

А. В. Клинов, А. И. Разинов, А. Е. Прокопович,
Е. В. Саблин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОГО ОБМЕНА НА СМЕСЕВОМ КАТИОНИТЕ H^+ , Na^+ В ПРОЦЕССАХ ВОДОПОДГОТОВКИ

Ключевые слова: процессы ионообмена, умягчение воды, кинетика многокомпонентного ионного обмена.

Разработана математическая модель многокомпонентного ионообмена на смешанном катионите (H^+ , Na^+) в картриджах, выпускаемых российской компанией «АкваБрит». Целью этого процесса является поддержание общей и карбонатной жесткости, а так же показателя pH воды в рамках норм ее использования в различных системах. В модели используется авторская методика описания матрицы коэффициентов многокомпонентной диффузии при ионном обмене в водной фазе. Для расчета матрицы коэффициентов многокомпонентной диффузии используются данные по эйнштейновским коэффициентам диффузии, которые определяются через ионные проводимости соответствующих ионов. Коэффициенты массоотдачи определялись по известным критериальным уравнениям в матричной форме. Проанализированы соотношения диагональных и недиагональных элементов матрицы коэффициентов массоотдачи. Показана возможность в определенных условиях пренебречь недиагональными элементами. Решением системы уравнений математической модели являются нестационарные профили концентраций ионов Ca^{2+} , H^+ , Na^+ , HCO_3^- в водной фазе и фазе ионита. Математическая модель содержит 4 параметра, значения 3-х из которых, были определены в предыдущей работе, а один был идентифицирован по экспериментальным данным. Было установлено, что в силу чрезвычайно низких концентраций водорода по сравнению с концентрацией других ионов для фиксируемого в эксперименте pH численное решение системы уравнений математической модели давало значительную ошибку. Поэтому для определения pH воды на выходе из картриджа предлагается использовать условие химического равновесия. Результаты моделирования позволили выявить особенности изменения концентрации ионов на выходе из картриджа, в том числе при наличии байпаса. Результаты моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, что дает основание рекомендовать модель для использования при решении проектных и проверочных задач в области ионообменных процессов и аппаратов для умягчения воды.

А. V. Klinov, A. I. Razinov, A. E. Prokopovich,
E. V. Sablin

ION EXCHANGE MODELING ON MIXED CATIONITE H^+ , Na^+ IN WATERPROOF PROCESSES

Keywords: ion exchange processes, water softening, kinetics of multicomponent ion exchange.

A mathematical model of multicomponent ion exchange on mixed cationite (H^+ , Na^+) in cartridges produced by the Russian company "AquaBrite" has been developed. The purpose of this process is to maintain the total and carbonate hardness, as well as the pH value of water within the norms of its use in various systems. The model uses the author's method of describing the matrix of multicomponent diffusion coefficients for ion exchange in the aqueous phase. To calculate the matrix of multicomponent diffusion coefficients, the data on Einstein diffusion coefficients, which are determined through ionic conductivities of corresponding ions, are used. Mass transfer coefficients were determined using known criterion equations in matrix form. The relations of diagonal and non-diagonal elements of the matrix of mass transfer coefficients were analyzed. The possibility to neglect non-diagonal elements under certain conditions is shown. The solution of the system of equations of the mathematical model is nonstationary profiles of concentrations of Ca^{2+} , H^+ , Na^+ , HCO_3^- ions in the aqueous phase and in the ionite phase. The mathematical model contains 4 parameters, the values of 3 of which were determined in the previous work, and one was identified from experimental data. It was found that due to extremely low concentrations of hydrogen compared to the concentration of other ions for the pH fixed in the experiment, the numerical solution of the system of equations of the mathematical model gave a significant error. Therefore, it is proposed to use the chemical equilibrium condition to determine the pH of water at the cartridge outlet. The results of modeling allowed to reveal the peculiarities of ion concentration change at the cartridge outlet, including in the presence of bypass. Modeling results are in satisfactory agreement with experimental data, which gives grounds to recommend the model for use in solving design and verification problems in the field of ion-exchange processes and apparatuses for water softening.

Введение

Процессы водоподготовки воды используются в различных промышленных технологиях, на объектах общественного питания и быту [1]. Важную роль в этих технологиях играют ионообменные процессы, которые позволяют избирательно менять состав воды, изменяя концентрацию определенных ионов [2-6]. Часто в технологиях подготовки воды для пищевого применения ионообменные процессы

реализуются в сменных картриджах, которые устанавливаются перед входом в оборудование или технологическую линию. Примерами различного исполнения таких картриджей является профессиональная продукция немецкой компаний «Brita» и российской компании «АкваБрит» [7, 8]. В нашей ранней статье [9] была предложена математическая модель ионообменного процесса умягчения воды в картридже «АкваБрит». Целью

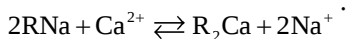
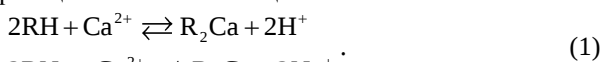
проведенного моделирования было определение величин ресурсов работы картриджа в зависимости от его конструктивных особенностей и режимов работы, характеристик ионообменной смолы и свойств воды на входе. Величинами, определяющими ресурс картриджа, являются значения общей и карбонатной жесткости в выходном потоке. В качестве ионообменной смолы был рассмотрен катионит H^+ . Ионы H^+ обмениваясь с ионами Ca^{2+} вступают в жидкой фазе в химическую реакцию с карбонат ионами HCO_3^- , что приводит к уменьшению как общей так и карбонатной жесткости. В этом случае процесс ионообмена является бинарным. Однако часто на практике помимо заданного значения общей и карбонатной жесткости, необходимо обеспечить некоторые другие характеристики воды, например величину pH. Известно, что последняя влияет на вкусовые характеристики получаемых напитков. В этом случае применяют смесевые ионообменные смолы. Тогда число ионов, участвующих в ионообмене, становится больше двух, что определяет необходимость использования при моделировании теории многокомпонентного ионообмена.

В данной работе представлено развитие математической модели [9] на случай многокомпонентного ионообмена. В качестве ионообменной смолы рассмотрен катионит (H^+ , Na^+), а в качестве характеристик воды на выходе – общая и карбонатная жесткость, а также значение pH.

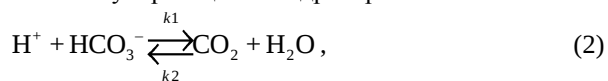
Математическая модель процесса многокомпонентного ионообмена

Процесс ионообмена рассматривается в картридже «АкваБрит». Область, где находится ионообменная смола имеет форму цилиндра. Основные характеристики ионообменной смолы и геометрические размеры картриджа представлены в работе [9]. Гидродинамические условия при движении жидкости через зернистый слой близки к модели идеального вытеснения, которая была принята в качестве структуры потока в картридже. Ионообменная смола содержала ионы H^+ , Na^+ . Ионный состав воды был представлен ионами кальция Ca^{2+} и гидрокарбонат ионами HCO_3^- .

Катионит рассматривался как однородная среда, в которой равномерно перемешаны и распределены центры RH и RNa , способные вступать в химическую реакцию с ионами кальция:



Ионы водорода, выходя из катионита, вступают в химическую реакцию с гидрокарбонат ионами:



здесь k_1 и k_2 – константы скорости прямой и обратной реакции.

Как показано в ранней работе [9] можно принять $k_2=0$, а условие химического равновесия (2) определить как:

$$\frac{[HCO_3^-][H]^+}{[CO_2]} = 4.27 \times 10^{-7} \quad (3)$$

Математическая модель ионообмена в картридже в условиях идеального вытеснения запишем следующей системой уравнений:

для фазы катионита

$$\frac{\partial C_{RCa}}{\partial \tau} = \frac{1}{1-\varepsilon} j_{Ca}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{RNa}}{\partial \tau} = \frac{1}{1-\varepsilon} j_{Na} \quad (5)$$

$$2C_{RCa} + C_{RH} + C_{RNa} = Q \quad (6)$$

для водной фазы

$$\frac{\partial C_{Ca}}{\partial \tau} = -\frac{w}{\varepsilon} \frac{\partial C_{Ca}}{\partial Z} - \frac{1}{\varepsilon} j_{Ca}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_{Na}}{\partial \tau} = -\frac{w}{\varepsilon} \frac{\partial C_{Na}}{\partial Z} + \frac{1}{\varepsilon} j_{Na} \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_H}{\partial \tau} = -\frac{w}{\varepsilon} \frac{\partial C_H}{\partial Z} + \frac{1}{\varepsilon} (2j_{Ca} + j_{Na}) - k_1 C_H C_{HCO_3} + k_2 C_{CO_2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial C_{HCO_3}}{\partial \tau} = -\frac{w}{\varepsilon} \frac{\partial C_{HCO_3}}{\partial Z} - k_1 C_H C_{HCO_3} + k_2 C_{CO_2} \quad (10)$$

$$C_{CO_2} = C_{HCO_3}^0 - C_{HCO_3} \quad (11)$$

здесь C – концентрация (моль/м³) с нижним индексом R в фазе ионита, без R в водной фазе; j – поток ионов; w – фиктивная скорость воды в картридже; ε – порозность ионита; Q – емкость ионита; τ – время; Z – координата направленная по оси картриджа.

Система уравнений (4-11) дополняется условиями однозначности:

начальные условия:

$$C_{RCa}(Z, 0) = 0, \quad C_{RNa}(Z, 0) = y_{Na} Q, \quad C_{Ca}(Z, 0) = 0,$$

$$C_H(Z, 0) = 0, \quad C_{HCO_3}(Z, 0) = 0, \quad C_{Na}(Z, 0) = 0$$

где y_{Na} – мольная доля Na в ионообменной смоле;

граничные условия:

$$C_{Ca}(0, \tau) = C_{Ca}^0, \quad C_H(0, \tau) = 0, \quad C_{Na}(0, \tau) = 0,$$

$$C_{HCO_3}(0, \tau) = C_{HCO_3}^0.$$

Потоки j_{Ca} и j_{Na} записываются в многокомпонентном варианте как [10]:

$$\begin{pmatrix} j_{Ca} \\ j_{Na} \end{pmatrix} = [K_V] \left(\begin{pmatrix} C_{RCa}^* \\ C_{RNa}^* \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C_{RCa} \\ C_{RNa} \end{pmatrix} \right), \quad (12)$$

верхним индексом $*$ обозначены равновесные концентрации компонентов в фазе ионита.

Матрица объёмных коэффициентов массопередачи $[K_V]$ при условии, что основное сопротивление массопереносу сосредоточено в жидкой фазе, имеет вид:

$$[K_V] = a[m]^{-1}[\beta] \quad (13)$$

здесь a – удельная поверхность контакта фаз, определяется по характеристикам смолы,

$$[m] = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{RCa}^*}{\partial C_{RCa}} & \frac{\partial C_{RCa}^*}{\partial C_{RNa}} \\ \frac{\partial C_{RNa}^*}{\partial C_{RCa}} & \frac{\partial C_{RNa}^*}{\partial C_{RNa}} \end{bmatrix} - \text{матрица коэффициентов}$$

распределения, элементы которой находятся как частные производные от равновесных концентраций.

Матрица коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе рассчитывалась по известному критериальному уравнению для зернистого слоя бинарных смесей [11, 12] с заменой коэффициента бинарной диффузии матрицей коэффициентов многокомпонентной диффузии:

$$[\beta] = \left[\frac{1.09w}{\varepsilon (Re Pr)^{\frac{2}{3}}} \right] = \frac{1.09v^{\frac{2}{3}}w}{\varepsilon Re^{\frac{2}{3}}} [D^r]^{\frac{2}{3}} \quad (14)$$

Матрица коэффициентов диффузии относительно границы раздела фаз в жидкой фазе при ионном обмене определялась согласно [13] как:

$$[D^r] = \begin{bmatrix} D_{11}^r & & \\ & D_{12}^r & \\ & D_{21}^r & \\ & & D_{22}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{Ca} \frac{D_{Na} C_{Na} + D_H (C_H + 4C_{Ca} + 2C_{Ca} + C_{Na} + C_H)}{4D_{Ca} C_{Ca} + D_{Na} C_{Na} + D_H (C_H + 2C_{Ca} + C_{Na} + C_H)} & \frac{2D_{Ca} C_{Ca} (D_{Na} - D_H)}{4D_{Ca} C_{Ca} + D_{Na} C_{Na} + D_H (C_H + 2C_{Ca} + C_{Na} + C_H)} & \\ \frac{2D_{Ca} C_{Ca} (D_{Na} - D_H)}{4D_{Ca} C_{Ca} + D_{Na} C_{Na} + D_H (C_H + 2C_{Ca} + C_{Na} + C_H)} & D_{Na} \frac{4D_{Ca} C_{Ca} + D_H (C_H + C_{Na} + 2C_{Ca} + C_{Na} + C_H)}{4D_{Ca} C_{Ca} + D_{Na} C_{Na} + D_H (C_H + 2C_{Ca} + C_{Na} + C_H)} & \end{bmatrix}$$

Эйнштейновские коэффициенты диффузии можно выразить через ионные проводимости соответствующих ионов, тогда при 17°C (условия проведения эксперимента, подробно описанного в [9]) получим:

$$D_{Ca} = 0.63 \cdot 10^{-9} \left(\frac{M^2}{c} \right), \quad D_{Na} = 1.06 \cdot 10^{-9} \left(\frac{M^2}{c} \right),$$

$$D_H = 7.45 \cdot 10^{-9} \left(\frac{M^2}{c} \right)$$

Подробный вывод условия равновесия при ионообмене представлен в [9], здесь приведем равновесные зависимости получаемые из (1):

$$C_{RCa}^* = \frac{QC_{Ca} K_1 K_2}{C_H K_2 + C_{Na} K_1 + 2C_{Ca} K_1 K_2} \quad (15)$$

$$C_{RNa}^* = \frac{QC_{Na} K_1}{C_H K_2 + C_{Na} K_1 + 2C_{Ca} K_1 K_2} \quad (16)$$

где K_1 и K_2 – параметры.

Вычислительная трудоемкость разработанной выше модели оказалась достаточно высокой. Время расчета одной точки (заданных условий работы картриджа) в программе MathCad составляло десятки часов. Поэтому предлагается упростить

математическую модель, оценивая величины элементов матрицы коэффициентов массоотдачи. Как было показано в [13] при выборе в качестве определяющих потоки ионов Ca^{2+} и Na^+ модуль значений недиагональных элементов матрицы коэффициентов диффузии оказывается в несколько раз меньше диагональных. Проведем анализ получаемых по (14) элементов матрицы коэффициентов массоотдачи, рассчитанных для условий работы картриджа Аквабрит 500 при расходе 65 л/ч и нулевом байпасе.

На рис. 1 представлены зависимости элементов матрицы коэффициентов массоотдачи β_{11} и β_{12} , определяющих поток ионов Ca^{2+} , от концентрации ионов Ca^{2+} - 1, Na^+ - 2 и H^+ - 3. Для всех зависимостей на этом графике выполнялось условие $2C_{Ca}^{2+} + C_{Na}^+ + C_H^+ = 2C_{Ca}^0$, где C_{Ca}^0 начальная концентрация ионов Ca принималась равной 5 моль/м³, что соответствует общей жесткости воды в немецких единицах GH около 28. Такое значение жесткости является близким к максимальному значению воды используемой в бытовой сфере. Сравнение показывает, что значения диагональных элементов матрицы коэффициентов массоотдачи почти для всех концентраций в 5 раз выше недиагональных. Таким образом, перекрестными элементами в данном случае можно пренебречь.

Тогда потоки компонентов (12) запишем в виде:

$$\begin{aligned} j_{Ca} &= K_{VCa} (C_{RCa}^* - C_{RCa}) \\ j_{Na} &= K_{VNa} (C_{RNa}^* - C_{RNa}) \end{aligned} \quad (17)$$

Коэффициенты массопередачи определяются из диагональных членов матрицы массоотдачи и матрицы коэффициентов распределения:

$$K_{VCa} = \frac{a\beta_{0,0}}{m_{0,0}}$$

$$K_{VNa} = \frac{a\beta_{1,1}}{m_{1,1}}$$

Для уменьшения вычислительной трудоемкости коэффициенты массоотдачи принимаются постоянными. Например, для рассмотренного на рис. 1 примера средняя по концентрации величина $\beta_{11} \approx 5.5 \cdot 10^{-5}$ м/с. Подобный анализ для элементов матрицы коэффициентов массоотдачи β_{22} и β_{21} , позволяет пренебречь последними и принять величину $\beta_{22} \approx 6.5 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Для численного решения системы дифференциальных уравнений с частными производными (4)–(10) использовался математический вычислительный пакет Mathcad 15.0 [14] и решатель Pdsolve.

Математическая модель процесса ионообмена содержит три параметра: две константы K_1 и K_2 в модели равновесия (15,16) и константы скорости прямой k_1 и обратной k_2 реакции (2). Ранее [9] были определены параметры K_1 , k_1 и k_2 путем сравнения расчетных и экспериментальных значений общей и карбонатной жесткости на выходе из картриджа. Однако в том случае настройка параметров осуществлялась по экспериментальным данным,

полученным на картридже со смолой, содержащей 10% Na, тогда как в модели этот факт не учитывался.

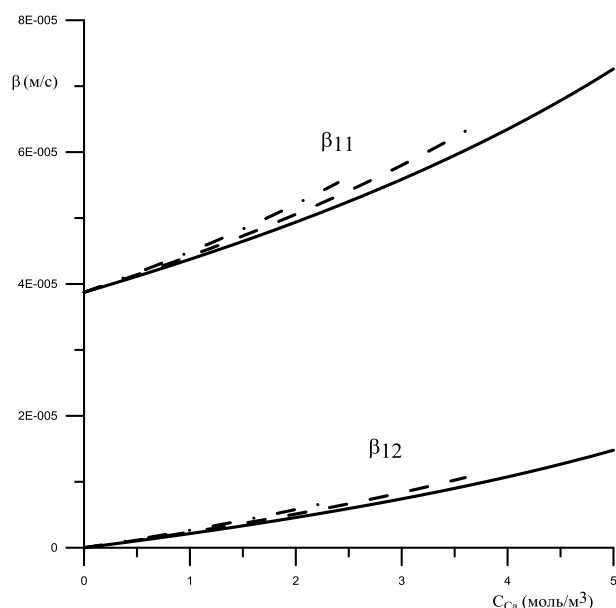


Рис. 1 – Численные значения элементов матрицы коэффициентов массоотдачи. Непрерывная линия $C_{Na}=0$ моль/м³, пунктирная $C_{Na}=2.5$ моль/м³, штрихпунктирная $C_{Na}=5$ моль/м³

Fig. 1 – Numerical values of elements of the matrix of mass transfer coefficients. Continuous line $C_{Na}=0$ mol/m³, dashed line $C_{Na}=2.5$ mol/m³, dashed line $C_{Na}=5$ mol/m³

Поэтому возможно определенные ранее значения параметров могут измениться. Анализ влияния значений параметров показал следующее:

- в силу особенности химической реакции величину скорости обратной реакции k_2 примем равной нулю (как это сделано в [9] в соответствии с [15]);

- значение константы K_1 оказывает основное влияние на выходные кривые общей и карбонатной жесткости, поэтому для сохранения удовлетворительного согласия с экспериментальными данными ее значение было принято прежним, равным 0.2;

- значение параметров K_2 и k_1 определяло в большей степени положение минимума и его величину кривой pH на выходе из картриджа.

Таким образом, настройка значений параметров K_2 и k_1 осуществлялась по согласованию рассчитываемых и экспериментальных кривых pH. Значение pH определялось по концентрации водорода на выходе из картриджа. В силу чрезвычайно низких концентраций водорода по сравнению с концентрациями других ионов для фиксируемого в эксперименте pH численное решение системы уравнений математической модели давало значительную ошибку.

Для корректировки получаемого решения по pH учтем следующие факты:

- химическая реакция достаточно быстрая, что должно обеспечивать на выходе из картриджа

концентрации HCO_3^- и H^+ ионов близкие к равновесным согласно (3);

- математическая модель описывает область картриджа, в которой содержится ионообменная смола, и не учитывает объем, в котором происходит смешение потоков выходящего из картриджа и байпасного. В этой области химическая реакция также может продолжаться, особенно в случае байпасного потока так как в нем содержится дополнительный реагент - гидрокарбонат ионы.

Тогда учитывая условие равновесия (3) и материального баланса (11) получим выражение для расчета концентрации ионов водорода на выходе из картриджа:

$$C_H = 4.27 \times 10^{-7} \left(\frac{C_{\text{HCO}_3}^0}{C_{\text{HCO}_3}} - 1 \right) \quad (18)$$

В выражении (18) C_{HCO_3} - определяется из решения системы уравнений (4)-(11).

При наличии байпасного потока в выражении (18) необходимо учесть дополнительное поступление гидрокарбонат ионов в камеру смешения с ним:

$$C_H = 4.27 \times 10^{-7} \left(\frac{C_{\text{HCO}_3}^0}{C_{\text{HCO}_3}(1-\chi) + \chi C_{\text{HCO}_3}^0} - 1 \right)$$

здесь χ - доля байпасного потока.

Окончательно для величины pH получим:

$$\text{pH} = -\log \left[\frac{4.27 \times 10^{-7} \left(\frac{C_{\text{HCO}_3}^0}{C_{\text{HCO}_3}(1-\chi) + \chi C_{\text{HCO}_3}^0} - 1 \right)}{+ 10^{-\text{pH}^0}} \right] \quad (19)$$

здесь pH^0 - начальное значение pH в воде.

Сопоставляя результаты расчета pH воды на выходе из картриджа с данными экспериментальных испытаний были определено что значение параметра k_1 может быть принято равным как и в работе [8] 10^{-1} м³/(с моль), а значение параметра $K_2=40$ м³/моль,

Сравнение результатов расчета по представленной в статье модели с результатами эксперимента на картридже АКВАБРИТ-500 показаны на рис. 2, 3. Видно, что результаты расчета концентраций удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для всех рассматриваемых в модели ионов, в том числе и по величине pH.

Заключение

В работе предложено развитие модели для описания процессов ионообмена [9] на случай смесового катионита H^+ , Na^+ . Модель содержит четыре настраиваемых параметра. Значения двух были приняты таким же, как в работе [9], значения двух других определены по изменению pH воды на выходе из картриджа. Сравнением рассчитываемых и экспериментальных данных содержания ионов Ca^{2+} , Na^+ , H^+ , HCO_3^- в воде на выходе из картриджа АКВАБРИТ-500, показано удовлетворительное описание его работы. Для адекватного определения pH воды предложено использовать предположение об условии близком к равновесному для химической

реакции (3) на выходе из картриджа. Это позволило снизить ошибку определения чрезвычайно низких концентраций водорода по сравнению с концентрациями других ионов для фиксируемого в

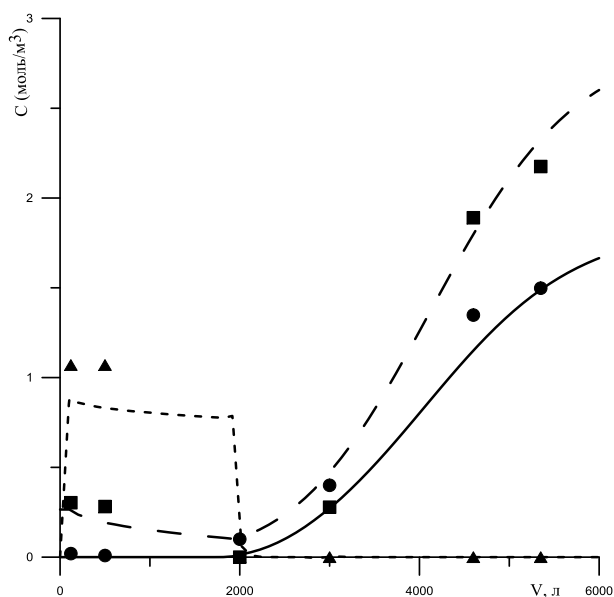


Рис. 2 – Профили концентраций ионов на выходе из картриджа в зависимости от объема прошедшей воды. Геометрические фигуры эксперимент, линии расчет по модели. Непрерывная линия и круги – ионы Ca^{2+} , линия крупный пунктир и квадраты – ионы HCO_3^- , линия мелкий пунктир и треугольники ионы – Na^+

Fig. 2 – Profiles of ion concentrations at the cartridge outlet depending on the volume of passed water. Geometric figures experiment, lines calculation. Continuous line and circles – Ca^{2+} ions, large dashed line and squares – ions, small dashed line and triangles – Na^+ ions

Литература

1. K. Judith, C. Reinhold, R. Dietmar, J. Agricult. Food Chem., 59, 1, 22–42 (2011) DOI: 10.1021/jf1032203
2. M. Hódi, K. Polyák, J. Hlavay, Environment International Volume 21, Issue 3, 1995, Pages 325–331 [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(95\)00019-H](https://doi.org/10.1016/0160-4120(95)00019-H)
3. P. Sirajudheen, Perumal Karthikeyan, Krishnapillai Ramkumar, Sankaran Meenakshi, Journal of Molecular Liquids, Volume 318, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114200>.
4. Simon A Parsons, Water Research. 2000, Volume 34, Issue 8, Pages 2369–2375. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00407-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00407-8).
5. M.H. Entezari, M. Tahmasbi, Ultrasonics Sonochemistry 2009, V16, Issue 3, Pages 356–360 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2008.09.008>
6. Dániel Madarász, Imre Szent, András Sági, János Halász, Ákos Kukovecz, Zoltán Kónya, Chemical Physics Letters, 2014 Volume 591, Pages 161–165, <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2013.11.021>.
7. <https://aquabrit.ru/>
8. <https://horecawater.ru>

эксперименте pH. Разработанная модель может использоваться при разработке и проектировании эффективных конструкций ионообменных аппаратов для умягчения воды.

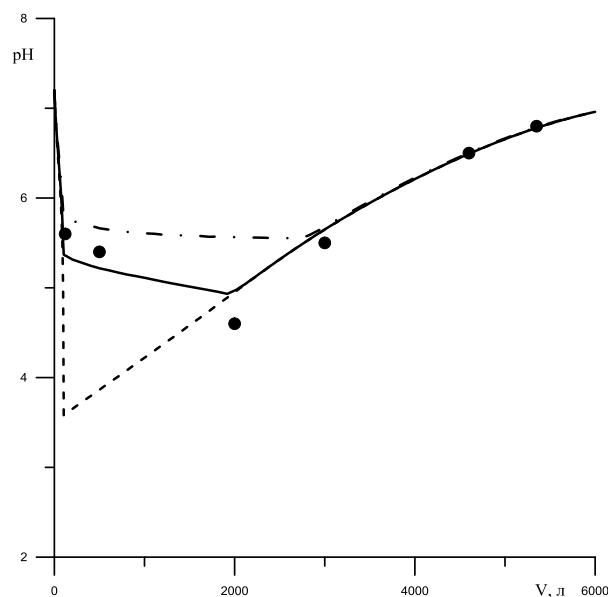


Рис. 3 – pH воды на выходе из картриджа в зависимости от объема прошедшей воды. Точки эксперимент для ионообменной смолы с соотношением $\text{Na}^+/\text{H}^+ = 10/90$, непрерывная линия расчет по (19). Пунктирная и штрихпунктирная линия расчет по модели для ионообменной смолы с соотношением $\text{Na}^+/\text{H}^+ = 0/100$ и $20/80$ соответственно

Fig. 3 – pH of water at the cartridge outlet as a function of the volume of passed water. Dots experiment for ion exchange resin with Na^+/H^+ ratio = 10/90, continuous line calculation according to (19). Dotted and dashed lines are model calculations for ion exchange resin with Na^+/H^+ ratio = 0/100 and 20/80, respectively

9. А. В. Клинов, А. И. Разинов, А. Е. Прокопович, Е. В. Саблин, Теорет. основы хим. технологии, 58, 1, 17–26 (2024). DOI: 10.31857/S0040357124010038
10. А. И. Разинов, А. В. Клинов, Г. С. Дьяконов, Процессы и аппараты химической технологии. Лань. Санкт-Петербург, 2022. 688 с
11. LeVav M., Carta G. Perry's Chemical Engineers' Handbook: Adsorption and Ion Exchange; McGraw-Hill Professional: New York, 2007. ISBN-10 : 0071511393
12. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта; Под ред. А. Н. Плановского. – Москва : Химия, 1980. – 248
13. А.И. Разинов, А.В. Клинов, Вестник технологического университета. 2024. Т.27, №12, стр.125
- 14 <https://www.mathcad.com/en/>
15. Butler J. N. Carbon dioxide equilibria and their applications. Lewis Publishers, 1991. 272 p.

References

1. K. Judith, C. Reinhold, R. Dietmar, J. Agricult. Food Chem., 59, 1, 22–42 (2011) DOI: 10.1021/jf1032203
2. M. Hódi, K. Polyák, J. Hlavay, Environment International Volume 21, Issue 3, 1995, Pages 325–331 [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(95\)00019-H](https://doi.org/10.1016/0160-4120(95)00019-H)

3. P. Sirajudheen, Perumal Karthikeyan, Krishnapillai Ramkumar, Sankaran Meenakshi, Journal of Molecular Liquids, Volume 318, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114200>.
4. Simon A Parsons, Water Research. 2000, Volume 34, Issue 8, Pages 2369-2375. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00407-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00407-8).
5. M.H. Entezari, M. Tahmasbi, Ultrasonics Sonochemistry 2009, V16, Issue 3, Pages 356-360 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2008.09.008> <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2008.09.008>
6. Dániel Madarász, Imre Szent, András Sápi, János Halász, Ákos Kukovecz, Zoltán Kónya, Chemical Physics Letters, 2014 Volume 591, Pages 161-165, <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2013.11.021>.
7. <https://aquabrit.ru/>
8. <https://horecawater.ru>
9. A. V. Klinov, A. I. Razinov, A. E. Prokopovich, and E. V. Sablin, *Theoret. bases of chemical technology*, **58**, 1, 17-26 (2024). DOI: 10.31857/S0040357124010038
10. A. I. Razinov, A. V. Klinov, G. S. Diakonov, Processes and apparatuses of chemical technology. Lan. St. Petersburg, 2022. 688 c
11. LeVav M., Carta G. Perry's Chemical Engineers' Handbook: Adsorption and Ion Exchange; McGraw-Hill Professional: New York, 2007. ISBN-10 : 0071511393
12. Rudobashta S. P. Mass transfer in systems with solid phase / S. P. Rudobashta; Edited by A. N. Planovsky. - Moscow : Chemistry, 1980. - 248
13. A.I. Razinov, A.V. Klinov, Vestnik of Technological University. 2024. Vol.27, No.12, p.125.
- 14 <https://www.mathcad.com/en/>
15. Butler J. N. Carbon dioxide equilibria and their applications. Lewis Publishers, 1991. 272 p.

© **А. В. Клинов** – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой Процессов и аппаратов химической технологии (ПАХТ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, alklin@kstu.ru. **А. И. Разинов** – канд. техн. наук, доцент кафедры ПАХТ, КНИТУ, a_razinov@mail.ru; **А. Е. Прокопович** – вице-президент Национальной ассоциации кулинаров России, Москва, Россия, alexprokopovich@me.ru; **Е. В. Саблин** – канд. техн. наук, зам. генерального директора ООО «АкваБрит», Москва, Россия, sablin@aquabrit.ru

© **A. V. Klinov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the department of Processes and Apparatuses of Chemical Technology, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, alklin@kstu.ru. **A. I. Razinov** – PhD (Technical Sci.), Associate professor, the PACT department, KNRTU, a_razinov@mail.ru; **A. E. Prokopovich** – Vice-president of the National Association of Chefs of Russia, Moscow, Russia, alexprokopovich@me.ru; **E. V. Sablin** – PhD (Technical Sci.), Deputy General Director of LLC «AquaBrit», Moscow, Russia, sablin@aquabrit.ru