

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ИОНООБМЕННОЙ СОРБЦИИ ИОНОВ МЕДИ В АППАРАТЕ ИДЕАЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Н.А. Лапшин, С.В. Натареев

Лапшин Николай Александрович, Натареев Сергей Валентинович*

Кафедра технологических машин и оборудования, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

Email: nikolaj.lapshin.93@bk.ru, natoret@mail.ru*

Статья посвящена исследованию переходных процессов ионообменной сорбции ионов тяжелых металлов на сульфокислотном катионите в емкостном аппарате с мешалкой. Предложено математическое описание процесса ионного обмена с учетом следующих упрощающих допущений: в начальный момент времени внутри аппарата находятся раствор и ионит, содержащие ионы тяжелых металлов; скорость ионного обмена лимитируется как внутренней, так и внешней диффузией; равновесие процесса описывается уравнением изотермы адсорбции Никольского; структура движения раствора и ионита в аппарате описывается моделью идеального смешения. В соответствии с принятыми допущениями сформулировано математическое описание процесса, включающее уравнение материального баланса аппарата, уравнение изотермы адсорбции, уравнение кинетики диффузии, а также начальные и граничные условия третьего рода. Решение задачи выполнено на ЭВМ численным методом, в котором для нахождения неизвестной концентрации раствора используется характеристическое уравнение аппарата непрерывного действия полного смешения. Для проверки адекватности разработанной модели реальному процессу были проведены экспериментальные исследования переходных процессов ионообменной сорбции ионов меди на сульфокислотном катионите Lewatit S-100 в лабораторном емкостном аппарате с мешалкой. При проведении исследований были сняты кривые разгона, на основании которых рассчитаны параметры нестационарного ионообменного процесса: время разгона, постоянная времени, коэффициент усиления объекта и максимальная скорость изменения концентрации раствора на выходе из аппарата. Сравнение результатов расчета и эксперимента позволило сделать вывод об адекватности разработанного математического описания реальному процессу. Расхождение расчета и эксперимента не превышает 14%. Даны рекомендации по применению полученных зависимостей для практического применения.

Ключевые слова: ионный обмен, переходный процесс, емкостной аппарат с мешалкой, математическое описание

UNSTEADY PROCESSES OF ION EXCHANGE SORPTION OF COPPER IONS IN A CONTINUOUS IDEAL MIXING APPARATUS

N.A. Lapshin, S.V. Natareev

Nikolay A. Lapshin, Sergey V. Natareev*

Department Chemical Engineering, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

Email: nikolaj.lapshin.93@bk.ru, natoret@mail.ru*

The article is devoted to the study of transient processes of ion-exchange sorption of heavy metal ions on a sulfonic acid cation exchanger in a vessel with a stirrer. A mathematical description of the ion exchange process is proposed, taking into account the following simplifying assumptions: at the initial moment of time, a solution and an ion exchanger containing heavy metal ions are inside the apparatus; the rate of ion exchange is limited by both internal and external diffusion; the process equilibrium is described by the Nikolsky adsorption isotherm equation; the structure of

the movement of the solution and the ion exchanger in the apparatus is described by the ideal mixing model. In accordance with the accepted assumptions, a mathematical description of the process is formulated, including the equation of the material balance of the apparatus, the equation of the adsorption isotherm, the equation of diffusion kinetics, as well as the initial and boundary conditions of the third kind. The solution of the problem is carried out on an electronic computer by a numerical method, in which the characteristic equation of a continuous-action apparatus of complete mixing is used to find the unknown concentration of the solution. To test the adequacy of the developed model to the real process, experimental studies of transient processes of ion-exchange sorption of copper ions on the Lewatit S-100 sulfonic acid cation exchanger in a laboratory capacitive apparatus with a stirrer were carried out. During the research, acceleration curves were taken, on the basis of which the parameters of the non-stationary ion-exchange process were calculated: acceleration time, time constant, gain of the object and the maximum rate of change in the concentration of the solution at the outlet of the apparatus. 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 14%. Recommendations are given on the application of the obtained dependences for practical application.

Key words: ion exchange, transient process, capacitive apparatus with stirrer, mathematical description

Для цитирования:

Лапшин Н.А., Натареев С.В. Нестационарные процессы ионообменной 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.

For citation:

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. DOI: 10.6060/ivkkt.20226512.6698.

ВВЕДЕНИЕ

К одному из основных процессов химической технологии относится процесс ионного обмена. Перспективным направлением аппаратурного оформления ионообменной обработки растворов являются аппараты непрерывного действия с интенсивным перемешиванием суспензии ионит-раствор. При эксплуатации данных аппаратов могут возникать так называемые переходные явления, возникающие в результате изменения концентрации и расхода исходного раствора и иных внешних возмущающих воздействий [1]. Переход режима работы аппарата из одного стационарного состояния в другое характеризуется вполне определенным законом изменения параметров двухфазного потока во времени. Необходимость исследования данного процесса обусловлена потребностью в точном прогнозировании времени выхода работы аппарата на стационарный режим, что позволяет повысить эффективность расхода материалов, участвующих в ионообменном процессе.

Одним из методов исследования процессов химической технологии является метод математического моделирования. В литературе в основном уделено значительное внимание моделированию

стационарных процессов в непрерывно действующих аппаратах [2-10]. Получены аналитические решения задач об изменении нестационарных полей концентрации вещества в телах классических форм (сфера, неограниченная пластина и неограниченный цилиндр) с равномерным и неравномерным начальным распределением концентрации вещества в условиях постоянной концентрации раствора [11-17]. Известны решения задач адсорбции из ограниченного объема раствора, в которых учитывается изменение концентрации раствора при протекании процесса [4]. В работе [18] найдены решения задач массообмена между твердой и жидкой фазами в емкостном аппарате полного смешения полупериодического действия (периодического по твердой фазе и непрерывного по жидкой фазе). Обзор известной литературы показал, что в настоящее время недостаточно изучены переходные процессы ионного обмена в емкостном аппарате непрерывного действия.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Пусть имеется емкостной аппарат непрерывного действия, в который помещены ионит объемом \bar{V} (м³) с начальной концентрацией сорбируемого вещества $\bar{c}_{cp,0}$ (кг-экв/м³) и раствор объемом

V (м^3) с начальной концентрацией C_0 ($\text{кг-экв}/\text{м}^3$). Ионит и раствор находятся внутри аппарата в состоянии равновесия. С момента времени $\tau = 0$ в аппарат поступает раствор с объемным расходом Q ($\text{м}^3/\text{с}$) и концентрацией вещества $C_{\text{вх}}$ ($\text{кг-экв}/\text{м}^3$), а также ионит с объемным расходом \bar{Q} ($\text{м}^3/\text{с}$) и концентрацией вещества $\bar{C}_{\text{ср.вх}}$ ($\text{кг-экв}/\text{м}^3$). Одновременно из аппарата выводится равное количество раствора с концентрацией $C(\tau)$ ($\text{кг-экв}/\text{м}^3$) и ионита с концентрацией $\bar{C}_{\text{ср}}(\tau)$ ($\text{кг-экв}/\text{м}^3$). Для разработки математического описания процесса ионного обмена примем следующие допущения: равновесие ионного обмена между раствором и ионитом описывается уравнением изотермы адсорбции Никольского; скорость процесса лимитируется как внешней, так и внутренней диффузией; структура движения твердой и жидкой фаз в аппарате описывается моделью полного смешения.

С учетом принятых допущений математическое описание процесса включает следующие уравнения:

– характеристическое уравнение аппарата полного смешения непрерывного действия:

$$V \frac{dC(\tau)}{d\tau} + \bar{V} \frac{d\bar{C}_{\text{ср}}(\tau)}{d\tau} = Q[C_{\text{вх}} - C(\tau)] + \bar{Q}[\bar{C}_{\text{ср.вх}} - \bar{C}_{\text{ср}}(\tau)]; \quad (1)$$

– уравнение изотермы адсорбции Никольского для обмена двухвалентного иона на одновалентный:

$$K_c = \frac{(C_{\text{вх}} - C)^2 \bar{C}_{\text{ср}}}{(a_0 - \bar{C}_{\text{ср}})^2 C}; \quad (2)$$

– уравнение кинетики диффузии:

$$D \left[\frac{\partial^2 \bar{C}(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \bar{C}(r, \tau)}{\partial r} \right] = \frac{\partial \bar{C}(r, \tau)}{\partial \tau} \quad (\tau > 0; \quad 0 \leq r \leq r_0); \quad (3)$$

– уравнение для определения средней концентрации сорбируемого вещества в ионите:

$$\bar{C}_{\text{ср}}(\tau) = \frac{3}{r_0^3} \int_0^{r_0} r^2 \bar{C}(r, \tau) dr; \quad (4)$$

– начальные и граничные условия:

$$C(0) = C_0; \quad (5)$$

$$\bar{C}_{\text{ср}}(0) = \bar{C}(r, 0) = \bar{C}_{\text{ср.0}}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \bar{C}(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad \bar{C}(0, \tau) \neq \infty; \quad (7)$$

$$D \frac{\partial \bar{C}(r_0, \tau)}{\partial r} = \beta [C(\tau) - C_{\text{гр}}(\tau)]; \quad (8)$$

где a_0 – ионообменная емкость ионита, $\text{кг-экв}/\text{м}^3$; \bar{D} – коэффициент диффузии в ионите, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; K_c – концентрационная константа равновесия; r – радиальная координата частицы, м ; r_0 – радиус частицы ионита, м ; β – коэффициент массоотдачи в растворе, $\text{м}/\text{с}$; τ – время, с ; индексы: гр – граничный; вх – входящий; ср – средний; 0 – начальный.

Решение системы уравнений (1) – (8) было выполнено на ЭВМ с применением однородных консервативных разностных схем. В результате решения находили теоретическую кривую разгона, которую сравнивали с экспериментальными данными. На основании полученных результатов эксперимента графическим способом определялось время выхода работы аппарата на стационарный режим (время разгона) τ_c . Также рассчитывались следующие характеристики переходного процесса [19].

Постоянная времени по жидкой фазе T :

$$T = \frac{V_{\text{ж}}}{Q_{\text{ж}}}. \quad (9)$$

Коэффициент передачи объекта $K_{\text{об}}$:

$$K_{\text{об}} = \left| \frac{C_{\text{вых}} - C_0}{C_{\text{вх}}} \right|. \quad (10)$$

Величина максимальной скорости изменения концентрации раствора R :

$$R = \frac{C_{\text{вых}}}{T}. \quad (11)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования переходных процессов сорбции ионов меди проводили на лабораторной установке, схема которой показана на рис. 1. Основным элементом установки являлся емкостной аппарат 1 с эллиптическим днищем. Аппарат был изготовлен из полипропилена диаметром 100 мм и высотой 140 мм. В состав установки также входили емкости для исходного 2 и очищенного 3 растворов, емкость для катионита в Na-форме 4, емкость для отработанного катионита 5, дозаторы 6 и 7, ротаметр 8, центробежный насос 9 и вентили 10 - 12. Для перемешивания суспензии раствор-ионит использовали двухлопастную мешалку диаметром 50 мм и высотой лопасти 5 мм. Частота вращения мешалки составляла 5 с^{-1} . Частота вращения мешалки была выбрана из предварительных опытов, в которых установлено, что скорость ионного обмена практически не зависит от числа оборотов мешалки.

Для проведения опытов в емкостной аппарат 1 заливали дистиллированную воду. Затем включали мешалку и одновременно загружали в аппарат определенную навеску катионита в Na-

форме и подавали в него исходный раствор из емкости 2 с помощью насоса 9 и отрегенерированный катионит из емкости 4 с помощью дозатора 6. Расход раствора установили по ротаметру 8. Одновременно из аппарата выводили самотеком очищенный раствор в емкость 3 и отработанный катионит с помощью дозатора 7 в емкость 5. Через определенные промежутки времени отбирали пробы раствора на выходе из аппарата, которые анализировали на содержание в них ионов сорбированного вещества. Опыт заканчивался, когда аппарат выходил на стационарный режим.

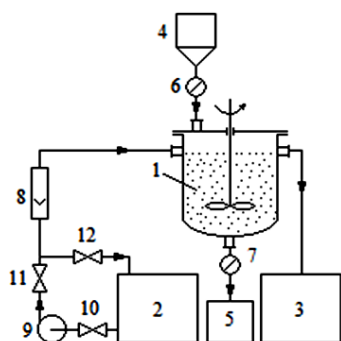


Рис. 1. Схема лабораторной установки
Fig. 1. Scheme of the laboratory setup

Для изучения нестационарных процессов ионного обмена использовали растворы сульфата меди с концентрацией $C_{вх}$, равной 0,1-0,01 кг-экв/м³. Объемный расход раствора Q изменялся в интервале от $1,5 \cdot 10^{-5}$ до $2,5 \cdot 10^{-5}$ м³/с. В качестве сорбента использовали сульфокислотный катионит Lewatit S-100 в Na-форме. Катионит был предварительно переведен в Na-форму в статических условиях раствором хлористого натрия концентрацией 1,8 кг-экв/м³ и отмыт дистиллированной водой. Во всех опытах объемный расход катионита \bar{Q} составлял $1,4 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Объем раствора V внутри аппарата составлял $9,5 \cdot 10^{-4}$, $9,4 \cdot 10^{-4}$ и $9,35 \cdot 10^{-4}$ м³, а катионита \bar{V} соответственно $5 \cdot 10^{-5}$, $6 \cdot 10^{-5}$ и $6,5 \cdot 10^{-5}$ м³, что соответствовало соотношениям $V/\bar{V} = 19, 15,7$ и $14,4$. Для определения концентрации раствора сульфата меди использовали метод УФ-спектрометрии по поглощению при длине волны 590 нм. Для определения оптической плотности раствора использовали спектрофотометр U-2001 (Hitachi, Япония). Для анализа использовали кювету с длиной оптического пути 20 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментальных и расчетных исследований приведены на рис. 2-4, на которых по оси абсцисс указано время процесса, а по

оси ординат – безразмерная концентрация раствора $N(\tau) = C(\tau)/C_{вх}$.

Как видно из представленных рис. 2-4, на форму кривых разгона оказывают определенное влияние объемный расход и концентрация исходного раствора, а также соотношение твердой и жидкой фаз в аппарате. На первых стадиях процесса наблюдается повышение концентрации раствора внутри аппарата, что связано в основном с поступлением в аппарат исходного раствора. Затем наблюдается плавное уменьшение концентрации раствора вследствие ионообменной адсорбции сорбируемого вещества катионитом. Как видно из кривых разгона, увеличение объемного расхода раствора на входе в аппарат приводит к уменьшению времени переходного процесса и увеличению концентрации раствора на выходе из аппарата. Также установлено, что соотношение катионита и раствора внутри аппарата в исследованном интервале не оказывает существенного влияния на время установления стационарного режима.

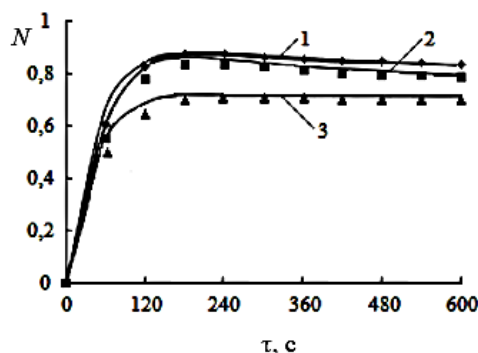


Рис. 2. Сравнение результатов расчета (кривые 1-3) и экспериментальных данных (маркеры) процесса ионообменной сорбции меди: $C_0 = \bar{C}_{ср,0} = 0$; $V = 9,4 \cdot 10^{-4}$ м³; $\bar{V} = 6 \cdot 10^{-5}$ м³;

$$Q = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}; C_{вх}, \text{ кг-экв}/\text{м}^3: 1 - 0,1; 2 - 0,05; 3 - 0,01$$

Fig. 2. Comparison of the results of calculation (curves 1-3) and experimental data (markers) of the process of ion-exchange sorption of copper: $C_0 = \bar{C}_{ср,0} = 0$; $V = 9,4 \cdot 10^{-4}$ м³; $\bar{V} = 6 \cdot 10^{-5}$ м³;

$$Q = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}; C_{им}, \text{ кг-экв}/\text{м}^3: 1 - 0,1; 2 - 0,05; 3 - 0,01$$

На рис. 2-4 также приведены в сравнении с экспериментальными данными результаты расчета с помощью разработанной математической модели для случая, когда $\bar{C}_{ср,0} = C_0 = 0$. Для расчетов были использованы следующие параметры ионообменных процессов: $a_0 = 1,2$ кг-экв/м³; $\bar{D} = 4,52 \cdot 10^{-11}$ м²/с и $K_c = 2$ при $C_{вх} = 0,1$ кг-экв/м³; $\bar{D} = 1,83 \cdot 10^{-11}$ м²/с и $K_c = 3$ при $C_{вх} = 0,05$ кг-экв/м³; $\bar{D} = 1,46 \cdot 10^{-11}$ м²/с и $K_c = 6$ при $C_{вх} = 0,01$ кг-экв/м³ [20]. Средний диаметр зерен набухшего катионита составлял $5,1 \cdot 10^{-4}$ м.

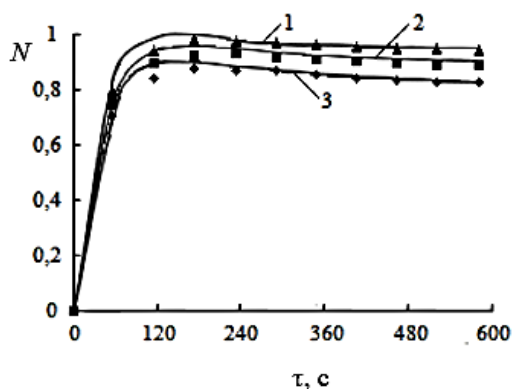


Рис. 3. Сравнение результатов расчета (кривые 1-3) и экспериментальных данных (маркеры) процесса ионообменной сорбции меди: $C_0 = \bar{C}_{cp,0} = 0$; $C_{вх} = 0.1$ кг-экв/м³; $V = 9.4 \cdot 10^4$ м³;

$$\bar{V} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3; Q \cdot 10^5, \text{ м}^3/\text{с}: 4 - 1.5; 5 - 2; 6 - 2.5$$

Fig. 3. Comparison of the results of calculation (curves 1-3) and experimental data (markers) of the process of ion-exchange sorption of copper: $C_0 = \bar{C}_{cp,0} = 0$; $C_{im} = 0.1$ kg-eq/m³; $V = 9.4 \cdot 10^4$ м³;

$$\bar{V} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3; Q \cdot 10^5, \text{ м}^3/\text{с}: 4 - 1.5; 5 - 2; 6 - 2.5$$

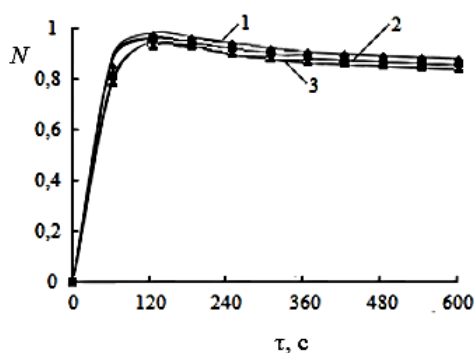


Рис. 4. Сравнение результатов расчета (кривые 1-3) и экспериментальных данных (маркеры) процесса ионообменной сорбции меди: $C_0 = \bar{C}_{cp,0} = 0$; $C_{вх} = 0.1$ кг-экв/м³; $Q = 1.5 \cdot 10^{-5}$ м³/с;

$$V/\bar{V} : 1 - 19; 2 - 15.7; 3 - 14.4$$

Fig. 4. Comparison of the results of calculation (curves 1-3) and experimental data (markers) of the process of ion-exchange sorption of copper: $C_0 = \bar{C}_{cp,0} = 0$; $C_{im} = 0.1$ kg-eq/m³; $Q = 1.5 \cdot 10^{-5}$ м³/с;

$$V/\bar{V} : 1 - 19; 2 - 15.7; 3 - 14.4$$

Коэффициент массоотдачи в растворе определяли по эмпирической зависимости [21]:

$$\beta = 0.504 \frac{D}{d_3} \left(\frac{\varepsilon d_3^4}{\nu^3} \right)^{0.206} Pr^{1/3}, \quad (12)$$

где D – коэффициент диффузии вещества в растворе, м²/с; d_3 – диаметр набухшего зерна ионита, м; $\varepsilon = N/(\rho_c V)$ – средняя скорость диссипации энергии; V – объем суспензии, м³; ν – кинематический коэффициент вязкости раствора, м²/с; ρ_c – плотность суспензии; кг/м³; $Pr = \nu/D$ – число

Прандтля; N – мощность, затрачиваемая на перемешивание, Вт; значение N определяется по опытным зависимостям $N/(\rho_c n^3 d_M^5) = f(Re_{ц})$ [22]; $Re_{ц} = \rho_c n d_M / \mu$ – число Рейнольдса; d_M – диаметр мешалки, м; n – частота вращения мешалки, 1/с; μ – динамический коэффициент вязкости раствора, Па·с.

Расчеты выполнены в системе компьютерной математики Mathcad Prime 4. Сравнение расчетных и экспериментальных данных переходных процессов ионного обмена позволяет сделать вывод об их удовлетворительной сходимости. Расхождение расчета и эксперимента не превышает 14%.

Результаты обработки экспериментальных данных сведены в таблицу, в которой приведены параметры переходных процессов ионного обмена. Опыты 1-3 проводили при различных концентрациях раствора (рис. 2), опыты 4-6 – при различных объемных расходах раствора (рис. 3) и опыты 7-9 – при различном соотношении объемов жидкой и твердой фаз в аппарате (рис. 4).

Таблица

Параметры переходного процесса
Table. Parameters of transient processes

Показатель	Значение показателя		
Номер опыта	1	2	3
$C_{вых}$, кг-экв/м ³	0,083	0,039	0,007
T , с	47	47	47
τ_c , с	180	360	540
$K_{об}$	0,84	0,78	0,6
$R \cdot 10^4$, кг-экв/(м ³ /с)	17,87	8,23	1,28
Номер опыта	4	5	6
$C_{вых}$, кг-экв/м ³	0,072	0,078	0,084
T , с	63	47	37,6
τ_c , с	120	180	240
$K_{об}$	0,72	0,78	0,84
$R \cdot 10^4$, кг-экв/(м ³ /с)	11,5	16,6	22,34
Номер опыты	7	8	9
$C_{вых}$, кг-экв/м ³	0,075	0,073	0,071
T , с	64	63	62
τ_c , с	360	360	360
$K_{об}$	0,75	0,73	0,71
$R \cdot 10^4$, кг-экв/(м ³ /с)	11,84	11,52	11,39

В опытах при изменении концентрации раствора на входе в аппарат наблюдается неизменность постоянной времени T . При этом с уменьшением концентрации раствора на входе в аппарат $C_{вх}$ происходит увеличение времени разгона τ_c и снижение коэффициента передачи объекта $K_{об}$, что позволяет сделать вывод о повышении способности ионообменной системы к самовыравниванию. Данный вывод также подтверждается уменьшением значений максимальной скорости изменения концентрации раствора на выходе из аппарата R .

Из анализа данных, приведенных в таблице, установлено, что с повышением расхода раствора Q увеличивается интенсивность процесса, снижается степень очистки раствора, возрастают время разгона τ_c , коэффициент передачи объекта $K_{об}$, максимальная скорость изменения концентрации раствора R и снижается постоянная времени T , что указывает на уменьшение инерционности ионообменной системы, которая будет быстрее реагировать на регулирующее воздействие. Полученные данные позволяют перейти к выбору необходимых средств автоматического регулирования, т.е. к выбору закона регулирования и соответствующего типа регулятора и его настроек.

В опытах при изменении соотношения жидкой и твердой фаз в аппарате V/\bar{V} в исследованном интервале не происходит существенного изменения величин переходных параметров процесса ионного обмена.

Разработанная математическая модель может быть рекомендована к применению для прогнозирования протекания процесса ионообменной сорбции в аппаратах с интенсивным перемешиванием суспензии катионит-раствор, например, в гидрометаллургии при разделении и выделении редкоземельных элементов, извлечении цветных и благородных металлов [23].

ВЫВОДЫ

В работе разработано математическое описание нестационарного процесса ионного обмена в

емкостном аппарате непрерывного действия с мешалкой, позволяющее прогнозировать время выхода аппарата на стационарный режим. Адекватность модели подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов расчета с экспериментальными данными ионного обмена Cu^{2+} - Na^+ на катионите Lewatit S-100. Установлены значения характеристик управляемости процесса ионного обмена в зависимости от концентрации и расхода раствора на входе в аппарат, а также соотношений объемов раствора и катионита внутри аппарата, которые позволяют судить об интенсивности переходного процесса, его инерционности и способности к самовыравниванию.

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. **Беспалов А.В., Харитонов Н.И.** Системы управления химико-технологическими процессами. М.: Академкнига. 2007. 690 с.
2. **Филимонова О.Н., Викулин А.С., Енютина М.В., Иванов А.В.** Влияние входной температуры на изотермическую очистку газа от монопримеси неподвижным слоем адсорбента. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 9. С. 88–92. DOI: 10.6060/ivkkt.20206309.6247.
3. **Натареев С.В., Захаров Д.Е., Сироткин А.А., Беляев С.В.** Ионный обмен на волокнистом ионите в емкостном аппарате проточного типа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 1. С. 107–113. DOI: 10.6060/ivkkt.20196201.5783.
4. **Singare P.U., Lokhande R.S., Prabhavalkar T.S.** Thermodynamics of ion exchange equilibrium for some univalent and divalent reaction systems using strongly basic anion exchange resin Indion FFIP. *Bull. Chem. Soc. Ethiopia.* 2008. December. P. 415–420. DOI: 10.4314/bcse.v22i3.61226.
5. **Груздева А.Н., Хамизов Р.Х., Золотарев П.П.** О теоретическом описании процессов внутридиффузионной сорбции и десорбции в ионообменных сорбентах. *Сорбц. и хроматограф. процессы.* 2008. Т. 8. Вып. 1. С. 99–105.

REFERENCES

1. **Bespalov A.V., Kharitonov N.I.** Control systems for chemical and technological processes. M.: Akademkniga. 2007. 690 p. (in Russian).
2. **Filimonova O.N., Vikulin A.S., Enyutina M.V., Ivanov A.V.** Inlet temperature influence on isothermal gas cleaning from mono-impurities by fixed layer of adsorbent. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2020. V. 63. N 9. P. 88–92. (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206309.6247.
3. **Natareev S.V., Zakharov D.E., Sirotkin A.A., Belyaev S.V.** Ion exchange on a fibrous ion exchanger in a capacitive flow type apparatus. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2019. V. 62. N 1. P. 107–113 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20196201.5783.
4. **Singare P.U., Lokhande R.S., Prabhavalkar T.S.** Thermodynamics of ion exchange equilibrium for some univalent and divalent reaction systems using strongly basic anion exchange resin Indion FFIP. *Bull. Chem. Soc. Ethiopia.* 2008. December. P. 415–420. DOI: 10.4314/bcse.v22i3.61226.
5. **Gruzdeva A.N., Khamizov R.Kh., Zolotarev P.P.** Theoretical description of the processes of intra-diffusion sorption and desorption in ion-exchange sorbents. *Sorbts. Khromatograf. Protsessy.* 2008. V. 8. N 1. P. 99–105 (in Russian).

6. **Полуляхова Н.Н.** Исследование кинетики сорбции на синтезированном ионите. *Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. Сер. 4.* 2010. № 2. С. 71-78.
7. **Zhao G., Wu X., Tan X., Wang X.** Sorption of heavy metal ion from aqueous solutions: A review. *Open Colloid Sci. J.* 2011. N 4. P. 19–31. DOI: 10.2174/1876530001104010019.
8. **Тимофеев К.Л., Усольцев А.В., Краюхин С.А., Мальцев Г.И.** Кинетика сорбции ионов индия, железа и цинка слабокислотными катионитами. *Сорбц. и хроматограф. процессы.* 2015. Т. 15. Вып. 5. С. 720-730.
9. **Долгоносков А.М., Хамизов Р.Х., Крачак А.Н., Прудковский А.Г., Колотилина Н.К.** Нелинейная кинетика многокомпонентного ионного обмена. Макроскопическая модель и немонотонные кривые. *Сорбц. и хроматограф. процессы.* 2014. Т. 14. Вып. 5. С. 724-734.
10. **Рудобашта С.П., Карташов Э.М.** Диффузия в химико-технологических процессах. М.: Колос С. 2010. 478 с.
11. **Рудобашта С.П., Кошелева М.К., Карташов Э.М.** Математическое моделирование экстрагирования целевого компонента из тел цилиндрической формы в полунепрерывном процессе. *Инж.-физич. журн.* 2016. Т. 89. № 3. С. 595-602.
12. **Рудобашта С.П., Кошелева М.К., Карташов Э.М.** Моделирование экстрагирования целевого компонента из тел сферической формы в полунепрерывном процессе. *Инж.-физич. журн.* 2017. Т. 90. № 4. С. 841-849. DOI: 10.1007/s10891-017-1628-4.
13. **Натареев С.В., Коккина Н.Р., Натареев О.С., Дубкова Е.А.** Массоперенос в системе с твердой фазой. *Теоретич. осн. химич. технол.* 2015. Т. 49. № 1. С. 74-78. DOI: 10.7868/S0040357115010091.
14. **Акулинин Е.И., Голубятников О.О., Дворецкий С.И.** Короткоцикловая безнагревная адсорбция для извлечения водорода, кислорода и азота из газовых смесей: математическое моделирование, оптимизация режимов функционирования и проектирование установок. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 11. С. 8–29. DOI: 10.6060/ivkkt.20216411.6459.
15. **Yusuff A.S., Popoola L.T., Omitola O.O., Adeodu A.O., Daniyan I.A.** Mathematical Modelling of Fixed Bed Adsorption Column for Liquid Phase Solute: Effect of Operating Variables. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 2013. V. 4. N 8. P. 811–822.
16. **Shafeeyan M.S., Wan Mohd Ashri Wan Daud, Shamir A.** A review of mathematical modeling of fixed-bed columns for carbon dioxide adsorption. *Chem. Eng. Res. Design.* 2014. N 92. P. 961–988. DOI: 10.1016/j.cherd.2013.08.018.
17. **Zhe Xu, Jian-guo Cai, Bing-cai Pan.** Mathematically modeling fixed-bed adsorption in aqueous systems. *J. Zhejiang University -Sci. A: Appl. Phys. Eng.* 2013. V. 14. N 3. P. 155–176. DOI: 10.1631/jzus.A1300029.
18. **Natareev S.V., Bykov A.A., Natareev O.S., Zakharov D.E.** Mass transfer in bodies of classical shapes in a semicontinuous complete mixing apparatus. *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 2. P. 202-208. DOI: 10.1134/S1070427217020070.
19. **Староверов А.Г.** Основы автоматизации производства. М.: Альянс. 2021. 312 с.
20. **Волжинский А.И., Константинов В.А.** Регенерация ионитов. Теория процесса и расчет аппаратов. Л.: Химия. 1990. 240 с.
21. **Когановский А.М.** Адсорбция и ионный обмен в процессах водоподготовки и очистки сточных вод. Киев: Наукова думка. 1983. 240 с.
22. **Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия. 1987. 576 с.
23. **Лебедев К.Б., Казанцев Е.И., Розманов В.М.** Иониты в цветной металлургии. М.: Металлургия. 1975. 352 с.
6. **Polulyakhova N.N.** Study of kinetics of adsorption on synthesized ionite. *Vestn. Sankt-Peterburg. Un-ta. Ser. 4.* 2010. N 2. P. 71-78 (in Russian).
7. **Zhao G., Wu X., Tan X., Wang X.** Sorption of heavy metal ion from aqueous solutions: A review. *Open Colloid Sci. J.* 2011. N 4. P. 19–31. DOI: 10.2174/1876530001104010019.
8. **Timofeev K.L., Usoltsev V.A., Krayukhin S.A., Maltsev G.I.** Kinetics of sorption of ions of indium, iron and zinc by weak acid cation cationites. *Sorbts.Khromatograf. Protssessy.* 2015. V. 15. N 5. P. 720-730 (in Russian).
9. **Dolgonosov A.M., Khamisov R.H., Krachak A.N., Prudkovsky A.G., Kolotilina N.K.** Non-linear kinetics of multicomponent ion exchange. Macroscopic model and non-monotonic curves. *Sorbts. Khromatograf. Protssessy.* 2014. V. 14. N 5. P. 724-734 (in Russian).
10. **Rudobashta, S.P., Kartashov E.M.** Diffusion in chemical-technological processes. М.: KolosS. 2010. 478 p. (in Russian).
11. **Rudobashta, S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M.** Mathematical modeling of extraction of the target component from the bodies of cylindrical shape in a semi-continuous process. *Inzh.-Fizich. Zhurn.* 2016. V. 89. N 3. P. 595-602 (in Russian).
12. **Rudobashta, S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M.** Modeling of the extraction of the target component from the bodies of spherical shape in a semi-continuous process. *Inzh.-Fizich. Zhurn.* 2017. V. 90. N 4. P. 841-849 (in Russian). DOI: 10.1007/s10891-017-1628-4.
13. **Natareev S.V., Kokkina N.R., Natareev O.S., Dubkova E.A.** Mass transfer in a system with a solid. *Teoretich. Osn. Khimich. Tekhnol.* 2015. V. 49. N 1. P. 74-78 (in Russian). DOI: 10.7868/S0040357115010091.
14. **Akulinin E.I., Golubyatnikov O.O., Dvoretzky S.I.** Pressure swing adsorption for recovery hydrogen, oxygen and nitrogen from gas mixtures: mathematical modeling, optimization and units design. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2021. V. 64. N 11. P. 8–29. (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216411.6459.
15. **Yusuff A.S., Popoola L.T., Omitola O.O., Adeodu A.O., Daniyan I.A.** Mathematical Modelling of Fixed Bed Adsorption Column for Liquid Phase Solute: Effect of Operating Variables. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 2013. V. 4. N 8. P. 811–822.
16. **Shafeeyan M.S., Wan Mohd Ashri Wan Daud, Shamir A.** A review of mathematical modeling of fixed-bed columns for carbon dioxide adsorption. *Chem. Eng. Res. Design.* 2014. N 92. P. 961–988. DOI: 10.1016/j.cherd.2013.08.018.
17. **Zhe Xu, Jian-guo Cai, Bing-cai Pan.** Mathematically modeling fixed-bed adsorption in aqueous systems. *J. Zhejiang University -Sci. A: Appl. Phys. Eng.* 2013. V. 14. N 3. P. 155–176. DOI: 10.1631/jzus.A1300029.
18. **Natareev S.V., Bykov A.A., Natareev O.S., Zakharov D.E.** Mass transfer in bodies of classical shapes in a semicontinuous complete mixing apparatus. *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 2. P. 202-208. DOI: 10.1134/S1070427217020070.
19. **Staroverov A.G.** Basics of factory automation. М.: Al'yans. 2021. 312 p. (in Russian).
20. **Volzhinsky A.I., Konstantinov V.A.** Regeneration of ion exchangers. Theory of the process and calculation of devices. Л.: Khimiya. 1990. 240 p. (in Russian).
21. **Koganovskiy A.M.** Adsorption and ion exchange in the processes of water treatment and wastewater treatment. Kiev: Naukova dumka. 1983. 240 p. (in Russian).
22. **Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A.** Examples and tasks in the course of processes and devices of chemical technology. Л.: Khimiya. 1987. 576 p. (in Russian).
23. **Lebedev K.B., Kazantsev E.I., Rozmanov V.M.** Ionites in non-ferrous metallurgy. М.: Metallurgy. 1975. 352 p. (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 30.06.2022

Принята к опубликованию (Accepted) 03.10.2022