



УДК 66.081: 546.633

Сорбция скандия сверхсшитыми полистирольными импрегнатами, содержащими фосфорорганические кислоты

Пьяе Пьо Аунг¹, Трошкина И.Д.¹, Веселова О.А.¹, Давидович Ю.А.²,
Цюрупа М.П.², Даванков В.А.²

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

²Институт элементарных соединений РАН им. А.Н. Несмеянова, Москва

Поступила в редакцию 23.12.2016 г.

Получены импрегнаты, содержащие ди-2-этилгексилфосфорную кислоту (Д2ЭГФК) и этилгексилфосфорную кислоту (ЭГФК) в сверхсшитом полистироле (MN-202). В статических условиях определены равновесные и кинетические характеристики сорбции скандия этими импрегнатами из кислых сульфатно-хлоридных растворов.

Ключевые слова: скандий, импрегнат, сверхсшитый полистирол, ди-2-этилгексилфосфорная кислота (Д2ЭГФК), этилгексилфосфорная кислота (ЭГФК), изотерма, константа скорости, энергия активации, коэффициент диффузии.

Sorption of scandium by hypercrosslinked polystyrene impregnate containing organophosphorus acids

Pyae Phyo Aung¹, Troshkina I.D.¹, Veselova O.A.¹, Davidovich Yu.A.²,
Tsyurupa M.P.², Davankov V.A.²

¹Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russia, Moscow

²Nesmeyanov-Institute of Organo-element Compounds, RAS, Russia, Moscow

We have studied the sorption of scandium from acidic sulfate-chloride solution by hypercrosslinked polystyrene sorbents (MN-202) impregnated with di-2-ethylhexyl phosphoric acid (D2EHPA) and ethylhexyl phosphoric acid (EHPA). The samples of impregnated resins obtained in this work contained 0.233 and 0.244 g of extractant per 1 g of impregnated resin respectively. The sorption of scandium by impregnated resins (D2EHPA) and (EHPA) was studied depending on pH, scandium concentration in solution, temperature and the duration. It has been found that the impregnated sorbent in acidic sulfate-chloride solutions of scandium have relatively low static sorption capacity (≤ 0.251 mmol/g). The equilibrium of scandium sorption is rapidly established within 20-30 min. The models of pseudo-first and pseudo-second orders and the Elovich equation were used for processing of integrated kinetic curves of scandium sorption. The values of the rate constants calculated from the model pseudo-second order describing the data with the best correlation coefficients (R^2 0.999) reached $14.4 \text{ g} \cdot (\text{mmol} \cdot \text{min})^{-1}$. Activation energy of the sorption of scandium is equal 10.0-13.4 kJ/mol. The rate is determined by the slowest stage - diffusion. The coefficients of diffusion of scandium in impregnate have the order of 10^{-11} - 10^{-12} m²/s. Solutions of sodium hydroxide are used for the elution of scandium. Reduction of scandium capacity does not exceed 15% after 5 cycles of sorption-washing-desorption.

Result of the study of characteristics of new hypercrosslinked polystyrene impregnates containing D2EHPA and EHPA allow us to recommend them to extraction of scandium from acidic sulfate-chloride solutions of different composition, including natural and waste waters from processing of polymetallic ores and other scandium-containing raw materials.

Keywords: scandium, impregnate, hypercrosslinked polystyrene, di-2-ethylhexyl phosphoric acid (D2EHPA), ethylhexyl phosphoric acid (EHPA), isotherm, rate constant, activation energy, diffusion coefficient.

Введение

Получение соединений скандия – рассеянного элемента, не образующего собственных месторождений, из различных видов природного и техногенного сырья связано с разработкой новых технологий их комплексной переработки, обеспечивающих ликвидацию экологически опасных техногенных отходов, содержащих этот металл, и одновременное получение ряда ценных продуктов. Скандий используют в виде соединений в производстве новых материалов с высокими эксплуатационными характеристиками (топливных элементов, люминофоров, лазеров, и др.). Широкое его использование сдерживается высокой ценой из-за малых объемов его производства, низкого содержания в сырье, а также сложности технологических схем его извлечения.

Для сорбционного извлечения скандия, который существует в растворах как в виде положительно, так и отрицательно заряженных ионов, могут быть использованы наряду с катионитами и аниониты различного типа [1]. Кроме того, эффективными для извлечения скандия оказались ТВЭКсы – сорбционные материалы с химически не связанным экстрагентом, полученные в процессе синтеза стиролдивинилбензольной матрицы в присутствии последнего [2].

Совершенствование гидрометаллургических процессов выделения скандия включает создание новых материалов, сочетающих свойства сорбентов и экстрагентов – импрегнированных материалов (импрегнатов).

Цель работы – изучение сорбционных характеристик по скандию импрегнатов, содержащих фосфорорганические кислоты в матрице сверхсшитого полистирольного носителя.

Эксперимент

В качестве носителя селективных к ионам скандия экстрагентов использовали сверхсшитые полистирольные сорбенты, характеризующиеся развитой нанопористой структурой с аномально большим свободным объемом ($0.7 \text{ см}^3/\text{г}$) и большой внутренней удельной поверхностью ($1000\text{-}1500 \text{ м}^2/\text{г}$) [3]. Эти полимеры обладают высокими сорбционными свойствами по органическим веществам и способны прочно их удерживать благодаря сочетанию гидрофобных и электронных взаимодействий с сорбатом.

В качестве экстрагентов использовали ди-2-этилгексилфосфорную кислоту (Д2ЭГФК), изготовленную в соответствии с ТУ 2435-028-82006400-2008 (Россия) и этилгексилфосфорную кислоту (ЭГФК) (экстрагент 57) (Россия).

Образцы импрегнатов (И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК) получены в лаборатории стереохимии сорбционных процессов ИНЭОС РАН. Для их изготовления навеску сверхсшитого полистирола (MN-202) с размером гранул 0.3-0.9 мм пропитывали экстрагентом, растворенным в подходящем растворителе. После контактирования полимера с раствором экстрагента сорбент промывали небольшим количеством воды, переносили на фильтр, отжимали и сушили до постоянного веса в вакуум-эксикаторе над фосфорным ангидридом. Полученные образцы взвешивали и по разнице массы импрегната и навески исходного носителя определяли содержание экстрагента в импрегнате.

Основные физико-химические характеристики исследуемых импрегнатов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические характеристики импрегнатов на основе сверхсшитого полистирола

Импрегнат	Содержание экстрагента в импрегнате	
	г/г	ммоль/г
И-Д2ЭГФК	0.233	0.724
И-ЭГФК	0.244	0.757

Определение сорбционных характеристик импрегнатов И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК при извлечении скандия проводили как из разбавленных минерализованных растворов, содержащих Cl^- 1.0 г/дм³ и SO_4^{2-} 30.0 г/дм³, так и из растворов, не содержащих указанных анионов. Выбор этих ионов обусловлен широким их распространением в природных и технологических растворах. Концентрация ионов скандия (Ш) в исходном растворе составляла 0.44 ммоль/дм³ (20 мг/дм³).

Сорбцию скандия из растворов изучали в статических условиях при комнатной температуре. Отношение навески импрегната (г) к объему раствора (см³) составляло 1 : 500. После контакта фаз при интенсивном перемешивании на встряхивателе ЛАБ-ПУ-1 и их разделения определяли концентрацию элемента в растворе (С, ммоль/дм³) и по балансовому соотношению рассчитывали сорбционную емкость (СЕ, ммоль/г). Содержание скандия в растворах определяли фотометрическим методом [4].

Предварительно было исследовано влияние концентрации серной кислоты в диапазоне значений рН 1÷6 на сорбцию скандия импрегнатом И-Д2ЭГФК. Анализ данных (рис. 1) показывает, что наибольшая емкость по скандию достигается при сорбции из растворов с кислотностью, соответствующей значению рН 3.

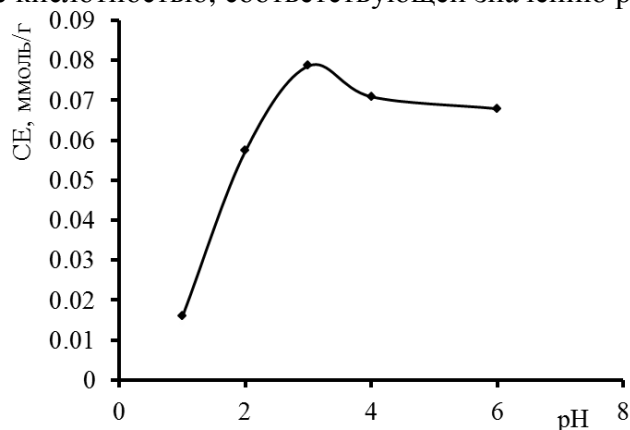


Рис. 1. Зависимость емкости импрегната И-Д2ЭГФК от значения рН минерализованного раствора с концентрацией по скандию 0.44 ммоль/дм³

Изотерма сорбции – одна из основных равновесных характеристик сорбционного процесса – была получена при выбранном оптимальном значении рН раствора (рН 3). Изотермы сорбции скандия импрегнатами И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК имеют характерную выпуклую форму (рис. 2а). Для их описания использовали уравнение Ленгмюра [5]. Анаморфозы уравнения Ленгмюра в координатах (С/СЕ) от С представлены на рис. 2б.

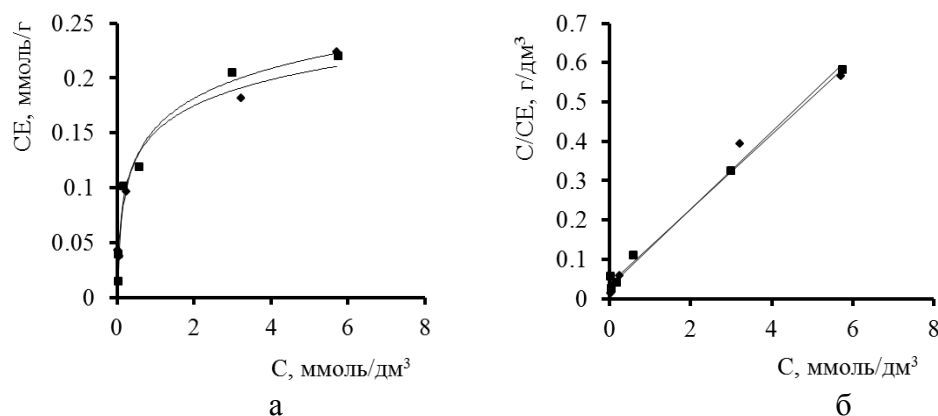


Рис. 2. Изотермы сорбции скандия из сернокисло-хлоридного раствора (рН 3) импрегнатами И-Д2ЭГФК (◆) и И-ЭГФК (■) (а) и их анаморфозы (б)

Расчитанные по уравнению Ленгмюра константы сорбционного равновесия, определяющие энергию взаимодействия сорбтива с импрегнатами (И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК), представлены в табл. 2.

Таблица 2. Константа равновесия и максимальная емкость по скандию импрегнатов И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК

Константа равновесия, дм ³ /моль	Максимальная емкость импрегната, ммоль/г
И-Д2ЭГФК	
2.65	0.251
И-ЭГФК	
3.22	0.248

Кинетику сорбции скандия импрегнатами И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК изучали методом ограниченного объема раствора на установке с термостатируемыми ячейками при температурах 293, 303 и 313 К (погрешность измерения температуры – $\pm 0.1^\circ$). Отношение навески импрегната (г) к объему раствора (см³) составляло 1 : 500. Концентрация ионов скандия(III) в исходном минерализованном растворе составляла 0.44 ммоль/дм³ (20 мг/дм³).

Интегральные кинетические кривые сорбции скандия импрегнатами из растворов вышеуказанного состава (рН 3), полученные при различных температурах, представлены на рис. 3 (а и б).

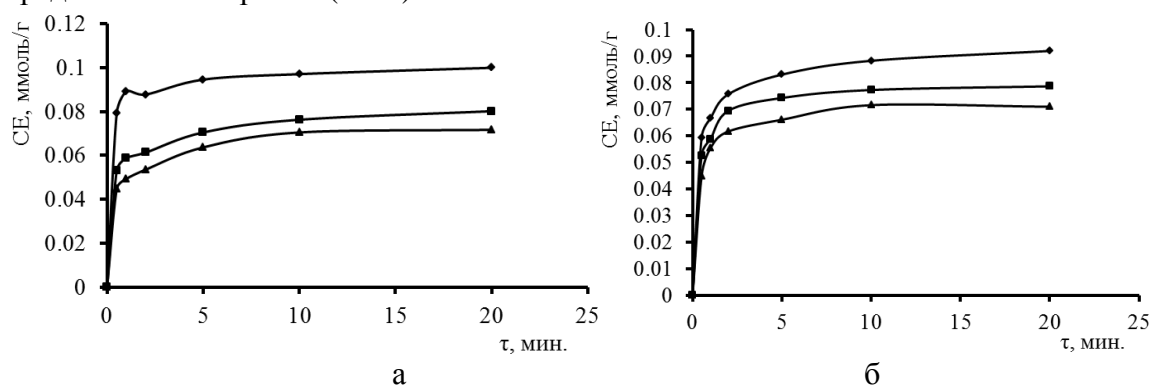


Рис. 3. Интегральные кинетические кривые сорбции скандия из сернокисло-хлоридных растворов импрегнатами И-Д2ЭГФК (а) и И-ЭГФК (б):

◆ – 293 К, ■ – 303 К, ▲ – 313 К

Поскольку скандий извлекается импрегнатами, содержащими фосфорорганические кислоты, по формальному механизму катионного обмена протонов на катионы Sc^{+3} для обработки кинетических данных использованы известные модели псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка и Еловича [5, 6], позволяющие выявить вклад стадии химического взаимодействия в процесс сорбции.

Кинетические уравнения моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядка, а также модели Еловича в линейной форме имеют вид:

$$\log(Q_e - Q_t) = \log Q_e - \frac{k_1}{2.303} \tau,$$

$$\frac{\tau}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} \tau,$$

$$Q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \tau,$$

где Q_e , Q_t – сорбционная емкость равновесная и в момент времени τ , ммоль/г; k_1 , k_2 – константы скорости псевдопервого и псевдовторого порядка, мин^{-1} , $\text{г}/(\text{ммоль} \cdot \text{мин})^{-1}$ соответственно; α – начальная скорость сорбционного процесса, $\text{г}/(\text{ммоль} \cdot \text{мин})$; β – константа Еловича, $\text{г} \cdot \text{ммоль}^{-1}$. Зависимости обработанных кинетических данных в линеаризованных координатах $\log(Q_e - Q_t) - \tau$, $\tau/Q_t - \tau$ и $Q_t - \ln \tau$ по этим моделям представлены на рис. 4-6.

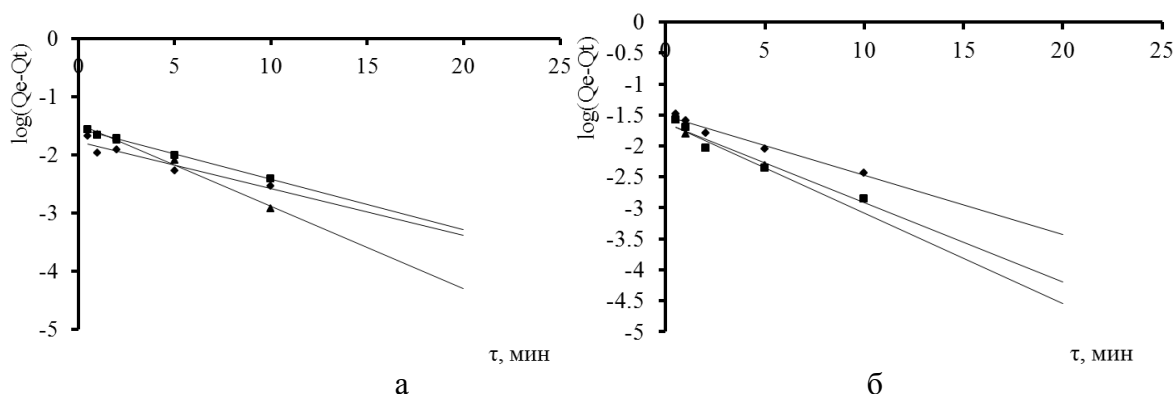


Рис. 4. Кинетические кривые сорбции скандия импрегнатами И-Д2ЭГФК (а) и И-ЭГФК (б) при различных температурах: \blacklozenge – 293 К, \blacksquare – 303 К, \blacktriangle – 313 К (к обработке по уравнению модели псевдопервого порядка)

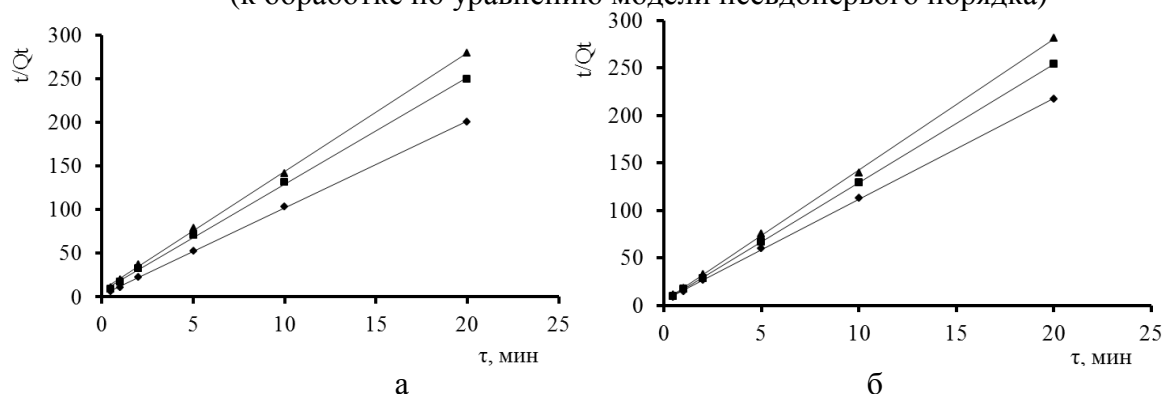


Рис. 5. Кинетические кривые сорбции скандия импрегнатами И-Д2ЭГФК (а) и И-ЭГФК (б) при различных температурах: \blacklozenge – 293 К, \blacksquare – 303 К, \blacktriangle – 313 К (к обработке по уравнению модели псевдовторого порядка)

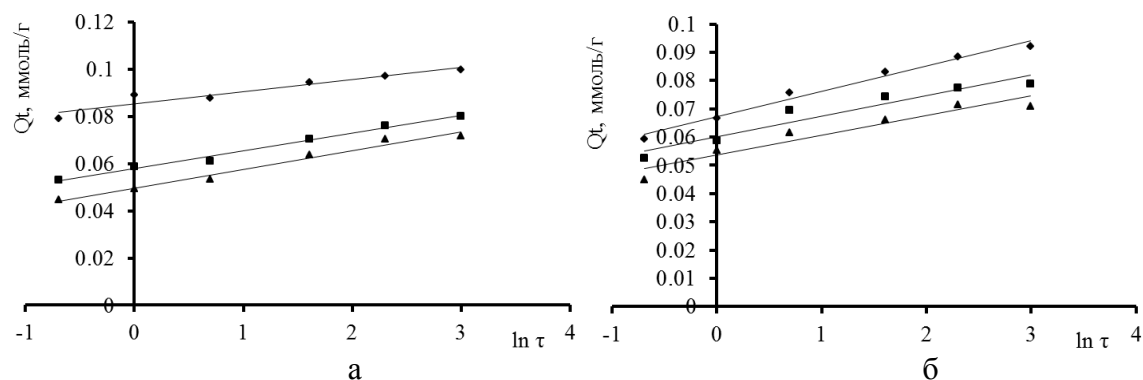


Рис. 6. Кинетические кривые сорбции скандия импрегнатами И-Д2ЭГФК (а) и И-ЭГФК (б) при различных температурах: \blacklozenge – 293 К, \blacksquare – 303 К, \blacktriangle – 313 К (к обработке по уравнению модели Еловича)

Рассчитанные по кинетическим уравнениям использованных моделей константы скоростей и коэффициенты корреляции представлены в табл. 3.

Таблица 3. Константы скорости сорбции скандия импрегнатами И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК, рассчитанные с использованием моделей псевдо-первого, псевдо-второго порядка и модели Еловича

Температура, К	Модель псевдо-первого порядка		Модель псевдо-второго порядка		Модель Еловича	
	k_1 ,	R^2	k_2 ,	R^2	β ,	R^2
	1/мин		$\Gamma \cdot (\text{ммоль} \cdot \text{мин})^{-1}$		$\Gamma \cdot \text{ммоль}^{-1}$	
Д2ЭГФК						
293	0.184	0.906	10.2	0.999	200.0	0.911
303	0.198	0.994	12.7	0.999	143.0	0.990
313	0.322	0.991	14.3	0.999	125.0	0.978
ЭГФК						
293	0.219	0.969	11.1	0.999	111.0	0.981
303	0.295	0.954	12.9	1.000	143.0	0.923
313	0.336	0.896	14.4	0.999	143.0	0.911

Исходя из значений коэффициентов корреляции, полученные кинетические данные по сорбции скандия импрегнатами И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК более адекватно описываются уравнением модели псевдо-второго порядка ($R^2 \geq 0.999$). Константа скорости сорбции скандия импрегнатом И-Д2ЭГФК повышается при нагреве и при температуре 313 К составляет $14.3 \text{ г} \cdot (\text{ммоль} \cdot \text{мин})^{-1}$, а при извлечении импрегнатом И-ЭГФК - $14.4 \text{ г} \cdot (\text{ммоль} \cdot \text{мин})^{-1}$.

Значение кажущейся энергии активации сорбции ($E_{\text{каж.}}$, кДж/моль) рассчитывали из зависимости $\ln k = f(T^{-1})$, вытекающей из уравнения Аррениуса [5], с использованием констант скорости k_2 по формуле:

$$E_{\text{каж.}} = \frac{R \ln \frac{k_{2(1)}}{k_{2(2)}} T_1 T_2}{T_2 - T_1}$$

в интервале температур 293-303, 303-313 и 293-313 К (табл. 4).

Исходя из полученных значений величины кажущейся энергии активации (табл. 4), не превышающих 40 кДж/моль, можно предположить, что скорость-

лимитирующей стадией процесса сорбции скандия является диффузия, а не катионный обмен протонов ди-2-этилгексилфосфорной кислоты на катионы Sc^{+3} , хотя кинетические данные с высокой степенью корреляции описываются учитывающей химическое взаимодействие моделью псевдо-второго порядка.

Таблица 4. Кажущаяся энергия активации сорбции скандия импрегнатами И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК

Импрегнат	$E_{\text{каж.}}$, кДж/моль при температуре, К		
	293-303	303-313	293-313
И-Д2ЭГФК	17.2	9.5	13.4
И-ЭГФК	11.4	8.5	10.0

С учетом времени полусорбции рассчитаны эффективные коэффициенты диффузии скандия в импрегнаты. Расчет коэффициентов диффузии проводили по формуле [7]:

$$D_{\text{эф}} = \frac{0.03R^2}{\tau_{0.5}},$$

где $D_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент диффузии скандия в импрегнате, m^2/c ; R – средний радиус зерна импрегната, м; $\tau_{0.5}$ – время полусорбции, с.

Средний радиус зерна импрегната рассчитывали по формуле [8]:

$$R = 0.435(R_{\text{max}} + R_{\text{min}}),$$

где R_{max} и R_{min} – максимальный и минимальный радиус зерна импрегната.

Значения коэффициентов диффузии скандия в импрегнатах И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК при температуре 293, 303 и 313 К составили $(0.68, 0.85 \text{ и } 1.14) \cdot 10^{-12} m^2/c$ и $(0.85, 1.13 \text{ и } 1.36) \cdot 10^{-12} m^2/c$, соответственно.

Десорбцию скандия с насыщенных импрегнатов осуществляли в статических условиях с использованием растворов гидроксида натрия (20 г/дм^3) при отношении импрегната к элюенту 1 : 100 ($0.1 \text{ г} : 10 \text{ см}^3$). Степень десорбции скандия из импрегнатов И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК за один контакт составила 51.1 и 49.3 %.

Устойчивость импрегнатов оценивали в циклических исследованиях. После пяти последовательных циклов контакта импрегната в сернокисло-хлоридных растворах, воде и растворах гидроксида натрия определяли емкость импрегнатов по скандию и сравнивали ее с емкостью исходного сорбента. Значение емкости по скандию уменьшились на 15 и 4 % при использовании импрегнатов И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК, соответственно. При значительной потере экстрагентов импрегнаты могут быть пропитаны новой порцией экстрагента.

Заключение

Импрегнаты И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК на основе сверхсшитого полистирола, полученные в этой работе и исследованные для сорбции скандия из кислых сульфатно-хлоридных растворов, хотя и обладают относительно низкой равновесной емкостью ($\leq 0.251 \text{ ммоль/г}$), демонстрируют высокие кинетические характеристики. При этом оба импрегната, содержащие разные фосфорорганические кислоты, имеют похожие свойства. Скорость сорбции скандия этими материалами значительно выше скорости извлечения его синтетическими смолами, например, фосфорсодержащими ионитами Lewatit TP260 и Purolite S957 (время установления равновесия составляет 1.5 и 2 ч, соответственно) [10]. В то же время она сопоставима со скоростью сорбции скандия ТВЭКСами, содержащими фосфорорганические экстрагенты (трибутилфосфат, ди-

зооктилметилфосфонат) [2]. Однако их получают в процессе синтеза стиролдвинилбензольной матрицы, что сложнее изготовления импрегнатов. В результате обработки кинетических данных показано, что механизм сорбционного процесса имеет сложный характер. Благодаря высокой проницаемости матрицы обеспечивается высокая скорость массопереноса при сорбции скандия на импрегнатах, причем равновесие в исследуемой системе устанавливается за 20-30 мин. Значения констант скоростей достаточно высоки, до $14.4 \text{ г} \cdot (\text{ммоль} \cdot \text{мин})^{-1}$. Скорость определяется самой медленной стадией процесса - диффузией. При этом коэффициенты диффузии скандия в импрегнатах имеют порядок 10^{-11} - $10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}$. При обсуждении механизма сорбции скандия импрегнатами необходимо учитывать катионообменное взаимодействие в системе сорбтив-экстрагент, что показано применением моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядка. В связи с быстрой кинетикой процесса и высокопроницаемой структурой матрицы, позволяющей рассматривать сорбент как квазигомогенную систему, применение модели Еловича затруднено.

Низкие значения величины кажущейся энергии активации сорбции скандия импрегнатами И-Д2ЭГФК и И-ЭГФК (10.0-13.4 кДж/моль) в то же время свидетельствуют о значительном вкладе диффузии в скорость-определяющую стадию.

Возможность десорбции скандия с импрегнатов раствором гидроксида натрия, а также незначительное уменьшение содержания экстрагента в циклических экспериментах по устойчивости, характерное для этого типа сорбентов, свидетельствуют об определенном технологическом потенциале исследуемых импрегнатов.

Полученные в работе физико-химические характеристики новых сверхсшитых полистирольных импрегнатов, содержащих фосфорорганические кислоты, позволяют рекомендовать их для извлечения и доизвлечения скандия из минерализованных растворов различного состава, в том числе, природных вод и технологических растворов, образующихся при переработке полиметаллических руд и другого скандийсодержащего сырья.

Список литературы

1. Коршунов Б.Г., Резник А.М., Семенов С.А. Скандий. М. Metallurgy. 1987. 184 с.
2. Korovin V., Pogorelov Yu. // Scandium: Compounds, Productions and Applications / Nova Science Publishers Inc. New-York. 2011. pp. 77-100.
3. Davankov V.A., Tsyurupa M.P. // *React. Polymer*. 1990. Vol. 13. pp. 27-42.
4. Малютина Т.М., Конькова О.В. Аналитический контроль в металлургии цветных и редких металлов. М. Metallurgy. 1988. 240 с.
5. Гельферих Ф. Иониты. Основы ионного обмена. М. ИЛ 1962. 491 с.
6. Ho Y.S. // *J. of Hazardous Materials*. 2006. Vol. B136, pp. 681-689.
7. Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена. Л. Химия, 1979. 336 с.
8. Справочник по обогащению полезных ископаемых. М. Metallurgizdat. 1950. 518 с.
9. Соколова Ю.В., Пироженко К.Ю. // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2015. Т. 15. № 4. С. 563-570.

References

1. Korshunov B.G., Reznik A.M., Semenov S.A. Scandium. M., Metallurgy Publ., 1987, 184 p.
2. Korovin V., Pogorelov Yu., Scandium: Compounds, Productions and Applications, Nova Science Publishers Inc., New-York, 2011, pp. 77-100.
3. Davankov V.A., Tsyurupa M.P., *React. Polymer*, 1990, Vol. 13, pp. 27-42.

4. Maljutina T.M., Kon'kova O.V. Analytical control in metallurgy of non-ferrous and rare metals. M., Metallurgy Publ., 1988, 240 p.
5. Gel'ferih F. Ionity. Osnovy ionnogo obmena. M., IL, 1962, 491 p.
6. Ho Y.S., J. of Hazardous Materials, 2006, Vol. B136, pp. 681-689.
7. Kokotov Ju.A., Pasechnik V.A. Ravnovesie i kinetika ionnogo obmena. L., Himija, 1979, 336 p.
8. Spravochnik po obogashheniju poleznyh iskopaemyh. M., Metallurgizdat, 1950, 518 p.
9. Sokolov Y.V., Pirozhenko K.Y., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2015, Vol. 15, No 4, pp. 563-570.

Пьяе Пьо Аунг – аспирант, кафедра технологии редких элементов и наноматериалов на их основе, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва

Трошкина Ирина Дмитриевна – д.т.н., профессор, кафедра технологии редких элементов и наноматериалов на их основе, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва

Веселова Ольга Александровна – студент, кафедра технологии редких элементов и наноматериалов на их основе, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва

Давидович Юрий Александрович – старший научный сотрудник, ФГБУН Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, \ Москва

Цюрупа Мария Петровна – д.х.н., ФГБУН Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, ведущий научный сотрудник, Москва

Даванков Вадим Александрович – д.х.н., профессор, ФГБУН Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва

Pyae Phyo Aung – the postgraduate student, department of technology of rare elements and nanomaterials, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russia, Moscow, e-mail: mice3982@gmail.com

Troshkina Irina D. – Dr. Sci., professor, department of technology of rare elements and nanomaterials, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russia, Moscow, e-mail: tid@rctu.ru

Veselova Olga A. – student, department of technology of rare elements and nanomaterials, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Russia, Moscow, e-mail: olliemelancholy@gmail.com

Davidovich Yurii A. – senior scientific fellow, Nesmeyanov-Institute of Organo-element Compounds, RAS, Russia, Moscow e-mail: yualda@rambler.ru

Tsyurupa Maria P. – Dr. Sci. (Chemistry), leading scientific fellow, Nesmeyanov-Institute of Organo-element Compounds, RAS, Russia, Moscow, e-mail: mts@ineos.ac.ru

Davankov Vadim A. – Dr. Sci. (Chemistry), professor, Nesmeyanov-Institute of Organoelement Compounds, RAS, Russia, Moscow, e-mail: davank@ineos.ac.ru