

## СОРБЦИЯ УРАНА ИЗ КАРБОНАТСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ КАРБОКСИЛИРОВАННЫМ ВОЛОКНИСТЫМ СОРБЕНТОМ

© 2013 М. А. Рагимли, А. Н. Нуриев

Институт химических проблем им. М. Ф. Нагиева НАНА, г. Баку, Азербайджан  
e-mail: iradam@rambler.ru

Поступила в редакцию 26.09.2012 г.

**Аннотация.** С целью концентрирования урана из карбонатсодержащих растворов типа морской воды, а также установления общих закономерностей процесса изучена кинетика сорбции урана в широком интервале концентраций и температур модифицированным карбоксиллированным волокнистым сорбентом ФОРПАН.

Установлено, что все кинетические зависимости во всем временном интервале удовлетворительно описываются обобщенным кинетическим уравнением Авраами-Ерофеева-Колмогорова. Обработку параметров уравнения производили методом наименьших квадратов. Выражая скорость процесса через термодинамические характеристики переходного состояния, рассчитаны энтропия ( $\Delta S^*$ ), энтальпия ( $\Delta H^*$ ) и энергия Гиббса ( $\Delta G^*$ ) процесса активации.

**Ключевые слова:** сорбция урана, волокнистый сорбент Форпан, карбонатсодержащие растворы.

### ВВЕДЕНИЕ

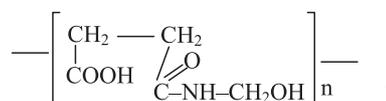
Извлечение урана из морских и океанических вод, (с содержанием урана ~3 мкг/л на фоне высокоминерализованного сложного солевого состава) будучи актуальной, практически значимой и перспективной, наряду с этим является и достаточно сложной задачей. Её успешному выполнению способствует необходимость подбора селективных сорбентов, а также разработка эффективных и избирательных методов концентрирования этого элемента. В настоящее время перспективными являются сорбционные методы с использованием комплексообразующих сорбентов [1]. Наряду с обычными гранульными сорбентами применяют волокнистые сорбенты на основе целлюлозы, поливинилового спирта и других полимерных материалов [2]. При извлечении микроэлементов ионообменниками из разбавленных растворов существенным является выбор оптимальных условий, обеспечивающих полное извлечение элементов. Обычно условия выбирают эмпирически. Для гранульных ионитов можно выбрать условия концентрирования расчетным путем [3]. Этот способ сводится к определению кинетических и равновесных параметров сорбции выбранным сорбентом, установлению механизма процесса и описа-

нию его математической моделью. Основополагающим в этих исследованиях сорбционного процесса является изучение кинетики.

В настоящей работе изучена возможность применения волокнистого сорбента ФОРПАН, синтезированного в Санкт-Петербургском институте текстильной и легкой промышленности им. С. М. Кирова, для извлечения урана из карбонатсодержащих растворов типа морской воды. Изучены кинетические характеристики процесса сорбции урана и с целью определения оптимальных условий получены полуэмпирические уравнения, устанавливающие общие закономерности процесса в исследуемом интервале концентраций и температур, рассчитана энергетика процесса и определено, что кинетика сорбции протекает в диффузионной области.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сорбент с условным названием ФОРПАН, синтезированный модификацией карбоксиллированного щелочным омылением ПАН-волокна формальдегидом, со структурной формулой звена



представляет собой волокно светло-желтого цвета со слабо-кислотными свойствами,  $\text{СОЕ}_{\text{NaOH}}=2.0$  ммоль/г и толщиной нити  $1.5 \cdot 10^{-3}$  см. Толщину определяли измерением под микроскопом диаметра нитей сорбента. За величину радиуса принята средняя арифметическая величина, полученная из 100 измерений. Предварительное изучение сорбционной способности сорбента ФОРПАН показало, что наиболее высокие коэффициенты распределения урана получаются при использовании исходной водородной формы сорбента. Основным требованием к модельным растворам является стабильность концентрации и форм существования урана в условиях карбонат-бикарбонатного равновесия.

Карбонатсодержащие растворы урана типа морской воды приготавливали растворением в стандартной морской воде (Каспийское море) трикарбонато-уранилатного комплекса  $\text{Na}_4[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]$  с добавлением для целей радиометрического контроля в качестве радиоактивного индикатора определенного количества раствора урана-233. Подробная методика приготовления растворов урана приводится в работах [4, 5]. Эта методика позволила получить активные карбонатсодержащие растворы со стабильными в течение долгого времени значениями pH  $7.85 \pm 0.05$  и концентрациями урана в интервале  $3.36 \cdot 10^{-5}$ — $7.14 \cdot 10^{-4}$  моль/л. Приготовленные растворы периодически анализировали на содержание урана радиометрическим методом и с помощью реагента Арсеназо-III.

Кинетику сорбции исследовали по методу ограниченного объема на установке, представляющей стеклянный реакционный сосуд, снабженный электромешалкой и термостатом. При включении мешалки и установлении определенной температуры (20, 35, 50 или 65 °С) раствора (в сосуд вводили 10 мл раствора урана, определенной концентрации, а также 0.01г воздушно-сухого волокна) одновременно фиксировалось время начала опыта. Через определенные промежутки времени из реакционного сосуда отбирали пробы раствора (по 0.025 мл) и анализировали на содержание урана  $\alpha$ -радиометрическим методом на приборе 2154-I—IM «Протока».

На основании исходной концентрации урана в растворе и его  $\alpha$ -радиоактивности, а также  $\alpha$ -радиоактивности в каждый момент времени рассчитывали концентрацию урана в растворе в заданное время  $\tau$  ( $C_{p,\tau}$ ), количество сорбированного урана в твердой фазе ( $C_{T,\tau}$ ) и величину коэффици-

ента распределения урана в системе в заданное время ( $K_{d,\tau}$ ) по формулам:

$$C_{p,\tau} = C_{p,исх.} \cdot \frac{J_{p,\tau}}{J_{p,исх.}} \quad (1)$$

$$C_{T,\tau} = \frac{C_{p,исх.} \cdot V}{m} \left( 1 - \frac{J_{p,\tau}}{J_{p,исх.}} \right) \quad (2)$$

$$K_{d,\tau} = \frac{V}{m} \left( \frac{J_{p,исх.}}{J_{p,\tau}} - 1 \right) \quad (3)$$

где  $J_{p,исх.}$  и  $J_{p,\tau}$  — исходная и определенная по истечении заданного времени  $\alpha$ -радиоактивность раствора, имп.;  $C_{p,исх.}$  и  $C_{p,\tau}$  — исходная концентрация урана и концентрация в заданное время в растворе, моль/л;  $V$  — объем раствора, мл;  $m$  — масса сорбента, г.

На основании предварительных данных было установлено, что сорбция урана волокном ФОРПАН после  $\tau=1.4 \cdot 10^4$  с изменяется незначительно. Поэтому, это время считали достаточным для достижения условного равновесия, а полученные величины  $C_p$  и  $C_m$ , принимали за равновесные и обозначали соответственно  $C_{p,\infty}$  и  $C_{m,\infty}$ .

При обработке кинетики сорбции урана исследуемым волокном было установлено, что все полученные кинетические зависимости во всем временном интервале удовлетворительно описываются обобщенным кинетическим уравнением Авраами-Ерофеева-Колмогорова:

$$C_{T,\tau} / C_{T,\infty} = 1 - e^{-k\tau^n} \quad (4)$$

где  $C_{m,\tau}/C_{m,\infty}$  — степень завершения процесса;  $k$  — кажущаяся константа скорости процесса сорбции,  $C^{n\tau}$ ;  $\tau$  — продолжительность эксперимента, с;  $n$  — постоянная, зависящая от условий эксперимента и механизма взаимодействия сорбата с сорбентом.

Результаты опытов представлены в виде зависимостей  $F=f(\tau)$  (рис. 1) [6].

Расчет величин  $k$  и  $n$  производили методом наименьших квадратов из линеаризованных в координатах:

$$\ln[-\ln(1 - C_{T,\tau} / C_{T,\infty})] - \ln \tau \quad (5)$$

кинетических зависимостей, представленных на рис. 2. Следует отметить, что аналогичный подход для обработки экспериментальных результатов кинетики сорбции предлагается авторами работ [4, 7].

Так как величина  $n$  в каждом случае непостоянна, и из-за этого изменяется величина  $k$  ( $c^{-n}$ ), то для удобства дальнейшей обработки и обсуждения экспериментов по сорбции необходимо было рассчитать обобщенные константы скоростей процесса сорбции урана ( $K$ ), имеющие постоянную размерность  $c^{-1}$ , это было сделано с использованием соотношения Саковича [8]:

$$K = n \cdot k^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

$$\ln K = \ln n + \frac{\ln k}{n} \quad (7)$$

Рассчитанные величины  $K$ ,  $k$  и  $n$  приведены в табл. 1.

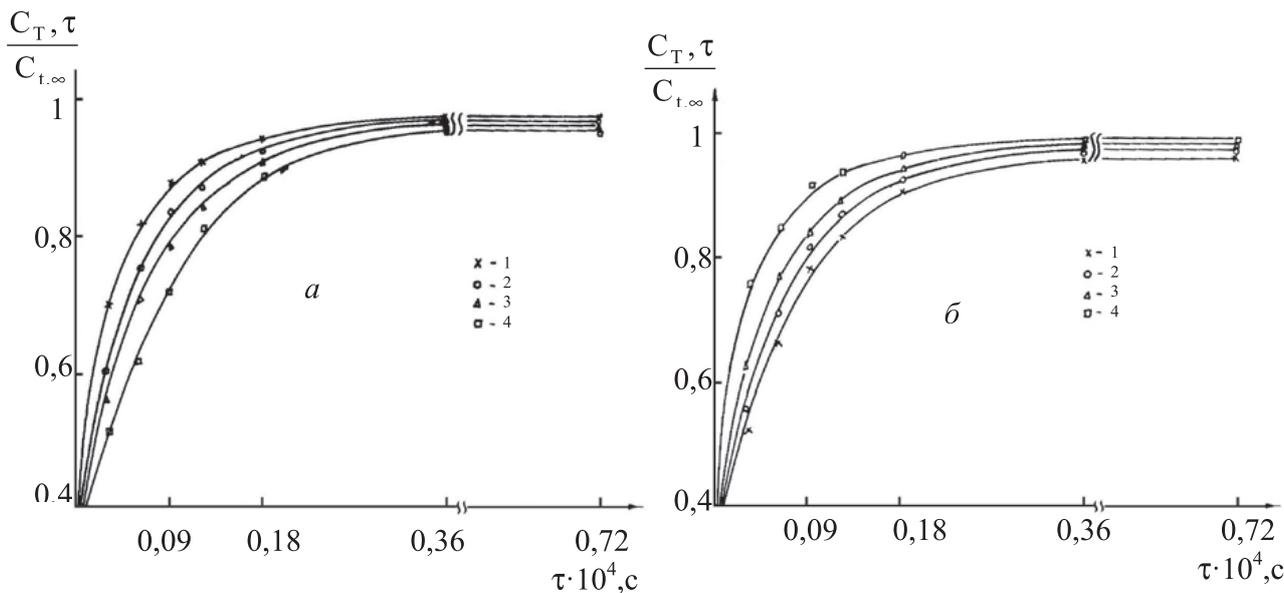
Замечено [8, 9], что при  $n$  равных 0.5 и близких к этому значению, процесс описывается в диффузионной области, т. е. при  $n < 1$ . Величину  $(1-n)$  следует принимать за меру ухода процесса в диффузионную область. Показатели степени  $n > 1$  характерны для реакций, протекающих в кинетической области. Известно [9], что график зависимости  $\ln F \rightarrow \tau$ , где  $F$  — доля сорбированного вещества, при химической реакции должен быть прямой линией, исходящей из начала координат, так как при стремлении  $\tau$  к 0, и величина  $F$  должна стремиться к 0.

**Таблица 1.** Условия и значения  $\ln K$ ,  $\ln k$  и  $n$ , полученные из результатов экспериментов по сорбции урана из карбонатсодержащих растворов типа морской воды волокнистым сорбентом ФОРПАН при pH=7.85

Температура, К	$C_{p, \text{исх}}$ моль/л	$\ln K, c^{-1}$	$\ln k, c^{-n}$	$n$	$n_{\text{ср.}}$
293	-	-6.667	-3.268	0.54	0.64
	$1.15 \cdot 10^{-4}$	-6.529	-3.352	0.62	
	$2.73 \cdot 10^{-4}$	-6.467	-3.994	0.66	
	$7.14 \cdot 10^{-4}$	-6.366	-4.417	0.73	
308	«→»	-6.705	-3.146	0.52	0.58
	«→»	-6.668	-3.328	0.55	
	«→»	-6.562	-3.631	0.60	
	«→»	-6.498	-3.873	0.64	
323	«→»	-6.725	-3.086	0.51	0.57
	«→»	-6.667	-3.268	0.54	
	«→»	-6.579	-3,570	0.59	
	«→»	-6.513	-3.812	0.63	
338	«→»	-6.806	-2.844	0.47	0.55
	«→»	-6.686	-3.207	0.53	
	«→»	-6.596	-3.510	0.58	
	«→»	-6.546	-3.691	0.61	

Из линеаризованных кинетических зависимостей (рис. 2) представленных при разных температурах ( $C_{\text{исх}}=3,36 \cdot 10^{-6}$  моль/л) видно, что полученные нами прямые пересекают ось ординат выше начала координат. Такое явление указывает на то, что в на-

чальный момент времени относительное количество сорбированного вещества значительно больше, чем в следующие моменты, что характерно для диффузионных процессов, а показатели степени, найденные из угла наклона кинетических прямых,



**Рис. 1.** Кинетические зависимости сорбции урана: а) при различных концентрациях его в растворе: 1— $3.36 \cdot 10^{-5}$  М; 2— $1.15 \cdot 10^{-4}$  М; 3— $2.73 \cdot 10^{-4}$  М; 4— $7.23 \cdot 10^{-4}$  М ( $\tau = 308$  К); б) при различных температурах процесса сорбции: 1—293.2 К; 2—308 К; 3—323 К; 4—338 К ( $C_{p, \text{исх.}} = 3.36 \cdot 10^{-5}$  М)

соответствуют значениям  $n \cong 0.5$ , что согласуется с данными табл. 1 и характерны для реакций, протекающих в диффузионной области.

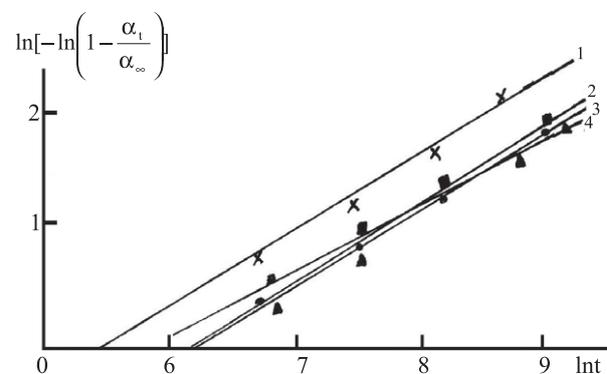
С целью установления общих закономерностей в исследуемом интервале концентраций и температур математической обработкой среднearифметических значений величины  $n$  в виде зависимости  $n=f(T)$ , рассчитано полуэмпирическое уравнение:

$$n_{cp} = (1.1714 \pm 0.44) + (-1.866 \cdot 10^{-3} \pm 1.38 \cdot 10^{-3}) \cdot T, \quad (8)$$

коэффициенты которого оптимально удовлетворяют при любой температуре от 293 до 338 К в исследуемом интервале концентраций, причем вклад «диффузионности» процесса в повышении температуры возрастает. Таким образом, полученные значения в пределах экспериментальных погрешностей соответствуют: при 293 К  $n_{cp} = 0.65$ ; 308 К  $n_{cp} = 0.6$ ; 323 К  $n_{cp} = 0.55$ ; 338 К  $n_{cp} = 0.5$ .

Как известно, характерной особенностью внутридиффузионных процессов на селективных сорбентах наряду со слабой ионизацией функциональных групп и склонностью к процессам комплексообразования, а также при наличии высоких коэффициентов распределения в области микроконцентраций исследуемых ионов на фоне высокоминерализованного солевого состава морской воды, являются низкие значения коэффициентов внутренней диффузии, причем эти значения уменьшаются с увеличением селективности сорбции как

за счет изменения природы функциональных групп ионита, так и за счет изменения природы сорбируемого иона. Так, величина коэффициента диффузии уранил-иона на сульфокатионите составляет  $3.06 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с, на карбоксильном катионите от  $10^{-12}$  до  $1.1 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с, а на фосфорнокислом катионите от  $10^{-11}$  до  $2.3 \cdot 10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с, что отражает специфику внутридиффузионной кинетики на сорбентах данного класса [10, 11]. При исследовании кинетики сорбции на селективных ионитах методом ограниченного объема, при котором вклад внешней диффузии целенаправленно сводится к минимуму за счет интенсивного перемешивания, как правило, реализуется внутридиффузионный процесс.



**Рис. 2.** Линеаризованные кинетические зависимости сорбции урана при различных температурах: 1—293; 2—308; 3—323; 4—338 К ( $C_{p, \text{исх.}} = 3.36 \cdot 10^{-5}$  М)

Аналогично [6], на основании экспериментальных данных, определив значения  $F$  для данного времени контакта сорбента с раствором в интервале температур от 20 до 65 °С, пользуясь таблицей

зависимостей  $Bt$  от  $F$ , рассчитаны коэффициенты стационарной диффузии по уравнению Бойда:

$$D = \frac{Btr^2}{t\pi^2} \quad (9)$$

**Таблица 2.** Средние значения коэффициентов внутренней диффузии ( $D$ , см<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>)

$C_{исх}$	293 К	308 К	323 К	338 К
$3.36 \cdot 10^{-5}$ М	$1.18 \cdot 10^{-11}$	$1.36 \cdot 10^{-11}$	$1.03 \cdot 10^{-11}$	$1.5 \cdot 10^{-11}$
$1.15 \cdot 10^{-5}$ М	$0.66 \cdot 10^{-11}$	$1.58 \cdot 10^{-11}$	$1.6 \cdot 10^{-11}$	$1.18 \cdot 10^{-11}$
$1.73 \cdot 10^{-5}$ М	$0.87 \cdot 10^{-11}$	$1.35 \cdot 10^{-11}$	$1.3 \cdot 10^{-11}$	$1.27 \cdot 10^{-11}$
$7.14 \cdot 10^{-5}$ М	$1.07 \cdot 10^{-11}$	$1.02 \cdot 10^{-11}$	$1.02 \cdot 10^{-11}$	$0.9 \cdot 10^{-11}$

$B$  — кинетический коэффициент,  $r$  — радиус волокна.

Полученные значения характерны для процессов, когда наряду с ионным обменом протекает и комплексообразование. Даже не зная величины радиуса волокна по постоянству величины  $\frac{Bt}{\tau}$  (т. к.  $\frac{r^2}{\pi^2}$  является величиной постоянной) при контакте

сорбента с раствором, можно сделать заключение о том, что скорость поглощения ионов определяется внутренней диффузией, при этом изменение концентрации раствора в ходе опыта не влияет на скорость процесса, что отражено в табл. 3.

**Таблица 3.** Скорость внутридиффузионного процесса

Значения	$C_{p.исх.} = 3.36 \cdot 10^{-5}$ М, T=293 К					
	$Bt$ $\tau, c$	0.068	0.124	0.293	0.300	0.375
$\frac{Bt}{\tau}$	$2.266 \cdot 10^{-4}$	$2.066 \cdot 10^{-4}$	$2.586 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$2.75 \cdot 10^{-4}$	$1.96 \cdot 10^{-4}$

Для связывания обобщенной константы скорости процесса сорбции с исходной концентрацией урана в растворе, математической обработкой методом наименьших квадратов зависимостей  $\ln K$  —

$\ln C_{p.исх.}$  получены уравнения вида:  $\ln K = a + b \ln C_{p.исх.}$  для всех исследуемых концентраций при каждой исходной температуре (табл. 4).

**Таблица 4.** Значения параметров уравнения  $\ln K = a + b \ln C_{p.исх.}$  в интервале исследованных концентраций для отдельной исходной температуры

T, К	$\ln C_{po}$	a	b
293	-10.301 -9.071 -8.206 -7.248	-5.6664	0.0969
308	«↔»	-5.9934	0.0700
323	«↔»	-6.0013	0.0686
338	«↔»	-5.9742	0.0873

Дальнейшей математической обработкой параметров табл. 4 получено обобщенное полуэмпирическое уравнение:

$$\ln K = (-5,9103 \pm 0.25) + (0.081 \pm 0.022) \ln C_{p, \text{исх.}} \quad (10)$$

позволяющее рассчитать константу скорости процесса сорбции урана волокном ФОРПАН из карбонатсодержащих растворов типа морской воды с pH=7.85 в широком интервале исследуемых концентраций для любой температуры от 20 до 65 °С.

Аналогичным образом обработанные экспериментальные данные по зависимости константы скорости процесса сорбции урана от температуры в исследуемом интервале концентрации, представлены на рис. 3 в виде общей температурной зависимости обобщенной константы скорости процесса сорбции урана. Выражая скорость процесса сорбции через термодинамические характеристики переходного состояния, с помощью уравнения вида:

$$\ln K = C - d/T, \quad (11)$$

где  $C$  и  $d$  — постоянные, характеризующие соответственно энтропию и энтальпию активации процесса сорбции, нами была определена энергия Гиббса процесса активации ( $\Delta G^*$ ). В табл. 5 пред-

ставлены параметры уравнения (11), полученные математической обработкой температурных зависимостей константы скорости методом наименьших квадратов и рассчитанные на их основе стандартные энтальпия ( $\Delta H^*$ ), энтропия ( $\Delta S^*$ ) и энергия Гиббса ( $\Delta G^*$ ) процесса активации с помощью известных соотношений:

$$\ln K = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (12)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (13)$$

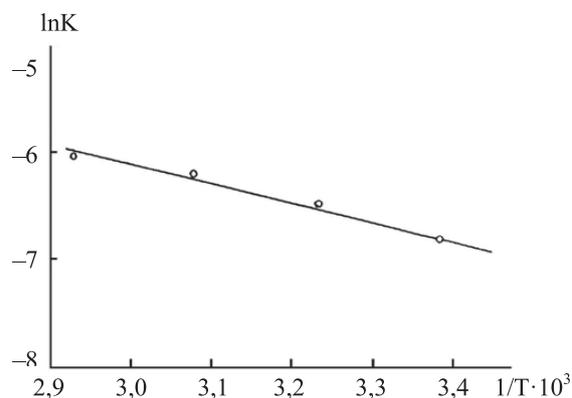


Рис. 3. Температурная зависимость обобщенной константы скорости реакции сорбции урана волокном «ФОРПАН»

Таблица 5. Значения параметров уравнения  $\ln K = C - d/T$ ; энтропия ( $\Delta S^*$ ), энтальпия ( $\Delta H^*$ ) и энергия активации ( $\Delta G^*$ ) процесса сорбции урана волокном ФОРПАН для каждой исходной концентрации в интервале температур от 25 до 65 °С

$C_{p, \text{исх.}}, \text{M}$	$T, \text{K}$	$C$	$D, \text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	$\Delta S^*, \text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$	$\Delta H^*, \text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$	$\Delta G^*, \text{КДж} \cdot \text{моль}^{-1}$
$3.36 \cdot 10^{-5}$	293 308 323 338	-6.543	270.8	-59.4	2259.9	18.5
$1.15 \cdot 10^{-4}$	«→»	-7.646	320.5	-65.3	2674.8	21.6
$1.73 \cdot 10^{-4}$	«→»	-7.361	255.6	-61.2	2125.2	20.6
$7.13 \cdot 10^{-4}$	«→»	-7.619	358.4	-63.5	2990.7	21.9

Как видно из табл. 5, значения  $C$  и  $d$ , характеризующие соответственно энтропию и энтальпию активации процесса сорбции, практически незначительно изменяются в интервале исходных концентраций.

На основе значений  $C$  и  $d$  (табл. 5) математической обработкой рассчитано обобщенное уравнение скорости процесса сорбции урана:

$$\ln K = (-7.29 \pm 0.80) - (220.576 \pm 74) / T \quad (14)$$

**Таблица 6.** Значения параметров обобщенного уравнения  $\ln K = C - d/T$  и рассчитанные на их основе энтропия, энтальпия и энергия активации процесса сорбции урана

$C_{p, \text{исх.}}$ , М	$C$	$d$ , град·с <sup>-1</sup>	$\Delta S^*$ , Дж·моль <sup>-1</sup> ·град <sup>-1</sup>	$\Delta H^*$ , Дж·моль <sup>-1</sup>	$\Delta G^*$ , КДж·моль <sup>-1</sup>
$3.36 \cdot 10^{-5}$	$-7.28 \pm 0,80$	$220.576 \pm 74$	$-60.857$	$1835.8$	$19.98$
$1.15 \cdot 10^{-4}$					
$1.73 \cdot 10^{-4}$					
$7.13 \cdot 10^{-4}$					

Полученное обобщенное уравнение (14) позволяет рассчитать скорость процесса сорбции урана волокнистым сорбентом ФОРПАН из модельных растворов морской воды с рН=7.85 в широком интервале температур (от 20 до 65 °С) и исходных концентраций, а рассчитанная энергия активации процесса сорбции урана в этих условиях оказалась равной 19.9 кДж/моль, т. е. ниже значений, свойственных хемосорбционным процессам (50—80 кДж/моль), и характерно для ионного обмена, что указывает на малую величину потенциального барьера реакции сорбции урана волокном ФОРПАН.

На основании исследования основных закономерностей кинетики сорбции урана волокном ФОРПАН можно сделать следующие выводы:

С целью выявления оптимальных условий установления общих закономерностей процесса изучена кинетика сорбции из модельных растворов типа морской воды с исходными концентрациями урана ( $3.33 \cdot 10^{-5}$ — $4.1 \cdot 10^{-4}$  моль/л) при рН 7.78, в температурном интервале от 20 до 65 °С.

Получено обобщенное полуэмпирическое уравнение, рассчитывающее значение  $n_{cp}$  для любой температуры от 20 до 65 °С в широком интервале исследуемых концентраций. Значения  $n=0.5$  и близкие к ним, свидетельствуют о том, что процесс сорбции протекает по внутридиффузионному механизму, что также подтверждается низкими значениями ( $n=10^{-11}$  см<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>) коэффициентов внутренней диффузии, полученными в интервале температур от 20 до 65 °С.

На основании зависимостей обобщенной константы скорости ( $\ln K - C_{p, \text{исх}}$  для каждой отдельной температуры, а также  $\ln K - 1/T$  для каждой исходной концентрации) математической обработкой методом наименьших квадратов рассчитаны полуэмпирические обобщенные уравнения  $\ln K = a + b \ln n_{p, \text{исх}}$  и  $\ln K = C - d/T$  для любой температуры от 20 до 65 °С в интервале исходных концентраций.

Энергия активации в исследуемых нами условиях оказалось ~19.9 кДж·моль<sup>-1</sup>, что указывает на малую величину потенциального барьера реакции и на малую энергию активации внутренней диффузии процесса сорбции урана из карбонатсодержащих растворов волокном «ФОРПАН».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мясоедова Г. В. // Росс. хим. журнал. 2005. Т. 49. № 2. С. 72.
2. Медведев В. П., Величко Б. А., Лихачева О. В. // Радиохимия. 2003. Т. 45. № 6. С. 549.
3. Сенявин М. М., Рубинштейн Р. Н., Комарова И. В. и др. Теоретические основы деминерализаций пресных вод. М.: Наука, 1975. С. 3—184.
4. Мясоедов Г. Ф., Новиков Ю. П., Мамедов Р. М. и др. // Радиохимия. 1984. Т. 26. № 5. С. 597.
5. Рагимли М. А., Нуриев А. Н., Эфендиева Ш. З. и др. // Азерб. хим. журнал. 2011. № 2. С. 23.
6. Крылов О. Т., Новиков П. Д. // ЖФХ. 1979. № 5. С. 1267—1268.
7. Нуриев А. Н., Акперов Г. А., Мамедов Р. М. и др. // Радиохимия. 1998. Т. 40. № 3. С. 256—258.
8. Сакович Г. В. // Ученые записки Томского гос-го ун-та им. В. В. Куйбышева. 1955. № 26. С. 103—110.

9. Павлюченко М.М., Лазерко Г. А. //ЖФХ. 1970. Т. 44. Вып. 1. № 4 С. 1062.

10. Параманов В. И., Акопов Г. А., Кочеткова Л. А. // Радиохимия. 1967. Т. 9. № 6. С. 642—652.

11. Чувелева Э. А., Юфрякова К. Н., Назаров П. П. и др. //ЖФХ. 1972. Т. 46. № 5. С. 1147—1150.

---

*Ragimli Menzer Akhmed* — Cand. Sci. (Chem.), Senior Research Fellow, Institute of Chemical Problems named after acad. M. F. Nagiyev of Azerbaijan National Academy of Sciences; e-mail: iradam@rambler.ru

*Nuriyev Ali Najafgulu* — Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences Azerbaijan, Head of Laboratory, Institute of Chemical Problems named after acad. M. F. Nagiyev of Azerbaijan National Academy of Sciences. e-mail: iradam@rambler.ru