

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ИОНООБМЕННОЙ СОРБЦИИ ИОНОВ ЦИНКА В АППАРАТЕ С ПЛОТНЫМ ДВИЖУЩИМСЯ СЛОЕМ ИОНИТА

С.В. Натареев, А.И. Ларина, А.А. Рябиков, С.А. Сырбу

Сергей Валентинович Натареев (ORCID 0009-0007-5620-7747)*, Анастасия Игоревна Ларина (ORCID 0000-0002-9227-7001), Алексей Александрович Рябиков (ORCID 0009-0008-3771-4580)

Кафедра технологических машин и оборудования, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000
E-mail: natoret@mail.ru*, nastyushka300495@yandex.ru, pluck612@gmail.com

Светлана Александровна Сырбу (ORCID 0000-0002-0694-7508)

Кафедра естественнонаучных дисциплин, Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, пр. Строителей, 33, Иваново, Российская Федерация, 153040
E-mail: syrbye@yandex.ru

Статья посвящена исследованию процессов ионообменной сорбции ионов цинка в аппарате с плотным движущимся слоем ионита. Предложено математическое описание процесса ионного обмена с учетом следующих упрощающих допущений: равновесие процесса описывается уравнением изотермы адсорбции Никольского; скорость ионного обмена лимитируется внутренней диффузией; структура движения раствора и ионита в аппарате описывается моделью идеального вытеснения; концентрация раствора на входе в аппарат является линейной функцией времени. В соответствии с принятыми допущениями разработано математическое описание процесса, включающее уравнение материального баланса аппарата по раствору, уравнение изотермы адсорбции, уравнение кинетики диффузии, а также начальные и граничные условия. Решение задачи выполнено методом интервально-итерационного анализа. Для проверки адекватности разработанной модели реальному процессу были проведены экспериментальные исследования нестационарных процессов ионообменной сорбции ионов цинка на сульфокислотном катионите КУ-2-8 в лабораторном аппарате непрерывного действия. Концентрация исходного раствора повышалась по линейному закону. При проведении исследований были сняты кривые изменения концентрации раствора по высоте аппарата и выходные кривые ионного обмена. Сравнение результатов расчета и эксперимента позволило сделать вывод об адекватности разработанного математического описания реальному процессу. Расхождение расчета и эксперимента не превышает 12%. Даны рекомендации по практическому применению полученных зависимостей.

Ключевые слова: ионный обмен, аппарат с плотным движущимся слоем ионита, математическое описание

UNSTEADY PROCESSES OF ION EXCHANGE SORPTION OF ZINC IONS IN A DENSE MOVING ION EXCHANGER BED APPARATUS

S.V. Natareev, A.I. Larina, A.A. Ryabikov, S.A. Syrbu

Sergey V. Natareev (ORCID 0009-0007-5620-7747)*, Anastasia I. Larina (ORCID 0000-0002-9227-7001), Alexey A. Ryabikov (ORCID 0009-0008-3771-4580)

Department Chemical Engineering, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia
Email: natoret@mail.ru, nastyushka300495@yandex.ru, pluck612@gmail.com

Svetlana A. Syrbu (ORCID 0000-0002-0694-7508)

Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Stroiteley ave., 33, Ivanovo, 1153040, Russia
E-mail: syrbye@yandex.ru

The article is devoted to the study of processes of ion-exchange sorption of zinc ions in a dense moving ion exchanger bed apparatus. A mathematical description of the ion exchange process is proposed, taking into account the following simplifying assumptions: the process equilibrium is described by the Nikolskogo adsorption isotherm equation; the rate of ion exchange is limited internal diffusion; the structure of the movement of the solution and the ion exchanger in the apparatus is described by the ideal displacement model. In accordance with the accepted assumptions, a mathematical description of the process is formulated, including the material balance equations for a solution, the equation of the adsorption isotherm, the equation of diffusion kinetics, as well as the initial and boundary conditions. The solution of the problem is carried a piecewise-iteration method. To test the adequacy of the developed model to the real process, experimental studies of processes of ion-exchange sorption of heavy metal ions on the KV-2-8 sulfonic acid cation exchanger in a laboratory dense moving ion exchanger bed apparatus. The concentration of the initial solution increased linearly. During the research, curves of changes in solution concentration along the height of the apparatus and output ion exchange curves were taken. Comparison of the results of calculation and experiment made it possible to conclude that the developed mathematical description is adequate to the real process. The discrepancy between the calculation and the experiment does not exceed 12%. Recommendations are given on the application of the obtained dependences for practical application.

Keywords: ion exchange, dense moving ion exchanger bed apparatus, mathematical description

Для цитирования:

Натареев С.В., Ларина А.И., Рябиков А.А., Сырбу С.А. Нестационарные процессы ионообменной сорбции ионов цинка в аппарате с плотным движущимся слоем ионита. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 1. С. 101–108. DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7090.

For citation:

Natareev S.V., Larina A.I., Ryabikov A.A., Syrbu S.A. Unsteady processes of ion exchange sorption of zinc ions in a dense moving ion exchanger bed apparatus. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 1. P. 101–108. DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7090.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно существующей классификации, ионообменное оборудование можно разделить на аппараты периодического и непрерывного действия [1–4]. Среди непрерывно действующих аппаратов отметим аппараты с плотным движущимся слоем ионита, которые, по сравнению, например, с традиционными ионитовыми фильтрами, имеют ряд неоспоримых преимуществ: 1) в аппарате нет зон с «неработающим» ионитом; 2) в процессе ионного обмена участвует одновременно вся масса ионита; 3) необходимое количество ионита в аппарате в 2–15 раз меньше, чем в ионитовом фильтре и др.

Аппараты непрерывного действия должны работать в неизменном во времени режиме. Однако на практике, например, при пуске аппарата, наличии внешних возмущений, связанных с условиями подачи или отвода ионита и раствора, изменении состава фаз и других случаях имеет место нестационарное протекание процесса [5, 6].

Настоящая статья посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию нестационарного процесса ионного обмена в колонном

аппарате непрерывного действия в условиях, когда источником нестационарности служит изменение во времени концентрации раствора, поступающего на очистку. Данный случай является наиболее характерным при очистке сточных вод промышленных предприятий [7, 8].

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрим процесс ионообменной сорбции ионов целевого компонента в ионообменной установке, представленной на рис. 1.

Основным элементом установки является колонный аппарат с прямоточным движением ионита и раствора 1, в верхней части которого находятся патрубок с тангенциальным вводом исходных растворов и ионита, а также распределительная решетка с проходным сечением 26%. В нижней части расположены коническое днище с патрубком и дренажное устройство для вывода соответственно отработанного ионита и очищенного раствора. Аппарат был изготовлен из органического стекла диаметром 0,035 м и высотой 0,3 м.

Для дозирования ионита применяли дозаторы кранового типа (рис. 2). Дозатор состоит из корпуса 1 со штуцерами 4 для ввода и вывода

ионита и раствора, плоской крышки 2 и пробки 3, имеющей форму усеченного конуса со сквозным отверстием, в середине которого установлена сетка 6 с размером ячейки меньшим, чем диаметр частицы ионита. Сверху пробки 3 установлен вал 5, к которому передается через муфту необходимое вращение от вала электродвигателя с редуктором (на рис. 2 не показан).

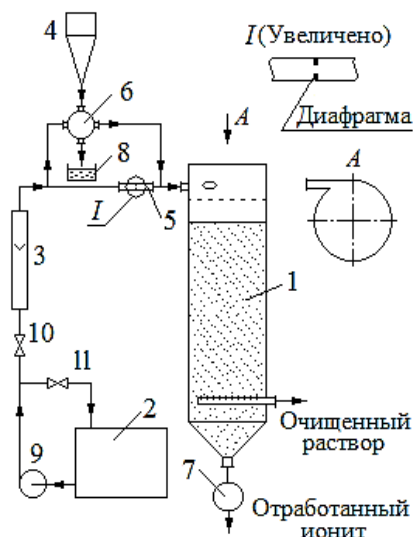


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 – аппарат с плотным движущимся слоем ионита; 2 – емкость для исходного раствора; 3 – ротаметр; 4 – емкость для исходного ионита; 5 – трубка с диафрагмой; 6 и 7 – дозаторы; 8 – емкость; 9 – насос; 10 и 11 – вентили

Fig. 1. Diagram of the laboratory installation: 1 – apparatus with a dense moving ionite layer; 2 – container for the initial solution; 3 – rotameter; 4 – container for the initial ionite; 5 – tube with diaphragm; 6 and 7 – dispensers; 8 – container; 9 – pump; 10 and 11 – valves

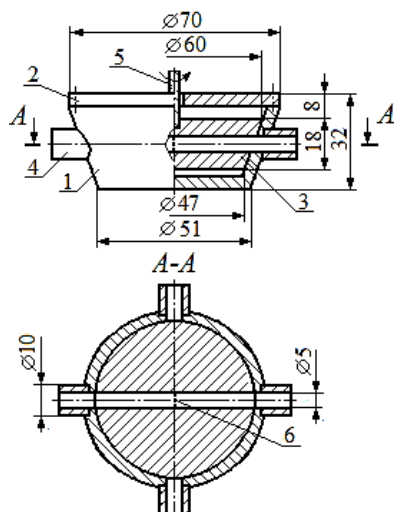


Рис. 2. Схема дозатора ионита (повернуто): 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – пробка; 4 – штуцер; 5 – вал; 6 – сетка
Fig. 2. The scheme of ionite dispenser (rotated): 1 – housing; 2 – lid; 3 – plug; 4 – fitting; 5 – shaft; 6 – mesh

Во время работы дозатора (рис. 2) пробка 3 вращается в корпусе 1 по часовой стрелке. В момент времени, когда сквозное отверстие в пробке 3 находится в вертикальном положении, ионит поступает через верхний штуцер в сквозное отверстие, где задерживается с помощью сетки 6. В другой момент времени, когда сквозное отверстие в пробке 3 находится в горизонтальном положении, в левый штуцер поступает исходный раствор, который выталкивает из отверстия ионит через штуцер, находящийся с противоположного конца дозатора.

Для проведения опытов в ионообменный аппарат 1 загружали определенное количество ионита высотой H , а затем с помощью насоса 9 и дозатора 6 непрерывно подавали в верхнюю его часть соответственно исходный раствор с объемным расходом Q и концентрацией $C_{вх}$, а также отрегенированный ионит с объемным расходом \bar{Q} . При движении раствора и ионита сверху вниз осуществлялся процесс ионного обмена. Очищенный раствор и отработанный ионит удалялись в нижней части аппарата. После выхода аппарата на неизменный во времени режим концентрацию растворенного вещества в растворе повышали по линейному закону. При проведении опытов проводили отбор проб раствора на входе в аппарат и по его высоте, в которых определяли содержание ионов сорбируемого компонента. Для опытов использовали растворы хлорида цинка с концентрацией 0,05, 0,1, 0,2 кмоль-экв/м³ и сульфокислотный катионит КУ-2-8 в Н-форме. Концентрацию ионов цинка в растворе определяли титрованием трилоном Б в присутствии ацетатного буфера и индикатора ксиленолового оранжевого [9].

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для расчета процесса ионного обмена в прямоточном аппарате с плотным движущимся слоем ионита предложено математическое описание. Сформулируем основные упрощающие допущения: 1) равновесие ионного обмена описывается уравнением изотермы Никольского; 2) скорость ионного обмена лимитируется внутренней диффузией; 3) структура движения раствора и ионита в аппарате описывается моделью идеального вытеснения; 4) концентрация раствора на входе в аппарат является линейной функцией времени; 5) движение раствора и ионита совпадают с направлением аксиальной координаты Ox .

Для решения задачи будем использовать метод интервально-итерационного анализа [10, 11]. В соответствии с данным методом разобьем слой ионита на ряд слоев небольшой высоты Δx ; и время

всего процесса представим рядом последовательно соединенных малых временных интервалов $\Delta\tau_j$. Согласно рекомендаций [12], высота небольшого слоя ионита должны быть достаточно большой по сравнению с размером частиц, но в то же время настолько малой, чтобы можно было принять физические условия процесса постоянными. Для i -ой высоты слоя ионита и j -ого временного интервала уравнение нелинейной изотермы ионного обмена Никольского

$$\tilde{K} = \frac{(C_{ax}-C_{p.i.j})^2 \bar{C}_{p.i.j}}{(a_0-\bar{C}_{p.i.j})^2 C_{p.i.j}}, \quad (1)$$

заменяем линейной аппроксимацией, а именно уравнением касательной в точке с координатами $(C_{p.i.j}, \bar{C}_{p.i.j})$

$$\bar{C}_{p.i.j} = mC_{p.i.j} + b, \quad (2)$$

где a_0 – обменная емкость ионита, кмоль-экв/м³; C – концентрация раствора, кмоль-экв/м³; \bar{C} – концентрация сорбируемого вещества в ионите, кмоль-экв/м³; \tilde{K} – концентрационная константа равновесия; m и b – коэффициенты; индексы: vx – входящий, p – равновесный.

Коэффициенты m и b в уравнении (2) имеют следующие значения

$$m = (C_{vx}^2 - C_{p.i.j}^2) \times \left[-\frac{1}{2C_{p.i.j}^2 \tilde{K}} + \frac{2\tilde{K}C_{p.i.j}a_0 + (C_{vx}-C_{p.i.j})^2}{2\tilde{K}C_{p.i.j}^2(C_{vx}-C_{p.i.j})\sqrt{4\tilde{K}C_{p.i.j}a_0 + (C_{vx}-C_{p.i.j})^2}} \right];$$

$$b = a_0 + \frac{(C_{vx} - C_{p.i.j})^2}{2\tilde{K}C_{p.i.j}} - \sqrt{\left(a_0 + \frac{(C_{vx} - C_{p.i.j})^2}{2\tilde{K}C_{p.i.j}}\right)^2 - a_0^2 - (C_{vx} - C_{p.i.j})^2} \times \left[-\frac{1}{2C_{p.i.j}^2 \tilde{K}} - \frac{2\tilde{K}C_{p.i.j}a_0 + (C_{vx}-C_{p.i.j})^2}{2\tilde{K}C_{p.i.j}^2(C_{vx}-C_{p.i.j})\sqrt{4\tilde{K}C_{p.i.j}a_0 + (C_{vx}-C_{p.i.j})^2}} \right] \quad (3)$$

Уравнение материального баланса по раствору для слоя ионита небольшой высоты имеет вид:

$$\varepsilon \frac{\partial C_{i.j}}{\partial \tau} + \varepsilon v \frac{\partial C_{i.j}}{\partial x} + (1 - \varepsilon)w \frac{\partial \bar{C}_{p.i.j}}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$N_{i,j}(x, \tau) = \begin{cases} N_{0.i,j} + \frac{6\bar{D}\tau(1-\varepsilon)}{r_0^2\varepsilon} \frac{(\bar{C}_{p.i,j}-\bar{C}_{sp.vx.i,j})}{C_{vx.i,j}} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\mu_n^2 \frac{\bar{D}x}{r_0^2 w}} \text{ при } 0 \leq \tau \leq \frac{x}{w}; \\ 1 + \frac{6\bar{D}\tau(1-\varepsilon)}{r_0^2\varepsilon} \frac{(\bar{C}_{p.i,j}-\bar{C}_{sp.vx.i,j})}{C_{vx.i,j}} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\mu_n^2 \frac{\bar{D}x}{r_0^2 w}} + \\ + \left[\frac{k}{C_{vx.i,j}} - \frac{6\bar{D}(1-\varepsilon)}{r_0^2\varepsilon} \frac{(\bar{C}_{p.i,j}-\bar{C}_{sp.vx.i,j})}{C_{vx.i,j}} \right] \left(\tau - \frac{x}{v} \right) \text{ при } \tau > \frac{x}{w}, \end{cases} \quad (11)$$

где v – скорость раствора, м/с; w – скорость ионита, м/с; x – координата, м; ε – порозность; τ – время, с; индекс: ср – средний.

Начальное и граничные условия к уравнению (4):

$$(x, 0) = C_{0.i,j}; \quad (5)$$

$$(0, \tau) = C_{ax.i,j} + k\tau; \quad (6)$$

$$(0, \tau) = \bar{C}_{sp.vx.i,j}, \quad (7)$$

где $C_{0.i,j}$ – начальная концентрация раствора, кмоль-экв/м³; $\bar{C}_{sp.vx.i,j}$ – концентрация сорбируемого вещества в ионите на входе в i -ый слой сорбента и j -ый временной интервал; k – действительное число.

В качестве уравнения для расчета локальной концентрации сорбируемого вещества в частице сферической формы используем решение уравнения диффузии при граничных условиях первого рода [10] с учетом замены переменной $\tau = \frac{x}{w}$:

$$\frac{\bar{C}_{i,j}(r, x) - \bar{C}_{sp.vx.i,j}}{\bar{C}_{p.i,j} - \bar{C}_{sp.vx.i,j}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} 2(-1)^{n+1} \frac{r_0 \sin(\mu_n \frac{r}{r_0})}{\mu_n r} e^{-\mu_n^2 \frac{\bar{D}x}{r_0^2 w}}, \quad (8)$$

где \bar{D} – коэффициент диффузии сорбируемого вещества в ионите, м²/с; r_0 – радиус частицы ионита, м; r – координата по радиусу частицы ионита, м; $\mu_n = n\pi$.

Уравнение связи между $\bar{C}_{sp.i,j}$ и $\bar{C}_{i,j}|_{r=r_0}$:

$$w \frac{\partial \bar{C}_{sp.i,j}}{\partial x} = 3 \frac{\bar{D}}{r_0} \frac{\partial \bar{C}_{i,j}}{\partial r} \Big|_{r=r_0}. \quad (9)$$

Уравнение материального баланса (4) преобразуем с учетом уравнения связи (9), и затем подставляем в него уравнение кинетики (8). Полученное уравнение после дифференцирования по r примет вид:

$$\varepsilon \frac{\partial C_{i,j}}{\partial \tau} + \varepsilon v \frac{\partial C_{i,j}}{\partial x} + 6(1 - \varepsilon) \times (\bar{C}_{p.i,j} - \bar{C}_{sp.vx.i,j}) \frac{\bar{D}}{r_0^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\mu_n^2 \frac{\bar{D}x}{r_0^2 w}} = 0. \quad (10)$$

Для решения уравнения (10) с начальным (5) и граничным (6) условиями использовали метод интегральных преобразований Лапласа относительно переменной τ [13]. В результате решения получено следующее выражение:

$$\text{где } N_{i,j}(x, \tau) = \frac{C_{i,j}(x, \tau)}{C_{\text{вх},i,j}}, \quad N_{0,i,j}(x, \tau) = \frac{C_{0,i,j}}{C_{\text{вх},i,j}}.$$

Уравнение (11) позволяет рассчитать распределение сорбируемого вещества по высоте i -ого слоя ионита и j -ого временного интервала. Данное уравнение отражает закономерности движения фронта концентрационной волны, распространяющегося от источника возмущения, находящегося на входе раствора и ионита в аппарат. При этом волновой фронт представляет собой поверхность, отделяющую часть слоя ионита, до которой уже дошли изменения концентрации раствора ($\tau > x/w$), от другой части слоя ионита, в которой возмущения еще не возникли ($\tau < x/w$). Распределение концентрации раствора по всей высоте аппарата в любой момент времени получают путем сопряжения решений для всех небольших слоев ионита Δx и малых временных интервалов Δt . С помощью найденной зависимости возможно также рассчитать выходную кривую ионного обмена.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для выполнения расчетов с помощью разработанной математической модели необходимо иметь надежные данные равновесия и кинетики процесса ионного обмена. На рис. 3 представлены изотермы ионного обмена $\text{Zn}^{2+} - \text{H}^+$, снятые в динамических условиях [14].

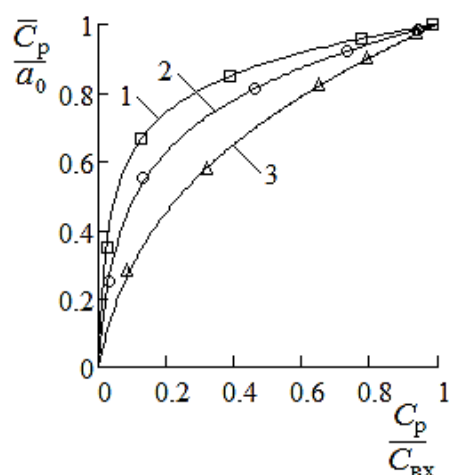


Рис. 3. Изотермы ионного обмена $\text{Zn}^{2+} - \text{H}^+$ на катионите КУ-2-8: $C_{\text{вх}}$, кмоль-экв/м³: 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,2
Fig. 3. Ion exchange $\text{Zn}^{2+} - \text{H}^+$ isotherm on the cation exchanger KU-2-8: $C_{\text{вх}}$, kmole-equiv/m³: 1 – 0.05; 2 – 0.1; 3 – 0.2

Из рис. 3 видно, что с уменьшением суммарной концентрации раствора крутизна кривых возрастает. Данный факт указывает на влияние эффекта электроселективности, состоящего в том,

что при сорбции катионов, имеющих более высокий заряд, чем десорбируемые из ионита катионы, предпочтение для сорбируемых катионов уменьшается с увеличением концентрации раствора. Экспериментальные изотермы ионного обмена были обработаны в рамках модели сорбции Никольского. Найденные значения динамической обменной емкости катионита a_0 и концентрационные константы равновесия \tilde{K} приведены в таблице. Здесь же показаны основные параметры работы проточного аппарата непрерывного действия.

Таблица

Ионный обмен в аппарате непрерывного действия с прямоточным движением фаз
Table. Ion exchange in a continuous apparatus with co-current movement of phases

Наименование показателя	Значение показателя		
$C_{\text{вх}}$, кмоль-экв/м ³	0,05	0,1	0,2
$k \cdot 10^5$, кмоль-экв/(м ³ ·с)	1,66	1,82	2
$\bar{Q} \cdot 10^7$, м ³ /с	1,5	2,2	3
$Q \cdot 10^6$, м ³ /с	5,52		
H , м	0,15		
a_0 , кмоль-экв/м ³	1,6		
\tilde{K}	1,5	1,2	0,8
ϵ	0,4		
$r_0 \cdot 10^4$, м	2,6		
Δx , м	0,01		
Δt , с	10		

На рис. 4 представлены типичные для процесса адсорбции кривые распределения безразмерной концентрации ионов цинка в растворе ($N = C(x)/C_{\text{вх}}$) по высоте аппарата, полученные при проведении эксперимента в стационарных условиях.

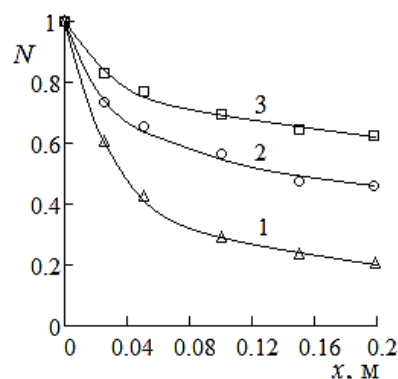


Рис. 4. Распределение безразмерной концентрации ионов Zn^{2+} в растворе по высоте аппарата: $C_{\text{вх}}$, кмоль-экв/м³: 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,2

Fig. 4. Distribution of the dimensionless concentration of Zn^{2+} ions in the solution along the height of the apparatus: $C_{\text{вх}}$, kmole-equiv/m³: 1 – 0.05; 2 – 0.1; 3 – 0.2

В начале процесса наблюдается резкое снижение концентрации раствора в связи с интенсивным поглощением ионов Zn^{2+} катионитом. Затем по мере движения раствора и катионита по высоте аппарата процесс замедляется в связи с постепенным насыщением сорбента, уменьшением концентрации раствора и повышением его кислотности. Эта неоднородность концентрационных условий находит свое отражение в кинетике процесса. Для процесса ионного обмена характерно изменение коэффициента внутренней диффузии в зависимости от степени отработки ионита. Согласно теоретическим представлениям Гельфериха [15], его величина зависит от соотношения концентраций противоионов в ионите. Скорость процесса определяется теми ионами, концентрация которых меньше. Поэтому для расчета целесообразно использовать не постоянный, а переменный коэффициент внутренней диффузии, учитывающий неоднородность различных элементарных слоев ионита.

Для расчета коэффициента внутренней диффузии использовали уравнение, предложенное Константиновым В.А. [16]:

$$\bar{D} = aC^q + p, \quad (12)$$

где a , q и p – коэффициенты.

Из анализа экспериментальных данных процесса ионного обмена $Zn^{2+}-H^+$ на катионите КУ-2-8 [17-21] найдены значения коэффициентов, входящих в уравнение (12): $a = 1,3 \cdot 10^{-10}$; $q = 2,2$ и $p = 1,2 \cdot 10^{-11}$.

Для проверки адекватности разработанной математической модели реальному процессу были проведены экспериментальные исследования ионного обмена в прямоточном аппарате при линейном изменении концентрации раствора на входе в аппарат. Значения действительного числа k , входящего в уравнение (6), для исследованных концентраций раствора приведены в таблице.

На рис. 5 приведены экспериментальные выходные кривые ионного обмена $Zn^{2+}-H^+$ в прямоточном аппарате. Согласно полученным данным во всех опытах изменение концентрации раствора на выходе из аппарата начинается в среднем через минуту от начала изменения концентрации раствора на входе в аппарат. При этом выходная кривая обращена выпуклостью вниз, что указывает на увеличение скорости ионообменного процесса в связи с повышением концентрации раствора на входе в аппарат. На рис. 5 также приведены расчет-

ные выходные кривые. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 12%.

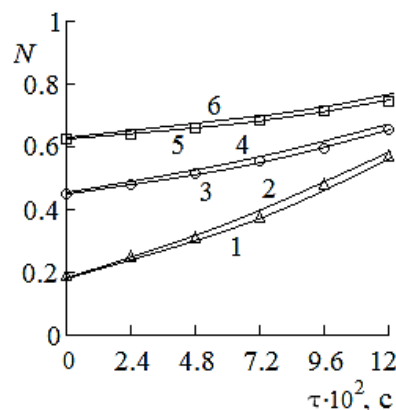


Рис. 5. Выходные кривые ионного обмена $Zn^{2+}-H^+$ в аппарате с прямоточным движением ионита и раствора: $C^{вх}$, кмоль-экв/м³: 1, 2 – 0,05; 3, 4 – 0,1; 5, 6 – 0,2. 1, 3, 5 – экспериментальные данные; 2, 4, 6 – расчетные кривые

Fig. 5. Output curves of $Zn^{2+}-H^+$ ion exchange in an apparatus with direct flow of ionite and solution: C^{inp} , kmole-eqv/m³: 1 – 0.05; 2 – 0.1; 3 – 0.2. 1, 3, 5 – experimental data; 2, 4, 6 – calculated curves

ВЫВОДЫ

Для описания нестационарного процесса ионного обмена в аппарате с прямоточным движением ионита и раствора предложено математическое описание, учитывающее нелинейность равновесной зависимости, внутридиффузионную кинетику обмена ионов между фазами и линейное изменение концентрации раствора на входе в аппарат. Удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными по ионообменной очистке растворов от ионов цинка сульфокислотным катионитом КУ-2-8 позволяет рекомендовать разработанную математическую модель для практического применения.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The study was carried out using the resources of the Center for the Collective Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Ministry of Education and Science of Russia, agreement No. 075-15-2021-671).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Натареев С.В., Захаров Д.Е., Лапшин Н.А.** Ионнообменная очистка воды от ионов тяжелых металлов в аппаратах периодического и непрерывного действия. *Совр. наукоём. технологии. Рег. прил.* 2019. № 2 (58). С. 150 – 159.
2. **Kilislioglu A.** Ion Exchange Technologies. Rijeka: InTech. 2012. P. 378. DOI: 10/5772/2925.
3. **SenGupta A.** Ion Exchange in Environmental Processes: Fundamentals, Applications and Sustainable Technology. John Wiley & Sons. 2017. 496 p. DOI: 10.1002/9781119421252.
4. **Inglezakin V.J., Poulopoulos S.G.** Adsorption, Ion Exchange and Catalysis: Design of Operations and Environmental Applications. Netherlands: Elsevier. 2006. 614 p. DOI: 10.1016/B978-044452783-7/50002-1.
5. **Беспалов А.В., Харитонов Н.И.** Системы управления химико-технологическими процессами. М.: Академкнига. 2007. 690 с.
6. **Лапшин Н.А., Натареев С.В.** Нестационарные процессы ионнообменной сорбции ионов меди в аппарате идеального смешения непрерывного действия. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 12. С. 105 - 111. DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6698.
7. **Балакирев В.Ф., Аксенов В.И., Ничкова И.И., Крымский В.В.** Обработка агрессивных промышленных стоков. М.: РАН. 2019. 115 с.
8. Водное хозяйство промышленных предприятий: справочное издание. Кн. 2. Под ред. В.И. Аксенова. М.: Теплотехник. 2005. 432 с.
9. **Алексеев В.Н.** Количественный анализ. М.: Альянс. 2007. 504 с.
10. **Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М.** Массообменные процессы химической технологии. СПб.: Химиздат. 2011. 440 с.
11. **Натареев С.В., Быков А.А., Захаров Д.Е.** Ионный обмен в пульсационной колонне непрерывного действия. *Вектор науки ТГУ.* 2016. № 4 (38). С. 38–44. DOI: 10.18323/2073-5073-2016-4-38-44.
12. **Аксельруд Г.А., Лысянский В.М.** Экстрагирование (система твердое тело – жидкость). Л.: Химия. 1974. 256 с.
13. **Диткин В.А., Прудников А.П.** Справочник по операционному исчислению. М.: Высш. школа. 1965. 465 с.
14. Практикум по ионному обмену. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. 2004. 160 с.
15. **Spencer N., Thornton J.** Ion Exchange: Theory and Applications (Series: Analytical Chemistry and Microchemistry). New York: Nova Science Publ. 2017. 319 p.
16. **Волжинский А.И., Константинов В.А.** Регенерация ионитов. Теория процесса и расчет аппаратов. Л.: Химия. 1990. 240 с.
17. **Натареев С.В.** Ионный обмен из ограниченного объема раствора. Иваново: Изд-во Иванов. гос. хим.-технол. ун-та. 2006. 136 с.
18. **Натареев С.В., Дубкова А.Е., Никифорова Т.Е., Натареев О.С., Быков А.А.** Ионнообменное извлечение ионов двухвалентных металлов в тарельчатой колонне со взвешенным слоем катионита. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2015. Т. 58. Вып. 1. С. 75 – 80.

REFERENCES

1. **Natareev S.V., Zaharov D.E., Lapshin N.A.** Ion exchange water treatment from heavy metal ions in the devices of periodical and continuous action. *Sovr. Naukoem. Tekhnol. Reg. pril.* 2019. N 2 (58). P. 150 – 159 (in Russian).
2. **Kilislioglu A.** Ion Exchange Technologies. Rijeka: InTech. 2012. P. 378. DOI: 10/5772/2925.
3. **SenGupta A.** Ion Exchange in Environmental Processes: Fundamentals, Applications and Sustainable Technology. John Wiley & Sons. 2017. 496 p. DOI: 10.1002/9781119421252.
4. **Inglezakin V.J., Poulopoulos S.G.** Adsorption, Ion Exchange and Catalysis: Design of Operations and Environmental Applications. Netherlands: Elsevier. 2006. 614 p. DOI: 10.1016/B978-044452783-7/50002-1.
5. **Bespalov A.V., Kharitonov N.I.** Control systems for chemical and technological processes. M.: Akademkniga. 2007. 690 p. (in Russian).
6. **Lapshin N.A., Natareev S.V.** Unsteady processes of ion exchange sorption of copper ions in a continuous ideal mixing apparatus. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 12. P. 105 – 111 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6698.
7. **Balakiyev V.F., Aksenov V.I., Nychkova I.I., Krymsky V.V.** Treatment of aggressive industrial effluents. M.: RAS, 2019. 115 p. (in Russian).
8. Water management of industrial enterprises: reference edition. Book 2. Ed. by V.I. Aksenov. M.: Teplotekhnika. 2005. 432 p. (in Russian).
9. **Alekseev V.N.** Quantitative analysis. M.: AlianC. 2007. 504 p. (in Russian).
10. **Romankov P.G., Frolov V.F., Fkisyuk O.M.** Mass transfer processes of chemical technology. SPb.: Khimizdat. 2011. 440 p. (in Russian).
11. **Natareev S.V., Bykov A.A., Zakharov D.E.** Ion exchange in continuous pulsed column. *Vektor Nauki TGU.* 2016. N 4 (38). P. 38 – 44 (in Russian). DOI: 10.18323/2073-5073-2016-4-38-44.
12. **Akselrud G.A., Lysyansky V.M.** Extraction (solid–liquid system). L.: Khimiya. 1974. 256 p. (in Russian).
13. **Ditkin V.A., Prudnikov A.P.** Handbook on operational calculation. M.: Vyssh. Shkola. 1965. 465 p. (in Russian).
14. Workshop on ion exchange. Voronezh: Izd-vo Voronezh. gos. Univ. 2004. 160 p. (in Russian).
15. **Spencer N., Thornton J.** Ion Exchange: Theory and Applications (Series: Analytical Chemistry and Microchemistry). New York: Nova Science Publ. 2017. 319 p.
16. **Volzhinsky A.I., Konstantinov V.A.** Regeneration of ion exchangers. Theory of the process and calculation of devices. L.: Khimiya. 1990. 240 p. (in Russian).
17. **Natareev S.V.** Ion exchange from a limited volume of solution. Ivanovo: Izd-vo Ivanov. Gos. Khim.-Tekhn. univ. 2006. 136 p. (in Russian).
18. **Natareev S.V., Dubkova A.E., Nikiforova T.E., Natareev O.S., Bykov A.A.** Ion exchange extraction of divalent metal ions in a plate column with a suspended cationite layer. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2015. V. 58. N 1. P. 75 – 80 (in Russian).

19. **Натареев С.В., Быков А.А., Захаров Д.Е., Натареев О.С.** Динамика сорбции и десорбции ионов меди в кольцевом слое катионита. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2015. Т. 58. Вып. 10. С. 73 – 76.
20. **Натареев С.В., Быков А.А., Захаров Д.Е., Никифорова Т.Е.** Ионный обмен в аппарате кипящего слоя непрерывного действия. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2017. Т. 60. Вып. 2. С. 85 – 90. DOI: 10.6060/tcct.2017602.5372.
21. **Блиничев В.Н., Лабутин А.Н., Зуева Г.А., Колобов М.Ю., Алексеев Е.А., Волкова Г.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Кокурина Г.Н., Лысова М.А., Миронов Е.В., Натареев С.В., Невиницын В.Ю., Пономарева Ю.Н., Постникова И.В., Сахаров С.Е., Чагин О.В.** Проблемы разработки энерго- и ресурсосберегающих процессов, реакторных систем и оборудования интенсивного действия, моделирования и оптимального управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 185 – 202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j.
19. **Natareev S.V., Bykov A.A., Zakharov D.E., Natareev O.S.** Dynamics of sorption and desorption of copper ions in the annular layer of cationite. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2015. V. 58. N 10. P. 73 – 76 (in Russian).
20. **Natareev S.V., Bykov A.A., Zakharov D.E., Nikiforova T.E.** Ion-exchange in fluid-bed device of continuously working. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2017. V. 60. N 2. P. 85 – 90 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.2017602.5372.
21. **Blinichev V.N., Labutin A.N., Zueva G.A., Kolobov M.Yu., Alekseev E.A., Volkova G.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kokurina G.N., Lysova M.A., Mironov E.V., Natareev S.V., Nevinitsyn V.Yu., Ponomareva Yu.N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V.** Problems of the development of energy- and resource-saving processes, reactor systems and equipment of intense action, modeling and optimal management. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2023. V. 66. N 7. P. 185 – 202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j.

Поступила в редакцию 27.03.2024
Принята к опубликованию 25.06.2024

Received 27.03.2024
Accepted 25.06.2024