



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.1

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12401

Самоподдерживающийся процесс умягчения – опреснения воды в простой двухкомпонентной системе. Экспериментальная проверка адекватности модели и расчет стационарного процесса в условиях эксперимента

Надежда Константиновна Колотилина[✉],

Андрей Гаральдович Прудковский, Руслан Хажсетович Хамизов

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия,
nkolotilina@mail.ru[✉]

Аннотация. Самоподдерживающийся процесс умягчения – обессоливания (СМП – процесс) включает в себя чередующиеся стадии умягчения воды на колонне с катионитом в натриевой форме, глубокое обессоливание умягченной воды дистилляцией, обратный перевод катионообменника в натриевую форму при противоточной регенерации рассолом, образующийся при обессоливании. Дополнительного расхода реагентов для регенерации практически не требуется. Две колонны с катионитом, работающие в противофазе, позволяют организовать непрерывные циклы умягчения – регенерации. В данной работе в лабораторных условиях изучали СМП-процесс в простой системе – катионообменник КУ-2х8 в натриевой форме и раствор хлоридных солей кальция и натрия. Задачей исследования являлась проверка адекватности математической модели СМП-процесса и расчет всех его циклов с целью проверки возможности наступления стационарного режима. Экспериментально воспроизводили цикл «0» СМП-процесса. Исходный раствор пропускали через колонку с катионитом в натриевой форме. Стадию сорбции останавливали при значении концентрации иона кальция на выходе из колонки 0.005 моль-экв/дм³. Получали выходную кривую сорбции иона кальция. Определяли содержание компонентов во всем объеме умягченной воды. Задавали концентрацию иона натрия в регенерационном растворе – 1 моль-экв/дм³, рассчитывали коэффициент концентрирования при обессоливании и готовили раствор для регенерации. Проводили противоточную регенерацию, расходуя весь объем полученного регенерационного раствора. Получали выходную кривую регенерации иона кальция. Определяли концентрации компонентов в фильтрате. Численный эксперимент проводили с использованием программы «Createscheme». Программа имитирует полную технологическую схему СМП процесса и рассчитывает его ионообменные стадии. Проверку адекватности математической модели проводили сопоставлением экспериментальных и расчетных выходных кривых иона кальция при сорбции и регенерации. Также сравнивали расчетные и экспериментальные составы технологических растворов после ионообменных стадий цикла «0» СМП-процесса. Экспериментально подтвердили правильность математической модели. Рассчитали СМП-процесс до наступления стационарного режима, начиная с 10 цикла. Расчетным путем установили, что при стационарном режиме используется только 2/3 обменной емкости катионита. Остальная часть обменной емкости блокируется ионом кальция. Снижение эффективности ионообменных стадий – недостаток самоподдерживающихся процессов. Показали, что математическое моделирование и численный эксперимент необходимы при изучении и организации самоподдерживающегося процесса.

Ключевые слова: ионный обмен, умягчение - обессоливание, самоподдерживающиеся процессы, эксперимент, моделирование, адекватность модели.

Благодарности: работа выполнена за счет средств бюджетного финансирования Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук.

Для цитирования: Колотилина Н.К., Прудковский А.Г., Хамизов Р.Х. Самоподдерживающийся процесс умягчения – опреснения воды в простой двухкомпонентной системе. Экспериментальная проверка адекватности модели и расчет стационарного процесса в условиях эксперимента // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 4. С. 438-447. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12401>



Original article

Self-sustaining process of softening – desalination in a simple two-component system. Experimental verification of adequacy of the mathematical model and the calculation of a stationary process under experimental conditions

Nadezhda K. Kolotilina[✉], Andrei G. Prudkovsky, Ruslan Kh. Khamizov

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, nkolotilina@mail.ru[✉]

Abstract. Self-sustaining softening – the desalination process (SSP) includes alternating stages of water softening in a column with a cation exchanger in the sodium form, deep desalination of softened water by distillation, and the reverse conversion of the cation exchanger to the sodium form during counter-current regeneration with brine formed during desalination. Almost no additional reagents were required for regeneration. Two columns with a cation exchanger operating in antiphase allowed organizing continuous softening – regeneration cycles. In this work, the SSP was studied in laboratory conditions in a simple system – a KU-2x8 cation exchanger in the sodium form and a solution of calcium and sodium chloride salts. The objective of the study was to verify the adequacy of the mathematical model of the SSP and calculate all its cycles in order to verify the possibility of achieving a stationary mode. Cycle “0” of the SSP was experimentally reproduced. The initial solution was passed through a column with a cation exchanger in the sodium form. The sorption stage was stopped when the concentration of calcium ion at the column outlet was 0.005 mol-eq/l. We obtained the output curve of calcium ion sorption. The content of components was determined in the entire volume of softened water. We set the concentration of sodium ion in the regeneration solution at 1 mol-eq/l, calculated the concentration coefficient during desalination, and prepared the solution for regeneration. Counter-current regeneration was performed using the entire volume of the resulting regeneration solution. We obtained the output curve of calcium ion regeneration. The concentrations of components in the filtrate were determined. The numerical experiment was conducted using the Createscheme program. The program simulates the complete technological scheme of the SSP and calculates its ion-exchange stages. The adequacy of the mathematical model was checked by comparing the experimental and calculated output curves of calcium ions in the course of sorption and regeneration. The calculated and experimental compositions of technological solutions after the ion-exchange stages of cycle «0» of the SSP were also compared. We experimentally confirmed the correctness of the mathematical model. The SSP was calculated before the beginning of the stationary mode, starting from the 10th cycle. It was calculated that only 2/3 of the exchange capacity of the cation exchanger was used in the stationary mode. The rest of the exchange capacity was blocked by calcium ions. The decreased efficiency of ion-exchange stages is a disadvantage of self-sustaining processes. It was shown that mathematical modelling and a numerical experiment were necessary when studying and organizing a self-sustaining process.

Keywords: ion exchange, softening – desalination, self-sustaining processes, experiment, modelling, adequacy of the model.

Acknowledgments: the work was supported by state funding of the Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Kolotilina N.K., Prudkovsky A.G., Khamizov R.H. Self-sustaining process of softening – desalination in a simple two-component system. Experimental verification of adequacy of the mathematical model and the calculation of a stationary process under experimental conditions. *Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy*. 2024. 24(4): 438-447. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12401>

Введение

В настоящее время к технологическим процессам предъявляются все более жесткие требования, касающиеся ресурсосбережения и минимизации экологиче-

ского ущерба. Именно поэтому разработка самоподдерживающихся (СМП) ионообменных технологий опреснения воды является актуальной. Основная идея СМП-процесса заключается в следующем: умягченная с помощью катионита исходная соленая вода подвергается

опреснению, а образующийся при этом рассол используется для противоточной регенерации катионита в повторяющихся циклах сорбции – десорбции. Две колонны с катионитом, работающие в противофазе, позволяют организовать непрерывные циклы умягчения – регенерации. Дополнительного расхода химических реагентов при этом практически не требуется. Теоретическое обоснование возможности организации самоподдерживающихся процессов приводится в работе [1]: такие процессы могут быть реализованы благодаря эффекту электроселективности в ионном обмене, когда 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. Кроме того, при одной и той же суммарной концентрации раствора селективность сорбента к иону с большим зарядом, как правило, повышается с уменьшением его эквивалентной доли в растворе.

В работах [1-3] авторы приводят результаты исследования самоподдерживающегося процесса умягчения - обессоливания методом математического моделирования. Рассчитывались технологические циклы до наступления стабилизации процесса при разных значениях его параметров. Показано [2], что на продолжительность стадий сорбции и регенерации стационарного СМП-процесса сильное влияние оказывают следующие факторы: соотношение концентраций двух- и однозарядных ионов в исходном растворе, суммарная концентрация растворов, степень концентрирования возвратных рассолов, потери однозарядных ионов с опресненной водой. Особенностью СМП процесса является снижение эффективности ионообменной стадии за счет того, что при неполной противоточной регенерации значительная доля полной обменной емкости катионита постоянно находится в форме катиона кальция.

Целью данной работы является экспериментальная проверка адекватности математической модели СМП-процесса умягчения – обессоливания воды в простой двухкомпонентной системе, состоящей из катионита КУ-2х8 в натриевой форме и раствора, содержащего смесь хлоридов натрия и кальция. Для этого экспериментально выполняли начальный (нулевой) цикл СМП-процесса, когда катионит еще полностью в натриевой форме. Затем в условиях эксперимента проводили расчет по математической модели нулевого цикла процесса и сопоставляли расчетные и экспериментальные результаты. Рассчитывали все технологические стадии процесса в цикле, проверяя возможность его стабилизации.

Экспериментальная часть

Численный эксперимент. Расчет проводили согласно технологической схеме СМП-процесса, представленной на рис. 1 [1]. Рассмотрим технологию подробнее. В начале (цикл 0) катионит находится в Na-форме. Через колонну с катионитом сверху вниз пропускается исходная вода, и за счет реакций ионного обмена из раствора удаляются катионы жесткости, что предотвращает образование осадков их солей в дальнейшем. Стадия умягчения заканчивается при достижении заданного значения концентрации иона кальция на выходе из колонны – 0.005 моль-экв/дм³ (выбрана по аналогии с работой [1]). Значение проскоковой концентрации нужно выбрать так, чтобы объем получаемого регенерационного раствора был достаточным, а примесь иона кальция в нем минимальна. Умягченная вода собирается в емкость E1. Измеряется концентрация иона натрия C_s в емкости E1. Весь объем воды из этой емкости (V_s) подвергается глубокому опреснению дистилляцией, а получающийся при этом рассол, содержащий соль натрия, накапливается и возвращается в циклический процесс на противоточную регенерацию отработан-

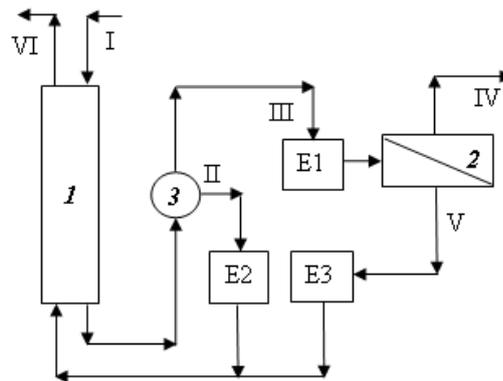


Рис. 1. [1] Схема СМП-процесса: 1 – колонна с катионитом, 2 – опреснитель, 3 – переключающее устройство потоков со стадии вытеснения электролита на стадию умягчения, E1 – емкость для умягченной воды, E2 – емкость для электролита, вытесненного из межзернового пространства слоя катионита, E3 – емкость для регенерационного рассола, 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. [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 – a tank for the electrolyte forced out of the intergrain space of the cationite layer; E3 – regeneration brine tank; I – cold water flow; II – flow of the electrolyte forced out of the intergrain space of the cationite layer; III – softened water flow; IV – desalinated water flow; V – regeneration brine flow; VI – discharge.

ного катионита, то есть обратного перевода его в Na^+ -форму. Задается требуемая концентрация иона натрия (C_r) в получаемом регенерационном растворе. Определяется коэффициент концентрирования при упаривании $k=C_r/C_s$. Объем раствора для регенерации определяется как V_s/k . После упаривания концентрированный раствор полностью подается снизу вверх в колонну с катионитом на противоточную регенерацию. В первом и последующих циклах на стадии сорбции регенерационный раствор, вытесняемый исходной водой из межзернового пространства до C_{Na^+} на выходе, равной $0.15 \text{ моль-экв/дм}^3$, собирается в емкость E2 и используется в следующем цикле для частичной регенерации, предваряющей основную стадию. Затем – сорбция до заданного проскока иона кальция, опреснение, частичная регенерация, основная регенерация и т.д.

Для расчета использовали программу «Createscheme» [4, 5], полностью имитирующую описанную выше технологическую схему. Для расчета ионообменных

стадий в программе применена послойная модель счета, основными параметрами которой являются высота единичного слоя сорбента (число слоев в колонне) и шаг по времени (объем порции пропускаемого раствора), которые находятся из условий достижения равновесия твердой и жидкой фаз на каждом шаге счета [6]. Значения кинетических и равновесных параметров математической модели брали из базы данных ионитов в программе «Createscheme» [4, 5] в разделе, относящемся к катиониту КУ-2x8 (табл. 1). База данных была создана на основе многолетнего опыта работы сотрудников лаборатории сорбционных методов по решению задач ионообменной водоподготовки методом математического моделирования.

Исходными данными для расчета (составы растворов, скорости потоков, характеристики катионита, объем загрузки, геометрия фильтра и т.п.) являлись условия лабораторного эксперимента.

Условия лабораторного эксперимента.
 Состав исходного раствора (моль-

Таблица 1. Равновесные и кинетические параметры математической модели.

Table 1. Equilibrium and kinetic parameters of the mathematical model.

Полная обменная емкость, моль-экв/дм ³	2.13
Диаметр зерна катионита, см	0.06
Порозность слоя	0.45
Коэфф. внешней диффузии, 1/с	0.1
Коэфф. внутренней диффузии, см ² /с	1.5 · 10 ⁻⁸
Параметры расчета коэффициента продольной диффузии (стадия регенерации) $D = K \cdot V^n$	K = 1.8 n = 0.9
Константы обмен катионов на ион водорода	
Na ⁺	1.2
Ca ²⁺	2.8

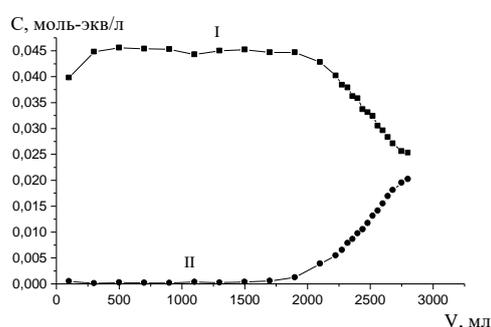


Рис. 2. Полные экспериментальные выходные кривые ионов натрия (1) и кальция (2) на колонке с КУ-2х8 в натриевой форме.

Fig. 2. Complete experimental output curves of sodium (1) and calcium (2) ions on a column with KU-2x8 in sodium form

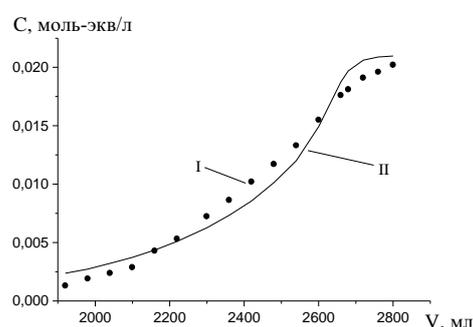


Рис. 3. Сопоставление результатов расчета и эксперимента на восходящем участке выходной кривой сорбции иона кальция. I – эксперимент, II – расчет.

Fig. 3. Comparison of the calculation and experiment results on the ascending section of the output curve of calcium ion sorption.

I – experiment, II – calculation

экв/дм³): Na⁺ – 0.024, Ca²⁺ – 0.021, Cl⁻ – 0.045. Объем загрузки набухшего катионита в колонке – 25.0 см³. Катионит зернением 0.06 см (определяли под микроскопом) переводили в натриевую форму и загружали в колонку так, чтобы свободный объем колонки соответствовал только межзерновому пространству слоя ионита. Высота загрузки ионита – 15 см. Сечение колонки – 1.66 см². Скорость пропускания раствора при сорбции составляла 10.1 см³/мин, при регенерации – 1.8 см³/мин и поддерживалась автоматически перистальтическим насосом. Полная обменная емкость катионита – 2.13 моль-экв/дм³.

Определение полной емкости проводили в динамических условиях из трех

экспериментов. В маленькой колонке 3 см³ катионита переводили в кальциевую форму десятикратным избытком 0.5 молярного раствора хлорида кальция, затем отмывали катионит водой и количественно смывали ион кальция с колонки 1.5 молярным раствором хлорида натрия. В полученном растворе определяли количество иона кальция, результат определения нормировали на единицу объема катионита.

Стадию сорбции останавливали при значении концентрации иона кальция на выходе из колонки, равном 0.005 моль-экв/см³. Измерения содержания компонентов в образцах, отбираемых на выходе из колонки, проводили методом ионной хроматографии.

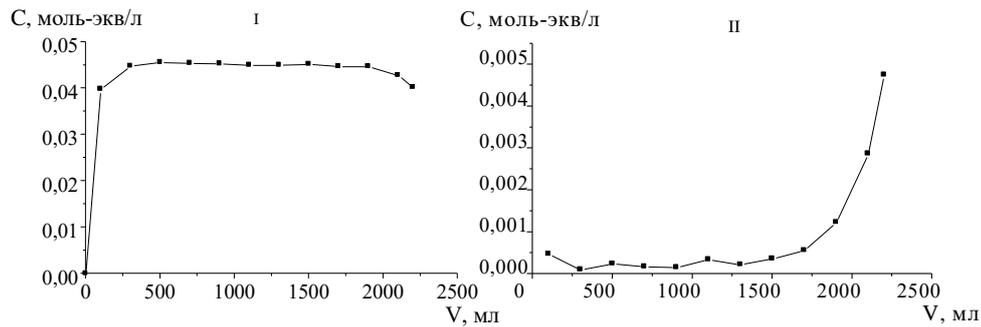


Рис. 4. Выходные кривые сорбции иона натрия (I) и кальция(II) в нулевом цикле.
 Fig. 4. Output curves of sodium (1) and calcium (2) ion sorption in the zero cycle.

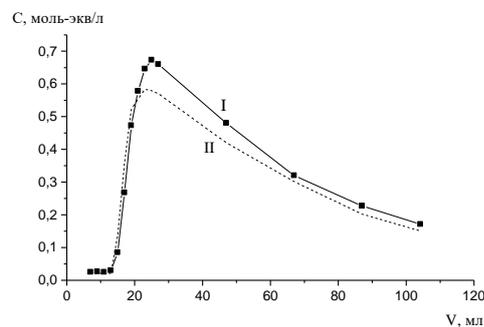


Рис.5. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов регенерации в нулевом цикле. I – экспериментальная выходная кривая регенерации иона кальция, II – расчетная кривая.

Fig. 5. Comparison of theoretical and experimental results of regeneration in the zero cycle. I – experimental output curve of calcium ion regeneration, II – calculated curve

Таблица 2. Характеристики нулевого цикла СМП-процесса

Table 2. Characteristics of the zero cycle of the SMP

Раствор, стадия	Объем V, см ³		Концентрация Na ⁺ моль-экв/дм ³		Концентрация Ca ²⁺ моль-экв/дм ³	
	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт	Расчет	Опыт
Пропущенный раствор, сорбция №0	2212.2	2205	0.044	0.045	8.8·10 ⁻⁴	5.0·10 ⁻⁴
Рассол после упаривания до C _{Na} =1 моль-экв/дм ³	97.61 k = 22.73	99.23 k = 22.22	1.0	1.0	0.020	0.011
Раствор после регенерации №0	97.61	99.23	0.64	0.57	0.28	0.32

Экспериментально получали полную выходную кривую катионов (рис. 2), находили значение пропущенного объема раствора, соответствующее достижению заданной проскоковой концентрации иона кальция. Результат сопоставляли с итогами расчета (рис. 3). Согласно экспериментальным данным, процесс умягчения на стадии нулевой сорбции

нужно остановить, пропустив 2200 см³ исходного раствора. Расчетное значение пропущенного объема, отвечающее заданному проскоку кальция, составил 2212.2 см³. После предварительного эксперимента колонку полностью регенерировали 1.5 молярным раствором хлорида натрия, отмывали водой.

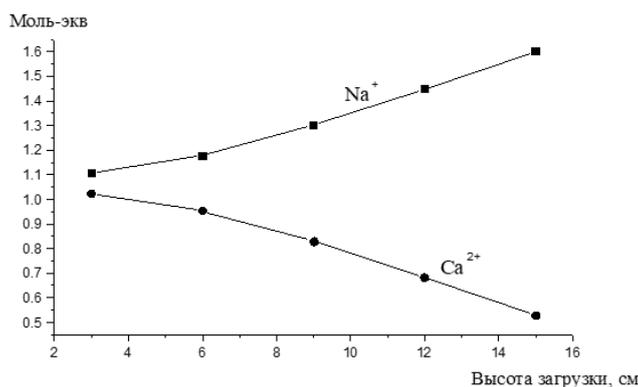


Рис.6. Расчетное распределение содержания катионов по высоте колонки после противоточной регенерации. Стационарный режим. Высота загрузки – 15 см, диаметр колонки – 1.45 см, количество слоёв при расчете – 5.

Fig. 6. Calculated distribution of cation content by column height after counter-current regeneration. Stationary mode. Loading height – 15 cm, column diameter – 1.45 cm, number of layers in calculation – 5.

Таблица 3. Средние расчетные значения концентраций катионов в колонке после регенерации. Стационарный режим.

Table 3. Average calculated values of cation concentrations in the column after regeneration. Stationary mode.

Фаза	Na ⁺ , моль-экв/дм ³	Ca ²⁺ , моль-экв/дм ³
Раствор	0.940	0.080
Ионит	1.327	0.803

Проводили стадию сорбции нулевого цикла до проскока иона кальция, пропуская 2205 см³ исходного раствора (рис. 4). Определяли концентрацию компонентов в пропущенном объеме. Задавали концентрацию иона натрия в регенерирующем растворе, равной 1 моль-экв/дм³. Рассчитывали коэффициент концентрирования и состав регенерационного раствора, который затем готовили и использовали в эксперименте по противоточной регенерации катионита после нулевой сорбции. Результаты эксперимента, а также данные соответствующего расчета, представлены на рис. 5.

Определяли концентрации компонентов в фильтрате после регенерации. На основании полученных данных провели сравнение расчетных и экспериментальных количественных характеристик нулевого цикла СМП-процесса (табл. 2).

Обсуждение результатов

Из рис. 3, 5 и табл. 2 видно, что математическая модель удовлетворительно

описывает процесс обессоливания. Неточность математического описания начального участка выходной кривой кальция на катионите в натриевой форме привела к расхождению расчетных и экспериментальных значений концентраций иона кальция в технологических растворах (табл. 2). Дополнительное уточнение значения константы обмена иона кальция на ион водорода, как существенно значимого параметра математической модели в изучаемой системе, позволит сгладить это расхождение. Дополнительных исследований требует также учет коэффициентов активности ионов в исследуемых растворах.

Из результатов расчета (рис. 7, 8) видно, что СМП-процесс успешно реализуется, стабилизация процесса наступает, начиная с десятого цикла. Численный эксперимент позволил проанализировать распределение катионов в фазе ионита и средние значения концентраций катионов в обеих фазах после регенерации в стационарном режиме (табл. 3, рис. 6), а

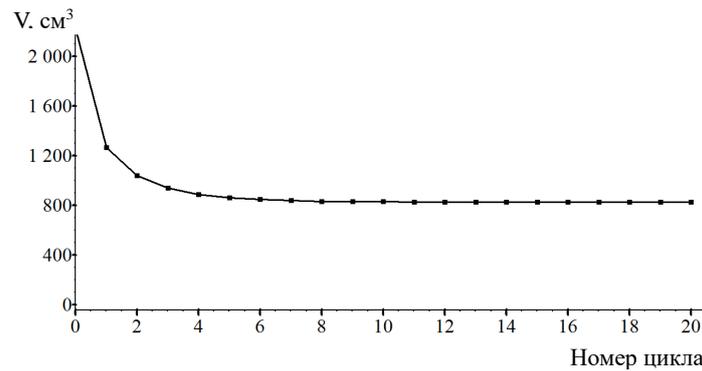


Рис. 7. Стадии сорбции. Значения пропущенного объема исходной воды до проскока иона кальция (0.005 моль-экв/дм³) в циклах до стабилизации. Объем воды, пропущенной до заданного проскока иона кальция в стационарном процессе, равен 825 см³.

Fig. 7. Sorption stages. Values of the passed volume of the initial water before the breakthrough of the calcium ion (0.005 mol-eq/l) in cycles before stabilisation. The volume of water passed before the specified breakthrough of the calcium ion in the stationary process was 825 ml.

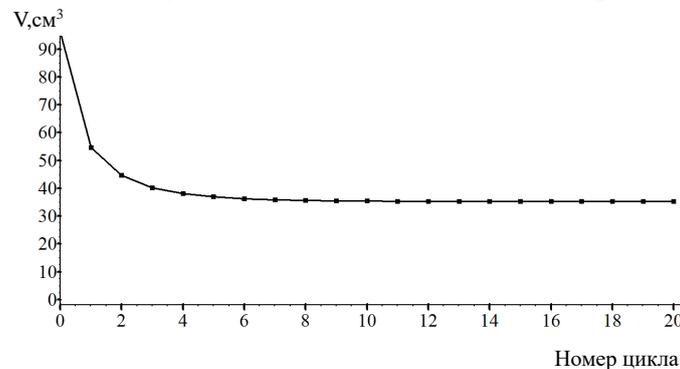


Рис. 8. Стадии противоточной регенерации. Значения объема пропущенного регенерационного раствора в циклах до стабилизации. Объем регенерационного раствора в последнем цикле равен 35.3 см³.

Fig. 8. Counter-current regeneration stages. Values of the volume of regeneration solution passed in cycles before stabilisation. The volume of regeneration solution in the last cycle was 35.3 ml.

также проследить зависимость продолжительности ионообменных стадий процесса от номера цикла. Продолжительность стадий сорбции и регенерации в стационарном режиме сократились примерно в 2.7 раза относительно времени выполнения тех же стадий на катионите в натриевой форме. При этом используется только $2/3$ от полной обменной емкости катионита, остальная часть емкости приходится на ион кальция, что говорит о снижении эффективности процесса. Сокращение времени сорбции и регенерации из-за уменьшения доли реализуемой емкости катионита – отличительная особенность СМП-процессов.

Заключение

Большое значение при изучении и организации самоподдерживающегося процесса обессоливания - опреснения приобретает численный эксперимент. Программа, адекватно моделирующая все стадии СМП-процесса, позволяет априори оценивать возможность его реализации, рассчитывать большое количество циклов до наступления стационарного режима, анализировать распределение компонентов в фазе ионита, варьировать технологические параметры оборудования и режима, добиваясь наилучшего результата. Появляется возможность масштабирования. Однако это предъявляет

высокие требования к степени адекватности математической модели. От правильности и точности математического описания будет зависеть правильность выбора технологического режима СМП-процесса и его контроль при практической реализации. Так, стадии сорбции и регенерации можно будет останавливать по достижении значения расчетного времени окончания стадий, не проводя мониторинг концентраций ионов кальция и натрия на выходе из колонны.

Очевидно, что в дальнейшем при организации СМП-процессов с помощью специальной программы должна решаться задача оптимизации. При заданных параметрах оборудования и заданном исходном составе раствора от выбора значения проскоковой концентрации иона кальция в момент остановки стадии сорбции, и коэффициента концентрирования рассола зависит полнота регенерации катионита и продолжительность стадий сорбции и регенерации. При чрезмерном уменьшении

значения проскоковой концентрации иона кальция сокращается объем регенерационного раствора, при сильном увеличении – в регенерационном растворе растет содержание примеси иона кальция. И то, и другое снижает эффективность ионообменных стадий за счет увеличения доли емкости катионита, занятой ионом кальция. Степень концентрирования рассола при дистилляции определяет результат регенерации, а также энергозатраты. Необходим выбор оптимальных значений параметров, обеспечивающих уровень эффективности ионообменной стадии, при котором организация СМП-процесса экономически целесообразна.

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.

Список литературы/References

1. Khamizov R.Kh., Komarova I.V., Galkina N.K., Prudkovsky A.G. Samopoderzhivayushchiesya protsessy umyagcheniya – opresneniya vody: prostye dvukhkomponentnye sistemy. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*. 2020; 54(5): 649-660. (In Russ.)
2. Khamizov R.Kh., Komarova I.V., Galkina N.K., Prudkovsky A.G. Samopoderzhivayushchiesya protsessy umyagcheniya – opresneniya vody: khloridno-sulfatnye sistemy. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*. 2022; 56(2): 183-196. (In Russ.)
3. Tokmachev M., Tikhonov N.A., Khamizov R.Kh., Investigation of cyclic self-sustaining ion exchange process for softening water solutions on the basis of mathematical modeling, *Reactive and Functional*

Polymers, 2008;68(8): 1245-1252. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2008.05>

4. Prudkovsky A.G., Komarova I.V., Galkina N.K. Programma «CreateScheme» dlya konstruirovaniya, rascheta i vizualizatsii ionoobmennykh shem. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2014; 14(5): 824-831. (In Russ.)

5. Komarova I.V., Galkina N.K., Prudkovsky A.G., Khamizov R.Kh. Matematicheskoe modelirovanie i raschet protsessa demineralizatsii vody v promyshlennom filtre. Soobshchenie 1. Gidrodinamika regeneratsii i otmyvki promyshlennogo filtra. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2017; 1(1): 10-19. (In Russ.)

6. Venitsianov E.V., Rubinshtein R.N. Dinamika sorbtsii iz zhidkikh sred. M. Nauka. 1983. 237 p. (In Russ.)



Информация об авторах / Information about the authors

Н.К. Колотилина – научный сотрудник, лаборатория сорбционных методов, ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

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

Р.Х. Хамизов – главный научный сотрудник, д.х.н., член-корр. РАН, лаборатория сорбционных методов, ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

N.K. Kolotilina – Scientific associate, Lab of Sorption Methods, GEOKHI RAS, Moscow, Russia, e-mail: nkolotilina@mail.ru

A.G. Prudkovskii – Dr.Sci. (Phys/Math), Senior Researcher, Lab of Sorption Methods, GEOKHI RAS, Moscow, Russia

R.Kh. Khamizov – Chief Researcher, Dr.Sci. (Chem), Corresponding Member of RAS, GEOKHI RAS, Lab of Sorption Methods, Moscow, Russia

Статья поступила в редакцию 18.03.2024; одобрена после рецензирования 22.06.2024; принята к публикации 03.07.2024.

The article was submitted 18.03.2024; approved after reviewing 22.06.2024; accepted for publication 03.07.2024.