

СОРБЦИЯ СОЕДИНЕНИЙ УРАНА (VI) ВОЛОКНИСТЫМ КАТИОНИТОМ ФИБАН K-1 ИЗ КИСЛЫХ СРЕД

SORPTION OF URANIUM (VI) COMPOUNDS BY FIBROUS CATION EXCHANGER FIBAN K-1 FROM ACIDIC MEDIA

Установлена высокая эффективность использования волокнистого катионита ФИБАН K-1 для извлечения соединений урана (VI) из соляно- и азотнокислых модельных растворов, в том числе из комбинированных железосодержащих растворов. Соединения урана (VI) извлекаются из соляно- и азотнокислых модельных растворов на 98,5–99,5 % и на 92–93 % из комбинированных железосодержащих растворов за небольшое время (в течение 5–10 мин) при расходе сорбента, соответственно, 1–5 и 10 г/дм³. Показано, что кинетика сорбции соединений урана описывается моделью псевдовторого порядка. Изотермы сорбции описаны уравнениями Ленгмюра, Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича. Рассчитаны константы уравнений, описывающих сорбцию, которые свидетельствуют о значительном родстве ионов уранила к данному сорбенту ($\Delta G^0_{\text{сорб.}} = -36,94 \div -38,21$ кДж/моль), ионообменном механизме сорбции (значения характеристической энергии сорбции >8 кДж/моль) и возрастании энергии связи сорбент — сорбат по мере заполнения поверхности. Установлено, что UO₂-форма катионита может быть регенерирована на 88–97 % 1 М растворами NaCl, HCl, H₂SO₄ и NaHCO₃.

Ключевые слова: сорбция, соединения урана (VI), волокнистый катионит, ионный обмен

The high efficiency of use the fibrous cation exchanger FIBAN K-1 for the extraction of uranium (VI) compounds from hydrochloric- and nitric acid model solutions, including combined iron containing solutions, was found. Compounds of uranium (VI) were extracted from hydrochloric- and nitric acid model solutions with 98,5-99,5% and 92-93% content of iron containing solutions in a short time (5-10 min) at a flow rate of sorbent, respectively, 1-5 and 10 g/dm³. It was shown that the kinetics of sorption of uranium compounds describes by the pseudo second-order model. Sorption isotherms were described by the equations of Langmuir, Freundlich and Dubinin-Radushkevich. The constants of the equations describing the sorption were calculated. These constants indicated a significant affinity of uranyl ions to the sorbent ($\Delta G^0_{\text{sorption}} = -36,94 \div -38,21$ kJ/mol), ion-exchange mechanism of sorption (values of sorption characteristic energy >8 kJ/mol) and increasing of the binding energy of the bond sorbent-sorbate in a process of surface coverage. It was found that UO₂-form of cation exchanger could be regenerated for 88-97% by 1 M solutions of NaCl, HCl, H₂SO₄ and NaHCO₃.

Key words: sorption, uranium (VI) compounds, fibrous cation exchanger, ion exchange

О.В. Перлова*, кандидат химических наук, доцент кафедры физической и коллоидной химии, Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, Украина

В.Ф. Сафонова, доктор химических наук, профессор, заведующая кафедрой физической и коллоидной химии, Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, Украина

Н.А. Перлова, аспирант кафедры физической и коллоидной химии, Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова, Украина

А.П. Поликарпов, кандидат химических наук, заведующий лабораторией синтеза и исследования свойств ионообменных волокон, Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Республика Беларусь

O.V. Perlova, V.F. Sazonova, N.A. Perlova, A.P. Polikarpov

*Адрес для корреспонденции: olga_perlova@onu.edu.ua

Извлечение соединений урана (VI) из природных и техногенных вод является актуальной экологической проблемой, обусловленной переработкой урансодержащих руд [1], для решения которой часто используют сорбцию [2–6]. Однако в настоящее время не все используемые сорбенты позволяют эффективно и быстро извлекать соединения урана (VI) из водных сред. Поэтому для решения экологических задач важным является вопрос поиска сорбентов комплексного действия. В этом отношении перспективными сорбентами представляются волокнистые иониты. В частности, волокнистые иониты ФИБАН (разработка Института физико-органической химии НАН Беларуси) [7] рекомендуются для умягчения и деионизации воды; они эффективно извлекают из водных растворов катионы металлов (Pb^{2+} , Hg^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} [8–10], Sr^{2+} [11], Pd^{2+} [12]), оксоанионы рения (VII) и ванадия (V) [13, 14]. По сравнению с гранулированными ионитами ионообменные волокна обладают более развитой поверхностью (удельная поверхность волокон варьируется в пределах 0,3–10,0 м²/г благодаря малому диаметру (20–50 мкм) элементарного волокна), большей способностью к набуханию, лучшими кинетическими и гидродинамическими характеристиками, которые обеспечивают высокую скорость обмена, большую доступность ионогенных групп для обмениваемых ионов, малую глубину диффузионного слоя волокна [7].

Цель работы — установить закономерности сорбции соединений урана (VI) из кислых сред (соляно- и азотнокислых модельных растворов) волокнистым катионитом ФИБАН К-1.

Материалы и методы исследования

Сорбатами являлись соединения урана (VI), присутствующие в модельных растворах ацетата уранила ($\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, х.ч.), содержащих 50 мг (0,21 ммоль) урана в литре, с добавлением 20 ммоль/дм³ HCl или HNO_3 . Исходные значения pH растворов равнялись 2,0–2,5. При данных условиях опытов уран (VI) находился в растворах в виде катионов уранила UO_2^{2+} (98,3 %) и катионных комплексов состава $[\text{UO}_2\text{Cl}]^+$ или $[\text{UO}_2\text{NO}_3]^+$ (1,6 %) [15]. В ряде опытов сорбцию урана (VI) проводили из комбинированных железосодержащих растворов состава, ммоль/дм³: U(VI) –0,21; FeCl_3 –4,4; HCl или HNO_3 –20. С подобными растворами приходится сталкиваться в практике очистки рудничных и техногенных вод предприятий, перерабатывающих урансодержащие руды [1].

В качестве сорбента использовали волокнистый монофункциональный сильнокислотный сульфокатионит ФИБАН К-1 в Н-форме с диаметром волокон 40 мкм и удельной поверхностью 0,3 м²/г.

Опыты по сорбции урана (VI) исследуемым сорбентом проводили в статическом режиме. Для этого в конические колбы емкостью 250 см³, со-

державшие 50 см³ раствора сорбата, вводили сорбент в количестве 0,025–1,000 г. Колбы закрывали притертыми пробками и встряхивали (аппарат для встряхивания Water bath shaker type 357) в течение 1–25 мин при температуре 20 ± 2 °С. Затем содержимое колб центрифугировали (лабораторная центрифуга MPW-340) со скоростью 3000 об./мин в течение 5 мин, после чего фотометрически (фотоколориметр КФК-2МП) анализировали водную фазу на содержание урана (VI) по стандартной методике [16].

Об эффективности процесса судили по степени сорбции урана (%) $S = (C_0 - C) \cdot 100 / C_0$ и величине удельной сорбции $A = (C_0 - C_p) \cdot V / m$, где C_0 , C и C_p — соответственно, начальная, конечная и равновесная концентрация урана (VI) в растворе; V — объем раствора сорбата; m — масса сорбента.

Десорбцию урана (VI) проводили в статическом режиме при непрерывном встряхивании деионизированной водой, 1 М растворами H_2SO_4 , H_3PO_4 , HCl , NaCl или NaHCO_3 , в течение 15 мин. Степень десорбции (%) урана (VI) рассчитывали по уравнению: $S_{\text{дес.}} = C_{\text{дес.}} \cdot 100 / (C_0 - C_p)$, где $C_{\text{дес.}}$ — концентрация урана (VI) в растворе после десорбции.

Для получения достоверных результатов опыты повторяли 5 раз. Относительная погрешность результатов измерений при коэффициенте надежности 0,95 составляла 0,5–2,5 %.

Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показали (табл. 1), что катионит ФИБАН К-1 эффективно (на 98,5–99,5 %) извлекает уран (VI) из модельных соляно- и азотнокислых растворов ацетата уранила (что позволяет уменьшить остаточную концентрацию урана в растворе до санитарных норм [17]) и на 92–93 % из комбинированных железосодержащих растворов.

При увеличении расхода катионита ФИБАН К-1 от 0,5 до 5,0 г/дм³ степень сорбции урана (VI) возрастает (табл. 1), однако с ростом времени сорбции эта зависимость становится менее существенной. Так, при проведении сорбции в течение 3 мин оптимальный расход сорбента составляет 5,0 г/дм³, в течение 10 мин — 2,0 г/дм³, а в течение 15 мин и более расход сорбента не влияет на эффективность процесса. Последнее позволяет выбирать рациональный расход сорбента и/или время сорбции. Для эффективного проведения сорбционного процесса и достижения требуемой глубины поглощения сорбата необходимо в каждом конкретном случае решать вопрос о приоритетности продолжительности процесса или минимально необходимого расхода сорбента.

Сорбция урана (VI) из модельных растворов ацетата уранила катионитом ФИБАН К-1 характеризуется высокой скоростью: равновесие в системе сорбент — раствор устанавливается в течение 10–15 мин и достигается тем быстрее, чем больше расход сорбента (табл. 1, 2). Это справедливо и для извлечения урана (VI) из комбинированных железосодержащих растворов (табл. 1, 2). Однако

в этом случае для достижения степени сорбции урана (VI) 90,0–92,2 % необходимо увеличить расход сорбента до 10,0 г/дм³ (табл. 1). Полученные результаты объясняются конкурентной сорбцией катионов Fe³⁺, присутствующих в растворе наряду с катионами UO₂²⁺.

Скорость сорбции урана (VI) из соляно- и азотнокислых модельных растворов, время достижения сорбционного равновесия (t_p) и кинетические характеристики процесса мало зависят от природы раствора (табл. 1, 2), поскольку формы нахождения соединений урана (VI) в обоих случаях аналогичны и, следовательно, сорбция происходит по одинаковому механизму.

Для установления механизма сорбции урана (VI) использовали модели псевдопервого и псевдоторгового порядков, которые описываются интегральными уравнениями [2] в линейной форме:

$$\ln(A_p - A) = \ln A_p - k_1 t,$$

$$\frac{t}{A} = \frac{1}{k_2 A_p^2} + \frac{1}{A_p} \cdot t,$$

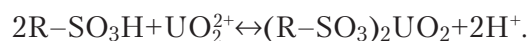
где A_p и A — удельная сорбция урана (VI) в состоянии равновесия и в момент времени t ; k_1 и k_2 — константы скорости сорбции псевдопервого и псевдоторгового порядков, соответственно.

Расчеты показали (табл. 2), что сорбция урана (VI) катионитом ФИБАН К-1 из соляно- и азотнокислых модельных растворов, содержащих и не содержащих соли Fe(III), описывается моделью псевдоторгового порядка. Об этом свидетельствуют не только высокие значения коэффициентов линейной корреляции (R^2), но и совпадение расчетных (A_p)

и экспериментальных (A_p (эксп.)) величин равновесной удельной сорбции. На основании значений констант скорости k_2 найдены величины начальной скорости сорбции h (табл. 2), т.к. при $t \rightarrow 0$ $h = k_2 A_p^2$ [2].

При сорбции урана (VI) из модельных растворов ацетата уранила с увеличением расхода сорбента от 0,5 до 5,0 г/дм³ константы скорости сорбции k_1 и k_2 возрастают, а величина равновесной удельной сорбции уменьшается. Начальная скорость сорбции принимает максимальные значения при сорбции урана (VI) с использованием минимального и максимального расхода сорбента. Это обусловлено вкладом в начальную скорость процесса сорбции h величины равновесной удельной сорбции A_p и константы скорости k_2 . Несколько иная картина (за исключением влияния расхода сорбента на значения k_2) наблюдается при сорбции урана (VI) из железосодержащих растворов. В данном случае значения константы скорости k_1 , напротив, снижаются, а значения равновесной сорбции и начальной скорости сорбции проходят через максимум, соответственно, при расходе сорбента 7,5 и 10,0 г/дм³.

Псевдоторговой порядок кинетики сорбции урана (VI) катионитом ФИБАН К-1 позволяет предположить следующий механизм взаимодействия сорбата с сорбентом:



Изотермы сорбции урана (VI) из модельных соляно- и азотнокислых растворов ацетата уранила (рис. 1) имеют форму изотерм Л3-типа по классификации Джайлса [18]. Такой тип изотерм характерен для систем, в которых силы взаимодействия между сорбированными частицами пренебрежимо малы, а между молекулами растворенного вещества и сорбентом достаточно велики, что приводит к их параллельной ориентации на поверхности сорбента. Перегибы, которые наблюдаются на изотермах, могут быть связаны с изменением ориентации частиц сорбата в сорбционном слое или с образованием второго слоя.

Для получения количественных характеристик взаимодействия сорбата и сорбента изотермы сорбции были обработаны с помощью некоторых уравнений для описания сорбции в линеаризированной форме [3]:

$$\text{Ленгмюра: } \frac{1}{A} = \frac{1}{A_\infty} + \frac{1}{A_\infty \cdot \beta} \cdot \frac{1}{C_p},$$

где C_p — равновесная концентрация сорбата; A — равновесная удельная сорбция; A_∞ — емкость сорбционного моно слоя; β — константа сорбционного равновесия, не учитывающая влияние растворителя на процесс сорбции, связанная с константой K_L (константа сорбционного равновесия Ленгмюра, учитывающая конкурентную сорбцию растворителя) соотношением: $K_L = \gamma \cdot \beta \cdot \omega_\omega / \omega$, где γ — число моль растворителя в 1 кг; ω и ω_ω — соответственно площади, занимаемые на поверхности сорбента молекулой (ионом) сорбата и молекулой воды; при расчетах принимали, что $\omega = \omega_\omega$,

Таблица 1

Зависимость степени сорбции (S) урана (VI) от расхода сорбента (q) и времени сорбции (t)

Раствор $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2$					Раствор, содержащий $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2$ и FeCl_3			
q , г/дм ³	0,5	1,0	2,0	5,0	5,0	7,5	10,0	15,0
t, мин	S, %				S, %			
Сорбция урана (VI) из солянокислых модельных растворов								
2	50,1	57,8	67,9	96,2	37,2	69,0	85,9	89,2
3	68,0	69,1	80,0	99,0	43,2	74,2	89,1	90,0
5	83,2	84,0	93,8	99,5	46,1	76,1	90,0	92,2
7	88,3	90,1	97,1	99,5	47,1	77,0	91,3	93,2
10	94,1	94,5	99,5	99,5	47,2	77,1	92,1	93,3
15	99,0	99,5	99,5	99,5	47,2	77,2	92,2	93,3
Сорбция урана (VI) из азотнокислых модельных растворов								
2	54,1	64,0	76,8	94,1	32,0	66,9	82,8	85,0
3	80,0	87,2	95,0	99,1	37,9	70,1	85,8	87,2
5	83,2	95,2	99,5	99,5	40,1	71,2	89,1	91,1
7	86,2	97,1	99,5	99,5	42,1	73,0	90,1	91,9
10	88,9	98,5	99,5	99,5	42,2	74,1	90,1	92,0
15	96,0	99,5	99,5	99,5	42,2	74,2	90,1	92,1

Таблица 2

Кинетические характеристики сорбции урана (VI) катионитом ФИБАН К-1

Расход сорбента, г/дм³	t _p , мин	A _p (эксп.)·10 ⁵ , моль/г	Модель псевдопервого порядка			Модель псевдовторого порядка			
			A _p ·10 ⁵ , моль/г	k ₁ , мин ⁻¹	R ²	A _p ·10 ⁵ , моль/г	k ₂ , г/(моль·мин)	h·10 ⁴ , моль/(г·мин)	R ²
Сорбция урана (VI) из солянокислых модельных растворов									
0,5	20	42,0	30,8	0,29	0,995	43,5	1,43·10 ³	2,71	0,998
1,0	15	21,0	14,1	0,25	0,988	21,7	3,02·10 ³	1,42	0,998
3,0	10	6,67	3,14	0,41	0,971	6,87	2,89·10 ⁴	1,36	0,999
5,0	3	4,20	2,45	1,38	0,986	4,04	1,86·10 ⁵	3,05	0,999
Сорбция урана (VI) из азотнокислых модельных растворов									
0,5	15	42,0	23,6	0,18	0,982	43,2	1,17·10 ³	2,19	0,999
1,0	10	21,0	17,2	0,40	0,996	21,9	3,61·10 ³	1,73	0,999
3,0	7	6,66	1,99	0,42	0,964	6,83	4,52·10 ⁴	2,11	0,999
5,0	3	4,20	1,58	1,26	0,982	4,02	2,80·10 ⁵	4,54	0,999
Сорбция урана (VI) из солянокислых модельных растворов, содержащих U(VI) и Fe(III)									
5,0	7	1,97	1,50	0,71	0,992	2,05	9,94·10 ⁴	0,419	0,999
7,5	7	2,16	0,77	0,60	0,955	2,22	1,55·10 ⁵	0,764	0,999
10,0	7	1,92	0,24	0,38	0,965	1,95	3,38·10 ⁵	1,29	0,999
15,0	7	1,30	0,12	0,36	0,998	1,32	6,63·10 ⁵	1,15	0,999
Сорбция урана (VI) из азотнокислых модельных растворов, содержащих U(VI) и Fe(III)									
5,0	7	1,76	1,04	0,52	0,962	1,90	7,76·10 ⁴	0,281	0,998
7,5	7	2,07	0,46	0,46	0,984	2,12	1,98·10 ⁵	0,889	0,999
10,0	7	1,89	0,54	0,63	0,996	1,94	2,57·10 ⁵	0,962	0,999
15,0	7	1,29	0,17	0,29	0,993	1,29	4,31·10 ⁵	0,743	0,999

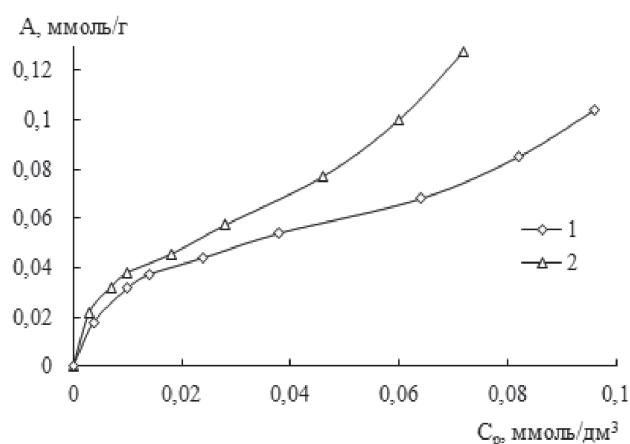


Рис. 1. Изотермы сорбции соединений урана (VI) из соляно- (1) и азотнокислых (2) растворов ацетата уранила катионитом ФИБАН К-1.

$$\text{Фрейндлиха: } \lg A = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_p,$$

где K_F и n — константы уравнения Фрейндлиха; K_F характеризует сорбционную емкость сорбента при единичной равновесной концентрации сорбата и отражает его относительную сорбционную способность; n характеризует интенсивность сорбции.

онного процесса и распределение активных центров, принимая значения $n > 1$ или $n < 1$;

Дубинина-Радушкевича:

$$\ln A = \ln A_{\infty} - \frac{R^2 T^2}{E^2} \left[\ln(1 + 1/C_p) \right]^2,$$

где E — характеристическая энергия сорбции.

Свободную энергию Гиббса сорбции $\Delta G^0_{\text{сорб}}$ рассчитывали по уравнению

$$\Delta G^0_{\text{сорб}} = -RT \ln K_L.$$

Результаты расчетов показали (рис. 2, табл. 3), что экспериментальные изотермы сорбции урана (VI) из модельных растворов хорошо описываются уравнениями Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича в одинаковом интервале равновесных концентраций с близкими и достаточно высокими значениями коэффициентов линейной корреляции. Вместе с тем, уравнением Ленгмюра они описываются хуже — на менее протяженных участках.

Последнее, вероятно, связано с тем, что отклонение от теории Ленгмюра может быть результатом энергетической неоднородности поверхности, которая характеризуется наличием сорбционных центров, обладающих различным сродством к сорбату [19]. Именно поэтому, вероятно, для описания экспериментальных изотерм сорбции соединений урана катионитом ФИБАН К-1 лучше подходят модели Фрейндлиха и Дубинина-Радушкевича, описывающие сорбцию на энергетически неоднородной поверхности.

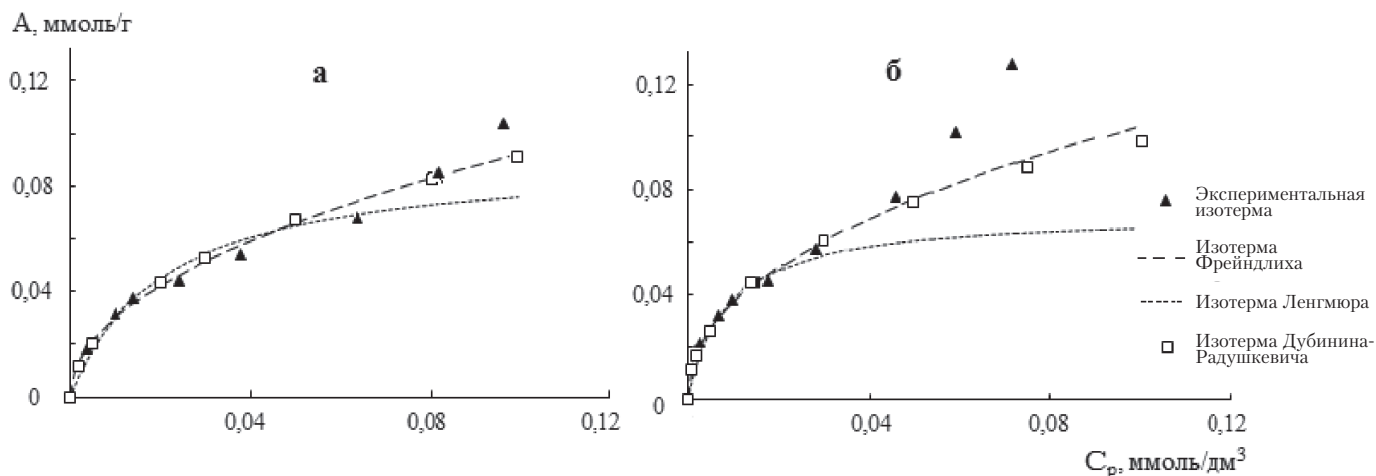


Рис. 2. Сравнение экспериментальных изотерм сорбции и различных моделей, характеризующих сорбцию урана (VI) из соляно- (а) и азотнокислых (б) растворов катионитом ФИБАН К-1.

Значения констант уравнений, описывающих сорбцию (табл. 3), позволяют сделать вывод о значительном сродстве ионов уранила к данному сорбенту (высокие значения K_L , K_F и $\Delta G^0_{\text{сорб.}}$), подтверждают ионообменный механизм сорбции (значения характеристической энергии сорбции >8 кДж/моль [20]) и возрастание энергии связи сорбент – сорбат по мере заполнения поверхности ($n > 1$). Значения $\Delta G^0_{\text{сорб.}}$ свидетельствуют о преимущественно химическом характере сорбции и целесообразности использования данного катионита для извлечения урана (VI) из соляно- и азотнокислых модельных растворов.

Таблица 3

Значения констант уравнений, описывающих сорбцию урана (VI) из соляно- и азотнокислых модельных растворов катионитом ФИБАН К-1

Константы уравнений, описывающих сорбцию	Численные значения констант уравнений	
	Солянокислые модельные растворы	Азотнокислые модельные растворы
Уравнение Ленгмюра		
A_{∞} , ммоль/г	0,076	0,071
$K_L \cdot 10^{-3}$, дм³/ммоль	3,85	6,48
$\Delta G^0_{\text{сорб.}}$, кДж/моль	-36,94	-38,21
Интервал C_p , ммоль/дм³	0,010–0,064	0,007–0,028
R^2	0,971	0,977
Уравнение Фрейндлиха		
K_F , ммоль $^{1-1/n}$ ·(дм³) $^{1/n}$ /г	8,15	6,51
n	2,06	2,23
Интервал C_p , ммоль/дм³	0,010–0,096	0,007–0,046
R^2	0,960	0,985
Уравнение Дубинина-Радушкевича		
E , кДж/моль	17,63	17,01
A_{∞} , ммоль/г	0,33	0,56
Интервал C_p , ммоль/дм³	0,010–0,096	0,007–0,046
R^2	0,981	0,980

Установлено (рис. 3), что с поверхности катионита ФИБАН К-1 уран (VI) практически не десорбируется деионизированной водой, что указывает на прочное связывание катионов уранила функциональными группами сорбента и подтверждает сделанный на основании изучения изотерм сорбции вывод о преимущественно химическом характере сорбции. Наиболее полно (95–97 %) десорбция уранил-ионов происходит после обработки сорбента растворами NaHCO_3 и H_2SO_4 (рис. 3). Исключительно высокая способность к регенерации UO_2 -формы катионита этими растворами объясняется протеканием реакций комплексообразования [21], приводящих к образованию в растворах устойчивых карбонатных и сульфатных анионных комплексов уранила [22]. Достаточно высокая степень десорбции (78 %) катионов уранила после обработки сорбента H_3PO_4 также связана с образованием в растворе устойчивых комплексных соединений уранил-ионов с дигидрофосфат-ионами [22], а более низкое значение степени десорбции обусловлено, по-видимому, образованием трудно-растворимых гидрофосфатов уранила [22] в фазе катионита. Полученные результаты указывают на значительный вклад поверхностного комплексообразования в сорбцию уранил-ионов на катионите ФИБАН К-1.

Опыты по десорбции уранил-ионов с поверхности катионита ФИБАН К-1 растворами NaCl и HCl показали, что степень десорбции указанными агентами составляет 88 и 89 %, соответственно. Учитывая низкую устойчивость хлоридных комплексов уранила [22], можно утверждать, что в данном случае десорбция катионов уранила происходит по механизму ионного обмена.

Заключение

Экспериментально установлена целесообразность использования волокнистого катионита ФИБАН К-1 для извлечения урана (VI) из соляно- и азотнокислых модельных растворов,

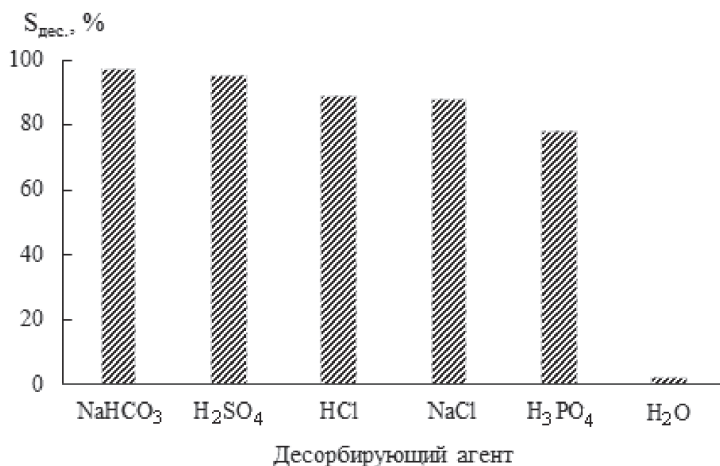


Рис. 3. Степень десорбции ($S_{\text{дес.}}$) уранил-ионов с поверхности катионита ФИБАН К-1.

содержащих и не содержащих добавку FeCl_3 . При оптимальных условиях проведения процесса остаточная концентрация урана (VI) в растворе составляет 0,25 мг/дм³.

Существенным преимуществом волокнистого катионита ФИБАН К-1 по сравнению с гранули-

рованными ионитами является более высокая скорость сорбции, в том числе из комбинированных железосодержащих растворов, хотя и при большем расходе катионита. Показано, что кинетика сорбции соединений урана описывается моделью псевдодвортного порядка.

Установлено, что экспериментальные изотермы сорбции урана (VI) катионитом ФИБАН К-1 лучше описываются уравнениями Фрейндлиха и Дубинина-Радускевича, характеризующими сорбцию на энергетически неоднородной поверхности, чем моделью Ленгмюра. Расчеты с помощью данных уравнений свидетельствуют о значительном сродстве ионов уранила к данному сорбенту ($\Delta G^0_{\text{сорб.}} = -36,94 \div -38,21$ кДж/моль), ионообменном механизме сорбции (значения характеристической энергии сорбции > 8 кДж/моль) и возрастании энергии связи сорбент – сорбат по мере заполнения поверхности.

Найдено, что степень десорбции уранил-ионов с поверхности катионита ФИБАН К-1 достигает 88–89 % после обработки сорбента 1 М растворами NaCl и HCl и 95–97 % – 1 М растворами NaHCO_3 и H_2SO_4 . Способность UO_2 -формы катионита к регенерации тем выше, чем более устойчивые комплексы уранила с соответствующими лигандами образуются в растворе.

Литература

1. Gupta C. Uranium Resource Processing / C. Gupta, H. Singh. Secondary Resources. Berlin, Heidelberg, New-York: Springer-Verlag, 2003. 519 p.
2. Anirudhan T.S. Improved performance of a biomaterial-based cation exchanger for the adsorption of uranium(VI) from water and nuclear industry wastewater / T.S. Anirudhan, P.G. Radhakrishnan // J. Environ. Radioact. 2009. V. 100. P. 250-257.
3. Yusan S.D. Sorption behaviors of uranium (VI) ions on $\alpha\text{-FeOOH}$ / S.D. Yusan, S.A. Erenturk // Desalination. 2011. V. 269. №1–3. P. 58-66.
4. Wang X. Removal of uranium (VI) ion from aqueous solution by SBA-15 / X. Wang, G. Zhu, F. Guo // Ann. Nucl. Energy. 2013. N 56. P. 151-157.
5. Han R. Removal of uranium (VI) from aqueous solutions by manganese oxide coated zeolite: discussion of adsorption isotherms and pH effect / R. Han, W. Zou, Y. Wang, L. Zhu // J. Environ. Radioact. 2007. N 93. P. 127-143.
6. Nilchi A. Kinetics, isotherm and thermodynamics for uranium and thorium ions adsorption from aqueous solutions by crystalline tin oxide nanoparticles / A. Nilchi, T.S. Dehaghan, S.R. Garmarodi // Desalination. 2013. N 321. P. 67-71.
7. Kosandrovich E.G. Fibrous Ion Exchangers / E.G. Kosandrovich, V.S. Soldatov // Ion Exchange Technology I: Theory and Materials. Eds. Inamuddin and M. Luqman. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer Science+Business Media, 2012. P. 299–371.
8. Грачек В.И. Хелатные сорбенты для очистки воды / В.И. Грачек, А.А. Шункевич, Р.В. Марцинкевич, В.С.

References

1. Gupta C., Singh H. *Uranium Resource Processing. Secondary Resources*. Berlin, Heidelberg, New-York, Springer-Verlag, 2003, 519 p.
2. Anirudhan T.S., Radhakrishnan P.G. Improved performance of a biomaterial-based cation exchanger for the adsorption of uranium(VI) from water and nuclear industry wastewater. *J. Environ. Radioact.*, 2009, vol. 100, pp. 250-257.
3. Yusan S.D., Erenturk S.A. Sorption behaviors of uranium (VI) ions on $\alpha\text{-FeOOH}$. *Desalination*, 2011, vol. 269, no. 1–3, pp. 58-66.
4. Wang X., Zhu G., Guo F. Removal of uranium (VI) ion from aqueous solution by SBA-15. *Ann. Nucl. Energy*, 2013, no. 56, pp. 151-157.
5. Han R., Zou W., Wang Y., Zhu L. Removal of uranium (VI) from aqueous solutions by manganese oxide coated zeolite: discussion of adsorption isotherms and pH effect. *J. Environ. Radioact.*, 2007, no. 93, pp. 127-143.
6. Nilchi A., Dehaghan T.S., Garmarodi S.R. Kinetics, isotherm and thermodynamics for uranium and thorium ions adsorption from aqueous solutions by crystalline tin oxide nanoparticles. *Desalination*, 2013, no. 321, pp. 67-71.
7. Kosandrovich E.G., Soldatov V.S. *Fibrous Ion Exchangers*. Inamuddin, Luqman M. (eds.) *Ion Exchange Technology I: Theory and Materials*. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer Science+Business Media, 2012, pp. 299–371.
8. Grachek V.I., Shunkevich A.A., Martsinkevich R.V., Soldatov V.S. Khelatnye sorbenty dlia ochistki vody [Chelating sorbents for water treatment]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii — Ecology and industry of Russia*, 2005, no. 1, pp. 25-27.

Солдатов // Экология и промышленность России. 2005. №1. С. 25-27.

9. Soldatov V.S. Syntheses and the Main Properties of Fiban Fibrous Ion Exchangers // *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2008. N 26. P. 457–513.

10. Грачек В.И. Новые азотфосфорсодержащие волокнистые иониты для очистки воды / В.И. Грачек, А.А. Шункевич, Р.В. Марцинкевич // Журн. прикл. химии. 2009. Т. 82. №1. С. 19-24.

11. Шункевич А.А. Применение волокнистых сорбентов ФИБАН для концентрирования ^{90}Sr из сточных вод / А.А. Шункевич, В.И. Грачек, И.И. Уголев, С.В. Матвейчук // Радиохимия. 2007. Т. 49. №6. С. 554-556.

12. Бондарева В.С. Сорбционное извлечение палладия азотсодержащими волокнистыми ионитами. Автореф. дис.... канд. хим. наук. М., 2010. 16 с.

13. Мин Э. Сорбция рения из минерализованных растворов волокнистыми сорбентами ФИБАН / Э. Мин, А.В. Шилиев, И.Д. Трошкина // Сорбционные и хроматографические процессы. 2013. Т. 13. Вып. 2. С. 199-206.

14. Нве Шванн У. Сорбционное извлечение ванадия (V) из разбавленных растворов. Дисс.... канд. техн. наук. М., 2014. 124 с.

15. Перлова О.В. Флотоэкстракционное выделение урана (VI) с помощью тонкоэмульгированных растворов триалкиламина в уайт-спирите / О.В. Перлова, А.А. Ширькалова // Химия и технология воды. 2008. Т. 30. №3. С. 385-400.

16. Марков В.К. Уран. Методы его определения / В.К. Марков, Е.А. Верный, А.В. Виноградов, С.В. Елисон. М.: Атомиздат, 1964. 503 с.

17. Гороновский И.Т. Краткий справочник по химии / И.Т. Гороновский, Ю.Ю. Назаренко, Е.Ф. Некряч. К.: Наук. думка, 1987. 829 с.

18. Джэйлс Ч. Адсорбция из растворов на поверхности твердых тел: Пер. с англ. / Ч. Джэйлс, Б. Инграм, Дж. Клюни, Я. Ликлема, Дж. Лэйн, Г. Парфит, Г. Рендалл, К. Рочестер, Г. Флир, Ф. Хесселинк, Д. Хоу. Под ред. Г. Парфит, К. Рочестер. М.: Мир, 1986. 488 с.

19. Егiazаров Ю.Г. Влияние степени гидратации сульфокатионита на каталитическую активность и характер протекающих реакций при синтезе метил-трет-амилового эфира / Ю.Г. Егiazаров, В.С. Солдатов, Л.Ю. Тычинская, Л.Н. Шаченкова, Б.Х. Черчес, Е.Н. Ермоленко // Кинетика и катализ. 2005. Т. 46. №4. С. 536-542.

20. Riemam W. Ion Exchange in Analytical Chemistry / W. Riemam, H. Walton Oxford-New York-Toronto-Sydney-Braunschweig: Pergamon Press, 1970. 375 p.

21. Запольський А.К. Водопостачання, водовідведення та якість води. К.: Вища школа, 2005. 671 с.

22. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1971. 456 с.

9. Soldatov V.S. Syntheses and the Main Properties of Fiban Fibrous Ion Exchangers. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 2008, no. 26, pp. 457–513.

10. Grachek V.I., Shunkevich A.A., Martsinkevich R.V. Novye azotfosforsoderzhashchie voloknistye ionity dlia ochistki vody [Modern nitrogen and phosphorus containing fiber ionites for water treatment]. *Zhurn. prikl. Khimii — Journal of applied chemistry*, 2009, vol. 82, no. 1, pp. 19-24.

11. Shunkevich A.A., Grachek V.I., Ugolev I.I., Matveichuk S.V. Primenenie voloknistikh sorbentov FIBAN dlia kontsentrirvaniia ^{90}Sr iz stochnykh vod [Application of fibrous sorbents FIBAN for ^{90}Sr concentration of wastewater]. *Radiokhimiia — Radiochemistry*, 2007, vol. 49, no. 6, pp. 554-556.

12. Bondareva V.S. *Sorbtsionnoe izvlechenie palladiia azotsoderzhashchimi voloknistymi ionitami. Avtoref. dis.... kand. khim. nauk* [Sorption extraction of palladium by nitrogen-containing fibrous ionites. Abstract of dissertation of Doctor of chemical sciences]. Moscow, 2010, 16 p.

13. Min E., Shiliaev A.V., Troshkina I.D. Sorbtsiia reniia iz mineralizovannykh rastvorov voloknistymi sorbentami FIBAN [Sorption of rhenium from mineralized solutions by fibrous sorbents FIBAN]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy — Sorption and chromatographic processes*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 199-206.

14. Nve Shvann U. *Sorbtsionnoe izvlechenie vanadiia (V) iz razbavlenykh rastvorov. Diss.... kand. tekhn. nauk* [Sorption extraction of vanadium (V) from dilute solutions. Dissertation of Doctor of technical science]. Moscow, 2014, 124 p.

15. Perlova O.V., Shirykalova A.A. Flotoekstraktsionnoe vydelenie urana (VI) s pomoshch'iu tonkoemul'girovannykh rastvorov trialkilamina v uait-spirite [Extraction of uranium (VI) by flotation using fine emulsified solutions of trialkylamine in white spirit]. *Khimiia i tekhnologiya vody — Chemistry and technology of water*, 2008, vol. 30, no. 3, pp. 385-400.

16. Markov V.K., Vernyi E.A., Vinogradov A.V., Elison S.V. *Uran. Metody ego opredeleniia* [Uranus. Methods of determining]. Moscow, Atomizdat Publ., 1964, 503 p.

17. Goronovskii I.T., Nazarenko Iu.Iu., Nekriach E.F. *Kratkii spravochnik po khimii* [Short Guide to Chemistry]. Kiev, Nauk. dumka, 1987, 829 p.

18. Dzhailes Ch., Ingram B., Kliuni Dzh., Liklema Ia., Lein Dzh., Parfit G., Rendall G., Rochester K., Flir G., Khesselinck F., Khou D., Parfit G. (ed.), Rochester K. (ed.) *Adsorbtsiia iz rastvorov na poverkhnosti tverdykh tel: Per. s angl.* [Adsorption from solutions onto solid surfaces: Translation from English]. Moscow, Mir Publ., 1986, 488 p.

19. Egiazarov Iu.G., Soldatov V.S., Tyhinskaia L.Iu., Shachenkova L.N., Cherkhes B.Kh., Ermolenko E.N. Vliianie stepeni gidratatsii sul'fokationita na kataliticheskuiu aktivnost' i kharakter protekaiushchikh reaktsii pri sinteze metil-tret-amiilovogo efira [Influence of the degree of hydration of sulfocationite on cationic activity and the character of the reactions occurring during the synthesis of methyl-tert-amyl ether]. *Kinetika i kataliz — Kinetics and Catalysis*, 2005, vol. 46, no. 4, pp. 536-542.

20. Riemam W., Walton H. *Ion Exchange in Analytical Chemistry*. Oxford-New York-Toronto-Sydney-Braunschweig: Pergamon Press, 1970, 375 p.

21. Zapol'skii A.K. *Vodopostachannia, vodovidvedennia ta iakist' void* [Water, sanitation and water quality]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 2005, 671 p.

22. Lur'e Iu.Iu. *Spravochnik po analiticheskoi khimii* [Handbook of analytical chemistry]. Moscow, Khimiia Publ., 1971, 456 p.