

УДК 541.183.12+546.273+546.831.4-36

Ю.С. Дзязько, А.В. Пальчик, Л.М. Рождественская, Ф. Лапик, В.Н. Беляков

КИНЕТИКА ОБМЕНА ИОНОВ  $\text{Cu}^{2+}$  И  $\text{H}^+$  НА ГИДРОФОСФАТЕ ЦИРКОНИЯ

Кинетическим и электромиграционным методами исследована подвижность ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{H}^+$  в фазе неорганического ионита на основе гидрофосфата циркония. Установлено, что подвижность ионов  $\text{Cu}^{2+}$  в гидрофосфате циркония возрастает по мере увеличения степени диссоциации функциональных групп ионита. Расчитаны эффективные коэффициенты диффузии, которые составляют для  $\text{Cu}^{2+}$   $4.77 \cdot 10^{-13}$ — $8.13 \cdot 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с, а для  $\text{H}^+$  —  $6.60 \cdot 10^{-12}$ — $1.65 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с.

Неорганические иониты на основе гидроксофосфата циркония (ГФЦ), а также его производных характеризуются высокой обменной емкостью и значительной селективностью по отношению к катионам двухвалентной меди, что позволяет рассматривать их как перспективные материалы для электродеионизационного извлечения этого металла [1, 2]. Одним из важнейших параметров, определяющих эффективность процесса электродеионизации, является подвижность поглощенных ионов в фазе ионита [3]. Кроме того, в случае гидролизующих ионов определяющую роль играет также и подвижность ионов  $\text{H}^+$ . Протоны, мигрирующие в слое ионита по действием электрического поля, нейтрализуют ионы  $\text{OH}^-$ , генерирующиеся на поверхности катионообменной мембраны, предотвращая образование нерастворимых гидроксосоединений. Таким образом, целью данной работы является оценка подвижности ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{H}^+$  в ГФЦ.

Изучен ионит, полученный фосфатированием гидратированного диоксида циркония аналогично [4]. Образец ГФЦ характеризовался следующими параметрами: насыпная плотность — 1162 кг/м<sup>3</sup>, мольное соотношение  $\text{Zr}:\text{P} = 0.92:1$ , полная обменная емкость 4200 моль/м<sup>3</sup>, удельная поверхность —  $10^5$  м<sup>2</sup>/кг.

Кинетику обмена  $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$  исследовали методом "тонкого слоя" [5]. Через слой ионита в циклическом режиме пропускали 0.1 М раствор  $\text{CuSO}_4$ , предварительно подкисленный  $\text{H}_2\text{SO}_4$  до рН 2.5 (для обеспечения диссоциации функциональных групп  $-\text{OPO}_3\text{H}_2$  только по механизму  $-\text{OPO}_3\text{H}_2 \leftrightarrow -\text{OPO}_3\text{H}^- + \text{H}^+$ ). Масса ионита составляла 0.1 г, а объем раствора — 1 дм<sup>3</sup>. Через определенные промежутки времени контакт ионита

с раствором прерывали, ионит обрабатывали 2 М  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и анализировали элюат атомно-абсорбционным методом при помощи спектрофотометра Pye Unicam SP 9.

Электромиграцию изучали при помощи установки, описание которой приведено в работе [6]. Электродиализная ячейка соответствовала схеме: катодное отделение — анионообменная мембрана (АМІ-7001) — концентрационное отделение — катионообменная мембрана (СМІ-7000) — отделение, заполненное ионитом — анионообменная мембрана — анодное отделение. Эффективная площадь мембран и электродов (платинированный титан) составляла 10 см<sup>2</sup> (1 см×10 см), толщина слоя ионита — 1.5 см. Дистиллированную воду из резервуара на входе в проточном режиме пропускали через слой ионита со скоростью  $1.67 \cdot 10^{-4}$  м/с. В анодной камере циркулировал 1 М  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , а в катодной и концентрационной — 1 М  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Объем каждого из циркулирующих растворов составлял 0.4 дм<sup>3</sup>.

Ионит предварительно переводили в частично замещенную форму, обрабатывая 0.01 М раствором  $\text{CuSO}_4$  в течение 24 ч. Объемное соотношение ионит : раствор составляло 1:15. Как было установлено, обменная емкость ионита, насыщенного таким образом, достигала 0.117 моль/кг.

Эксперимент проводили в гальваностатическом режиме при плотности тока 250 А/м<sup>2</sup>. Через фиксированные промежутки времени отбирали пробы из концентрационного и анодного отделений, а также на выходе из ячейки и определяли концентрацию  $\text{Cu}^{2+}$  атомно-абсорбционным методом.

На рис. 1, а приведена зависимость емкости ГФЦ по ионам  $\text{Cu}^{2+}$  ( $\bar{A}_{\text{Cu}}$ ) от времени обмена ( $\tau$ ). Величина  $\bar{A}_{\text{Cu}}$  закономерно увеличивалась во

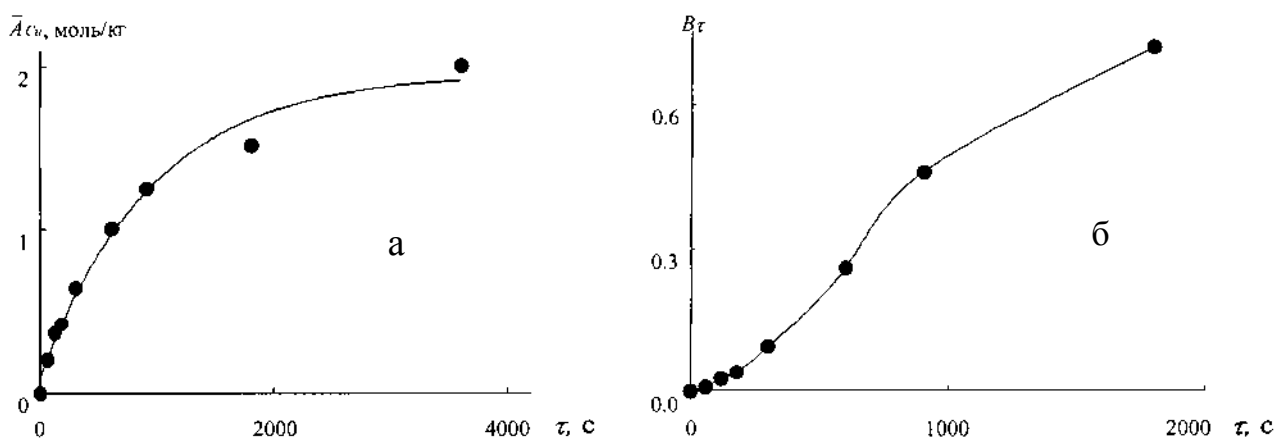


Рис. 1. Зависимость обменной емкости ГФЦ по катионам  $\text{Cu}^{2+}$  (а) и  $B\tau$  (б) от времени обмена.

времени, асимптотически приближаясь к некоторому постоянному значению ( $\bar{A}_{\text{Cu}}$ ), составляющему 2.11 моль/кг (экспериментально было найдено, что данная емкость достигается в течение 48 ч и впоследствии не изменяется). Как было предварительно установлено, при концентрации  $\text{CuSO}_4$  0.1 М скорость обмена не зависит от скорости потока раствора, что свидетельствует о внутридиффузионном характере обмена [5]. В этом случае, при условии  $\bar{A}_{\text{Cu}} / \bar{A}_{\text{Cu}}^\infty < 0.9$ , скорость ионного обмена может быть описана уравнениями [8]:

$$B\tau = 2\pi - \frac{1}{3} \frac{\pi^2 \bar{A}_{\text{Cu}}}{\bar{A}_{\text{Cu}}^\infty} - 2\pi \left( 1 - \frac{\pi \bar{A}_{\text{Cu}}}{\bar{A}_{\text{Cu}}^\infty} \right)^{0.5}; \quad (1)$$

$$B = \frac{4\pi^2 \bar{D}_{\text{Cu}}}{\bar{d}^2}, \quad (2)$$

где  $B$  — кинетический параметр;  $\bar{D}_{\text{Cu}}$  — коэффициент диффузии  $\text{Cu}^{2+}$  в фазе ионита;  $\bar{d}$  — диаметр гранул.

Для изотопного обмена зависимость  $B\tau$ — $\tau$  представляет собой прямую, если лимитирующей стадией является внутридиффузионная кинетика [8]. При обмене  $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$  линейность зависимости  $B\tau$ — $\tau$  не соблюдается (рис. 1, б) — данная зависимость может быть аппроксимирована функцией:

$$B\tau = \frac{a_1}{1 + \exp\left(-\frac{\tau - a_2}{a_3}\right)}, \quad (3)$$

где  $a_1$ — $a_3$  — эмпирические параметры ( $a_1=0.57$ ,  $a_2=606$ ,  $a_3=169$  с). Величина  $B$  была найдена дифференцированием функции (3), а  $\bar{D}_{\text{Cu}}$  — из уравнения (2).

Нелинейность функции  $B\tau$ — $\tau$  обусловлена

дополнительным влиянием градиента электрического потенциала, возникающем в гранулах ионита при обмене разнозарядных ионов [5]. При этом величина  $\bar{D}_{\text{Cu}}$  связана с коэффициентами самодиффузии  $\text{Cu}^{2+}$  ( $\bar{D}'_{\text{Cu}}$ ) и  $\text{H}^+$  ( $\bar{D}'_{\text{H}}$ ) соотношением:

$$\bar{D}_{\text{Cu}} = \frac{\bar{D}'_{\text{Cu}} \bar{D}'_{\text{H}} (z_{\text{Cu}^{2+}}^2 \bar{A}_{\text{Cu}} + z_{\text{H}^+}^2 \bar{A}_{\text{H}})}{\bar{D}'_{\text{Cu}} z_{\text{Cu}^{2+}}^2 \bar{A}_{\text{Cu}} + \bar{D}'_{\text{H}} z_{\text{H}^+}^2 \bar{A}_{\text{H}}}, \quad (4)$$

где  $z$  — заряд ионов.

Поскольку в нашем случае величина рН раствора не изменялась (вследствие большого соотношения масс раствора и ионита), можно полагать, что при достижении  $\bar{A}_{\text{Cu}}^\infty$  все ионы  $\text{H}^+$  функциональных групп, диссоциированных при рН 2.5, замещены на  $\text{Cu}^{2+}$  ( $\bar{A}_{\text{H}} \rightarrow 0$ ,  $\bar{A}_{\text{Cu}} / \bar{A}_{\text{Cu}}^\infty \rightarrow 1$ ). При этом, как следует из уравнения (3),  $\bar{D}_{\text{Cu}}$  соответствует  $\bar{D}'_{\text{H}}$ . Аналогично,  $\bar{D}_{\text{Cu}} = \bar{D}'_{\text{Cu}}$  при  $\bar{A}_{\text{Cu}} \rightarrow 0$  ( $\bar{A}_{\text{Cu}} / \bar{A}_{\text{Cu}}^\infty \rightarrow 0$ ). Таким образом, коэффициенты самодиффузии  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{H}^+$  были найдены экстраполяцией зависимости  $\bar{D}_{\text{Cu}}$ — $\bar{A}_{\text{Cu}} / \bar{A}_{\text{Cu}}^\infty$  на 0 и 1 соответственно (рис. 2). Экстраполирован отрезок кривой, соответствующий возрастанию  $\bar{D}_{\text{Cu}}$ . При этом  $\bar{D}'_{\text{Cu}} = 9.08 \cdot 10^{-14}$  и  $\bar{D}'_{\text{H}} = 2.4 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с.

Уменьшение  $\bar{D}_{\text{Cu}}$  при  $\bar{A}_{\text{Cu}} / \bar{A}_{\text{Cu}}^\infty > 0.48$  обусловлено, очевидно, дополнительным взаимодействием  $\text{Cu}^{2+}$  с функциональными группами ионита. Подтверждением этому служит сверхэквивалентное поглощение  $\text{Cu}^{2+}$ : полная эквивалентная обменная емкость по этим катионам при рН 2.5 составляет 4.22 г-экв/кг, а по  $\text{Na}^+$  — 1.33 г-экв/кг при этом же рН (по данным потенциометрического титрования).

Эффективный коэффициент диффузии, соответствующий обмену  $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$  ( $\bar{D}_{\text{Cu}}^3$ ), найден из уравнения:

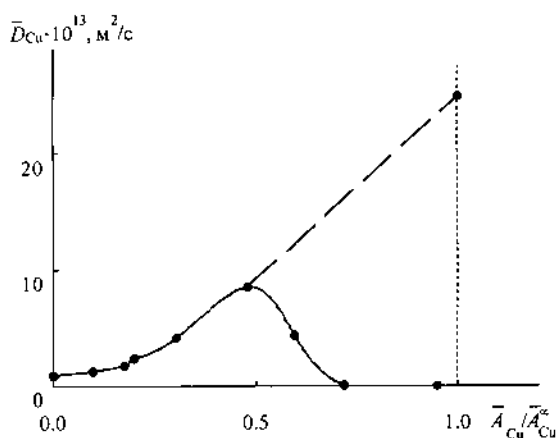


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузии, соответствующего обмену  $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$ , от  $\bar{A}_{\text{Cu}}/A_{\text{Cu}}^\infty$ .

$$D_{\text{Cu}}^3 = 0.03 \frac{\bar{d}}{4\tau_{0.5}}, \quad (5)$$

где  $\tau_{0.5}$  — время полуобмена. Учитывая, что  $t_{0.5} = 660$  с, величина  $D_{\text{Cu}}^3$  составляет  $4.77 \cdot 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с.

Подвижности  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{H}^+$  в ГФЦ при рН 4 были найдены электромиграционным методом. Определение  $\bar{D}_{\text{Cu}}$  при данном значении рН кинетическим методом не представлялось возможным, поскольку рН 0.1 М  $\text{CuSO}_4$  составляет приблизительно 3.3 вследствие гидролиза  $\text{Cu}^{2+}$ .

В ходе эксперимента ионы  $\text{Cu}^{2+}$  мигрировали в концентрационное отделение. Зависимость количества  $\text{Cu}^{2+}$  в католите ( $n_{\text{Cu},\text{к}}$ ) от  $\tau$  приведена на рис. 3 (кривая 1). В анолите, катодном отделении и диализате ионы меди не были обнаружены. Переход ГФЦ из  $\text{Cu}^{2+}$  в  $\text{H}^+$ -форму сопровождался некоторым увеличением напряжения (рис.

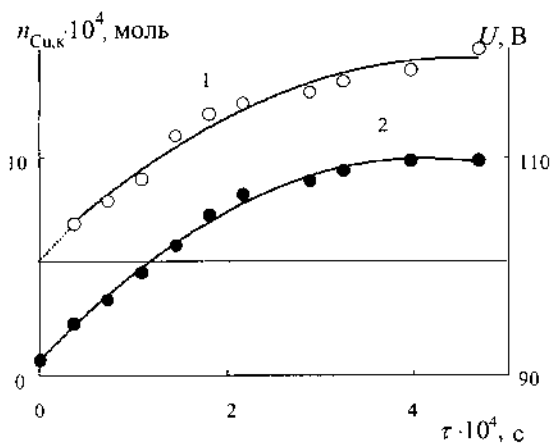


Рис. 3. Зависимость количества  $\text{Cu}^+$  в отделении концентрирования (1) и напряжения (2) от времени.

3, кривая 2). Это, вероятно, было обусловлено частичным осаждением нерастворимых гидроксо соединений  $\text{Cu}^{2+}$  на поверхности мембраны. Подтверждением этому предположению служит анализ материального баланса, проведенный сопоставлением количества  $\text{Cu}^{2+}$  в ионите до и после окончания эксперимента с величиной  $n_{\text{Cu},\text{к}}$ . Установлено, что примерно 15 % от общего количества десорбированной меди осаждалось на катионообменной мембране.

Величина рН раствора, образующегося в отделении, заполненном ионитом, на протяжении 13 ч эксперимента оставалась без изменения и составляла 4.

Полученные данные позволяют сделать некоторые количественные оценки переноса ионов  $\text{Cu}^{2+}$  в слое ионита аналогично [7]. Поток ионов  $\text{Cu}^{2+}$  через мембрану был определен как  $\tilde{N}_{\text{Cu}}$ :

$$\tilde{N}_{\text{Cu}} = \frac{1}{S} \cdot \frac{dn_{\text{Cu},\text{к}}}{d\tau}. \quad (6)$$

В случае, если перенос ионов осуществляется только через ионит, поток катионов через мембрану соответствует потоку через ионит ( $\bar{N}_{\text{Cu}}$ ), включающему миграционную, диффузионную и конвекционную составляющие. Иными словами,  $\tilde{N}_{\text{Cu}} = \bar{N}_{\text{Cu}}$ . В начальный момент времени ( $\tau=0$ ) градиентом концентрации, возникающем в слое ионита под действием внешнего электрического поля, можно пренебречь [7]. Поскольку исследуемый образец ГФЦ характеризуется мезопористой структурой [4], конвекционную составляющую также можно не принимать во внимание. Таким образом, поток через ионит обусловлен только миграцией и связан с коэффициентом диффузии в ионите выражением, аналогичным приведенному в работе [5]:

$$\bar{N} = -\frac{z_{\text{Cu}}F}{RT} \cdot D_{\text{Cu}}^3 \bar{\rho} \bar{A}_{\text{Cu}} \text{grad}\bar{\Phi}, \quad (7)$$

здесь  $F$  — константа Фарадея;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — температура;  $\bar{\rho}$  — насыпная плотность ионита;  $\text{grad}\bar{\Phi}$  — градиент потенциала в слое ионита.

Зависимость  $n_{\text{Cu},\text{к}}$  от времени выражается уравнением:

$$n_{\text{Cu},\text{к}} = b_1 + b_2(1 - \exp(-b_3)), \quad (8)$$

где эмпирические коэффициенты  $b_1=0.07$  моль,  $b_2=1.09$  моль,  $b_3=5.34 \cdot 10^{-5}$  с<sup>-1</sup> и, соответственно,  $\bar{N}_{\text{Cu}}=b_2b_3=5.82 \cdot 10^{-5}$  моль/(м<sup>2</sup>·с) при  $\tau_0=0$ .

Учитывая, что напряжение на ячейке достигает высоких значений, при оценке градиента по-

тенциала через слой ионита потенциалами электродов и падением напряжения в мембранах и 1 М растворах электролитов можно пренебречь. Начальная напряженность электрического поля в ионите была рассчитана на основании напряжения на ячейке  $U$ :

$$|\text{grad } \Phi| = U_0/l_b, \quad (9)$$

где  $U_0$  — напряжение на ячейке,  $l_b$  — толщина слоя ионита.

Кажущаяся плотность используемой фракции ГФЦ составляла 1162 кг/м<sup>3</sup>, а содержание меди на единицу массы — 0.12 моль/кг. Напряжение на ячейке при  $\tau=0$  составляло 100.4 В ( $\text{grad } \Phi = -6693$  В/м) и, в соответствии с этим, значение коэффициента диффузии  $\bar{D}_{\text{Cu}}$  —  $8.13 \cdot 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с.

Полученные результаты позволяют также оценить подвижность ионов  $\text{H}^+$  в фазе ионита. Электропроводность системы ионит—раствор ( $\kappa$ ) соответствует:

$$\kappa = \frac{I}{U_0} \frac{S}{l_b} \quad (10)$$

и составляет  $3.7 \cdot 10^{-2}$  См/м при напряжении на ячейке в 100.4 В. На основании кондуктометрических измерений было найдено, что электропроводность раствора в отделении, заполненном ионитом, составляла  $1 \cdot 10^{-2}$  См/м.

Величину  $\kappa$  можно представить как функцию электропроводности двух фаз — раствора ( $\kappa_s$ ) и ионита ( $\bar{\kappa}$ ) [5]:

$$\kappa = \frac{c_1 \kappa_s \bar{\kappa}}{c_2 \bar{\kappa} + (1 - c_2) \kappa_s} + c_3 \kappa_s + c_4 \bar{\kappa}, \quad (11)$$

где эмпирические коэффициенты  $c_1$ ,  $c_3$  и  $c_4$  связаны уравнением:

$$c_1 + c_3 + c_4 = 1. \quad (12)$$

Учитывая, что обычно  $c_4=0.28$  и  $c_3 \ll 1$ , величина  $c_1$  составляет 0.72 [5]. Моделирование уравнения (11) по двум независимым параметрам  $\bar{\kappa}$  и  $c_2$  позволяет заключить, что электропроводность ионита находится в пределах 0.06—0.15 См/м. Предполагая отсутствие необменно сорбированного электролита в фазе ГФЦ и пренебрегая вкладом  $\text{Cu}^{2+}$  в общую электропроводность, коэффициент диффузии ионов  $\text{H}^+$ ,  $\bar{D}_{\text{H}}$  можно определить из уравнения:

$$\bar{D}_{\text{H}} = \frac{RT\bar{\kappa}}{z_{\text{H}}^2 F^2 \bar{\rho} \bar{A}_{\text{H}}}. \quad (13)$$

Содержание диссоциированных групп в ГФЦ при рН 4, по данным потенциометрического тит-

рования, составляет 2.28 моль/кг, а  $\bar{A}_{\text{Cu}}=0.12$  моль/кг. В соответствии с этим  $\bar{D}_{\text{H}}=6.60 \cdot 10^{-12}$ — $1.65 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с.

Следует отметить, что эффективные коэффициенты диффузии, соответствующие обмену  $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{H}^+$ , а также коэффициенты самодиффузии катионов меди и водорода, полученные кинетическим методом при рН 2.5, значительно меньше коэффициентов диффузии  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{H}^+$ , полученных электромиграционным методом при рН 4. Это может быть обусловлено специфическим взаимодействием катионов металла с функциональными группами ионита, что приводит к искажению зависимости  $\bar{D}_{\text{Cu}} - \bar{A}_{\text{Cu}}/A_{\text{Cu}}^\infty$ . С другой стороны, ГФЦ является слабокислотным ионитом — при повышении рН увеличивается степень диссоциации функциональных групп и, таким образом, сокращается расстояние от одной диссоциированной группы до другой. Это облегчает перенос ионов в фазе ионита.

Эффективные коэффициенты диффузии  $\text{Cu}^{2+}$ , полученные кинетическим и электромиграционным методами для ГФЦ, являются величинами того же порядка, что и коэффициент диффузии  $\text{Ni}^{2+}$  для сильноосшитой макропористой катионообменной смолы [7]. Перспективное улучшение ионопроводящих характеристик ГФЦ связано, очевидно, с увеличением количества фосфорнокислых групп.

**РЕЗЮМЕ.** Кінетичним і електроміграційним методами досліджено рухливості йонів  $\text{Cu}^{2+}$  та  $\text{H}^+$  у фазі неорганічного йоніту на основі гідрофосфату цирконію. Встановлено, що рухливості йонів  $\text{Cu}^{2+}$  у гідрофосфаті цирконію зростає із збільшенням ступеня дисоціації функціональних груп йоніту. Розраховані ефективні коефіцієнти дифузії, які складають для  $\text{Cu}^{2+}$   $4.77 \cdot 10^{-13}$ — $8.13 \cdot 10^{-13}$ , а для  $\text{H}^+$  —  $6.60 \cdot 10^{-12}$ — $1.65 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с.

**SUMMARY.** The mobility of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{H}^+$  ions in inorganic ion-exchanger based on zirconium hydrophosphate was investigated using both kinetic and electromigration method. It was found, that the  $\text{Cu}^{2+}$  ion mobility in zirconium hydrophosphate arises with increase of split degree of functional group. The effective diffusion coefficients were calculated, the are  $4.77 \cdot 10^{-13}$ — $8.13 \cdot 10^{-13}$  m<sup>2</sup>/c for  $\text{Cu}^{2+}$  and  $6.60 \cdot 10^{-12}$ — $1.65 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/c for  $\text{H}^+$ .

1. Пил P.V. // Collect. Czech. Chem. Comm. -1984. -49, № 8. -P. 1749—1755.
2. Романова И.В., Фарбун И.А., Александрова В.С., Хайнаков С.А. // Журн. прикл. химии. -2003. -76, № 5. -С. 759—763.
3. Дзязько Ю.С., Атаманюк В.Ю. Наук. записки

- НАУКМА. Хімічні науки. -2004. -28. -С. 50—62.
4. Дзязько Ю.С., Рождественская Л.М., Пальчик А.В., Беляков В.Н. // Теорет. и эксперим. химия. -2003. -39, № 6. -С. 380—384.
5. Helfferich F. Ion Exchange. -New York.: Dover, 1995.
6. Dzyazko Yu.S., Belyakov V.N. Desalination. -2004.

- 162. -P. 179—189.
7. Spoor P.B., ter Ween W.R., Janssen L.J.J. // J. Appl. Electrochem. -2001. -31, № 5. -P. 523—530.
8. Reichenberg D. // J. Amer. Chem. Soc. -1953. -75, № 3. -P. 589—597.

Институт общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского  
НАН Украины, Киев  
Лаборатория химических наук CNRS-ENSIC, Нанси, Франция

Поступила 27.05.2005

УДК 541.18.043:541.18.048

Т.С. Сліпенюк, В.В. Нечипорук

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІЖЧАСТИННИХ ВЗАЄМОДІЙ У СУСПЕНЗІЯХ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ

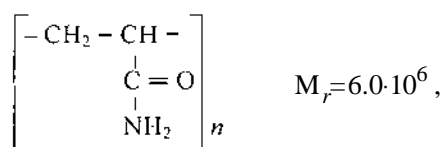
Дана кількісна оцінка основних силових складових розклинюючого тиску парної міжчастинної взаємодії. Досліджені флокуляційні процеси у водних суспензіях синтетичного алмазу в присутності поліакриламід-у та поліетиленоксиду.

На сьогодні актуальним є питання регулювання флокуляційними процесами у водних суспензіях на основі порошків синтетичного алмазу [1]. Саме для таких суспензій, дисперсна фаза яких є седиментаційно-нестійкою, актуальним є вивчення специфіки дії таких стабілізаторів дисперсних систем, як водорозчинні полімери [2, 3].

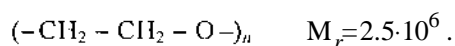
Об'єктами дослідження були:

- а) синтетичні алмазні порошки з середніми розмірами частинок 10 та 1 мкм {СА(10) та СА(1)};
- б) водорозчинні полімери:

поліакриламід (ПАА)



поліетиленоксид (ПЕО)



Дисперсійне середовище — дистильована вода.

Стійкість суспензії алмазного порошку оцінювали методом оптичної турбідиметрії, вимірюючи оптичну густину суспензії. Для цього використовувався концентраційний фотоелектроколометр КФК-2МП з мікропроцесорною установкою, яка дозволяла налагодити прилад на опти-

мальний режим роботи. Використовувались кварцеві кювети товщиною 1.0 см. Робоча довжина хвилі випромінювання  $\lambda$  дорівнювала 540 нм.

Для роботи вибирались концентрації твердої фази, при яких оптична густина не перевищувала значення 2.0—2.5. Це пов'язано з тим, що при більших значеннях  $D$  різко зростає похибка у визначенні оптичних параметрів, завдяки тому, що величина коефіцієнту екстинкції є стає функцією концентрації як твердої фази ( $c$ ), так і добавки, розмірів кювети  $l$  і спостерігається відхилення від закону Бугера–Ламберта–Бера для мутних середовищ:  $D = \varepsilon \cdot c \cdot l$ . Таким умовам відповідали значення концентрацій СА(1) порошку, які лежали в діапазоні, що не перевищував  $1.0 \text{ кг/м}^3$ . Для порошку СА(10) концентрації не перевищували  $5.0 \text{ кг/м}^3$ . Для характеристик впливу хімічних добавок на агрегативну та седиментаційну стійкість СА-порошків ми брали зміну оптичної густини  $\Delta D = D - D_0$ , де  $D_0$  — оптична густина суспензії при відсутності добавки. Добавки вносились у процесі перемішування суспензії, яке здійснювалося з допомогою магнітної мішалки.

Сили парної взаємодії частинок розраховували згідно з сучасною модифікованою теорією ДЛФО із включенням структурних та гідродинамічних сил [4, 5]. Розрахунок силових параметрів у даних системах необхідний для виявлення ролі