

UDC 661.183.12

Kornukova E.A., Grechushkin A.N. The probabilistic-statistical model of the regeneration process of ion-exchange filters

Вероятностно-статистическая модель процесса регенерации ионообменных фильтров

Kornukova Ekaterina Andreevna,

Master's Degree, Bauman Moscow State Technical University,
Department of Ecology and Industrial Safety, Moscow

Grechushkin A.N.,

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

Корнукова Екатерина Андреевна,
магистр, МГТУ им. Н.Э. Баумана,

кафедра «Экология и промышленная безопасность», г. Москва

Гречушкин А.Н.,

к.т.н, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана,

кафедра «Экология и промышленная безопасность», г. Москва

Abstract. *This article presents a diffusion-based probabilistic-statistical model for describing the parallel-flow regeneration process of a cation exchange filter. To study ion exchange processes with a vertical fixed resin bed, an experimental setup was constructed, and an experimental methodology was developed to determine the key parameters of cation exchange resin regeneration with a sodium chloride solution. When comparing experimental and calculated data, the discrepancy does not exceed 15%.*

Keywords: *ion exchange, regeneration front, probabilistic-statistical model, distribution density, Fokker-Planck-Kolmogorov equation.*

Аннотация. *В данной статье представлена вероятностно-статистическая модель диффузионного типа для описания процесса параллельной регенерации катионообменного фильтра. Для исследования ионообменных процессов с вертикальным неподвижным слоем смолы создан экспериментальный стенд и разработана методика проведения эксперимента с целью определения основных параметров регенерации катионита раствором поваренной соли. При сопоставлении экспериментальных и расчетных данных расхождение не превышает 15%.*

Ключевые слова: *ионный обмен, фронт регенерации, вероятностно-статистическая модель, плотность распределения, уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова.*

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

Ионообменная технология для обессоливания и умягчения природной воды широко применяется в энергетике, химии, металлургии и других отраслях промышленности, поэтому следует отметить, что разработке расчетных методик и проектированию ионитных фильтров на сегодняшний день уделяется большое внимание [1, 2]. Обзор научной литературы показал, что усовершенствовать расчет ионообменника можно за счет учета диффузионной составляющей, обусловленной

неравномерным распределением потока по сечению аппарата, наличием застойных зон и конвенционным перемешиванием в потоке [3, 4].

Описание предложенной математической модели

Пусть процесс регенерации катионита в натриевой форме происходит в цилиндрическом ионообменнике с неподвижным однородным слоем монодисперсной смолы длиной L_0 и площадью свободного поперечного сечения F_0 . Введём систему отсчёта, связанную с безразмерной координатой оси симметрии фильтра S и временем $t = t_0 = 0$, которое отсчитывается от начала процесса подачи регенерационного раствора в фильтр.

Предположим, что в полностью истощенный катионит подается раствор поваренной соли с постоянной концентрацией C_{NaCl} и расходом $Q_0 = Q_0(t) = const$, а движение регенерирующего раствора происходит прямотоком со средней скоростью $W_0 = \frac{Q_0}{F_0} = const$. Используя уравнение материального баланса запишем систему уравнений динамики равновесного ионного обмена с учетом диффузионной составляющей [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial a'}{\partial t} = -W_0 \frac{\partial c}{\partial S} + D \frac{\partial^2 c}{\partial S^2} \\ a = \psi(c), \end{cases} \quad (1)$$

где $a = \psi(c)$ – уравнение изотермы ионного обмена,

D – коэффициент продольной диффузии,

c – текущая концентрация вытесняемого иона в потоке,

a и a' – равновесные величины ионного обмена и концентрация вытесняемого иона в ионите соответственно.

Среднюю скорость движения стационарного фронта регенерации можно вычислить по формуле:

$$W' = W_0 \frac{Ж}{\rho_N * a}, \quad (2)$$

где $Ж$ – общая жесткость, обусловленная вытеснением иона;

$\rho_N = const$ – насыпная плотность ионита в набухшем состоянии;

a – величина ионного обмена.

Наряду со средней скоростью движения фронта регенерации по слою ионита $W'(S, t)$ в рассматриваемом процессе будут постоянно присутствовать и случайные составляющие этой скорости – \tilde{W} , влиянием которых пренебречь нельзя, что позволяет записать:

$$W = W'(S, t) + \tilde{W}. \quad (3)$$

Поскольку величина \tilde{W} в выражении (3) обусловлена наличием случайных составляющих, действующих на молекулы вытесняемого иона, как со стороны потока дисперсионной среды, так и ионита, то и скорость W , и координата S , также будут случайными величинами. Таким образом, можно перейти к рассмотрению функции плотности распределения

$$f = f(S, t).$$

Величина $f(S, t)dS$ представляет собой вероятность того, произвольный ион будет иметь в момент времени t координату в интервале $(S, S + dS)$. Тогда для описания гидродинамической стадии процесса регенерации катионита можно воспользоваться уравнением Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК) в виде:

$$\frac{\partial f(S, t)}{\partial t} = -W'(t) \frac{\partial}{\partial S} f(S, t) + \frac{B}{2} \frac{\partial^2}{\partial S^2} f(S, t), \quad (4)$$

где $W'(S, t)$ – величина, характеризующая детерминированную составляющую системы в пространстве S ;

$B(S, t)$ – величина, характеризующая случайную составляющую протекающих процессов в пространстве S .

Решения уравнения (4) могут быть представлены в виде элементарных функций и будут иметь следующий вид:

$$f(S, t) = \frac{C}{\sqrt{2\pi Bt}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{((S - \int_0^t W'(t)dt) - \xi)^2}{2Bt} \right] f_0(\xi) d\xi, \quad (5)$$

где C – постоянная, определяемая из условий нормировки.

Описание экспериментального стенда

Для исследования кинетики и динамики процесса регенерации ионообменной смолы был разработан экспериментальный стенд, одним из основных элементов которого является вертикальная колонна с неподвижным слоем катионита. Технологическая схема экспериментального стенда представлена на рис.1. Для приготовления регенерирующего раствора используется пермеат и поваренная соль, при смешении которых готовится раствор $NaCl$. Исходно колонна заполнялась катионитом истощалась с помощью раствора хлорида кальция.

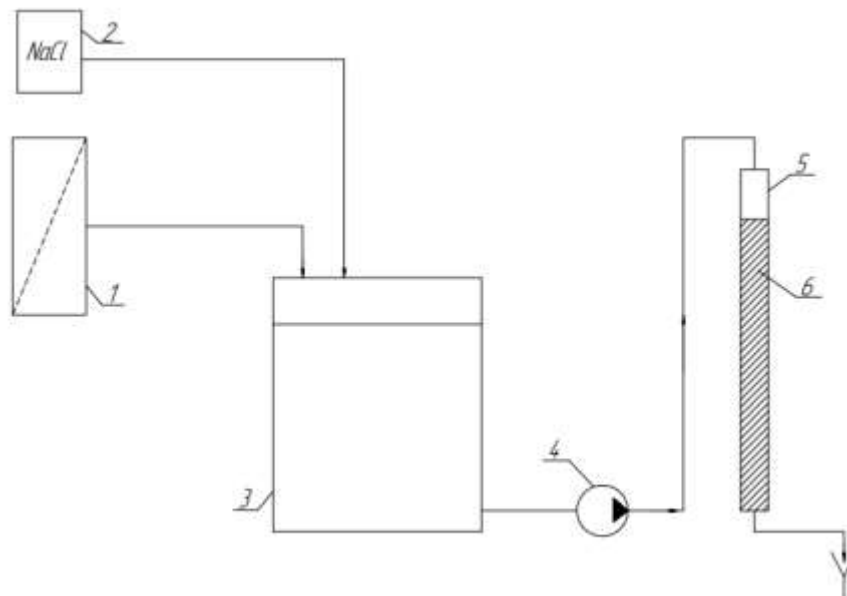


Рисунок 1. Технологическая схема экспериментального стенда: 1– вода, получаемая с помощью, обратноосмотической установки; 2 – поваренная соль; 3 – емкость для приготовления регенерирующего раствора; 4 – перистальтический насос; 5 – вертикальная колонна с неподвижным слоем катионита, оборудованная пробоотборниками; 6 – истощенный катионит

Стенд работает следующим образом: регенерирующий раствор подается в верхнюю часть колонны с постоянным расходом 1,8 л/ч. Постоянство расхода обеспечивается за счет перистальтического насоса. В процессе регенерации производится отбор проб в периодическом режиме для определения величины общей жесткости регенерирующего раствора, которая обусловлена наличием ионов Ca^{2+} . Определение общей жесткости отбираемых проб осуществляется с помощью комплексонометрического титрования трилоном Б.

При совмещении теоретических кривых, полученных в результате интегрирования выражения (5), и экспериментальных точек можно отметить, что распространение фронтов регенерации может быть удовлетворительно описано с помощью разработанной вероятностно-статической модели (рис.2).

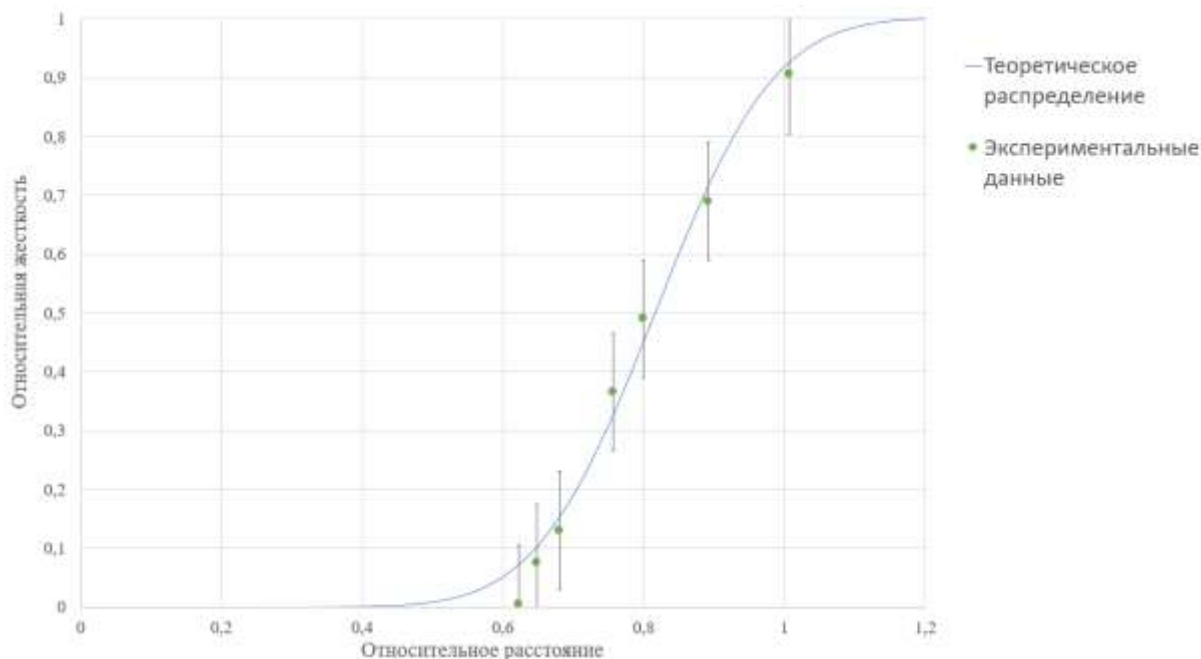


Рисунок 2. Сопоставление экспериментальных и теоретических фронтов регенерации

Разработанная модель позволяет оценить в рамках проведенного экспериментального исследования интенсивность случайных составляющих путем количественной оценки коэффициент продольной диффузии: $D = 4,2 * 10^{-6} \dots 4,5 * 10^{-6} \frac{\text{мм}^2}{\text{с}}$. В конечном итоге при расходах регенерирующего раствора $Q_0 = 1,8 - 2 \text{ м}^3/\text{ч}$ и высоте слоя ионита $L_0 = 1 - 1,2 \text{ м}$ расхождение между экспериментальными и расчетными значениями не превышает 15%.

Результаты экспериментального исследования подтверждают нарушение поршневой структуры движения фронта регенерации, поэтому важно учитывать диффузию при оценке времени регенерации фильтра. В противном случае часть смолы, расположенная в нижней части колонны, останется в истощенном состоянии, что приведет в последующем к сокращению фильтроцикла.

References

1. Павлов, Ю. Н. Применение современных методов очистки воды на ТЭЦ и котельных / Ю. Н. Павлов, В. С. Смирнов // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ "Нацразвитие": сборник избранных статей, Санкт-Петербург, 10–13 августа 2021 года. – Санкт-Петербург: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования

Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2021. – С. 52-57.

2. Комарова И. В. Универсальный подход к расчету и оптимизации схем ионообменной водоподготовки // Сорбционные и хроматографические процессы. – т. 12(5). – 2019. – С. 683-692.

3. Ходотович С.В. Вероятностно-статистический метод расчета ионообменного процесса / С.В. Ходотович, А.Н. Гречушкин // Одиннадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России»: сборник докладов. 24–27 сентября 2018 г., 2018. С. 523-525.

4. Лайпанов, Б. Ш. Современное состояние исследований кинетики и динамики ионного обмена / Б. Ш. Лайпанов // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2017. – Т. 1. – С. 247-255.

5. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники / Н.В. Кельцев. - М.: Химия, 1984. – 512с.