

УДК 621.039.7+546.05

РАЗРАБОТКА МЕТОДА МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ РЗЭ И ЦИРКОНИЯ ИЗ СОЛЕВЫХ РАСПЛАВОВ

© 2020 г. Л. С. Алексеева¹, *, Д. О. Савиных¹, А. И. Орлова¹, М. Ю. Каленова²,
А. М. Кощев², Е. А. Потанина¹, П. Ю. Сальников¹, Д. А. Михайлов¹

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23,
Нижний Новгород, 603950 Россия

²Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии, Каширское ш., 33, Москва, 115409 Россия
*e-mail: golovkina_lyudmila@mail.ru

Поступила в редакцию 20.12.2018 г.

После доработки 13.12.2019 г.

Принята к публикации 23.12.2019 г.

Применение магнитных полей в неводных процессах переработки облученного ядерного топлива с использованием солевых расплавов открывает новые возможности избирательного извлечения радионуклидов без разрушения растворителя. В настоящей работе такой подход развит для избирательного выделения РЗЭ и циркония. Исследовались гексаферрит стронция и феррит со структурой шпинели в качестве магнитного носителя, а также возможность его использования в хлоридных расплавах щелочных элементов. Проанализировано влияние условий процесса (температуры, времени выдержки, содержания Zr) на эффективность извлечения Nd и Zr методом магнитной сепарации.

Ключевые слова: РЗЭ, Zr, извлечение, расплав LiCl–KCl, магнитный носитель, магнетоплюмбит, шпинель

DOI: 10.31857/S0002337X20060019

ВВЕДЕНИЕ

Пироэлектрoхимическая технология с использованием в качестве растворяющей среды солевых расплавов и, прежде всего, расплавов хлоридов щелочных элементов признана в настоящее время перспективной. Пирохимические процессы характеризуются малыми объемами образующихся отходов, их высокой удельной активностью, практически отсутствием жидких технологических высокоактивных отходов. Эта технология обладает рядом достоинств: расплавы являются хорошей растворяющей средой, они устойчивы при высоких температурах, под действием радиации, их применение позволяет вывести из технологического процесса воду, необходимую для всех живых систем. Работы с хлоридными расплавами с применением их для пироэлектрoхимической технологии выполнялись и выполняются во многих странах мира: России [1–7], США, Японии [8], Корее [9], Великобритании [3, 10] (цеолитная сорбция). Поведение U, Np, Pu, Am в расплавах LiCl–KCl охарактеризовано в работах [1, 11–25]. Многообразие исследований, в т. ч. в последние годы [20–23], свидетельствует о том, что проблема является актуальной.

Извлечение из расплава актинидов (Am, Cm), редкоземельных элементов (РЗЭ) и циркония яв-

ляется одной из основных задач, решаемых в рамках этой технологии, в т. ч. в России [5, 6, 24, 25].

Среди методов извлечения, концентрирования, консолидации для последующей изоляции от биосферы продуктов деления актинидов разрабатываются осадительные, ионообменные, зонная кристаллизация, сорбционные.

Для извлечения компонентов, растворенных в расплаве LiCl–KCl, в настоящей работе предлагается использование магнитного поля.

В качестве магнитных носителей, способных включать в свой состав извлекаемые компоненты расплава, внимания заслуживают гексаферрит стронция со структурой магнетоплюмбита, включающий актиниды и РЗЭ, и ферриты со структурой шпинели, включающие цирконий.

Гексаферриты М-типа, изоморфные минералу магнетоплюмбиту, примерный состав которого описывается формулой $Pb_2Fe_{15}Mn_7AlTiO_{38}$ [26], представляют собой твердые оксидные соединения с общей формулой $MFe_{12}O_{19}$ (M = Ba, Sr, Pb). Такие гексаферриты могут включать в свой состав лантаниды. К настоящему времени изучены Sr-ферриты, в составе которых Sr и Fe участвуют в гетеровалентных замещениях: $La^{3+}-Co^{2+}$ [27, 28], $La^{3+}-Cu^{2+}$ [29], $La^{3+}-Zn^{2+}$ [30], $Ln^{3+}-Fe^{2+}$, $Ln^{3+}-$

Co^{2+} ($\text{Ln} = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}$) [31–34], а также $\text{Nd}^{3+} - \text{Zn}^{2+}$ [35], $\text{Pr}^{3+} - \text{Zn}^{2+}$ [36].

Гексаферриты стронция обладают хорошими магнитными характеристиками (температура Кюри 737 К [37]) и высокой химической стабильностью.

Ферриты со структурой шпинели характеризуются общей формулой VFe_2O_4 , где $\text{V} = \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}, \text{Cd}$. Они кристаллизуются в кубической решетке с пр. гр. $Fd\bar{3}m$, $Z = 8$ [38]. Феррошпинели обладают уникальными физико-химическими свойствами, в том числе отличными магнитными характеристиками, высокой химической стабильностью. Благодаря этим свойствам они рассматриваются в качестве магнитных сорбентов для извлечения ионов тяжелых металлов и радионуклидов из водных растворов [39–43].

Литературных данных о применении таких соединений для извлечения компонентов расплавов, в т. ч. расплавов щелочных хлоридов, не обнаружено.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объекты исследования. Объектами исследования являлись катиондефицитные гексаферриты со структурой магнетоплюмбита $\text{Sr}_{1-x}[\]_x\text{Fe}_{12-x}\text{Cu}_x\text{O}_{19}$ ($x = 0.4$), где $[]$ – вакантные позиции с предполагаемыми заселяющими катионами, в частности неодимом, а также твердый раствор $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ со структурой шпинели.

В настоящей работе в качестве катионов, размещающихся в позициях структуры магнетоплюмбита, выбран неодим как представитель лантанидов, входящих в состав продуктов деления ядерного топлива, а также как химический и структурный аналог актинидов (Am и Cm) [44], накапливающихся в ядерном топливе в процессе работы атомного реактора.

Методы исследования, приборы и установки. Фазовый состав образцов исследовали методом рентгенофазового анализа (**РФА**) на рентгеновском порошковом дифрактометре Shimadzu LabX XRD-6000 ($\text{CuK}\alpha$ -излучение, $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$).

Концентрацию Sr , Ba , Cu , Fe , Nd и Zr определяли методами атомной абсорбционной спектроскопии и атомной эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (**ИСП-АЭС**) на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-240FS Varian и эмиссионном спектрометре с ИСП Agilent 725 ICP-OES, Agilent Technologies.

Эксперимент проводили в трубчатой печи (рабочая температура до 1000°C) с термоконтроллером в потоке аргона (ТУ 6-21-12-94, “ос. ч.”). Для удаления остаточной воды аргон пропускали через концентрированную серную кислоту. Маг-

нитную фазу извлекали из расплава с помощью электромагнита.

Работы проводились в инертном боксе 850-NB Plas-Labs (США) в атмосфере аргона.

Подготовка расплава к работе. В экспериментах по изучению устойчивости магнетоплюмбита для получения расплава смесь (мол. %) безводных хлоридов: 55.7 LiCl (ООО “Ланхит”, “ос. ч.”) и 44.3 KCl (АО “Химреактив”, “х. ч.”), содержащую (% от массы расплава): 0.5 CsCl (ООО “Ланхит”, “ос. ч.”), 0.1 SrCl_2 (ООО “Ланхит”, “ос. ч.”), 0.3 BaCl_2 (ООО “Ланхит”, “ос. ч.”), помещали в фарфоровый тигель, просушивали в трубчатой печи (в атмосфере аргона) при температуре 150°C в течение 30 мин, затем нагревали до 450°C и выдерживали при этой температуре в течение 1.5 ч. К исходной смеси добавляли безводные хлориды (% от массы расплава): 1 NdCl_3 (ООО “Ланхит”, “ос. ч.”) и 0.1, 1 и 10 ZrCl_4 (ООО “Ланхит”, “ос. ч.”).

Для предотвращения перехода исходных хлоридов в оксидную форму к смеси добавляли хлорид аммония NH_4Cl (АО “Вектон”, “х. ч.”), при нагревании создающий поток хлороводорода.

Используемый электролит по составу моделировал расплав $\text{LiCl} - \text{KCl}$, получаемый в технологии пирохимической переработки отходов ядерного топлива (**ОЯТ**), содержащий, помимо извлекаемых компонентов (Am , Cm , PЗЭ и Zr), в примесных количествах хлориды цезия, стронция и бария, наличие которых может влиять на извлекаемость Nd и Zr из электролита.

Синтез. Катиондефицитное соединение со структурой магнетоплюмбита $\text{Sr}_{1-x}[\]_x\text{Fe}_{12-x}\text{Cu}_x\text{O}_{19}$ ($x = 0.4$) получали исходя из предположения, что вакантные позиции структуры в дальнейшем займут ионы Nd из расплава.

Порошок готовили смешиванием 0.5 М водных растворов SrCl_2 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ и CuCl_2 в стехиометрических соотношениях. Полученную смесь сушили при 90°C в течение 20 ч. Сухой остаток термостатировали при 500, 900, 1100°C в течение 10 ч на каждой стадии.

Твердый раствор $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ со структурой шпинели получали в расплаве $\text{LiCl} - \text{KCl}$. Для этого в расплав дополнительно вносили смесь оксидов железа II и III.

Выделение Nd и Zr из расплава. В расплав модельного состава вносили смесь оксидов железа II и III, готовый сорбент и смесь карбонатов: 55.7 мол. % Li_2CO_3 (АО “Химреактив”, “х. ч.”) и 44.3 мол. % K_2CO_3 (АО “Химреактив”, “ч. д. а.”) – в количестве, необходимом для перевода неодима и циркония в оксидную форму. Расчет массы сорбента проводили исходя из количества неодима в расплаве (моли): $n(\text{Nd}) = 2.5n(\text{Sr}_{0.6}[\text{Nd}_{0.4}]\text{Fe}_{11.6}\text{Cu}_{0.4}\text{O}_{19})$.

После выдерживания системы при 450°C в течение 3 ч магнитную фазу извлекали электромаг-

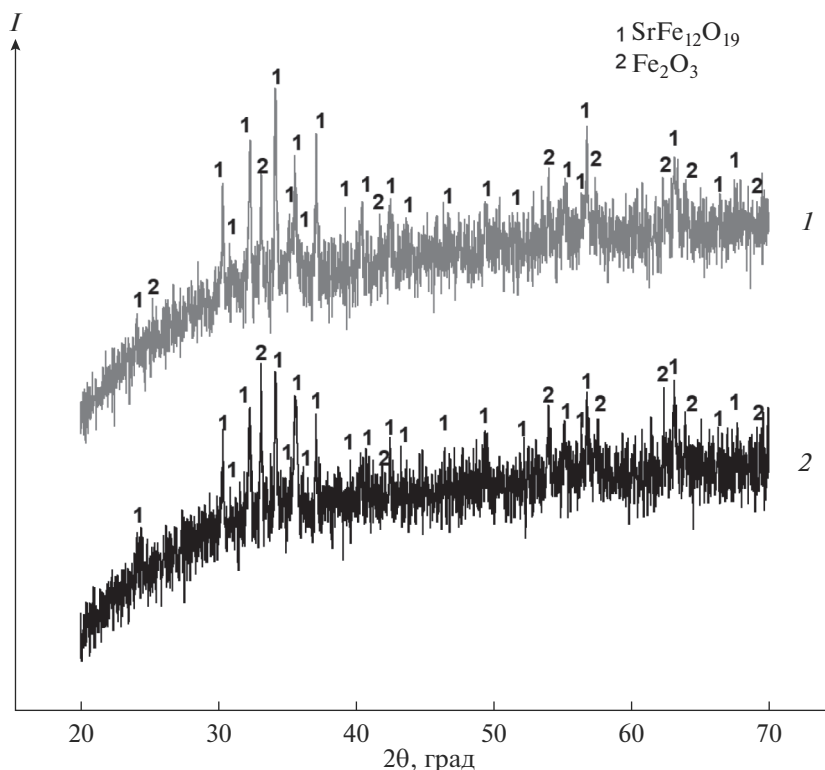


Рис. 1. Данные РФА: $Sr_{1-x}[]_xFe_{12-x}Cu_xO_{19}$ ($x = 0.4$) до (1) и после (2) выдержки в расплаве $LiCl-KCl$.

нитом из расплава. Оставшийся расплав растворили в дистиллированной воде, выделенную магнитом фазу также промывали дистиллированной водой. Растворы анализировали на содержание Sr, Ba, Cu, Fe, Nd и Zr. Определяли элементный и фазовый составы извлеченных проб и оставшегося в расплаве нерастворимого осадка. Оставшийся в расплаве осадок представлял собой смесь магнитной и немагнитной фаз. С помощью магнита их разделяли. Магнитное разделение осадка проводили для изучения его фазового состава; поскольку рентгенограммы железосодержащей фазы имеют высокий фон, максимумы отражения примесных фаз было бы сложно или даже невозможно анализировать.

Влияние условий эксперимента на магнитное выделение Nd и Zr из расплава. Для установления зависимости эффективности процесса магнитного извлечения Nd и Zr из расплава от условий эксперимента опыты проводили при разных содержаниях циркония (0.1, 1 и 10 мас. %), разных температурах (400 и 450°C) и разных временах выдержки сорбента в расплаве (3 и 6 ч).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Устойчивость магнетоплюмбита $Sr_{1-x}[Nd]_xFe_{12-x}Cu_xO_{19}$ ($x = 0.4$) в расплаве $LiCl-KCl$. Устойчивость магнетоплюмбита

$Sr_{1-x}[]_xFe_{12-x}Cu_xO_{19}$ ($x = 0.4$), где [] – вакантные позиции с предполагаемыми заселяющимися атомами в расплаве $LiCl-KCl$, изучали при температуре 450°C и выдержке в течение 3 ч.

Рентгенограммы магнетоплюмбита $Sr_{1-x}[]_xFe_{12-x}Cu_xO_{19}$ ($x = 0.4$) до и после выдержки в расплаве приведены на рис. 1.

По данным РФА установили, что состав исследуемого образца не изменился. Образец до и после выдержки в расплаве представлял собой смесь фазы, изоструктурной фазы магнетоплюмбита $SrFe_{12}O_{19}$, и фазы Fe_2O_3 .

Влияние концентрации циркония в расплаве электролита $LiCl-KCl$ на извлекаемость Nd и Zr. В результате экспериментов установили, что при прочих одинаковых условиях содержание Nd уменьшилось по сравнению с начальным на 35.4% в присутствии 0.1% Zr, на 33.4% в присутствии 1% Zr, на 54% в присутствии 10% Zr. Содержание циркония в расплаве заметно уменьшилось: до 0.02% для расплава с 0.1% Zr, до 0.05% – с 1% Zr и до 1.34% – с 10% Zr, что, в соответствии с данными РФА, было связано с образованием оксида циркония ZrO_2 и других Zr-содержащих соединений.

Рентгенограммы нерастворимых фаз, полученных в результате экспериментов, представлены на рис. 2. Как следует из приведенных данных, рентгенограммы магнитных фаз, извлеченных из

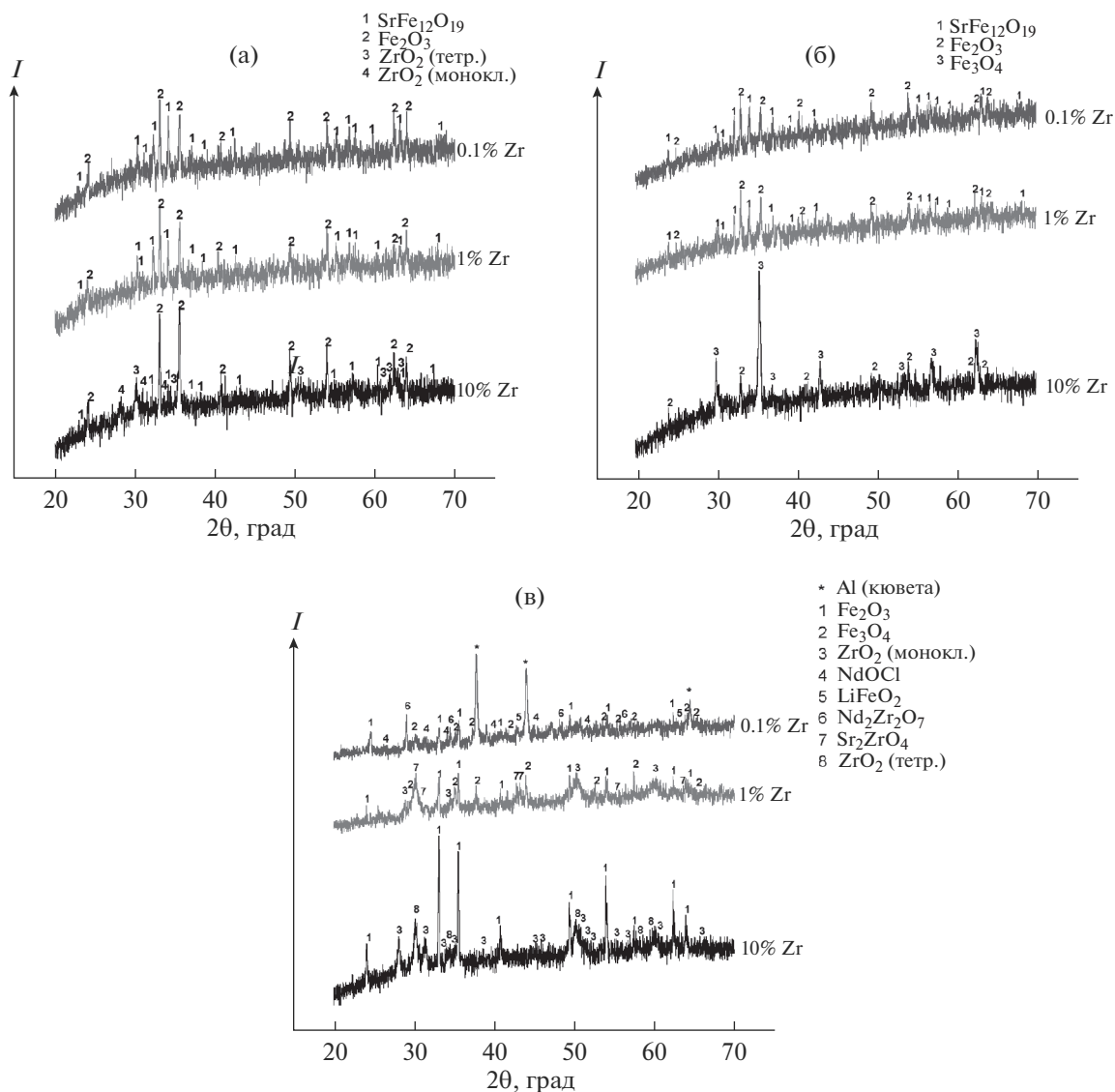


Рис. 2. Данные РФА: магнитной фазы, извлекаемой из расплава (а), магнитной фазы, оставшейся в расплаве (б), немагнитной фазы при содержании Zr 0.1, 1 и 10 мас. %.

систем с содержанием циркония 0.1 и 1 мас. % (рис. 2а), и магнитных фаз, оставшихся в расплаве (рис. 2б), сходны между собой. Во всех случаях порошки представляли собой смесь фазы, изоструктурной фазе гексаферрита стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, и оксида железа Fe_2O_3 . При содержании в электролите 10 мас. % циркония извлеченный порошок представлял собой смесь магнетита Fe_3O_4 и оксида железа Fe_2O_3 , а магнитная фаза, оставшаяся в расплаве, состояла из смеси фазы, изоструктурной гексаферриту стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, Fe_2O_3 , а также ZrO_2 . Немагнитная фаза, оставшаяся в расплаве с концентрацией Zr 0.10 мас. %, состояла из Nd-содержащих фаз: оксихлорида NdOCl и цирконата $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (рис. 2в). В немагнитных фазах, оставшихся в расплаве с содержанием Zr 0.1, 1 и

10 мас. %, присутствовала фаза Fe_2O_3 , а также Zr-содержащие фазы: цирконаты $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, Sr_2ZrO_4 и ZrO_2 .

Элементный состав магнитных фаз, извлеченных и оставшихся в расплаве, приведен в табл. 1.

Из элементного анализа твердых фаз (табл. 1) следует, что фаза, извлекаемая из расплава с помощью магнита, и магнитная фаза, оставшаяся в расплаве, практически не отличались друг от друга.

Распределение Nd и Zr между исследуемыми фазами представлено в табл. 2. Видно, что при исходном содержании циркония 0.1 и 1% основная часть неодима оставалась в расплаве (65–67%). При 10% Zr количество неодима в расплаве сокращалось примерно в 1.5 раза (до 46%).

Таблица 1. Элементный состав магнитных фаз: оставшейся (1) и извлеченной из расплава (2)

Условия	Фаза	С, мас. %					
		Sr	Ba	Cu	Fe	Nd	Zr
0.1 мас. % Zr, 450°C, 3 ч	1	4.01	0.013	0.11	73.02	0.39	0.048
	2	4.65	0.016	0.024	72.57	0.67	0.16
1 мас. % Zr, 450°C, 3 ч	1	3.09	0.07	0.029	62.79	0.42	0.37
	2	3.45	0.064	0.016	64.63	0.8	0.73
10 мас. % Zr, 450°C, 3 ч	1	0.69	0.007	0.009	73.57	1.08	9.45
	2	0.37	0.003	0.009	73.35	1.99	4.84
1 мас. % Zr, 400°C, 3 ч	1	3.88	0.009	0.019	67.51	0.017	0.31
	2	3.62	0.003	0.015	68.09	1.96	0.35
1 мас. % Zr, 450°C, 6 ч	1	3.13	0.004	0.025	63.19	1.14	0.93
	2	3.56	0.006	0.016	64.01	1.23	0.87

Таблица 2. Распределение Nd и Zr между фазами: 1 – извлеченная фаза, 2 – магнитная фаза, оставшаяся в расплаве, 3 – немагнитная фаза, 4 – расплав

Условия	Распределение Nd, %				Распределение Zr, %			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0.1 мас. % Zr, 450°C, 3 ч	10.7	12.1	12.6	64.6	25.6	14.9	59.3	0.2
1 мас. % Zr, 450°C, 3 ч	11	12.1	10.3	66.6	10	10.7	79.25	0.05
10 мас. % Zr, 450°C, 3 ч	15.2	17.8	21	46	3.7	15.6	67.3	13.4
1 мас. % Zr, 400°C, 3 ч	8.4	9.6	14.6	67.4	1.5	17.58	80.9	0.02
1 мас. % Zr, 450°C, 6 ч	15.5	17.7	19.4	47.4	10.94	14.48	74.57	0.01

Следует также отметить, что при 0.1 и 1% Zr содержание неодима в магнитных фазах более чем в 2 раза превышало его содержание в немагнитной фазе, при 10% Zr – более чем в 1.5 раза. Количество Zr, включаемое в магнитные фазы, уменьшалось при увеличении его исходной концентрации в расплаве.

Влияние температуры процесса. В результате экспериментов содержание Nd в расплаве сократилось по сравнению с начальным на 32.6% при проведении процесса при $t = 400^\circ\text{C}$ и на 33.4% при $t = 450^\circ\text{C}$. Содержание Zr в сравнении с начальным сократилось не менее чем на 99.9%.

Рентгенограммы нерастворимых фаз, полученных при $t = 400^\circ\text{C}$, представлены на рис. 3. Рентгенограммы отобранной и оставшейся в расплаве с содержанием циркония 1 мас. % магнитных фаз после эксперимента при 400°C сходны между собой. Порошки представляли собой смесь фазы, изоструктурной гексаферриту стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, и Fe_2O_3 . Немагнитная фаза, оставшаяся в расплаве, являлась смесью ZrO_2 , Fe_2O_3 и LiFe_5O_8 .

Из анализа распределения Nd и Zr между фазами (табл. 2) следует, что основная часть неодима остается в расплаве (66–67%) независимо от температуры процесса. При температуре 450°C содержание неодима в магнитных фазах более чем в 2 раза превышало его содержание в немагнитной фазе, а при 400°C их распределение было примерно одинаковым. Распределение циркония мало зависело от температуры – его большая часть (79–80%) содержалась в немагнитной фазе в обоих случаях.

Влияние времени выдержки. В результате экспериментов при разных временах выдержки – 3 и 6 ч – содержание Nd в расплаве сократилось по сравнению с начальным: на 33.4% при 3 ч и на 52.6% при 6 ч. Содержание Zr сократилось не менее чем на 99.9%.

Рентгенограммы нерастворимых фаз, полученных при времени выдержки сорбента в расплаве 6 ч, представлены на рис. 4. Из их анализа следует, что фазовые составы отобранной пробы и магнитной фазы, оставшейся в расплаве с содержанием циркония 1 мас. %, сходны между собой. В обоих случаях порошки представляли со-

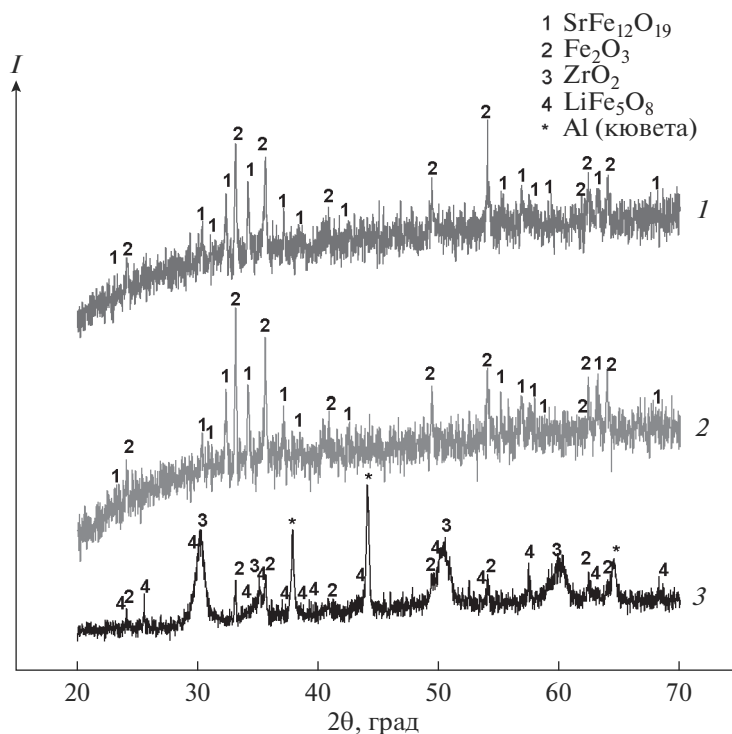


Рис. 3. Данные РФА: магнитной фазы, извлекаемой из расплава (1), магнитной фазы, оставшейся в расплаве (2), немагнитной фазы (3) после выдержки при $t = 400^\circ\text{C}$.

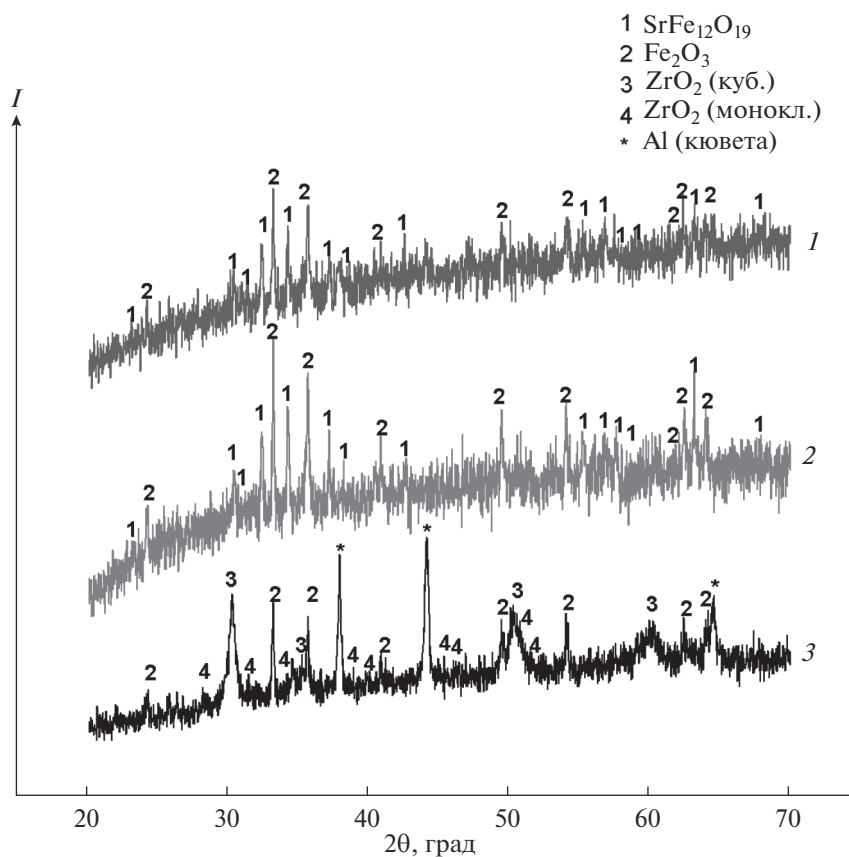


Рис. 4. Данные РФА: магнитной фазы, извлекаемой из расплава (1), магнитной фазы, оставшейся в расплаве (2), немагнитной фазы (3) после выдержки при 450°C в течение 6 ч.

бой смесь фазы, изоструктурной гексаферриту стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, и Fe_2O_3 . Немагнитная фаза, оставшаяся в расплаве, представляла собой смесь ZrO_2 и Fe_2O_3 .

Анализ распределения Nd и Zr между фазами (табл. 2) показал, что основная часть неодима осталась в расплаве (47–67%). При более длительной выдержке (6 ч) содержание неодима в магнитных и немагнитной фазах значительно увеличивалось по сравнению с 3-часовой выдержкой. Большая часть циркония содержалась в немагнитной фазе (75–80%). Его распределение мало зависело от времени выдержки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена устойчивость магнетоплюмбита $\text{Sr}_{1-x}\text{[Li]}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Cu}_x\text{O}_{19}$ ($x=0.4$) в расплаве LiCl–KCl.

Исследовано влияние концентрации циркония (0.1, 1, 10 мас. %) в расплаве LiCl–KCl (55.7 и 44.3 мол. % соответственно), содержащем хлориды Cs (0.5 мас. %), Sr (0.1 мас. %), Ba (0.3 мас. %), Nd (1 мас. %), температуры и длительности процесса на образование Nd- и Zr-содержащих фаз на основе ферритов со структурой магнетоплюмбита.

Исследуемый магнетоплюмбит показал наибольшую эффективность по отношению к неодиму и цирконию при 450°C и продолжительности его контакта с электролитом 6 ч.

Возможно магнитное извлечение Nd- и Zr-содержащих фаз из электролита.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках Хоздоговора № 63/3998 “Разработка методов выделения актинидов, РЗЭ и циркония из солевых расплавов” между ННГУ им. Н.И. Лобачевского и АО “ВНИИХТ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлова А.И. Высокотемпературное концентрирование компонентов топливного цикла с включением в кристаллические матрицы двойных солей: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. Ленинград. 1988. 48 с.
2. Lukinykh A.N., Lavrinovich Yu.G. et al. High-Level Waste Composition, Properties and Preparation for Long-Term Storage after Pyroelectrochemical Reprocessing of Irradiated Oxide Uranium-Plutonium Fuel // The 5th Int. Conf. on Recycling, Conditioning and Disposal RECOD98. (October 25–28). 1998. Nice. 1998. V. 3. P. 814–821.
3. Volkovich V.A., Griffiths T.R., Thied R.C. Formation of Lanthanide Phosphates in Molten Salts and Evaluation for Nuclear Waste Treatment // Phys. Chem. Phys. 2003. V. 5. № 14. P. 3053–3060.
4. Лизин А.А., Томилин С.В., Чистяков В.М. Исследования в ОАО “ГНЦ НИИАР” по обращению с высокоактивными отходами пирохимических процессов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: материаловедение и новые материалы. 2014. № 3. С. 96–114.
5. Мальцев Д.С., Волкович В.А., Васин Б.Д. Коэффициенты диффузии ионов урана(III) и (IV) в эвтектическом расплаве LiCl–KCl–CsCl // Расплавы. 2016. № 3. С. 226–237.
6. Мальцев Д.С., Волкович В.А., Васин Б.Д. Окислительно-восстановительные потенциалы урана в расплаве эвтектической смеси хлоридов лития, калия и цезия // Расплавы. 2016. № 3. С. 238–244.
7. Казаковцева Н.А., Майков М.А., Никитина Е.В. Исследование коррозии стали 12X18H10T в расплаве LiCl–KCl–nNdCl₃ // Расплавы. 2018. № 3. С. 344–349.
8. Amamoto I., Kofuji H., Myochin M. et al. Phosphates Behavior in Conversion of FP Chlorides // J. Nucl. Mater. 2009. V. 389. № 1. P. 142–148.
9. Cho Y.Z., Lee T.K., Choi J.H. et al. Eutectic (LiCl–KCl) Waste Salt Treatment by Sequential Separation Process // Nucl. Eng. Technol. 2013. V. 45. № 5. P. 675–682.
10. Harrison M.T., Simms H.E., Jackson A. et al. Salt Waste Treatment from a LiCl–KCl Based Pyrochemical Spent Fuel Treatment Process // Radiochim. Acta. 2008. V. 96. № 4–5. P. 295–301.
11. Koyama T., Johnson T.R., Fischer D.F. Distribution of Actinides in Molten Chloride Salt/Cadmium Metal System // J. Alloys Compd. 1992. V. 189. № 1. P. 37–44.
12. Hébert P., Picard G.S. Equilibrium Reaction between Molecular and Ionic Species in Pure LiCl and in LiCl–MCl (M = Na, K, Rb) Melts Investigated by Computational Chemistry // J. Mol. Struct. 1995. V. 358. № 1–3. P. 39–50.
13. Roy J.J., Grantham L.F., Grimmet D.L. et al. Thermodynamic Properties of U, Np, Pu, and Am in Molten LiCl–KCl Eutectic and Liquid Cadmium // J. Electrochem. Soc. 1996. V. 143. № 8. P. 2487–2492.
14. Shirai O., Iwai T., Suzuki Y. et al. Electrochemical Behavior of Actinide Ions in LiCl–KCl Eutectic Melts // J. Alloys Compd. 1998. V. 271–273. P. 685–688.
15. Lexa D. On the Reactive Occlusion of the (Uranium Trichloride + Lithium Chloride + Potassium Chloride) Eutectic Salt in Zeolite 4A // J. Nucl. Mater. 1999. V. 279. № 1. P. 57–64.
16. Iizuka M., Uozumi K., Inoue T. et al. Behavior of Plutonium and Americium at Liquid Cadmium Cathode in Molten LiCl–KCl Electrolyte // J. Nucl. Mater. 2001. V. 299. № 1. P. 32–42.
17. Simpson M.F., Gougar M.L.D. Two-Site Equilibrium Model for Ion Exchange between Monovalent Cations and Zeolite-A in a Molten Salt // Ind. Eng. Chem. Res. 2003. V. 42. № 18. P. 4208–4212.
18. Serp J., Konings R.J.M., Malmbeck R. et al. Electrochemical Behavior of Plutonium Ion in LiCl–KCl Eutectic Melts // J. Electroanal. Chem. 2004. V. 561. P. 143–148.
19. Kuznetsov S.A., Hayashi H., Minato K. et al. Electrochemical Behavior and Some Thermodynamic Proper-

- ties of UCl_4 and UCl_3 Dissolved in a LiCl-KCl Eutectic Melt // *J. Electrochem. Soc.* 2005. V. 152. № 4. P. 203–212.
20. Kim T.J., Jung Y., Shim J.B. et al. Study on Physicochemical Properties of U^{3+} in LiCl-KCl Eutectic Media at 773 K // *J. Radioanal. Nucl.* 2011. V. 287. № 1. P. 347–350.
 21. Park H.-S., Kim I.-T., Cho Y.-J. et al. Removal Behavior of Cs from Molten Salt by Using Zeolitic Materials // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2010. V. 283. № 2. P. 267–272.
 22. Wasnik M., Carlson K., Simpson M.F. Waste Minimization of Electrorefiner Waste Salt via Dechlorination: A New Approach // *Trans. Am. Nucl. Soc.* 2017. V. 117. P. 281–282.
 23. Liu K., Liu Y.-L., Chai Z.-F. et al. Evaluation of the Electroextractions of Ce and Nd from LiCl-KCl Molten Salt Using Liquid Ga Electrode // *J. Electrochem. Soc.* 2017. V. 164. № 4. P. 169–178.
 24. Волкович В.А., Васин Б.Д., Мальцев Д.С., Александров Д.Е. Способ очистки облученного ядерного топлива: Патент России № 2499306. 2013 // Б.И. № 32.
 25. Volkovich V.A., Ivanov A.B., Sobolev A.A., Vasin B.D., Griffiths T.R. An Electrochemical and Spectroelectrochemical Study of Ln(II) (Ln = Sm, Eu, Yb) Species in NaCl-2CsCl Melt // *ECS Trans.* 2014. V. 64. № 4. P. 617–634.
 26. Pollert E. Crystal Chemistry of Magnetic Oxides Part 2: Hexagonal Ferrites // *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 1985. № 11. P. 155–205.
 27. Yamamoto H., Obara G. Magnetic Properties of Anisotropic Sintered Magnets Using Sr-La-Co System Powders by Mechanical Compounding Method // *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metall.* 2000. V. 47. P. 796–800.
 28. Yamamoto H., Obara G. Effect of La_2O_3 and Co_3O_4 Additives on Magnetic Properties of Sr-M Ferrite by Mechanical Compounding Method // *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metall.* 2000. V. 47. № 2. P. 160–164.
 29. Башкиров Л.А., Красовская Л.И., Великанова И.А., Польшко Д.Д. Кристаллическая структура и магнитные свойства ферритов системы $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Cu}_x\text{O}_{19}$ // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорганических веществ.* 2011. № 3. С. 43–50.
 30. Taguchi H., Takeishi T., Suwa K. High Energy Ferrite Magnets // *J. Phys. IV.* 1997. № 7(C1). P. C1-311–C1-312.
 31. Mocuta H., Morel A. Structural and Magnetic Properties of Hydrothermally Synthesised $\text{Sr}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ Hexagonal Ferrites // *J. Alloys. Compd.* 2004. V. 364. № 1. P. 48–52.
 32. Lechevallier L., Le Breton J.M., Morel A., Tenaud P. Influence of the Presence of Co on the Rare Earth Solubility in M-Type Hexaferrite Powders // *J. Magn. Mater.* 2007. V. 316. № 2. P. 109–111.
 33. Lechevallier L., Le Breton J.M. On the Solubility of Rare Earths in M-type $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ Hexaferrite Compounds // *J. Phys. Condens. Matter.* 2008. № 20. P. 175203–175212.
 34. Ze W., Bashkirov L.A., Trukhanov S.V. et al. Crystal Structure and Magnetic Properties of $\text{Sr}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Co}_x\text{O}_{19}$ Solid Solutions // *Inorg. Mater.* 2014. V. 50. № 3. P. 290–295.
 35. Польшко Д.Д., Башкиров Л.А., Лобановский Л.С., Труханов С.В. Кристаллическая структура и магнитные свойства высококоэрцитивных ферритов $\text{Sr}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$, $(\text{Sr}_{0.85}\text{Ca}_{0.15})_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$ при температурах 6–300 К в магнитных полях до 14 Тл // *Тр. БГТУ. Химия и технология неорганических веществ.* 2009. № 3. С. 83–84.
 36. Польшко Д.Д., Башкиров Л.А., Труханов С.В. и др. Кристаллическая структура и магнитные свойства высококоэрцитивных твердых растворов $\text{Sr}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{12-x}\text{Zn}_x\text{O}_{19}$ // *Неорган. материалы.* 2011. Т. 47. № 1. С. 81–86.
 37. Morishita H., Amano A., Ueda H. et al. Single Crystal Growth of Strontium Ferrite with Magnetoplumbite Structure Using the Traveling Solvent Floating Zone Method // *J. Jpn. Soc. Powder Powder Metall.* 2014. V. 61. № S1. P. S64–S66.
 38. Mathew D.S., Juang R.S. An Overview of the Structure and Magnetism of Spinel Ferrite Nanoparticles and Their Synthesis in Microemulsions // *Chem. Eng. J.* 2007. V. 129. P. 51–65.
 39. Ngomsik A.F., Bee A., Draye M. et al. Magnetic Nano- and Microparticles for Metal Removal and Environmental Applications: A Review // *C. R. Chim.* 2005. V. 8. P. 963–970.
 40. Gao Z., Cui F., Zeng S. et al. A High Surface Area Superparamagnetic Mesoporous Spinel Ferrite Synthesized by a Template-Free Approach and Its Adsorptive Property // *Microporous Mesoporous Mater.* 2010. V. 132. № 1–2. P. 188–195.
 41. Tu Y.J., You C.F., Chang C.K. Kinetics and Thermodynamics of Adsorption for Cd on Green Manufactured Nano-Particles // *J. Hazard. Mater.* 2012. V. 235–236. P. 116–122.
 42. Harikishore K.R.D., Yun Y.S. Spinel Ferrite Magnetic Adsorbents: Alternative Future Materials for Water Purification? // *Coord. Chem. Rev.* 2016. V. 315. P. 90–111.
 43. Kefeni K.K., Mamba B.B., Msagati T.A.M. Application of Spinel Ferrite Nanoparticles in Water and Wastewater Treatment: A Review // *Sep. Purif. Technol.* 2017. V. 188. P. 399–422.
 44. Krauskopf K.B. Thorium and Rare-Earth Metals as Analogs for Actinide Elements // *Chem. Geol.* 1986. V. 55. P. 323–335.