

25. **Химическая** технология облученного ядерного горючего. Под ред. В.Б. Шевченко. М.: Атомиздат, 1971. 448 с.
26. **Bettis E.** The aircraft reactor experiment-operation. — Nucl. Sci. Engng, 1967, v. 2, № 6, p. 841—853.
27. **McPherson H.** The molten salt adventure. — Ibid., 1985, v. 90, p. 374—380.
28. **Загнитько А.В., Бочагин Ф.С.** Исследование солевой композиции 66LiF — 34BeF_2 (мол. %) для получения ^{99}Mo , $^{89}\text{SrF}_2$ в ампульном устройстве на реакторе ИР-8. Отчет ИМЛ РНЦ «Курчатовский институт», 2008. 15 с.
29. **Sousek P., Chuchvalcova Bimova K., Lisy F. e.a.** Development of electrochemical separation methods from molten fluoride salt media. — In: Proc. Global'2005. Japan, 2005, 9—13 Oct., Paper 062.
30. **Degtyarev A.M., Feinberg O.S., Karmanov F.I. e.a.** Subcritical molten salt reactor with fast/intermediate spectrum for minor actinides transmutation. — In: Proc. Global'2011. Japan, 2011, 11—16 Dec., Paper 386820.
31. **Дегтярев А.М., Коляскин О.Е., Мясников А.А. и др.** Жидкосольевой подкритический реактор-сжигатель трансплутониевых актиноидов. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 4, с. 183—188.
32. **Olson L., Ambrosek J., Sridharan K. e.a.** Materials corrosion in molten LiF — NaF — KF salt. — J. Fluor. Chem., 2009, v. 130, № 1, p. 67—73.
33. **Дегтярев А.М., Пономарев Л.И.** Жидкосольевой реактор с быстрым спектром нейтронов. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 6, с. 367—368.

Поступила в Редакцию 29.03.13

УДК 546.161; 546.798.2; 546.65; 621.039.522

РАСТВОРИМОСТЬ PuF_3 , AmF_3 , CeF_3 , NdF_3 В РАСПЛАВЕ LiF — NaF — KF

Лизин А.А., Томилин С.В., Гневашов О.Е., Газизов Р.К., Осипенко А.Г., Кормилицын М.В., Баранов А.А., Захарова Л.В. (ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград), Наумов В.С. (ГНЦ РФ — ФЭИ, г. Обнинск), Пономарев Л.И. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

В настоящей работе измерена растворимость PuF_3 и AmF_3 в эвтектике LiF — NaF — KF и показано, что она в 10 раз превышает все известные до сих пор значения. Кроме того, измерена растворимость фторидов лантаноидов CeF_3 , NdF_3 и показано, что они могут быть использованы как имитаторы PuF_3 и AmF_3 соответственно.

Подготовка компонентов для экспериментов. Для изучения растворимости PuF_3 , AmF_3 , CeF_3 , NdF_3 в эвтектике $46,5\text{LiF}$ — $11,5\text{NaF}$ — 42KF исходные фториды готовили специальным образом индивидуально для каждого состава. Для идентификации и контроля фазового состава получаемых трифторидов, а также проб расплавов с растворенными трифторидами использовали рентгенофазовый анализ. Радиоактивные порошки анализировали фотометодом с регистрацией на рентгеновскую пленку, нерадиоактивные — дифрактометрическим. Радиоактивные порошки запаивали в стеклянные капилляры, для измерений использовали камеру Дебая—Шеррера типа РКУ-114М с медным антикатодом и никелевым фильтром с регистрацией на пленку. Анализ рентгенограмм и расчет функций углов рассеяния проводили

на лабораторном измерительном комплексе ПИКАР с учетом основных систематических ошибок [1, 2]. Интенсивность рефлексов оценивали визуально по маркам почернения по 100-балльной шкале с шагом $2^{1/4}$. Обработку и расчет рентгенограмм осуществляли с помощью прикладных программ. Для идентификации фазового состава продуктов использовали картотеку дифракционных данных JCPDS.

Фториды лития и натрия получали путем газофазного гидрофторирования особочистых карбонатов при наличии паров безводного фтористого водорода при 300°C и последующей выдержке до полного удаления остатков влаги и летучих примесей. Фторид калия получали из водного раствора K_2CO_3 (ч.д.а.) путем добавления 15%-ного водного раствора HF (о.с.ч.) до слабокислой реакции и последующей фильтрации, упаривания и охлаждения раствора до 20 — 22°C . Выпавшие кристаллы KF отфильтровывали, отжимали и высушивали до постоянной массы при 130 — 150°C .

Безводные фториды лития, натрия и калия шихтовали, загружали в графитовый тигель вместо металлического — для предотвращения загрязнения продуктами коррозии и плавляли

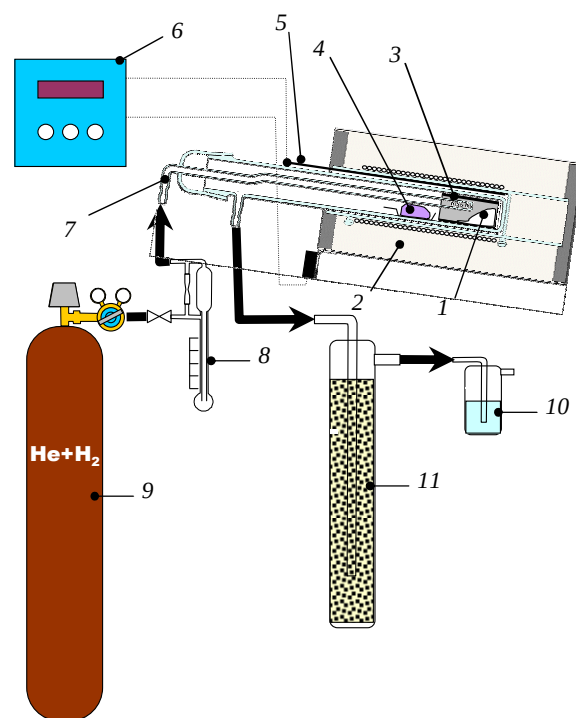
при 700—720 °С. Суммарное содержание катионов примесей (Ca, Mg, Zn) и элементов подгруппы железа, а также примесей анионов в приготовленной солевой системе LiF—NaF—KF не превышало $10^{-3}\%$ по массе. Безводный трифторид церия получали из нитрата церия (III) $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Нитрат растворяли в дистиллированной воде, к полученному раствору добавляли 1,5-кратный избыток концентрированной плавиковой кислоты для осаждения трифторида церия, полученный осадок фильтровали и промывали на фильтре разбавленным раствором плавиковой кислоты концентрацией 0,05 М. Все химические операции с плавиковой кислотой проводили в полипропиленовой посуде. После фильтрации и промывки осадок трифторида церия высушивали при 100 °С на воздухе. Высушенный осадок диспергировали в агатовой ступке. Трифторид неодима был изготовлен фирмой Sigma-Aldrich (США) с чистотой продукта более 99,99%.

Безводный трифторид плутония получали из диоксида плутония, выделенного электрохимическим методом из расплава хлоридов щелочных металлов. Для этого исходную навеску PuO_2 массой 3,5 г растворяли в смеси 10М HNO_3 + 0,05М HF при 100 °С в течение трех недель. После полного растворения диоксида интенсивно зеленый нитратный раствор плутония (IV) разбавляли до концентрации ~4,7 М азотной кислотой. К полученному нитратному раствору плутония в полипропиленовой колбе последовательно добавляли раствор сульфаминовой и аскорбиновой кислот. После добавления аскорбиновой кислоты исходный зеленый раствор плутония изменял окраску на синюю, что свидетельствовало о восстановлении плутония до трехвалентного состояния.

После полного восстановления плутония к полученному раствору добавляли небольшой (25%) избыток концентрированной плавиковой кислоты (45% по массе HF), полученный осадок тщательно перемешивали, суспензию после осаждения выливали в специально приготовленную пластиковую воронку с бумажным фильтром. Осадок отделяли от фильтрата и промывали разбавленной плавиковой кислотой. В процессе фильтрации наблюдали изменение

окраски осадка от светло-фиолетового до бледно-розового. Осадок высушивали на воздухе при комнатной температуре, цвет осадка при этом не изменялся. По данным рентгенографии он представлял собой кристаллогидрат тетрафторида плутония ($\text{PuF}_4 \cdot 1,6\text{H}_2\text{O}$), который затем для повторного восстановления плутония до трехвалентного состояния и обезвоживания трифторида подвергали термообработке в токе особочистой гелий-водородной смеси ($\text{He} + 5,6\% \text{H}_2$) при наличии фторида аммония с постепенным повышением температуры от 300 до 450 °С. При достижении 325 °С наблюдались слабые рефлекссы безводного гексагонального PuF_3 . При этом цвет фторида изменился от бледно-розового до шоколадно-светло-коричневого со слегка пурпурным оттенком. Схема установки для получения PuF_3 из гидратированного PuF_4 показана на рис. 1.

Безводный AmF_3 получали из диоксида ^{243}Am , произведенного в отделении радионуклидных источников и препаратов ОАО «ГНЦ НИИАР». Исходный препарат $^{243}\text{AmO}_2$ в коли-



Р и с. 1. Схема установки для получения PuF_3 из гидратированного PuF_4 : 1 — лодочка с порошком $\text{PuF}_4 \cdot 1,6\text{H}_2\text{O}$; 2 — электрическая печь; 3 — никелевый стакан; 4 — фторид аммония; 5 — ячейка для сушки $\text{PuF}_4 \cdot 1,6\text{H}_2\text{O}$; 6 — колонка с химическим поглотителем; 7 — барботер; 8 — ротаметр для измерения расхода газа; 9 — газовый баллон; 10 — блок регулировки температуры печи; 11 — термopара

честве 1 г помещали в тefлоновый стакан и добавляли 6М раствор азотной кислоты. Характеристики препарата приведены в табл. 1. Препарат растворяли в кварцевой ячейке при 100 °С до получения однородного нитратного раствора. После полного растворения добавляли избыточное количество плавиковой кислоты и переводили диоксид америция в трифторид. Полученный осадок центрифугировали, промывали водой и сушили на воздухе при 90 °С. Остаточную воду удаляли при 450 °С в токе аргона высокой чистоты при наличии гидрофторида аммония. Полученный трифторид америция содержал в своем составе только адсорбированную воду, которая легко удалялась без пирогидролита в токе чистого аргона.

Таблица 1. Характеристики оксида ^{243}Am , использованного для синтеза AmF_3

Характеристика препарата	Требования ТУ 95 1669—97	Фактическое значение
Масса препарата, г		1,02
Масса америция в препарате, г		0,89
Активность препарата, ГБк		19,1
Удельная активность ^{243}Am , ГБк/г	>6	6,21
Радионуклидная чистота, %	>15	33,2
Изотопный состав америция, %:		
^{243}Am	>96	96,55
^{241}Am	—	3,45
Массовая доля америция, %	>86	87,1
Массовая доля ^{244}Cm , %	<0,5	0,28
Отношение суммарной активности ^{242}Cm и ^{244}Cm к активности ^{243}Am	<4	1,37
Отношение суммарной активности продуктов деления к активности ^{243}Am	<0,05	$<4 \cdot 10^{-3}$
Массовая доля нерадиоактивных примесей, %	<1	0,67

Из полученных порошков безводных CeF_3 , NdF_3 , PuF_3 , AmF_3 при давлении 200 МПа прессовали таблетки диаметром ~5 мм и спекали в

очищенном от влаги и кислорода аргоне высокой чистоты марки 5.5 при 700 °С в течение 2 ч. Спеченные таблетки CeF_3 имели светло-желтый цвет, NdF_3 — светло-розовый с фиолетовым оттенком, PuF_3 — серый цвет с фиолетовым оттенком, таблетки AmF_3 — желтую окраску с розовым оттенком. Анализ показал, что рентгенограммы таблетки содержат только дифракционные рефлексы монофазных безводных трифторидов.

Методика измерения растворимости.

Установка для изучения растворимости фторидов состоит из никелевой ячейки с герметичной крышкой, в которой предусмотрены проходки в виде трех никелевых трубок: для загрузки таблеток трифторидов, для контролирующей термопары и трубки для отбора проб (рис. 2). Герметичная ячейка продувалась аргоном высокой чистоты.

Таблетки трифторидов столбиком загружали в трубку-подвеску диаметром 6 мм из расчета наибольшей растворимости при максимальной температуре исследований. Расплав загружали в никелевый тигель, размещенный на дне ячейки. Для предотвращения падения, просыпания таблеток и свободного доступа расплава соли к растворяемым таблеткам в нижней части трубки

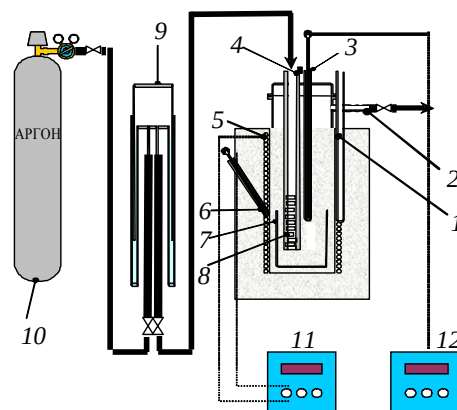


Рис. 2. Принципиальная схема установки для изучения растворимости трифторидов актиноидов и лантаноидов: 1 — никелевая ячейка; 2 — газоотводящая трубка; 3 — термопара в чехле для контроля температуры в зоне расплава; 4 — проходка для загрузки трубки с таблетками трифторидов и подачи аргона; 5 — электрическая печь; 6 — термопара регулировки температуры печи; 7 — никелевый тигель с расплавом; 8 — никелевая трубка с загруженными таблетками трифторида; 9 — газгольдер; 10 — газовый баллон с аргоном высокой чистоты; 11 — блок регулировки температуры печи; 12 — блок измерения температуры в зоне расплава

с закрытым перфорированным дном были предусмотрены боковые вертикальные разрезы.

После установления первой необходимой температуры 550 °С трубку с загруженными таблетками опускали в расплав до дна тигля и выдерживали в течение 24 ч до полного насыщения расплава растворенными таблетками, после чего трубку с таблетками приподнимали над расплавом и выдерживали в течение 1 ч для его стекания обратно в тигель. Пробы для анализа отбирали никелевым капилляром с закрепленной на конце никелевой сеткой с диаметром пор 40 мкм, в котором создавали небольшой вакуум с помощью винтового дозатора. После остывания пробу извлекали из капилляра, помещали в герметичные пробирки и передавали на анализ, трубку с нерастворенными таблетками вновь опускали до дна тигля, температуру в печи повышали до следующей температурной точки, и все операции повторяли.

Для проверки отсутствия нерастворенной фазы трифторидов в расплаве, корректности основного пробоотбора, а также правильности расчета растворимости трифторидов по результатам химического анализа после окончания измерений капилляром без сетки отбирали пробу расплава со дна тигля. Для измерения растворимости CeF_3 в тигель загружали 1,2 г соли $46,5\text{LiF}—11,5\text{NaF}—42\text{KF}$, в трубку-подвеску помещали 21 таблетку CeF_3 общей массой 4,22 г из расчета максимально возможной растворимости ~42 мол. доли. Эксперимент проводили при 600 и 700 °С. Анализ пробы со дна тигля не обнаружил кристаллической фазы CeF_3 , но указал на наличие фаз типа KCeF_4 , K_2CeF_5 , $(\text{Na}, \text{K})_7\text{Ce}_6\text{F}_{31}$.

Для измерения растворимости NdF_3 в трубку загружали 3 г трифторида неодима (15 таблеток), в тигель — 1 г соли. Растворимость изучали в температурном диапазоне 550—700 °С с шагом 50 °С. Рентгенографический анализ пробы со дна тигля свидетельствовал об отсутствии кристаллической фазы NdF_3 , но показал несколько широких рефлексов, не поддающихся интерпретации.

Для измерения растворимости PuF_3 в тигель загружали 0,65 г солевой системы. В трубку по-

мещали таблетки общей массой 3 г, что соответствует концентрации PuF_3 ~40 мол. доли. Расплав выдерживали при 550, 600, 650, 700 °С в течение 24 ч в каждой точке. Пробы при 550 и 600 °С имели светло-фиолетовую, при 650 и 700 °С интенсивную темно-фиолетовую окраску, что визуально указывает на трехвалентное состояние фторида плутония в расплаве. При анализе пробы со дна тигля не найдено кристаллической фазы PuF_3 , но обнаружены фазы типа KPu_2F_7 , KPuF_4 , NaPuF_4 .

Для измерения растворимости AmF_3 в тигель загружали 0,2 г солевой системы $46,5\text{LiF}—11,5\text{NaF}—42\text{KF}$. В трубку помещали четыре таблетки общей массой 1,1 г, что соответствует расчетной концентрации ~45 мол. доли. Пробы расплава имели насыщенный желтый цвет. После окончания эксперимента в нижней части трубки обнаружены остатки нерастворенной таблетки. В пробе со дна тигля кристаллическая фаза AmF_3 не обнаружена, но рентгенограмма пробы содержит несколько широких рефлексов, не поддающихся интерпретации. Рентгенографический анализ нерастворенных и смоченных расплавом таблеток подтвердил наличие фаз трифторидов церия, неодима, плутония и америция.

Все пробы расплавов с растворенными трифторидами церия, неодима, плутония и америция, отобранные для анализа и закристаллизованные при комнатной температуре, растворяли в концентрированной азотной кислоте с добавкой 0,1 М водного раствора H_3BO_3 .

Концентрацию плутония и америция в полученных растворах определяли методами α -спектрометрии. Спектры α -излучения регистрировали с помощью полупроводниковых α -спектрометров с поверхностно-барьерными $\text{Si}(\text{Au})$ -детекторами ДКП с.д.-25 и ДКП с.д.-1000 энергетическим разрешением 30 кэВ по линии 5499 кэВ ^{238}Pu . Для калибровки α -спектрометров использовали образцовые спектрометрические α -источники. α -Спектры обрабатывали по программе ESBS-7x Green Star, которая предназначена для анализа α -спектров, полученных на полупроводниковых детекторах с помощью спектрометрических плат SBS. В качестве ос-

новного метода анализа в программе используется разложение спектра по стандартным спектрам α -излучающих нуклидов. Массу плутония и америция определяли по суммарной α -активности их изотопов. Для определения суммарной α -активности Pu и Am их азотно-кислые растворы (0,2 мл) наносили на диски из коррозионно-стойкой стали 10X18H9T диаметром 20, толщиной 0,5 мм с диаметром активного пятна 15 мм, ограниченным контуром из полистирола. Мишени с растворами сушили под лампой. Ошибка в определении содержания указанных актиноидов не превышала 10—12%.

Концентрацию церия в азотно-кислых растворах определяли с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой OPTIMA 2100 DV фирмы PERKIN ELMER Corporation с использованием стандартной распылительной камеры Scott-Type и распылителя с сапфировым наконечником GemTip. Раствор в распылитель подавался перистальтическим насосом. Для построения калибровочных зависимостей и определения концентрации церия в пробах были приготовлены серии образцов сравнения с различной концентрацией церия. Построение градуировочных зависимостей осуществлялось автоматически по программе WinLab по линейной модели, концентрация в пробе рассчитывалась автоматически с учетом сигнала «холостого» раствора. Погрешность в определении церия не превышала 7%.

Концентрацию неодима в азотно-кислых растворах определяли спектрофотометрическим методом по интенсивности полос поглощения на характеристической длине волны 794 и 575,5 нм. Для работы использовали регистрирующий спектрофотометр Beckman DU6-40. В предварительных экспериментах на стандартном растворе неодима, приготовленном растворением навески Nd_2O_3 в фиксированном объеме 1 моль/л HNO_3 , были определены коэффициенты молярного погашения $\varepsilon_{575,5} = 6,5$ и $\varepsilon_{794} = 9,2$ и проверена справедливость выполнения закона Бугера—Ламберта—Бера в указанных условиях. Оптическую плотность Nd(III) определяли по высоте пика аналитической линии на 794 нм. Погрешность в определении неодима не превышала 10%.

Растворимость. Результаты измерения растворимости PuF_3 , AmF_3 , CeF_3 , NdF_3 в эвтектике $46,5\text{LiF}—11,5\text{NaF}—42\text{KF}$ при 550—700 °C приведены в табл. 2, 3. Содержание актиноида или лантаноида, а также растворимость соответствующего ему трифторида вычисляли по формуле

$$S = 100 \left[1 + \frac{1}{M_{\text{FL}}} \left(100 \frac{M_{\text{ак}}}{m_{\text{ак}}} - M_{\text{акF}_3} \right) \right]^{-1},$$

где M_{FL} , $M_{\text{ак}}$, $M_{\text{акF}_3}$ — молекулярная масса $46,5\text{LiF}—11,5\text{NaF}—42\text{KF}$, актиноида (лантаноида) и трифторида актиноида (лантаноида) соответственно; $m_{\text{ак}}$ — массовая доля актиноида (лантаноида) в расплаве, %.

Т а б л и ц а 2. Растворимость PuF_3 , AmF_3 в эвтектике $\text{LiF}—\text{NaF}—\text{KF}$

T , °C	Содержание Pu, % по массе	Растворимость PuF_3 , мол. доля	Содержание Am, % по массе	Растворимость AmF_3 , мол. доля
550	25,6	$6,1 \pm 0,6$	45,7	$15,1 \pm 1,8$
600	38,3	$11,1 \pm 1,1$	62,4	$31,6 \pm 3,1$
650	53,3	$21,3 \pm 2,1$	63,6	$33,5 \pm 3,4$
700	62,8	$32,8 \pm 3,3$	68,6	$43,2 \pm 4,3$

Т а б л и ц а 3. Растворимость CeF_3 , NdF_3 в солевой системе $\text{LiF}—\text{NaF}—\text{KF}$

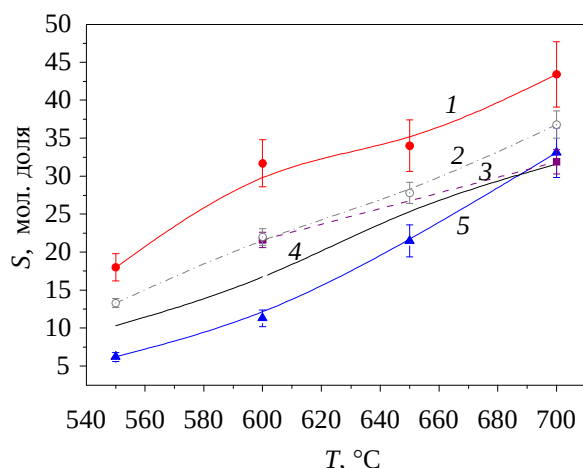
T , °C	Содержание Ce, % по массе	Растворимость CeF_3 , мол. доля	Содержание Nd, % по массе	Растворимость NdF_3 , мол. доля
550			$30,7 \pm 1,5$	$13,3 \pm 0,6$
600	40,4	$21,6 \pm 1,0$	$41,5 \pm 2,1$	$22,0 \pm 1,1$
650			$46,8 \pm 2,3$	$27,8 \pm 1,4$
700	49,0	$31,8 \pm 1,6$	$53,0 \pm 2,6$	$36,8 \pm 1,8$
750			$52,6 \pm 2,6$	$36,2 \pm 1,6$
800			$53,0 \pm 2,6$	$36,8 \pm 1,8$

Зависимость растворимости изученных трифторидов в солевой системе можно представить аналитически как функцию $\lg S$ абсолютной температуры T в виде

$$\lg S = 5,58 - 3949,3/T, r = 0,997 \text{ для } \text{PuF}_3;$$

$$\lg S = 3,75 - 2051,6/T, r = 0,998 \text{ для } \text{AmF}_3;$$

$$\lg S = 3,94 - 2300/T, r = 0,991 \text{ для } \text{NdF}_3.$$



Р и с. 3. Температурная зависимость растворимости в солевой системе 46,5LiF—11,5NaF—42KF AmF_3 (1), NdF_3 (2), CeF_3 (3), PuF_3 (теория [5]) (4), PuF_3 (5)

Обращает на себя внимание высокая растворимость PuF_3 и AmF_3 , неизвестная ранее ни для одной из фторидных солей. Кроме того, подтверждена тесная аналогия температурной зависимости растворимости PuF_3 , CeF_3 в эвтектике 46,5LiF—11,5NaF—42KF (см. табл. 2, 3, рис. 3), известная ранее для другой топливной соли [3, 4]. Высокая растворимость PuF_3 и CeF_3 согласуется также с термодинамическими расчетами [5] и данными работы [6]. Аналогия температурных зависимостей растворимости AmF_3 , NdF_3 в этой эвтектике установлена впервые.

Измеренная растворимость трифторидов америция и плутония вместе с данными работ [7, 8] важна для разработки жидкосолевых реакторов-сжигателей америция [9], а также быстрых с уран-плутониевым циклом [10].

Авторы признательны участникам семинара МЮКАТЭКС за активное обсуждение результатов, а также О.Е. Коляскину за помощь при подготовке статьи к печати.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГК «Росатом», контракт № Н.4ф.45.90.11.1020, 2011 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковенко А.Г., Баранов А.Ю., Филиппов А.Н. Модернизация измерительного комплекса порошковых рентгенограмм. — В сб.: Новые технологии для энергетики, промышленности и строительства, вып. 5. Дмитровград, 2002, с. 77—85.
2. Powder Diffraction File. Intern. Center for Diffraction Data, Swarthmore, Pennsylvania, USA, 1999.
3. Barton C., Breeding M., Gilpatrick L. e.a. Solubility of cerium trifluoride in molten salt mixtures of lithium, beryllium and thorium fluorides. — Inorg. Chem., 1970, v. 16, p. 68—69.
4. Пономарев Л.И., Серегин М.Б., Михаличенко А.А. и др. Обоснование выбора имитаторов актиноидов для исследования растворимости в топливной соли жидкосолевых реакторов. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 6, с. 341—346.
5. Beneš O., Konings R. Actinide burner full: potential compositions based thermodynamics evaluation — of MF— PuF_3 (M = Li, Na, K, Rb, Cs) and LaF_3 — PuF_3 systems. — J. Fluor. Chem., 2009, v. 130, № 1, p. 22—29.
6. Серегин М.Б., Паршин А.П., Кузнецов А.Ю. и др. Растворимость UF_4 , ThF_4 , CeF_3 в расплаве LiF—NaF—KF. — Радиохимия, 2011, т. 53, № 5, с. 416—418.
7. Воложин М.В., Закиров Р.Я., Мушников П.Н. и др. Растворимость CeF_3 , PuF_3 в расплаве LiF—NaF—KF. — См. настоящ. вып., с. 17—19.
8. Лизин А.А., Томилин С.В., Гневашов О.Е. и др. Растворимость UF_4 , ThF_4 в расплаве LiF—NaF—KF. — См. настоящ. вып., с. 20—22.
9. Degtyarev A.M., Feinberg O.S., Karmanov F.I. e.a. Subcritical molten salt reactor with fast/intermediate spectrum for minor actinides transmutation. — In: Proc. Global'2011. Japan, 2011, Dec. 11—16, Paper 386820.
10. Дегтярев А.М., Пономарев Л.И. Жидкосолевой реактор с быстрым спектром нейтронов. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 3, с. 135—143.

Поступила в Редакцию 29.03.13