

## СОРБЦИЯ $\text{NdF}_3$ И $\text{ThF}_4$ АКТИВНЫМИ УГЛЯМИ И ЦЕОЛИТАМИ ИЗ РАСПЛАВА $\text{LiF-NaF-KF}$

© 2022 г. Ю. С. Федоров<sup>а,\*</sup>, В. В. Самонин<sup>а</sup>, А. С. Зотов<sup>а</sup>, Е. Д. Хрылова<sup>а</sup>,  
Е. А. Спиридонова<sup>а</sup>, А. Е. Мирославов<sup>б</sup>, А. А. Акатов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),  
190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26

<sup>б</sup> Радиевый институт им. В.Г. Хлопина,  
194021, Санкт-Петербург, 2-й Муринский пр., д. 28  
\*e-mail: fys54@mail.ru

Поступила в редакцию 07.07.2021, после доработки 02.09.2021, принята к публикации 09.09.2021

Исследована сорбция фторидов неодима и тория различными марками активированных углей и цеолитов из расплава фторидов щелочных металлов  $\text{LiF-NaF-KF}$ . Показано, что фторид неодима сорбируется более эффективно по сравнению с фторидом тория как цеолитами, так и активированными углями. Экспериментальные данные изотермы сорбции  $\text{Nd(III)}$  цеолитом  $\text{NaX}$  аппроксимируются уравнением Фрейндлиха в отличие от сорбции углем АГ-3, где данные описываются уравнением Ленгмюра. Рассмотрены возможные варианты механизмов сорбции для различных сорбентов. Для  $\text{Nd(III)}$  выявлена корреляция сорбционных свойств углей различных марок для отношения кислых и основных окислов на единицу поверхности.

**Ключевые слова:** фториды, расплавы, щелочные металлы, неодим, торий, сорбция, активированный уголь, цеолиты.

**DOI:** 10.31857/S0033831122030066, **EDN:** FQGFSU

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во всем мире возрос интерес к использованию расплавов солей применительно к ториевому топливному циклу [1]. Новые концепции по наработке  $^{233}\text{U}$  связаны с использованием гибридного термоядерного реактора синтез-деление [2, 3]. В качестве ториевого blankets целесообразно использовать расплав фторидов солей, содержащий сырьевой изотоп, т.е. фторид тория; в этом случае в данной системе может быть реализована непрерывная и быстрая очистка вновь наработанного изотопа и продуктов деления [1]. При таком подходе образование нежелательного изотопа  $^{232}\text{U}$  будет минимальным. Возможными эвтектиками, пригодными для blankets, являются расплавы фторидов солей, например эвтектика  $\text{LiF-ThF}_4$  или  $\text{LiF-NaF-KF}$ , в которой растворяется 32.8 мол%  $\text{ThF}_4$  при температуре  $650^\circ\text{C}$  [4]. Непрерывное выделение целевых компонентов из расплава фторидов может осуществляться с использованием сорбционных методов.

Сорбционные процессы могут использоваться и для очистки солевых топливных эвтектик от продуктов деления в жидкосолевых реакторах. Такие методы оказались бы полезными при использовании эвтектик  $\text{LiF-NaF-KF}$  [5, 6] и  $\text{LiF-BeF}_2$  [7, 8], рассматриваемых в качестве топливных солей для разного типа жидкосолевых реакторов.

Работ по исследованию сорбции из расплавов солей очень мало. Цеолит  $\text{NaA}$  использовали в динамических условиях для очистки от РЗЭ и осколочных элементов хлоридных эвтектик [9, 10] и для фторидной эвтектики  $\text{LiF-CaF}_2$  [11].

В настоящей работе изучена сорбция  $\text{NdF}_3$  и  $\text{ThF}_4$  из расплава эвтектики  $\text{LiF-NaF-KF}$  с использованием различных типов активированных углей и цеолитов в статических условиях.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследований процессов в расплавах фторидов требуется использовать особо чистые ком-

поненты, поскольку небольшие примеси могут значительно исказить результаты экспериментов. Так, для эвтектики фторидов щелочных металлов важно отсутствие воды, так как в противном случае из фторидов редкоземельных элементов (РЗЭ) и актинидов, хорошо растворимых в эвтектике  $\text{LiF-NaF-KF}$ , образуются соответствующие малорастворимые оксифториды и  $\text{HF}$ . Используемые в работе  $\text{NdF}_3$  и  $\text{ThF}_4$  не должны содержать значимых количеств оксифторидов и гидратной воды, поэтому особые требования были к составу полученных продуктов.

Фторид неодима получали смешением водных растворов нитрата неодима и фторида натрия (в мольном соотношении 1 : 3) при перемешивании без нагревания в течение 2 ч. После выпадения сиреневого хлопьеобразного осадка его промывали, отделяли, сушили на фильтре Шотта и переносили в герметичный бюкс. Непосредственно перед смешением с расплавом фторидов щелочных металлов фторид неодима сушили в вакууме при температуре  $350^\circ\text{C}$  в течение 3 ч.

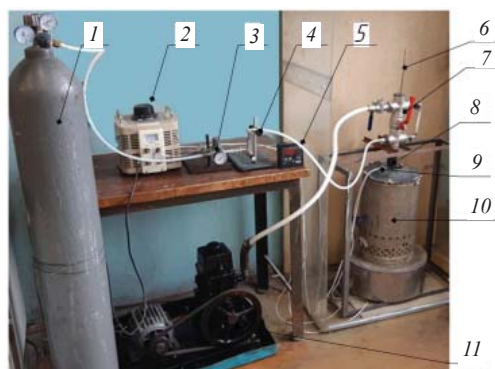
Для получения фторида тория  $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$  грели при  $200^\circ\text{C}$  в течение 1 ч, потом при  $400^\circ\text{C}$  еще 2 ч. Полученный  $\text{ThO}_2$  обрабатывали восьмикратным избытком  $\text{NH}_4\text{HF}_2$ , нагревали до  $500^\circ\text{C}$  в течение 2 ч [12].

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполнялся на дифрактометре D2 Phaser (Bruker, Германия) с использованием  $\text{CuK}_\alpha$ -излучения (напряжение рентгеновской трубки 30 кВ, сила тока 10 мА), съемку проводили в диапазоне углов  $2\theta = 7^\circ\text{--}70^\circ$  в режиме сканирования с шагом  $0.02^\circ$  со скоростью  $0.5$  град/мин. Обработку результатов проводили с использованием программы DIFFRAC.EVA.V5.0 и картотеки PDF-2 ICDD ( $\text{NdF}_3$  – PDF 01-078-1859,  $\text{ThF}_4$  – 00-015-0413).

Результаты рентгенофазового анализа полученного фторида неодима и фторида тория указывают на соответствие полученных фторидов данным картотек.

Окисленные угли получали по методике [13] обработкой перекисью водорода, затем переводили в Na-форму обработкой раствором щелочи.

Методика модифицирования активного угля фуллеренами состояла из стадий приготовления водного раствора фуллерена, пропитки активного угля, выдерживания и последующей термообра-



**Рис. 1.** Фотография установки для изучения сорбции из расплавов солей. 1 – баллон с аргоном, 2 – лабораторный автотрансформатор, 3 – мембранный регулятор давления с манометром, 4 – ротаметр, 5 – потенциометр-измеритель температуры, 6 – ручка устройства ввода адсорбента, 7 – система вентилей регулирования разряжения и подачи аргона, 8 – реактор с расплавом эвтектики, 9 – термопара, 10 – печь, 11 – вакуум-насос.

ботки при  $130^\circ\text{C}$ . Массовая доля модификатора, наносимого на углеродную поверхность, составила  $0.004\%$ . Раствор фуллерена готовили путем диспергирования рассчитанного количества фуллерена с использованием ультразвука. Состав фуллерена:  $\text{C}_{60}$  –  $95.5\%$ , остальные – высшие фуллерены. Производитель – ЗАО «ИЛИП», Санкт-Петербург.

Все использованные в работе активированные угли и цеолиты перед опытом сушили в течение 2 ч при  $200$  и  $400^\circ\text{C}$  соответственно.

Фотография установки для исследования сорбции фторидов неодима и тория активированными углями и цеолитами в статических условиях из расплава эвтектики  $\text{LiF-NaF-KF}$  при  $650^\circ\text{C}$  представлена на рис. 1. Подробная схема приведена в работе [14].

Фториды лития, калия и натрия (ч.д.а.) использовали в мольном соотношении  $\text{LiF}$  (46.5)– $\text{NaF}$  (11.5)– $\text{KF}$  (42.0) и перед опытами сушили в течение 3 ч под вакуумом при  $400^\circ\text{C}$ . Качество полученной соли проверяли по точке плавления на дериватографе; она составила  $456^\circ\text{C}$ , что практически соответствует литературным данным [1]. К высушенной соли добавляли фторид неодима или фторид тория и повторно проводили сушку в течение 2 ч под вакуумом. Опыты проводили в среде аргона при температуре  $650^\circ\text{C}$  и значительном (в 200 и более раз) избытке эвтектики, содержащей фториды неодима и тория, по отношению к исследуемым образцам

сорбента. Непосредственно сорбцию проводили в колбе (реакторе) из пирографита. Высушенный активированный уголь или цеолит помещали в специальную корзину из металлической меди с отверстиями и опускали в расплав солей. Корзину с сорбентами периодически подвергали вертикально-поступательному движению для перемешивания соли. После извлечения корзины проводили анализ на содержание  $\text{Nd(III)}$  или  $\text{Th(IV)}$  в угле или цеолите и в солевой эвтектике. Величину сорбции определяли по отношению концентрации элемента в сорбенте к массе сорбента. Из-за избытка эвтектики, содержащей фториды неодима и тория, по отношению к исследуемым образцам сорбента концентрация фторидов неодима и тория в эвтектике практически не менялась.

Пробы с углем, цеолитом и эвтектики обрабатывали серной кислотой для удаления  $\text{HF}$  и после упаривания разбавляли водой и анализировались с использованием арсеназо III в среде соляной кислоты на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ на длине волны 650 нм по методике [15]. Предварительно по используемой методике определяли фоновые значения, которые оказались близкими к нулю.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов по сорбции  $\text{Nd(III)}$  и  $\text{Th(IV)}$  из эвтектики  $\text{LiF-NaF-KF}$  при температуре  $650^\circ\text{C}$  приведены в табл. 1, из которой следует, что  $\text{Nd(III)}$  сорбируется в основном гораздо эффективнее, чем  $\text{Th(IV)}$ . При этом наилучшие сравнительные результаты по сорбции  $\text{Nd(III)}$  получены для активированного угля АГ-3 и цеолитов. Активированные угли, за исключением СКТ-6А, после нахождения в расплаве эвтектики практически не изменили внешний вид, при этом не выявлено налипания или попадания солей эвтектики внутрь сорбентов. Это установлено в результате того, что масса проб активированных углей, взятых из расплава для анализа и после извлечения сорбированных компонентов в ходе анализа, практически не изменилась, как внешний вид гранул угля. Активированный уголь СКТ-6А после сорбции в расплаве фторидов щелочных металлов претерпел разрушение и терял форму гранул с образованием спекшихся комков, содержание  $\text{Nd(III)}$  в нем определяли так же, как для цеолитов, с учетом поглощенной эвтектики.

**Таблица 1.** Величины сорбционной емкости активированных углей и цеолитов по  $\text{Nd(III)}$  и  $\text{Th(IV)}$  при сорбции из расплава фторидов  $\text{LiF-NaF-KF}$ . Температура  $650^\circ\text{C}$ , время сорбции 1.5 ч. Равновесная концентрация элементов в расплаве 0.068 ммоль/л

Марка сорбента	Концентрация в сорбенте, мг/г	
	$\text{Nd(III)}$	$\text{Th(IV)}$
ФАС	1.4	–
СКТ-6А	3.4	–
СКТ-6А окисленный, в Na-форме	0.41	–
АГ-5	2.4	–
АГ-5 (с фуллереном)	2.8	–
АГ-3	8.4	0.17
АГ-3 окисленный, в Na-форме	5.6	–
АГ-3П	1.7	0.28
АГ-ПР	0.31	0.39
Цеолит NaA	10.6	0.88
Цеолит NaX	9.5	0.92

Оба образца цеолитов после воздействия расплава эвтектики получили повреждения шаровой формы, набухли и впитали некоторое количество расплава (в среднем около 40%). Для цеолитов используемых марок эффект адгезии оказался весьма велик, что привело к затруднениям для отделения налипших солей эвтектики. Для определения количества поглощенных солей фторидов щелочных металлов использовали подобранные по одинаковой массе гранулы высушенного при  $400^\circ\text{C}$  исходного цеолита и сравнивали с массой после сорбции в эвтектике и механического отделения солей с поверхности гранул по специальной методике.

Для сорбции  $\text{Th(IV)}$  наилучшие результаты оказались у цеолитов, хотя и существенно ниже по сравнению с  $\text{Nd(III)}$ . Из табл. 1 следует, что  $\text{Th(IV)}$  цеолитами сорбируется лучше, чем активированными углями.

При окислении углей увеличивается число кислотных оксидов, что способствует увеличению ионообменных свойств [13, 16]. Некоторые активированные угли подвергали окислению для того, чтобы усилить ионообменные свойства углей, однако увеличения извлечения  $\text{Nd(III)}$  окисленными сорбентами не произошло, и даже сорбционная емкость уменьшилась. При этом следует учесть, что окис-

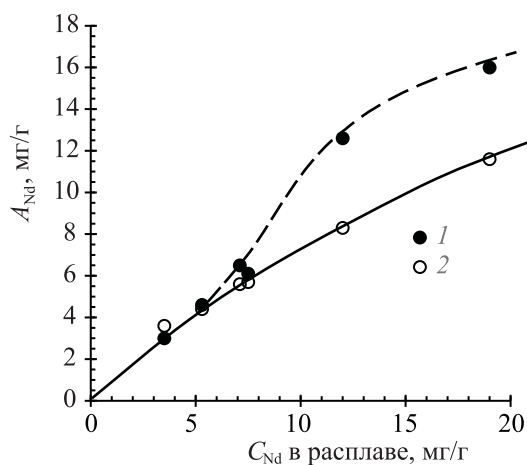


Рис. 2. Изотерма сорбции Nd(III) цеолитом NaX при 650°C: 1 – суммарное содержание Nd(III) в цеолите и поглощенной эвтектике, 2 – содержание Nd(III) в цеолите за вычетом содержания Nd(III) в эвтектике внутри цеолита.

ленные угли использовались для сорбции в натриевой форме для исключения образования фтористого водорода. Введение фуллерена в АГ-5 привело к небольшому увеличению сорбции.

На рис. 2 представлены изотерма сорбции Nd(III) цеолитом NaX при температуре 650°C с суммарным содержанием неодима в цеолите и эвтектике, поглощенной цеолитом, а также содержание неодима в цеолите за вычетом его содержания в эвтектике внутри цеолита. Доля Nd(III) в поглощенной цеолитом эвтектике определяли следующим образом. Поскольку увеличение массы цеолитов после контакта с расплавом возрастало на известную величину (в среднем на 40%), концентрацию Nd(III) в поглощенной цеолитом эвтектике приравнивали к его концентрации равновесной фазе расплава LiF–NaF–KF. Как видно из рис. 2, влияние поглощенной эвтектики начинает сказываться на поглощении Nd(III) при его концентрациях в эвтектике более 5 мг/г. Это связано с тем, что концентрация в поглощенной цеолитом эвтектике больше количества, поглощенного непосредственно самим цеолитом, поэтому учет доли Nd(III), поглощенного эвтектикой, приводит к снижению величины сорбции самим цеолитом.

На рис. 3 представлены сравнительные изотермы сорбции Nd(III) цеолитом NaX, полученной в ходе данной работы, и активированным углем АГ-3 из работы [14]. Из рис. 3 видно, что изотермы сор-

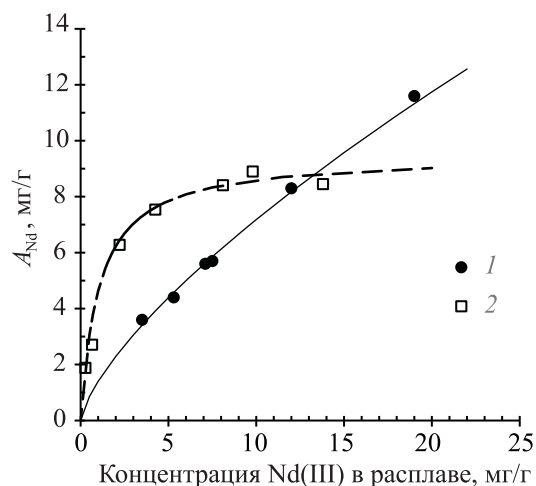


Рис. 3. Изотерма сорбции Nd(III) цеолитом NaX (1) и активированным углем АГ-3 (2) при 650°C: сплошная линия – аппроксимация экспериментальных результатов уравнением Фрейндлиха для цеолита NaX (за вычетом доли эвтектики в сорбенте), штриховая – аппроксимация экспериментальных результатов уравнением Ленгмюра для АГ-3.

бции Nd(III) активированным углем АГ-3 и цеолитом имеют различный характер, при этом экспериментальные результаты описываются уравнениями Ленгмюра (АГ-3) и Фрейндлиха (NaX):

$$A_{Nd} = 1.4 C^{0.802},$$

где  $A_{Nd}$  – величина сорбции цеолитом NaX, мг/г;  $C$  – концентрация Nd(III) в эвтектике, мг/г.

Таким образом, можно предположить, что сорбция Nd(III) углем АГ-3 происходит, по-видимому, на поверхности угля (вероятно, имеет место процесс хемосорбции), а сорбция цеолитом осуществляется в объеме за счет ионного обмена, как предполагают некоторые исследователи [9, 10].

Сравнение сорбционной способности цеолита NaX и активного угля АГ-3 по результатам построенных изотерм адсорбции показывает, что в области малых концентраций, характерных для реализации сорбционных процессов, значительное преимущество имеет активный уголь. При этом энергия взаимодействия неодима с углеродной поверхностью, содержащей ионогенные группы, достаточно высока в отличие от энергии связывания катиона с матрицей цеолита по механизму обмена. Поэтому при малых концентрациях неодима в расплаве (в данном примере ниже 5 мг/г) изотерма адсорбции для активного угля идет круче по сравнению с цеолитом и сорбционная емкость активного угля



Таблица 2. Параметры активированных углей

Образец АУ	$S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /г	Объем пор, см <sup>3</sup> /г				Содержание оксидов, мг-экв/г	
		$V_{ми}$		$V_{ме}$	$V_{ма}$	кислые	основные
		$V_{01ми}$	$V_{02ми}$				
АГ-ПР	1100	0.26	0.11	0.11	0.45	0.22	0.49
ФАС	1770	0.53	–	0.49	0.015	0.04	0.28
АГ-3П	1000	0.24	0.25	0.37	0.64	0.13	0.27
АГ-5	1250	0.22	0.11	0.12	0.45	0.09	0.39
АГ-5+F	710	0.24	0.11	0.12	0.47	0.10	0.28
СКТ-6А	1670	0.59	–	0.20	0.20	0.34	0.82
АГ-3	1500	0.20	0.13	0.10	0.45	0.19	0.35

в данной области превышает аналогичную характеристику цеолита более чем в два раза.

С другой стороны, возможно и другое обоснование процесса сорбции. Цеолиты NaA и NaX состоят из тетраэдров SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, образующих открытую каркасно-полостную структуру [AlSiO<sub>4</sub>]<sup>-</sup> с отрицательным зарядом, который компенсируется катионами металлов. Вероятно, следует учитывать возможность реакций, протекающих с оксидами алюминия и кремния. В расплавах фторидов методом рентгенофазового анализа идентифицировано образование AlNdO<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в присутствии LiF и NdF<sub>3</sub> [17]. Оксид кремния в расплаве LiF–NaF–KF может взаимодействовать при температуре 600°C с ионами фтора, образуя небольшое количество [SiO<sub>3</sub>F]<sup>3-</sup>, а также [Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>]<sup>2-</sup> за счет разрушения мостиковой связи Si–O–Si [18]. Этим же, по-видимому, можно объяснить частичное разрушение цеолитов в ходе сорбции и сильный эффект адгезии с расплавом.

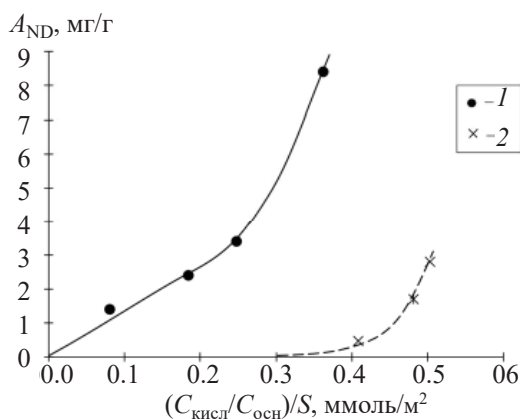
Для оценки сравнительной сорбционной активности активированных углей в табл. 2 приведены некоторые ключевые параметры используемых углей. Усредненные данные по размерам пор и удельной поверхности (за исключением АГ-5 и АГ-5+F) взяты из справочника [19], остальные параметры получены в ходе данной работы.

В табл. 2 образцы активированных углей представлены в порядке увеличения сорбционных свойств по отношению к Nd(III). Как видно из представленной таблицы, не отслеживается влияние объема характерных типов пор на сорбционную способность данных активных углей на их сорбционную способность по неодиму. Определенная закономерность сорбции Nd(III) связана с содержанием как кислых, так и основных оксидов, которые, как правило, расположены на поверхности активи-

рованных углей. В процессе сорбции играют роль как кислые оксиды, так и основные [13], которые, например, могут поглощать анионные комплексы из водных сред [20], а также большая поверхность сорбента, на которой располагаются оксиды. Определенная роль оксидов на поверхности углей может быть связана с образованием оксидов или оксифторидов с NdF<sub>3</sub> аналогично тому, как это происходит при добавлении оксида натрия [21] или оксида лития [22, 23] в расплав LiF–NaF–KF.

Для установления возможной корреляции на рис. 4 представлена зависимость величины сорбции Nd(III) от относительного содержания кислых оксидов (отношение кислых окислов к основным) на единицу поверхности сорбента.

Из рис. 4 видно, что исследуемые угли расположились в две группы. В первой группе адсорбентов находятся газовые угли ФАС, АР-5, СКТ-6 и АГ-3, которые отличаются высокой характеристической энергией адсорбции в микропорах [19]. Ко второй группе относятся рекуперационные угли АГ-ПР и АГ-3П, которые предназначаются для выделения поглощенных компонентов после адсорбции, обладают более низкой характеристической энергией [19]. Вследствие этого при равных значениях плотности активных групп на поверхности газовые угли, вероятно, обладают более высокой сорбционной емкостью по Nd(III). И наоборот, равная сорбционная емкость по неодиму достигается при гораздо более низкой плотности ионогенных групп для газовых углей. Ко второй группе также относится газовый уголь АГ-5, модифицированный фуллеренами (АГ-5F), что, по-видимому, происходит вследствие того, что его удельная поверхность в результате модифицирования существенно уменьшилась.



**Рис. 4.** Корреляционная зависимость величины сорбции Nd(III) от соотношения кислотных и основных оксидов на единицу поверхности. Данные из табл. 1 и 2. Угли по мере возрастания величины  $A_{\text{Nd}}$ : 1 – ФАС, АГ-5, СКТ-6, АГ-3; 2 – АГ-ПР, АГ-ЗП, АГ-5Ф.

Чем выше плотность кислотных групп относительно основных, тем более эффективно проходит извлечение Nd(III). Следует отметить, что не получается разумных корреляций при использовании только кислотных или только щелочных оксидов. Вероятно, оксиды обоих типов влияют на процесс извлечения Nd(III), при этом Th(IV) активными углями извлекается слабо. Разница в величинах сорбционного извлечения Nd(III) и Th(IV) может быть связана как с большими размерами последнего, так и с большей прочностью его фторидных комплексов. Известно, что Nd(III) в расплавах LiF–NaF–KF образует анионные комплексы  $\text{NdF}_6^{3-}$  [24], а Th(IV) образует более сложные фторидные комплексы с преобладанием  $[\text{ThF}_8]^{4-}$  [25]. Кислые оксиды, содержащиеся на поверхности активных углей, могут участвовать в образовании оксифторидов NdOF [26], которые фиксируются в порах угля, или более сложных комплексов по аналогии с сорбцией активированными углями из водных растворов анионных комплексов платины и других элементов [20].

При этом следует учесть, что окисленные угли использовали для сорбции в натриевой форме для исключения образования фтористого водорода. По всей вероятности, процесс поглощения крупного катиона Nd(III) происходит не за счет ионного обмена на катион натрия, а по хорошо известному в технике применения ионитов механизму хелатообразования. В этом случае замена протона в кислотных группах на натрий полностью нивелирует

процесс присоединения за счет образования хелатных соединений.

Следует отметить, что можно с достаточной долей уверенности исключить влияние на сорбцию потенциально не удаляемой при длительной сушке под вакуумом воды, так как в случае наличия воды образование оксифторида тория происходило бы эффективнее по сравнению с фторидом неодима, чего не наблюдалось в ходе работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статических условиях исследована сорбция Nd(III) и Th(IV), вводимых в виде соответствующих фторидов, из расплавов фторидов щелочных элементов с использованием активированных углей и цеолитов. Для всех исследуемых сорбентов величина сорбции Nd(III) значительно выше по сравнению с Th(IV). Цеолиты NaA и NaX в ходе сорбции частично разрушаются, по-видимому, за счет взаимодействия алюминия и кремния с анионом фтора. При этом сорбционная емкость по Nd(III) составила примерно 10 мг/г для концентрации в эвтектике 0.068 ммоль/л, а по Th(IV) – менее 1 мг/г для такой же концентрации в эвтектике. Экспериментальные изотермы сорбции Nd(III) цеолитом NaX аппроксимируются уравнением Фрейндлиха. Возможный механизм сорбции может быть связан либо с ионным обменом, либо с образованием соединения  $\text{AlNdO}_3$ .

Проведено сравнение извлечения Nd(III) и Th(IV) различными марками активированных углей. Наибольшей сорбционной емкостью для Nd(III) обладает уголь АГ-3, при этом Th(IV) слабо извлекается углями, исследованными в ходе работы. Отмечено, что экспериментальные данные для изотермы сорбции Nd(III) углем АГ-3 аппроксимируются уравнением Ленгмюра. Обнаружена корреляция величины сорбции Nd(III) различными марками углей с относительной величиной содержания кислотных оксидов на единицу поверхности углей. Сделано предположение, что сорбция углями Nd(III) происходит, вероятно, за счет образования оксифторидов, которые фиксируются в порах углей.

Различие сорбционных свойств Nd(III) и Th(IV) при использовании активных углей и цеолитов указывает на возможность разработки сорбционных

процессов очистки расплавов фторидных эвтектик, основанных на селективности сорбции.

#### ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

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

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Molten Salt Reactors and Thorium Energy / Ed. T. J. Dolan. Elsevier, 2017. 815 p.
- Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И., Изнатьев В.В., Цибульский В.Ф., Андрианова Е.А. // Энергетическая политика. 2017. № 3. С. 12.
- Velikhov E.P., Kovalchuk M.V., Azitov E.A., Ignatiev V.V., Subbotin S.A., Tsibul'skiy V.F. // At. Energy. 2013. Vol. 114, N 3. P. 193.  
<https://doi.org/10.1007/s10512-013-9695-x>
- Lizin A.A., Tomilin S.V., Gnevashov O.E., Gazizov R.K., Osipenko A.G., Kormilitsyn M.V., Nezgovorov N.Y., Naumov V.S., Ponomarev L.I. // At. Energy. 2013. Vol. 115, N 1. P. 22.  
<https://doi.org/10.1007/s10512-013-9742-7>
- Ponomarev L.I., Belonogov M.N., Volkov I.A., Simonenko V.A., Sheremet'eva U.F. // At. Energy. 2019. Vol. 126, N 3. P. 139.  
<https://doi.org/10.1007/s10512-019-00528-y>
- Ponomarev L.I., Belonogov M.N., Volkov I.A., Simonenko V.A., Sheremet'eva U.F. // At. Energy. 2019. Vol. 126, N 3. P. 150.  
<https://doi.org/10.1007/s10512-019-00529-x>
- Ignatiev V.V., Feynberg O.S., Zagnitko A.V., Merzlyakov A.V., Surenkov A.I., Panov A.V., Subbotin V.G., Afonichkin V.K., Khokhlov V.A., Kormilitsyn M.V. // At. Energy. 2012. Vol. 112, N 3. P. 157.  
<https://doi.org/10.1007/s10512-012-9537-2>
- Delpesch S., Merle E., Heuer D., Allibert M., Ghetta V., Le-Brun C., Doliger X., Picard G. // J. Fluorine Chem. 2009. Vol. 130, N 1. P. 11.  
<https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2008.07.009>
- Pereira C., Babcock B.D. // Proc. Second Int. Symp. «Extraction and Processing for the Treatment and Minimization of Wastes». Scottsdale, Arizona, Oct. 27–30, 1996. P. 16. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/28/019/28019520.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/019/28019520.pdf)
- Кузин М.А., Макаров А.О. // Экология и пром-сть России. 2014. № 12. С. 8.
- Cassayre I.L., Malmbeck R., Harrison M., De Angelis G., Caravaca C., Bourg S. // Int. Conf. Pyroprocessing Research. Fontana, WI, Sept. 26–29, 2012. [https://www.ne.anl.gov/nce/pyroprocess-conference/presentations/Tuesday\\_PM/Cassayre\\_Pyrochemical%20Separation.pdf](https://www.ne.anl.gov/nce/pyroprocess-conference/presentations/Tuesday_PM/Cassayre_Pyrochemical%20Separation.pdf)
- Руководство по неорганическому синтезу / Под ред. Г. Брауэра. М.: Мир, 1985. С. 1225.
- Тарковская И.А. Окисленный уголь. Киев: Наук. думка, 1981. 200 с.
- Федоров Ю.С., Самонин В.В., Зотов А.С., Хрылова Е.Д., Спиридонова Е.А., Мирославов А.Е., Акатов А.А. // Радиохимия. 2021. Т. 63, № 6. С. 525.
- Савин С.Б. Органические реагенты группы арсеназо III. М.: Атомиздат, 1971. 348 с.
- Jaramillo J., Alvarez P. M., Gomez-Serrano V. // Fuel Process. Technol. 2010. Vol. 91. P. 1768.
- Abbasalizadeh, A., Malfliet, A., Seetharaman, S., Sietsma, J., Yang, Y. J. Sustain. Metall. 2017. Vol. 3, N 3. P. 627.  
<https://doi.org/10.1007/s40831-017-0120-x>
- Suzuki Y., Inoue Y., Yokota M., Takuya Goto T. // J. Electrochem. Soc. 2019. Vol. 166, N 13. P. 564.
- Активные угли, эластичные сорбенты, катализаторы, осушители и химические поглотители на их основе: Номенклатурный каталог / Под ред. В.М. Мухина. М.: Руда и металлы, 2003. 278 с.
- Воробьев-Десятовский Н.В., Кубышкин С.А., Ибрагимова Р.И., Каичев В.В., Дубровский Я.А., Бабарков В.Н., Пичугина Д.А. // ЖОХ. 2012. Т. 82, № 3. С. 390.
- Ponomarev L.I., Fedorov Y.S., Miroslavov A.E., Degtyarev A.M. // At. Energy. 2016. Vol. 121, N 1. P. 63.  
<https://doi.org/10.1007/s10512-016-0162-3>
- Мирославов А.Е., Степанова Е.С., Федоров Ю.С., Легин Е.К., Хохлов М.Л., Кольцов В.В., Тюпина М.Ю. Патент RU 2637256 C1. 2016 // Б.И. 2017. № 34.
- Rollet A.L., Veron E., Bessada C. // J. Nucl. Mater. 2012. Vol. 429. P. 40.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.05.010>
- Хохряков А.А., Вершинин А.О., Пайвин А.С., Лизин А.А. // Расплавы. 2015. № 4. С. 3.
- Dai J., Long D., Huai P., Li Q. // J. Mol. Liq. 2015. Vol. 211. P. 747–753.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2015.07.076>
- 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)