



УДК 541.183.123

## Идентификация коэффициента электроселективности и его зависимости от термодинамических факторов при обмене многозарядных ионов

Кузьминых В.А., Селеменев В.Ф.

*ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет», Воронеж*

Поступила в редакцию 23.03.2015 г.

Выявлена зависимость коэффициента разделения многозарядных ионов при бинарном обмене между сильнодиссоциирующим ионообменником и раствором сильного электролита от ионного состава. Полученные результаты позволяют определять и регулировать вклад электроселективности, как фактора влияния, в разделение противоионов при любом соотношении их зарядов, а также – зарядов коионов раствора электролита и фиксированных ионов ионообменника, не принимающих прямого участия в эквивалентном межфазном обмене.

**Ключевые слова:** феноменология, ионообменная адсорбция, равновесие, сильнодиссоциирующий ионообменник, разнорядные ионы, изотерма сорбции

## Identification of coefficient of electric-selectivity and its dependence on thermodynamic factors in exchange of multicharged ions

Kuzminykh V.A., Selemenev V.F.

*Voronezh State University, Voronezh*

Objects of research the equilibrium ion exchange system with selective exchange of multiply charged ions between strong base ion exchangers and solutions of binary mixtures of strong electrolytes with a common multiply charged co-ions. Subject –thermodynamic selectivity estimation problem in the exchange of differently charged ions and control the separation factor as the key indicator of the effectiveness of the process used. To identify the relationship differently charged ions separation factor with the compositions of the interacting phases and other factors influence the state of thermodynamic equilibrium. Test method – phenomenological, based on the application to the description of the equilibrium ion exchange systems of laws of chemical thermodynamics and its corollaries, using the equation of Gibbs-Duhem. The equation that expresses the relationship between the partition coefficient of ions and factors affecting their metabolism: the thermodynamic equilibrium constant of ion exchange, the difference in counter-charges and their total concentrations in interacting phases, collectively determining factor electrical selectivity manifestation. Established relationship allows determine the contribution electrical selectivity as one of the factors of influence in the separation of ions in any proportions of their charges and concentrations; opens up the possibility of approximating the equilibrium isotherms exchange of multiply charged ions by the Langmuir isotherm Nikolsky.

**Keywords:** phenomenology, ion-exchange adsorption, equilibrium, strong dissociating ion-exchange resin, different electrical ion-charges, isotherm of sorption

## Введение

Одной из проблем физической химии ионного обмена является управление селективностью ионита, определяющей конечные результаты ионообменного разделения и, как правило, зависящей от состава взаимодействующих фаз [1-7]. При этом, свойство неизоселективности характеризует ионообменники не только частично диссоциирующие [8-9], но и при их полной диссоциации – когда обменивающиеся ионы имеют разные заряды и проявляется фактор электроселективности [10].

Недостаточная изученность электроселективности как одного из факторов, значительно осложняющих прогнозирование конечных результатов ионообменного разделения, явилась естественным основанием для наиболее общей постановки и решения задачи физико-химического управления разделением двух разнозарядных ионов в ионообменных средах с полностью диссоциирующими фазами [3-6].

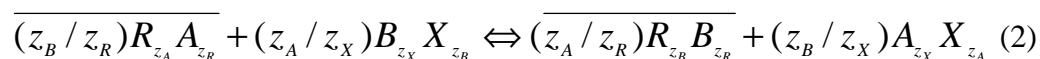
Цель работы – выявление зависимости коэффициента разделения и вклада фактора электроселективности при обмене ионов от его термодинамической константы, концентраций и зарядов как противоионов, так и не принимающих непосредственного участия в эквивалентном обмене коионов раствора и фиксированных ионов ионообменника.

## Физико-химическая модель

Предлагаемые количественные представления основаны на анализе условий равновесия при разделении многозарядных ионов ионообменниками гелевого типа, рассматриваемыми как сильный полиэлектролит с равномерно распределенными фиксированными ионами R – при эквивалентном обмене противоионов A его исходной формы на сорбируемые – B :

$$\overline{C}_B^{z_A} / \overline{C}_A^{z_B} = K_{A,B} C_B^{z_A} / C_A^{z_B} \quad (1)$$

из смеси сильных электролитов  $I_{z_X} X_{z_I}$  ( $I=A, B$ ) с общим многозарядным коионом (X):



в условиях электронейтральности в каждой из взаимодействующих фаз:

$$\sum_{I=A,B} z_I C_I = z_X C_X = C = const, \quad \sum_{I=A,B} z_I \overline{C}_I = z_R \overline{C}_R = a = const. \quad (3)$$

Обозначения:  $\overline{C}_R$  – концентрация фиксированных ионов в ионообменнике, равная его удельной обменной емкости в условиях полной диссоциации;  $\overline{C}_I, C_I$  – концентрации противоиона I в ионообменнике ( $I=A, B$ ) и равновесном с ним растворе из смеси сильных электролитов  $I_{z_X} X_{z_I}$  ( $I=A, B$ ) с общим многозарядным коионом концентрации  $C_X$ .

Ионообменное разделение (1-2) наиболее изучено при обмене равнозарядных ионов ( $z_B = z_A$ ) – когда термодинамическая константа ионного обмена  $K_{A,B}$  равна отношению коэффициентов распределения между ионообменником и раствором электролита

$$\Gamma_I = \overline{C}_I / C_I \quad (I = A, B) \quad (4)$$

сорбируемого (B) и десорбируемого (A) ионов:

$$K_{A,B} = (\Gamma_B / \Gamma_A)^{z_A} \quad (z_B = z_A) \quad (5)$$

и, тем самым, однозначно определяет коэффициент разделения этих ионов

$$K_{B/A} = \Gamma_B / \Gamma_A \quad (6)$$

через ее значение явной взаимозависимостью:

$$K_{B/A} \equiv K_{A,B}^{1/z_A} \quad (z_B = z_A). \quad (7)$$

Особенностью ионообменного равновесия (1-2) при разделении ионов разных зарядов ( $\Delta z = z_B - z_A \neq 0$ ) является принципиальная невозможность однозначной физико-химической интерпретации коэффициента разделения  $K_{B/A}$  – в явном виде и непосредственно только через термодинамическую константу ионообменного равновесия  $K_{A,B}$ , поскольку последняя, в отличие от случаев равных зарядов (5) выражается, согласно (1), через отношение индивидуальных коэффициентов распределения обменивающихся ионов с разными степенными показателями:

$$K_{A,B} = \Gamma_B^{z_A} / \Gamma_A^{z_B} \quad (\Delta z \neq 0) \quad (8)$$

– при неочевидной ее взаимосвязи с коэффициентом разделения (6).

Выявление этой взаимосвязи в условиях разделения (1-4), (6) осложненных проявлением электроселективности при обмене ионов разных зарядов (8) и явилось целью данной работы – в развитие ранее полученных результатов [9], ограниченных условиями равенства зарядов коионов и фиксированных ионов ( $z_X = z_R$ ).

### Обсуждение результатов

В системах, осложненных различием зарядов обменивающихся ионов ( $z_B / z_A \neq 1$ ), когда, в соответствии с (8), (6),

$$K_{A,B}^{1/z_A} = \Gamma_B / \Gamma_A^{z_B/z_A} = K_{B/A} / \Gamma_A^{z_B/z_A - 1} \quad (z_B / z_A \neq 1), \quad (9)$$

коэффициент разделения

$$K_{B/A} = K_{A,B}^{1/z_A} \Gamma_A^{z_B/z_A - 1} \quad (z_B / z_A \neq 1). \quad (10)$$

Его взаимосвязь с ионным составом любой из находящихся в равновесии фаз находится по коэффициенту распределения десорбируемого иона А (4) из условий электронейтральности (3):

$$z_X C_X = \sum_{I=A,B} z_I \bar{C}_I / \Gamma_I = (z_A \bar{C}_A + z_B \bar{C}_B / K_{B/A}) / \Gamma_A = [z_R \bar{C}_R + (1/K_{B/A} - 1)z_B \bar{C}_B] / \Gamma_A$$

и

$$z_R \bar{C}_R = \sum_{I=A,B} z_I C_I \Gamma_I = (z_A C_A + K_{B/A} z_B C_B) \Gamma_A = [z_X C_X + (K_{B/A} - 1)z_B C_B] \Gamma_A,$$

– так, что

$$\Gamma_A = z_R \bar{C}_R / [z_X C_X + (K_{B/A} - 1)z_B C_B] = (z_R \bar{C}_R / z_X C_X) [1 + (K_{B/A} - 1)n_B] \quad (11)$$

$$\Gamma_A = [z_R \bar{C}_R + (1/K_{B/A} - 1)z_B \bar{C}_B] / z_X C_X = (z_R \bar{C}_R / z_X C_X) [1 + (1/K_{B/A} - 1)N_B], \quad (12)$$

где

$$n_B = z_B C_B / z_X C_X, \quad N_B = z_B \bar{C}_B / z_R \bar{C}_R \quad (13)$$

– эквивалентные доли иона В в растворе и ионите соответственно.

Подставляя найденное в (10), приходим к уравнениям для коэффициента разделения разнозарядных ионов с неявной зависимостью от ионных составов взаимодействующих фаз

$$K_{B/A} = K_{B/A}^{(0)} / [1 + (K_{B/A} - 1)n_B]^{z_B/z_A - 1} = K_{B/A}^{(0)} [1 + (1/K_{B/A} - 1)N_B]^{z_B/z_A - 1}, \quad (14)$$

где

$$K_{B/A}^{(0)} = K_{A,B}^{1/z_A} (z_R \bar{C}_R / z_X C_X)^{z_B/z_A - 1} \quad (15)$$

– обобщенный показатель равновесия в изотерме ионообменной сорбции (1) по Никольскому приведенного вида

$$N_B / (1 - N_B)^{z_B/z_A} = K_{B/A}^{(0)} n_B / (1 - n_B)^{z_B/z_A}, \quad (16)$$

учитывающий влияние электроселективности ( $\Delta z = z_B - z_A \neq 0$ ).

В системах, осложненных различием зарядов обменивающихся ионов ( $z_B/z_A \neq 1$ ), достаточно корректная формулировка поставленной задачи и ее решение, прежде всего требуют количественного определения электроселективности как одного из факторов влияния с оценкой его проявления и вклада в процесс ионообменного разделения в целом.

Вполне очевидно, что для этой цели, в качестве стандартной ионообменной системы, по отклонению от которой можно оценить влияние электроселективности, наиболее естественно выбрать систему с равнозарядными обменивающимися ионами (4-6), в которой электроселективность, как фактор влияния, отсутствует

$$K_{B/A}^{\Delta z=0} \equiv K_{A,B}^{1/z_A} \quad (\Delta z = z_B - z_A = 0), \quad (17)$$

и коэффициент электроселективности

$$k_{B/A} = K_{B/A} / K_{B/A}^{\Delta z=0} = K_{B/A} / K_{A,B}^{1/z_A} = 1 \quad (z_A = z_B = 1), \quad (18)$$

в соответствии с (7).

Согласно (10), показатель электроселективности

$$k_{B/A} = K_{B/A} / K_{B/A}^{\Delta z=0} = K_{B/A} / K_{A,B}^{1/z_A} = \Gamma_A^{z_B/z_A - 1} \quad (z_B/z_A \neq 1), \quad (19)$$

выражает увеличение (уменьшение) коэффициента разделения ионов из-за различия их зарядов

$$K_{B/A} = k_{B/A} K_{B/A}^{\Delta z=0} = k_{B/A} K_{A,B}^{1/z_A}. \quad (20)$$

с относительным отклонением коэффициента разделения  $K_{B/A}$  от его представления через термодинамическую константу обмена в условиях отсутствия электроселективности (20):

$$(K_{B/A} - K_{B/A}^{\Delta z=0}) / K_{B/A}^{\Delta z=0} = (K_{B/A} - K_{A,B}^{1/z_A}) / K_{A,B}^{1/z_A} = k_{B/A} - 1. \quad (21)$$

Используя представление (20) как подстановку

$$K_{B/A} = k_{B/A} K_{A,B}^{1/z_A} \quad (22)$$

в выведенное для коэффициента разделения  $K_{B/A}$  уравнение (14-15) находим, что коэффициент электроселективности

$$k_{B/A} = k_{B/A}^{(0)} / [1 + (K_{A,B}^{1/z_A} k_{B/A} - 1)n_B]^{z_B/z_A - 1} = k_{B/A}^{(0)} [1 + (K_{A,B}^{1/z_A} / k_{B/A} - 1)N_B]^{z_B/z_A - 1}, \quad (23)$$

где заряды противоионов и коионов, их эквивалентные ионные доли и общие концентрации в обеих фазах, как факторы влияния, учитываются в их совокупности критерием подобия

$$k_{B/A}^{(0)} = K_{B/A}^{(0)} / K_{A,B}^{1/z_A} = (z_R \bar{C}_R / z_X C_X)^{z_B/z_A - 1}, \quad (24)$$

– выделяя тем самым термодинамическую константу ионообмена  $K_{A,B}$  как независимый фактор влияния – в отличие от фактора электроселективности, зависящего от  $K_{A,B}$ , как следует из выведенного уравнения (23).

Критерий подобия

$$K_{B/A}^{(0)} = K_{A,B}^{1/z_A} (z_R \bar{C}_R / z_X C_X)^{z_B/z_A-1} \quad (25)$$

совпадает с коэффициентом разделения  $K_{B/A}$  при малом содержании сорбируемого иона В в ионообменной системе ( $n_B \approx N_B \approx 0$ ), а его критериальное значение

$$K_{B/A}^{(0)} = 1 \Leftrightarrow K_{A,B}^{1/z_A} (z_R \bar{C}_R / z_X C_X)^{z_B/z_A-1} = 1 \quad (25)$$

выражает необходимые и достаточные условия отсутствия селективности при обмене многозарядных ионов:

$$K_{B/A} \equiv 1. \quad (26)$$

Как следствие – режим линейной изотермы сорбции ионов (9):

$$N_B \equiv n_B \quad (27)$$

– при любом соотношении зарядов противоионов ( $z_B / z_A$ ) и коионов ( $z_R / z_X$ ), что хорошо видно из данных компьютерного анализа на рис. 1 (кривая 2).

$$\text{При } K_{B/A}^{(0)} > 1 \Leftrightarrow K_{A,B}^{1/z_A} (z_R \bar{C}_R / z_X C_X)^{z_B/z_A-1} > 1 \quad (28)$$

– изотерма ионообменной сорбции выпуклая, с проявлением селективности ионообменника к сорбируемому иону В:

$$K_{B/A} > 1 \Leftrightarrow (z_R \bar{C}_R / z_X C_X)^{z_B/z_A-1} > 1 / K_{A,B}^{1/z_A}. \quad (29)$$

$$\text{При } K_{B/A}^{(0)} < 1 \Leftrightarrow K_{A,B}^{1/z_A} (z_R \bar{C}_R / z_X C_X)^{z_B/z_A-1} < 1 \quad (30)$$

– изотерма ионообменной сорбции вогнутая, с проявлением селективности ионообменника к десорбируемому иону А:

$$K_{B/A} < 1 \Leftrightarrow (z_R \bar{C}_R / z_X C_X)^{z_B/z_A-1} < 1 / K_{A,B}^{1/z_A} \quad (31)$$

– на любой стадии обмена, как и в случае (29), с невозможностью обращения селективности и инверсии присущей изотермам сорбции  $s$ - и  $\sigma$ -образного вида [9].

И наконец, возможность проявления свойства изоселективности [9]:

$$dK_{B/A} / dN_B \equiv 0 \Leftrightarrow K_{B/A} \equiv K_{B/A}^{(0)} = K_{A,B}^{1/z_A} (z_R \bar{C}_R / z_X C_X)^{z_B/z_A-1}$$

реализуется только в условиях отсутствия фактора электроселективности, когда заряды обменивающиеся ионы имеют равные заряды ( $z_B = z_A$ ).

При нарушении условий ( $z_B = z_A$ ), действие фактора электроселективности ( $z_B \neq z_A$ ) приводит к явлению неизоселективности либо с монотонным уменьшением коэффициента разделения:

$$dK_{B/A} / dN_B < 0 < (K_{B/A}^{(0)} - 1)(z_B / z_A - 1) \Leftrightarrow \begin{cases} \min\{K_{B/A}^{(0)}; z_B / z_A\} > 1, \\ \max\{K_{B/A}^{(0)}; z_B / z_A\} < 1 \end{cases} \quad (32)$$

– по мере превращения ионообменника в конечную В-форму, от его начального значения (15) при ( $n_B \approx N_B \approx 0$ ) до конечного:

$$K_{B/A} = K_{B/A}^{(1)} = [K_{B/A}^{(0)}]^{z_A/z_B},$$

реализуемого при  $n_B \approx N_B \approx 1$  (данные рис. 1, кривая 3) либо с – увеличением:

$$dK_{B/A}/dN_B > 0 > (K_{B/A}^{(0)} - 1)(z_B/z_A - 1) \Leftrightarrow \begin{cases} K_{B/A}^{(0)} > 1 > z_B/z_A, \\ K_{B/A}^{(0)} < 1 < z_B/z_A \end{cases} \quad (33)$$

(кривая 1).

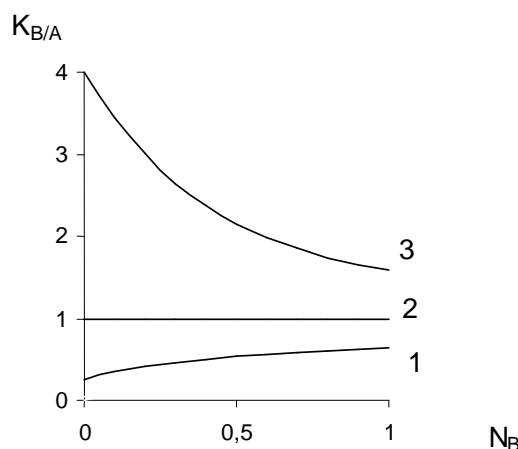


Рис. 1. Коэффициент разделения в зависимости от ионного состава при  $K_{A,B}^{1/z_A} = 1 = z_A$ ,  $z_B/z_A = 3$  и различных отношениях в ионите и растворе а) коионных сил  $z_R \bar{C}_R / z_X C_X = 1/2$  (1), 1 (2), 2 (3) – общий случай; б) концентраций  $\bar{C}_R / C_X = 1/2$  (1), 1 (2), 2 (3), если  $z_R/z_X = 1$  и в) зарядов коионов  $z_R/z_X = 1/2$  (1), 1 (2), 2 (3), когда  $\bar{C}_R / C_X = 1$ .

Откуда следует, что падение коэффициента разделения  $K_{B/A}$  под действием фактора электроселективности оказывается возможным тогда и только тогда, когда ионообменник селективен к противоionsу с большим зарядом:

$$dK_{B/A}/dN_B < 0 \Leftrightarrow \begin{cases} K_{B/A}^{(0)} > K_{B/A}^{(1)} > 1 > z_A/z_B, \\ K_{B/A}^{(1)} < K_{B/A}^{(0)} < 1 < z_A/z_B; \end{cases} \quad (34)$$

что наглядно иллюстрируют данные рис. 1 (кривая 3) и табл.1 (вариант  $z_B/z_A = 2$ ).

И, наоборот, проявление фактора электроселективности в возрастании  $K_{B/A}$  имеет место только при ионообменнике селективном к противоionsу с меньшим зарядом:

$$dK_{B/A}/dN_B > 0 \Leftrightarrow \begin{cases} K_{B/A}^{(1)} > K_{B/A}^{(0)} > 1 > z_B/z_A, \\ K_{B/A}^{(0)} < K_{B/A}^{(1)} < 1 < z_B/z_A \end{cases}; \quad (35)$$

рис.1 (кривая 1); табл. 1,  $z_B/z_A = 1/2$ .

Из представленных на рисунке и в таблице 1 данных также видно, что концентрационно-валентный эффект увеличения (уменьшения) коэффициента разделения ( $K_{B/A}$ ) может достигаться при неравенстве зарядов обменивающихся противоionsов А и В ( $z_B \neq z_A$ ) исключительно электроселективностью ( $K_{A,B} = 1: K_{B/A} = k_{B/A}$ ), проявляющейся в преимущественном электростатическом «перетягивании» противоionsа с большим зарядом фазой с большей силой электростатического поля коионов (подвижных в растворе и фиксированных – в ионите).

При этом, электроселективность, как фактор, регулируется ее коэффициентом (24):

$$k_{B/A}^{(0)} = K_{B/A}^{(0)} / K_{A,B}^{1/z_A} = (z_R \bar{C}_R / z_X C_X)^{z_B/z_A - 1}, \quad (36)$$

– с помощью выявленных управляющих критериев (25-31), – отношением зарядов противоионов ( $z_B / z_A$ ) – табл.1, а так же – коионов ( $z_R / z_X$ ) – рис.1 (режим в)) и их концентраций ( $\bar{C}_R / C_X$ ) – рис. 1 (режим б)), обобщаемых комплексным критерием подобия в виде отношения коионных сил взаимодействующих фаз ( $z_R \bar{C}_R / z_X C_X$ ) – ионита и раствора (рис. 1; режим а)).

Таблица 1. Экстремальные значения коэффициента разделения  $K_{B/A}$  (электроселективности  $k_{B/A}$ ) разнозарядных ионов в зависимости от коионной силы ионообменника по отношению к раствору ( $z_R \bar{C}_R / z_X C_X$ ) для прямого ( $z_B / z_A = 2$ ) и обратного обмена противоионов при  $K_{A,B} = 1$  ( $K_{B/A} = k_{B/A}$ ).

$z_B / z_A$	2		1/2	
$z_R \bar{C}_R / z_X C_X$	$K_{B/A}^{(0)} = k_{B/A}^{(0)}$	$K_{B/A}^{(1)} = k_{B/A}^{(1)}$	$K_{B/A}^{(0)} = k_{B/A}^{(0)}$	$K_{B/A}^{(1)} = k_{B/A}^{(1)}$
0.01	0.01	0.1	10	100
0.1	0.1	0.33	3.3	10
1	1	1	1	1
10	10	3.3	0.33	0.1
100	100	10	0.1	0.01

И наконец, из данные представленные на рис. 1 видно, что все три способа управления селективностью: а), б) и в) могут приводить к одинаковым результатам, а также то, что, изменение заряда коиона в растворе: в) может кардинально повлиять на селективность и характер ее зависимости от состава ионообменника (для заряда его фиксированных ионов – аналогично).

Наблюдаемый различный характер изменения коэффициента разделения (электроселективности) в представленном на рис. 1 и в таблице 1 (в каждом случае и целом) объясняется и легко прогнозируется из установленных условий (32-35) по приведенным регулятивным значениям параметров ( $z_B / z_A$ ), ( $z_R / z_X$ ) и ( $\bar{C}_R / C_X$ ) [10].

### Заключение

Проблема практической оценки селективности и ее управления возникает из-за неясности ее взаимосвязи с факторами влияния – особенно, когда не только противоионы, но и коионы имеют разные заряды.

Представленные результаты выявляют природу разделения многозарядных ионов не как не чисто химическую, выразив его основной показатель эффективности коэффициент ( $K_{B/A}$ ) в виде неявной зависимости от константы ионообменного равновесия, зарядов противоионов и коионов, а также их концентраций в обеих фазах.

Анализ установленной неявной взаимосвязи  $K_{B/A}$  с учетом возможного неравенства зарядов коионов раствора и фиксированных коионов ионообменника

( $z_X \neq z_R$ ), как фактора влияния, показал, что, по аналогии с ранее рассмотренным частным случаем ( $z_X = z_R$ ) [10]:

– при полной диссоциации ионообменника обращение его селективности с инверсией, присущей изотермам сорбции s- и  $\sigma$ -образного вида, принципиально невозможно; свойство изоселективности, характеризуемое независимостью коэффициента разделения  $K_{B/A}$  от ионного состава взаимодействующих фаз, реализуется только в условиях отсутствия фактора электроселективности – при равенстве зарядов обменивающихся ионов.

При их неравенстве ( $z_B \neq z_A$ ) действие фактора электроселективности приводит к явлению неизоселективности с падением коэффициента разделения ( $K_{B/A}$ ) по мере превращения ионита в конечную форму, либо – с его увеличением, согласно (32-35); т.о. падение коэффициента разделения под действием фактора электроселективности оказывается возможным только тогда, когда ионообменник селективен к противоиону с большим зарядом и, наоборот, его возрастание имеет место только для ионообменника селективного к противоиону с меньшим зарядом.

Концентрационно-валентный эффект увеличения селективности достигается либо за счет разбавления внешнего раствора электролита, с увеличением ( $z_R/z_X$ ) – при большем заряде сорбируемого иона, либо за счет концентрирования, с уменьшением ( $z_R/z_X$ ) – в противоположном случае (большем заряде десорбируемого иона). Достижимый за счет фактора электроселективности концентрационно-валентный эффект также зависит от ионного состава и он максимален (минимален), когда ион с большим (соответственно, меньшим) зарядом является микрокомпонентом.

При изменении концентрации переход от проявления ионообменником селективности к одному из противоионов к проявлению селективности к другому сопровождается сменой тенденции убывания (возрастания) коэффициента разделения по мере превращения ионита – на противоположную (рис.1).

При одинаковом химическом средстве ионообменника к противоионам ( $K_{A,B} = 1$ ) их разделение полностью осуществляется по чисто электростатическому механизму – электрическими полями, создаваемыми подвижными и неподвижными коионами раствора и ионита, в зависимости от зарядов противоионов ( $z_B/z_A$ ) и коионных сил этих фаз ( $z_R \bar{C}_R / z_X C_X$ ), как регуляторов электроселективности, согласно (36).

*«Прикладные научные исследования проводятся при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России по Соглашению № 14.577.21.0111 от 22 сентября 2014 г. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57714X0111.»*

## Список литературы

1. Иониты в химической технологии / Под ред. Б.П. Никольского и П.Г. Романкова. Л.: Химия, 1982. 416 с.
2. Ионный обмен / Под ред. Я. Маринского. М.: Мир, 1968. 565 с.
3. Солдатов В.С. Простые ионообменные равновесия. Минск: Наука и техника, 1972. 218 с.



4. Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена Л.: Химия, 1970. 336 с.

5. Кокотов Ю.А., Золотарев П.П., Елькин Г.Э. Теоретические основы ионного обмена: Сложные системы. Л.: Химия, 1986. 280 с.

6. Кузьминых В.А., Селеменев В.Ф. // Материалы V Всероссийской конференции «Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах (ФАГРАН-2010)», 3–8 окт. 2010 г. 2010. С. 746-749.

7. Кузьминых В.А., Селеменев В.Ф. // Материалы V Всероссийской конференции

«Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах (ФАГРАН-2010)», 3-8 окт. 2010 г. 2010. С. 749-752.

8. Кузьминых В.А., Селеменев В.Ф. // Теория и практика сорбционных процессов. 2000. Вып. 26. С. 195-212.

9. Кузьминых В.А., Селеменев В.Ф. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2007. Т. 7. Вып. 5. С. 764-773.

10. Кузьминых В.А., Селеменев В.Ф. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. Вып. 6. С. 926-932.

## References

1. Ionity v himicheskoj tehnologii [Ion exchangers in chemical technology], Pod red. В.Р. Nikol'skogo i P.G. Romankova, L.: Himija, 1982, 416 p.

2. Ionnyj obmen [Ion exchange], Pod red. Ja Mariinskogo, M.: Mir, 1968, 565 p.

3. Soldatov V.S. Prosteje ionoobmennye ravnovesija [Simple ion exchange equilibrium], Minsk: Nauka i tehnika, 1972, 218 p.

4. Kokotov Ju.A., Pasechnik V.A. Ravnovesie i kinetika ionnogo obmena [Equilibrium and kinetics of ion exchange], L.: Himija, 1970, 336 p.

5. Kokotov Ju.A., Zolotarev P.P., El'kin G.Je. Teoreticheskie osnovy ionnogo obmena: Slozhnye sistemy [Theoretical Foundations of ion exchange: Complex Systems], L.: Himija, 1986, 280 p.

6. Kuz'minyh V.A., Selemenev V.F. Materialy V Vserossijskoj konferencii «Fiziko-himicheskie processy v kondensirovannyh sredah i na mezhfaznyh granicah (FAGRAN-2010)», 3-8 okt. 2010., Voronezh, 2010, pp. 746-749.

7. Kuz'minyh V.A., Selemenev V.F. Materialy V Vserossijskoj konferencii «Fiziko-himicheskie processy v kondensirovannyh sredah i na mezhfaznyh granicah (FAGRAN-2010)», 3-8 okt. 2010. Voronezh, 2010, pp. 749-752.

8. Kuz'minyh V.A., Selemenev V.F., *Teorija i praktika sorbcionnyh processov*, 2000, No 26, pp. 195-212.

9. Kuz'minyh V.A., Selemenev V.F., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2007, Vol. 7, No 5, pp. 764-773.

10. Kuz'minyh V.A., Selemenev V.F., *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2014, Vol. 14, No 6, pp. 926-932.

**Кузьминых Виталий Аркадьевич** – к.х.н., ведущий инженер кафедры аналитической химии, химический факультет, Воронеж, тел. (4732) 208932

**Селеменев Владимир Федорович** – д.х.н., профессор кафедры аналитической химии, химический факультет, Воронеж, тел. (4732) 208362

**Kuzminykh Vitaly A.** – Ph.D, leading engineer, Department of analytical chemistry, chemical faculty, Voronezh State University, Voronezh; e-mail: [vitalyku2011@yandex.ru](mailto:vitalyku2011@yandex.ru)

**Selemenev Vladimir V.** – doctor of science, professor, head of Department of analytical chemistry, chemical faculty, Voronezh State University, Voronezh