

**Т.В. Мальцева, А.В. Пальчик, Е.О. Куделко,
С.Л. Василюк, К.А. Каздобин**

**ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ
ГИДРАТИРОВАННЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ZrO_2
НА ВЕЛИЧИНУ ИОННОЙ ПРОВОДИМОСТИ**

Институт общей и неорганической химии
им. В.И. Вернадского НАН Украины, г. Киев
maltseva@ionc.kiev.ua

Измерена предельная ионная проводимость в дистиллированной воде гидратированных соединений на основе ZrO_2 , содержащих в качестве второго компонента фосфат циркония, фосфат циркония и фосфомолибденовую кислоту, а также гидратированный оксид алюминия, в максимально насыщенной ионной форме после поглощения ионов $Cu(II)$. Величина проводимости ионообменных материалов составляет 0,01 – 0,07 См м⁻¹. Сопоставлены величины ионной проводимости, а также миграционной подвижности адсорбированных ионов $Cu(II)$ со свойствами поверхности гидратированных соединений (заряд, объем пор, радиус пор). Показано, что ионная проводимость и подвижность адсорбированных ионов возрастают с уменьшением радиуса пор неорганических полимеров.

Ключевые слова: гидратированный оксид циркония, ионный обмен, ионный перенос, проводимость, радиус пор.

Введение. Для создания непрерывных градиентно-управляемых процессов целевой очистки разбавленных водных растворов от различных ионов [1–3] необходимы ионообменные материалы (ИОМ) с высокой селективностью, проводимостью и обратимостью. В этой связи изучение возможности применения оксигидратных ИОМ в качестве селективной транспортной среды достаточно актуально.

Высокие скорости переноса противоионов в оксигидратных соединениях, получаемых, например, с использованием золь-гель метода, обусловлены тем, что процесс протекает преимущественно в межзерненном пространстве, содержащем значительное количество легко-

© Т.В. Мальцева, А.В. Пальчик, Е.О. Куделко, С.Л. Василюк, К.А. Каздобин, 2015

подвижных молекул воды. Согласно квантово-механическим расчетам [4] внедрение молекул воды между противоионом и фиксированным ионом ионообменного материала существенно снижает энергию связи обменивающегося иона, и его подвижность увеличивается минимум в четыре раза. К структурно-химическим характеристикам поверхности неорганических гидратированных соединений, влияющим на избирательность поглощения и скорость переноса адсорбированных ионов, можно отнести знак и величину заряда полииона оксидной матрицы, концентрацию структурно связанной воды, величину удельной поверхности, приходящуюся на мезо- и макропоры (так называемую "внешнюю"), а также объем и преобладающий радиус пор. Актуально создание неорганических полимерных материалов с оптимальными свойствами поверхности, обеспечивающих высокую проводимость по извлекаемому иону при сохранении селективности извлечения. Двойные гидратированные соединения на основе ZrO_2 характеризуются достаточно высокой селективностью извлечения: оксидные – по отношению к многозарядным катионам, проявляющим сродство к кислороду поверхностных гидроксильных групп оксида, а также по отношению к многозарядным анионам [5]; содержащие фосфат-ионы – по отношению к многозарядным катионам и ионам цезия [2].

Цель данной работы – определение критериев применимости ионообменных материалов в процессах электродеионизации разбавленных растворов. Для этого величины эффективной ионной проводимости и подвижности адсорбированных ионов $Cu(II)$ сопоставлены со структурно-химическими характеристиками поверхности неорганических гидратированных соединений на основе ZrO_2 , такими, как поверхностный заряд полииона неорганической матрицы, объем и радиус пор.

Методика эксперимента. Объектами исследования выбраны двойные оксигидраты на основе ZrO_2 , содержащие в качестве второго компонента фосфатные группы в соотношении $Zr:P = 1,4$ ($Zr-Ph-1$) [6] и $0,6$ ($Zr-Ph-2$) [7]; фосфатные группы в соотношении $Zr:P = 0,6$ и фосфоромолибденовую кислоту (ФМК) в количестве 30 мг/г ($Zr-Ph-3$) [7]. Ионообменный полимер $Zr-Ph-1$ на основе оксифосфата циркония синтезировали по методике, предполагающей увеличение преобладающего размера пор до 5 нм и более. Аналогичное сопоставление свойств проведено для оксигидратов состава $Zr_xAl_{1-x}O_y \cdot nH_2O$ [5]. Внешнюю удельную поверхность $S_{вн}$ и параметры пористой структуры ионо-

обменных материалов рассчитывали из данных, полученных методом термической десорбции азота (ТДА) с помощью прибора Autosorb-6-B (США). Перед измерением адсорбции и десорбции азота образцы активировали в токе азота при 150÷190°С в течение двух часов. Концентрацию структурно связанной воды определяли из дериватограмм, снятых на приборе Derivatograph Q-1500 DPaulik&Paulik (Венгрия), в режиме нагрева печи 5°С/мин. Концентрацию обменных поверхностных групп рассчитывали из максимальной величины поглощения Pb^{2+} с учетом коэффициента стехиометрии обмена ионов гидроксония.

Сопротивление гранул ИОМ (фракция 0,2 – 0,5 мм) измеряли в ячейке конденсаторного типа с титан-платинированными электродами площадью по 2 см², находящимися на расстоянии 1 см, на переменном токе в диапазоне частот 10²÷10⁵ Гц в присутствии раствора. Для этого снимали спектры импеданса на электрохимическом модуле PGSTAT302N Metrohm Autolab.

Зависимость проводимости ИОМ от проводимости раствора $CuCl_2$ экстраполировали на ось ординат и получали предельное значение проводимости ИОМ. Величину подвижности адсорбированных катионов \bar{u}_i рассчитывали из общего уравнения электропроводности с учетом вклада ионов гидроксония. Сначала измеряли проводимость оксигидратов после синтеза и отмытки от адсорбированных при синтезе катионов в 2 М HNO_3 и дистиллированной воде, после чего, с учетом общей объемной концентрации катионообменных центров X_H , определяли подвижность ионов гидроксония в фазе оксигидрата u_H , м²·В⁻¹·с⁻¹ следующим образом:

$$\bar{u}_H = \sigma_H (F \cdot X_H \cdot 0,6)^{-1}, \quad (1)$$

где σ_H – проводимость оксигидрата (предельное значение), См·м⁻¹; F – постоянная Фарадея, Кл·моль⁻¹; 0,6 – коэффициент заполнения объема твердой фазой, принятый для шарообразных частиц.

Затем рассчитывали величину \bar{u}_i по формуле

$$\bar{u}_i = (\sigma_i F^{-1} - \bar{u}_H (X_H - X_i)) \cdot (0,6 \cdot z^{-1} X_i)^{-1}, \quad (2)$$

где σ_i – проводимость оксигидрата после адсорбции ионов из концентрированного раствора $CuCl_2$; z – заряд адсорбирующегося иона;

X_i – объемная концентрация центров, занятых ионами данного вида i , моль·м⁻³, определяемая в виде

$$X_i = A \cdot p. \quad (3)$$

Здесь A – количество поглощенных катионов, моль · г⁻¹; p – насыпная плотность оксигидрата, г · см⁻³.

При изучении миграционного переноса адсорбированных ионов Cu(II) ионообменный материал предварительно насыщали ионами из 0,25 М раствора CuCl₂, затем многократно промывали дистиллированной водой. Гранулы ионообменного материала помещали в центральную секцию электродеионизационной ячейки и пропускали раствор CuCl₂ с концентрацией 1·10⁻⁵; 1·10⁻³; 2·10⁻³; 4·10⁻³ М при линейной скорости 0,014 см·с⁻¹. Выбранная величина скорости пропускания раствора находится в соотношении к скорости ионного обмена, обеспечивающем достаточно высокую остаточную концентрацию ионов меди в растворе, поскольку задачей исследования являлось определение величины миграционной подвижности адсорбированных ионов, а не полное извлечение ионов из раствора. Плотность тока изменяли в диапазоне 2,3÷11,0 А·м⁻², что соответствовало токовой нагрузке на ячейке 5 – 25 мА. Величину миграционного потока ионов рассчитывали на основании снижения концентрации ионов в растворе, которую определяли атомно-адсорбционным методом.

Выход по току (η , %) определяли по уравнению

$$\eta = N_i \cdot z_i \cdot S_j \cdot F \cdot 100 / I, \quad (4)$$

где N_i – величина удельного потока ионов в катодную секцию электродеионизационной ячейки, моль · с⁻¹ · м⁻²; z_i – заряд иона Cu(II); S_j – площадь электрода, м²; I – величина тока на ячейке, А.

Градиент электрического потенциала в слое ионообменного материала рассчитывали следующим образом:

$$\text{grad } \phi = (U - U_{er} - U_{mb} - U_{el}) / l, \quad (5)$$

где $\text{grad } \phi$ – градиент потенциала через слой оксигидрата, В·м⁻¹; U – напряжение на ячейке; U_{er} – снижение напряжения, связанное с протеканием электродных реакций; U_{mb} , U_{el} – снижение напряжения на

мембранах и в электролите, V ; l – толщина центральной камеры ячейки, м.

При расчете градиента электрического потенциала в слое частиц исследуемых соединений из величины напряжения на ячейке вычитали потенциал электродных реакций и отдельно измеренную величину снижения напряжения в электродных камерах и на мембранах, что составляло $< 0,1$ В. Это обусловлено, по-видимому, высокой проводимостью ионообменных мембран ("Нафион-117").

Энергозатраты на извлечение 1 г металла рассчитывали как

$$W = I \cdot U \cdot (\Theta \cdot N_i \cdot S)^{-1}, \quad (6)$$

где W – энергозатраты, Вт · с; Θ – химический эквивалент ионов Cu(II).

Миграционную подвижность ионов Cu(II) определяли с использованием уравнения [1]

$$N_i = z_i X_i \bar{u}_i \cdot \text{grad } \phi. \quad (7)$$

Эффективную проводимость центральной секции электродеионизационной ячейки, содержащей неорганический полимер и пропускаемый раствор, находили из напряжения на ячейке при минимальной величине тока за вычетом затрат напряжения на электродную реакцию.

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 приведены величины максимальной адсорбции ионов Pb(II) и коэффициента стехиометрии обмена ионов гидроксония при поглощении ионов Pb(II) из раствора Pb(NO₃)₂, внешней удельной поверхности, концентрации поверхностных групп, а также преобладающего (r_1) и среднего (r_2) радиусов неорганических полимеров.

По данным термогравиметрии, содержание структурной воды в ионообменных материалах составляет от 2,3 до 3,5 молекул в пересчете на 1 структурную единицу полимера. Заряд поверхности материалов, содержащих фосфат Zr(IV), является отрицательным, т.е. они проявляют катионообменные свойства в разбавленных растворах с нейтральным значением pH.

Неорганические соединения, содержащие фосфатные группы, характеризуются более заметными катионообменными свойствами по сравнению с оксигидратными (ZrO₂ · n H₂O, Zr_{0,7}Al_{0,3}O _{y} · n H₂O), что выражается в более высоких значениях величины k .

В соответствии с рН депротонирования поверхностных групп исследуемых соединений, при поглощении ионов Pb(II) из раствора Pb(NO₃)₂, только оксигидраты обладают выраженной анионообменной функцией, что подтверждается нулевой величиной коэффициента стехиометрии обмена ионов гидроксония, т.е. эквивалентностью обмена катионов и анионов.

Причиной слишком низкого значения величины удельной поверхности для образца Zr–Ph–3, вероятно, является вода, адсорбированная в порах ИОМ и связанная с хемосорбированной и структурной водой. Возможно, для полного удаления такой воды требуется более высокая температура, чем 150–190 °С. Преобладающая величина радиуса пор в указанных материалах изменяется от 0,8 до 6,3 нм.

На рис. 1 приведены зависимости дифференциального объема пор от их радиуса в ионообменных материалах. Среди изученных соединений максимальным объемом пор с радиусом до 2 нм обладают гидратированный диоксид циркония (ZrO₂·nH₂O) и двойной оксигидрат Zr_{0,7}Al_{0,3}O_y·nH₂O. Для ZrO₂·nH₂O характерен большой объем пор в широком диапазоне величин радиусов, а двойной оксигидрат циркония в основном содержит поры радиусом до 2,1 нм.

В структуре поверхности оксифосфата циркония Zr–Ph–1 преобладают мезопоры. При частичном фосфатировании оксигидрата циркония заполнение поверхности происходит главным образом за счет пор в диапазоне радиусов 1 – 2 нм (см. рис. 1, а). Дальнейшее фосфатирование оксигидрата циркония (см. рис. 1, б) приводит к резкому уменьшению общего объема пор и величины удельной поверхности (см. табл. 1), а модифицирование поверхностных групп фосфоромолибденовой кислотой несколько увеличивает объем пор за счет увеличения объема микропор.

В табл. 2 приведены величины объемной концентрации ионов, предельные значения удельной проводимости в дистиллированной воде и рассчитанные по (1) и (2) величины эффективной подвижности ионов гидроксония и адсорбированных ионов.

Таблица 1. Характеристики поверхности неорганических полимеров

ИОМ	Полицион матрицы	$A_{\text{max}}, \text{Pb}(\text{II}), \text{Mг}^{-1}$	$k, \text{M/M}$	$S_{\text{нар}}, \text{M}^2 \cdot \text{г}^{-1}$	$N_{\text{HM}}^{\text{sp}}, \text{HM}^{-2}$	r_1, r_2, HM
$\text{ZrO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	$[\text{ZrO}_2 \cdot 2,7\text{H}_2\text{O}]_n^0$	0,37	0	52	9	1,7; 3,5
Zr-Ph-1	$[\text{ZrO}_2 \cdot \text{Zr}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4,6\text{H}_2\text{O}]_n^{2-}$	0,4	1,2	110	5	6,3; 13,2
Zr-Ph-2	$[\text{Zr}(\text{PO}_4)_2 \cdot 3,3\text{H}_2\text{O}]_n^{2-}$	0,45	1,8	44	16	1,5; < 0,8
Zr-Ph-3	$[\text{Zr}(\text{PO}_4)_2 \cdot 3,3\text{H}_2\text{O}]_n^{2-}$ $[\text{Zr}(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Zr}(\text{PMO}_{12}\text{O}_{40}) \cdot 5,8\text{H}_2\text{O}]_n^{4-}$	0,42	1,7	(4)	(150)	1,7; 1,6
$\text{Zr}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{O}_y \cdot n\text{H}_2\text{O}$	$[\text{Zr}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{O}_y \cdot 3,1\text{H}_2\text{O}]_n^0$	0,27	0	253	3	0,8; 1,1

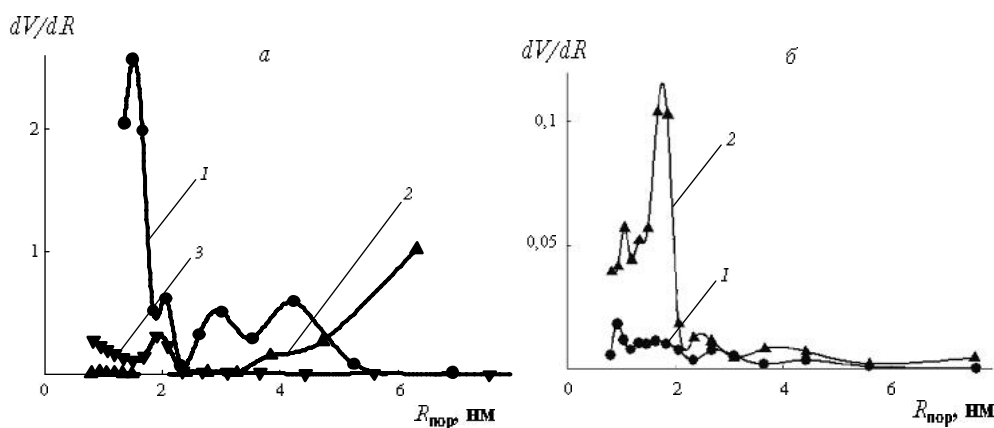


Рис. 1. Распределение пор по радиусам в оксигидратных (а) и фосфатированных (б) гидратированных соединениях на основе ZrO_2 , а: 1 – ZrO_2 , 2 – $Zr-Ph-1$, 3 – $Zr_{0,7}Al_{0,3}O_y \cdot nH_2O$; б: 1 – $Zr-Ph-2$, 2 – $Zr-Ph-3$.

Таблица 2. Объемная концентрация ионов, эффективные удельная проводимость и подвижность ионов в ионообменных материалах

ИОМ	Ион	X , моль · см ³	σ , Сммм ⁻¹	$\bar{u} \cdot 10^{-9}$, м ² · В ⁻¹ · с ⁻¹
$ZrO_2 \cdot nH_2O$	H_3O^+	0,83	0,022	0,3
	Cu(II)	0,35	0,014	0,2
Zr-Ph-1	H_3O^+	0,64	0,007	0,2
	Cu (II)	0,26	0,003	<0,1
Zr-Ph-2	H_3O^+	0,72	0,042	1,0
	Cu(II)	0,28	0,027	0,4
Zr-Ph-3	H_3O^+	0,72	0,035	0,8
	Cu (II)	0,25	0,033	0,5
$Zr_{0,7}Al_{0,3}O_y \cdot nH_2O$	H_3O^+	0,53	0,023	1,1
	Cu(II)	0,18	0,068	3,7

При фосфатировании оксигидрата циркония и повышении концентрации фосфатных групп величина ионной проводимости возрастает как для исходной формы (H_3O^+), так и после поглощения ионов. При этом проводимость протонной формы увеличивается приблизительно в три раза, катион-насыщенной формы – незначительно. Доля

проводимости, приходящаяся на протоны, для ионообменных материалов, содержащих фосфат циркония, составляет не менее 40 % по отношению к общей величине проводимости. Следовательно, выход по току адсорбированных ионов при использовании этих ИОМ в сильноразбавленных растворах не может превышать 40 % даже при высоких степенях заполнения адсорбционной емкости поглощенными ионами.

На рис. 2 представлены зависимости напряжения от величины тока на ячейке при пропускании раствора CuCl_2 различной концентрации сквозь центральную секцию электродеионизационной ячейки, содержащую в качестве ионообменной транспортной среды фосфат циркония Zr–Ph–2.

Из величины напряжения при минимальной плотности тока рассчитана эффективная проводимость центральной секции электродеионизационной ячейки, содержащей неорганический полимер и пропускаемый раствор. Зависимости эффективной проводимости неорганических полимеров $\text{Zr}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{O}_y \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и Zr–Ph–2 от концентрации пропускаемого раствора показаны на рис. 3.

Из сопоставления величин предельной проводимости материалов в дистиллированной воде и проводимости раствора CuCl_2 (см. табл. 2, рис. 3) следует, что в выбранном диапазоне концентраций раствора ($1 \cdot 10^{-5} \div 4 \cdot 10^{-3}$ М) наиболее эффективной ионообменной средой для переноса извлекаемых ионов будут служить неорганические полимеры Zr–Ph–2, Zr–Ph–3 и $\text{Zr}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{O}_y \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

В табл. 3 приведены результаты экспериментов по миграционному переносу ионов Cu(II) с применением неорганических полимеров Zr–Ph–2 и $\text{Zr}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{O}_y \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Таблица 3. Удельный ток, напряжение, градиент потенциала, выход по току, энергозатраты ($I = 15$ мА) и миграционная подвижность ионов Cu(II)

ИОМ, р-р	$d N \cdot 10^4$, моль·с ⁻¹ ·м ⁻²	U, В	grad ϕ	η , %	W , Вт·ч	$\bar{u} \cdot 10^{-9}$, м ² ·В ⁻¹ ·с ⁻¹
Zr–Ph–2, $2 \cdot 10^{-3}$ М	0,6	9,1	1042	16	99	0,2
Zr–Ph–2, $4 \cdot 10^{-3}$ М	3,1	6,6	686	80	14	1,5
$\text{Zr}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{O}_y \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $4 \cdot 10^{-3}$ М	2,7	3,7	271	70	9	6,6

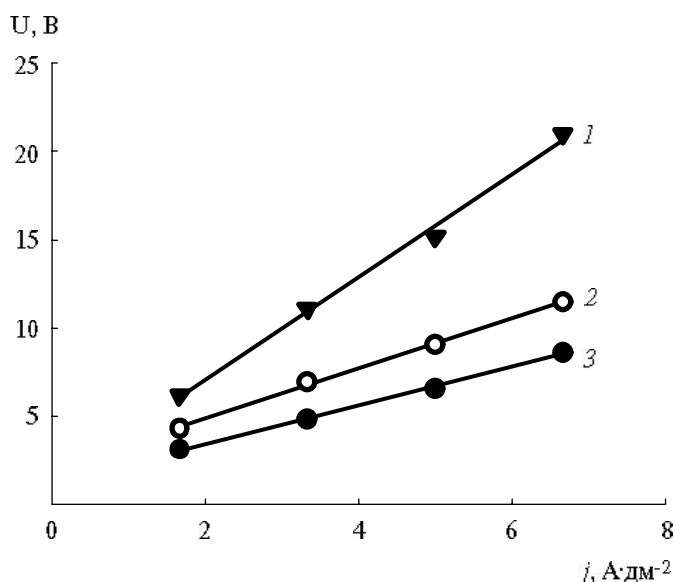


Рис. 2. Зависимость напряжения U от плотности тока j на ячейке для $Zr - Ph - 2$ при пропускании раствора $CuCl_2$ с концентрацией, M : $1 \cdot 10^{-5}$ (1); $2 \cdot 10^{-3}$ (2); $4 \cdot 10^{-3}$ (3).

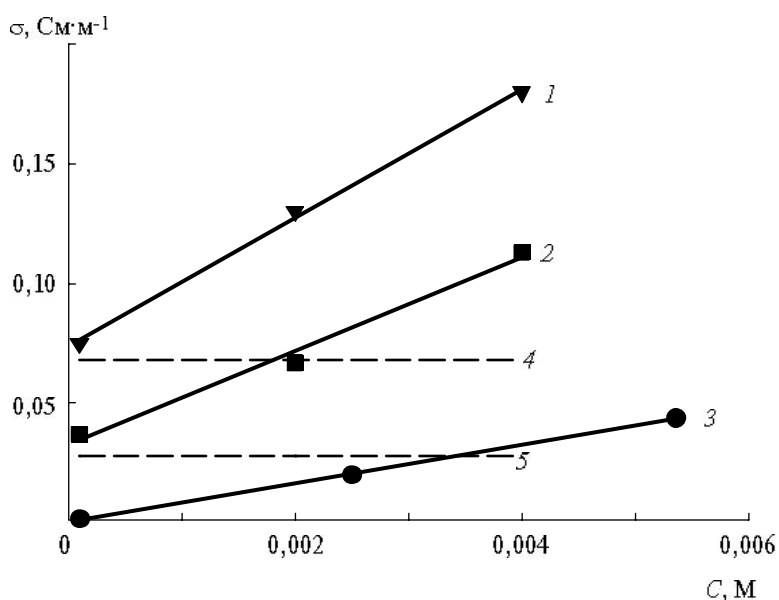


Рис. 3. Зависимость эффективной проводимости $Zr_{0,7}Al_{0,3}O_y \cdot nH_2O$ (1), $Zr - Ph - 2$ (2) и раствора $CuCl_2$ (3) от концентрации последнего. Пунктиром показаны величины предельной проводимости полимеров $Zr_{0,7}Al_{0,3}O_y \cdot nH_2O$ (4) и $Zr - Ph - 2$ (5) в дистиллированной воде.

Из полученных данных следует, что наиболее значимым фактором, определяющим выход по току и энергозатраты на электроперенос адсорбированных ионов в исследуемых материалах в электродеионизационном процессе является концентрация извлекаемых ионов в растворе, поскольку объемная доля последнего в объеме ячейки и грануле значительна. Степень извлечения ионов в экспериментах по электродеионизации составляет 30 – 50 % при исходной концентрации извлекаемого иона $\approx 10^{-3}$ М. Однако, даже при остаточных концентрациях $< 10^{-5}$ М, когда выходы по току заметно снижаются (см. табл. 3), энергозатраты на извлечение ионов составляют ~ 1 кВт · ч/кг, что свидетельствует об экономичности и перспективности метода электродеионизации.

Все рассмотренные материалы относятся к классу неорганических гидратов, обладающих высокой протонной проводимостью [8]. Эта проводимость осуществляется по "жестким" ионным каналам, в которых структурно связанная вода образует сетку водородных связей. Показано [9], что ионы металлов движутся по системе водородных связей, используя гидроксильные группы в качестве гидратных оболочек. При этом перенос ионов происходит в безактивационном режиме [10].

Выводы. Увеличение размера пор (переход от ионообменных материалов с преобладающим радиусом пор в диапазоне до 2 нм к оксифосфату Zr–Ph–1 со средним размером пор 6,3 нм) приводит к уменьшению как ионной проводимости, так и подвижности ионов.

Представлен ряд гидратированных соединений с общей базовой структурой оксидного каркаса (ZrO_2) и различной степенью химического модифицирования поверхностных фрагментов Zr – OH путем добавления оксидов элементов, характеризующихся более высокой по сравнению с ZrO_2 концентрацией структурной воды. Подвижность ионов в пористых системах с уменьшением диаметра пор обычно снижается, особенно при приближении размера пор к размеру адсорбированного иона. Так как в данном случае преобладающий радиус пор, определяющий радиус поверхностных структурных фрагментов исследуемых ИОМ, намного превышает размер адсорбированного иона, наиболее вероятным является влияние этой величины на концентрацию хемосорбированной воды, обуславливающей высокую подвижность адсорбированных ионов. Степень гидратации структурного фрагмента поры будет играть определяющую роль в величине подвижности адсорбированного иона.

Полученные данные можно объяснить тем, что существует оптимальный размер поры, обуславливающий как высокую избирательность поглощения данного иона, так и достаточную степень гидратации для осуществления быстрого переноса. Изменение размера пор сверх этой величины, оптимальной для подвижности иона, приводит к возрастанию доли разбавленного раствора относительно доли хемосорбированной воды, содержащей поверхностно сконцентрированные ионы, что способствует уменьшению их проводимости и подвижности.

Таким образом, уменьшение ионной проводимости и подвижности ионов при переходе от ИОМ с преобладающим радиусом пор в диапазоне до 2 нм к оксифосфату $Zr - Ph - 1$ со средним размером пор 6,3 нм связано с уменьшением вклада переноса ионов по ионным каналам и переходу к переносу через раствор. С увеличением радиуса пор объемная концентрация хемосорбированной (ионизированной) воды в порах снижается, и величины подвижности ионов в этом случае относятся не к концентрированной по ионам части водной границы раздела, а к разбавленному поровому раствору.

Резюме. Виміряна гранична іонна провідність в дистильованій воді гідратованих сполук на основі ZrO_2 , що містять в якості другого компонента фосфат цирконію, фосфат цирконію і фосфомолібденову кислоту, а також гідратований оксид алюмінію, в максимально насиченій іонній формі після поглинання іонів $Cu(II)$. Величина провідності матеріалів становить 0,01 – 0,07 $См м^{-1}$. Проведено зіставлення величини іонної провідності, а також міграційної рухливості адсорбованих іонів $Cu(II)$ з властивостями поверхні гідратованих сполук (заряд, об'єм пор, радіус пор). Показано, що іонна провідність і рухливість адсорбованих іонів зростають із зменшенням радіусу пор неорганічних полімерів.

T.V. Maltseva, A.V. Pal'chik, E.O. Kudelko, S.L. Vasylyuk, K.A. Kazdobin

EFFECT OF THE SURFACE PROPERTIES OF HYDRATED COMPOUNDS BASED ON ZrO_2 ON THEIR IONIC CONDUCTIVITY

Summary

The limiting ionic conductivity in distilled water was measured for hydrated compounds based on ZrO_2 , containing as the second component the zirconium

phosphate, zirconium phosphate together with phosphomolybdic acid as well as hydrated alumina for the maximum saturated ionic form after absorption of Cu(II) ions. The conductivity of materials is 0,01 – 0,07 Sm⁻¹. A comparison of the ionic conductivity, as well as migration mobility of the Cu(II) ions adsorbed, with surface properties of the hydrated compounds (charge, pore volume, pore radius) was evaluated. It is shown that the ionic conductivity and mobility of adsorbed ions increases with decreasing of pore radii in inorganic polymers.

Список использованной литературы

- [1] *Spoor P.B., Koene L., ter Veen W.R., Janssen L.J.J.* // Chem. Eng. J. – 2002. – **85**. – P. 127–135.
- [2] *Kotvitskiy A.G., Maltseva T.V., Belyakov V.N.* // Separ. and Purif. Technol. – 2005. – **41**, N 3. – P. 329–334.
- [3] *Rozhdestvenska L.M., Dzyazko Y.S., Belyakov V.N.* // Desalination. – 2006. – **198**. – P. 247–255.
- [4] *Шапошник В.А.* // Соросовский образовател. журн. – 1999. – № 2. – С. 71–77.
- [5] *Maltseva T.V., Kudelko E.O., Belyakov V.N.* // Russ. J. Phys. Chem., A. – 2009. – **83**, N 13. – P. 2336–2339.
- [6] *Мальцева Т.В., Котвицкий А.Г., Пальчик А.В., Беляков В.Н.* // Укр. хим. журн. – 2004. – **70**, № 10. – С. 81 – 84.
- [7] *Мальцева Т.В., Котвицкий А.Г., Василюк С.Л.* // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2005. – **3**, №4. – С. 933–943.
- [8] *Ярославцев А.Б.* // Успехи химии. – 1994. – **63**, №5. – С. 449–455.
- [9] *Grevillot G., Dziaż'ko J., Kazdobin K., Belyakov V.* // J. Solid State Electrochem. – 1999. – **3**, N 2. – P. 111–116.
- [10] *Kazdobin K.* // In Modern Tools and Methods of Water Treatment for Improving Living Standards (NATO Sci. Ser. IV: Earth and Environmental Sciences). – 2005. – **48**. – P. 219–234.

Поступила в редакцию 15.11.2013 г.