



УДК 66.08.546.6

## Кинетика сорбции ионов индия, железа и цинка слабокислотными катионитами

Тимофеев К.Л., Усольцев А.В., Краюхин С.А., Мальцев Г.И.

*АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма*

Поступила в редакцию 17.03.2015 г.

Исследованы закономерности кинетики сорбции ионов индия, железа(III) и цинка из модельных растворов на слабокислотных катионитах с разными функциональными группами, в том числе аминоросфорными. Установлен смешаннодиффузионный режим процесса сорбции, что подтверждают значения кажущейся энергии активации. Рассчитаны коэффициенты диффузии, константы скорости внешней и внутренней диффузии. Для выявления вклада стадии химического взаимодействия применены модели псевдопервого и псевдовторого порядка.

**Ключевые слова:** кинетика, сорбция, индий, железо, цинк, энергия активации, коэффициенты взаимодиффузии

## The kinetics of sorption of ions of indium, iron and zinc weak acid cation exchange resin

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

*«Uralelectromed», Pyshma*

Regularities of the kinetics of sorption of ions Indium, iron(III) and zinc from model solutions of weak acid cation exchangers with different functional groups, including aminophosphonate. Installed mix-diffusing mode sorption process, which is confirmed by the values of the apparent energy of activation. Calculated coefficients diffusion, the rate constants of external and internal diffusion. To identify the contribution stage of the chemical interaction of the applied models pseudo-first and pseudo-second order.

**Keywords:** kinetics, sorption, indium, iron, zinc, activation energy, the mutual diffusion coefficients

### Введение

В современных наукоемких отраслях и технологиях широко используют редкие металлы, в частности индий, что приводит к динамичному увеличению его потребления в экономически развитых странах мира. Поскольку собственные минералы индия (джалиндит, йиксунит) не имеют промышленных запасов, основными сырьевыми источниками металла являются отходы и промежуточные продукты производства цинка, и в меньшей степени, свинца и олова, содержащие 0.001–0.1 % индия. Перспективным способом для извлечения и концентрирования индия из сложных по составу технологических растворов представляется селективная сорбция на синтетических слабокислотных катионитах, в том числе содержащих аминоросфорные группы, широко используемых в последнее время в различных гидрометаллургических процессах. При реализации ионообменных

процессов на практике необходимо учитывать кинетические свойства сорбента, определяющие возможность селективного поглощения сорбтива за время контакта с сорбентом. Знание стадии, тормозящей массоперенос, необходимо, чтобы выбрать оптимальные условия процесса и интенсифицировать сорбцию извлекаемых компонентов.

Целью настоящей работы явилось определение кинетических характеристик процесса сорбции из растворов ионов индия, железа(III) и цинка на слабокислотных катионитах ( $-0.5 \div 0.4$  мм) в том числе содержащих аминофосфоновые группы, установление механизма кинетики сорбции, расчет коэффициентов диффузии обменивающихся ионов, констант скорости и энергии активации суммарного процесса.

### Теоретическая часть

Исследование кинетики сорбции начинают с получения интегральных кинетических кривых сорбции в системах « $a_t - \tau$ » или « $F - \tau$ », где  $F = a_t/a_\infty$  – относительная степень сорбции;  $a_\infty$  и  $a_t$  – количество сорбата на единицу массы смолы в состоянии равновесия и в момент времени  $\tau$  соответственно, ммоль/г;  $\tau$  – продолжительность процесса, с.

Полученные экспериментальные данные обрабатывали с использованием уравнений, учитывающих влияние внешней (пленочной), внутренней (гелевой) диффузии и стадии химической реакции. Поскольку сорбция на ионообменных смолах является сложным и многостадийным процессом, обычно выявляют лимитирующую стадию, которая определяет общую скорость процесса [1].

При внешнедиффузионном механизме кинетики процесс выравнивания концентрации в приповерхностном слое жидкости (диффузионном слое) осуществляется намного быстрее, чем диффузия в твердой фазе, поэтому градиенты концентрации появляются только в зерне [2]. Для описания кинетики в условиях постоянства концентрации сорбтива на поверхности зерна ионита использовано уравнение [3]:

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

где  $F$  – доля превращения вещества, которая является функцией параметра  $D_g t / r_o^2$ ;  $t$  – время, в течение которого достигается данная величина  $F$ ;  $n$  – число слагаемых (1, 2, 3...). Отношение  $D_g \pi^2 / r_o^2$  – константа скорости гелевой диффузии ( $B$ ,  $s^{-1}$ );  $D_g$  – коэффициент гелевой диффузии,  $cm^2/s$ . После подстановки  $B$  уравнение (1) принимает вид:

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

где  $Bt$  – безразмерный параметр, решающий задачи диффузии в твердом теле определенной формы, например, сферы с радиусом  $r_o$ .

Величины  $F$  как функция  $F = f(Bt)$  сведены в таблицы [1]. Если зависимость  $Bt=f(t)$  линейна, то лимитирующей стадией является диффузия в фазе сорбента. Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс равен величине  $B$ , тогда коэффициент гелевой диффузии  $D_g = B r_o^2 / \pi^2$ . Если зависимость « $Bt-t$ »

нелинейная, значит ощутимо влияние внешнедиффузионного этапа массопереноса и уравнение (2) нельзя использовать для расчета  $D_g$ .

Асимптотическое приближение зависимости  $F$  от  $t$  в начальный момент обмена при малых степенях заполнения смолы подчиняется закону корня:

$$F = \frac{6}{r_o} \sqrt{\frac{D_g t}{\pi}}, \quad (3)$$

поэтому зависимость « $F - \sqrt{t}$ » при внутрисферном механизме кинетики линейна. Это уравнение применимо с приемлемой точностью для  $F \approx 0.3$ , для более высоких значений  $F$  используют таблицы [3]. Уравнение (3) можно представить в виде:

$$\frac{F^2 \pi^3}{6^2} = Bt \quad (4)$$

позволяющем графически определить численное значение константы скорости гелевой диффузии ( $B, c^{-1}$ ) в координатах « $F^2 \pi^3 / 6^2 - t$ ».

В разбавленных растворах (не более 10 ммоль/дм<sup>3</sup>) скорость процесса, как правило, лимитируется пленочной диффузией:

$$-\ln(1 - F) = \frac{3D \cdot c^o}{r_o \cdot \delta \cdot m \cdot t}, \quad (5)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии вещества через пленку жидкости толщиной  $\delta$ , покрывающей зерно сорбента;  $c^o$  и  $m$  – концентрация сорбтива в растворе и сорбенте [4]. При пленочном механизме диффузии зависимость  $-\ln(1-F)=f(t)$  должна быть линейной, а множитель перед  $t$  – равен тангенсу угла наклона этой прямой к оси абсцисс. Его называют константой скорости внешней диффузии ( $\gamma, c^{-1}$ ):

$$\gamma = \frac{3D \cdot c^o}{r_o \cdot \delta \cdot m}. \quad (6)$$

С учетом того, что исследованные иониты являются комплексообразующими, можно предположить, что сорбция сопровождается комплексообразованием, когда химическая реакция протекает достаточно медленно и может лимитировать общую скорость обмена противоионов [5]. Поэтому следующим этапом обработки кинетических кривых было применение известных моделей, позволяющих выявить вклад стадии химического взаимодействия в процесс сорбции: модели псевдопервого порядка; псевдвторого порядка; модифицированного второго порядка и Еловича (табл. 1) [6, 7].

Таблица 1. Уравнения моделей химической кинетики

Модель	Интегральная форма уравнения*
Псевдопервого порядка	$a_t = a_{\infty} (1 - e^{-k_1 t})$
Псевдвторого порядка	$a_t = t / [1 / (\sigma a_{\infty}^2) + (t / a_{\infty})]$
Модифицированного второго порядка	$a_t = a_{\infty} [1 - 1 / (b + k_2 t)]$
Еловича	$a_t = (1 / \beta) \ln(1 + \alpha \beta t)$

\* $k_1$  – константа скорости сорбции модели псевдопервого порядка, 1/с;  
 $\sigma$  – кинетический коэффициент модели псевдвторого порядка, г/(ммоль·с);  
 $k_2$  – константа скорости сорбции модели модифицированного второго порядка, 1/с;  
 $b$  – параметр уравнения ( $b \leq 1$ );  $\alpha$  – начальная скорость сорбционного процесса, г/(ммоль·с);  $\beta$  – константа уравнения Еловича, г/ммоль.

Кинетические уравнения моделей псевдопервого и псевдвторого порядка в линейной форме соответственно

$$\ln(a_{\infty} - a_t) = \ln a_{\infty} - k_1 t \quad (7)$$

$$\frac{t}{a_t} = \frac{1}{[(\sigma \cdot a_{\infty}^2) + (1/a_{\infty})t]} \quad (8)$$

представлены в виде зависимостей в координатах « $\ln(a_{\infty}-a_t) - t$ » и « $t/a_t - t$ ».

Модели модифицированного второго порядка и Еловича не рассматривали, поскольку они в соответствии с коэффициентом детерминации ( $R_1^2$ ) с меньшей точностью описывают экспериментальные данные, чем зависимости (7) и (8) [7].

Кажущуюся энергию активации ( $\Delta E$ , кДж/моль) сорбционного процесса определяли из зависимости  $\ln k_1 = f(T^{-1})$  с использованием констант скорости моделей псевдопервого и псевдвторого порядка путем графического решения уравнений

$$k_{j(j)} = k_{j(0)} \exp\left[-\frac{\Delta E}{RT_{(j)}}\right] \quad (9)$$

$$\ln k_{j(j)} = \ln k_{j(0)} - \frac{\Delta E}{RT_{(j)}} \quad (10)$$

с применением метода наименьших квадратов.

Расчетным методом значения кажущейся энергии активации можно определить по формуле:

$$\Delta E = \frac{R \cdot \ln[k_{i(1)}/k_{i(2)}] \cdot T_{(1)} \cdot T_{(2)}}{T_{(2)} - T_{(1)}} \quad (11)$$

## Эксперимент

Кинетику сорбции ионов металлов изучали методом ограниченного объема из монорастворов состава:  $\sim 4.4$  ммоль/дм<sup>3</sup>  $Me^{z+}$ ;  $4-5$  г/дм<sup>3</sup>  $H_2SO_4$ , подобного технологическим растворам выщелачивания вельц-оксидов цинкового производства, при  $J:T=200$  и температурах  $298-328$  К. Ранее было установлено, что в интервале кислотности  $5-50$  г/дм<sup>3</sup>  $H_2SO_4$  извлечение индия и железа катионитами остается неизменно высоким (свыше  $\sim 97\%$ ), а цинка – снижается с  $91$  до  $5-20\%$  от исходной концентрации в растворе [16]. Для устранения внешнедиффузионных ограничений, связанных с переносом сорбтива из объема раствора к поверхности пленки жидкости, покрывающей зерна сорбентов (табл. 2) фракции  $0.4-0.5$  мм, поддерживали скорость вращения мешалки  $\omega \approx 5$  с<sup>-1</sup>, определенную в ходе предварительных исследований. Предварительную подготовку смол к работе проводили по стандартной методике [9].

Таблица 2. Некоторые характеристики исследованных смол

Наименование	Purolite S955	Lewatit TP260	Lewatit TP272
Тип катионита	Слабокислотный катионит		ТВЭКС
Функциональная группа	Фосфоновая $H_4O_5P_2$ Сульфоновая $H_2O_3S$ Карбоксильная $COOH$	Аминометил- фосфоновая $CH_6NO_3P$	Бис-(2,4,4) триметилпентил- фосфиновая $C_{16}H_{35}O_2P$
Матрица	Макропористый полистирол, сшитый с дивинилбензолом		

Суммарный объем отобранных проб за время опыта не превышал 3 % от исходного объема раствора. Модельные электролиты готовили растворением точных навесок металлического индия в серной кислоте, препаратов солей (х.ч.)  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – в дистиллированной воде с дальнейшим окислением  $\text{Fe}^{2+}$  пероксидом водорода до  $\text{Fe}^{3+}$  [2, 10, 11]. Концентрацию ионов металлов в растворах определяли атомно-абсорбционным методом на приборе AA-7000 Shimadzu (Япония).

### Обсуждение результатов

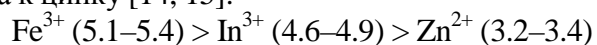
Кинетические кривые сорбции ионов металлов приведены для смолы Purolite S955 (рис. 1а). На примере ионов железа показано, что повышение температуры в интервале 298–328 К увеличивает скорость сорбции ионов металла (кривые 1, 2). Равновесные концентрации металлов в растворе и в фазе смолы достигались в течение 10–15 часов с начала процесса, за исключением сорбции индия и цинка смолой Purolite S955, когда насыщение наступало через 30 мин. При контакте цинкового раствора со смолами Lewatit TP260 и TP272 в течение 72 часов сорбция металла отсутствовала, что, вероятно, объясняется отсутствием химического взаимодействия двухзарядных катионов цинка с аминофосфоновыми и фосфиновыми ионогенными группами, а также повышенной кислотностью раствора для данных ионитов (в сравнении с Purolite S955).

На рис. 1 б представлены кинетические кривые сорбции ионов металлов на смоле Purolite S955 в координатах « $-\ln(1-F)-t$ » при температуре 298 К. В начальный момент (при малых значениях  $F$ ), зависимость линейная, аппроксимируется уравнением (4). Линейность данных зависимостей подчеркивается прерывистыми линиями. При увеличении  $F$  кривая становится нелинейной, что свидетельствует об увеличении влияния внутридиффузионного массопереноса в сорбционный процесс при некоторой степени заполнения смолы.

В случае преобладания внутрисферного лимитирования кинетические кривые аппроксимируются уравнениями (2)–(4). Линейность данных зависимостей в координатах « $F-t^{0.5}$ », подчеркнутая сплошными линиями (рис. 2а), означает, что внутридиффузионное лимитирование сорбционного процесса имеет место, поэтому уравнения (2)–(4) могут быть использованы для расчета коэффициента и константы скорости диффузии ионов металлов в смолах. Линейная зависимость, полученная в координатах « $F^2 \pi^3 / 6^2 - t$ » (рис. 2б), также подтверждает факт наличия внутридиффузионного лимитирования сорбции.

В целом, процесс протекает в смешаннодиффузионном режиме, когда он контролируется диффузией в пленке раствора на поверхности зерен сорбента и в самих зернах смолы [2, 12].

На скорость диффузии ионов металлов в фазе смолы оказывают влияние такие факторы, как радиус гидратированного иона, его заряд и подвижность. В частности, сродство ионов к сорбенту снижается в соответствии с уменьшением кристаллографического размера, увеличением заряда и, как следствие, с увеличением радиуса гидратированного иона [13]. Радиусы гидратированных ионов ( $r_r \cdot 10^{-8}$  см) убывают в ряду от железа к цинку [14, 15]:



Напротив, скорость внутренней диффузии согласно значениям коэффициента гелевой диффузии ( $D_r$ ,  $\text{см}^2/\text{с}$ ) возрастает от железа к цинку (табл. 3).

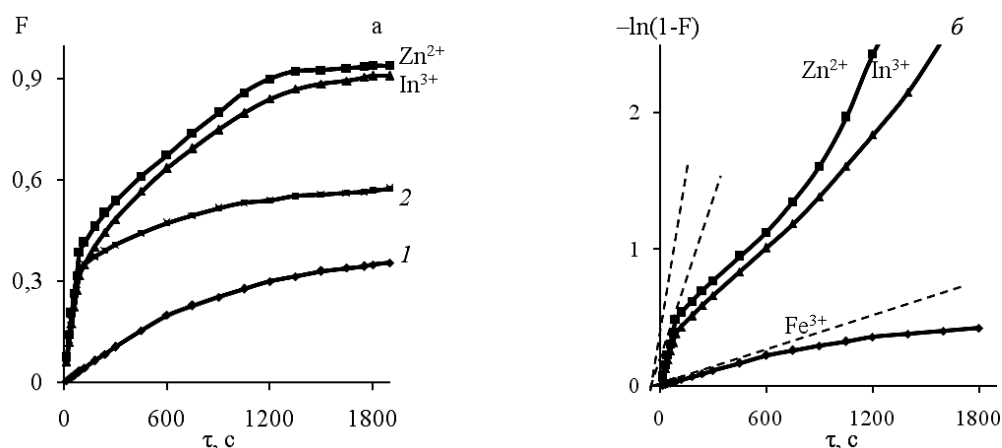


Рис. 1. Зависимости  $a$  – « $F-t$ »,  $b$  – « $-\ln(1-F) -t$ », для сорбции ионов металлов ( $1,2 - Fe^{3+}$ ) смолой Purolite S955 при температуре, К:  $a, b, 1 - 298$ ;  $2 - 328$

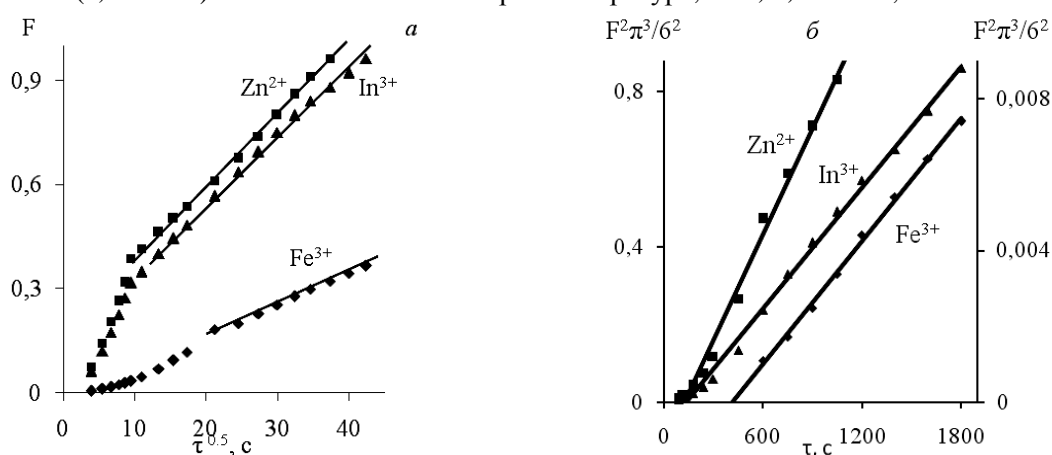


Рис. 2. Зависимости  $a$  – « $F-t^{0.5}$ »,  $b$  – « $F^2 \pi^3 / 6^2 - t$ » для сорбции ионов металлов смолой Purolite S955 при температуре 298К

Таблица 3. Значения коэффициента гелевой (внутренней) диффузии

Т, К	$D_f \cdot 10^8, \text{см}^2/\text{с}$				
	Purolite S955			Lewatit TP272	
	In	Fe(III)	Zn	In	Fe(III)
298	4.48	0.31	6.34	1.55	0.045
308	5.76	0.69	9.65	1.84	0.049
318	7.09	1.06	13.01	2.15	0.057
328	8.38	1.44	16.38	2.43	0.060

Среди исследованных ионитов, исходя из рассчитанных величин констант скорости внешней и внутренней диффузии, можно рекомендовать смолу Purolite S955 для отделения ионов индия и цинка от железа(III); в меньшей степени этому соответствует сорбент Lewatit TP272 вследствие худших кинетических характеристик. Величины констант скоростей сорбции ионов индия и железа на ионите Lewatit TP260 одного порядка, что значительно затрудняет их разделение (табл. 4). Полученные экспериментальные данные удовлетворительно описываются кинетическими уравнениями моделей псевдопервого порядка – значения коэффициента детерминации ( $R_i^2$ ), константы скорости сорбции ( $k_1$ ), определенной как тангенс угла наклона прямолинейной зависимости в координатах « $\ln(a_\infty - a_t) - t$ » (рис. 3а), в основном, свыше 0.9 (табл. 5).

Таблица 4. Значения констант скорости внешней ( $\gamma$ ) и внутренней ( $B$ ) диффузии

Константы скорости	Т, К	Purolite S955			Lewatit TP260		Lewatit TP272	
		In	Fe(III)	Zn	In	Fe(III)	In	Fe(III)
$\gamma \cdot 10^3, c^{-1}$	298	4.25	0.37	5.11	0.70	1.58	1.81	0.056
	328	19.72	4.58	34.83	1.11	1.86	2.19	0.061
$B \cdot 10^3, c^{-1}$	298	0.87	0.06	1.23	0.12	0.26	0.30	0.009
	328	1.63	0.28	3.19	0.26	0.43	0.47	0.011

Высокие коэффициенты детерминации указанных зависимостей позволяют сделать вывод о большей термодинамической выгоде взаимодействий типа «сорбат–сорбент».

Таблица 5. Параметры кинетических моделей сорбции ионов металлов

Смола–сорбат	Т, К	$a_{\infty}$ , ммоль/г	Псевдопервый порядок		Псевдвторой порядок		
			$k_1 \cdot 10^3, c^{-1}$	$R_1^2$	$k_2 \cdot 10^3, c^{-1}$	$R_2^2$	
S955	In <sup>3+</sup>	298	1.05	1.40	0.981	3.34	0.985
		308	1.13	1.82	0.944	5.71	0.988
		318	1.21	2.14	0.927	8.11	0.990
		328	1.29	2.76	0.916	10.46	0.997
	Fe <sup>3+</sup>	298	0.85	0.31	0.990	0.37	0.996
		308	0.95	0.38	0.924	0.52	0.983
		318	1.03	0.46	0.859	0.68	0.908
		328	1.26	0.54	0.766	0.83	0.870
	Zn <sup>2+</sup>	298	0.66	1.72	0.972	3.85	0.974
		308	0.80	2.47	0.904	6.66	0.982
		328	0.87	3.23	0.851	12.29	0.999
		TP260	298	In <sup>3+</sup>	0.75	0.26	0.956
Fe <sup>3+</sup>	0.53	0.53		0.975	0.73	0.995	
TP272	298	In <sup>3+</sup>	0.46	0.64	0.979	0.97	0.998
		Fe <sup>3+</sup>	0.40	0.045	0.990	0.11	0.991

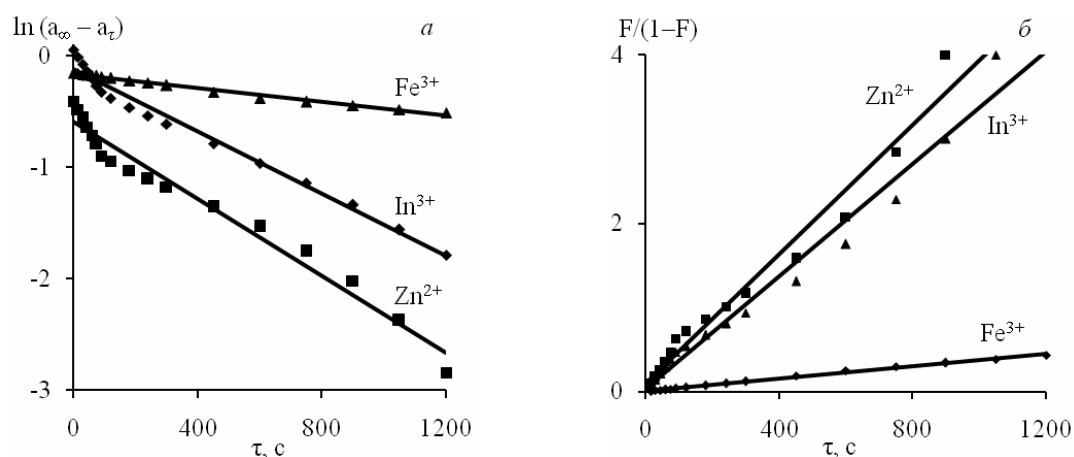


Рис. 3. Зависимости « $\ln(a_{\infty}-a_t) - t$ » (а) и « $F/(1-F) - t$ » (б) для кинетических моделей псевдопервого и псевдвторого порядка сорбции ионов металлов на смоле Purolite S955 при температуре 298 К

Была предпринята попытка описать экспериментальные данные кинетическим уравнением модели псевдвторого порядка (8) в виде:

$$\frac{F}{(1-F)} = (\sigma \cdot a_{\infty})t, \quad (12)$$

где множитель перед  $\tau$  равен тангенсу угла наклона прямолинейной зависимости к оси абсцисс в координатах « $F/(1-F) - \tau$ » (рис. 3б). По сути он является константой скорости сорбции модели псевдвторого порядка ( $k_2 = \sigma a_{\infty}, c^{-1}$ ).

Как видно из полученных данных, высокие значения коэффициентов детерминации ( $R^2 > 0,9$ ) (табл. 5) позволяют судить в пользу применимости как модели псевдопервого, так и псевдвторого порядка для описания химической стадии процесса сорбции.

В рамках модели кинетики сорбции псевдопервого порядка на смоле Purolite S955 на основании графической интерпретации уравнения (7) были рассчитаны константы скорости процесса ( $k_1, c^{-1}$ ). Для ионов цинка и индия значения константы скорости псевдопервого порядка выше по сравнению с ионами железа(III), что согласуется с относительно малым временем установления равновесия в системе (~30 мин) и более высокими значениями коэффициента диффузии (табл. 3).

Результаты по определению кажущейся энергии активации при сорбции ионов металлов на исследованных смолах представлены в табл. 6 и на рис. 4.

Таблица 6. Предэкспоненциальный множитель и энергия активации моделей

Сорбент-сорбат		Псевдопервый порядок			Псевдвторой порядок		
		$k_{1(0)},$ 1/с	$R_1^2$	$-\Delta E,$ кДж/моль	$k_{2(0)},$ 1/с	$R_2^2$	$-\Delta E,$ кДж/моль
S955	$In^{3+}$	1.886	0.992	18.37	896	0.981	29.70
	$Fe^{3+}$	0.138	0.999	15.03	2.70	0.992	21.88
	$Zn^{2+}$	1.347	0.943	17.05	1001	0.984	30.79
TP260	$In^{3+}$	0.016	0.938	10.23	1.04	0.989	20.86
	$Fe^{3+}$	18.02	0.958	9.11	0.032	0.993	9.20
TP272	$In^{3+}$	0.015	0.991	7.75	0.115	0.995	11.76
	$Fe^{3+}$	2.57	0.995	10.24	0.016	0.996	12.22

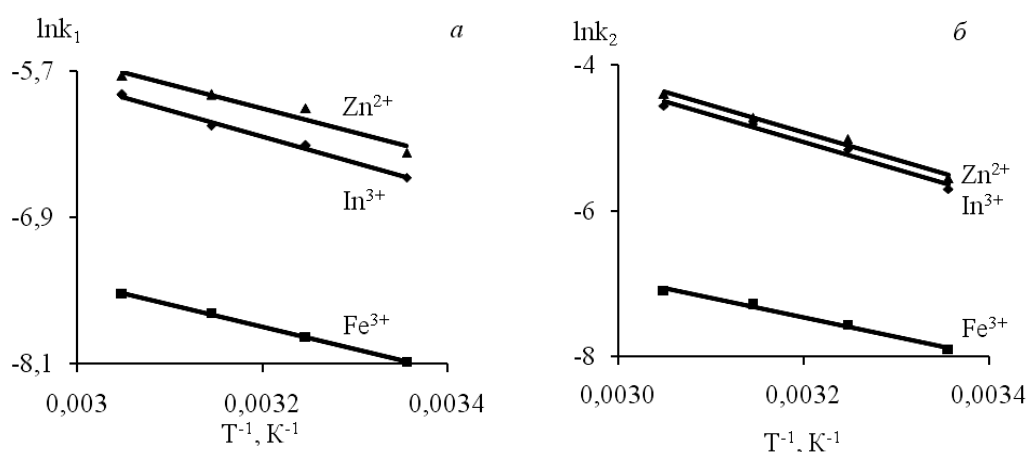


Рис. 4. Зависимости  $a - \langle \ln k_1 - T^{-1} \rangle$ ,  $b - \langle \ln k_2 - T^{-1} \rangle$  для сорбции ионов металлов на смоле Purolite S955

Несмотря на значительные различия в величинах константы скорости сорбции ионов железа(III) на смоле Purolite S955, по сравнению с ионами индия и цинка (табл. 5), энергия активации для исследованных ионов соизмерима и не превышает значений, характерных для диффузионных процессов



( $-\Delta E < 50$  кДж/моль). Выявлено некоторое увеличение значений энергии активации по модели псевдвторого порядка (22-30 кДж/моль), по сравнению с моделью псевдопервого порядка (15-18 кДж/моль).

Для смолы Lewatit TP272 лимитирующей стадией при сорбции ионов железа(III) и индия очевидно является пленочная диффузия.

## Заключение

Согласно значениям коэффициента гелевой диффузии ( $D_g$ ) скорость сорбции возрастает в ряду:  $Fe^{3+} < In^{3+} < Zn^{2+}$ , в соответствии с уменьшением радиуса гидратированных ионов – от  $(5.1-5.4) \cdot 10^{-8}$  см для железа(III) до  $(3.2-3.4) \cdot 10^{-8}$  см для цинка(II).

Исходя из величин констант скорости внешней ( $\gamma$ ) и внутренней ( $B$ ) диффузии, получены следующие ряды убывания скорости сорбируемости исследованных ионов металлов на смолах: Purolite S955 –  $Zn > In > Fe^{3+}$ ; Lewatit TP260 –  $Fe^{3+} > In$ ; Lewatit TP272 –  $In > Fe^{3+}$ . Для слабокислотных смол константы скорости диффузии ( $\gamma$ ,  $B$ ) и, соответственно сорбции индия, снижаются в ряду: S955 > TP272 > TP260.

Наибольшая скорость извлечения индия и цинка из растворов установлена для Purolite S955 – время достижения равновесной концентрации индия составило 30 мин, а цинка ~ 25 мин. Количественная сорбция цинка на смолах Lewatit TP260 и Lewatit TP 272 не выявлена.

В целом, процесс сорбции протекает в смешаннодиффузионном режиме, когда он контролируется диффузией в пленке раствора на поверхности зерен сорбента и в самих зернах смолы, что подтверждают рассчитанные значения энергии активации ( $-\Delta E < 50$  кДж/моль).

Извлечение исследованных элементов из модельных монокомпонентных растворов на слабокислотных смолах удовлетворительно описывается кинетическими моделями псевдопервого и псевдвторого порядка, исходя из значений коэффициента детерминации ( $R_i^2 = 0.91-0.99$ ). Значения констант скорости сорбции ионов металлов ( $k_1$ ,  $k_2$ ) растут с увеличением температуры раствора.

## Список литературы

1. Полянский Н.Г., Горбунов Г.В., Полянская Н.Л. Метод исследования ионитов. М.: Химия, 1976. 208 с.
2. Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена. Л.: Химия, 1970. 336 с.
3. Бойд Д.Е., Адамсон А.В., Майерс Л.С. Хроматография. Метод разделения ионов. М.: ИИЛ, 1949. 333 с.
4. Риман В., Уолтон Г. Ионообменная хроматография в аналитической химии. М.: Мир, 1973. 375 с.
5. Салдадзе К. М., Копылова-Валова В. Д. Комплексообразующие иониты (комплекситы). М.: Химия, 1980. 336 с.
6. Cheung W.H., Ng J.C.Y., McKay G. // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2003. Vol. 78. No 5. pp. 562-571.
7. Неудачина Л.К., Петрова Ю.С., Засухин А.С. // *Аналитика и контроль.* 2011. Т. 15. № 1. С. 87-95.
8. Лазарев А.М., Харламов И.П., Яковлев П.Я., Яковлева Е.Ф. Справочник химика-аналитика. М.: Metallurgia, 1976. 184 с.
9. Цитович И.К. Курс аналитической химии. М.: Высшая школа, 1985. 400 с.
10. Коростелев П. П. Приготовление растворов для химико-аналитических работ. М.: Изд. АН СССР, 1962. 311 с.
11. Коростелев П.П. Реактивы и растворы в металлургическом анализе. М.: Metallurgia, 1977. 400 с.

12. Крижановская О.О., Синяева Л.А., Карпов С.И. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. Вып. 5. С. 784-794.

13. Цундель Г. Гидратация и межмолекулярное взаимодействие. М.: Мир, 1972. 404 с.

14. Балданова Д. М., Танганов Б. Б. Плазменно-гидродинамическая концепция состояния ионов в растворах электролитов в

оценке некоторых свойств. М.: Академия Естествознания, 2012. 324 с.

15. Балданов М.М., Балданова Д.М., Жигжитова С.Б., Танганов Б.Б. // Доклады АН ВШ РФ. 2006. № 2(7). С. 32-38.

16. Усольцев А.В., Набойченко С.С., Тимофеев К.Л., Тутубалина И.Л., Краюхин С.А. // Цветная металлургия. 2014. № 4. С. 45-49.

## References

1. Polyanskii N.G., Gorbunov G.V., Polyanskaya N.L. Metod issledovaniya ionitov (The method of investigation of ion exchangers), M.: Khimiya, 1976, 208 p.

2. Kokotov Yu.A., Pasechnik V.A. Ravnovesie i kinetika ionnogo obmena [Equilibrium and kinetics of ion exchange], L.: Khimiya, 1970, 336 p.

3. Boid D.E., Adamson A.V., Maiers L.S. Khromatografiya. Metod razdeleniya ionov. M.: IIL, 1949. 333 p.

4. Riman V., Uolton G. Ionoobmennaya khromatografiya v analiticheskoi khimii, M.: Mir, 1973, 375 p.

5. Saldadze K.M., Kopylova-Valova V.D. Kompleksoobrazuyushchie ionity (kompleksity) [Chelating resins], M.: Khimiya, 1980, 336 p.

6. Cheung W. H., Ng J. C. Y., McKay G., *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2003, Vol. 78, No 5, pp. 562-571.

7. Neudachina L.K., Petrova Yu.S., Zasukhin A.S., *Analitika i kontrol'*, 2011, Vol. 15, No 1, pp. 87-95.

8. Lazarev A.M., Kharlamov I.P., Yakovlev P.Ya., Yakovleva E.F. Spravochnik khimika-analitika [Directory analytical chemist], M.: Metallurgiya, 1976, 184 p.

9. Tsitovich I. K. Kurs analiticheskoi khimii [A course of analytical chemistry], M.: Vysshaya shkola, 1985, 400 p.

10. Korostelev P.P. Prigotovlenie rastvorov dlya khimiko-analiticheskikh rabot [Preparation of solutions for chemical analysis works], M.: AN SSSR, 1962, 311 p.

11. Korostelev P.P. Reaktivy i rastvory v metallurgicheskom analize [Reagents and solutions metallurgical analysis], M.: Metallurgiya, 1977, 400 p.

12. Krizhanovskaya O.O., Sinyaeva L.A., Karpov S.I., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2014, Vol. 14, No 5, pp. 784-794.

13. Tsundel' G. Gidratatsiya i mezhmolekulyarnoe vzaimodeistvie [Hydration and intermolecular interaction], M.: Mir, 1972, 404 p.

14. Baldanova D.M., Tanganov B.B. Plazmenno-gidrodinamicheskaya kontseptsiya sostoyaniya ionov v rastvorakh elektrolitov v otsenke nekotorykh svoistv [Plasma-state hydrodynamic conceptions n electrolyte solutions in the evaluation of certain properties], M.: Akademiya Estestvoznaniya, 2012, 324 p.

15. Baldanov M.M., Baldanova D.M., Zhighitova S.B., Tanganov B.B., *Doklady AN VSh RF*, 2006, No 2(7), pp. 32-38.

16. Usol'tsev A.V., Naboichenko S.S., Timofeev K.L., Tutubalina I.L., Krayukhin S.A., *Tsvetnaya metallurgiya*, 2014, No 4, pp. 45-49.

**Тимофеев Константин Леонидович** – к.т.н., Главный гидрометаллург технического отдела АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма

**Усольцев Алексей Викторович** – Главный специалист управления стратегического планирования ООО «УГМК-Холдинг», Верхняя Пышма

**Краюхин Сергей Александрович** – к.т.н., Начальник Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма

**Мальцев Геннадий Иванович** – д.т.н., с.н.с., Главный специалист Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь», Верхняя Пышма

**Timofeev Konstantin L.** – c. t. sc , Leading Hydrometallurgist technical department "Uralelectromed", Pyshma

**Usoltsev Alexey V.** - Leading Specialist of the Strategic Planning of "UMMC-Holding", Pyshma

**Krajukhin Sergey A.** - c. t. sc, Head of Research Center "Uralelectromed" Pyshma

**Maltsev Gennady I.** – d.t.sc, s. sc. m. ,Leading specialist of the Research Center "Uralelectromed" Pyshma, e-mail: [mgi@elem.ru](mailto:mgi@elem.ru)