

УДК 541.183:628.515

## СОРБЦИОННО-СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ЦЕОЛИТОВ В ОТНОШЕНИИ РАДИОНУКЛИДОВ $^{90}\text{Sr}$ И $^{137}\text{Cs}$

© 2002 А.П.Красноперова, Г.Д.Юхно, Л.Т.Лебедева, Н.В.Далецкая, А.Ю.Лонин

Изучены сорбционно-селективные свойства синтетических цеолитов (эрионита,  $\text{NaA}$ ,  $\text{NaX}$ ,  $\text{NaY}$ ) относительно радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в зависимости от рН, концентрации постороннего электролита и носителя и температуры. Установлена высокая сорбционная способность в отношении  $^{137}\text{Cs}$  высококремнеземных цеолитов эрионита и цеолита  $\text{NaY}$  (99%). Относительно  $^{90}\text{Sr}$  лучшими сорбционными характеристиками обладает низкокремнеземный цеолит  $\text{NaA}$  (97%). Существенное влияние на сорбцию радионуклидов синтетическими цеолитами оказывают рН раствора и температура. Показано, что с ростом концентрации постороннего электролита и изотопного носителя сорбция радионуклидов резко уменьшается, а с ростом температуры увеличивается.

Один из наиболее целесообразных путей решения проблемы очистки природных и технических вод от радионуклидов – это использование сорбентов.

Выбор сорбентов определяется несколькими факторами, главными из которых являются его сорбционные характеристики, химическая и радиационная стойкость. Безусловно, не последнюю роль играет стоимость материала.

В последние годы для очистки воды наряду с природными цеолитами стали широко применяться синтетические – искусственные алюмосиликаты, которые уже в прошлом столетии использовались в технологии водоподготовки для смягчения воды [1]. Благодаря высокой однородности и чистоте они значительно в большей степени отвечают требованиям технологий, чем природные. Однако их использование долгое время тормозилось из-за дороговизны, низкой химической стойкости и небольшой обменной емкости.

Современные синтетические цеолиты являются высококачественными и сравнительно дешевыми сорбентами. Предварительные исследования показали [1-7], что некоторые из них обладают достаточно высокими сорбционно-селективными свойствами относительно радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

В настоящее время известно более 100 синтетических цеолитов [1,5]. В технологии сорбционной очистки воды от радионуклидов наиболее широко используются цеолиты двух структурных типов: А и X. Гораздо меньше изучены в этом отношении эрионит и цеолит  $\text{NaY}$ .

Коэффициент  $x$  в общей формуле цеолитов  $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot x\text{SiO}_2\cdot y\text{H}_2\text{O}$  различен для разных структурных форм. От коэффициента  $x$  зависит количество компенсирующих катионов и обмененная емкость цеолита. По величине отношения  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  цеолиты разделяют на низкокремнеземные и высококремнеземные. К низкокремнеземным цеолитам относятся цеолиты А и X ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2-3$ ). К высококремнеземным относятся эрионит и цеолит Y ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4-10$ ).

В отличие от цеолитов А, X и Y, синтетический эрионит имеет более сложный химический состав. В его решетке кроме натрия в значительных количествах содержатся ионы  $\text{K}^+$ . Из всех известных цеолитов у эрионита самое большое значение отношения  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 7$ , вследствие чего он наиболее кислотоустойчив.

Широкие перспективы использования синтетических цеолитов в качестве селективных ионообменников определяют актуальность систематического изучения их ионообменных свойств.

Целью настоящей работы являлось сравнительное изучение сорбционно-селективных свойств синтетических цеолитов: эрионита,  $\text{NaA}$ ,  $\text{NaX}$ ,  $\text{NaY}$  по отношению к радионуклидам  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  при различных значениях рН раствора, температуры, концентрации носителя и постороннего иона.

## Экспериментальная часть

Сорбционная способность синтетических цеолитов по отношению к радионуклидам  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  изучалась в статических условиях методом ограниченного объема в интервале значений pH от 2 до 8.5 и диапазоне температур 293.15 – 318.15 К.

В качестве сорбентов использовали синтетические цеолиты: эрионит, NaA, NaX, NaY с диаметром зерен 0.3–0.5 мм, которые были синтезированы и предоставлены Научно-исследовательским и Проектным институтом основной химии, г. Харьков [8–10].

Для изучения влияния на сорбционную способность цеолитов посторонних ионов использовали раствор  $\text{NaCl}$  ( $C_{\text{NaCl}}=0.05$  моль/  $\text{dm}^3$ ,  $T=293.15$  K), а в качестве изотопных носителей служили растворы  $\text{CsCl}$  и  $\text{SrCl}_2$  с концентрациями 0.1 моль/  $\text{dm}^3$  и 1 моль/  $\text{dm}^3$ .

Кислотность растворов регулировали путем добавок растворов  $\text{HCl}$  и  $\text{NaOH}$ .

В экспериментах использовались растворы радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  с удельной активностью  $1.76 \cdot 10^6$  Бк/  $\text{dm}^3$  и  $^{137}\text{Cs}$  с удельной активностью  $3.18 \cdot 10^6$  Бк/  $\text{dm}^3$ , без носителей.

Для исследования сорбции навески сорбентов массой 0.05 г перемешивали с помощью магнитной мешалки с 10 мл растворов, содержащих радионуклиды при заданном значении pH, в присутствии постороннего иона или изотопного носителя до установления термодинамического равновесия.

Методика определения сорбционной способности синтетических цеолитов в отношении радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  и времени, необходимого для установления сорбционного равновесия, подробно описаны в работе [11].

Время, необходимое для установления термодинамического равновесия в системе цеолит – раствор определялось на основании изучения кинетики сорбции. Кинетические кривые были получены методом последовательного отбора проб в интервале времени от 0 до  $\tau_\infty$ , где  $\tau_\infty$  – время установления равновесия между раствором и цеолитом, и измерения радиоактивности сухого остатка аликвоты раствора. Постоянство радиоактивности двух последовательно отобранных проб свидетельствовало об установлении сорбционного равновесия в системе.

После окончания каждого опыта цеолиты тщательно промывали, и промывные воды исследовали на содержание радионуклидов. Отсутствие радиоактивности в промывных водах свидетельствовало о прочной фиксации радионуклидов на исследуемых сорбентах.

Радиоактивность проб  $^{90}\text{Sr}$  определялась после достижения его равновесия с дочерним  $^{90}\text{Y}$ .

Радиометрические измерения сухого остатка проб проводили на установке  $\alpha$ - $\beta$ -автомат NRR-610 “Tesla”.

Относительные погрешности измерений радиоактивности не превышали 2%.

## Результаты и их обсуждение

В качестве количественных характеристик взаимодействия сорбентов с радионуклидами использованы коэффициенты распределения радионуклидов ( $K_d$ ,  $\text{cm}^3/\text{г}$ ), и коэффициенты сорбции ( $K_s, \%$ ) [11].

Относительная погрешность величин в диапазоне их значений  $1 \cdot 10^2$  –  $1 \cdot 10^4$  рассчитывали с относительной погрешностью 2–5%, а в диапазоне значений  $K_d < 10^2$  – с погрешностью 10%.

Анализ полученных кинетических кривых сорбции радионуклидов на синтетических цеолитах (рис.1) показал, что сорбционное равновесие в системах радионуклид–сорбент для  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  наступает через разные промежутки времени. Равновесие между цеолитами и  $^{137}\text{Cs}$  наступает через 20–60 минут,  $^{90}\text{Sr}$  – через 96–240 часов.

Как видно из рис.1, процесс ионного обмена состоит из двух стадий: быстрой и медленной. Согласно литературным данным [4], вклад каждой из них зависит от особенностей структуры цеолитов и физико-химических характеристик обменивающихся ионов. Радаком и соавторами [12] предложена математическая модель двухстадийного процесса: I стадия – диффузионный процесс; II – внутрикристаллический обмен, описываемый кинетическим уравнением 1-го порядка.

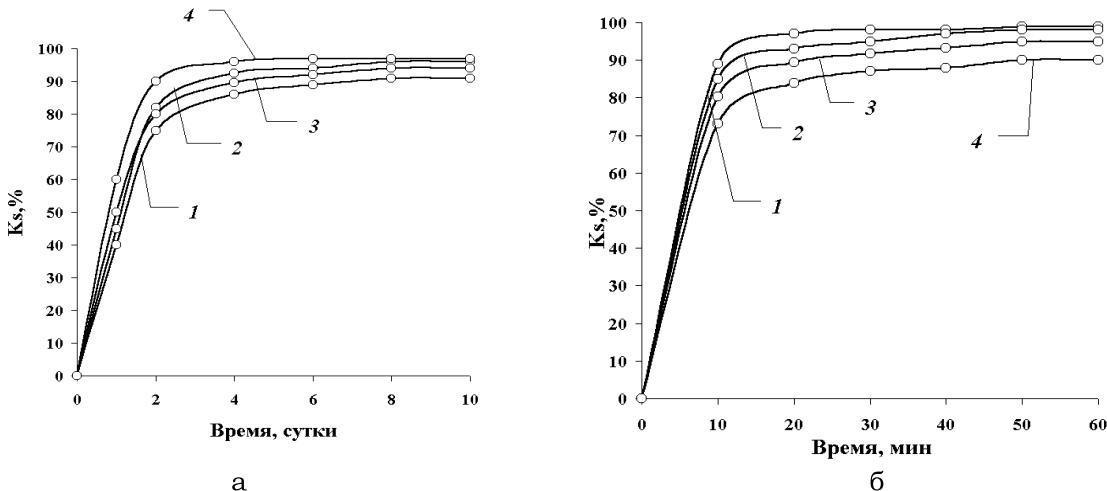


Рис.1. Кинетические кривые сорбции  $^{90}\text{Sr}$  (а) и  $^{137}\text{Cs}$  (б) на синтетических цеолитах при  $\text{pH}=7$ : 1 – эрионит; 2 –  $\text{NaY}$ ; 3 –  $\text{NaA}$ ; 4 –  $\text{NaX}$ .

Полученные нами данные согласуются с результатами работ [4, 13–15], в которых на основании анализа эффективных коэффициентов диффузии для обмена одновалентных и двухвалентных катионов на цеолитах было сделано предположение, что скорость обмена зависит от селективности цеолита, энергии гидратации, заряда и радиуса входящего катиона. В этих же работах показано, что коэффициенты самодиффузии для обмена одновалентных катионов на два порядка выше, чем одно-двуихвалентных, а энергия активации ниже примерно в 2 раза.

Так как стандартная энталпия гидратации  $\text{Cs}^+$  ( $\Delta H_{\text{гид}}^0 = -280 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ) гораздо меньше энергии гидратации  $\text{Sr}^{2+}$  ( $\Delta H_{\text{гид}}^0 = -1475 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ), а ионный радиус  $\text{Cs}^+$  ( $r=0.167 \text{ нм}$ ) больше ионного радиуса  $\text{Sr}^{2+}$  ( $r=0.127 \text{ нм}$ ), то и скорость обмена  $\text{Na}-\text{Cs}$  на исследуемых цеолитах во много раз выше, чем скорость обмена  $\text{Na}-\text{Sr}$ .

Значения коэффициентов распределения ( $K_d$ ,  $\text{см}^3/\text{г}$ )  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  на цеолитах, приведенные в таблице 1, позволяют провести сопоставление сорбционно-селективных свойств и выявить особенности взаимодействия синтетических цеолитов с радионуклидами  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Для сравнения в таблице 1 приведены данные о сорбционных свойствах природного цеолита клиноптилолита, полученные нами ранее [11].

**Таблица 1.** Значения коэффициентов распределения ( $K_d$ ) радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  на цеолитах при различных значениях  $\text{pH}$  при температуре 293.15 К

Цеолит	$K_d$ , $\text{см}^3/\text{г}$							
	$^{137}\text{Cs}$				$^{90}\text{Sr}$			
	$\text{pH}=2$	$\text{pH}=5$	$\text{pH}=7$	$\text{pH}=8.5$	$\text{pH}=2$	$\text{pH}=5$	$\text{pH}=7$	$\text{pH}=8.5$
Клиноптилолит	$(1.68 \pm 0.03) \cdot 10^3$	$(8.59 \pm 0.2) \cdot 10^3$	$(12.8 \pm 0.3) \cdot 10^3$	$(9.08 \pm 0.18) \cdot 10^3$	$11.2 \pm 1.1$	$(1.44 \pm 0.08) \cdot 10^2$	$(3.40 \pm 0.17) \cdot 10^2$	$(8.50 \pm 0.42) \cdot 10^2$
Эрионит	$(3.28 \pm 0.1) \cdot 10^3$	$(3.53 \pm 0.07) \cdot 10^3$	$(4.55 \pm 0.09) \cdot 10^3$	$(2.23 \pm 0.04) \cdot 10^3$	$18.0 \pm 1.8$	$(3.01 \pm 0.15) \cdot 10^2$	$(5.80 \pm 0.29) \cdot 10^2$	$(2.80 \pm 0.14) \cdot 10^2$
NaA	$(7.6 \pm 0.4) \cdot 10^2$	$(8.0 \pm 0.4) \cdot 10^2$	$(8.6 \pm 0.4) \cdot 10^2$	$(1.00 \pm 0.03) \cdot 10^3$	$7.0 \pm 0.7$	$(7.49 \pm 0.37) \cdot 10^2$	$(1.22 \pm 0.04) \cdot 10^3$	$(4.70 \pm 0.23) \cdot 10^2$
NaY	$(1.72 \pm 0.05) \cdot 10^3$	$(2.72 \pm 0.05) \cdot 10^3$	$(3.25 \pm 0.07) \cdot 10^3$	$(3.19 \pm 0.06) \cdot 10^3$	$5.0 \pm 0.5$	$(6.23 \pm 0.31) \cdot 10^2$	$(1.19 \pm 0.04) \cdot 10^3$	$(2.20 \pm 0.11) \cdot 10^2$
NaX	$(8.0 \pm 0.4) \cdot 10^2$	$(9.0 \pm 0.4) \cdot 10^2$	$(9.9 \pm 0.5) \cdot 10^2$	$(5.0 \pm 0.2) \cdot 10^2$	$21.0 \pm 2.1$	$(5.30 \pm 0.26) \cdot 10^2$	$(8.40 \pm 0.42) \cdot 10^2$	$(5.20 \pm 0.52) \cdot 10^2$

Как видно из таблицы 1, синтетические цеолиты обладают достаточно высокой сорбционной способностью в отношении исследуемых радионуклидов. В то же время, в их поведении при ионном обмене наблюдаются существенные различия.

Анализ литературных данных [1, 4, 16–17] показал, что различаются селективность и термодинамические константы цеолитов. Часто различаются даже данные, полученные разными авторами при изучении обмена одних и тех же катионов.

Известно [2, 4–7], что сорбционные свойства цеолитов зависят от целого ряда факторов, таких, как структура цеолита, природа и физико-химические свойства сорбируемых ионов (энергия гидратации, заряд, радиус иона), концентрация ионов в растворе, pH раствора и температура.

Как было показано нами ранее [11], наибольшую селективность к  $^{137}\text{Cs}$  имеет природный высококремнеземный цеолит клиноптилолит ( $K_d = 12800$  при pH = 7), а селективность синтетических цеолитов к  $^{137}\text{Cs}$ , в том числе высококремнеземных, (эрионит –  $K_d = 4550$ ,  $\text{NaY} - K_d = 3250$ ) оказалась значительно ниже. Кроме того, сорбционная способность низкокремнеземных цеолитов  $\text{NaA}$  и  $\text{NaX}$  в отношении  $^{137}\text{Cs}$  по сравнению с эрионитом и цеолитом  $\text{NaY}$  также гораздо ниже.

Более низкая степень обмена иона натрия на ион цезия на синтетических цеолитах A, X и Y по сравнению с клиноптилолитом может быть объяснена недоступностью натрия для обмена, из-за пространственных затруднений, связанных с тем, что диаметр иона цезия (0.334 нм) превышает размер окон в 6-членных кольцах. Вследствие этого места  $S_1$  внутри гексагональных призм для иона цезия становятся недоступными.

Основное структурное различие цеолитов типа  $\text{NaA}$ ,  $\text{NaX}$  и  $\text{NaY}$  состоит в несколько разном соединении между собой кубооктаэдрических структурных единиц и в разном их пространственном расположении (табл. 2).

Кроме того, даже при одинаковой структуре алюмокремнекислородного каркаса ионообменные и селективные свойства цеолитов значительно изменяются в зависимости от числа атомов алюминия, замещающих кремний в тетраэдрах.

Специфичность цеолитов как ионобменников обусловлена сродством ионов к решетке. В связи с этим у цеолитов существует тесная связь между обменной способностью и энергией гидратации соответствующих ионов. С увеличением энергии гидратации входящего катиона, уменьшается поглощение его цеолитом.

**Таблица 2.** Физико-химические и структурные свойства синтетических цеолитов A, X, Y и эрионита [2]

Цеолит	Химическая формула	Кристаллическая структура	Параметры элементарной ячейки, нм	Размер окон, нм
NaA	$\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 4.5\text{H}_2\text{O}$	Кубическая	$a=2.464$	0.42 в 8-членных; 0.22 в 6-членных
NaX	$\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2.5\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Кубическая	$a=2.502-2.486$	0.74 в 12-членных; 0.22 в 6-членных
NaY	$\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4.8\text{SiO}_2\cdot 8.9\text{H}_2\text{O}$	Кубическая	$a=2.486$	0.74 в 12-членных; 0.22 в 6-членных
Эрионит	$0.65\cdot\text{K}_2\text{O}\cdot 0.45\cdot\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 7\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Гексагональная	$a=1.326$	0.36 x 0.52 в 8-членных кольцах

При обмене катионов в высококремнеземных цеолитах (клиноптилолит, эрионит и цеолит Y) наиболее важным фактором является взаимодействие обмениваемых ионов с решеткой, а в низкокремнеземных цеолитах, каркас которых содержит большое количество атомов алюминия, процесс обмена определяется изменением степени гидратации больших полостей. В связи с этим наиболее полно внедряется в полости высококремнеземных цеолитов эрионита и  $\text{NaY}$  слабогидратированный ион цезия, значительно слабее сорбируется ион стронция, имеющий высокие значения термодинамических характеристик гидратации [11].

Значительное влияние на сорбционное поглощение радионуклидов оказывает pH раствора. Как видно из таблицы 1, сорбция радионуклидов на всех цеолитах с ростом pH увеличивается и становится максимальной при pH=7. Дальнейший рост pH приводит к уменьшению сорбции радионуклидов. При низких значениях pH ионы водорода взаимодействуют с кислородным радикалом каркаса цеолита, вследствие чего образуются гидроксильные группы и понижается заряд матрицы. Этот процесс сопровождается уменьшением сорбционной способности цеолитов в отношении  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

Кроме того, образовавшиеся в кислых средах OH-ионы, вероятно, взаимодействуют с атомами алюминия кристаллической решетки, что приводит к разрушению сорбента и уменьшению его сорбционной способности.

Степень обмена ионов на синтетических цеолитах и распределение по кристаллографическим позициям в значительной степени зависят от температуры.

На основании рентгеноструктурных и других физико-химических методов исследования [2, 18, 19] сделано предположение, что при нагревании в цеолитах происходит значительное перераспределение катионов по их кристаллографическим позициям и наблюдается миграция ионов в структуре цеолита в результате чего они становятся более доступными для ионного обмена.

Сорбционная способность цеолитов в отношении  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  с ростом температуры возрастает (рис.2), однако температурные коэффициенты сорбции  $^{90}\text{Sr}$  значительно выше температурных коэффициентов сорбции  $^{137}\text{Cs}$ . Более резкое возрастание сорбции  $^{90}\text{Sr}$  с ростом температуры вероятно связано с уменьшением эффективного размера иона стронция за счет дегидратации, благодаря чему он может проникать в кубооктаэдрические единицы и замещать ионы натрия в позициях  $S_1$  цеолита [2, 18], что способствует полноте ионного обмена.

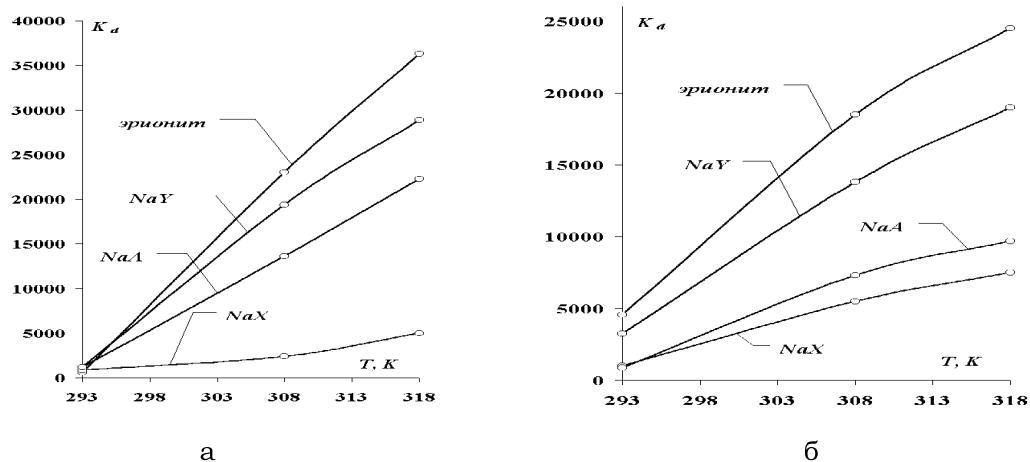


Рис.2. Зависимость коэффициентов распределения ( $K_d$ )  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  на синтетических цеолитах от температуры.

Значительное влияние на сорбционную способность цеолитов оказывает присутствие в растворе посторонних ионов и изотопных носителей (табл. 2,3).

**Таблица 3.** Влияние хлористого натрия на коэффициенты распределения ( $K_d$ ) радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  на синтетических цеолитах при  $\text{pH}=7$  и температуре 293.15

Нуклид	$C_{\text{NaCl}}$ , моль/ $\text{dm}^3$	Сорбент			
		Эрионит	NaA	NaX	NaY
		$K_d$			
$^{137}\text{Cs}^+$	0	$(4.55 \pm 0.09) \cdot 10^3$	$(8.60 \pm 0.43) \cdot 10^2$	$(9.90 \pm 0.50) \cdot 10^2$	$(3.25 \pm 0.07) \cdot 10^3$
	0.05	$77.0 \pm 7.7$	$17.0 \pm 1.7$	$20 \pm 2$	$62.0 \pm 6.2$
$^{90}\text{Sr}^{2+}$	0	$(5.80 \pm 0.29) \cdot 10^2$	$(1.22 \pm 0.04) \cdot 10^3$	$(8.40 \pm 0.42) \cdot 10^2$	$(1.19 \pm 0.04) \cdot 10^3$
	0.05	$(1.92 \pm 0.19) \cdot 10^2$	$(1.47 \pm 0.15) \cdot 10^3$	$(1.83 \pm 0.18) \cdot 10^2$	$(1.26 \pm 0.13) \cdot 10^2$

**Таблица 4.** Влияние концентрации изотопных носителей на коэффициенты распределения ( $K_d$ ) радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  на синтетических цеолитах при  $\text{pH}=7$  и температуре 293.15 К

Нуклид	$C_{\text{носителя}}$ , моль/ $\text{dm}^3$	Сорбент			
		Эрионит	NaA	NaX	NaY
		$K_d$			
$^{137}\text{Cs}^+$	0	$(4.55 \pm 0.09) \cdot 10^3$	$(8.60 \pm 0.43) \cdot 10^2$	$(9.90 \pm 0.50) \cdot 10^2$	$(3.25 \pm 0.07) \cdot 10^3$
	0.1	$54.0 \pm 5.4$	$66.0 \pm 6.6$	$45.0 \pm 4.5$	$44.0 \pm 4.4$
$^{90}\text{Sr}^{2+}$	0	$(5.80 \pm 0.29) \cdot 10^2$	$(1.22 \pm 0.04) \cdot 10^3$	$(8.40 \pm 0.42) \cdot 10^2$	$(1.19 \pm 0.03) \cdot 10^3$
	0.1	$(1.20 \pm 0.12) \cdot 10^2$	$78.0 \pm 5.8$	$82.0 \pm 8.2$	$63.0 \pm 6.3$

Повышение ионной силы раствора, созданной хлористым натрием, а также концентрации изотопного носителя приводят к резкому уменьшению  $K_d$  как  $^{90}\text{Sr}$ , так и  $^{137}\text{Cs}$ .

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в реальных условиях невозможно достичь такой высокой степени очистки воды, которую обычно получают на дистиллированной воде.

Рост количества поглощенных ионов цезия и стронция с разбавлением свидетельствует о том, что реакции ионного обмена на исследуемых цеолитах подчиняются закону действующих масс. Обнаруженное некоторыми авторами [20] отклонение от линейной зависимости между логарифмом количества поглощенных катионов и логарифмом количества катионов в равновесном растворе для реакции ионного обмена  $\text{Na} - \text{Sr}$  может быть связано с частичной рекристаллизацией структуры цеолита в результате обмена натрия на стронций.

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующий вывод. Синтетические цеолиты эрионит  $\text{NaA}$ ,  $\text{NaX}$  и  $\text{NaY}$  обладают высокой поглотительной способностью по отношению к  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  при низких равновесных концентрациях этих и посторонних ионов в растворе и могут быть использованы для очистки воды от этих радионуклидов.

Кроме того, при прочих равных условиях сорбционное извлечение  $^{137}\text{Cs}$  лучше проводить эрионитом и  $\text{NaY}$ , а  $^{90}\text{Sr}$  – цеолитами  $\text{NaA}$ ,  $\text{NaY}$  и  $\text{NaX}$ .

### Литература

1. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита М.: Мир, 1976. 606 с.
2. Пионтковская М.А. Физико-химические, адсорбционные и каталитические свойства модифицированных фазажитов. Киев: Наука думка, 1978. 204 с.
3. Кузнецов Ю.В., Щебетковский В.Н., Трусов А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. М.: Атомиздат, 1974. 360 с
4. Толмачев А.М., Никашина В.А., Челищев Н.Ф. Ионообменные свойства и применение синтетических и природных цеолитов/ / Ионный обмен. М.: Наука, 1981. С.45-63
5. Челищев Н.Ф., Беренштейн Б.Г., Володин В.Ф. Цеолиты – новый тип минерального сырья. М.: Недра, 1987. 176 с.
6. Жданов С.П., Хвощев С.С, Самулович Н.Н. Синтетические цеолиты. М.: Химия, 1981. 264 с.
7. Тарасевич Ю.И. Природные сорбенты в процессах очистки воды. К.: Наукова думка, 1981. 208 с.
8. Николина В.Я., Кныш Л.И., Соколова Н.А. Весці АН БССР, серия хімічних наук. 1966. №1. С.65-69.
9. Авт.свид.СССР “Способ получения кристаллического алюмосиликата( $\text{NaA}$ )” 925022, опубл. 04.01.82, авт.Николина В.Я., Кныш Л. И., Киркач А.И., Липкинд Б.А., Бурылов В.А., Павличев В.Н., Костина И.Д., Миронов И.А., Ахметлин М.И., Яровиков В.А., Олицук А.И.
10. Авт.свид.СССР “Способ получения синтетического цеолита ( $\text{NaY}$ )” 758703 , опубл. 28.04.80, авт. Николина В.Я., Киркач А.И., Кныш Л.И., Колосова Н.В., Липкинд Б.А., Слепнева Л.Т.
11. Красноперова А.П., Лонин А.Ю., Юхно Г.Д., Лебедева Л.Т., Далецкая Н.В. Вісник Харківського національного університету. Хімія. 2001. №532. Вип. 7(30). С.145-148.
12. Radak V.M., Gal I.J., Salai J.J. J.Chem.Soc., Faraday Trans. Part 1. 1976. V.5. P.1150-1156.
13. Rao A.V., Rees L.V.C. Kinetics of ion exchange in mordenite. Trans. Faraday Soc. 1966. V.62. P.2505-2507.
14. Wolf F., Gols C., Glos C., Pilchowski K. Ztschr. Phys. Chem. 1976. Bd.257. No.6. S.1137-1147.
15. Ames L.L. Amer. Miner. 1962. V.47. P.1310-1317.
16. Barrer R.M. Brit. Chem. Eng. 1959. V.4. No.5. P.267-279.
17. Barrer R. M. Chem. and Ind. 1962. V.14. No.2. P.2158-2166.
18. Пионтковская М.А., Тарануха О.М., Бобонич Ф.М., Неймарк И.Е., Галин П.Н., Лебедев Я.С. Неорганические ионообменные материалы. Вып.1. Л. 1974. С.140-152.
19. Barry T.J., Lay L.A. J. Phys. and Chem. Solids. 1968. V.29. No.11-12. P.1821-1831.

20. Ермоленко Н.Ф., Ширинская Л.П., Зарецкий М.В. Весці АН БССР, серыя хімічних наук. 1963. №2. С.111-114.

*Поступила в редакцию 17 сентября 2002 г.*

Kharkov University Bulletin. 2002. №549. Chemical Series. Issue 8(31). A.P.Krasnopyorova, G.D.Yuhno, L.T.Lebedeva, N.V.Daletskaya, A.Y.Lonin. Sorption-selective properties of some synthetic zeolites with respect to radionuclides  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$ .

Sorption-selective properties of synthetic zeolites (erionyte, NaA, NaX, NaY) with respect to  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  radionuclides were studied in relation to pH, foreign electrolyte, carrier and temperature. High silica zeolites of erionyte and NaY zeolite have the best sorption characteristics in respect to  $^{90}\text{Sr}$  (99%). pH of sorption and temperature exert a major influence on radionuclides sorption with synthetic zeolites. Radionuclide sorption was shown to decrease with the increase in foreign electrolyte concentration and isotope carrier, it increases with the rise of temperature .