

Химическая ТЕХНОЛОГИЯ



Производственный, научно-технический, информационно-аналитический и учебно-методический журнал

Орган Научного совета РАН по химической технологии

Рекомендован ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Журнал переводится на английский язык и выпускается издательством "Pleiades Publishing, Ltd." в виде приложений к журналу "Theoretical Foundations of Chemical Engineering", распространение которого осуществляет издательство "Springer".

Русскоязычная версия журнала включена в базу Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science.



Том 18

Издается с января 2000 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

- Гордиенко П.С., Шабалин И.А., Ярусова С.Б., Азарова Ю.А., Сомова С.Н.,
Перфильев А.В. Состав, структура и сорбционные свойства наноструктурированных
алюмосиликатов 2
- Лановецкий С.В., Пойлов В.З., Косвинцев О.К. Физико-химические основы технологии
получения кристаллогидратов нитрата магния и марганца 9
- Фролова Е.А., Кондаков Д.Ф., Авдюшкина Л.И., Быков А.В., Шкарупин А.Н.,
Данилов В.П. Фазовые равновесия в водно-солевых системах из карбонатов калия,
натрия и аммония и противогололедные свойства карбонатных композиций. 15

НЕФТЕХИМИЯ И НЕФТЕПЕРЕРАБОТКА

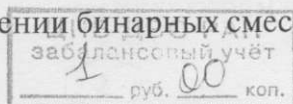
- Анисимов А.В., Андреев Б.В., Есева Е.А., Поликарпова П.Д., Тараканова А.В.,
Устинов А.С. Очистка сернисто-щелочных стоков от меркаптанов методом дистилляции 20

ХИМИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ РЕДКИХ, РАССЕЯННЫХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

- Кузин М.А., Макаров А.О., Лакеев П.В. Апробация процесса фильтрования
отработавшего цинкового расплава после снятия оболочки твэла с нитридным ОЯТ
реактора БОР-60 25
- Кузьмин В.И., Кузьмина А.А. Экстракция скандия из хлоридных растворов смесью
трибутилфосфата и молекулярного йода. 29
- Чернышова О.В., Дробот Д.В. Варианты электрохимической переработки
ренийсодержащего жаропрочного сплава 36

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

- Захаров М.К., Мартынова М.М., Прусаченкова М.И. Сравнение затрат теплоты при
разделении бинарных смесей методами дистилляции и ректификации 43



УДК 544.726

Состав, структура и сорбционные свойства наноструктурированных алюмосиликатов

Д-р техн. наук П.С. Гордиенко^{1,2}, И.А. Шабалин¹, канд. хим. наук С.Б. Ярусова^{1,2,*}, канд. хим. наук Ю.А. Азарова^{1,2}, С.Н. Сомова¹, канд. хим. наук А.В. Перфильев^{1,3}

¹Институт химии ДВО РАН, Владивосток

²Владивостокский государственный университет экономики и сервиса

³Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

*E-mail: yarusova_10@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2016.

Представлены данные по сорбционным свойствам синтетических наноструктурированных алюмосиликатов калия с соотношением Si/Al от 1 до 5, полученных в многокомпонентной системе $\text{KOH}-\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}-\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$, в статических условиях сорбции при различных температурах и с различным солевым фоном азотнокислых солей, определена энергия активации процесса сорбции ионов цезия.

Ключевые слова: наноразмерные структуры, синтетические алюмосиликаты, сорбция, ионы цезия, кинетика сорбции, энергия активации.

Введение

Ранее авторами данной статьи представлены данные по синтезу наноструктурированных алюмосиликатов калия (САК), полученных в многокомпонентной системе $\text{KOH}-\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}-\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}-\text{H}_2\text{O}$, исследованы ИК- и ЯМР-спектры. По данным ЯМР-спектров, алюминий в алюмосиликатах, в зависимости от соотношения Si/Al, находится в различных структурных положениях с тетраэдрической и октаэдрической координацией по кислороду.

Целью данной работы является исследование сорбционных свойств, влияния солевого фона на сорбционную емкость ряда алюмосиликатов калия с различным соотношением Si/Al (от 1 до 5) по отношению к ионам Cs^+ ; изучение кинетических параметров сорбции ионов Cs^+ ,

определение энергии активации процесса сорбции.

Экспериментальная часть

Сорбцию ионов Cs^+ проводили в статических условиях из водных растворов хлорида цезия при соотношении твердой и жидкой фаз Т:Ж, равном 1:400, и температуре 20 °С в течение 3 ч. Растворы хлорида цезия готовили растворением навески CsCl марки «ч. д. а.» в дистиллированной воде. Из полученного раствора разбавлением готовили серию исходных водных растворов в интервале концентраций ионов Cs^+ от 0,24 до 43,9 ммоль/л. В серию пробирок помещали навески сорбента, заливали их водным раствором хлорида цезия с разными начальными концентрациями в вышеуказанном диапазоне и перемешивали на магнитной мешалке *RT 15 power (IKA WERKE, ФРГ)*. Параллельно с исследуемыми пробами в качестве контрольного опыта в пробирку с дистиллированной водой помещали навеску сорбента. Затем растворы отделяли от сорбента фильтрованием и определяли в фильтратах концентрацию ионов Cs^+ и K^+ .

Для определения кинетических параметров сорбции при температурах 20, 40 и 70 °С в серию пробирок с навесками сорбента массой по 0,5 г заливали по 20 мл раствора с концентрацией ионов Cs^+ 7,67 ммоль/л

перемешивали в течение 1, 5, 10, 30, 60, 120 и 240 мин. Через указанные временные промежутки сорбент отделяли от раствора и в фильтрате определяли концентрацию ионов Cs^+ .

Влияние концентрации азотнокислых солей щелочных металлов (натрия, калия) и аммония (марки «х.ч.») на степень извлечения ионов цезия α (%) наноструктурированными алюмосиликатами калия исследовано при соотношении Т:Ж = 1:1000 при температуре 20 °С. Время перемешивания сорбента с солевым раствором — 3 ч.

Сорбционную емкость A_c , ммоль/г, исследуемых образцов рассчитывали по формуле:

$$A_c = \frac{(C_{исх} - C_p)}{m} \cdot V, \quad (1)$$

где $C_{исх}$ — исходная концентрация ионов Cs^+ в растворе, ммоль/л; C_p — равновесная концентрация ионов Cs^+ в растворе, ммоль/л; V — объем раствора, л; m — масса сорбента, г.

Степень извлечения ионов Cs^+ (α , %) рассчитывали по формуле:

$$\alpha = \frac{C_{исх} - C_p}{C_{исх}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Изотермы сорбции описывали уравнением Ленгмюра:

$$A_c = K_{л(и)} \cdot C_{исх} \cdot A_m \cdot (1/(1 + K_{л(и)} \cdot C_{исх})), \quad (3)$$

где A_m — максимальная сорбционная емкость, ммоль/г; $K_{л(и)}$ — постоянная Ленгмюра, л/ммоль.

Константу Ленгмюра $K_{л(р)}$ определяли из графической зависимости сорбционной емкости сорбента от исходной концентрации сорбата в растворе по методике, описанной в [1], с учетом максимальной сорбционной емкости A_m по уравнению:

$$K_{л(р)} = 1/(C_{исх}^* - (1/2) \cdot A_m \cdot (m/V)), \quad (4)$$

где $C_{исх}^*$ — исходная концентрация сорбата, при которой сорбционная емкость сорбента

равна половине максимальной сорбционной емкости.

Данные по кинетике сорбции ионов Cs^+ анализировали с использованием кинетических моделей химических реакций псевдопервого и псевдovторого порядков [2, 3]. Кинетическая модель скорости химической реакции псевдопервого порядка (модель Лагергрена) описывается уравнением:

$$(dA_t/dt) = k_1(A_e - A_t), \quad (5)$$

где k_1 — кажущаяся константа скорости псевдопервого порядка; A_e , A_t — величины сорбции в состоянии равновесия и в момент времени t соответственно.

В линейной интегральной форме при начальных условиях: $A_t = 0$, при $t = 0$ и $A_t = A_e$ в момент времени t уравнение (5) имеет вид:

$$\log(A_e - A_t) = \log A_e - (k_1 \cdot t)/2,303. \quad (6)$$

Кинетическая модель псевдovторого порядка описывается уравнением:

$$(dA_t/dt) = k_2(A_e - A_t)^2, \quad (7)$$

где k_2 — константа скорости сорбции модели псевдovторого порядка.

Уравнение (7) преобразовано и приведено к виду:

$$(1/A_t) = (1/A_m) - 1/(t \cdot k_2 \cdot A_m^2), \quad (8)$$

где A_m — максимальная сорбционная емкость сорбента, ммоль/г.

Временные зависимости процесса сорбции проанализировали и с учетом уравнения для топохимических реакций Колмогорова—Ерофеева получили следующую зависимость:

$$\alpha = 1 - \exp(-k \cdot t^n), \quad (9)$$

где α — степень извлечения ионов Cs^+ из раствора; t — время сорбции; k — постоянная, определяющая константу скорости процесса сорбции; n — порядок реакции (k и n определяются графически).

Для анализа экспериментальных данных по кинетике уравнение (9) записано в форме уравнения линейной регрессии:

$$\ln(-\ln(1-\alpha)) = \ln k + n \cdot \ln t. \quad (10)$$

Кинетические зависимости в координатах $\ln(-\ln(1-\alpha)) = f(\ln t)$ имеют вид прямых, а угол наклона определяет значение порядка реакции: при $n < 1$ процесс сорбции характеризуется как процесс, контролируемый диффузионными явлениями, а при $n > 1$ — как кинетический процесс. При $\ln t = 0$ на оси ординат отсекается отрезок, пропорциональный значению $\ln k$.

Температурная зависимость константы скорости реакции сорбции описана уравнением Аррениуса:

$$k = A \cdot \exp(E_a/RT), \quad (11)$$

где A — предэкспоненциальный множитель с размерностью константы скорости процесса сорбции k ; E_a — энергия активации процесса сорбции, кДж/моль; T — абсолютная температура, К; R — газовая постоянная, кДж/моль.

В логарифмической форме уравнение Аррениуса имеет вид:

$$\ln k = \ln A - (E_a/RT). \quad (12)$$

Из графической зависимости $\ln k$ от $1/T$ определена энергия активации процесса сорбции ионов Cs^+ наноструктурированными алюмосиликатами из водного раствора.

Методы анализа

Концентрацию ионов водорода в водном растворе определяли рН-метром/иономером — мультитестом ИПЛ-102 со стеклянным электродом ЭСК-10601/7, стандартизованным по буферным растворам.

Содержание ионов Cs^+ и K^+ в растворах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре *Solaar 6 M* по аналитическим линиям 852,1 и 766,5 нм соответственно. Предел обнаружения ионов цезия в водных растворах составляет 0,01 мкг/мл, калия — 0,002 мкг/мл.

Результаты и их обсуждение

Изотермы сорбции

В табл. 1 приведены данные по сорбционной емкости и степени извлечения ионов Cs^+ из водных растворов при температуре 20 °С при Т:Ж = 1:400.

На рис. 1 представлены графические зависимости сорбционной емкости от исходной концентрации ионов цезия в растворе ($C_{\text{исх}}$) по экспериментальным данным и описанные уравнением (1), формально напоминающим уравнение Ленгмюра для равновесной концентрации ионов цезия в растворе с коэффициентами $K_{\text{л(и)}}$ ($K_{\text{л(и)}} = 1/C_{\text{исх}}^*$), приведенными в табл. 1.

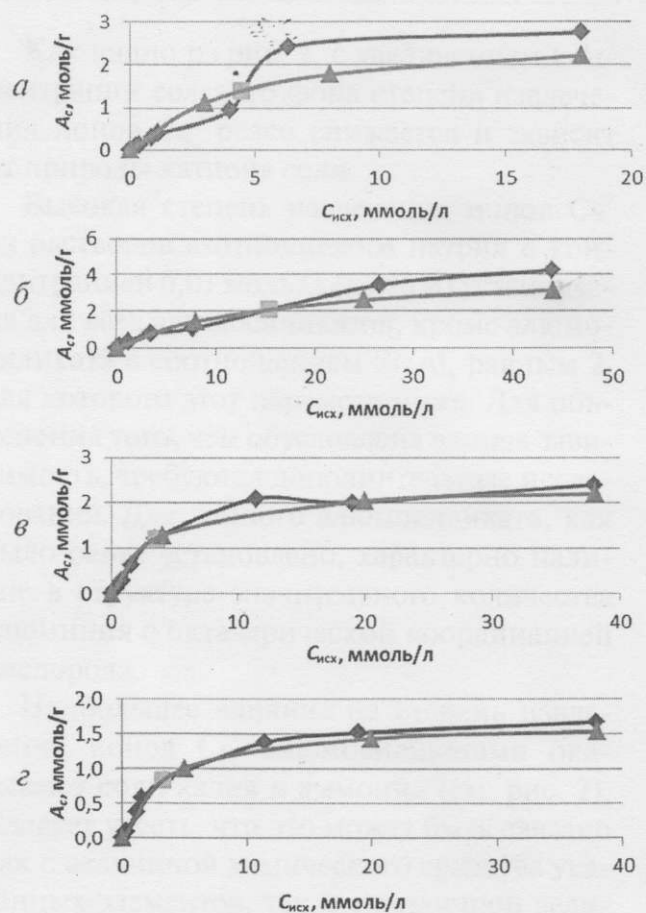


Рис. 1. Зависимости сорбционной емкости алюмосиликатов с соотношениями Si/Al, равными 1 (а), 2 (б), 4 (в), 5 (г), от концентрации ионов цезия в растворе (◆ — экспериментальные точки, ▲ — точки, построенные согласно уравнению $A_c = K_{\text{л}} \cdot C_{\text{исх}} \cdot A_m \cdot (1/(1 + K_{\text{л(исх)}} \cdot C_{\text{исх}}))$)

Таблица 1. Сорбционная емкость и степень извлечения ионов Cs⁺ алюмосиликатами (Т:Ж = 1:400, при T = 20 °C)

KAlSiO ₄ ·H ₂ O ($K_{л(р)} = 1,053$ л/ммоль, $K_{л(и)} = 0,2244$ л/ммоль)				KAlSi ₂ O ₆ ·1,5H ₂ O ($K_{л(р)} = 0,1$ л/ммоль, $K_{л(и)} = 0,0651$ л/ммоль)			
$C_{исх}$, ммоль/л	C_p , ммоль/л	A_c , ммоль/г	α , %	$C_{исх}$, ммоль/л	C_p , ммоль/л	A_c , ммоль/г	α , %
0,24	0,003	0,095	98,8	0,24	0,006	0,0936	97,5
0,35	0,01	0,136	97,1	1,09	0,18	0,364	83,5
0,86	0,135	0,29	84,3	1,11	0,21	0,36	81,1
1,11	0,11	0,4	90,1	3,43	1,37	0,824	60,1
4,01	1,67	0,936	58,4	7,72	5,0	1,088	35,2
6,34	0,36	2,4	94,3	26,6	17,9	3,48	32,7
18,0	11,16	2,736	38,0	43,9	33,3	4,24	24,1
KAlSi ₄ O ₁₀ ·2,4H ₂ O ($K_{л(р)} = 1,067$ л/ммоль, $K_{л(и)} = 0,2831$ л/ммоль)				KAlSi ₅ O ₁₂ ·2,7H ₂ O ($K_{л(р)} = 0,926$ л/ммоль, $K_{л(и)} = 0,3075$ л/ммоль)			
$C_{исх}$, ммоль/л	C_p , ммоль/л	A_c , ммоль/г	α , %	$C_{исх}$, ммоль/л	C_p , ммоль/л	A_c , ммоль/г	α , %
0,24	0,007	0,09	97,1	0,24	0,006	0,0936	97,5
0,29	0,006	0,114	97,9	0,29	0,06	0,092	79,3
1,6	0,02	0,632	98,8	1,6	0,18	0,57	88,8
3,43	0,41	1,208	88,1	3,43	1,33	0,84	61,2
11,5	6,18	2,13	46,3	11,5	8,0	1,4	30,4
19,0	14,0	2,0	26,3	19,0	15,14	1,54	20,3
37,9	31,91	2,4	15,8	37,9	33,7	1,68	11,1

В пределах ошибок измерения представленные зависимости изотерм сорбции, экспериментальные и построенные по уравнению Ленгмюра (1), совпадают. Расчет констант Ленгмюра $K_{л(р)}$ проводили по формуле (2), и их значения приведены в табл. 1.

По максимальной сорбционной емкости алюмосиликаты с соотношением Si/Al, равным 1 и 3, близки [1]. Следует отметить, что для исследуемого ряда алюмосиликатов калия характерна высокая степень извлечения ионов Cs⁺ из водных растворов — до 98%. С учетом мольных долей ионов калия в полученных алюмосиликатах, максимальных значений сорбционной емкости по ионам Cs⁺ (см. табл. 1), ошибок измерений величин концентраций сорбата, массы сорбента и объема раствора величина доли обмена ионов K⁺ на ионы Cs⁺ составляет более 80%.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные по влиянию солевого фона азотнокислых солей щелочных металлов и аммония на степень извлечения ионов Cs⁺ алюмосиликатами.

Как видно из рис. 2, с увеличением концентрации солевого фона степень извлечения ионов Cs⁺ резко снижается и зависит от природы катиона соли.

Высокая степень извлечения ионов Cs⁺ из растворов азотнокислого натрия с концентрацией 0,01 моль/л (до 78%) установлена для всех алюмосиликатов, кроме алюмосиликата с соотношением Si/Al, равным 2, для которого этот параметр ниже. Для объяснения того, чем обусловлена данная зависимость, требуются дополнительные исследования. Для данного алюмосиликата, как было ранее установлено, характерно наличие в структуре значительного количества алюминия с октаэдрической координацией кислорода.

Наибольшее влияние на степень извлечения ионов Cs⁺ алюмосиликатами оказывают соли калия и аммония (см. рис. 2). Следует учесть, что это может быть связано как с величиной химического сродства указанных элементов, так и с различной величиной произведения растворимости алюмо-

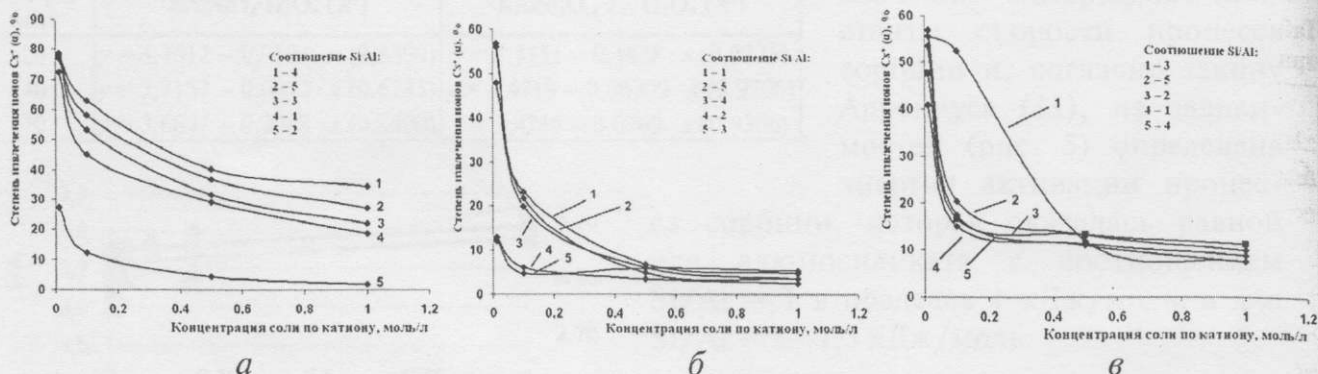


Рис. 2. Зависимости величины степени извлечения ионов Cs^+ алюмосиликатами от концентрации азотнокислых солей: а — $NaNO_3$, б — KNO_3 , в — NH_4NO_3

силикатов цезия, натрия, калия и аммония в исследуемых растворах.

В табл. 2 приведены экспериментальные данные по кинетике сорбции ионов Cs^+ , полученные для алюмосиликатов с соотно-

шением Si/Al, равным 1 и 5, при различных температурах (20, 40 и 70 °С).

Следует отметить высокую скорость катионного обмена между сорбентом и раствором. Уже через минуту (без учета времени на фильтрацию) сорбционная емкость $KAlSiO_4 \cdot H_2O$ и $KAlSi_5O_{12} \cdot 2,7H_2O$ составляет не менее 95% от равновесной (см. табл. 2). Подобная зависимость была получена ранее и для $KAlSi_3O_8 \cdot 1,5H_2O$ [1].

Изменение температуры незначительно влияет на кинетику процесса. Данные по кинетике сорбции при различных температурах для $KAlSiO_4 \cdot H_2O$ и $KAlSi_5O_{12} \cdot 2,7H_2O$ обработаны в соответствии с кинетической моделью процесса псевдотортого порядка, согласно уравнению (7), и представлены на рис. 3, которые описываются линейными уравнениями (табл. 3) с высокими коэффициентами корреляции (R^2).

Для $KAlSi_5O_{12} \cdot 2,7H_2O$ коэффициенты корреляции значительно выше, т.е. кинетика процесса реакции катионного обмена при сорбции ионов Cs^+ для этого соединения описывается кинетической моделью псевдотортого порядка наилучшим образом. Возможно, это связано со структурой данного алюмосиликата, в котором содержится повышенное количество SiO_2 и уменьшено, соответственно, содержание структурных группировок типа Si—O—Al в его структуре.

Из линейных уравнений, представленных в табл. 3, и согласно уравнению (7) ки-

Таблица 2. Зависимость величины сорбционной емкости от времени при различных температурах при сорбции ионов Cs^+ алюмосиликатами $KAlSiO_4 \cdot H_2O$ и $KAlSi_5O_{12} \cdot 2,7H_2O$

Температура, °С	Время, мин	Сорбент			
		$KAlSiO_4 \cdot H_2O$		$KAlSi_5O_{12} \cdot 2,7H_2O$	
		C_p , ммоль/л	$A_{c(t)}$, ммоль/г	C_p , ммоль/л	$A_{c(t)}$, ммоль/г
20	1	1,0981	0,2626	0,8320	0,2732
	5	1,0830	0,2634	0,5946	0,2832
	10	1,0009	0,2668	0,5766	0,2836
	30	0,9995	0,2667	0,5819	0,2837
	60	0,9961	0,2667	0,5712	0,2841
	120	0,9970	0,2666	0,5692	0,2842
	240	0,9840	0,2674	0,5680	0,2840
40	1	1,0505	0,2650	0,5864	0,2829
	5	1,0099	0,2663	0,4973	0,2869
	10	1,0014	0,2666	0,4634	0,2878
	30	1,0036	0,2664	0,4540	0,2886
	60	0,8903	0,2712	0,4730	0,2878
	120	0,9073	0,2703	0,4870	0,2872
	240	0,8773	0,2719	0,4680	0,2880
70	1	1,3657	0,2588	0,6119	0,2818
	5	1,0587	0,2711	0,4987	0,2870
	10	1,2235	0,2645	0,5118	0,2864
	30	1,0391	0,2718	0,4651	0,2883
	60	1,0429	0,2717	0,4532	0,2885
	120	0,9722	0,2745	0,4470	0,2891
	240	0,8841	0,2780	0,5043	0,2868

Таблица 3. Линейные уравнения кинетической модели псевдодвухго порядка

T, °C/сорбент	KAlSiO ₄ ·H ₂ O, (R ²)	KAlSi ₅ O ₁₂ ·2,7H ₂ O, (R ²)
20	y = 3,7512 - 0,0624 · x (0,8300)	y = 3,5151 - 0,1428 · x (0,9925)
40	y = 3,7152 - 0,0672 · x (0,6283)	y = 3,4719 - 0,06302 · x (0,9706)
70	y = 3,6647 - 0,2058 · x (0,8300)	y = 3,4715 - 0,0769 · x (0,9366)

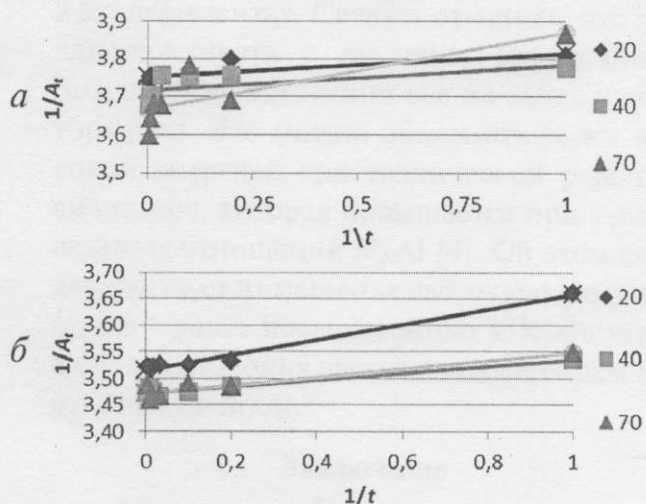


Рис. 3. Кинетическая модель псевдодвухго порядка при сорбции ионов Cs⁺ алюмосиликатами с соотношениями Si/Al, равными 1 (а) и 5 (б)

нетической модели процесса сорбции псевдодвухго порядка рассчитаны константы k₂, г·мин⁻¹·ммоль⁻¹, при температурах 20, 40 и 70 °C соответственно: для KAlSiO₄·H₂O — 225,5; 205,4; 65,3 и для KAlSi₅O₁₂·2,7H₂O — 86,53; 191,3; 156,7.

Сорбцию ионов Cs⁺ алюмосиликатами следует рассматривать как топохимическую реакцию и, исходя из этого, данные по кинетике проанализированы с привлечением уравнения (9) Колмогорова—Ерофеева с представлением экспериментальных данных в виде графической зависимости (рис. 4).

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 4, следует, что порядок реакции процесса сорбции, согласно модели Колмогорова—Ерофеева, значительно меньше единицы (в пределах 0,03), а это характерно для процессов, контролируемых диффузионными явле-

ниями. Из этих же графических зависимостей получены значения логарифма константы скорости процесса сорбции и, согласно закону Аррениуса (11), из зависимостей (рис. 5) определена энергия активации процесса сорбции, которая оказалась равной для алюмосиликата с соотношением Si/Al = 1 в пределах 1 кДж/моль, а для Si/Al = 5—1,5 кДж/моль.

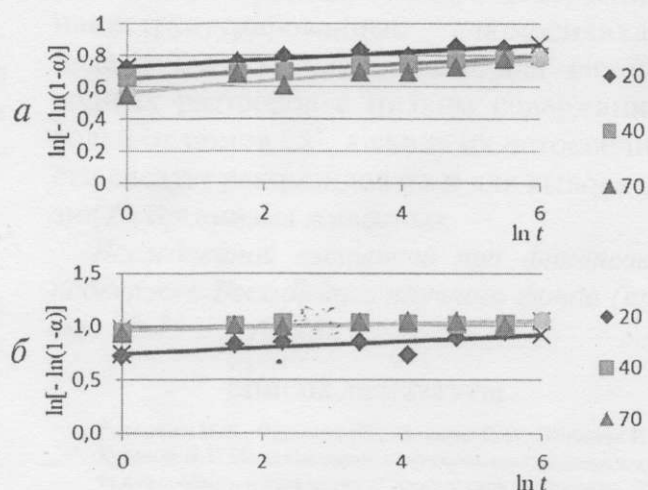


Рис. 4. Логарифмические зависимости по уравнению Колмогорова—Ерофеева для алюмосиликатов с соотношениями Si/Al, равными 1 (а) и 5 (б)

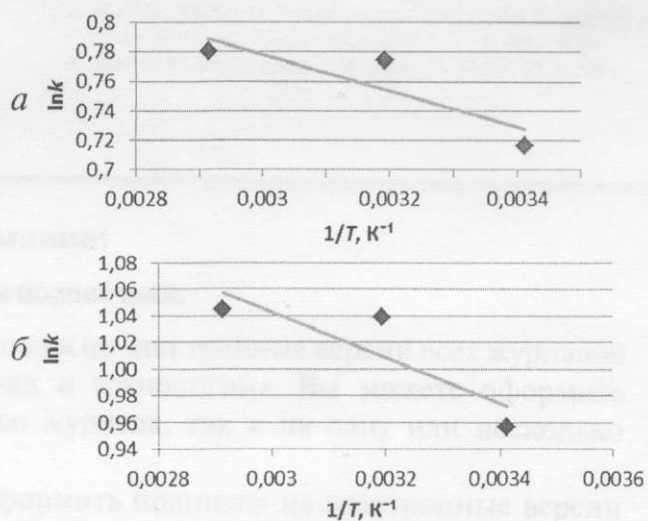


Рис. 5. Зависимость логарифма константы скорости процесса сорбции ионов Cs⁺ от обратной температуры для алюмосиликатов с соотношениями Si/Al, равными 1 (а) и 5 (б), для интервала температур 20—70 °C

В данном случае для реакции процесса сорбции с такой низкой энергией активации должна быть характерна слабая температурная зависимость, что и наблюдается в экспериментах. Следует отметить, что для алюмосиликата с высоким содержанием SiO_2 энергия активации все же выше в полтора раза. Это можно объяснить более высокой энергией кристаллической решетки силикатов, которая повышается при увеличении соотношения Si/Al [4]. Об этом свидетельствует и смещение частот максимумов пиков в ранее исследованных ИК-спектрах в область высоких частот с повышением соотношения Si/Al .

Заключение

Исследованы процессы сорбции ионов Cs^+ из хлоридных растворов в статических условиях. В исследуемом ряду алюмосиликатов наибольшее значение сорбционной емкости (более 4,0 ммоль/г) характерно для алюмосиликата с соотношением Si/Al , равным 2. При исследовании влияния азотнокислых солей на сорбцию ионов Cs^+ установлено, что наибольшее влияние на степень извлечения ионов Cs^+ алюмо-

силикатами оказывают соли калия и аммония. Высокая степень извлечения ионов Cs^+ из растворов с концентрацией азотнокислого натрия с концентрацией 0,01 моль/л (до 78%) установлена для всех алюмосиликатов, кроме алюмосиликата с соотношением Si/Al , равным 2. Определены кинетические параметры сорбции. Установлено, что время выхода на равновесные значения составляет несколько минут. Полученные наноструктурированные алюмосиликаты целесообразно использовать для очистки водных растворов с низким содержанием солей от ионов Cs^+ , а ввиду их нетоксичности следует рекомендовать и для вывода цезия из организма животных.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-17-10016).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Буланова С.Б., Шабалин И.А., Курявый В.Г. Использование синтетического алюмосиликата для сорбции ионов цезия // Химическая технология. 2013. Т. 14. № 3. С. 185–192.
2. Coleman N.J., Brassington D.S., Raza A., Mendham A.P. Sorption of Co^{2+} and Sr^{2+} by waste-derived 11 Å tobermorite // Waste Management. 2006. V. 26. P. 260–267.
3. Ho Y.S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. 1999. V. 34. P. 451–465.
4. Костов И. Минералогия. М.: Изд-во «Мир», 1971. 584 с.

Внимание!

Уважаемые подписчики,

на нашем сайте www.nait.ru доступна подписка на электронные версии всех журналов научно-технического издательства «Наука и технологии». Вы можете оформить подписку как на полнотекстовую версию журнала, так и на одну или несколько интересных Вас статей.

Кроме того, с 2017 года Вы можете оформить подписку на электронные версии всех наших журналов и на сайте «НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКИ» <http://elibrary.ru>.