

СОРБЦИЯ АКТИВИРОВАННЫМ УГЛЕМ ПРОТАКТИНИЯ, ТОРИЯ И ДРУГИХ АКТИНИДОВ ИЗ РАСПЛАВА LiF–NaF–KF

© 2022 г. Ю. С. Федоров^{a,*}, В. В. Самонин^a, А. С. Зотов^a, Е. Д. Хрылова^a,
Е. А. Спиридонова^a, А. Е. Мирославов^b, А. А. Акатов^a

^a Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26

^b Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, 194021, Санкт-Петербург, 2-й Мурунский пр., д. 28
*e-mail: fys54@mail.ru

Поступила в редакцию 29.06.2022, после доработки 18.08.1022, принята к публикации 23.08.2022

Исследована сорбция фторидов урана и тория активированным углем из эвтектики. Изотермы сорбции обоих фторидов при температуре 650°C имеют выраженный выпуклый характер и описываются уравнением Ленгмюра. Проведены опыты по сорбции протактиния активированным углем АГ-3 при температуре 650°C из расплава фторидов щелочных металлов LiF–NaF–KF, содержащего фториды тория и неодима. Выявлено, что с ростом концентраций фторидов неодима или тория величина сорбции протактиния уменьшается, причем в случае с фторидом тория уменьшение наблюдается в большей степени. При сорбции протактиния активированным углем с металлическим натрием величина сорбции возрастает в 20 раз при содержания натрия в угле 30%. Коэффициенты разделения протактиния с другими актинидами увеличиваются по мере увеличения количества натрия в угле.

Ключевые слова: фториды, расплавы, щелочные металлы, протактиний, торий, уран, сорбция, активированный уголь, металлический натрий.

DOI: 10.31857/S0033831122060090, **EDN:** MGHQQI

ВВЕДЕНИЕ

Ториевый топливный цикл, основанный на наработке и последующем использовании ^{233}U , имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционным урановым топливным циклом. Прежде всего, при делении ^{233}U практически не образуются долгоживущие трансплутониевые актиниды, которые являются одним из основных компонентов высокоактивных отходов (ВАО), требующих геологического захоронения. Однако при облучении ^{232}Th параллельно происходит образование ^{232}U , обладающего вместе со своими дочерними радионуклидами высоким уровнем радиоактивности, затрудняющим практическое использование в атомной энергетике из-за необходимости применения защитных камер для обращения на всех стадиях изготовления ядерного топлива.

В последнее время усилился интерес к ториевому топливному циклу [1]. Появились подходы к возможному получению ^{233}U с минимальным содержанием ^{232}U , в том числе с использованием бланкетов термоядерного реактора синтез–деление [2, 3]. Данный подход основан на том, что если непрерывно извлекать из бланкета, содержащего торий, ^{233}Pa , из которого при распаде образуется ^{233}U , то можно значительно снизить накопление ^{231}Pa , из которого образуется ^{232}U . С увеличением длительности облучения ториевого бланкета для наработки относительно высокого количества ^{233}U (например, при облучении до 200 сут) одновременно будет происходить накопление ^{232}U и ^{234}U до 1.7 и 0.19% от суммы урана соответственно [4], при этом суммарная мощность дозы будет 2.2 Зв/ч для 1.7% ^{232}U [5].

В качестве ториевого бланкета может быть использован расплав фторидов щелочных элементов,

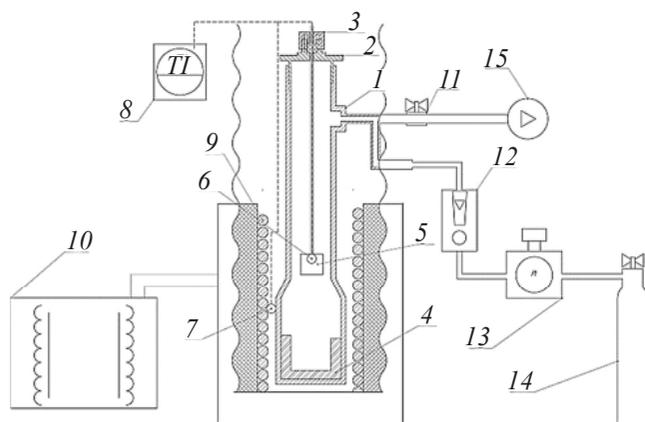


Рис. 1. Схема установки, используемой для обогащения активированного угля металлическим натрием. 1 – корпус; 2 – съемная резьбовая крышка; 3 – цанговое уплотнение штока сетки; 4 – керамический вкладыш реактора; 5 – сетка из нержавеющей стали для угля со штоком; 6, 7 – датчики температуры; 8 – измеритель температуры – потенциометр; 9 – печь; 10 – автотрансформатор; 11 – шаровой кран; 12 – ротаметр с игольчатым дросселем; 13 – мембранный регулятор давления с манометром; 14 – баллон; 15 – вакуум-насос.

содержащий фторид тория [3]. Особенностью непрерывного выделения ^{233}Pa из расплава фторидов является то, что за время короткого цикла облучения ^{232}Th произойдет малое накопление ^{233}Pa , поэтому наиболее изученные методы, такие как восстановительная экстракция ^{233}Pa в жидкий Bi с Li , электрорафинирование на катоде, осаждение оксидами и другие методы [1], будут неэффективны. Для непрерывного выделения низких концентраций ^{233}Pa целесообразно было бы использовать сорбционные процессы, способные извлекать из расплавов микроконцентрации различных элементов.

Недавно авторами [6] было показана возможность использования активированного угля для извлечения Nd(III) из расплава фторидов щелочных металлов (FLiNaK). При этом активированный уголь АГ-3 оказался устойчив в исследуемом диапазоне температур $550\text{--}700^\circ\text{C}$.

Целью данной работы является проведение исследования извлечения Pa , U и Th из эвтектики FLiNaK с использованием активированного угля и модифицированного металлическим Na угля для дополнительной фиксации Pa на угле.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали эвтектику на основе фторидов щелочных металлов состава, мол%: LiF (46.5)– NaF (11.5)– KF (42.0) (FLiNaK). Ее качество проверяли по температуре плавления ($T_{\text{пл}} = 454^\circ\text{C}$) с использованием дериватографа. Схема установки по проведению сорбции активированным углем АГ-3 из FLiNaK подробно описана ранее [6].

Высушенный активированный уголь помещали в специальную корзину из металлической меди с отверстиями и опускали в расплав солей. Опыты проводили при температуре 650°C в статических условиях, время сорбции составляло 1.5 ч. Корзину с активированными углями периодически подвергали вертикально-поступательному движению для перемешивания соли с углем. После извлечения корзины проводили анализ на содержание целевых элементов в угле и в солевой эвтектикой.

Анализ концентрации Th , U и Nd проводили следующим образом. Пробы с углем и эвтектики обрабатывали серной кислотой для удаления HF и после упаривания разбавляли водой и анализировали с использованием арсеназо III в среде соляной кислоты на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ на длине волны 650 нм по методике [7].

Активированный уголь АГ-3 перед обогащением металлическим натрием с целью повышения сродства его поверхности к металлу подвергался сушке на воздухе при 200°C , термообработке под вакуумом и в среде инертного газа при 600°C . Образцы активированного угля, обогащенного металлическим натрием, получали на установке, представленной на рис. 1.

Предварительно подготовленный уголь помещали в сетку 5, шток сетки фиксировали уплотнением 3. Металлический натрий помещали в реактор в количестве, не превышающем объем керамического вкладыша 4, нагрев проводили в среде аргона.

Температуру в реакторе и длительность процесса обогащения подбирали с учетом того, какое содержание металла в угле необходимо получить. Экспериментально установлено, что для получения образцов с содержанием металла в диапазоне от 1 до 10 мас% необходим контакт активированного угля с расплавом при температуре $200\text{--}300^\circ\text{C}$, а для получения более высоких (до 30 мас%) содержаний

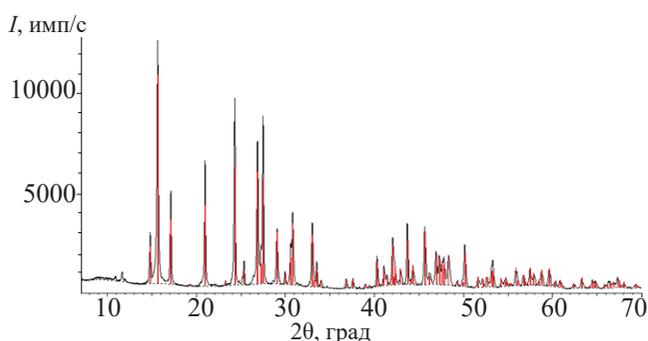


Рис. 2. Дифрактограмма UF_4 . Штрих-линии относятся к библиотечным данным.

металла в угле требуется нагрев до $400\text{--}600^\circ\text{C}$ в течение 2 ч.

Фториды тория, ^{231}Pa и ^{241}Am , а также Nd получали совместно из соответствующих нитратов по методике, описанной в работе [6]. Анализ содержания ^{231}Pa , ^{241}Am проводили на γ -спектрометре с разрешением 1.8 кэВ с блоком детектирования GTV45P4-83) и анализатором DSPec jr 2.0 фирмы ORTEC. UF_4 получали путем электрохимического восстановления уранилнитрата, осаждения фторидом аммония и последующего прокалывания осадка при температуре 600°C в смеси с бифторидом аммония в течение 4 ч. Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на дифрактометре D2 Phaser (Bruker, Германия) с использованием CuK_α -излучения, напряжение рентгеновской трубки 30 кВ, сила тока 10 мА. Съемку проводили в диапазоне углов 2θ $7^\circ\text{--}70^\circ$ в режиме сканирования с шагом 0.02° со скоростью – 0.5 град/мин. Обработку результатов проводили с использованием программы DIFFRAC.EVA.V5.0. Качество получаемого продукта контролировали по дифрактограмме (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для реализации ториевого топливного цикла необходимо извлекать ^{233}Pa непосредственно из эвтектики, содержащей фторид облучаемого природного ^{232}Th . Ранее было показано, что при температуре 650°C фторид тория сорбируется углем АГ-3 из эвтектики FLiNaK на порядок меньше фторида неодима [6]. Важно понимать, как в аналогичных условиях происходит сорбция фторида четырехвалентного урана, который образуется при распаде ^{233}Pa . Данные по сорбции фторидов U(IV) и Th(IV)

представлены на рис. 3, из которого следует, что величина извлечения U(IV) немного выше таковой для Th(IV).

Данные изотермы сорбции фторидов урана и тория, представленной на рис. 3, удовлетворительно аппроксимируются по уравнению Ленгмюра:

$$A_{U,Th} = \frac{A_0 K C}{(1 + K C)}, \quad (1)$$

где C – текущая концентрация элемента в эвтектике, A_0 – предельное содержание в сорбенте, K – константа.

На рис. 3 представлен расчет (линия) по уравнению (1) для U(IV) при $A_0 = 0.68$ мг/г и $K = 0.30$, для Th(IV) при $A_0 = 0.30$ мг/г и $K = 0.15$.

Из данных рис. 3 следует, что реализовать селективное извлечение активированным углем изотопов урана, образованного из изотопов протактиния в рамках ториевого цикла, по паре U(IV)–Th(IV) не представляется реализуемым из-за отсутствия существенного различия в изотермах сорбции.

При непрерывном извлечении микроколичества образуемого ^{233}Pa при облучении тория, растворенного в эвтектике, необходимо оценить роль фторида тория, растворимость которого в эвтектике весьма велика и достигает 32.8 мол% [8]. На рис. 4 показано влияние фторидов тория и неодима на сорбцию протактиния активированным углем АГ-3. Из рис. 4 видно, что с ростом концентрации обоих фторидов

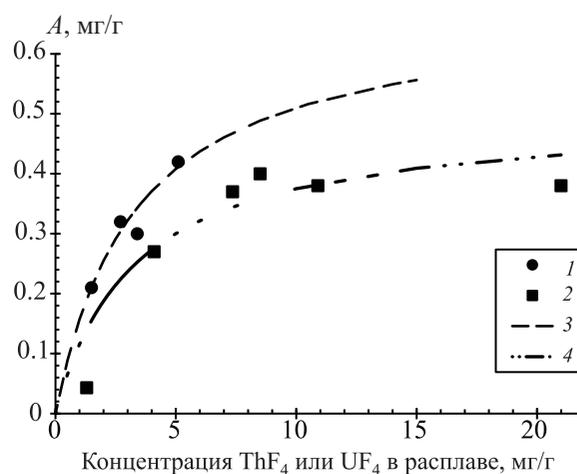


Рис. 3. Изотермы сорбции фторидов тория и урана из расплава. 1, 2 – экспериментальные данные; 3, 4 – аппроксимация экспериментальных точек по уравнению Ленгмюра. 1, 3 – UF_4 ; 2, 4 – ThF_4 .

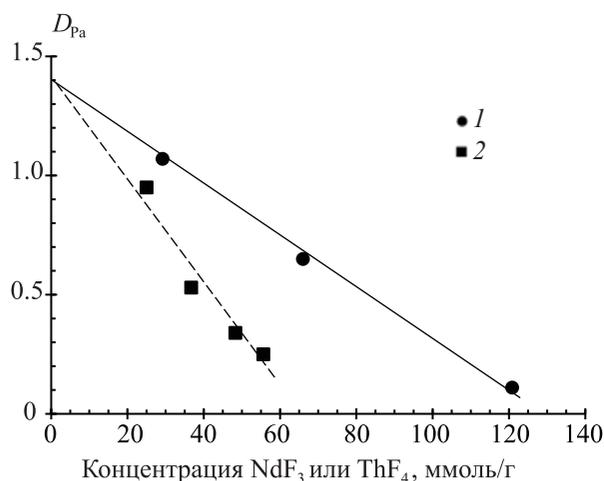


Рис. 4. Зависимость сорбции фторида протактиния активированным углем от содержания NdF_3 (1) или ThF_4 (2) в расплаве FLiNaK.

величина сорбционной емкости для протактиния снижается. Вероятно, на сорбцию Pa из FLiNaK активированным углем значительное влияние оказывают процессы, происходящие в расплаве, связанные с образованием сложных комплексов.

Известно, что Nd(III) в расплавах LiF-NaF-KF образует анионные комплексы NdF_6^{3-} [9], а Th(IV) образует более сложные фторидные комплексы (например, почти 18% $[ThF_9]^{5-}$) с преобладанием $[ThF_8]^{4-}$ [10, 11]. Можно предположить, что протактиний образует более прочные комплексы с торием, чем неодимом, например $[Pa]^{4+}[ThF_8]^{4-}$, которые препятствуют извлечению протактиния активированным углем. Валентное состояние протактиния в расплавах FLiNaK и некоторых других равно 4 [12, 13]. Образование соединений протактиния с анионными комплексами тория и неодима объясняет снижение сорбционного извлечения протактиния с ростом концентраций элементов в расплаве.

Из рис. 4 видно, что экстраполяция сорбционной емкости по протактинию на нулевые значения концентраций макроэлементов приводит к примерно

одному значению величины сорбции протактиния, равному 1.4. Из сравнения рис. 3 и рис. 4 также следует, что практически невозможно селективно извлекать протактиний сорбцией при содержании фторида тория в эвтектике более 30 ммоль/г, т.е. в условиях ториевого цикла.

Между тем, известно, что протактиний сравнительно легко восстанавливается в расплавах фторидов до металлического состояния либо непосредственным введением металлического лития [10], либо при экстракции в расплав висмута с металлическим восстановителем (Li, Th и т.д.) [13, 14].

Окислительно-восстановительные потенциалы фторидов тория и лантанидов в расплаве FLiNaK близки [15], при этом металлический литий может восстановить лантаниды в данной эвтектике до металла при температуре 650°C, а металлический натрий – не может [16, 17]. По этой причине было исследовано влияние металлического натрия, внесенного в активированный уголь, на селективность сорбции протактиния в присутствии тория и других актинидов.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов распределения протактиния и других актинидов активированным углем АГ-3 при температуре 650°C и различном содержании металлического натрия с фиксированным содержанием в расплаве фторида тория. Из табл. 1 следует, что при отсутствии в АГ-3 металлического натрия коэффициенты распределения для рассмотренных элементов примерно равны, а коэффициенты разделения протактиния и других актинидов близки к 1. С увеличением содержания металлического натрия коэффициенты распределения по отношению к активированному углю растут, однако для протактиния наблюдается более значительный рост по сравнению с другими элементами. При содержании натрия в угле 30% коэффициент распределения протактиния достигает 12.3, что значительно больше, чем для других элементов, а

Таблица 1. Влияние содержания металлического Na в активированном угле на сорбцию радионуклидов из LiF-NaF-KF. Равновесная концентрация Th(IV) в расплаве 9.0 ± 0.1 г/дм³. Остальные элементы в индикаторных количествах

Na, %	D_{Pa}	D_U	D_{Th}	D_{Am}	D_{Pa}/D_{Th}	D_{Pa}/D_U	D_{Pa}/D_{Am}	D_U/D_{Th}
0	0.53	0.57	0.48	0.53	1.10	0.93	1.00	1.19
5.02	1.80	0.65	0.81	–	2.22	2.77	–	0.80
30.1	12.30	2.80	3.20	3.71	3.85	4.40	3.32	0.88

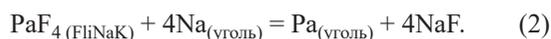
Таблица 2. Влияние количества натрия в АГ-3 на его характеристики

Параметры обработки АГ-3	Содержание Na в АГ-3		W_S , см ³ /г	Содержание Na, мг/г		Соотношение C : Na между слоев графита, моль/моль
	%	мг/г		в порах	интеркалят	
Исходный ^a	0	0	0.375	–	–	–
Уголь с Na	5.0	53	0.318	53	0	–
	30.0	428	0.181	188	240	7.99

^a Уголь, прогретый под вакуумом при температуре 600°C.

коэффициент разделения протактиния и тория достигает 3.85 при сопоставимых значениях для других актинидов.

Можно предположить, что восстановление протактиния металлическим натрием, находящимся в активированном угле, протекает по аналогии с восстановлением литием, растворенным в металлическом висмуте, при извлечении протактиния из расплава фторидов [12]:



Щелочные металлы в отличие от металлического висмута незначительно растворяют актиниды (U, Th, Pa и др.) в виде металла [18]. Поэтому растворение в натрии, находящимся в угле АГ-3, протактиния, присутствующего в эвтектике в незначительном количестве в виде металла, вполне вероятно.

Вероятно, возможен и другой вариант, связанный с тем, что восстановленный протактиний будет размещаться в объеме пор активированного угля. Аналогично в порах активированного угля фиксируются наночастицы Ag [19], Pd, Cu и других элементов [20].

Для подтверждения этого предположения надо оценить характер размещения металлического натрия в активированном угле. Графит и активированный уголь обладают способностью к интеркаляции Li, Na и других щелочных металлов между слоями углерода с образованием соединений C_6Na и C_8Na [21, 22], а при высоком содержании щелочных металлов образуются ацетилениды динатрия и дилития Na_2C_2 и Li_2C_2 [23, 24]. Во всех этих соединениях щелочные металлы имеют положительный заряд за счет перераспределения электронов с атомами углерода. Восстановительные свойства металлического натрия могут зависеть от того, находится ли натрий в порах или располагается в структуре графитовых слоев.

В табл. 2 представлены экспериментальные данные по определению предельного объема сорбционного пространства (W_S), определяемого по поглощению бензола, а также других параметров, полученных расчетным путем исходя из заполняемости пор. Из табл. 2 видно, что с ростом количества натрия в АГ-3 величина W_S уменьшается, что указывает на заполнение микро- и мезопор натрием. Если считать, что уменьшение объема сорбирующих пор связано с заполнением их объема, то с учетом плотности металлического натрия 0.96842 г/см³ можно рассчитать массу натрия в порах угля. Остальное количество натрия может находиться между графитовыми слоями активированного угля, тем более что температура 600°C, при которой получали уголь с максимальным содержанием металлического натрия, соответствует условиям интеркаляции его в графит [22]. Из табл. 2 следует, что мольное соотношение углерода к натрию за вычетом его в порах практически равно 8.0, т.е. соответствует соединению C_8Na [21, 22]. Для угля с содержанием натрия 5% уменьшение объема W_S примерно соответствует объему, занятому металлическим натрием, т.е. между слоями металлического натрия нет. Вероятно, это связано с относительно низкой температурой включения натрия в АГ-3.

В АГ-3 содержится 0.9 мг-экв/г кислых оксидов и 0.35 мг-экв/г основных [25]. В порах угля оценочно (табл. 2) содержится 8.2 мг-экв/г натрия, т.е. только небольшая часть натрия (около 6%) может находиться в виде оксида, что может объяснить увеличение коэффициента распределения других элементов, представленных в табл. 1, за счет образования малорастворимых оксифторидов актинидов [26].

Исследование влияния металлического натрия, внедренного в состав активированного угля, на сорбцию фторидов различных металлов, включая про-

тактиний и торий, как наиболее важных элементов для ториевого цикла, целесообразно проводить в рамках отдельной работы, так как потребуется отработать методику получения заданного количества металлического натрия. В данном исследовании выявлен факт значительного влияния металлического натрия, внедренного в активированный уголь, на его сорбционную способность по протактинию и другим элементам, и рассмотрены возможные варианты такого процесса, которые могут быть связаны с растворением в металлическом натрии восстановленного протактиния или осаждением его в порах активированного угля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены эксперименты по сорбции протактиния, тория, урана и америция из эвтектики FLiNaK активированным углем АГ-3 при температуре 650°C. Показано, что изотермы сорбции фторидов урана и тория имеют выраженный выпуклый характер и описываются уравнением Ленгмюра, при этом величина сорбции данных элементов примерно на порядок меньше таковой для ранее исследованного фторида неодима.

С ростом концентрации в расплаве фторидов неодима и тория извлечение протактиния активированным углем падает, причем в присутствии тория больше, чем для неодима при сопоставимых условиях. Выдвинуто предположение, о том, что сильное кулоновское взаимодействие четырехзарядного катиона протактиния с анионными комплексами $[\text{ThF}_8]^{4-}$ препятствует сорбции протактиния. Падение коэффициента распределения протактиния в присутствии фторида неодима менее значимое, что, вероятно, связано с меньшей устойчивостью его комплекса с протактинием.

Обнаружено усиление сорбции протактиния активированным углем, насыщенным металлическим натрием. С ростом содержания натрия в активированном угле до 30 мас% происходит увеличение величины сорбции протактиния примерно в 20 раз по сравнению с исходным углем без натрия, и одновременно более чем в 3 раза увеличивается коэффициент отделения протактиния от других исследуемых элементов.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта РФФИ № 19-29-02010\19.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Molten Salt Reactors and Thorium Energy / Ed. T.J. Dolan. Elsevier, 2017. 815 p.
2. Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И., Игнатъев В.В., Цибульский В.Ф., Андрианова Е.А. // Энергетическая политика. 2017. № 3. С. 12.
3. Velikhov E.P., Kovalchuk M.V., Azitov E.A., Ignatiev V.V., Subbotin S.A., Tsibulskiy V.F. // At. Energy. 2013. Vol. 114, N 3. P. 193. <https://doi.org/10.1007/s10512-013-9695-x>
4. Марин С.В., Шаталов Г.Е. // Атом. энергия. 1984. Т. 56, № 5. С. 289.
5. Kang J., Hippel F.N. // Sci. Global Secur. 2001, Vol. 9. P. 1.
6. Fedorov Yu.S., Samonin V.V., Zotov A.A., Khrylova E.D., Spiridonova E.A., Miroslavov A.E., Akatov A.A. // Radiochemistry. 2021. Vol. 63, N 6. P. 754. <https://rdcu.be/cFHDM>
7. Савин С.Б. Органические реагенты группы арсеназо III. М.: Атомиздат, 1971. 348 с.
8. Lizin A.A., Tomilin S.V., Gnevashov O.E., Gazizov A.G., Osipenko A.G., Kormilitsin M.V. // At. Energy. 2013. Vol. 115, N 1. P. 22.
9. Хохряков А.А., Вершинин А.О., Пайвин А.С., Лузин А.А. // Расплавы. 2015. № 4. С. 3.
10. Smith A.L., Verleg M.N., Vlieland de Haas J.D., Ocadiz-Flores J.A., Martin P., Rothe J., Dardenne K., Salanne M., Gheribi A. E., Capelli E., van Eijck L., Konings R.J.M. // Synchrotron Radiat. 2019. Vol. 26. P. 124. <https://doi.org/10.1107/S160057751801648X>
11. Dai J., Long D., Huai P., Li Q. // J. Mol. Liq. 2015. V. 211. P. 747. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2015.07.076>
12. Zhao Z., Hu J., Cheng Z. et al. // RSC Adv. 2021 Vol. 11. P. 7436–7441.

- <https://doi.org/10.1039/d0ra09572a>.
13. *Grimes W.R.* // Nucl. Appl. Technol. 1970. Vol. 8. P. 137–155.
 14. *Fredrickson G., Cao G., Gakhar R., Yoo T.* // Report INL INL/EXT-18-51033. 2018. 184 p. https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort_7123.pdf
 15. *Bimova K.C., Tulackova R., Straka M., Keppert M., Lisy F., Soucek P.* // Proc. Int. Conf. ATALANTE 2008. Montpellier (France), 2008. Paper P1_22. P. 1. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/003/40003958.pdf
 16. *Wang Y., Ge J., Zhuo W., Guo S., Zhang J.* // J. Nucl. Mater. 2019. Vol. 518. P. 162. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.03.007>
 17. *Wang Y.* Species Chemistry and Electrochemical Separation in Molten Fluoride Salt: PhD Dissertation. Blacksburg, VA (USA), 2019. 146 p. https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/102614/Wang_Y_D_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 18. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник / Под ред. Н.П. Мякишева. М.: Машиностроение, 2001. Т. 3. Кн 1. 872 с.
 19. *Van H.T., Nguyen T.M.P., Thao V., Vu T.H., Nguyen T.V., Nguyen L.H.* // Water Air Soil Pollut. 2018. Vol. 229. P. 293. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4043-3>
 20. *Bahri M.A., Calvo L., Gilarranz M.A., Rodriguez J.J., Epron F.* // Appl. Catal. B: Environmental. 2013. Vol. 138–139. P. 141. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.02.048>
 21. *Khomenko V., Raymundo-Pinero E., Beguin F.* // J. Power Sources. 2008. Vol. 177. P. 643–651. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.101>
 22. *Wang G., Yu M., Feng X.* // Chem. Soc. Rev. 2021 Vol. 50. P. 2388. <https://doi.org/10.1039/d0cs00187brsc.li/chem-soc-rev>
 23. *Atoji M.* // J. Chem. Phys. 1974. Vol. 60, N 8. P. 3324. <https://doi.org/10.1063/1.1681524>
 24. *Benson D., Li Y., Luo W., Ahuja R., Svensson G.* // Inorg. Chem. 2013. Vol. 52, N 11. P. 6402. <https://doi.org/10.1021/ic4002219>
 25. Федоров Ю.С., Самонин В.В., Зотов А.С., Хрылова Е.Д., Спиридонова Е.А., Мирославов А.Е., Акатов А.А. // Радиохимия. 2022. Т 64, № 3. С. 1.
 26. *Fergus J.W.* // Mater. Res. Bull. 1996. Vol. 31, N. 11. P. 1317. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(96\)00138-9](https://doi.org/10.1016/0025-5408(96)00138-9)