

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСТВОРИМОСТИ RaF_2 В ВОДЕ

© 2021 г. П. С. Буткалюк^a, И. Л. Буткалюк^{a,*}, А. А. Агапов^б, А. С. Куприянов^a, Е. В. Казакова^a

^a Научно-исследовательский институт атомных реакторов,
433510, Димитровград Ульяновской обл., Западное шоссе, д. 9

^б Димитровградский инженерно-технологический институт Национального исследовательского ядерного
университета «МИФИ»,
433511, Димитровград Ульяновской обл., ул. Куйбышева, д. 294

*e-mail: Butkaluk-IL@yandex.ru

Получена 28.08.2019, после доработки 24.12.2019, принята к публикации 27.12.2019

Определена растворимость фторида радия в воде. Очистку радия проводили хроматографическим способом с использованием сорбента BioRad AG-50×8 (NH_4^+) 200–400 меш. Осаждение проводили добавлением к водному раствору очищенного $\text{Ra}(\text{NO}_3)_2$ спиртового раствора NH_4F , полученный осадок промывали этианолом, высушивали на воздухе. К сухому RaF_2 добавляли бидистиллированную воду и выдерживали 24 ч при термостатировании и перемешивании до наступления равновесия осадок–раствор. От маточного раствора отбирали аликвоты для альфа-спектрометрического определения ^{226}Ra . Растворимость в воде составила 0.763 ± 0.153 г на 100 г раствора. Дополнительно была оценена растворимость фторида радия в 96% этиловом спирте – $\sim 7.4 \times 10^{-5}$ г на 100 г раствора.

Ключевые слова: фторид радия, растворимость

DOI: 10.31857/S0033831121010044

ВВЕДЕНИЕ

В НИИАР разрабатывается технология получения короткоживущих альфа-излучающих нуклидов путем наработки их материнских изотопов ^{227}Ac и $^{228,229}\text{Th}$ облучением ^{226}Ra в реакторе СМ [1, 2]. Вследствие особенности конструкции оболочек мишени в раствор облученного материала в значимых количествах попадают примеси радиоактивных изотопов хрома, железа и кобальта [3]. Для отделения радия, тория и актиния от указанных примесей используется осаждение их фторидов с использованием фторида свинца в качестве носителя. Фторид тория имеет низкую растворимость [4], достоверные литературные данные о произведении растворимости фторида актиния отсутствуют, но известно, что он малорасторим в воде [5]. Согласно полученными ранее экспериментальным данным, фторид актиния практически количественно соосаждается с фторидом свинца при $c(\text{Pb}(\text{NO}_3)_2) \geq 100$ мг/л и концентрации фторид-ионов, превышающей концентрацию азотной кислоты [3]. Так как в литературе известны

примеры соосаждения очистки актиния методом соосаждения с фторидом бария [6], авторы данной работы рассматривали возможность исключения из данной методики фторида свинца и использования фторида радия в качестве носителя для актиния и тория.

Согласно работе [4], произведение растворимости фторида радия при 25°C составляет $\sim 2 \times 10^{-4}$, данное значение было вычислено из термодинамических данных [7]. Экспериментальных данных о растворимости фторида радия в воде не было найдено. Растворимость фторида бария (как ближайшего аналога фторида радия) в воде составляет 0.1607 г/л при 20°C [8]. Целью работы было экспериментальное определение растворимости фторида радия в воде и уточнение его произведения растворимости.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы

В работе использовали азотную кислоту квалификации ос.ч. 27-5, нитрат бария и фторид аммо-

ния квалификации х.ч., 96% этанол квалификации «люкс» ГОСТ 5962–2013.

Взвешивание аликов и навесок проводили при помощи аналитических весов Sartorius BP 210 S. Показания массы записывали с точностью до 0.0001 г, погрешность взвешивания составляла ± 0.3 мг.

Для разделения осадка и раствора использовали лабораторную центрифугу периодического действия ОПн-3.02 с частотой вращения до 3000 об/мин.

Для перемешивания растворов использовали лабораторный шейкер с регулятором скорости вращения LOIP LS-220. Для терmostатирования использовали термостат LOIP LT-200.

Для определения объемной активности гамма-излучающих радионуклидов ^{131}Ba и ^{226}Ra использовали гамма-спектрометр SBS-50 с полупроводниковым Ge-Li детектором типа ДГДК 150. Источники для измерения представляли собой растворы объемом 1.00 мл в стеклянных пробирках диаметром 12 мм.

Содержание ^{226}Ra определяли с помощью альфа-спектрометра на основе кремниевых PIPS-детекторов ПДПА-1К (Институт физико-технических проблем, Дубна, Россия) и амплитудного анализатора импульсов АЦП-8К-И2. Образцы (источники) для измерения активности альфа-излучения ^{226}Ra готовили нанесением 10–25 мкл анализируемого раствора на подложку из нержавеющей стали с последующим упариванием и прокалкой на электроплитке с открытой спиралью для отгонки ^{222}Rn . Перед измерением альфа-спектра подготовленный образец выдерживали в течение 1.5 ч, что необходимо для снижения активности короткоживущих дочерних продуктов распада ^{222}Rn . Для градуировки спектрометров использовали образцовые спектрометрические альфа-источники (ОСАИ).

Содержание нерадиоактивных примесей в препаратах $^{226}\text{Ra}(\text{NO}_3)_2$ определяли методом атомно-эмиссионного анализа с использованием установки, представляющей собой искровой источник возбуждения спектров ИВС-28, смонтированный внутри радиационно-защитного бокса, и спектрофограф ИСП-1, соединенный с этим источником при помощи оптического выхода.

Определение растворимости фторида бария в воде. Так как работа с ^{226}Ra является радиацион-

но-опасной, то целесообразно проводить работу с его миллиграммовыми количествами. При осаждении, а также промывке осадка неизбежны большие потери радия вследствие его растворимости в воде. В спиртовых растворах степень гидратации ионов уменьшается, что приводит к смещению равновесия в сторону недиссоциированной формы вещества, следовательно, растворимость солей в спиртовых растворах закономерно уменьшается. Поэтому решено было проводить осаждение из водно-спиртового раствора и промывать осадок фторидом радия этанолом. Для отработки методики осаждения фторида радия предварительно провели эксперименты с имитатором радия – барием. RaF_2 и BaF_2 имеют кубическую кристаллическую решетку, образованы катионами металлов с близким радиусом и одинаковым зарядом, поэтому с позиции электростатических взаимодействий данные соли являются аналогами.

Для подтверждения данных о растворимости BaF_2 был проведен эксперимент по определению растворимости BaF_2 в воде. Осадок BaF_2 готовили двумя способами – осаждением спиртовым и водным растворами фторида аммония. 2 г $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ растворяли в 100 мл бидистиллированной воды, разделяли раствор на 2 порции по 50 мл. Насыщенный раствор NH_4F в этаноле готовили следующим образом. В 150 мл этанола вносили 20 г NH_4F , перемешивали, выдерживали осадок над раствором в течение 24 ч для установления равновесия. Полученный маточный раствор фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента». К первой порции раствора $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ добавляли 100 мл раствора NH_4F с концентрацией 4 моль/л, ко второй – 150 мл насыщенного раствора NH_4F в этаноле, полученного ранее. Выдерживали полученные осадки BaF_2 над маточными растворами в течение 24 ч для установления равновесия, затем осадки промывали тремя порциями бидистиллированной воды, сушили на воздухе в течение 24 ч. К полученным высушеным осадкам добавляли 120 мл бидистиллированной воды, выдерживали маточный раствор над осадком в течение 24 ч. Осадки отфильтровывали через бумажный фильтр «синяя лента». По 100 мл полученных маточных растворов упаривали досуха. По массе полученных сухих остатков определяли растворимость BaF_2 в воде в обоих случаях.

Определение растворимости фторида бария в этаноле. Для определения растворимости BaF_2

в этаноле готовили насыщенный раствор BaF_2 в этаноле, который затем упаривали и определили массу сухого остатка. К 150 мл этанола добавляли 2 г NH_4F , перемешивали. Выдерживали в течение 24 ч для установления равновесия осадок–раствор. Маточный раствор фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента». К 100 мл раствора $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ с концентрацией 0.077 моль/л добавляли 150 мл насыщенного раствора NH_4F в этаноле, полученного ранее. Осадок промыли тремя порциями этанола объемом по 20 мл и сушили на воздухе в течение 24 ч. К просушенному осадку добавляли 1100 мл этанола, выдерживали раствор над осадком в течение 24 ч для установления равновесия осадок–раствор. Осадок отфильтровывали через бумажный фильтр «синяя лента». 1000 мл полученного маточного раствора упаривали досуха. Для определения массы сухого остатка, полученного в результате упаривания этанола, проводили контрольный опыт с упариванием 1000 мл этанола и определением массы сухого остатка.

Определение кинетики растворения фторида бария. Для определения времени, необходимого для наступления равновесия осадок–раствор при осаждении BaF_2 , был проведен эксперимент по определению кинетики растворения BaF_2 в бидистиллированной воде. 1.0610 г $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ растворяли в 15 мл бидистиллированной воды, вносили радиоизотопную метку ^{131}Ba . К раствору добавляли 60 мл раствора, содержащего 1 г NH_4F в этаноле. Выдерживали раствор над осадком в течение 24 ч, осадок центрифугировали в течение 10 мин, промывали тремя порциями этанола с последующим центрифугированием осадка, осадок сушили в течение 24 ч. Затем для полного удаления воды и спирта осадок прокаливали в течение 4 ч при 300°C. Удельная активность фторида бария на начало эксперимента составила 9.13×10^7 Бк/г.

В полипропиленовую пробирку вносили 70 мг BaF_2 , содержащего радиоизотопную метку ^{131}Ba , затем 10 мл бидистиллированной воды с температурой ~95°C. Продолжали нагрев пробирки на водянной бане в течение 4 ч, не доводя раствор до кипения, каждый час отбирая аликвоты для определения объемной активности ^{131}Ba методом гамма-спектрометрии.

Через 4 ч прекращали нагрев и термостатировали раствор и осадок при 25°C с одновременным

перемешиванием на лабораторном шейкере. Отбирали аликвоты для определения объемной активности ^{131}Ba методом гамма-спектрометрии через каждый час.

Очистка препарата ^{226}Ra . Был проведен эксперимент по определению растворимости RaF_2 в воде при термостатировании и перемешивании при 25°C. Исходный препарат ^{226}Ra был взят послеadioхимической переработки облученных радиевых мишней [1] и содержал значительные количества примесей солей железа, свинца, бария и др. Очистку радия проводили методом катионообменной хроматографии с использованием сорбента BioRad AG-50x8 (NH_4^+) 200–400 меш на самотечной хроматографической колонке объемом 2 см³ (высота $h = 55$ мм, диаметр $d = 7$ мм). Предварительно сорбент замачивали в бидистиллированной воде в течение 24 ч, затем полученной супензией заполняли хроматографическую колонку. Колонку промывали 20 к.о. (колоночный объем) бидистиллированной воды, затем 10 к.о. 8 моль/л HNO_3 , затем 20 к.о. бидистиллированной воды и 10 к.о. ацетатно-аммиачного буферного раствора с pH 4.5 с концентрацией 1 моль/л для переведения сорбента в NH_4^+ -форму. Во всех хроматографических процессах скорость элюирования составляла 1 мл/(мин см²). Для контроля очистки от примесей в раствор радия вводили радиоизотопную метку ^{131}Ba . Сорбцию радия проводили из аммиачно-ацетатного буферного раствора с pH 4.5 с концентрацией 1 моль/л. Затем промывали колонку 20 к.о. раствора 0.02 моль/л ЭДТУ (этилендиаминтетрауксусная кислота) в ацетатно-аммиачном буферном растворе с pH 4.5 с концентрацией 1 моль/л. Примеси и радий элюировали 40 к.о. раствором ЭДТУ с концентрацией 0.02 моль/л с pH 8.0, контрольное элюирование проводили 20 к.о. раствором ЭДТУ с концентрацией 0.02 моль/л с pH 9.5. Элюат собирали фракциями, затем объединяли фракции, содержащие радий и не содержащие ^{131}Ba и после корректировки pH буферным раствором с pH 4.5 проводили дополнительную очистку радия сорбцией на второй колонке объемом 2 см³ (высота $h = 55$ мм, диаметр $d = 7$ мм) с сорбентом BioRad AG-50×8 (NH_4^+) 200–400 меш. Колонку промывали 10 к.о. раствором ЭДТУ с концентрацией 0.02 моль/л в ацетатно-аммиачном буферном растворе с концентрацией 1 моль/л. Затем промывали

5 к.о. буферным раствором с pH 4.5 и концентрацией 1 моль/л, затем 5 к.о. бидистиллированной воды, примеси элюировали 40 к.о. 0.5 моль/л HNO₃. Радий элюировали 20 к.о. 8 моль/л HNO₃. Элюат упарили досуха в кварцевом стакане, сухой остаток растворяли в бидистиллированной воде.

Определение растворимости RaF₂ в воде и этаноле. Был проведен эксперимент по определению растворимости RaF₂ в воде с термостатированием и интенсивным перемешиванием раствора при 25°C. Кроме того, была определена растворимость RaF₂ в этаноле при той же температуре.

Сухой остаток Ra(NO₃)₂ растворяли в 200 мкл бидистиллированной воды, вносили в полиэтиленовую пробирку Эппendorфа, содержащую 800 мкл насыщенного раствора фторида аммония в этаноле. Выдерживали осадок в течение 24 ч для кристаллизации RaF₂, затем отделили его от раствора центрифугированием. Осадок промывали 3 порциями этанола объемом по 0.5 мл. От промывного спиртового раствора отбирали аликвоту массой 0.1019 г, разбавляли бидистиллированной водой до 0.7253 г и отбирали аликвоту для альфа-спектрометрического анализа. Затем осадок сушили в течение 24 ч на воздухе. В пробирку вносили 0.35 мл бидистиллированной воды и перемешивали, выдерживали 24 ч для установления химического равновесия осадок–раствор при термостатировании при 25°C. Как показали предварительные эксперименты по установлению равновесия осадок–раствор, проведенные с BaF₂, равновесие наступает менее, чем за 10 ч выдержки маточного раствора над осадком. Поэтому по аналогии было принято допущение о том, что равновесие осадок–раствор для RaF₂ наступает менее, чем через 24 ч после выдержки и при этом не происходит существенного радиолиза раствора. Более длительное выдерживание осадка над раствором нецелесообразно из-за неизбежного радиолиза осадка и возможного изменения кислотности раствора и растворимости RaF₂.

Отделяли осадок от раствора центрифугированием. От раствора отбирали аликвоту массой 0.0444 г, которую после разбавления HNO₃ с концентрацией 1 моль/л до 10.3531 г использовали для определения активности ²²⁶Ra методом альфа-спектрометрии. Через 4 сут отобрали повторно аликвоту

раствора массой 0.0568 г, которую после разбавления HNO₃ с концентрацией 1 моль/л до 10.3579 г также использовали для определения активности ²²⁶Ra методом альфа-спектрометрии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определение растворимости фторида бария в воде. Найденное из первого эксперимента значение растворимости BaF₂ при 25°C составило 0.1725 г/100 г, из второго – 0.1739 г/100 г. Полученные значения близки к литературным данным (0.169 г/100 г). Способ получения BaF₂ (из водного или спиртового раствора) не влияет на его растворимость. Следовательно, методику осаждения фторида с использованием спиртовых растворов можно рекомендовать для получения RaF₂ с целью снижения его потерь при осаждении и промывке осадка RaF₂.

Определение растворимости фторида бария в этаноле. В табл. 1 приведены экспериментальные данные по определению растворимости фторида бария в 96%-ном этаноле. Концентрацию этанола определяли по плотности (0.802 при 27°C). Согласно полученным экспериментальным, данным масса сухого остатка при упаривании 1000 мл этанола составила 0.0059 г, в то время как масса сухого остатка при упаривании насыщенного спиртового раствора BaF₂ составила 0.0057 г. Растворимость BaF₂ в этаноле настолько низкая, что можно лишь оценить ее значение как не более 0.00009 г (3σ, где σ = 0.0003 г – погрешность определения массы на аналитических весах) на 100 г раствора при 25°C.

Определение кинетики растворения BaF₂. На рис. 1 представлена полученная зависимость растворимости BaF₂ в воде в зависимости от времени выдержки осадка над маточным раствором. Равновесие устанавливается менее чем за 10 ч.

Очистка препарата ²²⁶Ra. Характеристики полученного препарата радия определяли методами альфа-, гамма- и атомно-эмиссионной спектрометрии; они представлены в табл. 2.

Согласно результатам атомно-эмиссионной спектрометрии, общее содержание примесей в препарате составило 0.9 мас% относительно радия.

Определение растворимости RaF₂. При вычислении молярных концентраций ионов Ra²⁺ и F⁻

Таблица 1. Результаты эксперимента по определению растворимости BaF_2 в этаноле

Состав раствора	m (пустого стакана), г	V (р-ра), мл	m (стакан+р-р), г	m (сухого остатка), г
Насыщенный BaF_2 в 95%-ном $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	96.1331	100	172.7021	Ниже предела обнаружения
Насыщенный BaF_2 в 95%-ном $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	195.3489	1000	997.8	0.0057
Контрольный опыт – 95%-ный $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	193.9410	1000	995.4	0.0059

плотность насыщенного раствора RaF_2 была взята равной $\sim 1.0 \text{ г}/\text{см}^3$.

При вычислении растворимости RaF_2 учитывали следующие компоненты погрешности: погрешность отбора аликвот из исходного и разбавленного растворов и разбавления (0.4–1.3%), погрешность эталона ^{226}Ra и погрешность обработки α -спектра 4%. Для снижения случайной погрешности, возникающей за счет статистической природы α -распада, набор спектра проводили до получения статистики в 10^5 – 10^6 импульсов. Для снижения погрешности отбора аликвот источники для α -спектрометрии готовили весовым методом. При этом вводили поправку на испарение раствора с поверхности источника за время взвешивания путем построения градуировочного графика зависимости массы от времени и экстраполирования его на момент нанесения раствора на источник. При нанесении аликвоты раствора на подготовленную подложку капля занимает большую площадь, в результате чего начинается интенсивное испарение азотной кислоты. Таким образом, концентрация раствора достаточно быстро меняется, и за время стабилизации показаний весов ошибка может достигнуть нескольких процентов. Массу аликвоты раствора, нанесенную на подложку, определяли следующим методом: после отбора раствора с заданным объемом и нанесения его на подложку начали отсчет времени по секундомеру, каждые 30 с фиксировали массу аликвоты, по достижении 3 мин останавливали секундомер, зависимость массы раствора от времени аппроксимировали методом наименьших квадратов и определяли массу в момент времени $t = 0$.

Суммирование погрешностей отдельных величин проводили по закону сложения ошибок [9]. Иные потенциальные погрешности, связанные с

Таблица 2. Характеристики препарата ^{226}Ra

$m(^{226}\text{Ra}), \text{ мг}$	14.45
Масса примесей, мкг	
Ba	5.5
Ca	44
Cr	<5.5
Fe	<16.5
Ni	<5.5
Pb	<16.5
Pt	<16.5
Si	28

сорбцией радионуклида на стенках посуды, поверхности наконечников пипеток принимали пренебрежимо малыми и не включали в суммарную погрешность определения. На рис. 2 представлено изображение полученного осадка RaF_2 .

В результате экспериментов получили данные о растворимости фторида радия, представленные в табл. 3.

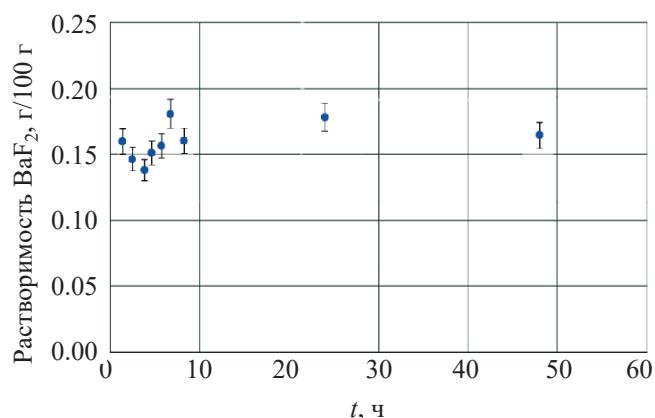
**Рис. 1.** Зависимость растворимости фторида бария в воде от времени контакта фаз.



Рис. 2. Осадок фторида радия.

Расчет растворимости фторида радия проводили по формуле

$$s(\text{RaF}_2) = \frac{A \cdot m_{\text{k-ta}} \cdot M(\text{RaF}_2)}{m_\alpha \cdot m_{\text{Ra}} \cdot 3.6577 \cdot 10^8 \cdot M(\text{Ra})},$$

где m_{Ra} – масса аликвоты раствора над осадком RaF_2 , отобранная для определения содержания радиоизотопа; $m_{\text{k-ta}}$ – масса разведенной аликвоты раствора

Таблица 3. Результаты экспериментов по определению растворимости фторида радия в воде

Параметр	Значение при времени выдержки, сут	
	1	4
$T, ^\circ\text{C}$	25	25
$m_{\text{Ra}}, \text{г}$	0.0444	0.0568
m_α	0.0199	0.0171
$m_{\text{k-ta}}$	10.3531	10.3579
$A, \text{Бк}$	21890	30267
$s(\text{RaF}_2), \text{г}/100 \text{ г раствора}$	0.819 ± 0.043	1.03 ± 0.054
Ионная сила, моль/л	0.079	0.099
$\gamma(\text{Ba}^{2+})$	0.37	0.34
$\gamma(\text{F}^-)$	0.78	0.76
$K_s^0(\text{RaF}_2)$	1.64×10^{-5}	2.87×10^{-5}

Таблица 4. Растворимость фторидов щелочноземельных элементов в воде

Соединение	Растворимость, г на 100 г р-ра
CaF_2	0.0016 при 18°C
SrF_2	0.012 при 27°C
BaF_2	0.1607 при 20°C
RaF_2	0.925 (среднее значение) при 25°C

над осадком RaF_2 ; m_α – масса разведенной аликвоты для альфа-спектрометрического определения содержания радиоизотопа; A – активность радиоизотопа, определенная методом альфа-спектрометрии. При расчетах $K_s^0(\text{RaF}_2)$ приняли допущение, что коэффициент активности для радиоизотопа равен коэффициенту активности для бария.

Ионную силу раствора рассчитывали по формуле

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n c_i z_i^2,$$

где c_i – концентрация иона, моль/л; z_i – заряд иона.

Коэффициент активности иона рассчитывали по формуле (уравнение Девиса):

$$\lg \gamma_\pm = -A |z_+ z_-| \left(\frac{\frac{1}{I^2}}{\frac{1}{1 + B \cdot I^2}} + CI \right) + \delta I,$$

где A, B, C, δ – коэффициенты (константы), зависящие от температуры и состава раствора; I – значение ионной силы раствора; z – заряд иона.

Константу растворимости рассчитывали по формуле

$$K_s^0 = \gamma(\text{Ba}^{2+}) \times [\text{Ra}^{2+}] \times (\gamma(\text{F}^-) [\text{F}^-])^2$$

Оцененная из экспериментальных величин растворимость фторида радия в воде как среднее значение двух точек составила 0.925 ± 0.049 г на 100 г раствора. В рамках работы было принято допущение о том, что равновесие осадок–раствор наступает менее, чем через 24 ч после выдержки маточного раствора над осадком и что за это время не происходит существенного радиолиза, способного повлиять на pH раствора.

Экспериментально определенная растворимость фторида радия в воде значительно выше растворимости фторида бария, что является ожидаемым результатом, так как растворимость фторидов в ряду $\text{CaF}_2, \text{SrF}_2, \text{BaF}_2$ в воде возрастает. В табл. 4 представлены результаты по растворимости фторидов щелочноземельных элементов в воде с учетом полученных данных.

Оценка растворимости RaF_2 в этаноле. Согласно полученным экспериментальным данным,

оценочные значения растворимости RaF_2 в этаноле при 25°C составили $\sim 7.43 \times 10^{-5}$ г на 100 г раствора при допущении, что равновесие в системе осадок–раствор достигается менее, чем за 24 ч, при этом для BaF_2 растворимость оценивается как менее 9×10^{-5} г на 100 г раствора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проделанные эксперименты показали, что растворимость фторида радия намного выше растворимости фторида бария и составляет $\sim 0.925 \pm 0.195$ г на 100 г раствора при 25°C , тогда как для фторида бария она составляет 0.16 г на 100 г раствора при 20°C . Оцененная растворимость фторида радия в этаноле составляют $\sim 7.43 \times 10^{-5}$ г на 100 г раствора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буткалюк П.С., Буткалюк И.Л., Тарасов В.А., Романов Е.Г., Кузнецов Р.А., Куприянов А.В., Куприянов А.С. // Сб. трудов АО «ГНЦ НИИАР». Димитровград: НИИАР, 2018, Вып. 2. С. 80–92.
- Кузнецов Р.А., Буткалюк П.С., Тарасов В.А., Баранов А.Ю., Буткалюк И.Л., Романов Е.Г., Куприянов В.Н., Казакова Е.В. // Радиохимия. 2012. Т. 54. № 4. С. 352–356.
- Кузнецов Р.А., Буткалюк П.С., Щербакова К.О. // Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР». 2017. С. 174–177.
- Новый справочник химика технолога. Химическое равновесие. Свойства растворов. СПб.: Профессионал, 2004. С. 375.
- Meyer G., Morss L.R. Synthesis of Lanthanide and Actinide Compounds. Springer, 2012. 368 р.
- Волынский Л.Д., Гарбузов В.М., Цирлин В.А. // Радиохимия. 1987. Т. 29, № 5. С. 660–662.
- Кумок В.Н., Кулешова О.М., Карабин Л.А. Произведения растворимости. Новосибирск: Наука, 1983. 264 с.
- Химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1988. Т. 1. С. 462.
- Залотов Ю.А. Основы аналитической химии. М.: Высш. шк., 2004. Т. 1. С. 38.