

УДК 66.011:66.023

ИОНООБМЕННАЯ ОЧИСТКА РАСТВОРОВ В КАСКАДЕ ЕМКОСТНЫХ АППАРАТОВ

С.В. Натареев, Д.Е. Захаров, Н.А. Лапшин

Ивановский государственный химико-технологический университет

В статье приводится математическое описание проточного процесса ионного обмена в каскаде емкостных аппаратов. При построении математической модели предполагают, что каскад состоит из ряда емкостных аппаратов с одинаковым рабочим объемом. В каждом аппарате перемешивание раствора и ионита принимается идеальным. Равновесие ионного обмена описывается уравнением линейной изотермы адсорбции Генри. Скорость процесса лимитируется как внутренней, так и внешней диффузией. Задача расчета состоит в определении распределения концентрации сорбируемого вещества в растворе и ионите по аппаратам каскада. Адекватность разработанной математической модели установлена на примере очистки воды от фосфат-ионов на анионите АВ-17-8 и ионов цинка на катионите КУ-2-8. Удовлетворительное совпадение результатов расчета и эксперимента позволило рекомендовать математическую модель для практического применения.

Ключевые слова: каскад емкостных аппаратов, ионный обмен, очистка воды.

Емкостные аппараты с мешалкой относятся к одному из наиболее распространенных видов химико-технологического оборудования. В аппаратах этого типа успешно может проводиться ионообменная очистка воды, поскольку перемешивание воды и ионита в рабочем объеме аппарата обеспечивает интенсификацию массообменного процесса между взаимодействующими фазами. С целью увеличения степени очистки воды и повышения использования обменной емкости ионита устанавливают каскад из емкостных аппаратов, которые соединяют между собой последовательно.

Данная работа посвящена разработке математического описания процесса ионного обмена в каскаде емкостных аппаратов. При построении математической модели предполагают, что каскад состоит из m емкостных аппаратов с одинаковым рабочим объемом $V_a = V + \bar{V}$, где V , \bar{V} – объем раствора и ионита в аппарате соот-

ветственно. В первый аппарат каскада поступают раствор с объемной скоростью Q и концентрацией $C_{вх}$, а также ионит с объемной скоростью \bar{Q} и с начальным содержанием целевого компонента $\bar{C}_{вх}$. В каждом аппарате перемешивание раствора и ионита принимается идеальным. Равновесие ионного обмена описывается уравнением линейной изотермы адсорбции Генри. Скорость процесса лимитируется как внутренней, так и внешней диффузией. Ионит представляет собой частицы сферической формы, имеющие однородную изотропную структуру. Задача расчета состоит в определении распределения концентрации сорбируемого вещества в растворе и ионите по аппаратам каскада. Для решения данной задачи с учетом принятых допущений предложено математическое описание, включающее следующие уравнения:

- уравнение материального баланса для i -го аппарата каскада:

$$Q(C_{вх,i} - C_{вых,i}) = \bar{Q}(\bar{C}_{вых,i} - \bar{C}_{вх,i}) \quad 1 \leq i \leq m; \quad (1)$$

- уравнение для определения средней концентрации сорбируемого вещества

ства в ионите на выходе из каскада аппаратов [1]:

$$\bar{C}_{\text{вых}} = \int_0^{\infty} f(\tau) \bar{C}_{\text{ср}}(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где C – концентрация сорбируемого вещества в растворе, кг-экв/м³; \bar{C} – концентрация сорбируемого вещества в ионите, кг-экв/м³; τ – время, с; $f(\tau)$ – функция, характеризующая структуру потока ионита; $\bar{C}_{\text{ср}}(\tau)$ – решение уравнения кинетики ионного обмена; индексы:

вх – входящий, вых – выходящий, ср – средний.

Функция распределения времени пребывания частиц ионита для ячеечной модели при импульсном возмущении имеет вид [1]:

$$f(\tau) = \frac{m^m}{(m-1)!} \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^{m-1} e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}, \quad (3)$$

где m – число ячеек; $\tau_0 = \bar{V}/\bar{Q}$ – среднее время пребывания ионита в аппарате, с.

даци ионного обмена из ограниченного объема раствора для сферической частицы ионита [2]:

В качестве уравнения кинетики ионного обмена используем решение за-

$$\frac{\bar{C}_{\text{ср}}(\tau) - \bar{C}_{\text{вх}}}{a_0 - \bar{C}_{\text{вх}}} = \frac{1}{1 + M/3} - \sum_n A_n e^{-\frac{\mu_n^2 \bar{D} \tau}{r_0^2}}, \quad (4)$$

$$\text{где } A_n = \frac{6Bi(\sin \mu_n - \cos \mu_n)}{\mu_n^3 \left[\left(\mu_n - \frac{MBi}{\mu_n} + \frac{2MBi}{\mu_n^3} \right) \sin \mu_n - \left(\frac{2MBi}{\mu_n^2} + Bi \right) \cos \mu_n \right]}, \quad M = \frac{3\Gamma \bar{Q}}{Q}, \quad Bi = \frac{\beta r_0}{\Gamma \bar{D}},$$

a_0 – равновесное значение адсорбции, кг-экв/м³; \bar{D} – коэффициент диффузии в ионите, м²/с; r_0 – радиус частицы, м; β – коэффициент массоотдачи в рас-

творе, м/с; Γ – константа изотермы ионообменной адсорбции Генри; μ_n – корни характеристического уравнения:

$$tg \mu = \frac{BiM - \mu^2}{\frac{MBi}{\mu_n} + \mu(Bi - 1)}. \quad (5)$$

Подставим функции $f(\tau)$ и $\bar{C}_{\text{ср}}(\tau)$ соответственно из уравнений (3) и (4)

в уравнении (2) и, применив формулу [3]

$$\int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-bx} dx = \frac{(a-1)!}{b^a}, \quad (6)$$

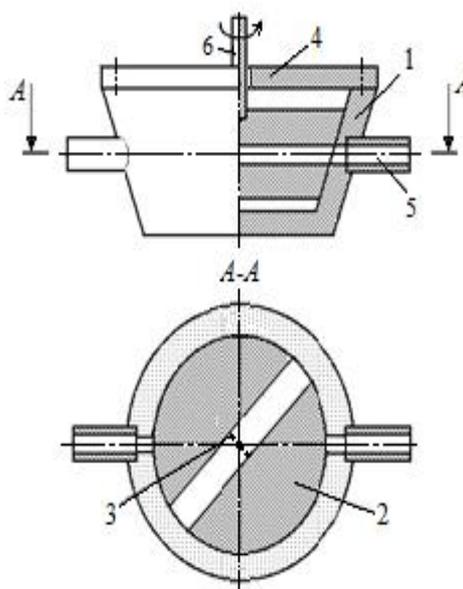


Рис. 2. Схема дозатора ионита:

1 – корпус; 2 – пробка; 3 – сетка; 4 – крышка; 5 – штуцер, 6 – ось

Перед началом опытов во все аппараты каскада загружали равные количества ионита, после чего с помощью насоса 10 из емкости 8 через вентили 12, 14 и ротаметр 11 непрерывно подавали в первый аппарат 1 каскада исходный раствор, который затем самотеком направлялся в следующий аппарат 2 и т.д. Далее включали мешалки и дозаторы ионита 4–7. Частота вращения мешалок n_M во всех аппаратах составляла 7 с^{-1} . Направление движения ионита в каскаде аппаратов

совпадало с направлением движения раствора. Отбор проб на анализ осуществляли из каждого аппарата каскада после выхода установки на стационарный режим работы. Характеристики работы ионообменной установки приведены в таблице.

Для расчета коэффициента массоотдачи в жидкой фазе в емкостном аппарате с мешалкой использовали следующее критериальное уравнение [6]:

$$Sh = 0,29 Re_M^{0,65} Sc^{0,33}, \quad (8)$$

$$\text{где } Sh = \frac{\beta d_c}{D}, \quad Re_M = \frac{n_M d_M^2}{\nu},$$

D – коэффициент диффузии сорбируемого иона в растворе, $\text{м}^2/\text{с}$; ν – кинематический коэффициент вязкости раствора, $\text{м}^2/\text{с}$.

Рассчитанный с помощью уравнения (8) коэффициент массоотдачи в растворе β имел значение $9,1 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$.

Характеристики процессов ионного обмена в каскаде аппаратов

Показатель	Наименование показателя	
	Анионит АВ-17-8(С1) – раствор H_3PO_4	Катионит КУ-2-8(Н) – раствор $ZnCl_2$
$Q \cdot 10^6, M^3/c$	2,61	3,62
$\bar{Q} \cdot 10^7, M^3/c$	1,21	0,35
$C_{вх} \cdot 10^2, кг-экв/м^3$	3,06	0,5
$\bar{C}_{вх}, кг-экв/м^3$	0	0
$V \cdot 10^3, м^3$	4,95	4,92
$\bar{V} \cdot 10^5, м^3$	5	8
$a_0, кг-экв/м^3$	0,312	0,98
$\bar{D} \cdot 10^{11}, м^2/c$	3,5 [2]	2 [4]
Γ	10,2 [2]	88 [2]
$d_3 \cdot 10^4, м$	5,2	5,1
$v \cdot 10^6, м^2/c$	1 [5]	1 [5]

На рис. 3 и 4 показаны в сравнении экспериментальные и расчетные данные распределения концентрации сорбируемого вещества в растворе и ионите по аппаратам каскада. Из рисунков видно, что скорость процесса ионного обмена различна в аппаратах каскада. В первом по ходу движения жидкой и твердой фаз аппарате наблюдается максимальная очистка раствора, а в последнем аппарате она минимальна, поскольку движущая сила процесса при проточке

изменяется неравномерно по аппаратам каскада. На входе в каскад движущая сила велика и она стремится к нулю на выходе из каскада. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов позволяет сделать вывод об их удовлетворительной сходимости. Расхождение не превышает 5 %. Разработанная математическая модель может быть рекомендована для решения практических задач в области очистки воды от ионов тяжелых металлов.

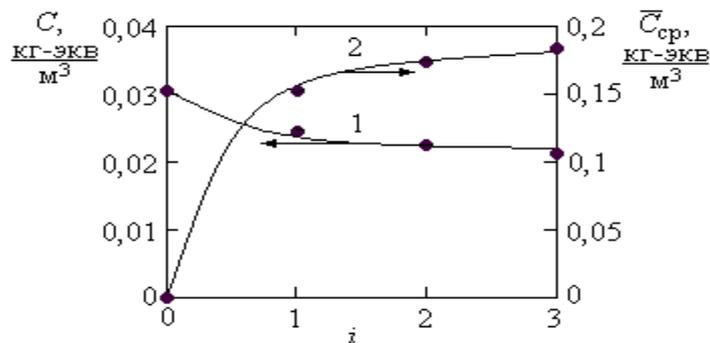


Рис. 3. Распределение концентрации ионов PO_4^{3-} в растворе (1) и анионите (2) по аппаратам каскада (точки – экспериментальные данные, линии – расчетные данные)

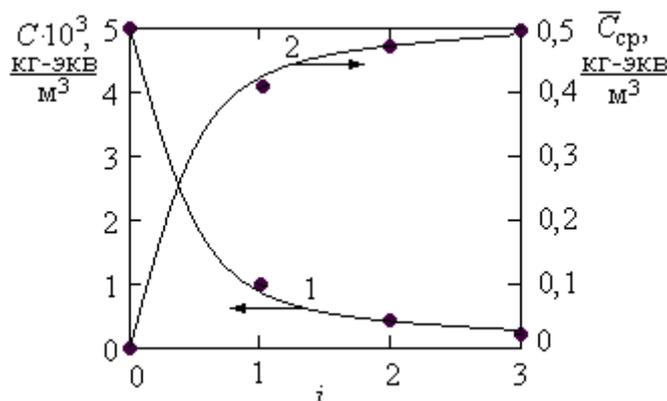


Рис. 4. Распределение концентрации ионов Zn^{2+} в растворе (1) и катионите (2) по аппаратам каскада

(точки – экспериментальные данные, линии – расчетные данные)

ЛИТЕРАТУРА

1. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Массообменные процессы химической технологии. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2017. 440 с.
2. Натареев С.В. Ионный обмен из ограниченного объема раствора. Иваново: ИГХТУ, 2006. 136 с.
3. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. В 3 т. Т. 1. Элементарные функции. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 632 с.
4. Галкина Н.К., Соколова Л.П., Смурова Е.С., Скорняков В.В. Расчет процесса сорбции и регенерации катионита КУ-2×8 при очистке кислых сточных вод заводов обработки цветных металлов // Теория и практика сорбционных процес-

сов. Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж, 1981. Вып.14. С. 82 - 86.

5. Магомедов У.Б., Алхасов А.Б., Магомедов М.М.–Ш. Справочник по теплопроводности и динамической вязкости воды и водных растворов солей / Под ред. В.Е. Фортова. М.: ФИЗМАЛИТ, 2013. 224 с.

6. Дыгнерский Ю.И., Дмитриев Е.А., Щерев И.А. Концентрационная поляризация при разделении растворов слаборастворимых солей обратным осмосом // Массообмен в химической технологии. Сб. науч. трудов. Рига: Изд-во РПИ, 1986. С. 130-140.

ION EXCHANGE SOLUTIONS TREATMENT IN THE CASCADE OF CAPACITY DEVICES

S. Natareev, D. Zaharov, N. Lapshin

The paper provides a mathematical description of the direct-flow process of ion exchange in a cascade of capacitive devices. When developed a mathematical model, it is assumed that the cascade consists of a number of capacitive devices with the same working volumes. In each apparatus, the mixing of the solution and the ionite is accepted as ideal. The ion exchange equilibrium is described by the equation of the linear Henry adsorption isotherm. The speed of the process is limited by both internal and external diffusion. The calculation task is to determine the distribution of the concentration of the adsorbed substance in the solution and ion exchanger over the devices of the cascade. The adequacy of the developed mathematical model is established by the example of water purification from phosphate ions on anion exchange resin AB-17-8 and zinc ions on cation exchange resin KU-2-8. The satisfactory coincidence of the calculation results and the experiment allowed us to recommend a mathematical model for practical application.

Key words: cascade of capacitive devices, ion exchange, water purification.

References

1. Romankov P.G., Frolov V.F., Flisyuk O.M. Massoobmennye processy khimicheskoy tekhnologii. SPb.: HIMIZDAT, 2017. 440 s.
2. Natareev S.V. Ionnyj obmen iz ogranichennogo obema rastvora. Ivanovo: IGHTU, 2006. 136 s.
3. Prudnikov A.P., Brychkov YU.A., Marichev O.I. Integraly i ryady. V 3-h t. T. 1. Elementarnye funkicii. M.: FIZMATLIT, 2002. 632 s.
4. Galkina N.K., Sokolova L.P., Smurova E.S., Skornyakov V.V. Raschet processa sorbcii i regeneracii kationita KU-2-8 pri ochildke kislyh stochnyh vod zavodov obrabotki cvetnyh metallov // Teoriya i praktika sorbcionnyh processov. Mezhvuz. sb. nauch. tr. Voronezh, 1981. Vyp.14. S. 82 - 86.
5. Magomedov U.B., Alhasov A.B., Magomedov M.M.–SH. Spravochnik po teploprovodnosti i dinamicheskoy vyazkosti vody i vodnyh rastvorov solej. M.: FIZMATLIT, 2013. 224 s.
6. Dytneriskij YU.I., Dmitriev E.A., Shherev I.A. Koncentracionnaya polyarizaciya pri razdelenii rastvorov slaborastvorimyh solej obratnym osmosom // Massoobmen v himicheskoy tekhnologii. Sb. nauch. trudov. Riga: Izdvo RPI, 1986. S. 130-140.