

## СОРБЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИНДИЯ ИЗ РАСТВОРОВ ЦИНКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2017 г. **К.Л. Тимофеев, Г.И. Мальцев, А.В. Усольцев, С.С. Набойченко**

АО «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма

Уральский федеральный университет (УрФУ)  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

*Статья поступила в редакцию 23.05.16 г., доработана 10.06.16 г., подписана в печать 30.06.16 г.*

Исследована в динамическом режиме сорбция ионов индия из поликомпонентных растворов с предварительно восстановленным железом (III), содержащих, г/дм<sup>3</sup>: 0,084 In<sup>3+</sup>, 6,2 Fe<sup>2+</sup>, 67,0 Zn<sup>2+</sup> и 19,6 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, на реагенте Metosol. Последний представляет собой монтмориллонит состава (Na,Ca)<sub>0,3</sub>(Al,Mg)<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>, модифицированный ди(2-этилгексил)фосфорной кислотой. Динамика поглощения им ионов металлов изучена методом фронтальной хроматографии. Определены значения рабочей (ДОЕ) и полной (ПДОЕ) динамических обменных емкостей минерального сорбента в зависимости от удельной скорости пропускания и температуры элюента. Обоснованы и рассчитаны основные параметры сорбционной технологии селективного извлечения индия из технологических растворов цинкового производства на реагенте Metosol в колонках с последующей десорбцией металла раствором соляной кислоты (1 : 1).

**Ключевые слова:** сорбция, десорбция, индий, модифицированный монтмориллонит, динамический режим.

**Тимофеев К.Л.** — канд. техн. наук, гл. гидрометаллург АО «Уралэлектромедь» (624091, Свердловская обл., г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 1). E-mail: K.Timofeev@elem.ru.

**Мальцев Г.И.** — докт. техн. наук, ст. науч. сотр., гл. специалист Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь». E-mail: mgi@elem.ru.

**Усольцев А.В.** — гл. специалист УСП ООО «УГМК–Холдинг» (624091, Свердловская обл., г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 1). E-mail: a.usolcev@ugmk.com.

**Набойченко С.С.** — докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН, зав. кафедрой металлургии тяжелых цветных металлов УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: svmamychenkov@yandex.ru.

**Для цитирования:** Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Усольцев А.В., Набойченко С.С. Сорбционная технология извлечения индия из растворов цинкового производства // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 2. С. 43–50.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-43-50.

*Timofeev K.L., Maltsev G.I., Usoltsev A.V., Naboichenko S.S.*

### **Sorption technology of indium extraction from zinc production solutions**

The article studies the dynamic sorption of indium ions from polycomponent solutions with pre-reduced iron (III) containing, g/dm<sup>3</sup>: 0,084 In<sup>3+</sup>, 6,2 Fe<sup>2+</sup>, 67,0 Zn<sup>2+</sup> and 19,6 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, on the Metosol reagent. The latter is a montmorillonite with the following composition (Na,Ca)<sub>0,3</sub>(Al,Mg)<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>, modified by di(2-ethylhexyl) phosphoric acid. Its absorption dynamics of metal ions was studied by the method of frontal chromatography. The article determines the values of working (DEC) and total (TDEC) dynamic exchange capacities of the mineral sorbent depending on the specific throughput rate and the eluent temperature. The article justifies and calculates the basic parameters of the sorption technology of selective indium extraction from process solutions used for zinc production operations on the Metosol reagent in columns with subsequent desorption of metal by hydrochloric acid solution (1 : 1).

**Keywords:** sorption, desorption, indium, modified montmorillonite, dynamic mode.

**Timofeev K.L.** — Cand. Sci. (Eng.), Chief hydrometallurgist of JSC «Uralelectromed» (624091, Sverdlovsk region, Verkhnyaya Pyshma, Uspenskij str., 1). E-mail: K.Timofeev@elem.ru.

**Maltsev G.I.** — Dr. Sci. (Eng.), Senior scientific officer, Chief specialist of the Research Center of JSC «Uralelectromed». E-mail: mgi@elem.ru.

**Usoltsev A.V.** — Chief specialist of USP, LLC «UMMC–Holding» (624091, Sverdlovsk region, Verkhnyaya Pyshma, Uspenskij str., 1). E-mail: a.usolcev@ugmk.com.

**Naboichenko S.S.** — Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of the RAS, Head of the Department of metallurgy of heavy non-ferrous metals of the Ural Federal University (620002, Yekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: svmamychenkov@yandex.ru.

**Citation:** Timofeev K.L., Maltsev G.I., Usoltsev A.V., Naboichenko S.S. Sorbtionnaya tekhnologiya izvlecheniya indiya iz rastvorov tsinkovogo proizvodstva. Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya. 2017. No. 2. P. 43–50.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-2-43-50.

## Введение

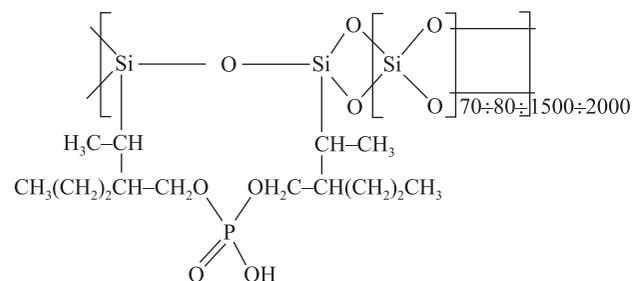
Минералы индия (джалиндит, йиксунит) не имеют промышленных месторождений, вследствие чего основным сырьевым источником металла являются отходы и промежуточные продукты производства цинка [1–3], а также, в меньшей степени, свинца [4–6] и олова [7–9], содержащие 0,001–0,1 % In. При кислотном выщелачивании, например вельц-оксида цинка, концентрация индия в растворах составляет 0,02–0,1 г/дм<sup>3</sup>, откуда его извлекают экстракцией [10–12], недостатком которой является попадание органических веществ в цинковые растворы, что мешает последующему электролизу цинка.

Альтернативным способом селективного извлечения индия представляется сорбция на модифицированном монтмориллоните — реагенте Metosol — в динамическом режиме, позволяющем максимально реализовать обменную емкость реагента и цикл операций сорбция/десорбция [13–15]. Применимость и перспективность использования сорбции для извлечения индия из растворов была показана в ряде статей [16–18].

Целью настоящей работы являлось определение основных параметров процесса сорбции ионов индия на модифицированном алюмосиликате в динамическом режиме в зависимости от удельной скорости пропускания и температуры элюента, а также обоснование основных параметров технологической схемы селективной сорбции индия в колонках.

## Методика исследований

Сорбцию индия из раствора (sol) состава, г/дм<sup>3</sup>: 19,6 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 6,2 Fe<sup>2+</sup>, 67,0 Zn<sup>2+</sup> и 0,084 In<sup>3+</sup>, осуществляли в колонках диаметром 2 см и высотой 40 см на реагенте (reag) Metosol со структурной формулой



Он был получен при модификации природного слоистого монтмориллонита состава

(Na,Ca)<sub>0,3</sub>(Al,Mg)<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub> ди(2-этилгексил) фосфорной кислотой (Д2ЭГФК или D2ЕНРА) в количестве 20 % относительно исходной массы алюмосиликата.

В ионообменные колонки для фиксации сорбента вначале загружали инертный носитель — кварцит с радиусом частиц ~1 мм, высотой слоя ~12 см, объемом 37 см<sup>3</sup> и порозностью слоя  $\epsilon = (V - V_s)/V = (37 - 22)/37 \approx 0,4$  [19]. Реагент Metosol в количестве 0,75 г (15 см<sup>3</sup>) иммобилизовали в межзеренное пространство с помощью неионогенного флокулянта Praestol-2500 (концентрация 1 %, объем ~0,3 см<sup>3</sup>). На стадии сорбции ионов металлов удельная объемная скорость пропускания исходного раствора (элюента) составляла  $u_{sol}/V_{reag} = 1,0 \div 2,7 \text{ ч}^{-1} (\text{см}^3 \cdot \text{ч}^{-1} / \text{см}^3)$ , или  $4,8 \div 12,7 \text{ см}^3 / (\text{см}^2 \cdot \text{ч})$  при температуре 298–328 К.

Постоянство подачи раствора обеспечивали с помощью перистальтического насоса. Порции раствора после сорбции объемом 10, 25 и 50 см<sup>3</sup> анализировали на остаточную концентрацию ионов In<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup> и Zn<sup>2+</sup> атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре с пламенной атомизацией ААС-6650 («Shimadzu», Япония).

Динамику поглощения ионов In<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup> и Zn<sup>2+</sup> реагентом Metosol изучали методом фронтальной хроматографии [20] путем построения выходных кривых сорбции при разных удельных скоростях (удельных нагрузках) элюента (подвижная фаза) и температурах (рис. 1). Выходные кривые представляли функциями

$$C/C_0 = f(V_{sol}/V_{reag}),$$

$$\alpha = f(V_{sol}/V_{reag}),$$

где  $V_{sol}$  и  $V_{reag}$  — объемы элюента, прошедшего через колонку, и реагента Metosol соответственно;  $C/C_0$  — отношение концентраций ионов в порции фильтрата и исходном растворе;  $\alpha$  — степень извлечения ионов металлов из раствора:

$$\alpha = [(C_0 - C)/C_0] \cdot 100 \%. \quad (1)$$

По объему до «проскока» и объему насыщения рассчитывали рабочую (ДОЕ) и полную (ПДОЕ) динамические обменные емкости сорбента:

$$\text{ДОЕ} = C_0 V_{sol(1)}/m, \quad (2)$$

$$\text{ПДОЕ} = (V_{sol(2)}C_0 - \Sigma V_{sol(3)}C)/m, \quad (3)$$

где  $V_{sol(1)}$  — объем раствора, пропущенный че-

рез ионит до появления ионов в фильтрате, т.е. до «проскока»,  $\text{см}^3$ ;  $m$  — масса воздушно-сухого сорбента, г;  $V_{sol(2)}$  — объем раствора, пропущенный через ионит до уравнивания концентраций ионов в фильтрате и исходном растворе,  $\text{см}^3$ ;  $\Sigma V_{sol(3)}$  — суммарный объем порций фильтрата после появления ионов («проскока»),  $\text{см}^3$ .

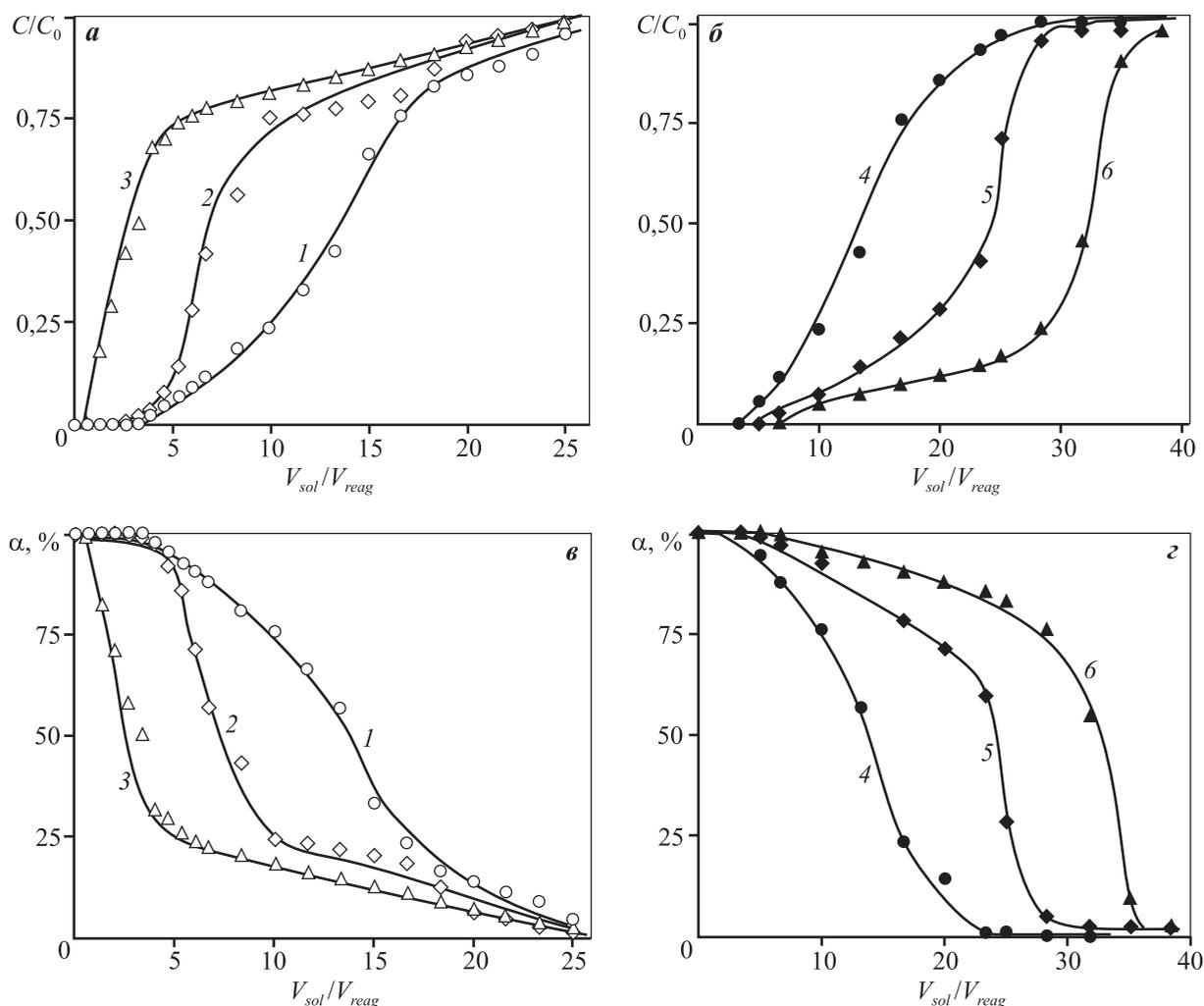
В ходе испытаний было проведено 5 циклов сорбции/десорбции.

Относительную объемную ширину сорбционного фронта  $\Delta V_{sol}/V_{reag(0,15 \div 0,85)}$  измеряли между точками  $C/C_0 = 0,15$  и  $0,85$ . Степень использования слоя ионита ( $\eta$ ) определяли как отношение ДОЕ/ПДОЕ.

Десорбцию ионит из насыщенного реагента Metosol осуществляли раствором HCl (1 : 1) с удельной объемной скоростью пропускания  $0,5 \text{ ч}^{-1}$  при температуре 298 К.

## Результаты и их обсуждение

В ходе проведенных исследований установлено, что в динамическом режиме ионы железа (II) и цинка количественно не сорбируются на реагенте Metosol. Поглощение указанных компонентов в статическом режиме из растворов с эквивалентной ионной концентрацией [21, 22], скорее всего, обусловлено ионообменным взаимодействием с функциональными группами и физической адсорбцией при образовании межмолекулярных связей с развитой поверхностью ( $\sim 70 \text{ м}^2/\text{г}$ ) модифицированного алюмосиликата. В условиях динамического режима происходит вытеснение адсорбированных ионов макрокомпонентов ионами ионит, по-видимому, образующего хелатные соединения с ионогенными группами ди(2-этил-гексил)фосфорной кислоты [23, 24].



**Рис. 1.** Выходные кривые сорбции ионов ионит при разных удельных скоростях раствора и температурах  $u_{sol}/V_{reag} = 1,0 \text{ ч}^{-1}$  (1, 4–6),  $2,0$  (2) и  $2,7$  (3).  $T = 298 \text{ К}$  (1–4),  $313$  (5) и  $328$  (6)

Вероятно, некоторое количество ионов железа (II) и цинка, определяемое параметрами процесса, постоянно присутствует в фазе сорбента, но незначительная убыль их концентраций в фильтрате не фиксируется при анализе, поскольку не превышает допустимую погрешность используемой методики определения. Выходные кривые сорбции ионов индия в исследованных интервалах удельной нагрузки и температуры имеют преимущественно S-образную форму; точка перегиба смещена в область низких значений удельного объема

пропущенного раствора ( $V_{sol}/V_{reag}$ ) или малой продолжительности процесса, что свидетельствует о замедлении скорости диффузии ионов в сорбенте (см. рис. 1).

Результаты оценки ширины хроматографического фронта ( $\Delta V_{sol}$ ) и скорости движения средней точки фронта ( $\omega_{0,5}$ , см/ч), а также полученные значения ДОЕ и ПДОЕ приведены в табл. 1.

С ростом линейной скорости пропускания элюента через колонку в интервале  $\omega_{0,5} = 4,78 \div 12,74$  см/ч «проскок» ионов индия в фильтрат на-

Таблица 1  
Параметры выходных кривых сорбции ионов индия

$u_{sol}/V_{reag}, \text{ч}^{-1}$	$\Delta V_{sol}/V_{reag}$	$V_{sol(1)}/V_{reag}$	$V_{sol(2)}/V_{reag}$	$\omega_{0,5}, \text{см/ч}$	ДОЕ	ПДОЕ	$\eta$
					ммоль-экв/г		
Температура 298 К							
1,0	12,10	3,333	28,333	4,78	0,1463	0,5722	0,226
2,0	12,24	1,999	26,666	9,55	0,0878	0,3971	0,221
2,7	12,35	0,666	24,999	12,74	0,0293	0,2375	0,123
$T, \text{К}$	$u_{sol}/V_{reag} = 1,0 \text{ч}^{-1}$						
313	11,64	4,999	38,333	4,78	0,2195	0,9129	0,240
328	10,24	6,666	41,666	4,78	0,2926	1,2925	0,256



Рис. 2. Принципиальная технологическая схема извлечения индия из растворов цинкового производства

ступает значительно раньше ( $V_{sol(1)}/V_{sol} = 3,33 \div 0,66$ ), увеличивается ширина хроматографического фронта ( $\Delta V_{sol}/V_{reag} = 12,1 \div 12,35$ ), снижаются полная динамическая обменная емкость (ПДОЕ =  $0,572 \div 0,237$  ммоль-экв/г) и степень использования слоя ионита ( $\eta = 0,226 \div 0,123$ ). По мере увеличения температуры в интервале  $T = 298 \div 328$  К уменьшается ширина хроматографического фронта ( $\Delta V_{sol}/V_{reag} = 12,1 \div 10,24$ ) возрастают полная динамическая обменная емкость (ПДОЕ =  $0,572 \div 1,293$  ммоль-экв/г) и степень использования слоя ионита ( $\eta = 0,226 \div 0,256$ ).

При разработке технологической схемы (рис. 2) сорбционно-го извлечения индия реагентом Metosol из растворов выщелачивания вельц-оксида цинкового производства вышеприведенного состава приняты следующие исходные данные: производительность —  $4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; скорость раствора на сорбции/десорбции  $u_{sol}/V_{reag} = 1,0/0,5 \text{ ч}^{-1}$ ; температура раствора на сорбции/десорбции  $298/328 \text{ К}$ ; ДОО/ПДОЕ =  $12,4/49,47 \text{ мг/г}$ ; режим работы —  $300 \text{ сут/год}$ . При проведении 5 циклов сорбции—десорбции абсолютные значения ДОО и ПДОЕ остались практически неизменными, что свидетельствует о высоких технологических свойствах реагента Metosol.

Рассмотрим технологические параметры отдельных операций.

**Сорбционное извлечение индия.** Исходный раствор выщелачивания вельц-оксида из накопительной емкости подают по направлению сверху вниз на каскад из четырех ступеней (I—IV), которыми являются последовательно работающие сорбционные фильтры (1—4). Количество аппаратов в каскаде

Таблица 2

Материальный баланс сорбционной технологии извлечения индия

Статья баланса	Объем*, м <sup>3</sup>	Количество In, кг	Распределение, %
<b>Сорбция индия на реагенте Metosol</b>			
<i>Поступило:</i>			
Исходный раствор (In = $0,084 \text{ г/дм}^3$ )	40×720	3,36×720	100
Реагент Metosol (H <sup>+</sup> -форма)	4×720	—	—
Маточный раствор (деионизированный)	1,2×720	—	—
<i>Получено:</i>			
Фильтрат (In < $0,001 \text{ г/дм}^3$ )	27936	0,03×720	~1
Насыщенный реагент Metosol	4×720	3,33×720	~99
Маточный раствор (исходный)	1,2×720	—	~0
<b>Взрыхление реагента Metosol</b>			
<i>Поступило:</i>			
Деионизированная вода	4×720	—	—
Насыщенный реагент Metosol	4×720	3,33×720	~100
Маточный раствор (исходный)	1,2×720	—	—
<i>Получено:</i>			
Вода после взрыхления	4×720	—	~0
Насыщенный реагент Metosol	4×720	3,33×720	~100
Маточный раствор (деионизированный)	1,2×720	—	—
<b>Десорбция/регенерация реагента Metosol</b>			
<i>Поступило:</i>			
Насыщенный реагент Metosol	4×720	3,33×720	~100
Маточный раствор (деионизированный)	1,2×720	—	~0
Раствор элюента (HCl 1:1)	4×360	2,012×360 (оборотный)	—
<i>Получено:</i>			
Регенерированный Metosol	4×720	—	~0
Маточный раствор (элюат)	1,2×360	2,0×360 (оборотный)	—
Элюат	4×360	6,72×360	~100
<b>Отмывка реагента Metosol</b>			
<i>Поступило:</i>			
Регенерированный Metosol	4×720	—	—
Маточный раствор (элюат)	1,2×360	2,0166×360 (оборотный)	—
Деионизированная вода	4×360	—	—
<i>Получено:</i>			
Регенерированный Metosol	4×720	—	—
Маточный раствор (деионизированный)	1,2×360	—	—
Промывной раствор для элюента	2,6×360	2,0166×360 (оборотный)	—
Промывной раствор для нейтрализации	1,4×360	—	—
* Первое число означает объем материала (раствора), второе — количество регенераций в год.			

определяется отношением выявленных значений динамических обменных емкостей: ПДОЕ/ДОЕ = 49,47/12,4 ≈ 4.

Величина загрузки (объем  $V_{reag}$ , масса  $m_{reag}$ ) реагента Metosol в каждом фильтре определяется производительностью ( $u_{sol} = 4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и скоростью подачи ( $u_{sol}/V_{reag} = 1 \text{ ч}^{-1}$ ) исходного раствора:  $V_{reag} = 4/1 = 4 \text{ м}^3$  или  $m_{reag} = 200 \text{ кг}$ . Количество кварцевого песка для иммобилизации реагента Metosol при порозности слоя  $\varepsilon \approx 0,4$  равняется  $V_{crys} = V_{reag}/\varepsilon = 4/0,4 = 10 \text{ м}^3$ . Продолжительность цикла сорбции при заданной скорости фильтрации обусловлена достижением ПДОЕ и составляет 40 ч. По окончании цикла сорбции фильтр 1 выводят на операции взрыхления загрузки и десорбции, а на сорбцию подключают фильтр 5 (IV ступень). Исходный раствор на сорбцию подают на фильтр 2 (I ступень). По истечении очередных 10 ч сорбции на десорбцию выводят фильтр 2 и в каскад подключают регенерированный фильтр 1 (IV ступень).

Предлагаемый режим сорбции обеспечивает максимальное насыщение индием реагента Metosol и практически полное извлечение металла из производственных растворов.

**Взрыхление, регенерация и отмывка ионита.** По окончании сорбции индия осуществляют взрыхление ионита деионизированной водой, которую подают в аппарат по направлению снизу вверх в количестве  $6 \text{ м}^3$  в течение 1,5 ч. После взрыхления ионита проводят десорбцию индия с одновременной регенерацией реагента Metosol в H-форму рабочим раствором элюента ( $\sim 180 \text{ г}/\text{дм}^3 \text{ HCl}$ ,  $V_{sol} = 4 \text{ м}^3$ ) со скоростью  $u_{sol}/V_{reag} = 0,5 \text{ ч}^{-1}$ . Товарную фракцию элюата, содержащего 4–5  $\text{г}/\text{дм}^3 \text{ In}$ , направляют на получение первичного индиевого концентрата.

После десорбции и регенерации ионита проводят его отмывку от кислоты деионизированной водой ( $4 \text{ м}^3$ ) со скоростью  $u_{sol}/V_{reag} = 0,5 \text{ ч}^{-1}$ . Первые  $2 \text{ м}^3$  образующихся отмывочных вод используют для приготовления рабочего раствора элюента, остальной объем направляют на станцию нейтрализации.

**Материальный баланс процесса извлечения индия** составлен при условии, что потери используемых реагентов и извлекаемого металла не превысили 0,1 % от общего количества, и поэтому ими можно пренебречь (табл. 2). Обратные растворы при оценке распределения индия не учитывались.

## Заключение

В ходе проведенных исследований установлено следующее. Из поликомпонентных растворов ионы железа (II) и цинка не сорбируются в динамическом режиме (в отличие от статического) на монтмориллоните, модифицированном ди(2-этилгексил)фосфорной кислотой (реагент Metosol), поскольку вытесняются ионами индия, вероятно образующего хелатные соединения с ионогенными группами D2ЕНРА.

С ростом скорости пропускания раствора через колонку «проскок» ионов индия в фильтрат наступает при меньшем объеме фильтрата, увеличивается ширина хроматографического фронта, снижаются полная динамическая обменная емкость и степень использования слоя ионита.

По мере увеличения температуры элюента уменьшается ширина хроматографического фронта, возрастают полная динамическая обменная емкость и степень использования слоя ионита.

Технологическая схема переработки растворов выщелачивания вельц-оксида цинкового производства предусматривает 4-ступенчатую последовательную сорбцию индия на реагенте Metosol из растворов выщелачивания вельц-оксида производства цинка с температурой 328 К, подаваемого с удельной объемной скоростью  $1 \text{ ч}^{-1}$  в течение 40 ч, что обеспечивает достижение ПДОЕ  $\sim 50 \text{ мг}/\text{г}$  реагента и практически полное извлечение ионов металла из жидкой фазы.

## Литература

1. *Abkhoshk E., Jorjani E., Al-Harashsheh M.S.* Review of the hydrometallurgical processing of non-sulfide zinc ores // Hydrometallurgy. 2014. Vol. 149. P. 153–167.
2. *Mikhlin Y., Vorobyev S., Romanchenko A.* Ultrafine particles derived from mineral processing: A case study of the Pb–Zn sulfide ore with emphasis on lead-bearing colloids // Chemosphere. 2016. Vol. 147. P. 60–66.
3. *Shang Yanbo, Tan Xin.* Study of new process technology for low-grade refractory zinc oxide ore // Proc. Environment. Sci. 2016. Vol. 31. P. 195–203.
4. *Кунеева Р.Д.* Состояние и перспективы переработки свинцово-цинковых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. Т. 15. No. 12. С. 456–460.
5. *Абрамов А.А.* Технология обогащения окисленных и смешанных руд цветных металлов. М.: Недра, 1986.

6. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Свинцовые и цинковые руды. М.: ФГУ ГКЗ, 2007.
7. *Jianguang H., Bin C., Gongjian L.* Material, energy and spatial fields for metallogenic prediction: Theory and practice: An example: Limu Sn polymetallic crisis mines // *Mining Sci. Technol. (China)*. 2011. Vol. 21. Iss. 1. P. 107—116.
8. *Fernie W.T.* Metals — the nobler // *Precious stones. For curative wear, and other remedial uses: Likewise the nobler metals*. 2013. P. 357—475.
9. *Нукулин Н.Н.* Распределение индия, ниобия, скандия в касситеритах Хинганского месторождения // *Вест. ЛГУ*. 1967. No. 6. С. 81—87.
10. *Nusen S., Chairuangsi T., Zhu Z.* Recovery of indium and gallium from synthetic leach solution of zinc refinery residues using synergistic solvent extraction with LIX 63 and Versatic 10 acid // *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 160. P. 137—146.
11. *Yang J., Retegan T., Steenari B.-M.* Recovery of indium and yttrium from flat panel display waste using solvent extraction // *Separat. Purificat. Technol*. 2016. Vol. 166. P. 117—124.
12. *Xingbin Li, Zhigan Deng, Cunxiong Li.* Direct solvent extraction of indium from a zinc residue reductive leach solution by D2EHPA // *Hydrometallurgy*. 2015. Vol. 156. P. 1—5.
13. *Ghorbani M., Nowee S. M., Ramezani N.* A new nanostructured material amino functionalized mesoporous silica synthesized via co-condensation method for Pb(II) and Ni(II) ion sorption from aqueous solution // *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 161. P. 117—126.
14. *Grailot A., Bouyer D., Monge S.* Removal of nickel ions from aqueous solution by low energy-consuming sorption process involving thermosensitive copolymers with phosphonic acid groups // *J. Hazard. Mater*. 2013. Vol. 244—245. P. 507—515.
15. *Dubenskiy A.S., Seregina I.F., Blinnikova Z.K.* Investigation of the new sorption preconcentration systems for determination of noble metals in rocks by inductively coupled plasma—mass spectrometry // *Talanta*. 2016. Vol. 153. P. 240—246.
16. *Wronski G., Debczak A., Hubicki Z.* Application of the FT-IR/PAS method in comparison of Ga(III) and In(III) sorption on lewattit OC-1026 and amberlite XAD-7 impregnated D2EHPA // *Acta. Phys. Polon. A*. 2009. Vol. 116. No. 3. P. 435—437.
17. *Liu J.S., Chen H., Chen X.Y.* Extraction and separation of In(III), Ga(III) and Zn(II) from sulfate solution using extraction resin // *Hydrometallurgy*. 2006. Vol. 82. P. 137—143.
18. *Fortes M.C.B., Martins A.H., Benedetto J.S.* Indium adsorption onto ion exchange polymeric resins // *Miner. Eng.* 2003. Vol. 16. P. 659—663.
19. *Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А.* Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л.: Химия, 1979.
20. *Тикунова И.В., Дробницкая Н.В., Артеменко А.И.* Справочное руководство по аналитической химии и физико-химическим методам анализа: Учеб. пос. М.: Высш. шк., 2009.
21. *Ганебных Е.В., Свиридов А.В., Мальцев Г.И.* Извлечение цинка из растворов высокодисперсными модифицированными алюмосиликатами // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2015. Т. 23. No. 1. С. 89—95.
22. *Свиридов А.В., Ганебных Е.В., Мальцев Г.И., Тимофеев К.Л.* Очистка промышленных стоков алюмосиликатными сорбентами // *Цв. металлы*. 2015. No. 12. С. 42—46.
23. *Радионон Б., Мальцев Г.* Индий в водных растворах. Saarbrücken: LAP LAMBERT Acad. Publ. Gmbx & Co. KG, 2014.
24. *Тимофеев К.Л., Усольцев А.В., Мальцев Г.И., Тутубалина И.Л.* Сорбция индия, железа и цинка из многокомпонентных систем на аминокислотных смолах // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2015. Т. 23. No. 3. С. 273—278.

## References

1. *Abkhoshk E., Jorjani E., Al-Harashsheh M.S.* Review of the hydrometallurgical processing of non-sulfide zinc ores. *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 149. P. 153—167.
2. *Mikhlin Y., Vorobyev S., Romanchenko A.* Ultrafine particles derived from mineral processing: A case study of the Pb—Zn sulfide ore with emphasis on lead-bearing colloids. *Chemosphere*. 2016. Vol. 147. P. 60—66.
3. *Shang Yanbo, Tan Xin.* Study of new process technology for low-grade refractory zinc oxide ore. *Proc. Environment. Sci.* 2016. Vol. 31. P. 195—203.
4. *Kupeeva R.D.* Sostojanie i perspektivy pererabotki svincovo-cinkovyh rud [The state and prospects of processing of lead-zinc ores]. *Gornyy informacionno-analiticheskiy bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2009. Vol. 15. No. 12. P. 456—460.
5. *Abramov A.A.* Tehnologija obogashhenija okislennyh i smeshannyh rud cvetnyh metallov [The technology of enrichment of oxidized and mixed ores of non-ferrous metals]. Moscow: Nedra, 1986.
6. Metodicheskie rekomendacii po primeneniju Klassifikacii zapasov mestorozhdenij i prognoznyh resursov tverdyh poleznyh iskopaemyh. Svincovyje i cinkovyje rudy [Methodical recommendations on application of Classification of reserves and forecast resources of solid useful minerals. Lead and zinc ores]

- cation of reserves and prognostic resources of solid minerals. Lead and zinc ore]. Moscow: FGU GKZ, 2007.
7. *Jianguang H., Bin C., Gongjian L.* Material, energy and spatial fields for metallogenic prediction: Theory and practice: An example: Limu Sn polymetallic crisis mines. *Mining Sci. Technol. (China)*. 2011. Vol. 21. Iss. 1. P. 107–116.
  8. *Fernie W.T.* Metals — the nobler. Precious stones. For curative wear, and other remedial uses: *Likewise the nobler metals*. 2013. P. 357–475.
  9. *Nikulin N.N.* Raspređenje indija, niobija, skandija v kasiteritah Hinganskogo mestorozhdenija [The distribution of indium, niobium, scandium in deposits of cassiterite Khingan]. *Vestnik LGU*. 1967. No. 6. P. 81–87.
  10. *Nusen S., Chairuangstri T., Zhu Z.* Recovery of indium and gallium from synthetic leach solution of zinc refinery residues using synergistic solvent extraction with LIX 63 and Versatic 10 acid. *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 160. P. 137–146.
  11. *Yang J., Retegan T., Steenari B.-M.* Recovery of indium and yttrium from flat panel display waste using solvent extraction. *Separat. Purificat. Technol.* 2016. Vol. 166. P. 117–124.
  12. *Xingbin Li, Zhigan Deng, Cunxiong Li.* Direct solvent extraction of indium from a zinc residue reductive leach solution by D2EHPA. *Hydrometallurgy*. 2015. Vol. 156. P. 1–5.
  13. *Ghorbani M., Nowee S. M., Ramezani N.* A new nanostructured material amino functionalized mesoporous silica synthesized via co-condensation method for Pb(II) and Ni(II) ion sorption from aqueous solution. *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 161. P. 117–126.
  14. *Graillot A., Bouyer D., Monge S.* Removal of nickel ions from aqueous solution by low energy-consuming sorption process involving thermosensitive copolymers with phosphonic acid groups. *J. Hazard. Mater.* 2013. Vol. 244–245. P. 507–515.
  15. *Dubenskiy A.S., Seregina I.F., Blinnikova Z.K.* Investigation of the new sorption preconcentration systems for determination of noble metals in rocks by inductively coupled plasma—mass spectrometry. *Talanta*. 2016. Vol. 153. P. 240–246.
  16. *Wronski G., Debczak A., Hubicki Z.* Application of the FT-IR/PAS method in comparison of Ga(III) and In(III) sorption on lewattit OC-1026 and amberlite XAD-7 impregnated D2EHPA. *Acta. Phys. Polon. A*. 2009. Vol. 116. No. 3. P. 435–437.
  17. *Liu J.S., Chen H., Chen X.Y.* Extraction and separation of In(III), Ga(III) and Zn(II) from sulfate solution using extraction resin. *Hydrometallurgy*. 2006. Vol. 82. P. 137–143.
  18. *Fortes M.C.B., Martins A.H., Benedetto J.S.* Indium adsorption onto ion exchange polymeric resins. *Miner. Eng.* 2003. Vol. 16. P. 659–663.
  19. *Ajerov M.Je., Todes O.M., Narinskij D.A.* Apparaty so stacionarnym zernistym sloem [Apparatus with stationary granular layer]. Leningrad: Khimija, 1979.
  20. *Tikunova I.V., Drobnickaja N.V., Artemenko A.I.* Spravochnoe rukovodstvo po analiticheskoj khimii i fiziko-khimicheskim metodam analiza: Uchebnoe posobie [Reference manual for analytical chemistry and physicochemical methods of analysis: A tutorial]. Moscow: Vysshaja shkola, 2009.
  21. *Ganebnyh E.V., Sviridov A.V., Mal'cev G.I.* Izvlechenie cinka iz rastvorov vysokodispersnymi modificirovannymi aljmosilikatami [The extraction of zinc from solutions of highly dispersed modified aluminosilicates]. *Khimija v interesah ustojchivogo razvitija*. 2015. Vol. 23. No. 1. P. 89–95.
  22. *Sviridov A.V., Ganebnyh E.V., Mal'cev G.I., Timofeev K.L.* Ochistka promyshlennyh stokov aljmosilikatnymi sorbentami [Treatment of industrial waste water with aluminosilicate sorbents]. *Tsvetnye metally*. 2015. No. 12. P. 42–46.
  23. *Radionov B., Mal'cev G.* Indij v vodnyh rastvorah [Indium in aqueous solutions]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Acad. Publ. Gmbx & Co. KG, 2014.
  24. *Timofeev K.L., Usol'cev A.V., Mal'cev G.I., Tutubalina I.L.* Sorbcija indija, zheleza i cinka iz mnogokomponentnyh sistem na aminofosfonovyh smolah [Sorption of India, iron and zinc from multicomponent systems on aminophosphonic resins]. *Khimija v interesah ustojchivogo razvitija*. 2015. Vol. 23. No. 3. P. 273–278.