

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ТЕТРАХЛОРФЕРАТОВ ЧЕТВЕРТИЧНОГО АММОНИЯ И ПИРИДИНИЯ

© 2022 г. О. Е. Журавлев^{a,*}, Л. И. Ворончихина^a, Д. В. Горбунова^{a,b}

^a Тверской государственной университет, Садовый пер. 35, Тверь, 170002 Россия

^b Тверской государственной медицинский университет, Тверь, 170100 Россия

*e-mail: pifchem@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 декабря 2021 г.

После доработки 25 января 2022 г.

Принято к печати 28 января 2022 г.

Синтезированы новые ионные жидкости – тетрахлорферраты(III) четвертичного аммония, $[(\text{CH}_3)_2\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})\text{R}]\text{FeCl}_4$, и пиридиния, $[\text{C}_5\text{H}_5\text{NR}]\text{FeCl}_4$ [R = $\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$, C_4H_9 , $(\text{CH}_2)_3\text{CN}$, $\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$, $\text{C}_{10}\text{H}_{21}$]. Изучена их термическая стабильность на воздухе в интервале 25–600°C, проведено сравнение термической стабильности тетрахлорферратов четвертичного аммония и 1-алкилпиридиния, предложен механизм термической деструкции.

Ключевые слова: магнитные ионные жидкости, тетрахлорферраты, термическая стабильность, четвертичные соли

DOI: 10.31857/S0044460X22030027

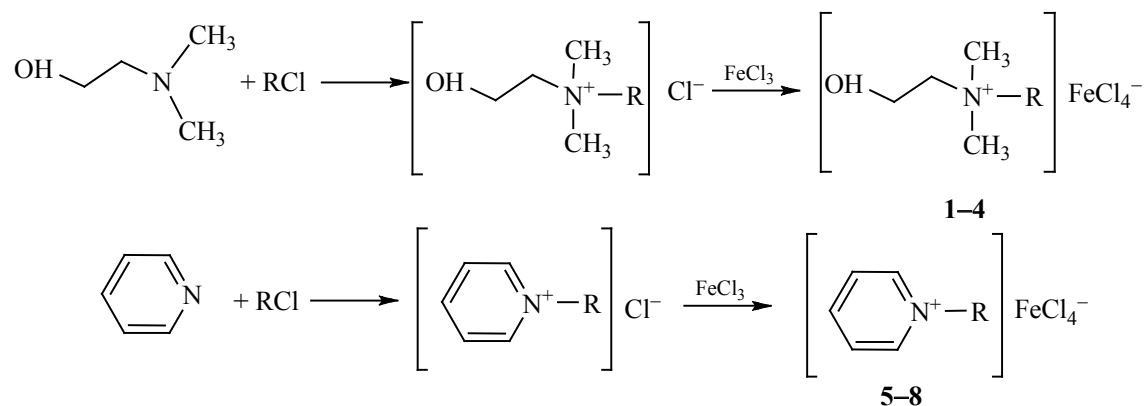
За последние годы ионные жидкости интенсивно изучаются, опубликовано много статей, обзоров, монографий [1–5]. Возможность замены токсичных взрывоопасных и агрессивных реакционных сред на альтернативные неортодоксальные или ионные жидкости в какой-то мере позволяет решать экологические проблемы, связанные с пагубным влиянием традиционных растворителей на окружающую природу. Кроме того, ионные жидкости – уникальные объекты для использования в катализе, органическом синтезе и в других областях [6].

Ионные жидкости – это соли, состоящие из ионов, жидкие при комнатной или близкой к ней температуре. По существу, это аналог расплава солей. В состав ионной жидкости входит объемный органический катион и анионы: Cl^- , Br^- , I^- , ClO_4^- , NO_3^- , BF_4^- , PF_6^- , SbF_6^- , RSO_3^- , Al_2Cl_7^- и др. Природа аниона оказывает большое влияние на свойства

ионных жидкостей: на температуру плавления, вязкость, плотность и др. Если в качестве аниона в ионной жидкости выступают галогениды переходных металлов (Fe, Co, Ni, Mn и др.), обладающих парамагнитными свойствами, то такие ионные жидкости обладают магнитной восприимчивостью [7]. Подобные соединения выделены в группу магнитных ионных жидкостей, и на примере 1-бутил-3-метилимидазолийтетрахлорферрата была изучена их магнитная восприимчивость ($40.6 \times 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$). Исследованные жидкости парамагнитны благодаря присутствию высокоспинового устойчивого тетраэдрического аниона FeCl_4^- .

В зависимости от природы катиона и аниона ионные жидкости обладают различной термической стабильностью. Ионные жидкости разлагаются при воздействии на них других веществ, например, воды, которая легко разлагает ионные жидкости, включающие AlCl_3 , а также при дей-

Схема 1.



ствии на них высоких температур. В последнем случае температура разложения зависит от природы органического катиона.

Большинство опубликованных исследований свойств ионных жидкостей (спектральных, магнитных, термических, электрохимических) относятся к солям, состоящим из аниона тетрахлорферрата(III) и катиона 1,3-диалкилимидазолия [8–12]; в меньшей степени представлены исследования солей Fe(III) с алифатическими и арильными катионами. В особенности это касается исследований термической стабильности тетрахлорферратных комплексов. В последние годы проводятся исследования термической стабильности комплексов с переходными металлами [13, 14], поскольку знание термической стабильности ионных жидкостей необходимо для определения температурного интервала применения этих соединений в различных химических процессах.

Нами изучена термическая стабильность магнитных ионных жидкостей – тетрахлорферратов четвертичных солей аммония и пиридиния. Исследованные соединения различаются природой гидрофильного центра и структурой гидрофобного заместителя при атоме N, но имеют один и тот же противоион – тетрахлорферрат-анион. Учитывая различную природу гидрофильного центра четвертичных солей, можно предполагать различный механизм их термического разложения, а также различную термическую стабильность.

Соединения 1–8 были получены методом, описанным ранее (схема 1) [15].

Полученные соединения – кристаллические либо аморфные вещества, их состав и строение подтверждены данными элементного анализа и ИК спектроскопии. Все синтезированные соединения гидрофильны, легко растворяются в полярных органических растворителях и воде, однако в воде соединения гидролизуются из-за неустойчивости аниона FeCl_4^- .

Спектры в видимой области указывают на наличие в составе всех ионных жидкостей аниона FeCl_4^- . В спектрах тетрахлорферратов проявляются три характеристические полосы иона FeCl_4^- при 534, 619, 688 нм, что согласуется с литературными данными [7]. Данные полосы поглощения отсутствуют в спектре хлорида железа(III).

Термодеструкция тетрахлорферратов четвертичных солей аммония и пиридиния представляет собой сложный стадийный процесс, на что указывают перегибы на кривых потери массы (рис. 1, 2). Температуры начала разложения ($T_{\text{разл}}$) исследуемых ионных жидкостей определяли графически путем нахождения точки пересечения касательных к базовой линии и прямолинейному участку кривой зависимости массы от температуры. Тетрахлорферраты четвертичных солей аммония 1–4 стабильны до 300°C и постепенно разлагаются в интервале 300–600°C. Во всех случаях образует-

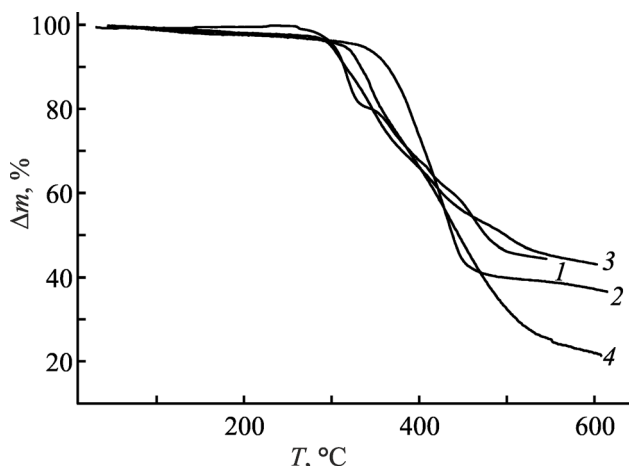


Рис. 1. Термическая стабильность тетрахлорферратов четвертичных солей аммония 1–4 (1–4).

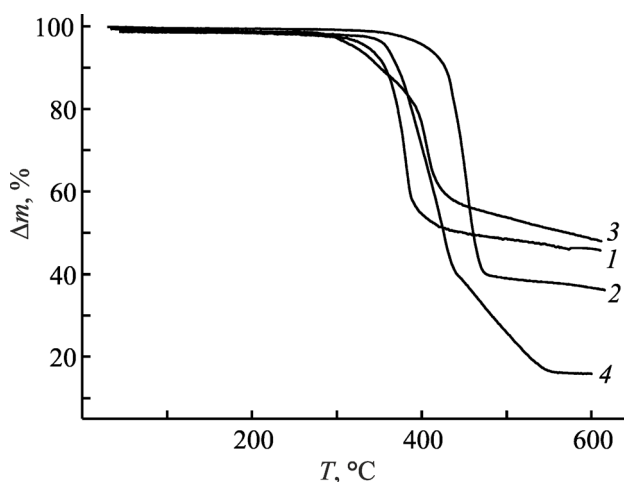


Рис. 2. Термическая стабильность тетрахлорферратов четвертичных солей пиридиния 5–8 (1–4).

ся неразложившийся остаток, состав и структура которого проанализирована нами ранее [16].

Из анализа полученных результатов термической деструкции тетрахлорферратов четвертичных солей аммония (рис. 1, табл. 1) следует, что наибольшей термической стабильностью обладает бутил(β-гидроксиэтил)диметиламмоний-тетрахлорферрат 2, который устойчив до 360°C и разлагается в одну стадию. Соединения 1 и 3 (рис. 1) демонстрируют сложный стадийный процесс термической деструкции, что, вероятнее всего, связано с образованием аллильных и 3-цианопропильных фрагментов, которые при высоких температурах полимеризуются. Для остальных

тетрахлорферратов четвертичного аммония температуры начала разложения лежат в интервале 294–321°C.

По сравнению с тетрахлорферратами четвертичного аммония тетрахлорферраты пиридиния 5–8 обладают большей термической стабильностью. Температуры их термического разложения находятся в интервале 310–425°C. Наибольшей термической стабильностью обладает тетрахлорферрат 1-бутилпиридиния, для которого наблюдается только 5% потери массы при 400°C.

Для установления влияния тетрахлорферрат-аниона на термическую стабильность исследованных соединений нами была изучена термическая

Таблица 1. Термическая стабильность тетрахлорферратов четвертичных солей аммония 1–4 и пиридиния 5–8

№	R	$T_{\text{разл}}^{\text{a}}$, °C	T_{50}^{b} , °C	Потеря массы, %					Остаток, %
				100	200	300	400	500	
1	CH ₂ CH=CH ₂	295	480	0	0	4	31	55	45
2	C ₄ H ₉	361	437	0	0	4	24	61	37
3	(CH ₂) ₃ CN	294	500	0	0	4	35	50	43
4	CH ₂ C ₆ H ₅	321	444	0	0	4	33	69	22
5	CH ₂ CH=CH ₂	353	455	0	0	2	45	52	43
6	C ₄ H ₉	425	460	0	0	0	5	60	36
7	(CH ₂) ₃ CN	310	557	0	0	3	24	47	48
8	C ₁₀ H ₂₁	365	425	0	0	3	30	74	16

^a $T_{\text{разл}}$ – температура начала термического разложения.

^b T_{50} – температура, соответствующая 50%-ной потере массы.

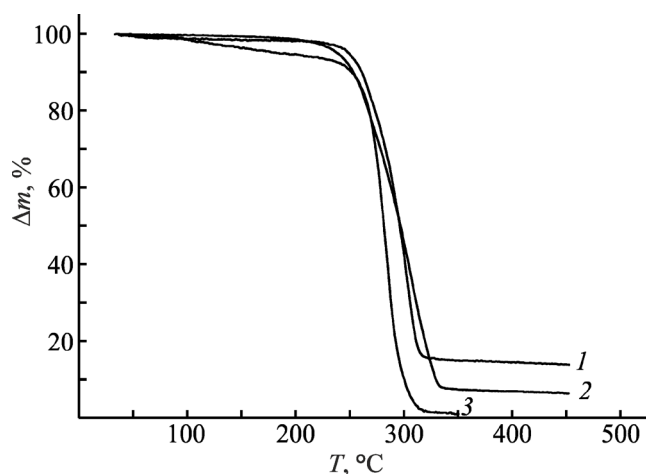


Рис. 3. Термическая стабильность хлоридов алкил(β-гидроксиэтил)диметиламмония. Alk = C₄H₉ (1), CH₂Ph (2), (CH₂)₃CN (3).

стабильность хлоридов четвертичного аммония (рис. 3), использованных в качестве прекурсоров при получении тетрахлорферратов 1–4. В отличие от тетрахлорферратов хлориды четвертичного аммония разлагаются в одну стадию с большей скоростью в интервале 250–330°C с практически полной потерей массы.

Анализируя наблюдаемые различия в термической стабильности изученных соединений, необходимо отметить, что первая стадия разложения органического катиона приводит к разрыву связи

R–N⁺, затем возможны два реакционных пути: β-элиминирование (E_β) и нуклеофильное замещение при четвертичном азоте (S_N) (схема 2) [17].

β-Элиминирование (распад по Гофману) зависит от основности аниона, от стерического окружения иона аммония и от температуры. Термическое разложение четвертичных солей аммония с алкильными заместителями протекает по бимолекулярному механизму E₂ и сопровождается образованием олефина (при условии, что есть хотя бы один углеродный атом в β-положении к электрофильному центру), третичного амина и галогеноводорода; в противном случае разложение может протекать в направлении, обратном синтезу [17].

Индуктивные эффекты группы R₄N⁺ повышают способность β-водородных атомов к протонизации и облегчают образование терминальных алкенов. Можно предположить, что термический распад как тетрахлорферратов, так и хлоридов аммония протекает именно по механизму внутримолекулярного β-элиминирования, включающему образование 5-центрового переходного состояния. В этом случае анион (A) выполняет функцию нуклеофила, и одновременно происходит гетеролитический разрыв связей C_β–H и C_α–N⁺, имеющей место в реакциях нуклеофильного β-элиминирования (схема 3).

Расщепление по данному механизму более вероятно, поскольку этильная группа (и замещенный

Схема 2.

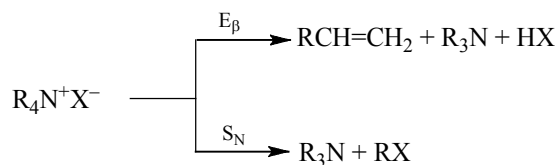


Схема 3.

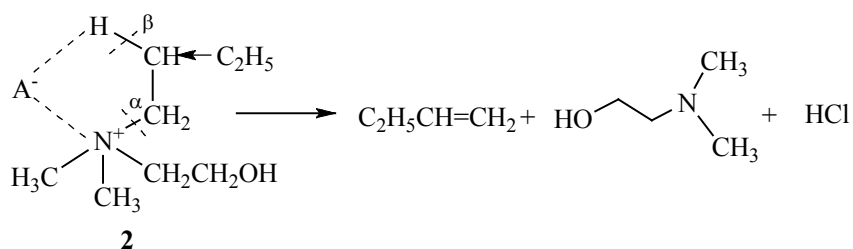
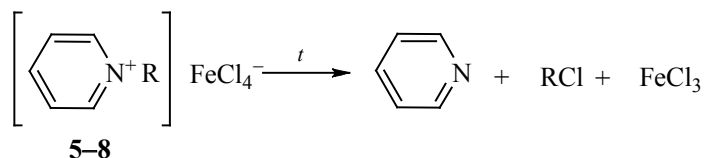


Схема 4.



этил) имеют преимущество перед другими заместителями [14]. Если в структуре катиона в цепи с атомом β-Н есть акцепторные заместители (C₆H₅, CN и др.), обладающие –I-эффектом, они способствуют β-протонированию и облегчают разложение органического катиона; в случае донорных заместителей (например, алкилы) отщепление β-Н атома затрудняется. Такая зависимость хорошо прослеживается при анализе термической стабильности соединений **2** и **6** с бутильным заместителем при атоме азота, проявляющем +I-эффект. В результате внутримолекулярное β-элиминирование при термическом разложении затруднено и наблюдается повышенная термическая стабильность.

Тетрахлорферраты **1–4** проявляют более высокую термическую стабильность по сравнению с хлоридами четвертичного аммония. Известно, что термическая стабильность солей четвертичного аммония зависит от природы аниона [18]. Анионы ClO₄⁻, H₃CC₆H₄SO₃⁻, NO₃⁻ повышают термостойкость соединений в силу того, что они с трудом принимают трехмерную структуру и затрудняют реализацию переходного состояния из-за большего объема аниона (FeCl₄⁻ 3.7, ClO₄⁻ 0.236, NO₃⁻ 0.189 Å) по сравнению с Cl⁻ (0.181 Å). Температуры разложения зависят и от координирующей природы аниона, причем для высоко координирующих галогенид-ионов они значительно ниже. Температуры разложения наиболее высоки для плохо координирующего тетрахлорферрат-аниона [19]. Аналогичные результаты получены при исследовании термической стабильности тетрафторборатов четвертичного аммония [20]. Замедление термического разложения тетрахлорферратов четвертичного аммония происходит вследствие дестабилизации переходного состояния за счет стерического отталкивания объемного аниона.

При термическом разложении тетрахлорферратов 1-алкилпиридиния **5–8** разрыв связи в катионе протекает в направлении, обратном синтезу, при этом образуется амин и галогеноалкан (схема 4) [20].

Разрушение органического катиона приводит к уменьшению силы электростатического взаимодействия с анионом. Так как существование тетрахлорферрат-аниона как самостоятельной частицы невозможно, происходит отщепление Cl⁻ и образование стабильных алкилхлоридов, амина и FeCl₃.

Причиной повышения термической стабильности ионных жидкостей следует считать сильные кулоновские взаимодействия катиона и тетрахлорферрат-аниона по сравнению с анионом Cl⁻. Прочность связей C–N⁺ в катионе повышается вследствие увеличения электрофильности четвертичного азота из-за электростатического взаимодействия. Обычно разрыв связи в катионе происходит под влиянием противоиона.

Термическая стабильность синтезированных ионных жидкостей с одним и тем же анионом определяется природой катиона и природой амина, лежащего в основе катиона. Ионные жидкости – это не просто ионная пара, а структура, в которой кроме кулоновских взаимодействий возможно образование водородных связей с протонированными атомами в структуре катиона. Это упрочняет соединение и обуславливает определенный порядок расположения и чередования катионов и анионов в кристаллической решетке соли [21, 22].

Для изучения влияния природы катиона на термическую устойчивость синтезированных ионных жидкостей в качестве эталона исследована кислота HFeCl₄·2H₂O. При исследовании термической стабильности этого соединения в тех же условиях найдено, что она устойчива до 80°C, затем в ин-

тервале 80–180°C (T_{\max} 165°C) происходит быстрая потеря массы в одну стадию. Такая низкая термическая стабильность вызвана заменой органического катиона на протон, что указывает на определяющее влияние катиона на термическую стабильность тетрахлорферратов.

Таким образом, исследованные тетрахлоферраты четвертичного аммония и 1-алкилпиридиния термически более устойчивы, чем соответствующие хлориды четвертичного аммония. Термическая стабильность тетрахлорферратов N-алкилпиридиния выше, чем термостабильность тетрахлорферратов аммония с одинаковыми заместителями при азоте. Предложен механизм термической деструкции тетрахлорферратов(III) четвертичного аммония как β -E₂-элиминирование (по Гофману). Термическое разложение тетрахлорферратов 1-алкилпиридиния протекает по схеме деалкилирования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ИК спектры записаны на спектрометре ALPHA в тонкой пленке между стеклами КВг для жидких соединений и в таблетках КВг – для твердых. Спектры в видимой области записаны на спектрофотометре СФ-56, растворитель – ацетон, длина оптического пути – 1 см. Данные дифференциальной термогравиметрии получены на приборе Netzsch STA 449 F3 температурный интервал 25–600°C, скорость нагрева – 5 град/мин в токе воздуха, скорость подачи воздуха – 20 мл/мин. Точность измерения температуры $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Элементный анализ проводили на автоматическом приборе Hewlett-Packard 185, С, Н, N-Analyser.

N-(2-Гидроксиэтил)-N,N-диметил-N-(пропен-2-ил)аммонийтетрахлорферрат(III) (1). Выход 85%. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3543 (ОН), 2967, 2892 (C–H_{Alk}), 1695 (C=C), 1211 (C–ОН). Найдено, %: С 25.4; Н 4.7; N 4.1. C₇H₁₆Cl₄FeNO. Вычислено, %: С 25.6; Н 4.9; N 4.3.

N-Бутил-N-(2-гидроксиэтил)-N,N-диметиламмонийтетрахлорферрат(III) (2). Выход 85%, т. пл. 30–32°C. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3350 (О–Н), 2940, 2890 (C–H_{Alk}), 1465 [δ (О–Н)], 1431 [δ (C–H_{Alk})], 1210 (C–О). Найдено, %: С 27.8; Н 6.0; N 6.9. C₈H₂₀Cl₄FeNO. Вычислено, %: С 27.9; Н 5.8; N 7.0.

N-(2-Гидроксиэтил)-N,N-диметил-N-(3-цианопропил)аммонийтетрахлорферрат(III) (3). Выход 91%. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3480 (О–Н), 2962, 2900 (C–H_{Alk}), 2252 (C \equiv N), 1479 [δ (О–Н)], 1427 [δ (C–H_{Alk})], 1190 (C–О), 1081 (C–N). Найдено, %: С 26.9; Н 5.0; N 7.7. C₈H₁₇Cl₄FeNO. Вычислено, %: С 27.0; Н 4.8; N 7.9.

N-Бензил-N-(2-гидроксиэтил)-N,N-диметиламмонийтетрахлорферрат(III) (4). Выход 88%. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3468 (О–Н), 3121, 3092, 3081 (C–H_{Ar}), 2963, 2877 (C–H_{Alk}), 1659 (C=C), 1617, 1546, 1490 (C–C_{Ar}), 763, 685 [δ (C–H_{Alk})]. Найдено, %: С 34.8; Н 4.6; N 3.6. C₁₁H₁₈Cl₄FeNO. Вычислено, %: С 35.0; Н 4.8; N 3.7.

1-Аллилпиридинийтетрахлорферрат(III) (5). Выход 90%. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3251, 3144, 3081 (C–H_{Ar}), 2950, 2844 (C–H_{Alk}), 1652 (C=C), 1637, 1516, 1491 (C–C_{Ar}), 758, 685 [δ (C–H_{Alk})]. Найдено, %: С 30.1; Н 3.1; N 4.2. C₈H₁₀Cl₄FeN. Вычислено, %: С 30.2; Н 3.2; N 4.4.

1-Бутилпиридинийтетрахлорферрат(III) (6). Выход 94%. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3241, 3145, 3089 (C–H_{Ar}), 2956, 2842 (C–H_{Alk}), 1640, 1510, 1491 (C–C_{Ar}), 743, 690 [δ (C–H_{Alk})]. Найдено, %: С 32.6; Н 3.1; N 4.0. C₉H₁₄Cl₄FeN. Вычислено, %: С 32.4; Н 4.2; N 4.2.

1-(3-Цианопропил)пиридинийтетрахлорферрат(III) (7). Выход 88%. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3247, 3133, 3079 (C–H_{Ar}), 2955, 2848 (C–H_{Alk}), 2252 (C \equiv N), 1631, 1512, 1480 (C–C_{Ar}), 751, 688 [δ (C–H_{Alk})]. Найдено, %: С 31.6; Н 3.3; N 8.2. C₉H₁₁Cl₄FeN₂. Вычислено, %: С 31.4; Н 3.2; N 8.1.

1-Децилпиридинийтетрахлорферрат(III) (8). Выход 92%. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 3055 (C–H_{Ar}), 2978, 2843 (C–H_{Alk}), 1648, 1515, 1458 (C–C_{Ar}), 765, 680 [δ (C–H_{Alk})]. Найдено, %: С 43.0; Н 6.4; N 3.3. C₁₅H₂₆Cl₄FeN. Вычислено, %: С 43.1; Н 6.2; N 3.4.

Гидротетрахлорферрата(III) дигидрат. Растворяли 0.1 моль FeCl₃·6H₂O в 30 мл 36%-ной HCl. Продукт реакции экстрагировали диэтиловым эфиром и после удаления растворителя получали янтарно-желтые кристаллы, т. пл. 46°C.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Журавлев Олег Евгеньевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6187-4287>

Ворончихина Людмила Ивановна, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-6026-6631>

Горбунова Дарья Валерьевна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8622-3808>

БЛАГОДАРНОСТЬ

Термический анализ проводили в Отделении физико-химического анализа Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vidal L., Riekkola M.-L., Canals A. // *Anal. Chim. Acta*. 2012. Vol. 715. P. 19. doi 10.1016/j.aca.2011.11.050
2. Hallett J.P., Welton T. // *Chem. Rev.* 2011. Vol. 111. P. 3508. doi 10.1021/cr1003248
3. Pandey G.P., Hashmi S. A., Agrawal R.C. // *J. Phys. (D)*. 2008 Vol. 41. P. 55409. doi 10.1088/0022-3727/41/5/055409
4. Welton T., Wasserscheid P. *Ionic liquids in synthesis*. Weinheim: Wiley-VCH, 2002.
5. Wasserscheid P., Kelm W. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2000. Vol. 39. N 21. P. 3772. doi 10.1002/1521-3773(20001103)39:21<3772::AID-ANIE3772>3.0.CO;2-5
6. Sheldon R. // *Chem. Commun.* 2001. P. 2399. doi 10.1039/B107270F
7. Hayashi S., Hamaguchi H. // *Chem. Lett.* 2004. Vol. 33. P. 1590. doi 10.1002/chin.200518200
8. Kogelnig D., Stojanovic A., Kammer F., Terzieff P., Galanski M., Jirsa F., Krachler R., Hofmann T., Kerppler B.K. // *Inorg. Chem. Commun.* 2010. Vol. 13. P. 1485. doi 10.1016/j.inoche.2010.08.023
9. Pedro I. de, Rojas D.P., Blanco J.A., Fernández J.R. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2011. Vol. 323. P. 1254. doi 10.1016/j.jmmm.2010.11.016
10. Cruz M.M., Borges R.P., Godinho M., Marques C.S., Langa E., Ribeiro A.P.C., Lourenço M.J.V., Santos F.J.V., Nieto de Castro C.A., Macatrão M., Tariq M., Esperança J.M.S.S., Canongia J.N.L., Afonso C.A.M., Rebelo L.P.N. // *Fluid Phase Equilib.* 2013. Vol. 350. P. 43. doi 10.1016/j.fluid.2013.03.001
11. Godajdar M.B., Kiasat A.R., Hashemi M.M. // *J. Mol. Liq.* 2013. Vol. 183. P. 14. doi 10.1016/j.molliq.2013.03.022
12. Muraoka J., Kamiya N., Ito Y. // *J. Mol. Liq.* 2013. Vol. 182. P. 76. doi 10.1016/j.molliq.2013.03.012
13. Ferenc W., Walkow-Dziewulska A., Sadowski P. // *J. Therm. Anal. Cal.* 2005. Vol. 82. P. 365. doi 10.1007/s10973-005-0904-2
14. Wyraykowski D., Maniecki T., Garda M., Styezen E., Warnke Z. // *J. Therm. Anal. Cal.* 2007. Vol. 90. P. 893. doi 10.1007/s1097300682079
15. Журавлев О.Е., Веролайнен Н.В., Ворончихина Л.И. // *ЖПХ*. 2011. Т. 84. Вып. 7. С. 1086; Zhuravlev O.E., Verolainen, N.V., Voronchikhina, L.I. // *Russ. J. Appl. Chem.* 2011. Vol. 84. N 7. P. 1158. doi 10.1134/S1070427211070068
16. Журавлев О.Е., Карпенков А.Ю., Карпенков Д.Ю., Ворончихина Л.И. // *ЖОХ*. 2015. Т. 85. Вып. 4. С. 641; Zhuravlev O.E., Karpenkov A.Yu., Karpenkov D.Yu., Voronchikhina L.I. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2015. Vol. 85. N 4. P. 882. doi 10.1134/S1070363215040209
17. Ингольд К. Теоретические основы органических реакций. М.: Мир, 1973. С. 538; Ingold C.K. *Structure and mechanism in organic chemistry*. Ithaca; London: Cornell University Press, 1969, P. 538.
18. Huang Y., Chen Z., Crosthwaite J.M., Sudhir N.V.K., Aki Brennecke J.F. // *J. Chem. Thermodynamics*. 2021. Vol. 16. P. 106560. doi 10.1016/j.jct.2021.106560
19. Рыжков Ю.А., Ворончихина Л.И. // *ЖПХ*. 1994. Т. 67. Вып. 5. С. 821.
20. Crosthwaite J.M., Muldoon M.J., Dixon J.K., Anderson J.L., Brennecke J.F. // *J. Chem. Thermodynamics*. 2005. Vol. 37. P. 559. doi 10.1016/j.jct.2005.03.013
21. Zhang Y., He H., Zhang S., Fan M. // *ACS Omega*. 2018. Vol. 3. P. 1823. doi 10.1021/acsomega.7b01805
22. Puttick S., Davis A.L., Butler K., Lambert L., El harfi J., Irvine D.J., Whittaker A.K., Thurecht K.J., Licence P. // *Chem. Sci.* 2011. Vol. 2. P. 1810. doi 10.1039/C1SC00207D

Comparative Characteristics of Thermal Stability of Quaternary Ammonium and Pyridinium Tetrachloroferrates

O. E. Zhuravlev^{a,*}, L. I. Voronchikhina^a, and D. V. Gorbunova^{a,b}

^a Tver State University, Tver, 170002 Russia

^b Tver State Medical University, Tver, 170100 Russia

*e-mail: pifchem@mail.ru

Received December 14, 2021; revised January 25, 2022; accepted January 28, 2022

New ionic liquids quaternary ammonium $[(\text{CH}_3)_2\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})\text{R}]\text{FeCl}_4$ and pyridinium $[\text{C}_5\text{H}_5\text{NR}]\text{FeCl}_4$ [$\text{R} = \text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$, C_4H_9 , $(\text{CH}_2)_3\text{CN}$, $\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5$, $\text{C}_{10}\text{H}_{21}$] were synthesized. Their thermal stability was studied in air in the range of 25–600°C. The thermal stability of quaternary ammonium and 1-alkylpyridinium tetrachloroferrates was compared, and the mechanism of thermal destruction was proposed.

Keywords: magnetic ionic liquids, synthesis, tetrachloroferrates, thermal stability, quaternary salts