

УДК 66.08:669.872:546.7:546.4:661.183

КИНЕТИКА СОРБЦИИ ИОНОВ ИНДИЯ, ЖЕЛЕЗА И ЦИНКА НА МОДИФИЦИРОВАННОМ МОНТМОРИЛЛОНИТЕ

К.Л. Тимофеев, Г.И. Мальцев*, А.В. Свиридов

(АО «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма; *e-mail: mgi@elem.ru)

Получены интегральные кинетические кривые адсорбции ионов индия и железа (III) из модельных растворов на модифицированном ди(2-этил-гексил)фосфорной кислотой монтмориллоните Метозоль. Показано, что кинетика адсорбции может быть достоверно описана с помощью моделей псевдопервого и псевдovторого порядка. Установлен смешаннодиффузионный режим адсорбции ионов металлов на реагенте Метозоль. Для ионов In^{3+} константы скорости внешней и внутренней диффузии на реагенте Метозоль больше, чем для Fe^{3+} , что обуславливает возможность его использования для селективной сорбции индия из сложных по составу технологических растворов цинкового производства.

Ключевые слова: монтмориллонит, алюмосиликаты, индий, железо, цинк, сорбция, интеркаляция.

Высокая востребованность редких металлов, в частности индия, в современных наукоемких отраслях и технологиях (электронике, лазерной технике, подшипниковых и легкоплавких сплавах, высококачественных сталях, электромагнитных и оптических материалах, новой керамике и композитах и др.) приводит к динамичному расширению его потребления в экономически развитых странах мира [1]. Основными источниками сырья для получения металла являются отходы и промежуточные продукты производства цинка, содержащие до 0,1% индия [2–4]. Перспективным для извлечения и концентрирования индия из сложных по составу технологических растворов представляется селективная сорбция на минеральных модифицированных алюмосиликатах, широко используемых в последнее время в различных гидрометаллургических процессах [5–7]. Эффективность сорбции на высокодисперсных алюмосиликатных сорбентах может быть резко увеличена путем интеркаляционной модификации их поверхности [8–10]. Синтезированные реагенты представляют собой тонкопористые сорбенты с саморасширяющейся структурой. Закономерности адсорбции ионов металлов на поверхности таких сорбентов изучены недостаточно, хотя представляют большой научный и практический интерес. Исследование кинетики сорбции позволяет установить скорость достижения равновесия, максимальную рабочую емкость ионита для раствора определенного состава и механизм взаимодействия ионов металлов с ионитом при сорбции.

Цель работы – изучение кинетики адсорбции индия, железа и цинка из водных растворов на модифицированных высокодисперсных алюмосиликатах, а также оценка возможности их использования в качестве альтернативы экстракции или в сочетании с этим процессом для извлечения индия из технологических растворов.

Теоретический анализ

В качестве природных высокодисперсных алюмосиликатов использовали монтмориллониты Курганского и Зырянского месторождений, модификацию поверхности которых осуществляли посредством интеркаляционного синтеза с помощью анионных и амфотерных прекурсоров неорганической и органической природы. Интеркаляцию проводили за счет внедрения и закрепления прекурсоров в структуру и межслоевое пространство монтмориллонитов [11, 12]. В ходе интеркаляции алюмосиликатов различными по природе прекурсорами наблюдалось резкое изменение их физико-химических свойств (сорбционная способность, адгезия, поверхностный заряд, реология, межчастичное и гетерокоагуляционное взаимодействие). Для монтмориллонита, где два тетраэдрических кремнекислородных слоя сжимают октаэдрический алюмокислородный слой, закрепление анионов может происходить на поверхности положительно заряженных ребер, а интеркаляция катионов – по отрицательным граням минерала (рис. 1).

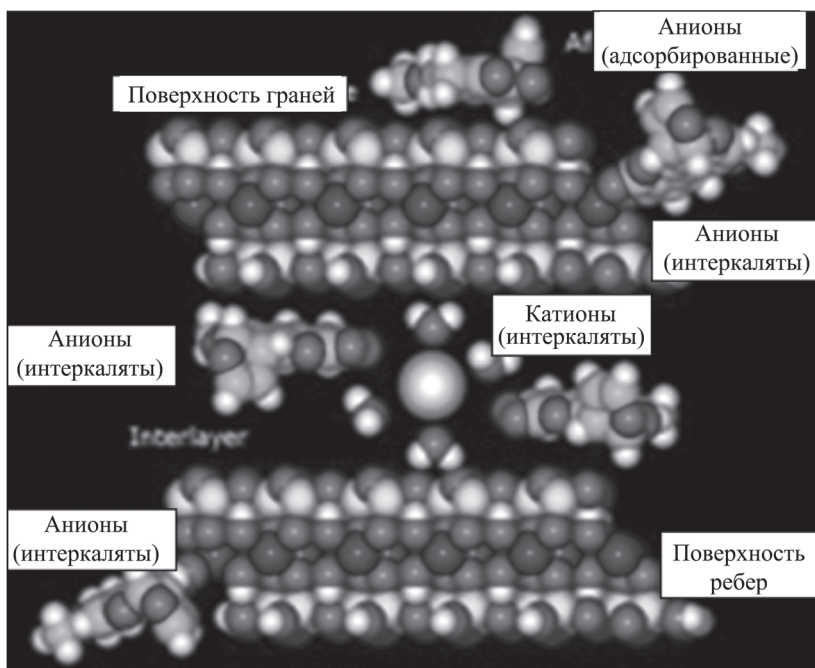


Рис. 1. Интеркаляционная модификация монтмориллонита

При разбавлении гидрозолей монтмориллонита самопроизвольно диспергируется до элементарных пакетов толщиной около 10 нм с удельной поверхностью до 400–600 м²/г. Большая часть поверхности минерала становится фактически внешней поверхностью, легко доступной для адсорбирующихся из водных растворов компонентов различной природы.

Направленный подбор прекурсоров позволяет решать широкий круг практических задач, связанных с использованием высокодисперсных природных сорбентов, в частности, осуществлять селективное извлечение индия из технологических растворов цинкового производства.

Экспериментальная часть

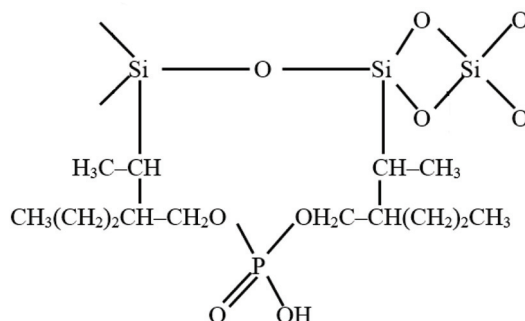
Объектами проведенных исследований служили модельные водные растворы, имеющие следующий состав, г/дм³: 0,11 In³⁺; 0,065 Zn²⁺; 0,056 Fe³⁺; 1–100 H₂SO₄. Использовали

также технологические растворы после восстановления железа (III), содержащие, г/дм³: 0,095 In³⁺; 73,1 Zn²⁺; 10,1 Fe²⁺; 20,5 H₂SO₄. Исследования проводили при температуре 25–55 °С.

Первый этап модификации природных монтмориллонитов состоял в обработке растворов кальцинированной содой в целях замещения ионов кальция на ионы натрия. Натриевая форма монтмориллонита отличалась от кальциевой более высокими значениями удельной поверхности и дзета-потенциала частиц и, как следствие, лучшими адсорбционными характеристиками [13].

На втором этапе модификации проводили интеркаляцию монтмориллонитов в Na-форме с помощью прекурсоров, в частности ди(2-этилгексил)фосфорной кислоты (Д2ЭГФК), содержание которой составляло 20 мас.%. В результате был получен реагент Метозоль, структурная формула которого представлена на схеме.

С х е м а



Эксперименты по сорбции ионов металлов на минеральном реагенте проводили по следующей методике. В испытуемый раствор объемом 100 см³ при интенсивном перемешивании вносили 4 см³ 5%-го Метозоля. После установления адсорбционного равновесия в системе при медленном перемешивании в течение 30 мин твердую фазу отделяли центрифугированием, а в фугате определяли остаточное содержание ионов металлов Me^{z+} атомно-адсорбционным методом на спектрофотометре с пламенной атомизацией «ААС-6650» («Shimadzu»). Последующий анализ обработанных растворов показал отсутствие прекурсоров, что свидетельствует об их прочном закреплении в тонкопористой структуре монтмориллонита.

При исследовании процесса сорбции получены интегральные кинетические кривые в системе $F - \tau$, где $F = a_t/a_\infty$ – относительная степень сорбции; a_∞ и a_t – количество сорбата (ммоль/г) на единицу массы смолы в состоянии равновесия и в момент времени τ (τ – продолжительность процесса, с). Для обработки полученных экспериментальных данных использовали уравнения, учитывающие влияние внешней (пленочной), внутренней (гелевой) диффузии и стадии химической реакции. Поскольку сорбция на ионообменных смолах является сложным и многостадийным процессом, выявляют обычно лимитирующую стадию, которая определяет общую скорость процесса [14].

В начальный период времени при внешнедиффузионном механизме кинетики скорость сорбции определяется процессом выравнивания концентрации в приповерхностном слое жидкости (диффузионном слое). По мере заполнения сорбента и перехода к гелевой кинетике диффузия в твердой фазе осуществляется намного медленнее, чем в диффузионном слое, поэтому градиенты концентрации появляются только в зерне [15]. Для описания кинетики в условиях постоянства концентрации сорбтива на поверхности зерна ионита использовано уравнение [16]:

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{D_g n^2 \pi^2 \tau}{r_0^2}\right), \quad (1)$$

где F – доля превращения вещества, которая является функцией параметра $D_g t/r_0^2$; τ – время, в течение которого достигается данная величина F ; n – число слагаемых (1, 2, 3...); D_g – коэффициент гелевой диффузии, см²/с.

Константа скорости гелевой диффузии (B , с⁻¹) выражена отношением $B = D_g \pi/r_0^2$. С учетом константы скорости уравнение (1) принимает вид:

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-B\tau n^2), \quad (2)$$

где $B\tau$ – безразмерный параметр, решающий задачи диффузии в твердом теле определенной формы, например сферы с радиусом r_0 .

Значения F как функции $F = f(B\tau)$ сведены в таблицы [14]. Если зависимость $B\tau = f(\tau)$ линейна, то лимитирующей стадией является диффузия в фазе сорбента. Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс равен B , а коэффициент гелевой диффузии $D_g = B r_0^2/\pi^2$. Если зависимость $B\tau - \tau$ нелинейная, значит ощутимо влияние внешнедиффузионного этапа массопереноса и уравнение (2) нельзя использовать для расчета D_g .

Асимптотическое приближение зависимости F от τ в начальный момент обмена при малых степенях заполнения смолы ($F \approx 0,3$) подчиняется закону корня:

$$F = \frac{6}{r_0} \sqrt{D_g \tau / \pi}, \quad (3)$$

поэтому зависимость $F - \sqrt{\tau}$ при гелевой кинетике линейна; для более высоких значений F используют таблицы [16]. Уравнение (3) можно представить в виде:

$$F^2 \pi^3 / 6^2 = B\tau, \quad (4)$$

позволяющем графически определить численное значение константы скорости гелевой диффузии (B , с⁻¹) в координатах $F^2 \pi^3 / 6^2 - \tau$, где τ – продолжительность процесса, с. В разбавленных растворах (не более 10 ммоль/дм³) скорость процесса, как правило, лимитируется пленочной диффузией [17]:

$$-\ln(1 - F) = (3Dc^0/r_0\delta m) \tau, \quad (5)$$

где D – коэффициент диффузии вещества через пленку жидкости толщиной δ , покрывающую зерно сорбента; c^0 и m – концентрация сорбтива (в растворе) и сорбата (в сорбенте). При пленочном механизме диффузии зависимость $-\ln(1-F) = f(\tau)$ должна быть линейной, а множитель перед величиной τ в уравнении (5), являющийся константой скорости внешней диффузии ($\gamma = (3Dc^0/r_0\delta m)$, с⁻¹), должен равняться тангенсу угла наклона этой прямой к оси абсцисс.

Поскольку реагент Метозоль содержит фосфорные группы, можно предположить, что ио-

нообменное взаимодействие сопровождается комплексообразованием, когда химическая реакция протекает достаточно медленно и может лимитировать общую скорость обмена противоионов [18, 19]. На следующем этапе обработки кинетических кривых применяют, как правило, известные модели псевдопервого и псевдovторого порядка, позволяющие выявить вклад стадии химического взаимодействия в процесс сорбции.

Кинетические уравнения моделей псевдопервого и псевдovторого порядка в линейной форме имеют вид:

$$\ln(a_{\infty} - a_{\tau}) = \ln a_{\infty} - k_1 \tau; \quad (6)$$

$$\tau/a_{\tau} = 1/(k_2 a_{\infty}) + (1/a_{\infty})\tau,$$

$$F/(1-F) = k_2 \tau, \quad (7)$$

где k_1 и k_2 – константы скорости сорбции модели соответственно псевдопервого и псевдovторого порядка (с^{-1}) представлены в виде зависимостей в координатах

$$\ln(a_{\infty} - a_{\tau}) - \tau,$$

$$\tau/a_{\tau} - \tau \text{ или } F/(1-F) - \tau.$$

Изменение кажущейся энергии активации (ΔE , кДж/моль) сорбции определяли из зависимости $\ln k_i = f(T^{-1})$ с использованием констант скорости моделей псевдопервого и псевдovторого порядка путем графического решения уравнений (с применением метода наименьших квадратов):

$$k_{i(j)} = k_{0(i)} \exp[-\Delta E/(RT_{(j)})], \quad (8)$$

$$\ln k_{i(j)} = \ln k_{0(i)} - \Delta E/(RT_{(j)}). \quad (9)$$

Расчетным методом можно определить величину изменения кажущейся энергии активации по формуле [20]:

$$\Delta E = \{R \ln[k_{(1)}/k_{(2)}]T_{(1)}T_{(2)}\}/[T_{(2)} - T_{(1)}]. \quad (10)$$

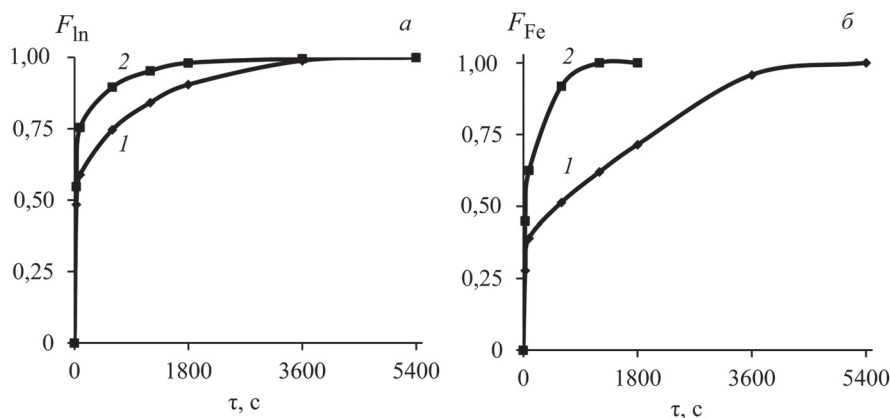


Рис. 2. Интегральные кинетические кривые сорбции ионов индия (а) и железа (III) (б) на реагенте Метозоль при температуре, К: 298 (1); 328 (2)

Результаты и их обсуждение

Интегральные кинетические кривые сорбции ионов индия и железа (III) на модифицированном алюмосиликате представлены на рис. 2. Повышение температуры увеличивает скорость сорбции ионов металлов. Равновесные концентрации элементов в растворе и в фазе реагента Метозоль (a_{∞}) в зависимости от температуры устанавливались в течение 0,5–1,5 ч, что сопоставимо с продолжительностью процесса для синтетических ионообменных смол [21]. Ионы цинка на реагенте Метозоль при температуре 25–55 °С количественно не сорбируются.

Для определения лимитирующей стадии кинетики сорбции экспериментальные данные по извлечению ионов индия обработали по уравнениям (1)–(5) (рис. 3). Зависимости в координатах $-\ln(1-F) = f(\tau)$ линейны в начальный период времени (при малых значениях F) и аппроксимируется с уравнением (5) (рис. 3, а). При увеличении F на кривых появляются изломы, что свидетельствует о возрастании влияния внутридиффузионного массопереноса в сорбционный процесс при некоторой степени заполнения реагента Метозоль. В целом процесс сорбции ионов металлов на модифицированных алюмосиликатах протекает в смешанно-диффузионном режиме, когда контролируется диффузией в пленке раствора на границе раздела жидкой и твердой фаз и непосредственно в фазе сорбента [15].

Доказательством того, что стадией, лимитирующей сорбцию, является внутренняя диффузия, служит наблюдение прямолинейной зависимости в координатах $F - \tau^{1/2}$ спустя некоторое время после начала процесса (рис. 3, б) и линейная зависимость в координатах $F^2\pi^3/6^2 - \tau$ (рис. 3, в).

Значения коэффициента диффузии ионов металлов внутри слоев минерального сорбента (D_r , см²/с) и коэффициент скорости внутренней

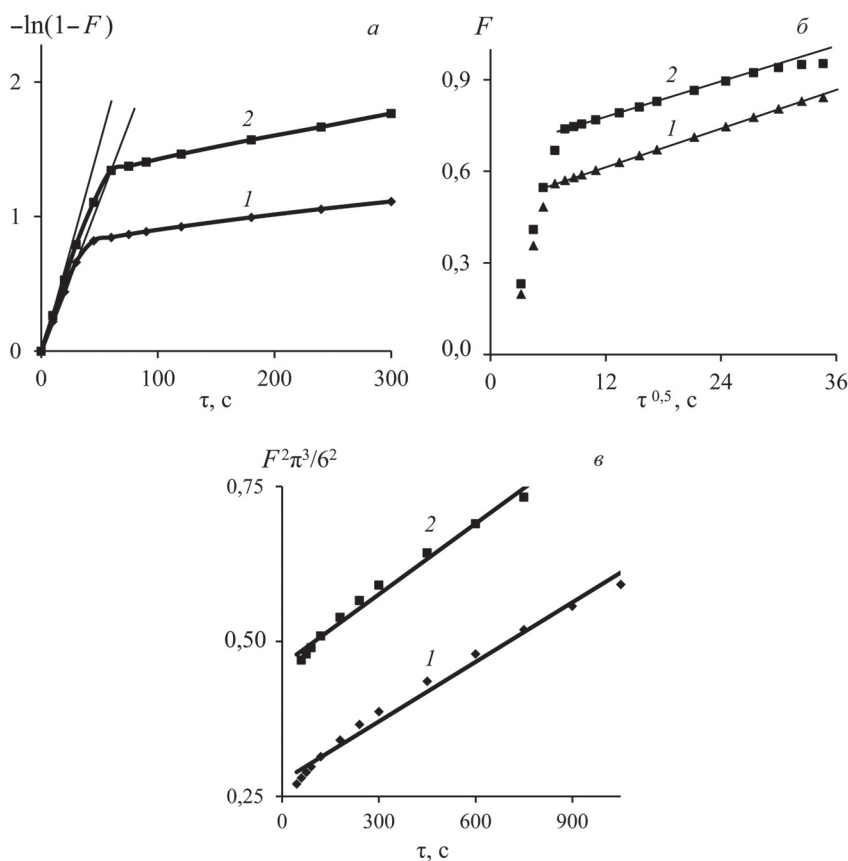


Рис. 3. Зависимости $-\ln(1 - F) - \tau$ (а), $F - \tau^{0,5}$ (б), $F^2 \pi^3 / 6^2 - \tau$ (в) при сорбции ионов индия на реагенте Метозоль при температуре, К: 298 (1); 328 (2)

Таблица 1

Значения коэффициента (D_r) и коэффициента скорости (k_r) гелевой диффузии

T, K	$D_r \cdot 10^{16}, \text{см}^2/\text{с}$		$k_r \cdot 10^2, \text{ммоль}/\text{г}\cdot\text{с}^{0,5}$	
	In	Fe(III)	In	Fe(III)
298	5,07	2,40	1,26	0,54
308	5,77	3,83	1,40	0,71
318	6,51	5,59	1,54	0,88
328	7,29	7,67	1,69	1,07

диффузии (k_r , ммоль/г·с^{0,5}) рассчитывали при эффективной толщине слоев $r_0 = 25 \cdot 10^{-7}$ см и максимальной емкости сорбента, α_∞ , ммоль/г: 0,413–0,461(индий); 0,257–0,286 (железо (III)) (табл. 1).

На скорость диффузии ионов металлов в фазе сорбента влияют радиус гидратированного иона, его заряд и подвижность. Средство ионов к сорбенту снижается с уменьшением кристаллографического размера, повышением заряда и, как следствие, с увеличением радиуса гидратированного иона [22].

Согласно данным табл. 1, скорость внутренней диффузии зависит от величины гидратированных радиусов ионов In^{3+} ($(4,6-4,9) \cdot 10^{-8}$ см) и Fe^{3+} ($(5,1-5,4) \cdot 10^{-8}$ см) [23, 24], когда значения коэффициента диффузии D_r для ионов In^{3+} больше, чем для ионов Fe^{3+} .

Для ионов индия константы скорости внешней ($\gamma_{\text{In}} \cdot 10^3 = 16,13-18,23$) и внутренней диффузии ($B_{\text{In}} \cdot 10^3 = 0,8-1,03$) больше, чем для Fe^{3+} ($\gamma_{\text{Fe}} \cdot 10^3 = 9,27-15,0$; $B_{\text{Fe}} \cdot 10^3 = 0,38-0,88$) (табл. 2). Для сравнения, константы скорости внешней

Т а б л и ц а 2

Значения констант скорости внешней (γ) и внутренней (B) диффузии

Константы скорости	T, K	Реагент Метозоль	
		In	Fe(III)
$\gamma \cdot 10^3, 1/c$	298	16,13	9,27
	308	16,88	11,22
	318	17,55	13,14
	328	18,23	15,0
$B \cdot 10^3, 1/c$	298	0,80	0,38
	308	0,91	0,60
	318	1,03	0,88
	328	1,15	1,21

($\gamma_{\text{In}} \cdot 10^3 = 7,7-9,1$) и внутренней ($B_{\text{In}} \cdot 10^3 = 0,3-1,1$) диффузии ионов металлов для синтетических смол соизмеримы с аналогичными величинами для минерального сорбента [15].

Поскольку сорбент Метозоль модифицирован комплексообразующим реагентом – ди(2-этил-гексил)фосфорной кислотой, ионообменная сорбция может сопровождаться комплексообразованием, когда химическая реакция может лимитировать общую скорость процесса. Поэтому при обработке кинетических кривых использовали модели псевдопервого (6) и псевдвторого порядка (7), позволяющие выявить вклад стадии химического взаимодействия в процесс сорбции (рис. 4, табл. 3).

Полученные экспериментальные данные удовлетворительно описываются кинетическими уравнениями модели псевдопервого порядка. Значения коэффициента детерминации (R_1^2) константы скорости сорбции (k_1), определенной как тангенс угла

наклона прямолинейной зависимости в координатах $\ln(a_\infty - a_t) - \tau$ (рис. 4, а), в основном превышают 0,95 (табл. 3). Высокие значения коэффициента детерминации указанных зависимостей позволяют сделать вывод об эффективности взаимодействий типа сорбат – сорбент.

Для модели псевдвторого порядка, характеризующей взаимодействие типа сорбат – сорбат также получены высокие значения коэффициента детерминации ($R_2^2 > 0,97$) константы скорости сорбции (k_2), определенной как тангенс угла наклона прямолинейной зависимости в координатах $F/(1-F) - \tau$ (рис. 4, б).

Таким образом, можно говорить о применимости модели как псевдопервого, так и псевдвторого порядка для описания химической стадии процесса сорбции ионов металлов на минеральном реагенте Метозоль. Учитывая значения k_2 , превышающие значения k_1 , можно предположить, что общая скорость процес-

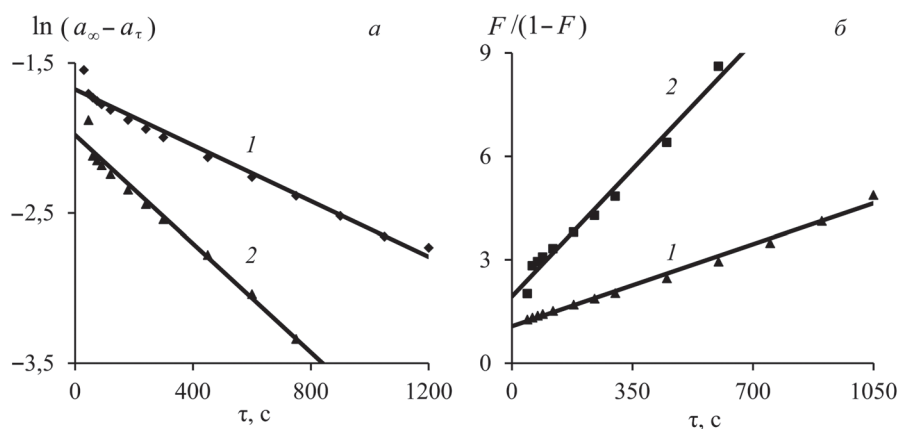


Рис. 4. Зависимости $\ln(a_\infty - a_t) - \tau$ (а) и $F/(1-F) - \tau$ (б) при сорбции ионов индия на реагенте Метозоль при температуре, К: 298 (1); 328 (2)

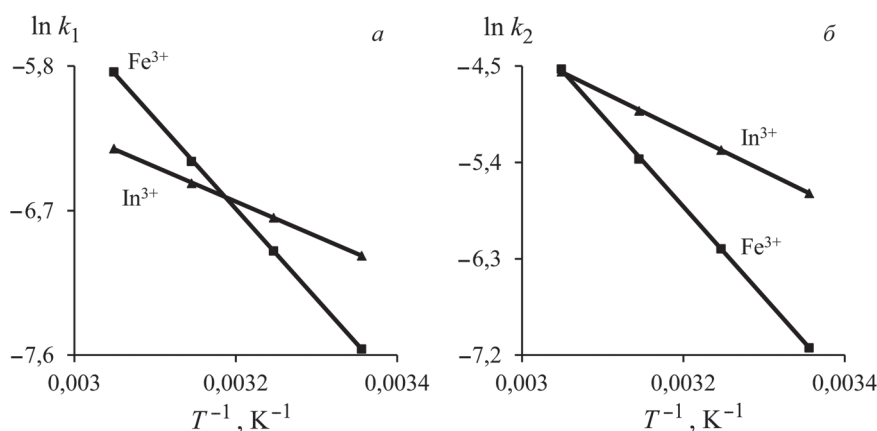


Рис. 5. Зависимости $\ln k_1 - T^{-1}$ (а) и $\ln k_2 - T^{-1}$ (б) при сорбции ионов металлов на реагенте Метозоль

Т а б л и ц а 3

Равновесные удельные количества сорбата, константы скорости сорбции ионов металлов и коэффициенты детерминации кинетических моделей псевдопервого и псевдвторого порядков

Ион	T, К	a_{∞} , ммоль/г	Псевдопервый порядок		Псевдвторой порядок	
			$k_1 \cdot 10^3$, 1/с	R_1^2	$k_2 \cdot 10^3$, 1/с	R_2^2
In ³⁺	298	0,413	0,93	0,981	3,39	0,992
	308	0,429	1,18	0,983	5,07	0,990
	318	0,445	1,46	0,980	7,32	0,989
	328	0,461	1,81	0,978	10,56	0,982
Fe ³⁺	298	0,257	0,52	0,955	0,80	0,994
	308	0,267	0,96	0,969	2,02	0,989
	318	0,276	1,67	0,981	4,67	0,985
	328	0,286	2,92	0,991	10,81	0,971

Т а б л и ц а 4

Предэкспоненциальный множитель и энергия активации кинетических моделей

Сорбент-сорбат		Псевдопервый порядок			Псевдвторой порядок		
		$\ln k_{1(0)}$	R_1^2	$-\Delta E$, кДж/моль	$\ln k_{2(0)}$	R_2^2	$-\Delta E$, кДж/моль
Метозоль	In ³⁺	0,28	0,995	18,03	6,69	0,994	30,76
	Fe ³⁺	11,25	0,996	46,72	21,25	0,997	70,49

са сорбции возрастает за счет дополнительно структурирования сорбата в фазе реагента Метозоль, особенно усиливающегося с ростом температуры (табл. 3). Константы скорости k_1 и k_2 для минерального сорбента соизмеримы с аналогичными параметрами для органических ионообменных смол [15]. Кажущуюся энергию активации (ΔE , кДж/моль) сорбционного процесса определяли графическим методом по уравнению

(9) в координатах $\ln k_i - 1/T$ с использованием констант скорости k_1 и k_2 (рис. 5, табл. 4).

На основании изменения величины энергии активации можно предположить, что для ионов индия стадией, лимитирующей скорость процесса сорбции, являются диффузионные процессы ($-\Delta E < 50$ кДж/моль), а для ионов железа (III) наряду с диффузионными процессами возможно химическое взаимодействие с функциональными

группами модифицированных алюмосиликатов ($-\Delta E \geq 50$ кДж/моль). В целом выявлено некоторое увеличение значений энергии активации для модели псевдвторого порядка (30–70 кДж/моль), по сравнению с моделью псевдопервого порядка (18–46 кДж/моль).

Выводы

1. Сорбция ионов индия и железа (III) на алюмосиликатах, модифицированных ди(2-этилгексил) фосфорной кислотой, протекает в смешанно-диффузионном режиме, когда процесс контролируется диффузией в пленке раствора на границе раздела жидкой и твердой фаз и в фазе сорбента. С повышением температуры скорость сорбции In^{3+} и Fe^{3+} увеличивается.

2. Скорость внутренней диффузии для минерального сорбента Метозоль зависит от величины гидратированного радиуса ионов, который меньше для In^{3+} ($(4,6-4,9) \cdot 10^{-8}$ см), чем для Fe^{3+} ($(5,1-5,4) \cdot 10^{-8}$ см). В результате значения коэффициента диффузии D_r для ионов In^{3+} больше, чем для ионов Fe^{3+} .

3. Для ионов In^{3+} константы скорости внешней и внутренней диффузии на реагенте Метозоль больше, чем для Fe^{3+} , а по абсолютной величине соизмеримы с аналогичными величинами для синтетических ионообменных смол.

4. Показана возможность использования моделей псевдопервого и псевдвторого порядка с константами скорости соответственно k_1 и k_2 для описания химической стадии процесса сорбции ионов металлов на минеральном реагенте Метозоль. Учитывая значения k_2 , превышающие k_1 , можно предположить, что общая скорость процесса сорбции возрастает за счет дополнительного структурирования сорбата в фазе реагента Метозоль, особенно усиливающегося с ростом температуры.

5. Можно предположить, что в случае ионов индия стадией, лимитирующей скорость процесса сорбции, являются диффузионные процессы ($-\Delta E < 50$ кДж/моль), а для ионов железа(III) возможно еще и химическое взаимодействие с функциональными группами модифицированных алюмосиликатов ($-\Delta E \geq 50$ кДж/моль).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Индий: Глобальные промышленные рынки и перспективы // Roskill.com, Ereport.ru (2006–2015). URL: <http://www.ereport.ru/articles/commod/indium.htm> (дата обращения: 29.04.2016)
- Chang J., Zhang L., Du Y. // Sep. Purif. Technol. 2016. Vol. 164. P. 12
- Swain B., Mishra C., Hong H.S. // Environ. Res. 2016. Vol. 147. P. 249
- Sawai H., Rahman I. M.M., Tsukagoshi Y. // Chem. Eng. J. 2015. Vol. 277. P. 219
- Alguacil F.J., Lopez F.A., Rodriguez O. // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2016. Vol. 130. P. 81.
- Doušová B., Fuitová L., Grygar T. // J. Hazard. Mater. 2009. Vol. 165. Iss. 1–3. P. 134
- Thanos A.G., Katsou E., Malamis S. // Chem. Eng. J. 2012. Vol. 211–212. P. 77
- Santos J. De L., Cornejo-Bravo J.M., Castillo E. // Res.-Eff. Technol. 2015. Vol. 1. Iss. 2. P. 98
- Cheng H., Liu Q., Yang J. // Thermochim. Acta. 2012. Vol. 545. P. 1
- Huskić M., Brnardić I., Žigon M. // J. Non-Cryst. Solids. 2008. Vol. 354. Iss. 28. P. 3326.
- Пат. 2118296 РФ / В.В. Свиридов, А.В. Свиридов. 1995
- Ермаков Д.В., Свиридов А.В., Ибатулина Ю.Р. // Изв. Челябинского научного центра. 2004. № 1 (22). С. 164.
- Ганебных Е.В., Свиридов А.В., Мальцев Г.И. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2015. Т. 58. № 1. С. 45.
- Полянский Н.Г., Горбунов Г. В., Полянская Н.Л. Методы исследования ионитов. М., 1976.
- Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена. Л., 1970.
- Бойд Д.Е., Адамсон А.В., Майерс Л.С. Хроматография. Метод разделения ионов. М., 1949.
- Риман В., Волтон Г. Ионообменная хроматография в аналитической химии. М., 1973.
- Салдадзе К.М., Копылова-Валова В.Д. Комплексообразующие иониты (комплекситы). М., 1980.
- Салдадзе К.М., Пашков А.Б., Титов В.С. Ионообменные высокомолекулярные соединения. М., 1978.
- Елькин Т.Э., Пасечник В.А., Самсонов Т.В. Термодинамика ионного обмена. Минск, 1968.
- Тимофеев К.Л., Усольцев А.В., Набойченко С.С., Мальцев Г.И. // Вестн. Омского университета. 2015. № 3 (77). С. 55.
- Цундель Г. Гидратация и межмолекулярное взаимодействие. М., 1972.
- Балданова Д.М., Танганов Б.Б. Плазменно-гидродинамическая концепция состояния ионов в растворах электролитов в оценке некоторых свойств. М., 2012.
- Балданов М.М., Балданова Д.М., Жигжитова С.Б., Танганов Б.Б. // Докл. АН ВШ РФ. 2006. № 2 (7). С. 32.

THE KINETICS OF SORPTION OF IONS OF INDIUM, IRON AND ZINC ON A MODIFIED MONTMORILLONITE

K.L. Timofeev, G.I. Maltsev*, A.V. Sviridov

(JSC «Uralelektromed»; *e-mail: mgi@elem.ru)

The obtained integral kinetic curves of adsorption of ions of indium and iron (III) from model solutions on a modified di(2-ethyl-hexyl)phosphoric acid the montmorillonite Metosol. It is shown that the kinetics of adsorption can be reliably described by models of pseudofirst and pseudosecond order. Installed mode of adsorption of metal ions on the reactant Metosol. For ions In^{3+} are the rate constants of external and internal diffusion on the reagent Metosol more than for Fe^{3+} , which leads to the possibility of its use for selective adsorption of indium from the complex composition of technological solutions of zinc production.

Key words: montmorillonite, aluminosilicates, indium, iron, zinc, sorption, intercalation.

Сведения об авторах: Тимофеев Константин Леонидович – гл. гидрометаллург технического отдела АО «Уралэлектромедь», канд. техн. наук (K.Timofeev@elem.ru); Мальцев Геннадий Иванович – гл. специалист Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь», док. техн. наук (mgi@elem.ru); Свиридов Алексей Владиславович – вед. специалист Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь», канд. техн. наук (asv1972@mail.ru).