

ИЗВЛЕЧЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ СОРБЦИЕЙ НА КАТИОНООБМЕННЫХ СМОЛАХ

А.В. Артамонов, Д.Н. Смирнова, Н.Н. Смирнов, А.П. Ильин

Александр Владимирович Артамонов

Отдел промышленной экологии и фтористых солей, АО «Научно исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам имени профессора Я.В. Самойлова», АО «НИУИФ», Северное шоссе, 75, г. Череповец, Вологодская обл., Российская Федерация, 162622

E-mail: AArtamonov@phosagro.ru

Дарья Николаевна Смирнова, Николай Николаевич Смирнов*, Александр Павлович Ильин

Кафедра технологии неорганических веществ, Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: nnsmi@mail.ru*

В основе производства экстракционной фосфорной кислоты лежат два одновременно протекающих процесса: растворение фосфатного сырья в смеси серной и фосфорной (образующейся в процессе) кислот и кристаллизация сульфата кальция (фосфогипса). Фосфогипс является неизбежным многотоннажным и весьма обременительным отходом при сернокислотной переработке апатита, который представляет интерес уже не только как источник строительного гипса, но и как альтернативное редкоземельное сырье, не обладающее природной активностью и содержащее в себе редкоземельные элементы как цериевой, так и иттриевой групп. В качестве сырья для получения редкоземельных элементов использован сульфат кальция трех видов: фосфогипс со шламонакопителя, фосфолугидрат сульфата кальция и фосфодигидрат сульфата кальция с карусельного фильтра производства экстракционной фосфорной кислоты на ОАО «ФосАгро-Череповец». Рассмотрено извлечение редкоземельных элементов из фосфогипса со шламонакопителя методом выщелачивания (перколяции) неорганическими кислотами с последующей сорбцией на катионообменных смолах. В качестве адсорбента для извлечения РЗЭ из растворов выщелачивания применен катионит «Purolite» C-150. Найдена статическая обменная емкость катионита – емкость смолы при достижении равновесия с раствором определенного объема и состава. Статическая емкость катионита по редкоземельным элементам составляет 1,57 %, что говорит о хорошей поглощающей способности. Десорбцию редкоземельных элементов с катионита проводят раствором аммиачной селитры. Установлено, что оптимальным раствором для выщелачивания является серная кислота концентрацией 5 мас.%. Степень извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса серной кислотой составляет порядка 82%.

Ключевые слова: фосфорная кислота, фосфогипс, редкоземельные элементы, извлечение, выщелачивание, перколяция, адсорбент, смола

EXTRACTION OF RARE EARTH ELEMENTS FROM SOLID WASTE OF PRODUCTION OF PHOSPHORIC ACID FOLLOWED BY SORPTION ON CATION EXCHANGE RESINS

A.V. Artamonov, D.N. Smirnova, N.N. Smirnov, A.P. Ilyin

Aleksandr V. Artamonov

Department of industrial Ecology and Fluorides, The Research Institute for Fertilizers and Insectofungicides, Severnoe shosse, 75, Cherepovets, Vologda region, 162622, Russia
E-mail AArtamonov@phosagro.ru

Daria N. Smirnova, Nicolay N. Smirnov, Aleksandr P. Ilyin

Department of Inorganic Substances Technology, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia
E-mail: nnsmi@mail.ru

The basis of production of extraction phosphoric acid is two simultaneous processes: dissolving phosphate raw material in a mixture of sulfuric and phosphoric (formed in the process) acids and crystallization of calcium sulfate (phosphogypsum). Phosphogypsum is an inevitable large-tonnage and cumbersome waste at sulfuric acid processing of apatite, which is of interest not only as a source of building gypsum, but also as an alternative rare earth raw material does not have a natural activity and containing rare-earth elements as a cerium and yttrium groups. As a raw material for the production of rare earth elements, calcium sulfate of three types has been used: phosphogypsum from a sludge accumulator, calcium phosphate phospho-hemihydrate and calcium sulfate phosphate dihydrate from a carousel filter produced by extraction phosphoric acid at JSC "PhosAgro-Cherepovets". The extraction of rare-earth elements from phosphogypsum from a sludge accumulator by leaching (percolation) with inorganic acids with subsequent sorption on cation-exchange resins is considered. As an adsorbent for extracting REE from leach solutions, cationite "Purolite" S-150 is used. A static exchange capacitance of cation exchanger is found that is the capacity of the resin when equilibrium is reached with a solution of a certain volume and composition. The static capacity of cation exchanger for rare-earth elements is 1.57%, which indicates a good absorbing capacity. Desorption of rare-earth elements from the cation exchanger is carried out with a solution of ammonium nitrate. The optimal solution for leaching was found to be sulfuric acid with a concentration of 5% by weight. The degree of extraction of rare-earth elements from phosphogypsum with sulfuric acid is about 82%.

Key words: phosphoric acid, phosphogypsum, rare earth elements, extraction, leaching, percolation, adsorbent, resin

Для цитирования:

Артамонов А.В., Смирнова Д.Н., Смирнов Н.Н., Ильин А.П. Извлечение редкоземельных элементов из твердых отходов производства фосфорной кислоты с последующей сорбцией на катионообменных смолах. *Иzv. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 10. С. 87–93

For citation:

Artamonov A.V., Smirnova D.N., Smirnov N.N., Ilyin A.P. Extraction of rare earth elements from solid waste of production of phosphoric acid followed by sorption on cation exchange resins. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 10. P. 87–93

ВВЕДЕНИЕ

Сырьем для промышленности редкоземельных элементов (РЗЭ) может оказаться в настоящее время апатитовый концентрат и продукты его переработки: в первую очередь экстракционная фосфорная кислота (ЭФК) и фосфогипс. В основе производства экстракционной фосфорной кислоты лежат два одновременно протекающих процесса:

растворение фосфатного сырья в смеси серной и фосфорной (образующейся в процессе) кислот и кристаллизация сульфата кальция (фосфогипса).

Образующиеся в качестве побочных продуктов дигидрат или полугидрат сульфата кальция в связи с содержанием в них примесей P_2O_5 (неразложненного фосфата, недоотмытой фосфорной кислоты, сокристаллизованного P_2O_5 и воды) называют

соответственно фосфогипс или фосфополугидрат (ФПГ) или фосфодигидрат (ФДГ) сульфата кальция.

Фосфогипс является неизбежным много-тоннажным и весьма обременительным отходом при сернокислотной переработке апатита. Так при производстве фосфорных удобрений на одну тонну фосфорной кислоты (100% H_3PO_4) образуется до трех тонн фосфогипса, который, в настоящее время, преимущественно из-за нерентабельности, используется крайне мало. На отдельных предприятиях минеральных удобрений скопились огромные отвалы фосфогипса. На ОАО «ФосАгро-Череповец» около 50 млн. т, на ОАО «Фосфорит» (г. Кингисепп) – 30 млн. т, на ООО «Балаковские минеральные удобрения» – 30 млн. т и т.д. Всего в России в настоящее время скопилось в отвалах около 300-350 млн. т фосфогипса, которые негативно влияют на окружающую среду прилегающих к заводам территорий.

В настоящее время, когда в значительной

мере истощились запасы природного гипса, фосфогипс представляет интерес уже не только как источник строительного гипса, но и как альтернативное редкоземельное сырье: легкодоступное, имеющее практически нулевую стоимость, не обладающее природной активностью и содержащее в себе РЗЭ как цериевой, так и иттриевой групп [1, 2].

МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве сырья для получения редкоземельных элементов использовали сульфат кальция трех видов: фосфогипс со шламонакопителя, фосфополугидрат сульфата кальция и фосфодигидрат сульфата кальция с карусельного фильтра производства экстракционной фосфорной кислоты на ОАО «ФосАгро-Череповец». Фосфогипсы перед началом исследования были подвержены количественному химическому анализу, результаты которого приведены в табл. 1. Для эксперимента выбран фосфогипс, взятый со шламонакопителя.

Таблица 1

Количественный химический анализ фосфогипса
Table 1. Quantitative chemical analysis of phosphogypsum

Наименование показателя, концентрация (мас.%)	Фосфогипс со шламонакопителя	Фосфополугидрат сульфата кальция	Фосфодигидрат сульфата кальция
1	2	3	4
Сульфаты (SO_3),	54,4	54,8	54,8
Оксид алюминия (Al_2O_3)	0,20	0,072	0,020
Оксид бора (B_2O_3),	0,0092	0,0016	0,00064
Кадмий (Cd)	0,00032	<0,00003	<0,00003
Кобальт (Co)	-	<0,00003	<0,00003
Хром (Cr)	0,0020	0,00022	0,0002
Медь (Cu)	0,0014	0,0017	0,0016
Оксид железа (Fe_2O_3)	0,025	0,0077	0,0089
Оксид калия (K_2O)	0,055	0,024	0,024
Оксид магния (MgO)	0,17	0,011	0,010
Марганец (Mn)	0,0012	0,00080	0,00070
Молибден (Mo)	0,00016	0,00012	0,00011
Оксид натрия (Na_2O)	0,27	0,012	0,010
Никель (Ni)	0,00016	0,00003	<0,00003
Свинец (Pb)	0,00098	0,00050	0,00043
Оксид стронция (SrO)	2,04	0,39	0,57
Ванадий (V)	-	<0,00003	<0,00003
Цинк (Zn)	0,0018	0,00091	0,0012
Оксид церия (CeO_2)	0,27	0,10	0,019
Оксид диспрозия (Dy_2O_3)	0,0042	0,0022	0,0021
Оксид европия (Eu_2O_3)	0,0023	0,0012	0,0010
Оксид гадолиния (Gd_2O_3)	-	0,0017	<0,00003
Оксид лантана (La_2O_3)	0,17	0,085	0,088
Оксид неодима (Nd_2O_3)	0,12	0,031	0,030
Оксид празеодима (Pr_2O_3)	0,018	0,029	0,027
Оксид самария (Sm_2O_3)	-	0,0052	0,0052
Оксид тербия (Tb_2O_3)	0,0014	0,00058	0,00058
Оксид иттрия (Y_2O_3)	0,016	0,0065	0,0066
Оксид титана (TiO_2)	0,014±0,3	<0,009	0,045 ± 0,005
∑РЗЭ, мас.%	0,60	0,26	0,18

Лабораторная установка для извлечения РЗЭ состоит из бутылки и стеклянной колонки внутренним диаметром (35,0±1,0) мм и высотой 300 мм. В нижнюю часть колонки впаивают фильтр типа ФКН ПОР 250 ХС по ГОСТ 25336 или другое фильтрующее устройство, устойчивое к действию сильных кислот, не пропускающее частицы фосфогипса и обладающее малым сопротивлением фильтрации. Колонка соединена с бутылкой с помощью стеклянной трубки и резинового шланга с винтовым зажимом. Из бутылки рабочий раствор кислоты подают в колонку для выщелачивания РЗЭ из фосфогипса. Скорость подачи кислого раствора регулируют краном. Скорость фильтрования кислоты через слой фосфогипса можно регулировать за счет поддержания высоты столба жидкости над слоем осадка. При этом необходимо следить за целостностью слоя и не допускать его размывания потоком кислоты или нарушения структуры за счет вытеснения воды более плотным рабочим раствором. По мере протекания процесса отбирают пробы жидкости после колонки. Отобранные пробы кислоты анализируются на содержание в них ΣРЗЭ (в пересчете на оксиды редкоземельных элементов) фотокolorиметрическим методом, основанным на измерении оптической плотности окрашенных в красно-фиолетовый цвет растворов, получаемых при взаимодействии РЗЭ с арсеназо III в тартратной среде при pH = 3.

По окончании опыта отмывают фосфогипс от кислоты. Качество отмывки контролируют по pH раствора на выходе из колонки. Отмывку следует считать законченной при превышении значения pH в воде после колонки более 3,0. Для контроля полноты отмывки РЗЭ из фосфогипса отбирают пробу твердого осадка из колонки и анализируют ее на ΣРЗЭ.

В качестве адсорбента для извлечения РЗЭ из растворов выщелачивания применяют катионит «Purolite» C-150 [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экстрагенты, применяющиеся для извлечения и разделения металлов, должны удовлетворять ряду физико-химических, технологических и экономических требований. Экстрагент должен иметь хорошую экстрагирующую способность и избирательность. Вещество наиболее полно экстрагируется, когда энергия взаимодействия вещества с экстрагентом велика. Также экстрагент должен легко регенерироваться, иметь плотность, отличную от плотности воды, малую вязкость, быть относительно нелетучим и дешевым.

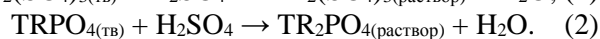
Поскольку редкоземельные элементы достаточно хорошо растворимы в сильных минеральных кислотах при pH менее 1,8, то они могут быть извлечены из фосфогипса растворами серной, соляной или азотной кислот [4].

Выщелачивание РЗЭ проводим методом перколяции. Перколяция – технологический процесс фильтрования жидкости через неподвижный слой твердого вещества (выщелачивание просачиванием) с целью извлечения металла (его химических соединений) или его очистки от примесей [5].

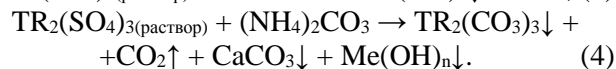
Процесс выщелачивания состоит из трех стадий:

- подвода реагирующих веществ к твердой поверхности;
- химическая реакция;
- отвод растворимых продуктов реакции в раствор.

Реакции процесса выщелачивания имеют следующий вид:



Дальнейшее извлечение редкоземельных элементов ведут методом осаждения по реакциям:



Чаще всего выщелачивание протекает в диффузионной области, т.е. скорость процесса контролируют первая и третья стадии. Однако, возможен кинетический режим, при котором самой медленной стадией является химическая реакция, а также смешанный диффузионно-кинетический режим.

При выщелачивании РЗЭ из сульфата кальция методом перколяции рабочий раствор фильтруют через плотный слой фосфогипса. При контакте раствора с твердым веществом происходит растворение РЗЭ и выход его в жидкую фазу. При таком выщелачивании удается добиться более полного извлечения, поскольку время контакта достаточно большое, а объем жидкости невелик, все это приводит к значительному концентрированию раствора.

Выщелачивание проводят раствором серной кислоты концентрацией 20;10;5;3 мас.%. Данные по извлечению редкоземельных элементов из фосфогипса серной кислотой представлены на рис. 1.

По виду полученных кривых можно сделать вывод, что концентрация суммы редкоземельных элементов при выщелачивании растворами H₂SO₄ увеличивается при уменьшении концентрации кислоты.

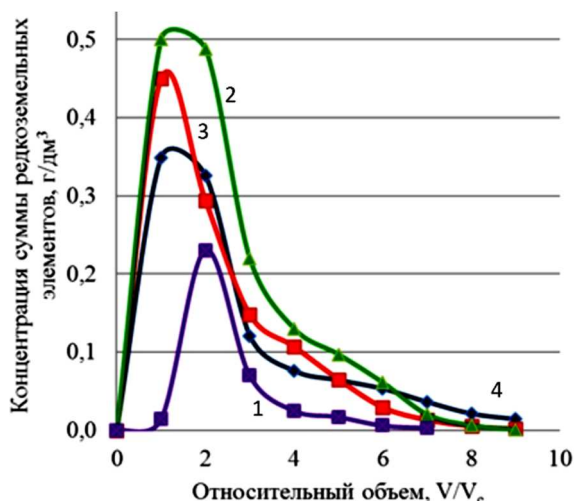


Рис. 1. Зависимость концентрации суммы редкоземельных элементов в рабочем растворе от относительного объема кислоты, прошедшей через слой фосфогипса. 1 – Серная кислота концентрацией 3 мас.%, 2 – серная кислота концентрацией 5 мас.%, 3 – серная кислота концентрацией 10 мас.%, 4 – серная кислота концентрацией 20 мас.%

Fig. 1. The concentration dependence of the sum of rare earth elements in the working solution, on the relative volume of acid passed through a layer of phosphogypsum. 1- sulfuric acid with the concentration of 3 weight%, 2 -sulfuric acid with the concentration of 5 weight%, 3 - sulfuric acid with the concentration of 10 weight%, 4 - sulfuric acid with the concentration of 20 weight%

Максимальная концентрация ΣРЗЭ достигается после пропускания через слой фосфогипса первого относительного объема кислоты. Спад концентрации РЗЭ в растворе выщелачивания начинается при пропускании через слой фосфогипса 3-4 объема кислоты. Поскольку кривые имеют устоявшийся вид, можно сделать предположение о том, что меха-

низм извлечения редкоземельных элементов один и тот же для растворов выщелачивания разных концентраций.

Оптимальным раствором для выщелачивания, как видно из графика, является серная кислота концентрацией 5 мас.%, что говорит о высокой растворимости сульфатов РЗЭ в данном растворе. Дальнейшее разбавление кислоты нецелесообразно, поскольку степень извлечения РЗЭ резко падает.

Таблица 2

Степень извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса

Table 2. The degree of extraction of rare earth elements from phosphogypsum

Концентрация ΣРЗЭ в исходном фосфогипсе	Концентрация ΣРЗЭ в пробе, % после опыта	Степень извлечения РЗЭ, % (по твердому)
0,60	-	-
0,60	0,16 (извлечение РЗЭ 20 мас.% H ₂ SO ₄)	73,33
0,60	0,14 (извлечение РЗЭ 10 мас.% H ₂ SO ₄)	76,67
0,60	0,11 (извлечение РЗЭ 5 мас.% H ₂ SO ₄)	81,67
0,60	0,20 (извлечение РЗЭ 3 мас.% H ₂ SO ₄)	66,67

Для контроля полноты извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса, отбирают пробу твердого осадка из колонки и анализируют ее на концентрацию ΣРЗЭ. На основании полученных данных рассчитывают степень извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса (табл. 2).

Таблица 3

Состав концентратов, полученных методом осаждения
Table 3. Composition of concentrates obtained by precipitation

Наименование показателя, концентрация (мас.%)	Концентрат	
	1 Осадитель карбонат аммония	2 Осадитель гидрат аммиака
Оксид кальция (CaO)	15,1	14,2
Оксид титана (TiO ₂)	0,015	0,023
Сульфаты (SO ₃)	1,50	3,8
Оксид железа (Fe ₂ O ₃)	0,062	0,12
Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	0,61	0,89
Оксид церия (CeO ₂)	0,98	2,89
Оксид диспрозия (Dy ₂ O ₃)	0,015	0,031
Оксид европия (Eu ₂ O ₃)	0,0091	0,020
Оксид гадолиния (Gd ₂ O ₃)	0,0002	0,0002
Оксид лантана (La ₂ O ₃)	0,60	1,21
Оксид неодима (Nd ₂ O ₃)	0,55	1,16
Оксид празеодима (Pr ₂ O ₃)	0,066	0,14
Оксид самария (Sm ₂ O ₃)	0,0002	0,0002
Оксид тербия (Tb ₂ O ₃)	0,0061	0,013
Оксид иттрия (Y ₂ O ₃)	0,062	0,15
ΣРЗЭ расчетная, мас.%	2,3	5,6

Из полученных растворов выщелачивания выделим концентраты лантаноидов. Для этого рассмотрим 2 метода:

- осаждение растворов выщелачивания карбонатом аммония и гидратом аммиака;

- сорбция растворов выщелачивания на катионообменной смоле с последующим осаждением. В исследовании использовалась смола «Purolite» C-150, зарекомендовавшая себя в производстве редкоземельных элементов.

В результате осаждения растворами $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ и $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ получены концентраты РЗЭ, составы которых представлены в табл. 3.

Полученные после экспериментов кислые растворы могут содержать до 40 г/дм^3 РЗЭ в пересчете на оксиды. Невысокая кислотность растворов выщелачивания позволяет использовать сорбцию на катионообменных смолах для извлечения и обогащения РЗЭ.

Наиболее важный показатель катионита, участвующего в сорбции РЗЭ – его обменная емкость. В первом приближении можно считать, что переход ионов из раствора в смолу, осуществляется лишь путем обмена на эквивалентное количество противоионов смолы. Перед началом выделения концентрата лантаноидов методом сорбции была найдена статическая (равновесная) обменная емкость катионита – емкость смолы при достижении равновесия в статических условиях с раствором определенного объема и состава. Статическая емкость катионита по редкоземельным элементам составляет 1,57 %. Это говорит о хорошей поглощающей способности катионита. Десорбцию РЗЭ с катионита проводят раствором аммиачной селитры концентрацией 600 г/дм^3 . Данные по регенерации катионита представлены в табл. 4. Кривые элюирования редкоземельных элементов с «Purolite» C-150 приведены на рис. 2.

Таблица 4

Данные по регенерации катионита

Table 4. Data for the regeneration of cation exchanger

Регенерация катионита (выщелачивание РЗЭ серной кислотой)		
Объем пропущенного элюата	Оптическая плотность раствора	$\Sigma\text{РЗЭ}$, г/дм^3
0	0	0
0,1	0,110	0,75
0,2	0,107	0,64
0,3	0,095	0,50
0,4	0,070	0,30
0,5	0,009	0,06
0,6	0,003	0,02

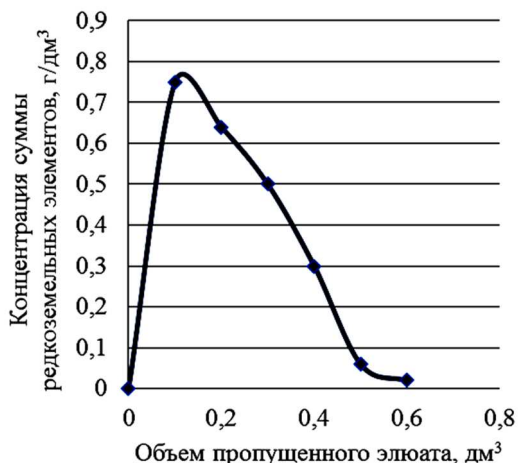


Рис. 2. Кривые элюирования редкоземельных элементов с «Purolite» C-150 (регенерация катионита (выщелачивание РЗЭ серной кислотой))

Fig. 2. Curves of elution of rare earth elements with «Purolite» C-150 (regeneration of cation exchanger (leaching of REE with sulfuric acid))

Скорость отмывки катионита и концентрация РЗЭ максимальна при прохождении через слой сорбента $0,1 \text{ дм}^3$ элюата. Далее идет постепенный спад концентрации $\Sigma\text{РЗЭ}$. В табл. 5 приведен состав концентрата, полученного методом сорбции.

Таблица 5

Состав концентрата, полученного методом сорбции
Table 5. Composition of the concentrate obtained by sorption

Наименование показателя, концентрация (мас.%)	Концентрат 3 десорбция РЗЭ с катионита
Оксид кальция (CaO)	0,015
Оксид титана (TiO_2)	0,0010
Оксид железа (Fe_2O_3)	0,026
Оксид алюминия (Al_2O_3)	0,16
Оксид церия (CeO_2)	0,071
Оксид диспрозия (Dy_2O_3)	0,004
Оксид европия (Eu_2O_3)	0,0022
Оксид гадолиния (Gd_2O_3)	0,0058
Оксид лантана (La_2O_3)	0,021
Оксид неодима (Nd_2O_3)	0,028
Оксид празеодима (Pr_2O_3)	0,091
Оксид самария (Sm_2O_3)	0,082
Оксид тербия (Tb_2O_3)	-
Оксид иттрия (Y_2O_3)	0,017
$\Sigma\text{РЗЭ}$ расчетная, мас.%	7,51

По полученным данным можно судить о преимуществе сорбционного метода получения концентратов РЗЭ из растворов выщелачивания серной кислотой.

ВЫВОД

Фосфогипс рассматривается как альтернативное сырье для промышленности редкоземельных элементов, легкодоступное, имеющее практически нулевую стоимость, не обладающее природной активностью и содержащее в себе РЗЭ легкой и среднетяжелой групп.

Извлечение редкоземельных элементов проводилось методом перколяции растворами сер-

ной кислоты различной концентрации с последующей сорбцией на катионообменной смоле. Оптимальная концентрация раствора выщелачивания – 5 мас.% раствор H_2SO_4 . Степень извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса серной кислотой составляет порядка 82%.

Получены концентраты редкоземельных элементов из растворов выщелачивания методом осаждения и сорбцией на катионообменной смоле.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Косынкин В.Д., Глебов В.А.** Возрождение российского производства редкоземельных металлов - важная задача российской экономики. Материалы 3-й Международной конференции «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». Апатиты. 2013. С. 15-21.
2. **Мещеряков Ю.Г., Федоров С.В.** Промышленная переработка фосфогипса. СПб.: Стройиздат. 2007. 104 с.
3. Технические характеристики катионитов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://wwtec.ru/htm>.
4. **Шестаков С.В., Козырев А.Б.** Комплексная переработка отвалов фосфогипса с получением редкоземельного концентрата. Материалы 2-ой Российской конференции с международным участием «Новые подходы в химической технологии минерального сырья» Применение экстракции и сорбции. СПб. 2013 С. 175-177.
5. **Локшин Э.П., Ивлев К.Г., Тареева О.А.** Выщелачивание лантаноидов из фосфополугидрата сернокислыми растворами повышенной концентрации. Деп. В ВИНТИ 30.05.2005. № 774-В2005. 11 с.

REFERENCES

1. **Kosynkin V.D., Glebov V.A.** The revival of the Russian production of rare earth metals - the most important task of the Russian economy. Proceedings of the 3rd International Conference "Functional Nanomaterials and High-Purity Substances." Apatity. 2013. P. 15-21 (in Russian).
2. **Meshcheryakov Yu.G., Fedorov S.V.** Industrial processing of phosphogypsum. SPb.: Stroyizdat. 2007. 104 p. (in Russian).
3. Specifications of cation exchangers [electronic resource]. Access: <http://wwtec.ru/htm>.
4. **Shestakov S.V., Kozyrev A.B.** Complex processing of phosphogypsum dumps to produce a rare earth concentrate. Proceedings of the 2nd Russian Conference with international participation "New Approaches in chemical technology of mineral raw materials" Application of extraction and adsorption. SPb. 2013. P. 175-177 (in Russian).
5. **Lokshin E.P., Ivlev K.G., Tareeva O.A.** The leaching of lanthanides from phosphohemihydrate with sulfuric acid solutions of increased concentration. Dep. In VINITI 30.05.2005. N 774-V2005. 11 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 25.05.2017

Принята к опубликованию 07.09.2017

Received 25.05.2017

Accepted 07.09.2017