



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.1; 628.16

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/10564

Критерии существования самоподдерживающихся процессов умягчения и опреснения воды для простой двухкомпонентной системы

**Андрей Гаральдович Прудковский¹✉,
Руслан Хажсетович Хамизов, Ирина Владимировна Комарова**

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской Академии наук, Москва, Россия, prudkovsky@gmail.com✉

Аннотация. Ещё во второй половине прошлого века возникла идея создания безреагентных процессов умягчения и очистки воды. Смысл идеи в том, что регенерация колонны после умягчения производится концентратом раствора, полученного после удаления очищенной воды. Фундаментальная причина принципиальной реализуемости подобных процессов состоит в так называемом «эффекте электроселективности», состоящим в том, что при одном и том же соотношении эквивалентных концентраций разнозарядных катионов в растворе, селективность катионита к ионам с меньшим зарядом повышается с увеличением суммарной концентрации катионов. Интерес к самоподдерживающимся процессам умягчения-опреснения (СМП) связан с новыми технологическими возможностями создания систем водоподготовки нового поколения, например, мобильных автономных установок или систем с высокой степенью извлечения пресной воды и концентрирования рассола.

Как показывают наши теоретические исследования, подобный процесс возможен при выполнении некоторых условий. Именно для уточнения этих условий нами и был поставлен численный эксперимент на простейшем нейтральном двухкомпонентном растворе, содержащем катионы кальция и натрия, а также анионы хлора. Выведены формулы для трёх критериев существования СМП-процессов.

Как показали наши расчёты, СМП-процессы возможны только в случае растворов, содержащих ограниченную концентрацию ионов кальция, которая не должна превышать одной десятой от ёмкости употребляемого сорбента. Кроме того, на характеристики самоподдерживающихся процессов, оказывают также влияние: суммарная концентрация ионов и степень концентрирования в опреснителе. Все эти условия выражены в виде критерия, который можно оценить не только по формулам, но и практически по результатам исследования первого цикла реального процесса. Результаты статьи могут быть обобщены для более сложных систем.

Ключевые слова: самоподдерживающиеся процессы, умягчение, опреснение, катионит, сорбция, регенерация, стационарный режим.

Для цитирования: Прудковский А.Г., Хамизов Р.Х., Комарова И.В. Критерии существования самоподдерживающихся процессов умягчения и опреснения воды для простой двухкомпонентной системы // *Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22, № 4. С. 377-385.* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10564>

Original article

Criteria for the existence of self-sustaining water softening and desalination processes for a basic two-component system

Andrey G. Prudkovskii¹✉, Ruslan Kh. Khamizov¹, Irina V. Komarova¹

¹Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Science Moscow, Russian Federation, prudkovsky@gmail.com✉

Abstract. The idea of reagentless softening and purification of water appeared in the first half of the 20th century. The idea implies that the regeneration of the column after softening is performed using a solution concentrate obtained after removing the purified water. The possibility of the implementation of such processes is accounted for by the so-called electroselectivity effect. It means that when using the same ratio of equivalent concentrations of multi-charge cations in the solution, the selectivity of the cation exchanger to ions with smaller charges increases with an increase in the total concentration of cations. The interest to self-sustaining softening and purification processes has been induced by new technological capabilities for the creation of the next-generation water treatment systems, for instance mobile systems or systems ensuring a high degree of extraction of fresh water and brine concentration.

Our theoretical study demonstrated that the process is possible under certain conditions. To determine these conditions we conducted a numerical experiment using a basic neutral two-component solution containing calcium and sodium cations and chlorine anions. The study determined the formulae for three criteria for a self-sustaining process.

Our calculations demonstrated that self-sustaining processes are only possible in solutions containing a limited concentration of calcium ions, which should be below one tenth of the volume of the sorbent used. The characteristics of self-sustaining processes are also affected by the total concentration of ions and the degree of concentration in the distiller. These conditions are presented as a criterion which can be assessed using the suggested formulae as well as based on the results of the practical study of the first cycle of the actual process. The results of the study can be generalised and propagated to more complex systems.

Keywords: self-sustaining processes, softening, desalination, cation exchanger, sorption, regeneration, stationary mode

For citation: Prudkovskii A.G., Khamizov R. Kh., Komarova I.V. Criteria for the existence of self-sustaining water softening and desalination processes for a basic two-component system. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(4): 377-385. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10564>

Введение

Первые исследования возможности существования самоподдерживающихся процессов умягчения-опреснения (СМП) проводились в 70-годах прошлого столетия в лаборатории конверсии морской воды Калифорнийского университета [1, 2]. Эта идея, развитая впоследствии в наших работах [3, 4], заключается в следующем: в повторяющемся циклическом процессе через колонну с катионитом в *Na*-форме пропускается раствор, содержащий катионы натрия и кальция, последние сорбируются в результате реакции ионного обмена, умягченная вода подвергается глубокому опреснению без опасности образования отложений слабо-растворимых веществ, рассол, содержащий только соли натрия, накапливается и возвращается на регенерацию катионита после его отработки для вытеснения катионов жесткости и обратного перевода катионита в *Na*-форму. Весь процесс проиллюстрирован на рис.1.

В начале циклического процесса колонна загружена сорбентом КУ-2, нахо-

дящимся в натриевой форме, при умягчении натрий вытесняется кальцием. Объем сорбента W , здесь численный эксперимент идет на колонне объемом $W=0.196\text{ м}^3$. В соответствии со схемой (рис. 1) циклический процесс имеет следующие фазы:

1) на колонну подается поток электролита, содержащий катионы натрия и кальция с концентрациями C_{Na} (моль-экв/дм³) и C_{Ca} (моль-экв/дм³), а также анионы хлора $C_{Cl}=C_0=C_{Na}+C_{Ca}$.

2) процесс умягчения ведется до проскока ионов кальция с заданной концентрацией $C_{pr} \ll C_{Ca}$; $C_{pr} \ll C_{Na}$, здесь принято $C_{pr}=0.005$ (моль-экв/дм³);

3) получившийся объем V_S умягченной воды, содержащей в основном только ионы натрия, подается на блок опреснителя;

4) после опреснителя поток делится на опресненную воду, концентрация катионов в которой равна C_W (моль-экв/дм³) и концентрат с содержанием ионов натрия C_R (моль-экв/дм³), в данной работе $C_W=0.005$, $C_R=1$;

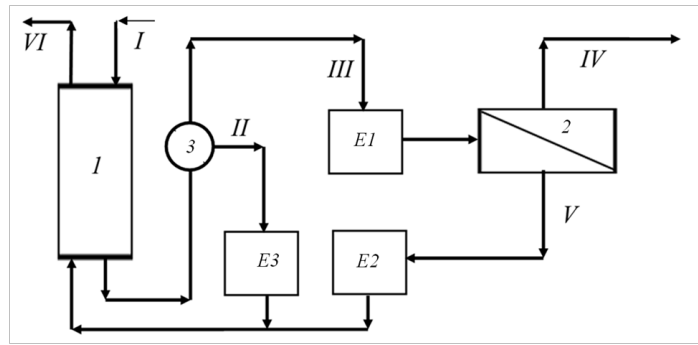


Рис. 1. Схема СМП-процесса: 1 – колонна с катионитом; 2 – опреснитель; 3 – переключающее устройство потоков со стадии вытеснения электролита на стадию умягчения; E1 – бак для умягченной воды; E2 – бак для регенерационного рассола; E3 – бак для электролита, вытесненного из межзернового пространства слоя катионита; I – поток исходной воды; II – поток электролита, вытесненного из межзернового пространства слоя катионита; III – поток умягченной воды; IV – поток опресненной воды; V – поток регенерирующего рассола; VI – сброс.

Fig. 1. A scheme of a self-sustaining process: 1 – column with the cationite; 2 – distiller; 3 – a device for switching the flows from forcing out the electrolyte to the softening stage; E1 – water softening tank; E2 – regeneration brine tank; E3 – a tank for the electrolyte forced out of the inter-grain space of the cationite layer; I – cold water flow; II – flow of the electrolyte forced out of the inter-grain space of the cationite layer; III – softened water flow; IV – desalinated water flow; V – regeneration brine flow; VI – discharge.

5) поток концентрата с концентрацией C_R подаётся на регенерацию колонны в противоточном режиме;

6) после регенерации колонны отработанный раствор уходит на сброс и начинается новый цикл процесса.

Кроме того, процесс содержит малый цикл II, связанный с отмывкой колонны от содержимого жидкой фазы. Объём раствора, циркулирующий в этом цикле, не превышает объёма колонны W и много менее объёма раствора V_S , циркулирующего в основном цикле.

Целью данной работы было найти условия, при которых процесс мог бы стать замкнутым и безреагентным, то есть, без дополнения каких-либо ещё реагентов, кроме входного электролита.

Теоретическая часть

Численное моделирование эксперимента производилось программой, созданной в ГЕОХИ, алгоритм работы которой подробно описан в [5]. Стадия умягчения заканчивается в момент заданного проскока кальция на выходе из колонны, при этом количество кальция, сорбируемого в колонне, составляет $C_{Ca}V_S$. Количество натрия, выходящего

из колонны состоит из натрия, поданного на колонну извне, плюс количество натрия, вытесненного из колонны кальцием входного раствора. Таким образом, на выходе из колонны получаем следующее количество кальция $(C_{Na} + C_{Ca})V_S = C_0V_S$. Процесс концентрирования-опреснения управляется коэффициентами:

$$k_W = \frac{C_W}{C_0} < 1 \quad k_R = \frac{C_R}{C_0} > 1 \quad (1)$$

Выписывая материальные уравнения для объёма раствора и количества натрия в нём, получаем для объёмов концентрата V_R и опреснённой воды V_W :

$$\begin{cases} V_R + V_W = V_S \\ C_R V_R + C_W V_W = C_0 V_S \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_R + V_W = V_S \\ k_R V_R + k_W V_W = V_S \end{cases} \quad (2)$$

$$V_W = \frac{k_R - 1}{k_R - k_W} V_S$$

$$V_R = V_S - V_W = \left[1 - \frac{k_R - 1}{k_R - k_W} \right] V_S = \frac{1 - k_W}{k_R - k_W} V_S ;$$

Для удобства дальнейшего изложения введём обозначение $Q_R = \frac{1 - k_W}{k_R - k_W} \equiv \frac{C_0 - C_W}{C_R - C_W}$,

которое будет определять связь между

объемами умягчённой воды и концентратом, которым затем производится регенерация колонны $V_R = Q_R V_S$.

При циклическом процессе всё дополнительное количество кальция, добавленное при умягчении, должно быть заменено натрием при регенерации, откуда имеем первый критерий R_C возможности существования циклического процесса:

$$V_R \cdot C_R > V_S C_{Ca} \Rightarrow R_C = \frac{Q_R C_R}{C_{Ca}} > 1 \quad (3)$$

Формула (3) для критерия R_C полностью аналогична формуле критерия R_C , предложенной в работе [4] для более сложной системы.

Второй критерий, управляющий циклическим процессом, получается в результате рассмотрения первой сорбции, когда возможно точно определить объём $V_S = \frac{a_0 W}{C_{Ca}}$. Учитывая, что нормальная работа процесса происходит при $V_S \gg W$, второй критерий R_A можно записать в виде:

$$R_A = \frac{a_0}{C_{Ca}} \gg 1 \quad (4)$$

Как показали исследования с помощью модельных расчётов, конкретная величина критерия R_A зависит от длины колонны. Для колонны в один метр это значение равно 10, для колонн меньшей длины коэффициент R_A увеличивается, а для большей длины колонны может незначительно снижаться. Для колонок малой длины следует учитывать ещё один критерий:

$$R_H = \frac{L}{H} \gg 1, \quad (5)$$

где L – длина колонны, а H – высота теоретической тарелки ВЭТТ [6, 7], определяющая диффузионное размытие:

$$H = 2v \left[\frac{D_L}{v^2} + \frac{1}{\beta} + \theta \right] \quad (6)$$

где D_L – коэффициент продольной диффузии, v – линейная скорость потока, коэффициент $\beta^{-1} \sim v^{-0.5}$ определяет характерное время внешней диффузии, а θ –

характерное время внутренней диффузии [7].

Экспериментальная часть

Для численного эксперимента мы использовали систему, показанную на рис.1, со следующими параметрами.

Колонна, заполнена сорбентом КУ-2, ёмкостью $a_0 = 2$ кг-экв/м³, диаметром 0.5 м, высота слоя сорбента 1 м, скорость потока при сорбции пять колоночных объёмов в час, при регенерации – один колоночный объём в час. Электролит содержит ионы хлора, натрия и кальция. Конец процесса умягчения определялся по проскоку кальция 0.005N, такая же величина была выбрана и для опреснённой воды $C_{Cl} = 0.005N$. Регенерация проводилась одонормальным раствором $NaCl$: $C_R = 1N$.

Численный эксперимент проводился для двух суммарных концентраций анионов и катионов в умягчаемой воде: $C_{Cl} = C_0 = \{0.1 \text{ и } 0.3\}$ (моль-экв/дм³); концентрации катионов натрия и кальция варьируются как отношения: 1:4, 1:1, 4:1. Условия численных экспериментов приведены в таблице 1. Результаты численных экспериментов представлены в таблицах 2 и 3, а также на рисунках 2-5.

Как показали расчёты, циклический СМП-процесс был получен для всех вариантов начальных данных, кроме варианта $A23$ ($C_{Na} = 0.006N$; $C_{Ca} = 0.024N$; $R_A = 8$; $R_C = 1.24$), в котором критерий $R_A = 8$ менее 10. Решено было найти гипотетический сорбент большей ёмкостью, который позволял бы увеличить критерий R_A при постоянном значении критерия $R_C = 1.24$ так, чтобы восстановить условия СМП-процесса. Такой сорбент был найден численным перебором. При ёмкости сорбента $a_0 = 5$ кг-экв/м³ найден СМП-процесс $A24$ с теми же входными концентрациями $C_{Na} = 0.006N$, $C_{Ca} = 0.024N$, но с увеличением значения критерия R_A за счёт увеличения ёмкости сорбента $R_A = 21$, при этом значение второго критерия осталось прежним $R_C = 1.24$.



Таблица 1. Начальные условия численных экспериментов (вариант A24 моделирует процесс на сорбенте с $a_0=5$)

Table 1. Initial conditions in numerical experiments (variant A24 simulates the process on the sorbent $a_0=5$)

Варианты	Концентрации (моль-экв)			Критерии		
	C_0	N_a	C_a	Q_R	R_a	R_c
A11	0.1	0.08	0.02	0.095	100	4.77
A12	0.1	0.05	0.05	0.095	40	1.9
A13	0.1	0.02	0.08	0.095	25	1.19
A14	0.1	0.008	0.092	0.095	22	1.03
A21	0.3	0.24	0.06	0.296	33	4.9
A22	0.3	0.15	0.15	0.296	13	1.98
A23	0.3	0.06	0.24	0.296	8	1.24
A24	0.3	0.06	0.24	0.296	21	1.24

Таблица 2. Объемы умягченного раствора в зависимости от номера цикла СМП-процесса.

Концентрация на входе $C_0=0.1$ моль-экв/дм³

Table 2. Volumes of the softened solution depending on the number of the cycle of the self-sustaining process. The inlet concentration is $C_0=0.1$ mol-eq/dm³

Номера циклов	Варианты							
	A11	A12	A13	A14	A21	A22	A23	A24
0	79.62	36.06	23.85	21.1	22.12	11.07	7.657	19.1
1	70.7	25.86	14.55	12.08	18.21	7.22	4.192	9.608
2	69.49	23.61	12.25	9.9	17.47	6.321	3.342	7.183
3	69.21	22.69	11.05	8.683	17.22	5.887	2.823	6
4	69.14	22.29	10.33	7.894	17.13	5.66	2.39	5.263
5	69.12	22.1	9.858	7.336	17.1	5.531	2.027	4.734
6	69.12	22.02	9.542	6.919	17.09	5.455	1.702	4.327
7	69.12	21.97	9.317	6.592	17.08	5.412	1.358	4.017
8	69.12	21.96	9.15	6.331	17.08	5.388	0.8725	3.788
9	69.12	21.95	9.025	6.116	17.08	5.372	-	3.607
10	69.12	21.94	8.942	5.937	17.08	5.362	-	3.464
11	69.12	21.94	8.875	5.785	17.08	5.359	-	3.339
12	69.12	21.94	8.817	5.653	17.08	5.356	-	3.243
13	69.12	21.94	8.783	5.537	17.08	5.352	-	3.173
14	69.12	21.94	8.75	5.438	17.08	5.352	-	3.114
15	69.12	21.94	8.733	5.352	17.08	5.352	-	3.058
157	69.12	21.94	8.733	4.46	17.08	5.352	-	2.81
158	69.12	21.94	8.733	4.46	17.08	5.352	-	2.81

Для варианта A13 СМП-процесс также близок к срыву в силу малости критерия $R_c=1.19$. Критерий R_A для варианта A13 большой: $R_A=25$. В связи с этим, мы решили проверить, при каком значении коэффициента R_c наступит срыв СМП-процесса. Так, методом перебора было найдено последнее возможное значение критерия $R_c=1.03$, ниже этого значения СМП-процесс перестает существовать. Вариант A14 с входными концентрациями $C_{Na}=0.008N$, $C_{Ca}=0.092N$, $R_A=22$,

$R_c=1.03$ представлен в таблицах и на рисунках.

Обсуждение результатов

Численные эксперименты показали возможность существования СМП – процессов и влияние на эти процессы введённых здесь критериев R_A и R_c . Следует также отметить, что начальный этап умягчения на колонке, находящейся в

Таблица 3. Объёмы регенерационного раствора в зависимости от номера цикла СМП-процесса. Концентрация на входе $C_0=0.3$ моль-экв/дм³

Table 3. Volumes of the regeneration solution depending on the number of the cycle of the self-sustaining process. The inlet concentration is $C_0=0.3$ mol-eq/dm³

Номера циклов	Варианты							
	A11	A12	A13	A14	A21	A22	A23	A24
0	7.593	3.438	2.275	1.978	6.488	3.212	2.202	5.593
1	6.742	2.463	1.385	1.149	5.392	2.135	1.237	2.84
2	6.625	2.248	1.165	0.9405	5.172	1.865	0.9825	2.118
3	6.598	2.16	1.049	0.8237	5.097	1.735	0.8275	1.763
4	6.592	2.122	0.9803	0.7478	5.07	1.666	0.6992	1.543
5	6.59	2.103	0.9352	0.6942	5.06	1.627	0.5922	1.386
6	6.59	2.095	0.9045	0.6542	5.055	1.604	0.4972	1.265
7	6.59	2.092	0.8825	0.6228	5.055	1.592	0.3967	1.174
8	6.59	2.09	0.867	0.5977	5.053	1.585	0.2547	1.107
9	6.59	2.088	0.8553	0.5772	5.053	1.58	-	1.053
10	6.59	2.088	0.847	0.56	5.053	1.577	-	1.012
11	6.59	2.088	0.8403	0.5453	5.053	1.576	-	0.9748
12	6.59	2.088	0.8353	0.5327	5.053	1.575	-	0.9468
13	6.59	2.088	0.8318	0.5215	5.053	1.574	-	0.9265
14	6.59	2.088	0.8287	0.512	5.053	1.574	-	0.909
15	6.59	2.088	0.8267	0.5038	5.053	1.574	-	0.8925
157	6.59	2.088	0.8267	0.418	5.053	1.574	-	0.82
158	6.59	2.088	0.8267	0.418	5.053	1.574	-	0.82

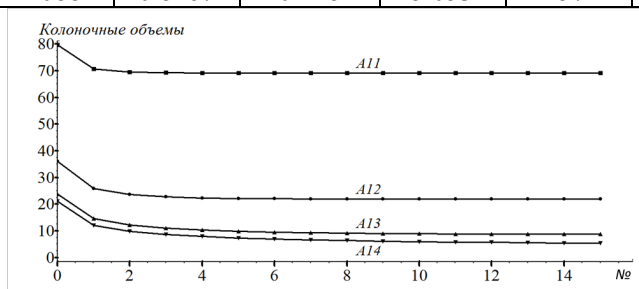


Рис. 2. Объёмы умягчённого раствора для вариантов A11-A14 в зависимости от номера цикла. Концентрация на входе $C_0=0.1$ моль-экв/дм³

Fig. 2. Volumes of the softened solution for A11-A14 variants depending on the number of the cycle. The inlet concentration is $C_0=0.1$ mol-eq/dm³

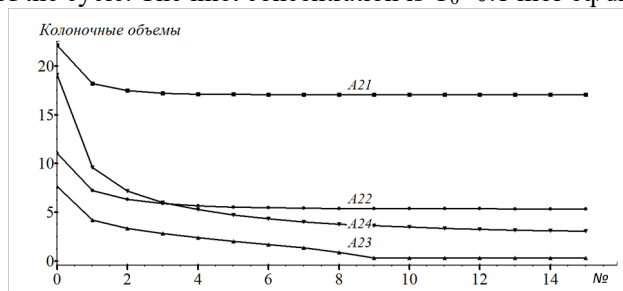


Рис. 3. Объёмы умягчённого раствора для вариантов A21-A24 в зависимости от номера цикла. Концентрация на входе $C_0=0.3$ моль-экв/дм³

Fig. 3. Volumes of the softened solution for A21-A24 variants depending on the number of the cycle. The inlet concentration is $C_0=0.3$ mol-eq/dm³

натриевой форме, позволяет оценить критерии R_A и R_H экспериментально без расчётов по формулам (4, 5). Так, критерий

R_A равен объёму раствора V_S , полученному до проскока кальция, делённому на

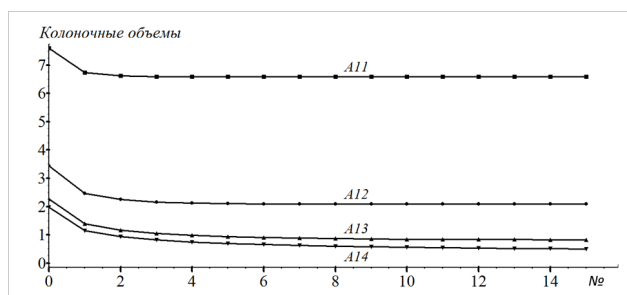


Рис. 4. Объёмы регенерационного раствора для вариантов A11-A14 в зависимости от номера цикла. Концентрация на входе $C_0=0.1$ моль-экв/дм³

Fig. 4. Volumes of the regeneration solution for A11-A14 variants depending on the number of the cycle. The inlet concentration is $C_0=0.1$ mol-eq/dm³

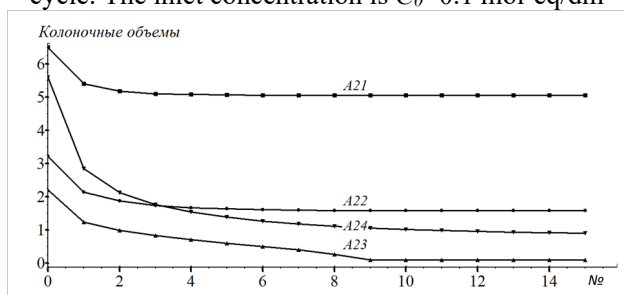


Рис. 5. Объёмы регенерационного раствора для вариантов A21-A24 в зависимости от номера цикла. Концентрация на входе $C_0=0.3$ моль-экв/дм³

Fig. 5. Volumes of the regeneration solution for A21-A24 variants depending on the number of the cycle. The inlet concentration is $C_0=0.3$ mol-eq/dm³

Таблица 4. Величины H – высоты теоретической тарелки ВЭТТ и критерия R_H для разных вариантов счёта

Table 4. H-heights of the theoretical plate HETP and criterion R_H for various calculation variants

Номера циклов	Варианты							
	A11	A12	A13	A14	A21	A22	A23	A24
L_H (см.)	98.6	97.3	96.6	94.6	93.4	93.0	92.5	92.7
H (см.)	2.8	5.4	6.8	10.8	13.2	14.0	15.0	14.6
R_H	36	18	15	9	7.6	7.0	6.6	6.8

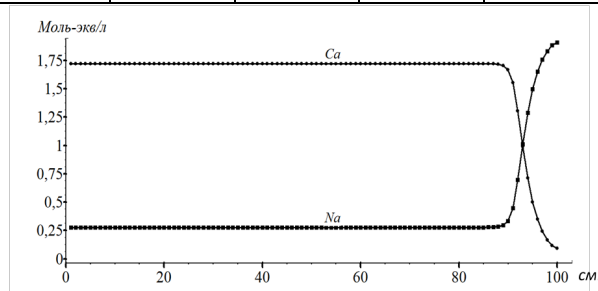


Рис. 6. Содержимое колонны после первой сорбции для варианта A22 в зависимости от длины колонны. Графики концентраций кальция и натрия пересекаются в сечении 93 см, высота тарелки равна 14 см, а критерий $R_H=7$.

Fig. 6. The content of the column after the first sorption for the A22 variant depending on the length of the column. Concentration graphs of calcium and sodium intersect in the cross-section of 93 cm, the height of the plate is 14 cm, and the criterion $R_H=7$.

объём сорбента в колонне: $R_A = \frac{V_s}{W}$. Критерий $R_H > 1$ можно рассчитать по размы-

тию фронта концентраций натрия и кальция в колонке после сорбции. Для этого достаточно найти сечение колонны L_H , в котором концентрации кальция и натрия

равны между собой. Расстояние от этого сечения до конца колонны приблизительно равно половине величины ВЭТТ: $H = 2(L - L_H)$; $R_H = L/H$. Аналогично можно оценить критерий R_H и по выходной кривой до момента V_H равенства концентраций натрия и кальция $R_H = V_S / \{2(V_H - V_S)\}$. Результаты оценок критерия R_H для представленных здесь вариантов счёта представлены в таблице 4, а пример содержимого колонны для варианта A22 дан на рисунке 6.

Критерий R_C также можно получить экспериментально, измерив концентрацию натрия в концентрате C_R и его объём V_R , полученные после опреснителя: $R_C = \frac{C_R V_R}{C_{Ca} V_S}$, где C_{Ca} – концентрация кальция во входном растворе.

Заключение

Проведённые численные эксперименты показали условия существования

Список литературы

1. Klein G., Vermeulen T. Cyclic performance of layered beds for binary ion exchange // *AICHE Symp. Ser.* 1975. Vol. 71. No 152. pp. 69-76.
2. Klein G. Design and development of cyclic operations // *NATO ASI Ser. Ser.E.* 1981. Vol. 33. pp. 427-441.
3. Хамизов Р.Х., Комарова И.В. Галкина Н.К., Прудковский А.Г. Самоподдерживающиеся процессы умягчения-опреснения воды. Простые двухкомпонентные системы // *Теоретические основы химической технологии.* 2020. Т.54. №5. С. 649-660.
4. Хамизов Р.Х., Комарова И.В. Галкина Н.К., Прудковский А.Г. Самоподдерживающиеся процессы умягчения-опреснения воды. Хлоридно-сульфатные системы // *Теоретические основы химической технологии.* 2022. Т.56. № 2. С. 183-196.
5. Комарова И.В., Галкина Н.К., Прудковский А.Г., Хамизов Р.Х., Математическое моделирование и расчет процесса

циклических СМП-процессов в простейших хлоридных натрий-кальциевых системах. Исследована связь найденных критериев R_A , R_C , R_H с возможностью существования замкнутого безреагентного процесса. Найденные значения критериев $R_A=10$, $R_C=1$, $R_H=1$ являются критическими в идеальных системах, практически следует использовать увеличенные значения этих коэффициентов $R_A>20$, $R_C>1.2$, $R_H>5$. Результаты статьи могут быть обобщены на более сложные системы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

деминерализации воды в промышленном фильтре Сообщение 1. Гидродинамика регенерации и отмывки промышленного фильтра // *Сорбционные и хроматографические процессы.* 2017. Т.17. №1. С.10-19.

6. Долгонос А.М. Критерий выбора неподвижных фаз для повышения производительности хроматографического анализа // *Журнал аналитической химии.* 2019. Т. 74. № 4. С. 279-284.

7. Долгонос А.М., Рудаков О.Б., Прудковский А.Г. Колоночная аналитическая хроматография: практика, теория, моделирование. СПб. Лань. 2015. 468 с.

References

1. Klein G., Vermeulen T. Cyclic performance of layered beds for binary ion exchange // *AICHE Symp. Ser.* 1975; 71(152): 69-76.
2. Klein G. Design and development of cyclic operations. *NATO ASI Ser. Ser.E.* 1981; (33): 427-441.
3. Khamizov R. Kh., Komarova I.V., Galkina N.K., Prudkovskii A.G. Self-Sustaining Processes of Water Softening and



Desalination: Simple Two-Component Systems. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020; 54(5): 919-930.

4. Khamizov R. Kh., Komarova I.V., Galkina N.K., Prudkovskii A.G. Self-Sustaining Water Softening-Desalination Processes: Chloride-Sulfate Systems. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2022; 56(2): 186-199.

5. Komarova I.V., Galkina N.K., Prudkovskii A.G., Khamizov R.Kh. Mathematical simulation and calculation of the process of water demineralization in industrial filter

part 1. Hydrodynamics of regeneration and washing of industrial filter. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskie protsessy*. 2017; 17(1): 10-19.

6. Dolgonosov A.M. A criterion of selection of stationary phases for improving the performance of chromatographic analysis. *Journal of Analytical Chemistry*. 2019; 74(4): 376-381.

7. Dolgonosov A.M., Rudakov O.B., Prudkovskii A.G. Kolonochnaja analiticheskaja hromatografija: praktika, teorija, modelirovanie. SPb: Lan. 2015. 468 p

Информация об авторах / Information about the authors

А.Г. Прудковский – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, лаборатория сорбционных методов, ГЕОХИ РАН, Москва, Россия

Р.Х. Хамизов – чл.корр., зав. лаборатории сорбционных методов, ГЕОХИ РАН, Москва, Россия

И.В. Комарова – к.х.н., старший научный сотрудник, лаборатория сорбционных методов, ГЕОХИ РАН, Москва, Россия

A.G. Prudkovskii – Dr.Sci. (Phys/Math.), Leading researcher, Lab of Sorption Methods, GEOKHI RAS, Moscow, Russian Federation, prudkovsky@gmail.com

R.Kh. Khamizov – Dr.Sci.(Chem), Head of the Laboratory of Sorption Methods, GEOKHI RAS, Moscow, Russian Federation, khamiz@mail.ru

I.V. Komarova – Ph.D. (Chem.), Senior researcher, Lab of Sorption Methods, GEOKHI RAS, Moscow, Russian Federation, ivk.geohi@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 29.07.2022; принята к публикации 02.08.2022.

The article was submitted 15.07.2022; approved after reviewing 29.07.2022; accepted for publication 02.08.2022.