= ФИЗИКОХИМИЯ РАСТВОРОВ =

УДК 542.61

ЭКСТРАКЦИОННАЯ ПЕРЕРАБОТКА Fe,Ni-СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ Ni-MH АККУМУЛЯТОРОВ

© 2021 г. М. И. Федорова^{*a*}, Ю. А. Заходяева^{*a*}, А. Е. Баранчиков^{*a*}, В. А. Кренев^{*a*}, А. А. Вошкин^{*a*}, *

^аИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский пр-т, 31, Москва, 119991 Россия *e-mail: voshkin@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 30.05.2020 г. После доработки 30.06.2020 г. Принята к публикации 01.07.2020 г.

Разработан комбинированный процесс переработки Fe,Ni-содержащих элементов отработанных Ni-MH аккумуляторов. Проведено выщелачивание и последующее экстракционное разделение ионов Fe(III) и Ni(II) из анодных сеток утилизируемых коммерчески доступных аккумуляторов. Впервые показана возможность эффективного разделения ионов Fe(III) и Ni(II) ($\beta_{Fe/Ni} = 22$) в двух-фазной водной системе на основе полипропиленгликоля-425 и фазообразующего раствора выщелачивания на основе хлорида никеля. Полученные результаты могут быть использованы для реализации экстракционных этапов переработки Ni-MH аккумуляторов.

Ключевые слова: жидкостная экстракция, двухфазные водные системы, элементы питания, "зеленая" химия

DOI: 10.31857/S0044457X21020082

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей в современном мире является поиск способов переработки отработанных высокотехнологичных изделий. Сложность их состава и архитектуры определяет необходимость разработки комплексных методов, которые обеспечивали бы высокую эффективность разделения компонентов составляющих их современных неорганических материалов, например, фотокаталитически активных композитов [1], электродов для солнечных батарей [2], магнетоэлектрических преобразователей [3], электрокатализаторов [4, 5], суперконденсаторов [6] и многих других. Особенно остро этот вопрос стоит для отработанных химических источников тока вследствие высоких темпов роста потребления электронного оборудования [7-9]. Содержащиеся в них металлы после переработки могут быть повторно использованы для создания новых перспективных функциональных материалов [10–13].

Первый этап переработки аккумуляторов включает в себя механическое выделение катодного порошка и анода, состоящего из анодного порошка, закрепленного на носителе — анодной сетке. Элементный состав Ni-MH аккумуляторов достаточно широк и включает в себя следующие элементы, мас. %: 17–63 Ni, 8–30 Fe, 12–17 редкоземельные металлы (**P3M** – La, Ce, Nd, Pr, Y),

3.7–5 Co, 1.7–3.1 K, 0.8–2.2 Zn, 0.7–2.3 Mn, 0.2– 1.1 Al и другие металлы (Na, Ca, Ag, Pb, Cr, Cu, Ti, V), содержание которых составляет <1% [14-19]. Видно, что Ni-MH аккумуляторы содержат в своем составе в большей степени никель, железо и РЗМ. На втором этапе переработки проводят растворение катода и анода в соляной, серной или азотной кислоте. Анализ литературных данных [14-20] показал, что наиболее эффективное извлечение металлов (Ni, Co, P3M, Fe) в ходе выщелачивания анода достигается при использовании 2—6 н растворов серной или соляной кислоты при температуре 60-90°С в течение 100 мин при массовом соотношении твердого материала к жидкости 1 : 21. Дальнейшее выделение и разделение металлов из полученных растворов выщелачивания проводят комбинацией таких методов, как осаждение [15, 16, 21] и жидкостная экстракция [8, 21 - 31].

На этапе переработки целесообразно последовательно и максимально использовать возможности всех методов разделения (от механических до химических). Так, в работе [18] анод был разделен на активный материал (анодный порошок) и носитель (анодную сетку) и их растворение было проведено раздельно. Авторами был определен состав раствора выщелачивания сетки: основную часть (94.2 мас. %) сетки составляют железо и никель. В этой связи механическое отделение анодной сетки и ее последующая экстракционная переработка позволяют выделить существенное количество никеля и железа в ходе утилизации анода, тем самым переработка компонентов аккумуляторов становится более рациональной.

Наиболее экономически выгодным способом выделения и разделения Fe(III) и Ni(II) из раствора выщелачивания является жидкостная экстракция [8, 21–28] с использованием нейтральных (трибутилфосфат, LIX-84I и др.) [8, 22, 23], катионообменных (ди(2-этилгексил)фосфорная кислота (Д2ЭГФК), Суапех 272) [21, 24–26], анионообменных (Aliquat 336) [25] и бинарных [25–28] экстрагентов, растворенных в органических растворителях.

Так, для разделения ионов Fe(III) и Ni(II) в хлоридных средах наиболее эффективны нейтральные и анионообменные экстрагенты [8, 22, 23, 25], которые количественно извлекают Fe(III) в широком диапазоне концентраций HCl (2-8 моль/л) и не извлекают Ni(II) ($E_{Ni} \le 2\%$) в тех же условиях. В сульфатных средах наиболее подходящими являются катионообменные экстрагенты [21, 24, 25]. Так, при использовании Д2ЭГФК степень извлечения Fe(III) достигает 80% за одну ступень экстракции при рН 4, в то время как степень извлечения Ni(II) практически не зависит от кислотности водного раствора и составляет <5% за одну ступень [21]. Таким образом, эффективность тех или иных экстрагентов зависит от природы среды раствора выщелачивания.

Несмотря на хорошую изученность и высокую эффективность при разделении и концентрировании широкого ряда металлов, в том числе из растворов выщелачивания, вышеперечисленных экстракционных систем, их использование зачастую не отвечает принципам "зеленой" химии. На сегодняшний день одно из наиболее интенсивно развивающихся направлений экстракционной химии — это поиск экологически безопасных гетерогенных систем. К ним можно отнести двухфазные водные системы, которые применяются для экстракции широкого ряда металлов: Fe, Ni, Co, Al и др. [29–36]. Так, экстракционная система на основе полиэтиленгликоля-1500 и нитрата натрия оказалась эффективной для комплексного извлечения ионов цветных металлов (Fe, Ni, Co, Al, Mn, Zn, Cu) [30], однако ее селективность достаточно низкая, так как большинство металлов в нитратных средах экстрагируется в полимерную фазу в виде гидрофильных аквакатионов, имеющих схожие значения энергии гидратации [37]. Двухфазные водные системы на основе полипропиленгликоля-425 (ППГ-425) И

хлорида натрия [32–34] показали свою эффективность в процессах извлечения ионов железа(III). Так, при концентрации хлорид-ионов в солевой фазе >4 моль/л достигается количественное извлечение Fe(III) [32]. Извлечение и разделение металлов из сульфатных сред с использованием водорастворимых полимеров возможно только в присутствии комплексообразователей (1-нитрозо-2нафтола, фосфорорганических кислот, тиоцианата калия и др.) [31, 35, 36].

В связи с этим особый интерес представляют исследования, направленные на исключение из экстракционного процесса токсичных и пожароопасных органических растворителей, а также сокращение числа дополнительных реагентов, необходимых для получения гетерогенной системы и эффективного разделения ионов металлов, например Fe(III) и Ni(II).

Цель настоящей работы — разработка технологических этапов выщелачивания и последующего экстракционного разделения ионов Fe(III) и Ni(II) в процессе переработки Fe,Ni-содержащих анодных сеток отработанных коммерчески доступных Ni-MH аккумуляторов с использованием гетерогенной системы на основе ППГ-425.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В экспериментах использовали цилиндрические Ni-MH аккумуляторы типоразмера AA емкостью 1900 мA/ч и напряжением 1.2 В. Из одной батарейки массой 26.7 г после снятия кожуха были выделены активные элементы: анодный порошок (9.2 г), анодная сетка (0.9 г) и катод (9.2 г). Выделенные элементы были охарактеризованы комплексом структурных и спектральных методов.

Состав поверхности анодной сетки определяли методом рентгеноспектрального микроанализа (**PCMA**) с использованием растрового электронного микроскопа NVision 40 (Carl Zeiss, Германия), снабженного энергодисперсионным детектором X-MAX (Oxford Instruments, Великобритания). Количественный состав сетки определяли с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра с разрешением по длине волны ARL Optim'X (Therто Techno, Швейцария), фазовый состав – с помощью рентгеновского порошкового дифрактометра D8 Advance (Bruker, Германия).

Растворение анодной сетки проводили при температурах 60 и 90°С в среде 2 М соляной кислоты, а также в растворе 4 М HCl при массовом соотношении тв : x = 1 : 21.

Разделение ионов металлов раствора выщелачивания проводили в экстракционной системе на ос-



Рис. 1. Внешний вид анодной сетки по данным РЭМ: 1 – поверхность анодной сетки, 2 – анодный порошок.

нове ППГ-425 (Acros Organics, CAS № 25322-69-4) и хлорида натрия квалификации "х. ч." при температуре 25°С в градуированных центрифужных пробирках в термостатированном шейкере Enviro-Genie (Scientific Industries, Inc.) при скорости вращения 30 об/мин до установления термодинамического равновесия (20 мин).

Концентрацию ионов Fe(III) и Ni(II) в растворе выщелачивания, солевой и полимерной фазах после экстракции определяли спектрофотометрическим методом на спектрофотометре Cary-60 (Agilent Tech., USA) с использованием сульфосалициловой кислоты для анализа содержания Fe(III) при длине волны 420 нм и 4-(2-пиридилазо)резорцина для Ni(II) при длине волны 492 нм.

Представленные экспериментальные данные являются результатом серии трех экспериментов и обработаны с использованием методов математической статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выделенная из Ni-MH аккумулятора типоразмера AA анодная сетка была проанализирована комплексом методов. Внешний вид поверхности сетки представлен на рис. 1.

Методом РСМА был определен состав поверхности анодной сетки (табл. 1): никель 90.7 мас. %, железо 5.3 мас. %, другие элементы представлены в незначительном количестве и могут входить в состав анодного порошка, оставшегося в порах сетки. Из представленной на рис. 2 дифрактограммы порошкообразной анодной сетки следует, что в ее состав входит металлический никель, а также сплав железа и никеля (состав сплава, приведенный в базе данных PDF2, соответствует формуле $Fe_{0.7}Ni_{0.3}$).

Рентгенофлуоресцентный анализ (табл. 2) показал, что в состав сетки входят железо (49.3 мас. %), никель (49.2 мас. %) и следовые количества других металлов: Mn, K, Ca, Cr, V, Ti. Их содержание составляет от 0.26 до 0.09 мас. % от общего количества железа и никеля, вследствие чего их выделение является нецелесообразным, поэтому далее мы рассматриваем задачу разделения Fe и Ni.

Выщелачивание анодной сетки соляной кислотой проводили в условиях, представленных в табл. 3. Там же приведены значения концентраций железа, никеля и соляной кислоты в полученных в результате выщелачивания растворах. При проведении выщелачивания 2 М раствором соляной кислоты при массовом соотношении тв : x = 1 : 21 и температурах 60 и 90°C были получены растворы, содержащие Fe(III) и Ni(II) в близких концентрациях (табл. 3) с остаточным содержанием соляной кислоты 0.7 моль/л. Про-

Таблица 1. Элементный состав поверхности анодной сетки, определенный методом РСМА

Элемент	Ni	Fe	K	Co
Содержание, мас. %	90.6	5.3	0.7	0.2





Рис. 2. Дифрактограмма анодной сетки. Штрих-диаграмма красного цвета отвечает металлическому никелю, штрих-диаграмма зеленого цвета - сплаву Fe_{0 7}Ni_{0 3}.

цесс выщелачивания до полного растворения анодной сетки длился в течение 24 и 12 ч соответственно. Использование более концентрированного раствора соляной кислоты (4 M HCl, соотношение тв : m = 1 : 21) позволило существенно сократить время выщелачивания. Был выполнен цикл исследований по выщелачиванию анодной сетки 4 М раствором соляной кислоты при 60 и 90°С, получены растворы с идентичным содержанием металлов и остаточным содержанием соляной кислоты 3 моль/л. Процесс выщелачивания до полного растворения анодной сетки длился 7 и 2 ч соответственно.

Следует отметить, что во всех случаях происходило полное растворение анодной сетки. При этом целесообразно использовать более концентрированную соляную кислоту, а повышение

Таблица 2. Брутто-состав анодной сетки, определенный с использованием рентгенофлуоресцентного анализа

Элемент	Содержание, мас. %	$\pm\Delta$
Ni	49.2	0.3
Fe	49.3	0.3
Mn	0.19	0.02
Κ	0.26	0.03
Ca	0.17	0.02
Cr	0.09	0.01
V	0.15	0.02
Ti	0.13	0.02
S	< 0.01	—
Р	< 0.01	—

температуры до 90°С является неоправданным. Таким образом, в качестве наиболее благоприятного предложен следующий режим выщелачивания: *C*(HCl) = 4 моль/л; *t* = 60°С; тв : ж = 1: 21, 7 ч (табл. 3). Соответственно, дальнейшие исследования по разделению ионов железа(III) и никеля(II) были выполнены из растворов выщелачивания состава, моль/л: Fe(III) 0.875, Ni(II) 0.817, HC13.

Как было показано нами ранее [32], эффективное извлечение ионов Fe(III) из хлоридных растворов возможно в экстракционных системах на основе ППГ-425. Синтез экстракционной системы в этом случае проводится с использованием полимера, хлорида натрия и воды. В настоящем исследовании для экстракционного разделения исследуемой пары металлов мы использовали экстракционные системы двух типов, в которых образование гетерогенной системы с ППГ-425 происходило за счет использования в качестве фазообразователя имеющегося в растворе выщелачивания хлорида никеля(II) и за счет введения фазообразующего компонента – хлорида натрия.

В первом случае на основании данных о фазовых равновесиях в системах с ППГ-425 мы предположили, что гетерогенная система может быть образована на основе хлорида никеля без введения дополнительных высаливающих агентов. В раствор выщелачивания был введен ППГ-425 (30 мас. %). Эксперименты проводили при температурах 25, 40 и 60°С. В полученной системе коэффициент распределения железа(III) составил ~2.6, а никеля(II) - 0.12, что обеспечивало коэффициент разделения 22. Полученные данные (табл. 4) свидетельствуют о том, что коэффициенты распределения металлов в данной экстракционной системе остаются постоянными в широком диапазоне температур. Это позволяет вести экстракцию при температуре 60°С без охлаждения раствора выщелачивания. Таким образом, нами впервые была получена и применена устойчивая гетерогенная система на основе ППГ-425 и хлорида никеля. Следует отметить, что в экстракционной системе на основе ППГ-425 и хлорида натрия уже при 40°С образуется трехфазная система (две жидкие и одна твердая фазы).

Ионы Fe(III) из хлоридных сред в двухфазных водных системах на основе водорастворимых полимеров экстрагируются в виде анионных комплексов состава [FeCl₄]⁻ [32]. Таким образом, увеличение концентрации хлорид-ионов в солевой фазе будет увеличивать коэффициент распределения железа(III). На основании данных о фазовых равновесиях в системе с ППГ-425 и хлори-

Концентрация, моль/л Условия выщелачивания Fe Ni HCl C(HCl) = 2 моль/л; $t = 60^{\circ}C$; 0.875 0.812 0.7 тв : ж = 1 : 21, 24 ч C(HCl) = 2 моль/л; $t = 90^{\circ}C$; 0.878 0.819 0.7 тв: ж= 1: 21, 12 ч C(HCl) = 4 моль/л; $t = 60^{\circ}C$; 0.875 0.817 3 тв : ж = 1 : 21, 7 ч C(HCl) = 4 моль/л; $t = 90^{\circ}C$; 0.879 0.818 3 тв: ж = 1:21, 2 ч

Таблица 3. Параметры и состав раствора выщелачивания анодной сетки Ni-MH-аккумулятора соляной кислотой

дом натрия [38] нами был выбран состав, соответствующий устойчивой гетерогенной системе ППГ-425 (30 мас. %)–NaCl (8 мас. %)–H₂O, который был получен путем добавления к раствору выщелачивания полипропиленгликоля-425 и хлорида натрия. Согласно установленным значениям коэффициентов распределения (табл. 4), предложенная система демонстрирует существенно большее значение коэффициента разделения ионов Fe(III) и Ni(II) ($\beta_{Fe/Ni} = 63.2$).

Таким образом, показана возможность эффективного экстракционного разделения Fe(III) и Ni(II) как с использованием гетерогенной системы на основе раствора выщелачивания и ППГ-425, так и с добавлением хлорида натрия. При этом очевидно, что система без хлорида натрия представляется более перспективной, так как позволяет существенно увеличить число степеней свободы в управлении экстракционным разделением (широкий интервал температур и области двухфазного расслаивания), а также уменьшить количество реагентов для проведения процесса разделения, что обеспечит минимизацию коррозии экстракционного оборудования и в полной мере согласуется с принципами "зеленой" химии.

На основании проведенных исследований нами предложена и реализована принципиальная схема переработки анодной сетки Ni-MH аккумулятора, представленная на рис. 3.

Измельченную анодную сетку растворяли в 4 М растворе HCl при 60°С в течение 7 ч. Для экстракционного разделения металлов использовали двухфазную гетерогенную систему на основе ППГ-425 (30 мас. %) и раствора выщелачивания. Процесс был реализован в экстракционном каскаде из смесителей-отстойников в режиме противотока. Было установлено, что проведение пяти ступеней экстракции позволяет получить водно-солевой раствор, содержащий не менее 99 мас. % Ni(II), и водно-полимерный раствор, содержащий не менее 99 мас. % Fe(III). Учитывая, что обе фазы рафинат и экстракт - водные (это одно из существенных преимуществ двухфазных водных систем по сравнению с гетерогенной системой вода-органический растворитель), возможно дальнейшее эффективное электроосаждение железа из экстракта и никеля из рафината [39, 40].

Оставшиеся после извлечения металлов растворы могут быть переработаны с выделением ППГ-425 и раствора соляной кислоты, которые далее будут направлены на стадию экстракционного разделения и выщелачивания соответственно.

Таблица 4. Коэффициенты распределения и коэффициенты разделения ($\beta_{Fe/Ni}$) металлов в зависимости от состава экстракционной системы и температуры

Состав системы		D _{Ni}	$\beta_{Fe/Ni}$
Раствор выщелачивания (C (HCl) = 3 моль/л) + ППГ-425 (30 мас. %), $t = 25^{\circ}$ C	2.64	0.12	22
Раствор выщелачивания (C (HCl) = 3 моль/л) + ППГ-425 (30 мас. %), $t = 40^{\circ}$ C		0.12	21.3
Раствор выщелачивания (C (HCl) = 3 моль/л) + ППГ-425 (30 мас. %), $t = 60^{\circ}$ C		0.11	22.8
Раствор выщелачивания (C(HCl) = 3 моль/л) + ППГ-425 (30 мас. %) + NaCl (8 мас. %), $t = 25^{\circ}$ C		0.18	63.2



Рис. 3. Принципиальная схема переработки анодной сетки Ni-MH аккумулятора с получением железа и никеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе нами проведено выщелачивание и последующее экстракционное разделение ионов Fe(III) и Ni(II) из анодной сетки отработанных Ni-MH аккумуляторов. Показано, что экстракционная система, полученная при смешении раствора выщелачивания и полипропиленгликоля-425, обеспечивает разделение ионов Fe(III) и Ni(II) с коэффициентом разделения >22. Предложена принципиальная схема переработки Fe,Ni-содержащих элементов отработанных Ni-MH аккумуляторов с замкнутым циклом по реагентам. Таким образом, на стадии переработки анодной сетки обеспечивается полное разделение и выделение железа и никеля в форме, пригодной для дальнейшего использования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Москвы в рамках научного проекта № 19-33-70011 с использованием оборудования ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mao M., Xu J., Li Y., Liu Z.* // J. Mater. Sci. 2020. V. 55. P. 3521.

https://doi.org/10.1007/s10853-019-04205-0

- Larina L.L., Alexeeva O.V., Almjasheva O.V. et al. // Nanosyst. Phys. Chem. Math. 2019. V. 10. P. 70. https://doi.org/10.17586/2220-8054-2019-10-1-70-75
- 3. *Hohenberger S., Jochum J.K., Van Bael M.J. et al.* // Materials. 2020. V. 13. P. 197. https://doi.org/10.3390/ma13010197
- Kodintsev I.A., Martinson K.D., Lobinsky A.A., Popkov V.I. // Nanosyst. Phys. Chem. Math. 2019. V. 10. P. 573. https://doi.org/10.17586/2220-8054-2019-10-5-573-578
- Ramos-Garcés M.V., Colón J.L. // Nanomaterials. 2020. V. 10. P. 822.

https://doi.org/10.3390/nano10050822

- Dakshana M., Meyvel S., Malarvizhi M., Sathya P. // Nanosyst. Phys. Chem. Math. 2020. V. 11. P. 230. https://doi.org/10.17586/2220-8054-2020-11-2-230-236
- Assefi M., Maroufi S., Yamauchi Y., Sahajwalla V. // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2020. V. 24. P. 26. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.01.005
- Yi X., Huo G., Tang W. // Hydrometallurgy. 2020. V. 192. Art. 105265. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105265
- Lin S.-L., Huang K.-L., Wang I.-C. et al. // J. Air Waste Manage. Assoc. 2016. V. 66. № 3. P. 296. https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1131206
- Zagaynov I.V., Loktev A.S., Arashanova A.L. et al. // Chem. Eng. J. 2016. V. 290. P. 193. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.01.066
- Shcherbakov A.B., Zholobak N.M., Spivak N.Ya., Ivanov V.K. // Russ. J. Inorg. Chem. 2014. V. 59. P. 1556. https://doi.org/10.1134/S003602361413004X
- Shilova O.A., Nikolaev A.M., Kovalenko A.S. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2020. V. 65. P. 426. https://doi.org/10.1134/S0036023620030134
- Urkasym kyzy S., Krisyuk V.V., Turgambaeva A.E. et al. // J. Struct. Chem. 2019. V. 60. P. 1635. https://doi.org/10.1134/S0022476619100093
- 14. Sobianowska-Turek A. // Waste Manage. 2018. V. 77. P. 213. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.046

- 15. Korkmaz K., Alemrajabi M., Rasmuson A.C., Forsberg K.M. // Metals. 2018. V. 8. № 12. P. 1062. https://doi.org/10.3390/met8121062
- Fernandes A., Afonso J.C., Dutra A.J.B. // Hydrometallurgy. 2013. V. 133. P. 37. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.11.017
- Li L., Xu S., Ju Z., Wu F. // Hydrometallurgy. 2009.
 V. 100. P. 41. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.09.012
- Larsson K., Ekberg C., Ødegaard-Jensen A. // Waste Manage. 2013. V. 33. P. 689. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.06.001
- 19. Yang X., Zhang J., Fang X. // J. Hazard. Mater. 2014. V. 279. P. 384. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.027
- 20. *Liu C., Deng Y., Chen J. et al.* // Ind. Eng. Chem. Res. 2017. V. 56. № 26. P. 7551. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b01427
- 21. Agarwal V., Khalid M.K., Porvali A. et al. // Sustainable Materials and Technologies. 2019. V. 22. A. e00121. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00121
- Lee M.-S., Lee K.-J. // Hydrometallurgy. 2005. V. 80. P. 163. https://doi.org/10.1016/i.hvdromet.2005.06.010
- Hu F., Hu H., Yang J. et al. // J. Mol. Liq. 2019. V. 291. A. 111253.
- https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111253
- Olivier M.C., Dorfling C., Eksteen J.J. // Miner. Eng. 2012. V. 27–28. P. 37. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.12.006
- 25. Voshkin A.A., Belova V.V., Khol'kin A.I. // Russ. J. Inorg. Chem. 2003. V. 48. № 4. Р. 608. [Вошкин А.А., Белова В.В., Холькин А.И. // Журн. неорган. химии. 2003. Т. 48. № 4. С. 699.]
- 26. Voshkin A.A., Belova V.V., Zakhodyaeva Y.A. // Russ. J. Inorg. Chem. 2018. V. 63. № 3. Р. 387. [Вошкин А.А., Белова В.В., Заходяева Ю.А. // Журн. неорган. химии. 2018. Т. 63. № 3. С. 362.] https://doi.org/10.1134/S0036023618030233
- 27. Voshkin A.A., Kodin N.V., Kondakov D.F., Kostanyan A.E. // Russ. J. Inorg. Chem. 2010. V. 55. № 5. Р. 794. [Вошкин А.А., Кодин Н.В., Кондаков Д.Ф., Костанян А.Е. // Журн. неорган. химии. 2010. Т. 55. № 5. С. 852.] https://doi.org/10.1134/S0036023610050220
- Voshkin A.A., Belova V.V., Zhilov V.I. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2004. V. 49. № 8. Р. 1278. [Вошкин А.А., Жидкова Т.И., Белова В.В. и др. // Журн. неорган. химии. 2004. Т. 49. № 8. С. 1384.]
- Gradov O.M., Zakhodyaeva Y.A., Zinov'eva I.V., Voshkin A.A. // Molecules. 2019. V. 24. P. 3549. https://doi.org/10.3390/molecules24193549
- Zakhodyaeva Yu.A., Zinovyeva I.V., Tokar E.S., Voshkin A.A. // Molecules. 2019. V. 24. P. 4078. https://doi.org/10.3390/molecules24224078
- Zakhodyaeva Yu.A., Izyumova K.V., Solov'eva M.S., Voshkin A.A. // Theor. Found. Chem. Eng. 2017. V. 51. № 5. Р. 883. [Заходяева Ю.А., Изюмова К.В., Соловьева М.С., Вошкин А.А. // Химическая технология. 2016. Т. 17. № 12. С. 569.] https://doi.org/10.1134/S0040579517050244
- 32. Zakhodyaeva Yu.A., Zinov'eva I.V., Voshkin A.A. // Theor. Found. Chem. Eng. 2019. V. 53. № 5. Р. 735. [Заходяева Ю.А., Зиновьева И.В., Вошкин А.А. // Теорет. основы хим. технологии. 2019. Т. 53. № 5.

ЖУРНАЛ НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ том 66 № 2 2021

280

https://doi.org/10.1134/S0040579519050373

- Федорова М.И., Заходяева Ю.А., Вошкин А.А. // Теорет. основы хим. технологии. 2020. Т. 54. № 3. С. 304.
 - https://doi.org/10.31857/S0040357120030021
- 34. Fedorova M.I., Zinovyeva I.V., Zakhodyaeva Yu.A., Voshkin A.A. // Theor. Found. Chem. Eng. 2020. V. 54. № 2. Р. 313. [Федорова М.И., Зиновьева И.В., Заходяева Ю.А., Вошкин А.А. // Теорет. основы хим. технологии. 2020. Т. 54. № 2. С. 202.] https://doi.org/10.1134/S0040579520020037
- 35. da Rocha Patrício P., Mesquita M.C., da Silva L.H.M., da Silva M.C.H. // J. Hazard. Mater. 2011. V. 193. P. 311. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.062

- Valadares A., Valadares C.F., de Lemos L.R. al. // Hydrometallurgy. 2018. V. 181. P. 180. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.09.006
- Yizhak M. // J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1991. V. 87. № 18. P. 2995.
- 38. Cheluget E.L., Gelinas S., Vera J.H., Weber M.E. // J. Chem. Eng. Data. 1994. V. 39. № 1. P. 127. https://doi.org/10.1021/je00013a036
- Torabinejad V., Aliofkhazraei M., Assareh S. et al. // J. Alloys Compd. 2017. V. 691. P. 841. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.329
- 40. Oriňáková R., Strečková M., Trnková L. et al. // J. Electroanal. Chem. 2006. V. 594. № 2. P. 152. https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2006.05.031