

ИЗВЛЕЧЕНИЕ РОДИЯ, РУТЕНИЯ, ПАЛЛАДИЯ ГЕКСАЦИАНОФЕРРАТОМ(II) ЖЕЛЕЗА(III) ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ И СОЛЯНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ

© П. В. Давыдова, В. А. Королев

АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»,
194021, г. Санкт-Петербург, 2-й Мушинский пр., д. 28
E-mail: davydova@khlopin.ru

Поступила в Редакцию 26 ноября 2023 г.

После доработки 22 декабря 2023 г.

Принята к публикации 29 декабря 2023 г.

Приведены результаты исследования возможности извлечения Rh, Ru и Pd с использованием $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$ из азотнокислых и солянокислых растворов. Определены условия практически полного извлечения суммы металлов платиновой группы из азотнокислых растворов в интервале концентраций кислоты 1–5 М. Из солянокислых растворов Rh и Ru можно извлечь при концентрации кислоты 0.1–0.5 М. Pd полностью извлекается как из азотно-, так и солянокислых растворов концентрацией 1–5 М. Из модельных растворов переработки отработавшего ядерного топлива вместе с Rh, Ru и Pd в разной степени извлекаются также Cs, Mo и Zr. Изотермы сорбции Rh и Ru описываются уравнением Ленгмюра. Изотерма сорбции Pd имеет нестандартную двухступенчатую форму. $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$ может быть рекомендован для извлечения металлов платиновой группы из технологических растворов, в том числе растворов переработки отработавшего ядерного топлива и отработанных катализаторов.

Ключевые слова: $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$; Rh; Ru; Pd; изотерма сорбции; извлечение металлов; технологические растворы; платиновые металлы

DOI: 10.31857/S0044461823110026; EDN: CLSSYE

Большой спрос и высокая стоимость металлов платиновой группы стимулируют поиск путей повторного использования материалов, содержащих эти металлы. К таким материалам относятся растворы гальванических производств, катализаторы химической и нефтехимической промышленности, автомобильные катализаторы, мембранные палладиевые катализаторы для получения сверхчистого водорода, материалы электронной техники, медицины и т. п.

Значительное количество металлов платиновой группы (несколько килограммов Rh, Ru, Pd на 1 т отработавшего ядерного топлива [1]) нарабатывается в реакторах атомных электростанций и находится в растворах переработки отработавшего ядерного топлива. Как правило, промышленные растворы, содержащие металлы платиновой группы, — это солянокислые растворы. Платиновые металлы содержатся также в азотнокислых растворах переработки отработавшего ядерного топлива, в которых концентрации Ru, Rh, Pd и HNO_3 могут изменяться

в широких пределах. Часто используемым методом обращения с жидкими высокоактивными отходами является остекловывание. Наличие в высокоактивных отходах металлов платиновой группы вызывает некоторые эксплуатационные проблемы, например, осаждение Ru, Rh и Pd в ходе плавления стекломассы на дно аппарата, из-за чего возникают технические трудности при выдаче стекломассы в контейнер [2, 3].

Известны способы извлечения металлов платиновой группы с помощью гексацианоферратов металлов [3–5]. В работе [4] предпринята попытка применить $Al_4[Fe(CN)_6]_3$ для совместного извлечения металлов платиновой группы из модельных растворов переработки отработавшего ядерного топлива. Из растворов HNO_3 концентрацией 1.5 М и концентрациями Ru, Rh и Pd 1700, 4400 и 2000 мг·л⁻¹ соответственно удалось полностью извлечь Pd, менее 50% Ru и лишь около 1% Rh.

Авторами ранее была исследована возможность использования $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$, получаемого *in situ*,

для извлечения Pd из азотнокислых растворов переработки отработавшего ядерного топлива [6]. Pd в описанных в работе условиях извлекается количественно независимо от концентрации HNO_3 в интервале 1–5 М.

Применение гексацианоферратов металлов может также вызывать интерес у исследователей для одновременного совместного извлечения некоторых металлов платиновой группы из растворов добычи природных ископаемых или переработки изделий, содержащих Ru, Rh и Pd концентрацией до 200–300 мг·л⁻¹.

Цель работы — оценка возможности применения $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ для совместного извлечения Rh, Ru, Pd из азотнокислых и солянокислых растворов, в том числе из модельных растворов переработки отработавшего ядерного топлива.

Экспериментальная часть

В работе использовали $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ (х.ч., ОАО «Аурат»), $\text{RhCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (х.ч., ОАО «Аурат»), палладий металлический в порошке (х.ч., ОАО «Красцветмет»), HNO_3 (х.ч., ОАО «Каустик»), HCl (х.ч., ОАО «Каустик»), медные листы (М1, ООО «Металлика»), а также реактивы марки «ч.»: $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, $\text{FeCl}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ag}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3$ — и «ч.д.а.»: $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, H_2MoO_4 (все — АО «ЛенРеактив»).

Азотнокислый и солянокислый растворы Rh получали растворением навески $\text{RhCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в 12 М HNO_3 и трижды упаривали до влажных кристаллов. Затем осадок растворяли в 8 М HNO_3 . Для получения раствора хлорида родия навеску $\text{RhCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ растворяли в 6 М HCl .

В азотнокислых растворах после растворения отработавшего ядерного топлива Ru находится в форме нитрозо-нитратов различного состава [7, 8]. Навеску $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ растворяли в 12 М HNO_3 и трижды упаривали до влажных кристаллов. Затем осадок растворяли в 8 М HNO_3 и через полученный раствор в течение 24 ч пропускали смесь газов NO и NO_2 , полученных по реакции металлической меди с HNO_3 , для получения нитрозо-нитратных комплексов Ru.

Солянокислый раствор Ru получали растворением навески $\text{Ru}(\text{OH})\text{Cl}_3$ в 6 М HCl .

Азотнокислый и солянокислый растворы Pd получали растворением навески порошка металлического Pd в 6 М HNO_3 или в 6 М HCl соответственно.

Азотнокислый раствор Mo готовили согласно [9], используя HNO_3 и H_2MoO_4 .

Для получения $\text{Zr}(\text{NO}_3)_4$ навеску $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2$ заливали 10 М HNO_3 , прогревали на плитке при 50–60°C

при непрерывном перемешивании на магнитной мешалке в течение 24 ч. После остывания и отстаивания (6–8 ч) декантировали раствор с осадка в круглодонную колбу и кипятили с обратным холодильником 48 ч. Остывший раствор фильтровали через бумажный фильтр.

Для приготовления азотнокислого модельного раствора переработки отработавшего ядерного топлива использовали $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cs}(\text{NO}_3)_3$, приготовленные растворы $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Zr}(\text{NO}_3)_4$, а также H_2MoO_4 .

$\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ синтезировали из водных растворов $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ и FeCl_3 по методике, описанной в [10]. Полученный материал тщательно отмывали дистиллированной водой от ионов K^+ и Cl^- , затем сушили при температуре 100°C до постоянной массы. Дистиллированную воду получали на электрическом аквадистилляторе (Labdevices-10LIII, UED Group).

Определение концентраций элементов в растворах осуществляли методом оптически-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой с помощью прибора ICP OES (Varian 725-ES Radial).

Степень извлечения благородных металлов определяли в режиме статической сорбции. В стеклянные колбы помещали 400 мг сорбента и 40 см³ рабочего раствора солей индивидуальных металлов концентрацией 200 мг·л⁻¹. Суспензию перемешивали при заданной температуре со скоростью 200 об·мин⁻¹ и через определенные промежутки времени или по окончании перемешивания отбирали пробы жидкой фазы.

Степень извлечения металлов (R , %) рассчитывали по формуле

$$R = \frac{(c_{\text{и}} - c_{\text{р}})}{c_{\text{и}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $c_{\text{и}}$ — исходная концентрация металла в растворе (мг·л⁻¹); $c_{\text{р}}$ — равновесная концентрация металла в растворе после сорбции (мг·л⁻¹).

Поиск оптимальных условий извлечения Rh, Ru, Pd из азотнокислых растворов начали с проведения серии экспериментов по определению зависимости степени извлечения металла от времени контакта с сорбентом. Эксперименты проводили при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и концентрации HNO_3 1 М.

Для построения изотерм сорбции применяли метод переменных концентраций, суть которого заключается в приведении навесок сорбента одинаковой массы в контакт с растворами различных концентраций металла, причем объемы растворов остаются постоянными.

Для построения изотерм сорбции использовали данные статической обменной емкости (COE), полученные при концентрации HNO_3 и HCl 1 М и температуре 80°C . Масса навески сорбента составляла 200 мг, объем раствора — 20 см^3 . В эксперименте использовали растворы солей индивидуальных металлов, содержащие $100\text{--}3000\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. Контакт фаз проводили при постоянном перемешивании на лабораторной магнитной мешалке в течение 3 ч. По окончании эксперимента фазы разделяли, маточники анализировали на содержание металлов. Значение статической обменной емкости (COE, $\text{мг}\cdot\text{г}^{-1}$) сорбента по металлу рассчитывали по формуле

$$\text{COE} = \frac{(c_{\text{и}} - c_{\text{р}})V_{\text{р-ра}}}{m_{\text{сорб}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{р-ра}}$ — объем загрузки исходного раствора (дм^3), $m_{\text{сорб}}$ — масса навески сорбента (г).

Для количественного описания равновесия сорбции в интервале концентраций были использованы линеаризованные уравнения моделей Ленгмюра и Фрейндлиха. О применимости моделей судили по значению среднеквадратичного отклонения (R^2).

Математическую обработку экспериментальных данных вели в соответствии с уравнениями изотерм Ленгмюра (3) и Фрейндлиха (4):

$$\frac{c_{\text{р}}}{\text{COE}} = \frac{1}{K_L a_m} + \frac{c_{\text{р}}}{a_m}, \quad (3)$$

где K_L и a_m — константы уравнения Ленгмюра;

$$\lg \text{COE} = \lg K_F + \frac{1}{n} c_{\text{р}}, \quad (4)$$

где K_F — константа Фрейндлиха [$(\text{мг}^{1-(1/n)} \cdot (\text{дм}^3)^{1/n}) \cdot \text{г}^{-1}$], n — фактор гетерогенности.

Обсуждение результатов

Pd из азотнокислого раствора при 20°C извлекается нацело в течение первых 15 мин (рис. 1, а). В то же время извлечение Rh и особенно Ru существенно замедляется через 15–20 мин, и за 3 ч они извлекаются не более чем на 40%, при этом достигнутая степень извлечения существенно выше, чем в работе [3]. Так как дальнейшее увеличение времени контакта не приводит к сколько-нибудь заметному изменению степени извлечения Ru и Rh, длительность последующих экспериментов составляла 3 ч.

Повышение температуры до 80°C позволяет увеличить степень извлечения Ru и Rh более 95% (рис. 1, б). При совместном извлечении металлов платиновой группы из раствора с концентрациями каждого металла $200\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, $c_{\text{HNO}_3} = 1\text{ М}$ при 80°C не было замечено взаимного влияния металлов на сорбцию. Степень извлечения Rh и Pd составила $>99\%$, а Ru — $\sim 95\%$.

Применительно к переработке отработавшего ядерного топлива концентрация HNO_3 в растворах может варьироваться от 1 до 5 М. Эксперименты по извлечению Rh, Ru и Pd из растворов в указанном диапазоне концентраций HNO_3 проводили при температуре 80°C . Достигнутые величины степени извлечения оказались практически постоянными (95–100%). Высокая степень извлечения суммы Rh, Ru и Pd делает возможным использование сорбента в широком диапазоне кислотности технологических растворов.

Важной для технологического применения характеристикой сорбента является его способность извлекать металлы платиновой группы из разбавленных растворов. Из 1 М азотнокислого раствора с концентрацией каждого металла $\sim 5\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ за 3 ч при

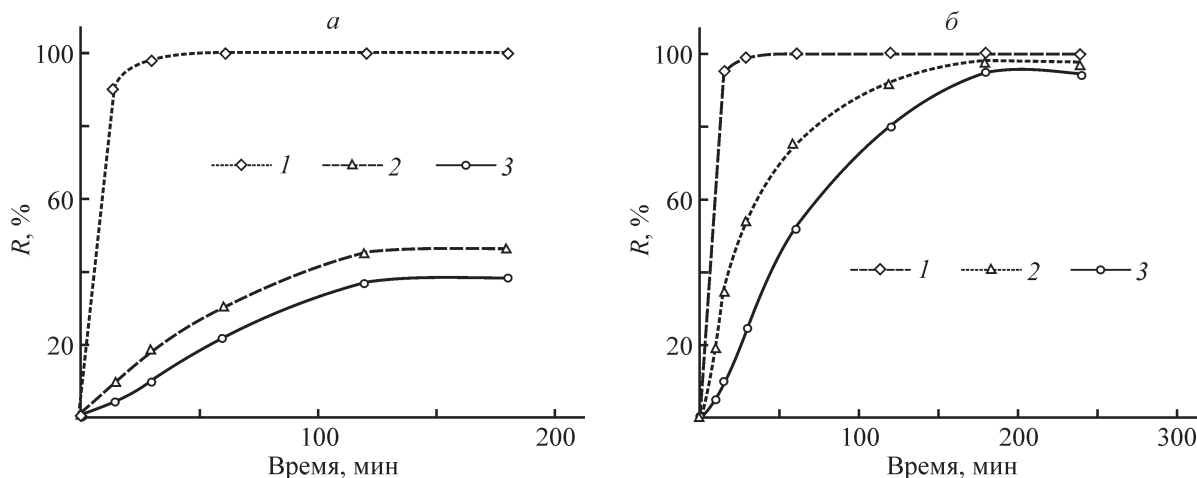


Рис. 1. Зависимость степени извлечения металлов от времени контакта, $c_{\text{HNO}_3} = 1\text{ М}$; $T = 20 \pm 2$ (а), $80 \pm 2^\circ\text{C}$ (б). 1 — Pd, 2 — Rh, 3 — Ru.

80°C металлы платиновой группы были извлечены нацело (конечная концентрация металлов оказалась ниже предела обнаружения — для Pd — 0.02 мг·л⁻¹, для Rh — 0.04 мг·л⁻¹, для Ru — 0.02 мг·л⁻¹).

Возможность извлечения металлов платиновой группы из растворов переработки отработавшего ядерного топлива проверили на многокомпонентном модельном растворе (табл. 1). Степень совместного извлечения металлов платиновой группы составила >99%. Помимо благородных металлов из модельного раствора были извлечены Cs, Mo и в незначительной степени Zr. Взаимодействие Cs с Fe₄[Fe(CN)₆]₃ было ожидаемо, так как гексацианоферраты различных металлов используются для извлечения Cs из радиоактивных отходов [11]. Попутное извлечение Mo оказывает положительное влияние на качество стеклоподобного компаунда, так как присутствие ионов Mo в высокой концентрации приводит к образованию гетерогенных стекол [12]. Полученные результаты (табл. 1) дают основание для рассмотрения Fe₄[Fe(CN)₆]₃ в качестве селективного сорбента для извлечения металлов платиновой группы из технологических растворов переработки отработавшего ядерного топлива.

Селективное выделение металлов платиновой группы из солянокислых растворов имеет большое значение в гидрометаллургической технологии аффинажа благородных металлов, где практически повсеместно используются именно хлоридные рас-

Таблица 1
Сорбция металлов Fe₄[Fe(CN)₆]₃ из модельного раствора*

Металл	Концентрация в исходном растворе, мг·л ⁻¹	Степень извлечения, %
Rh	115	>99.9
Ru	225	98.0
Pd	325	>99.9
Cs	750	>99.9
Mo	1030	53.0
Zr	380	17.0
Sr	445	<0.1
Ba	1520	<0.1
Ce	2240	<0.1
Eu	220	<0.1
U	45	<0.1

* Условия проведения сорбционного процесса: 1 М HNO₃, 80°C, время контакта — 3 ч.

творы. С этой точки зрения представляет интерес исследовать сорбционное поведение Fe₄[Fe(CN)₆]₃ в хлоридных средах. Из солянокислых растворов в интервале концентраций HCl 1–5 М Pd извлекается нацело, хотя и несколько медленнее, чем из азотнокислых растворов. Степень извлечения Rh и Ru оказалась существенно меньше, чем из азотнокислых растворов, и имеет ярко выраженную зависимость от концентрации кислоты (рис. 2). Увеличение степени извлечения Rh и Ru при повышении температуры до 80°C в отличие от азотнокислых растворов не происходит.

Таким образом, совместное извлечение металлов платиновой группы можно реализовать лишь в интервале 0.1–0.5 М HCl. В более кислой области интерес может представлять селективное извлечение Pd с одновременным отделением его от Rh и Ru.

Основываясь на значительных отличиях закономерностей сорбции Pd от сорбции Ru и Rh, можно предположить, что эти металлы сорбируются Fe₄[Fe(CN)₆]₃ по различным механизмам. О характере сорбции металлов можно судить по изотермам сорбции, которые обычно описываются классическими моделями Ленгмюра и Фрейндлиха.

В области низких концентраций изотермы сорбции Ru, Rh, Pd на Fe₄[Fe(CN)₆]₃ (рис. 3) имеют выпуклый профиль с крутым подъемом, который свидетельствует о возможности глубокого извлечения металлов платиновой группы. При увеличении концентрации металла изотермы Ru и Rh достигают насыщения. Изотермы сорбции Pd в HNO₃ и HCl имеют ступени. Согласно [13], двухступенчатый вид изотермы и наличие точки перегиба свидетельствуют о смене механизма сорбции.

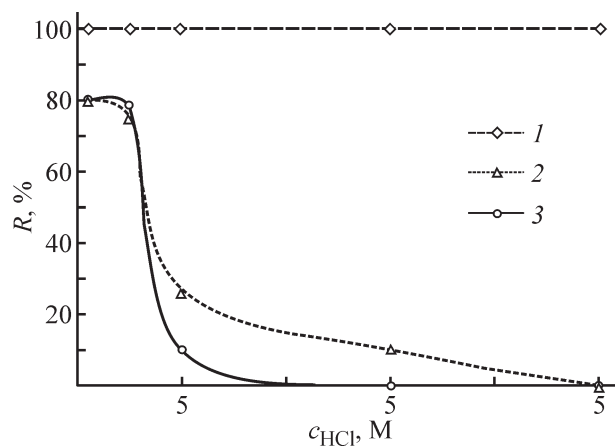


Рис. 2. Зависимость степени извлечения металла R от концентрации HCl.

1 — Pd, 2 — Rh, 3 — Ru; T = 20°C.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции, полученные при обработке изотерм сорбции металлов $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ с использованием моделей Ленгмюра и Фрейндлиха для всей области применяемых концентраций

Изотерма	Ru	Rh	Pd		Pd	
	$c_{\text{HNO}_3} = 1 \text{ M}$				$c_{\text{HCl}} = 1 \text{ M}$	
Интервал COE, $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$	0–40	0–45	<45	>45	<42	>42
Модель Ленгмюра	0.99	0.99	0.99	0.91	0.99	0.71
Модель Фрейндлиха	0.83	0.89	0.96	0.98	0.65	0.98

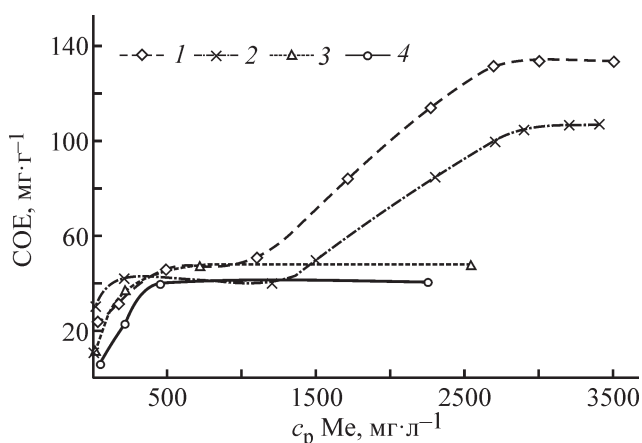


Рис. 3. Изотермы сорбции Rh, Ru, Pd из индивидуальных азотнокислых и солянокислых растворов.

1 — Pd, 3 — Rh, 4 — Ru, $c_{\text{HNO}_3} = 1.0 \text{ M}$; 2 — Pd, $c_{\text{HCl}} = 1 \text{ M}$.

В работе [5] описывается сорбция Pd из модельных растворов переработки отработавшего ядерного топлива $\text{K}_x\text{Ni}_y[\text{NiFe}(\text{CN})_6]$, который нанесен на SiO_2 матрицу. Авторами работы предложен ионообменный и одновременно окислительно-восстановительный механизм сорбции палладия, основанный на восстановлении сорбированного палладия до Pd(0) и окислении части Fe(II) до Fe(III). Сорбция Pd проходит в соответствии с моделью изотермы Ленгмюра.

В работе [14] рассматривалось взаимодействие HAuCl_4 с $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$. Авторы считают, что в результате взаимодействия происходит окисление Fe(II) до Fe(III) и восстановление Au(III) до Au(I) и (или) Au(0).

Возможно, что ионообменный и одновременно окислительно-восстановительный механизм сорбции является общим для взаимодействия $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ с соединениями платиновых металлов в азотнокислых или солянокислых растворах. Химия Ru и Rh в азотнокислых и солянокислых средах характеризуется многочисленностью химических форм, медленным переходом их друг в друга в определенных условиях и практической невозможностью перевода металла в единственную форму [15]. В азотнокислых рас-

творках Pd находится в форме нитрата, по-видимому, данная форма обеспечивает быстрое взаимодействие с $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ ввиду отсутствия комплексных соединений палладия или его олигомеров. Как было отмечено выше [16], Rh в азотнокислых растворах находится в форме олигомеров-нитратов. Повышение температуры раствора, возможно, способствует переходу олигомеров Rh в форму мономера-нитрата, что облегчает взаимодействие Rh с $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$. Планируется продолжение работ по изучению влияния температуры на сорбцию Ru с $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$.

Определены значения полной обменной емкости $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ по металлам, полученные в условиях эксперимента. Согласно полученным данным, полная обменная емкость $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ по металлам возрастает в ряду $\text{Ru} < \text{Rh} < \text{Pd}$.

Процесс взаимодействия Ru и Rh с $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ с максимальной вероятностью описывает уравнение Ленгмюра (табл. 2), о чем свидетельствуют высокие значения коэффициента корреляции R^2 — более 0.99. Применимость модели указывает на равноценность активных центров и однородность поверхности $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ по отношению к Ru и Rh.

На изотерме сорбции Pd можно выделить два участка. На первоначальном участке до достижения значения $\text{COE} \sim 45 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ изотерма сорбции описывается уравнением Ленгмюра (рис. 3). На втором участке, в отличие от Rh и Ru, при дальнейшем увеличении концентрации COE по Pd продолжает увеличиваться, достигая максимума при концентрации исходного раствора более $2100 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$.

Выводы

Показано, что $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ обладает способностью к одновременной сорбции Ru, Rh и Pd из азотнокислых растворов, что позволяет рекомендовать сорбент для проведения испытаний на реальных растворах переработки отработавшего ядерного топлива.

В солянокислых растворах только Pd может быть извлечен количественно с помощью $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$,

что дает возможность применения сорбента для извлечения или аффинажа палладия.

Благодарности

Авторы выражают благодарность к.х.н. А. А. Лумпову, Л. В. Красникову за участие в обсуждении результатов экспериментов, Ю. И. Корнейко, О. Н. Егоровой, С. А. Ткаченко за приготовление исходных растворов солей платиновых металлов, Н. В. Сапожниковой за разработку методики определения концентраций металлов платиновой группы в модельных многокомпонентных растворах.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка технологии извлечения металлов платиновой группы из отработавшего ядерного топлива», финансируемого АО «Наука и Инновации».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в этой статье.

Информация о вкладе авторов

П. В. Давыдова проводила эксперименты по определению условий извлечения металлов платиновой группы в азотнокислой и солянокислых средах, математически обрабатывала полученные изотермы сорбции металлов; В. А. Королев осуществлял синтез $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$, проводил экспериментальное изучение сорбционных процессов.

Информация об авторах

Давыдова Полина Викторовна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2156-1970>

Королев Владимир Алексеевич, к.х.н.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0492-469X>

Список литературы

- [1] Похитонов Ю. А. Выделение платиноидов из отработавшего топлива АЭС и перспективы их использования // Атом. энергия. 2019. Т. 127. № 6. С. 332–339. <https://www.elibrary.ru/WBTQWF> [Pokhitonov Yu. A. Recovery of platinoids from NPP spent nuclear fuel and outlook for their use // Atomic Energy. 2020. V. 127. P. 367–374. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00638-y>].
- [2] Пат. РФ 2077600 (опубл. 1997). Способ извлечения осколочного родия из азотнокислых водных растворов.
- [3] Onishi T., Sekioka K., Suto M., Tanaka K., Koyama Sh., Inaba Yu., Takahashi H., Harigai M., Takeshita K. Adsorption of platinum-group metals and molybdenum onto aluminum ferrocyanide in spent fuel solution // Energy Procedia. 2017. N 131. P. 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.421>
- [4] Mishima R., Inaba Yu., Tachioka S., Harigai M., Watanabe Sh., Onoe J., Nakase M., Matsumura T., Takeshita K. Sorption properties of aluminum hexacyanoferrate for platinum group elements // Chem. Lett. 2020. V 49. P. 83–86. <https://doi.org/10.1246/cl.190741>
- [5] Wang Q., Sang H., Chen L., Wu Y., Wei Y. Selective separation of Pd (II) through ion exchange and oxidation-reduction with hexacyanoferrates from high-level liquid waste // Sep. Purif. Technol. 2020. N 231. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115932>
- [6] Давыдова П. В., Корнейко Ю. И., Королев В. А., Красников Л. В., Крецер Ю. Л. Извлечение палладия из азотнокислых растворов переработки отработавшего ядерного топлива // Радиохимия. 2022. Т. 64. № 3. С. 1–4. <https://doi.org/10.31857/S0033831122030029> [Davydova P. V., Korneyko Yu. I., Korolev V. A., Krasnikov L. V., Kretser Yu. L. Recovery of palladium from nitric acid solutions of spent nuclear fuel reprocessing // Radiochemistry. 2022. V. 64. P. 280–283. <https://doi.org/10.1134/s1066362222030031>].
- [7] Kolarik Z., Renard E. V. Recovery of value fission platinoids from spent nuclear fuel. Part I: General considerations and basic chemistry // Platinum Metals Rev. 2003. V. 47. N 2. P. 74–87. <https://www.elibrary.ru/LHZZKL>
- [8] Goela A., McCloyb J. S., Pokornyc R., Kruger A. A. Challenges with vitrification of Hanford High-Level Waste (HLW) to borosilicate glass — An overview // J. Non-Cryst. Solids. 2019. V. 10. N 4. <https://doi.org/10.1016/j.nocx.2019.100033>
- [9] Артыкбаев Т. Д., Ишанходжаев С., Черниловская А. И., Черных Т. А. Растворение молибдена в азотной кислоте // Химия и хим. технология редких и цв. металлов. Сб. статей / Под ред. Н. А. Парпиева, Т. Д. Артыкбаева. Ташкент: ФАН, 1974. С. 123–127.
- [10] Reguera E., Fernández-Bertrán J., Dago A., Diaz C. Mössbauer spectroscopic study of Prussian Blue from different provenances // Hyperfine Interact. 1992. V. 73. P. 295–308. <https://doi.org/10.1007/BF02418604>
- [11] Воронина А. В., Семенищев В. С., Ноговицына Е. В., Бетенеков Н. Д. Исследование ферроцианидных сорбентов на основе гидратированного диоксида

- титана с применением физико-химических методов // *Радиохимия*. 2012. Т. 54. № 1. С. 66–70. <https://www.elibrary.ru/OXHDKH>
[Voronina A. V., Semenishchev V. S., Nogovitsyna E. V., Betenkov N. D. A study of ferrocyanide sorbents on hydrated titanium dioxide support using physicochemical methods // *Radiochemistry*. 2012. V. 54. P. 69–74. <https://doi.org/10.1134/S1066362212010109>].
- [12] Magnin M., Schuller S., Caurant D., Majérus O., Ligny D. d., Mercier C. Effect of compositional changes on the structure and crystallization tendency of a borosilicate glass containing MoO₃ // *Ceram. Trans.* 2009. V. 207. P. 59–67. <https://doi.org/10.1007/s10854-005-5139-2>
- [13] Пимнева Л. А., Ганяев В. П., Пахолков В. С. Сорбция двухзарядных ионов металлов из растворов MeF₂–HF(NH₄F·HF)–H₂O катионитом КФП-12 // *ЖПХ*. 1982. Т. 55. № 1. С. 40–46.
- [14] Ren B., Jones L., Oppedisano D., Kandgani Ah., Chen M., Antolasic F., Ippolito S., Bhargava S. The preparation of a AuCN/Prussian blue nanocube composite through galvanic replacement enhances stability for electrocatalysis // *Chem. Select.* 2017. V. 2. P. 5333–5340. <https://doi.org/10.1002/slct.201700908>
- [15] Беляев А. В. Химико-технологические проблемы платиновых металлов при переработке обработанного ядерного топлива // *ЖСХ*. 2003. Т. 44. № 1. С. 39–47. <https://www.elibrary.ru/OYRNAB>
[Belyaev A. V. Technological problems of platinum metals in nuclear fuel waste disposal // *J. Struct. Chem.* 2003. V. 44. N 1. P. 29–36. <https://doi.org/10.1023/A:1024976829428>].
- [16] Беляев А. В., Ренард Э. В., Храненко С. П., Емельянов В. А., Федотов М. А. О состоянии радиородия в жидких высокоактивных отходах от регенерации отработавшего топлива АЭС // *Радиохимия*. 2002. Т. 44. № 6. С. 493–505
[Belyaev A. V., Renard E. V., Khraanenko S. P., Emel'yanov V. A., Fedotov M. A. State of radiorhodium in high-level liquid waste from regeneration of spent nuclear fuel // *Radiochemistry*. 2002. V. 44. P. 546–558. <https://doi.org/10.1023/A:1022324208620>].
-