

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.4.05

УДК 67.04

А.Н. Дьяченко, Р.И. Крайденко, Е.И. КурченкоНациональный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия**КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
В СИСТЕМЕ ФТОРСОЛЕЙ**

Цель данной статьи – анализ литературы по проблемам коррозионных стойкостей при различных температурах таких металлов и сплавов, как черная сталь, серые чугуны хромистая сталь, аустенитная хромоникелевая сталь, сплавы на железоникелевой основе, титановые сплавы, монель-металл, бронза, алюминий, латунь, медь, магний, свинец, никель, сплавы циркония, медь, серебро, золото, титан и платины, в таких средах, как фторид аммония, бифторид аммония, смесь фторида аммония и бифторида аммония, расплав LiF-NaF-KF , гексафторосиликат аммония, гексафторотитанат аммония и гептафтороцирконат аммония. Прописаны коррозионные стойкости металлов и сплавов в растворах вышеуказанных веществ. Данные о материалах формировались в таблицы со следующими характеристиками: марка металла или сплава, температура среды, массовая доля фторсоли в растворе, скорость коррозии (мм/год). Указано, для каких областей производств используются фторсоли и больше всего необходимы данные о коррозионной стойкости металлов и сплавов для обеспечения устойчивой работы оборудования в условиях высокой коррозионной активности среды. Кратко описаны механизмы, по которым разлагается фторид аммония на аммиак и бифторид аммония в результате нагрева и их коррозионное действие на поверхности металлов и сплавов. В некоторых случаях указано, какие легирующие добавки влияют на повышение или понижение коррозионной стойкости металлов и сплавов. В процессе анализа литературы установлено, какие показатели коррозионной стойкости металлов и сплавов и в какой среде отсутствуют в справочной литературе.

Ключевые слова: бифторид аммония, фторид аммония, металл, сплав, конструкционные материалы, коррозионная устойчивость, расплав LiF-NaF-KF , гексафторосиликат аммония, гексафторотитанат аммония, гептафтороцирконат аммония, фтористые соли.

A.N. D'yachenko, R.I. Kraydenko, E.I. Kurchenko

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

**CORROSION RESISTANCE OF STEELS AND ALLOYS
IN FLUORIDE SALTS**

Purpose of the article is corrosive resistances analysis of steels and alloys such as chrome iron, austenitic Ni-Cr stainless steel, iron-nickel alloy, monel metal, copper, aluminium, bronze, brass, lead, alloy Zr, titanium, argentum, aurum and platinum, in ammonium fluoride, ammonium befluoride, salt mixture ammonium fluoride and ammonium befluoride, alloy LiF-NaF-KF , ammonium hexafluosilicate, ammonium hexafluorotitanate and ammonium hexafluorozirconate. Corrosive resistances of steels and alloys in fluoride solution were pointed. Materials data tabulated with characteristics: alloy grade, fluid temperature, weight percentage of fluoride salt in solution, rate of corrosion (mm/year). Area of production were pointed, where corrosive resistances of steels and alloys data needs for performance

assurance of equipments in corrosion environment. Alloy additives were noted and also their influence on corrosion resistance increase or corrosion resistance decrease in some circumstances was mentioned. It is found which corrosive resistances of steels and alloys in differential medium are missed.

Keywords: ammonium befluoride, ammonium fluoride, steel, alloy, construction materials, corrosion resistance, alloy LiF-NaF-KF, ammonium hexafluosilicate, ammonium hexafluorotitanate, ammonium hexafluorozirconate, fluoride salt.

Введение

В настоящее время металлы и сплавы всё еще остаются основными конструкционными материалами при создании различных машин и аппаратов. Во многих случаях разрушение металлических конструкций является результатом взаимодействия материалов с окружающей средой [1].

В производстве редких металлов всё больше используются фториды аммония. Фторид аммония и особенно бифторид аммония обладают значительно большей реакционной способностью в сравнении с другими неорганическими фторидами. Чистые соли фторидов в среднем электрохимически нейтральны, но система в целом нестабильна и образует атомы фтора, которые агрессивны для большинства металлов [2]. Более того, бифторид аммония может превосходить по активности безводный фтороводород [3, 4].

В последнее время фторид бериллия получают термическим разложением фторобериллата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{BeF}_4$ бифторидом аммония. Данный процесс протекает в барабанно-вращающихся печах, которые изготавливаются из Ст3 (ГОСТ 380–2005, от 150 до 220 °С) [5]. При таких температурах углеродистая сталь коррозионно не стойка [4], что требует выбора более коррозионностойкого сплава для изготовления барабана печи. Также фторид аммония получают путем смешения глиноземсодержащего сырья с фтористыми соединениями аммония, что тоже требует особого внимания к коррозионной стойкости конструкционных материалов [6].

Коррозионная стойкость металлов и сплавов в среде фторида аммония

Фторид аммония в водных растворах при нагреве разлагается с выделением аммиака и образованием бифторида аммония NH_4HF_2 . Присутствие фторида аммония в растворах увеличивает коррозионную активность среды, но при взаимодействии с рядом металлов присутствие фторида способствует образованию защитных пленок [3].

Коррозионная стойкость металлов в растворах фтористых солей в значительной степени зависит от состава и свойств образующихся пленок продуктов коррозии [7].

Сплавы, легированные никелем, такие как 03ХН28МДТ, 06ХН28МДТ, монель-металл (табл. 1), наиболее стойки в растворах фторида аммония. Низкую стойкость в данных растворах проявляют сплавы, легированные цирконием, и хромистые стали.

Таблица 1

Стойкость металлов и сплавов в растворе фторида аммония [8–28]

| Сплавы и металлы | Температура раствора, °С | Массовая доля фторида аммония в растворе, % | Скорость коррозии, мм/год |
|---|--------------------------|---|---------------------------|
| Углеродистые стали | 20 | 9,5 | 0,2–1 |
| | | 35 | 0,1–0,4 |
| | 50 | 12 | 1–1,5 |
| | | 50 | 0,1 |
| Серые чугуны | 20 | 20 | 0,05–0,5 |
| Хромистая сталь Х13–Х25 | 50 | 50 | <0,2 |
| | 100 | 50 | Более 10 |
| Аустенинтная хромоникелевая сталь Х18Н10Т, Х17Н13М2Т | 20 | 20 | 1–1,3 |
| | До 90 | 50 | 0,3 |
| | 115 | 80 | 0,15 |
| Сплавы на железоникелевой основе 03ХН28МДТ, 06ХН28МДТ | 115 | Менее 80 | <0,1 |
| Монель-металл | До 75 | 10 | 0,05–0,5 |
| | До 100 | 20 | 0,05–0,5 |
| | До 100 | До 50 | <0,1 |
| | До 115 | 80 | <0,25 |
| ХН65МВ | До 75 | 20 | <0,05 |
| | До 100 | 40 | 0,05 |
| Медь | 50 | Менее 50 | <0,6 |
| | До 100 | 10 | 0,05–0,5 |
| Бронза | 20 | До 45 | 0,1–1 |

Окончание табл. 1

| Сплавы и металлы | Температура раствора, °С | Массовая доля фторида аммония в растворе, % | Скорость коррозии, мм/год |
|-----------------------|--------------------------|---|---------------------------|
| Латунь | До 50 | До 50 | <0,6 |
| | 20 | 10 | Более 10 |
| Алюминий | До 90 | Менее 50 | 0,5–0,6 |
| | До 115 | 80 | 0,5–0,6 |
| Сплавы АД1, Д16, АМг3 | 20–100 | 10–100 | Не более 0,1 |
| Сплав циркония Zr 702 | 28 | 20 | Более 10 |
| | 98 | 20 | Более 10 |
| Свинец | До 90 | 50 | <0,1 |
| | 115 | 80 | <0,2 |
| Титан | 50 | 50 | <0,1 |
| | 20 | 10 | 0,5–1,3 |
| Магний | 70 | 50 | 0,15 |
| | 90 | 50 | 0,5 |
| | 115 | 80 | 1 |
| Серебро | До 100 | До 50 | <0,1 |
| Золото | До 100 | До 60 | <0,05 |
| Платина | До 100 | До 60 | <0,05 |

Коррозионная стойкость металлов и сплавов в среде бифторида аммония

Кислые растворы фторидов более агрессивны, чем нейтральные и щелочные растворы. Кроме того, коррозионная активность растворов фторидов зависит от их концентрации. В разбавленных растворах фториды оказывают сильное агрессивное действие, но с увеличением концентрации коррозия замедляется [4]. Растворы бифторида аммония также способствуют формированию пассивных пленок на металлах [8].

Металлы и сплавы, которые показывают коррозионную стойкость в растворах бифторида аммония (табл. 2), легируют никелем, хромом с молибденом, сам никель также устойчив. Неустойчивыми в растворах бифторида аммония являются серые чугуны, углеродистые стали, медь, бронза, латунь и сплавы с титаном.

Таблица 2

Стойкость металлов и сплавов в растворе бифторида аммония [8–27]

| Сплавы и металлы | Температура раствора, °С | Массовая доля бифторида аммония в растворе, % | Скорость коррозии, мм/год |
|--|--------------------------|---|---------------------------|
| Углеродистые стали | До 50 | До 50 | 0,8 |
| | 90 | 80 | Более 10 |
| Серые чугуны | 20 | 12 | Более 10 |
| Сталь конструкционная криогенная Х18Н10Т | 20 | 20 | 0,1–0,5 |
| | До 50 | До 50 | 0,8 |
| | 90 | 80 | 0,8 |
| Сталь коррозионно-стойкая обыкновенная Х17Н13М2Т | 20 | 50 | 0,1–0,5 |
| | До 50 | До 50 | 0,15 |
| | 90 | 80 | 0,15 |
| Сталь высоколегированная ХН28МДТ | До 75 | 10 | 0,1–0,5 |
| | 100 | 50–85 | 0,1–0,5 |
| Никель | 20 | 10 | 0,05–0,5 |
| | 50 | 50 | <0,1 |
| | 90 | 80 | <0,1 |
| Монель-металл | До 90 | До 80 | <0,05 |
| | До 50 | 10 | 0,1–0,5 |
| Хромомолибденовый сплав Н70МФВ | До 100 | 10 | <0,05 |
| Хромомолибденовый сплав ХН65МВ | Свыше 100 | 50 | 0,05–0,5 |
| Медь | До 50 | 50 | 0,05 |
| | 20 | 12 | Более 10 |
| Бронза | 30 | 15 | Более 10 |
| Латунь | 30 | 15 | Более 10 |
| Сплав АМц | 50–90 | 10–80 | 0,5–1,7 |
| Сплав Д16 | 90 | 80 | 0,4 |
| Свинец | 90 | Менее 50 | <0,15 |
| | 20 | 10 | 0,05–0,5 |
| Сплав ВТ1 | 10–100 | 10–80 | Более 10 |
| Серебро | 10 | До 75 | <0,05 |
| Платина | 20 | 10 | <0,05 |

Коррозионная стойкость металлов и сплавов в смеси бифторида аммония и фторида аммония

При достижении температуры разложения фторид аммония образует бифторид аммония по реакции



В результате этого в растворе образуется смесь бифторида и фторида аммония при определенном соотношении $\text{NH}_4\text{F} : \text{NH}_4\text{HF}_2$. Данная смесь также оказывает различное коррозионное действие на металлы и сплавы в зависимости от соотношения и температуры [3].

В смеси растворов бифторида и фторида аммония большинство металлов не проявляют высокой стойкости (табл. 3) за исключением высоколегированной стали ХН28МДТ.

Таблица 3

Стойкость металлов и сплавов в смеси растворов бифторида аммония и фторида аммония [8–27]

| Сплавы и металлы | Температура раствора, °С | Массовая доля бифторида и фторида аммония в растворе, $\text{NH}_4\text{F} : \text{NH}_4\text{HF}_2$, % | Скорость коррозии, мм/год |
|--|--------------------------|--|---------------------------|
| Углеродистые стали | 80 | 26 : 19 | Более 10 |
| Сталь конструкционная криогенная Х18Н10Т | 80 | 26 : 19 | 0,4 |
| | 130 | 26 : 11 | Более 10 |
| Сталь коррозионно-стойкая обыкновенная Х17Н13М2Т | 80 | 26 : 19 | 0,4 |
| | 130 | 26 : 11 | Более 10 |
| Сталь высоколегированная ХН28МДТ | 80 | 26 : 19 | <0,15 |
| | 80 | (20–24) : (50–60) | 0,2 |
| Железоникелевый сплав 03ХН26МДБ | 80 | (20–24) : (50–60) | Более 10 |
| Железоникелевый сплав ХН30МДБ | 80 | (20–24) : (50–60) | Более 10 |
| Железоникелевый сплав 06ХН28МДТ | 100 | 25 : 54 | <0,4 |

Коррозионная стойкость металлов и сплавов в расплаве LiF–NaF–KF

Для электролизного производства с большой производительностью и с температурным диапазоном от 500 до 1500 °С используют смесь расплавов фторидных солей, так как они имеют низкое давление насыщенного пара при высоких температурах. Одним из описанных расплавов является эвтектика LiF–NaF–KF [28]. Коррозионная агрессивность данной смеси требует повышенного внимания к конструкционным материалам [29].

Комбинация Zn (3,2 %) и Ti (0,43 %) в сплаве Incoloy 800 НТ является основной причиной хорошей коррозионной стойкости данного сплава в эвтектике LiF–NaF–KF (табл. 4), присутствие Al (0,4 %) и Cr (23 %) в сплаве Inconel 625 понижает его коррозионную стойкость [30–32].

Таблица 4

Коррозионные стойкости аустенитных никель-хромовых жаропрочных сплавов в расплаве LiF–NaF–KF [31, 34–36]

| Сплавы и металлы | Температура расплава, °С | Скорость коррозии, мм/год |
|------------------|--------------------------|---------------------------|
| Inconel 600 | 550 | 6,2 |
| | 600 | 12,2 |
| | 650 | 25,9 |
| | 700 | 25,4 |
| | 750 | 15,8 |
| Inconel 617 | 550 | 10 |
| | 600 | 18,2 |
| | 650 | 22,7 |
| | 700 | 33,9 |
| | 750 | 97,9 |
| Inconel 625 | 550 | – |
| | 600 | 6,1 |
| | 650 | 5,0 |
| | 700 | 71,3 |
| | 750 | 127,6 |

Окончание табл. 4

| Сплавы и металлы | Температура расплава, °С | Скорость коррозии, мм/год |
|------------------|--------------------------|---------------------------|
| Incoloy 800 | 550 | 17,4 |
| | 600 | 30,1 |
| | 650 | 31,2 |
| | 700 | 45,4 |
| | 750 | 33,2 |
| Incoloy 800 HT | 550 | 1,79 |
| | 600 | 1,5 |
| | 650 | 1,45 |
| | 700 | 3,2 |
| | 750 | 4,73 |
| Hastelloy N | 550 | 4,79 (4,4) |
| | 600 | 20,72 (5,75) |
| | 650 | 18,5 (6,87) |
| | 700 | 26,55 |
| | 750 | 29,84 |
| Ni 220 | 550 | 0,97 |
| | 600 | 2,96 |
| | 650 | 1,53 |
| | 700 | – |
| | 750 | – |

**Коррозионная стойкость металлов и сплавов
в среде гексафторосиликата аммония, гексафторотитаната
аммония и гептафтороцирконата аммония**

Фторосиликаты аммония в водных растворах подвергаются гидролизу, в результате чего растворы имеют щелочной характер. Образующиеся при диссоциации фторосиликатов комплексные анионы $[\text{SiF}_6]^{2-}$ могут оказывать депассивирующее действие на металлы и сплавы в пассивном состоянии [34].

В среде раствора гексафторосиликата аммония устойчивым является хромомолибденовый сплав ХН65МВ, а также сплавы, легированные никелем (табл. 5). Минимальные показатели коррозионной стой-

кости в данном комплексном растворе имеют углеродистые стали, молибден, цирконий, никель и медь.

Таблица 5

Стойкости металлов и сплавов в растворе гексафторосиликата аммония [15, 21, 22, 35–37]

| Сплавы и металлы | Температура раствора, °С | Массовая доля гексафторосиликата аммония в растворе, % | Скорость коррозии, мм/год |
|--|--------------------------|--|---------------------------|
| Углеродистые стали | 20 | До 10 | Более 10 |
| Сталь конструкционная криогенная Х18Н10Т | 75 | До 10 | 0,05–0,5 |
| | 100 | До 20 | 0,6 |
| Сталь коррозионно-стойкая обыкновенная Х17Н13М2Т | 75 | До 10 | 0,05–0,5 |
| | 100 | До 20 | 0,6 |
| Железоникелевый сплав 03ХН26МДБ | 75 | До 10 | 0,5 |
| Железоникелевый сплав 06ХН28МДТ | 100 | 20 | <0,1 |
| | 300 | 20 | Более 10 |
| Никель | 20 | До 10 | 0,5 |
| | 100 | 20 | Более 10 |
| Монель-металл | 50 | До 10 | 0,05–0,5 |
| | 100 | До 20 | Более 10 |
| Хромомолибденовый сплав ХН65МВ | 20 | Менее 12 | <0,05 |
| Медь | 20 | 10 | 0,05–0,5 |
| | 100 | 20 | Более 10 |
| Алюминий | 50 | 20 | 0,05–0,5 |
| Свинец | 50 | 10–20 | 0,5 |
| Молибден | 100 | 20 | Более 10 |
| Цирконий | 20 | 10 | Более 10 |

В твердой соли гексафторосиликата аммония до 100 °С железоникелевые сплавы удовлетворительно стойки (0,05–0,5 мм/год). Также

медь и свинец имеют коррозионную стойкость 0,5 мм/год при 50 °С в твердой соли $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ [33].

Соль гексафторотитанат аммония не вызывает повышенной коррозии оборудования, так как не разлагается на комплексные анионы и проявляет стабильность в твердом виде и в виде раствора [37, 38].

При растворении гептафтороцирконата аммония $(\text{NH}_4)_3\text{ZrF}_7$ в воде образуются ионы ZrF_7^{-3} или, что более вероятно, $[\text{ZrF}_7 \text{H}_2\text{O}]^-$. Данные ионы гидролизуются с образованием фтороводорода HF в ZrF_4OH^- [39, 40], который, в свою очередь, является сильноагрессивной средой. Химическая активность фтороводорода сильно зависит от степени влажности, поскольку в определенных условиях на металлической поверхности может образовываться плавиковая кислота. Взаимодействие фтороводорода с защитными поверхностными оксидами металлов идет с самоускорением из-за образования воды [40].

Заключение

Приведенные данные по коррозионной стойкости металлов и сплавов позволяют сделать выводы:

– наиболее стойкие металлы и сплавы в среде растворов фторидов аммония это сплавы на основе никеля, такие как 03ХН28МДТ, 06ХН28МДТ, монель-металл;

– в расплаве LiF–NaF–KF наиболее коррозионно устойчивые сплавы – сплавы никеля, легированные цинком и титаном;

– в комплексном растворе гексафторосиликата аммония стойкость проявляют сплавы, легированные никелем, и хромомолибденовый сплав ХН65МВ;

– в источниках отсутствует данные о коррозионной стойкости металлов и сплавов в расплавах фторидов аммония.

Список литературы

1. Пахомов В.С., Шевченко А.А. Химическое сопротивление материалов и защита от коррозии. – М.: Химия: КолосС, 2009. – 444 с.
2. Holcomb D.E, Cetiner S.M. An overview of liquid fluoride-salt heat transport systems. – Oak Ridge National Laboratory, 2010.
3. Раков Э.Г. Фториды аммония. Итоги науки и техники. – М., 1988. – Т. 15. – 155 с. – (Сер.: Неорганическая химия).
4. Зотиков В.С. Коррозия и защита оборудования при производстве и применении в технике фторорганических продуктов. – СПб.: Теза, 1998. – 252 с.

5. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. *Металлургия редких металлов: учебник для вузов.* – 2-е изд. – М.: *Металлургия*, 1991. – 432 с.
6. Способ получения фтористого алюминия: пат. 431113 СССР: МПК C01F 7/50 / Морозов В.Г., Игнатъев О.С., Варлаков И.А., Коровин В.Н. – № 1429435; опубл. 05.06.1974. – 4 с.
7. Ульянин Е.А., Свистунова Т.В., Левин Ф.Л. *Высоколегированные коррозионностойкие сплавы.* – М.: *Металлургия*, 1987. – 88 с. – (Защита металлов от коррозии).
8. Исикава Н., Кобаяси Е. *Фтор. Химия и применение: учеб. пособие / пер. с яп. М.В. Поспелова; под ред. А.В. Фокина.* – М.: *Мир*, 1982. – 276 с.
9. Ахметов Н.С. *Общая и неорганическая химия.* – М.: *Высш. шк.*, 2001. – 743 с.
10. Кеше Г. *Коррозия металлов.* – М.: *Металлургия*, 1984. – 400 с.
11. Зотиков В.С., Семенюк Э.Я., Бахмутова Г.Б. *Поведение углеродистой стали в растворе фтористого аммония // Защита металлов.* – 1976. – Т. 12, № 4. – С. 420–424.
12. Зотиков В.С., Семенюк Э.Я. *Пассивность и коррозия металлов // Тр. ГИПХ.* – Л.: *Химия*, 1971. – Вып. 67. – С. 199–204.
13. *Коррозия новых металлических конструкционных материалов в бромистоводородной кислоте и ее парах / В.П. Долинкин, Г.Л. Шварц, Е.Ф. Кудрявцева, Л.С. Макарова, Н.Ф. Карулина // Химическое и нефтяное машиностроение.* – 1971. – № 10. – С. 17.
14. Антоновская Э.И., Тахтарова Л.В. *Коррозия металлических материалов в водных растворах фторидов при повышенных температурах // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева.* – 1961. – Т. 6, № 4. – С. 477–478.
15. *Corrosion data survey. Metals section.* – 5th ed. – Compiled by Hamner N.E. NASE. – Houston, 1974. – 283 p.
16. *Коррозия и защита химической аппаратуры / под ред. А.М. Сухотина.* – Л.: *Химия*, 1969. – Т. 1. – 554 с.
17. Туфанов Д.Г. *Коррозионная стойкость нержавеющей сталей, сплавов и чистых металлов.* – М.: *Металлургия*, 1990. – 320 с.
18. Воробьева Г.Я. *Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств.* – М.: *Химия*, 1975. – 816 с.
19. Ritter F. *Korrosionstabellen metallischer Werkstoffe.* – Wien: *Springer-Verlag*, 1958. – 290 s.
20. Фрайтаг Г. *Материалы для изготовления химической аппаратуры.* – М.; Л.: *Пиним техиздат*, 1934. – 70 с.
21. Дятлова В.Н. *Коррозионная стойкость металлов и сплавов: справочник.* – М.: *Машиностроение*, 1964. – 352 с.
22. Мигай Л.Л., Тарицына Т.А. *Коррозионная стойкость материалов в галогенах и их соединениях: справочник.* – М.: *Металлургия*, 1988. – 304 с.
23. *Коррозия: справочник / под ред. Л.Л. Шрайера.* – М.: *Металлургия*, 1981. – 627 с.
24. *Коррозия меди во фторидных растворах / В.С. Зотиков, Г.Б. Бахмутова, Н.А. Бочарова, Л.В. Смирнова, В.А. Герасимова, Э.Я. Семенюк // Химическая промышленность.* – 1985. – № 1. – С. 43–44.
25. *The effect of chromate in the corrosion behavior of duplex stainless steel in LiBr solutions / I. Uehara, I. Sakai, H. Ishikawa, E. Ishii, M. Nakane // Corrosion.* – 1986. – Vol. 42, № 8. – P. 492–498.

26. Материаловедение и защита от коррозии / Ю.С. Сидоркина, Г.П. Бекоева, Т.В. Манкевич, Н.Г. Зинченко // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1994. – № 1. – С. 26–27.
27. Жадан Т.А. Коррозионные свойства новой экономнолегированной нержавеющей стали OX18Г8Н2Т // Защита металлов. – 1968. – Т. 4, № 5. – С. 566–570.
28. Olson L.C. Materials corrosion in molten LiF-NaF-KF Eutectic salt. Ph. D. Thesis. – University of Wisconsin-Madison, 2009.
29. Williams D. Assessment of candidate molten salt coolants for the NGNP/NHI heat-transfer loop. – Oak Ridge National Laboratory, 2006.
30. Dulara I.V., Sinha R.K. High temperature reactors // Journal of Nuclear Materials. – 2008. – Vol. 383. – P. 183–188.
31. Corrosion aspects of compatible alloys in molten salt (FLiNaK) medium for Indian MSR program in the temperature range of 550-750 °C using electrochemical techniques / S.J. Keny, V.K. Gupta, A.G. Kumbhar, S. Rangarajan, M.R. Daitkar, N.K. Maheshwari, P.K. Vijayan, B.N. Jagatap // Thorium Energy Conference. – October 12-15. – Mumbai, 2015. – URL: <http://www.thoriumenergyworld.com> (дата обращения: 16.09.2017).
32. Misra A.K., Whittenberger J.D. // Proceedings of the 22nd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference cosponsored by the AIAA ANS ASME SAE IEEE ACS and AIChE. – 10-14 August. – Philadelphia, 1987. – AIAA-87-9226. – 14 p.
33. Пахомов В.С. Коррозия металлов и сплавов: справочник: в 2 кн. – М.: Наука и технологии, 2013. – Кн. 2. – 544 с.
34. Годнева М.М. Коррозия никелевого сплава во фторосолях // Журнал прикладной химии. – 1967. – Т. 40, № 8. – С. 1744–1749.
35. Годнева М.М., Гейзлер Э.С. Коррозия никелевого сплава в потоке фтора // Журнал прикладной химии. – 1967. – Т. 40, № 8. – С. 1750–1753.
36. Иголкин А.И. Применение циркония для аппаратурного оформления химических процессов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1999. – № 2. – С. 35–39.
37. Способ получения титана: пат. 015885 Южно-Африканская Республика: МПК С22В 34/12, С22С 1/00, С01Г 23/00 / Преториус Джерард; заявитель и патентообладатель «Перук Лимитед». – № 200901460, опубл. 30.04.2010. – 13 с.
38. Chemical Abstracts Service. – URL: <https://www.fluoridealert.org/wpcontent/pesticides/ammonium.fluosilicate.msds.htm> (дата обращения: 16.09.2017).
39. Production of alkali metal fluotitanates and fluozirconates: пат. 2653855 США: МПК С22В 34/12, С01Г 23/00 / Kaweski H.C.; заявитель и патентообладатель Kaweski Chemical Company; опубл. 29.09.1953. – 5 с.
40. Промышленные фторорганические продукты / В.Н. Максимов, В.Г. Барбанов, И.Л. Серушкин, В.С. Зотиков [и др.]. – Л.: Химия, 1966. – 544 с.

References

1. Pakhomov V.S., Shevchenko A.A. Khimicheskoe soprotivlenie materialov i zashchita ot korrozii [Chemical resistance of materials and protection against corrosion]. Moscow: Khimiia: KolosS, 2009. 444 p.

2. Holcomb D.E., Cetiner S.M. An overview of liquid fluoride-salt heat transport systems. Oak Ridge National Laboratory, 2010.
3. Rakov E.G. Ftoridy ammoniia. Itogi nauki i tekhniki [Ammonium fluorides. Results of science and technology]. Moscow, 1988, vol. 15. 155 p. (Ser.: Neorganicheskaia khimiia).
4. Zotikov V.S. Korroziia i zashchita oborudovaniia pri proizvodstve i primeneni i v tekhnike ftorganicheskikh produktov [Corrosion and protection of the equipment by production and application in the equipment of fluororganic products]. Saint-Petersburg. Teza, 1998. 252 p.
5. Zelikman A.N., Korshunov B.G. Metallurgii redkikh metallov: uchebnik dlia vuzov [Metallurgy of rare metals: the textbook for higher education institutions]. 2nd ed. Moscow. Metallurgii, 1991. 432 p.
6. Morozov V.G., Ignat'ev O.S., Varlakov I.A., Korovin V.N. Sposob polucheniia ftoristogo aliuminiia [Way of receiving fluoric aluminum]. Patent SSSR no. 1429435 (1974).
7. Ul'ianin E.A., Svistunova T.V., Levin F.L. Vysokolegirovannye korroziionnostoikie splavy [The high-alloyed corrosion-resistant alloys]. Moscow: Metallurgii, 1987, 88 p. (Zashchita metallov ot korrozii).
8. Isikava N., Kobaiasi E. Ftor. Khimiia i primenie: uchebnoe posobie [Chemistry and application]. Ed. A.V. Fokina. Moscow: Mir, 1982. 276 p.
9. Akhmetov N.S. Obshchaia i neorganicheskaia khimiia [General and inorganic chemistry]. Moscow: Vysshaia shkola, 2001. 743 p.
10. Keshe G. Korroziia metallov [Metallurgy]. Moscow, Metallurgii, 1984. 400 p.
11. Zotikov V.S., Semeniuk E.Ia., Bakhmutova G.B. Povedenie uglerodistoi stali v rastvore ftoristogo ammoniia [Behavior of carbonaceous steel in solution of fluoric ammonium]. *Zashchita metallov*, 1976, vol. 12, no. 4, pp. 420–424.
12. Zotikov V.S., Semeniuk E.Ia. Passivnost' i korroziia metallov [Passivity and corrosion of metals]. Trudy GIPKh. Leningrad, Khimiia, 1971, iss. 67, pp. 199–204.
13. Dolinkin V.P., Shvarts G.L., Kudriavtseva E.F., Makarova L.S., Karulina N.F. Korroziia novykh metallicheskh konstruktsionnykh materialov v bromistovodorodnoi kisloste i ee parakh [Corrosion of new metal constructional materials in hydrobromic acid and its couples]. *Khimicheskoe i nef'tianoe mashinostroenie*, 1971, no. 10, pp. 17.
14. Antonovskaia E.I., Takhtarova L.V. Korroziia metallicheskh materialov v vodnykh rastvorakh ftoridov pri povyshennykh temperaturakh [Corrosion of metal materials in water solutions of fluorides at the increased temperatures]. *Zhurnal Rossiiskogo khimicheskogo obshchestva imeni D. I. Mendeleeva*, 1961, vol. 6, no. 4, pp. 477–478.
15. Corrosion data survey. Metals section. 5nd ed. Compiled by N.E. Hamner NASE. Houston, 1974. 283 p.
16. Korroziia i zashchita khimicheskoi apparatury [Corrosion and protection of the chemical equipment]. Ed. A.M. Sukhotina. Leningrad, Khimiia, 1969, vol. 1. 554 p.
17. Tufanov D.G. Korroziionnaia stoikost' nerzhaveiushchikh stalei, splavov i chistykh metallov [Corrosion resistance of stainless steels, alloys and pure metals]. Moscow: Metallurgii, 1990. 320 p.

18. Vorob'eva G.Ia. Korrozionnaia stoikost' materialov v agressivnykh sredakh khimicheskikh proizvodstv [Corrosion resistance of materials in hostile environment of chemical productions]. Moscow: Khimiia, 1975. 816 p.
19. Ritter F. Korrosionstabellen metallischer Werkstoffe. Wien: Springer-Verlag, 1958. 290 p.
20. Freitag G. Materialy dlia izgotovleniia khimicheskoi apparatury [Materials for production of the chemical equipment]. Moscow, Leningrad, Pinim tekhnizdat, 1934. 70 p.
21. Diatlova V.N. Korrozionnaia stoikost' metallov i splavov: spravochnik [Corrosion resistance of metals and alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1964. 352 p.
22. Migai L.L., Taritsyna T.A. Korrozionnaia stoikost' materialov v galogenakh i ikh soedineniakh: spravochnik [Corrosion resistance of materials in halogens and their connections]. Moscow, Metallurgiiia, 1988. 304 p.
23. Korroziia: spravochnik [Corrosion]. Ed. L.L. Shraiera. Moscow, Metallurgiiia, 1981. 627 p.
24. Zotikov V.S., Bakhmutova G.B., Bocharova N.A., Smirnova L.V., Gerasimova V.A., Semeniuk E.Ia. Korroziia medi vo ftoridnykh rastvorakh [Corrosion of copper in fluoride solutions]. *Khimicheskaiia promyshlennost'*, 1985, no. 1, pp. 43–44.
25. Uehara I., Sakai I., Ishikawa N., Ishii E., Nakane M. The effect of chromate in the corrosion behavior of duplex stain-less steel in LiBr solutions. *Corrosion*, 1986, vol. 42, no. 8, pp. 492–498.
26. Sidorkina Iu.S., Bekoeva G.P., Mankevich T.V., Zinchenko N.G. Materialovedenie i zashchita ot korrozii [Materials science and protection against corrosion]. *Khimicheskoe i nefianoie mashinostroenie*, 1994, no. 1, pp. 26–27.
27. Zhadan T.A. Korroziionnye svoistva novoi ekonomnolegiro-vannoi nerzhaveiushchei stali OKh18G8N2T [Corrosion properties of new ekonomnolegirovanny OH18G8N2T stainless steel]. *Zashchita metallov*, 1968, vol. 4, no. 5, pp. 566–570.
28. Olson L.C. Materials corrosion in molten LiF-NaF-KF Eutectic salt. Ph. D. Thesis. University of Wisconsin-Madison, 2009.
29. Williams D. Assessment of candidate molten salt coolants for the NGNP/NHI heat-transfer loop. Oak Ridge National Laboratory, 2006.
30. Dulera I.V., Sinha R.K. High temperature reactors. *Journal of Nuclear Materials*, 2008, vol. 383, pp. 183–188.
31. Keny S.J., Gupta V.K., Kumbhar A.G., Rangarajan S., Daitkar M.R., Maheshwari N.K., Vijayan P.K., Jagatap B.N. Corrosion aspects of compatible alloys in molten salt (FLiNaK) medium for Indian MSR program in the temperature range of 550–750 °C using electrochemical techniques. Thorium Energy Conference. October 12–15. Mumbai, 2015, available at: <http://www.thoriumenergyworld.com> (accessed 16 september 2017).
32. Misra A.K., Whittenberger J.D. Proceedings of the 22nd Inter-society Energy Conversion Engineering Conference cosponsored by the AIAA ANS ASME SAE IEEE ACS and AIChE. 10–14 August. Phila-delphia, 1987. AIAA-87-9226, 14 p.
33. Pakhomov V.S. Korroziia metallov i splavov: spravochnik [Corrosion of metals and alloys]. Moscow, Nauka i tekhnologii, 2013, kniga 2, 544 p.
34. Godneva M.M. Korroziia nikelovogo splava vo ftorsoliakh [Corrosion of nickel alloy in the ftorsolyakh]. *Zhurnal prikladnoi khimii*, 1967, vol. 40, no. 8, pp. 1744–1749.

35. Godneva M.M., Geizler E.S. Korroziia nikelovogo splava v potoke ftora [Corrosion of nickel alloy in a fluorine stream]. *Zhurnal prikladnoi khimii*, 1967, vol. 40, no. 8, pp. 1750–1753.

36. Igolkin A.I. Primenenie tsirkoniia dlia apparaturnogo oformleniia khimicheskikh protsessov [Use of zirconium for hardware registration of chemical processes]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 1999, no. 2, pp. 35–39.

37. Sposob polucheniia titana [Way of receiving titan]. Patent 015885 Iuzhno-Afrikanskaia Respublika no. 200901460 (2010).

38. Chemical Abstracts Service, available at: <https://www.fluoridealert.org/wpcontent/pesticides/ammonium.fluosilicate.msds.htm> (accessed 16 September 2017).

39. Production of alkali metal fluotitanates and fluozirconates. Patent no. 2653855 SShA, zaiavitel' i patentoobladatel' Kaweckii Chemical Company; (1953).

40. Maksimov V.N., Barabanov V.G., Serushkin I.L., Zotikov V.S. et al. Promyshlennye ftororganicheskie produkty [Industrial fluororganic products]. Leningrad, Khimiia, 1966. 544 p.

Получено 12.07.2017

Об авторах

Дьяченко Александр Николаевич (Томск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры химической технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, проректор по научной работе и инновациям; e-mail: atom@tpu.ru.

Крайденко Роман Иванович (Томск, Россия) – доктор химических наук, заведующий кафедрой химической технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета; e-mail: kraydenko@tpu.ru.

Курченко Евгений Игоревич (Томск, Россия) – аспирант кафедры химической технологии редких, рассеянных и радиоактивных элементов Физико-технического института Национального исследовательского Томского политехнического университета; e-mail: evgenii@tpu.ru.

About the authors

Aleksandr N. D'yachenko (Tomsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Technology Rare, Trace and Radioactive Elements, Physicotechnical Institute, Vice-Rector for Research and Innovations, National Research Tomsk Polytechnic University; e-mail: atom@tpu.ru.

Roman I. Kraydenko (Tomsk, Russian Federation) – Doctor of Chemical Sciences, Head of Department of Chemical Technology Rare, Trace and Radioactive Elements, Physicotechnical Institute, National Research Tomsk Polytechnic University; e-mail: kraydenko@tpu.ru.

Evgeniy I. Kurchenko (Tomsk, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Chemical Technology Rare, Trace and Radioactive Elements, Physicotechnical Institute, National Research Tomsk Polytechnic University; e-mail: evgenii@tpu.ru.