

CHEMISTRY AND MATERIALS SCIENCE

UDC 661.183.12

Kornukova E.A., Grechushkin A.N. The analysis and evaluation of existing methods for calculation of the regeneration process of ion-exchange filters

Анализ и оценка существующих методик расчета процесса регенерации ионообменных фильтров

Kornukova Ekaterina Andreevna,

Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Grechushkin Andrey Nikolaevich,

Associate Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Гречушкин Андрей Николаевич,

доцент кафедры экологии и промышленной безопасности, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Корнукова Екатерина Андреевна,

магистрант, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Аннотация. В данной статье рассмотрены основные подходы к описанию процессов ионного обмена, а также методики расчета основных параметров регенерации катионита в натриевой форме. В настоящее время при проектировании установок по обессоливанию и умягчению воды используют эмпирические зависимости и коэффициенты, полученные в результате наладки и длительной эксплуатации промышленных объектов. На основании выявленных недостатков существующих методик расчета предлагается изменить подход к описанию процесса ионного обмена и представить его как случайный марковский процесс, в частности, перейти к рассмотрению вероятностно-статистических моделей диффузионного типа.

Ключевые слова: ионный обмен, регенерация, катионит в натриевой форме, методика расчета, продольная диффузия ионов.

Abstract. This article examines the main approaches to describing ion exchange processes, as well as methods for calculating the key parameters for sodium cation exchange resin regeneration. Currently, when designing water desalination and softening plants, empirical relationships and coefficients obtained from commissioning and long-term operation of industrial facilities are used. Based on the identified disadvantages of existing calculation methods, it is proposed to change the approach to describing the ion exchange process and present it as a random Markov process, in particular, to move to the consideration of probabilistic-statistical models of the diffusion type.

Keywords: ion exchange, regeneration, sodium cation exchange resin, calculation method, longitudinal diffusion of ions.

Рецензент: Сагитов Рамиль Фаргатович - кандидат технических наук, доцент. Заместитель директора, главный научный сотрудник. ООО «Научно-исследовательский проектный институт «Промышленное и гражданское строительство»

На сегодняшний день достичь технологической эффективности и экономической рентабельности в области промышленной водоподготовки невозможно без оптимизации и расчета сложных ионообменных процессов. Зачастую выбор числа ступеней очистки, типа ионита, размера фильтров, высоты загрузки смолы и режима регенерации осуществляется на основе эмпирических формул, зависимостей и коэффициентов, полученных экспериментально [1, 2]. При этом корректировка разработанных расчетных методик и полученных данных производится в ходе пусконаладочных работ и при длительной эксплуатации ионообменных установок.

Традиционно методика расчета регенерации ионообменного аппарата, основанная на использовании рабочей емкости ионита $E_{\text{раб}}$ с учетом эмпирических коэффициентов, необходимых для определения расхода поваренной соли P_c на одну регенерацию [3]. Данная методика использует осредненные характеристики протекающих процессов и не требует применения выражений для описания явного вида изотермы ионного обмена и фронта регенерации. Для ее эффективного практического использования необходимо получение большого объема экспериментальных данных при различном аппаратном оформлении технологического процесса в различных эксплуатационных условиях. Наибольшую трудность представляет определение значения рабочей обменной емкости, так как данная характеристика зависит от множества факторов, к которым относятся, как свойства самого ионита, так и условия его эксплуатации и расход реагентов.

Значение рабочей обменной емкости $E_{\text{раб}}$ можно рассматривать, как характеристику защитного действия слоя ионита, и в таком случае определить на основании выходной кривой ионитового фильтра:

$$E_{\text{раб}} = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{ф}}) * Q}{S * h}, \quad (1)$$

где $C_{\text{исх}}$ – исходная концентрация удаляемого иона, г-экв/м³;

$C_{\text{ф}}$ – концентрация удаляемого иона в фильтрате, г-экв/м³;

Q – количество обработанной воды за фильтроцикл, м³;

S – площадь поперечного сечения фильтра, м²;

h – высота слоя ионита, м.

Альтернативная зависимость для определения рабочей обменной емкости представлена в работе [4]:

$$E_{\text{раб}} = \alpha_{Na} * \beta_{Na} * E_{\text{полн}} - 0,5 * q_{\text{уд}} * Ж_{\text{о исх}}, \quad (2)$$

где α_{Na} – коэффициент эффективности регенерации натрий-катионита, учитывающий неполноту регенерации катионита;

β_{Na} – коэффициент, учитывающий снижение обменной емкости катионита по Ca^{2+} и Mg^{2+} вследствие частичного задержания катионитов Na^+ ;

$E_{полн}$ – полная обменная емкость катионита, г-экв/м³, определяемая по заводским паспортным данным;

$q_{уд}$ – удельный расход воды на отмывку катионита, м³ на 1 м³ катионита.

В случае использования представленных зависимостей удастся определить только расход реагентов P_c , необходимых для проведения регенерации:

$$P_c = \frac{f_k * H_k * E_{раб}^{Na} * a_c}{1000}, \quad (3)$$

где f_k – площадь одного фильтра, м²;

H_k – высота слоя катионита в фильтре, м;

a_c – удельный расход соли на 1 г-экв рабочей обменной емкости катионита.

Однако при проектировании и пусконаладке ионообменных фильтров также важно предварительно оценить время регенерационного цикла и распределение концентраций по высоте слоя смолы. Это, в свою очередь, возможно при разработке математической модели работы фильтра [5, 6].

В рамках феноменологического подхода для решения прикладных задач наиболее распространена одномерная математическая модель движения ионов в сорбирующей пористой среде с постоянным коэффициентом диффузии. Ее основные уравнения могут быть записаны в следующем виде [7]:

– уравнение материального баланса:

$$w \frac{\partial c_i}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial a_i}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_i}{\partial x^2}; \quad (4)$$

– уравнение статики:

$$a_i = f_i(c_1^*, \dots, c_n^*); \quad (5)$$

– уравнение внешнедиффузионной кинетики:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta(c_i - c_i^*); \quad (6)$$

– уравнение внутридиффузионной кинетики:

$$\frac{\partial(ar)}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2}{\partial r^2}(ar). \quad (7)$$

В уравнениях (4)-(7) приняты следующие обозначения: w – скорость движения регенерирующего раствора; c_i – концентрация в растворе; x – высота загрузки; a_i – концентрация в ионите; c_i^* – равновесная концентрация в растворе; D – коэффициент продольной диффузии,

r – радиус зерна ионита; β – коэффициент внешней диффузии;
 D^* – коэффициент внутренней диффузии.

В общем виде аналитическое решение системы до настоящего времени не получено, известны лишь частные случаи его решения, при этом основную трудность представляет описание коэффициента продольной диффузии D [8]. В настоящее время проявления продольной диффузии при ионном обмене связывают с неравномерностью укладки частиц ионита в слое, неодинаковой скоростью жидкости у поверхности зерна и на некотором отдалении от него, неравномерным распределением потока по сечению аппарата («пристеночный эффект»), наличием застойных зон, а также с конвенционным перемешиванием в потоке.

Представленные материалы позволяют сделать вывод, что в основе регенерационных процессов ионного обмена лежат как детерминированные, так и случайные составляющие, которые в процессах водоподготовки деминерализованной воды могут играть определяющую роль. Оценка случайных составляющих процесса регенерации возможна при детальном рассмотрении вероятностно-статических диффузионных моделей.

References

1. Комарова И.В., Галкина Н.К. М.М. Сенявин и оптимизация ионообменных процессов на основе математического моделирования /Сорбционные и хроматографические процессы, – 2017. –Т.17 – №6, с. 907-916.
2. Соболев, И. В. Ионообменные процессы очистки воды / И. В. Соболев, А. А. Варивода // Здоровьесберегающие технологии, качество и безопасность пищевой продукции: Сборник статей по материалам Всероссийской конференции с международным участием – Краснодар, 2021. – С. 93-96.
3. Технический справочник по обработке воды: [в 2 т.: перевод с французского] / [Л. Андриамирадо и др.; науч. ред.: М. И. Алексеев и др.]. — 2-е изд. — Санкт-Петербург: Водоканал Санкт-Петербурга, Новый журнал, 2007.
4. Беликов С.Е. Водоподготовка: справочник / Под ред. С. Е. Беликова. - Москва: ИД "Аква-Терм", 2007.
5. Комарова И.В., Галкина Н.К., Анфилов Б.Г., Шептовецкая К.И. Визуализация процесса ионообменного умягчения воды с целью прогнозирования и управления // Сорбционные и хроматографические процессы, т. 8(1). –2008. –С. 30-36.

6. Корниенко Т.С., Загорулько Е.А., Бондарева Л.П., Гапеев А.А. Математическая модель динамики сорбции в слое ионообменника // Сорбционные и хроматографические процессы. – т. 11(6). – 2011. – С. 895-899.

7. Юрчевский Е.Б., Комарова И.В., Галкина Н.К. «Прогнозирование технологических характеристик противоточных ионообменных фильтров с использованием математического моделирования» // Теплоэнергетика. – 2003. – № 7. – С. 29–34.

8. Кокотов, Ю. А. Теоретические основы ионного обмена. Сложные ионообменные системы / Ю. А. Кокотов, П. П. Золотарев, Г. Э. Елькин. – Л.: Химия, 1986. – 280 с.