

УДК 66.081.6

РАСЧЕТ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ БАРОМЕМБРАННОМ РАЗДЕЛЕНИИ ГАЛЬВАНОСТОКОВ

© О.А. Абоносимов, С.И. Лазарев, А.М. Акулиничев, Д.О. Абоносимов

Ключевые слова: баромембранные аппараты; кинетические коэффициенты; математическая модель.

В статье приведена разработанная математическая модель массопереноса при баромембранном разделении гальваносток, основанная на уравнении гидродинамики движения раствора и уравнения конвективной диффузии в канале. Проведена проверка адекватности математической модели путем сравнения экспериментальных и расчетных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Мембранные технологии приобретают большое значение во многих отраслях промышленности, в т. ч. химической, пищевой, фармацевтической, микробиологической. В последнее время эти методы стали применять для обессоливания и очистки воды, создания водооборота на производстве, что особенно важно для обеспечения экологической безопасности окружающей среды.

Преимущество мембранных процессов по сравнению с традиционными методами очистки сточных вод в том, что одновременно решаются вопросы водоочистки, создания технологических производств и замкнутого водооборота и выделения ценных компонентов [1].

Однако широкое применение мембранных методов сдерживается малоизученностью кинетики массопереноса, его математическим описанием и отсутствием аппаратов для реализации методов разделения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

С этой целью на экспериментальных баромембранных аппаратах были проведены исследования по определению основных кинетических коэффициентов массопереноса, таких как коэффициенты задержания, выделения и водопроницаемости, коэффициенты диффузионной и осмотической проницаемости, коэффициенты продольного перемешивания, которые использовались для разработки математической модели [2–3].

Результаты экспериментальных исследований проводились в зависимости от концентрации растворенных веществ, градиента давления, скорости движения раствора, вида растворенного вещества и мембраны.

Для математического описания массопереноса в баромембранных аппаратах была разработана математическая модель, основанная на уравнении гидродинамики движения раствора и уравнения конвективной диффузии в канале.

В этой модели были приняты следующие допущения:

1) диффузионное сопротивление со стороны пермеата незначительно;

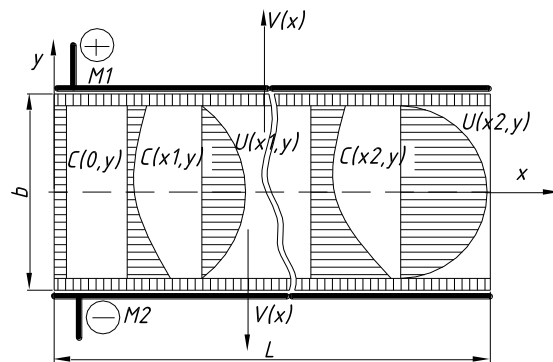


Рис. 1. Схема разделения раствора в межмембранном канале баромембранного аппарата: M_1 , M_2 – обратноосмотические мембраны; L – длина межмембранного канала, m – расстояние между мембранами; $C(x,y)$ поле концентраций растворенного вещества в растворе, $\text{кг}/\text{м}^3$; $U(x,y)$, $V(x)$ – продольная и поперечная скорости движения раствора в межмембранном канале

- 2) стенки межмембранного канала плоско-параллельны;
 - 3) режим течения жидкости ламинарный $\text{Re} < 2300$;
 - 4) насос обеспечивает постоянный расход раствора.
- Математическая запись модели массопереноса в обратноосмотических аппаратах:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}; \quad (2)$$

$$U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где ν – кинематическая вязкость раствора.

Начальные и граничные условия:

$$C(0, y) = C_{\text{исх}}; \quad (4)$$

$$U(x, b/2) = 0; U(x, 0) = 0; \quad (5)$$

$$K_1 C(x, b/2) V(x, b/2) = D \frac{\partial C(x, b/2)}{\partial y}; \quad (6)$$

$$K_2 C(x, 0) V(x, 0) = D \frac{\partial C(x, 0)}{\partial y},$$

где D – коэффициент диффузии вещества в растворе; $K_1(x)$, $K_2(x)$ – коэффициенты задерживания для обратноосмотических мембран, которые определяют по следующим формулам:

$$K(x) = 1 - \frac{C_n(x)}{C(x, b/2)}, \quad (7)$$

где $C(x, b/2)$ – концентрация растворенного вещества у поверхности мембран со стороны канала; для рассматриваемого обратноосмотического аппарата задача симметрична, т. е. $K_1(x) = K_2(x)$ вследствие того, что мембраны одинаковы.

Выражение для продольной скорости раствора, получаемое из уравнения движения жидкости в межмембранном канале, имеет следующий вид [4]:

$$U(x, b/2) = -\frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \left((b/2)^2 - y^2 \right). \quad (8)$$

Скорость фильтрации, полученная из уравнения проницаемости, имеет следующий вид:

$$V = K\Delta P_n - \frac{sh(\sqrt{|\lambda|}(L-x)) + ash(x\sqrt{|\lambda|})}{sh(L\sqrt{|\lambda|})}, \quad (9)$$

$$\text{где } \lambda = -\frac{3\mu k}{(b/2)^3}, \quad a = \frac{\Delta P_k}{\Delta P_n}.$$

Выражение для перепада давления по длине канала имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial x} = \frac{\Delta P_n \sqrt{|\lambda|}}{sh(L\sqrt{|\lambda|})} \left[ch(\sqrt{|\lambda|}(L-x)) - \left[-ach(x\sqrt{|\lambda|}) \right] \right]. \quad (10)$$

Используя уравнения (8)–(10) в уравнении конвективной диффузии (3), получаем конечную задачу в следующем виде:

$$f_1(x) \left((b/2)^2 - y^2 \right) \frac{\partial C}{\partial x} + f_2(x) \frac{\partial C}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}, \quad (11)$$

граничные условия:

$$C(x, b/2) f_2(x) = m \frac{\partial C(x, b/2)}{\partial y}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial C(x, 0)}{\partial y} = 0; \quad (13)$$

$$C_0(0, y) = C_0, \quad (14)$$

где

$$f_1(x) = \frac{\sqrt{|\lambda|}}{2\mu} \left[ch(\sqrt{|\lambda|}(L-x)) - ach(x\sqrt{|\lambda|}) \right]; \quad (6)$$

$$f_2(x) = K \left[ch(\sqrt{|\lambda|}(L-x)) + ach(x\sqrt{|\lambda|}) \right]; \quad (16)$$

$$\varepsilon = \frac{D sh(L\sqrt{|\lambda|})}{\Delta P_k}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial x} = \frac{D sh(L\sqrt{|\lambda|})}{K \Delta P_n}. \quad (18)$$

Полученная система уравнений (11)–(14) решается методом конечных разностей с нахождением поля концентраций $C(x, y)$. Для решения была составлена программа счета (на языке *Delphi*), реализованная на персональном компьютере. Зная поле концентраций $C(x, y)$, можно рассчитать локальные эффективные коэффициенты массоотдачи вдоль по длине канала по уравнению

$$\beta = \frac{D \frac{\partial C(x, b/2)}{\partial y}}{C(x, b/2) - \tilde{C}(x)}, \quad (19)$$

где $\tilde{C}(x)$ – средняя по сечению концентрация раствора в межмембранном канале;

$$\tilde{C}(x) = \frac{1}{b\tilde{U}} \int C(x, y) U(y) dy, \quad (20)$$

где \tilde{U} – средняя скорость потока жидкости в межмембранном канале;

$$\tilde{U} = \frac{1}{b} \int U(x, y) dy. \quad (21)$$

Проверка адекватности разработанной математической модели осуществлялась путем сравнения экспериментальных и расчетных данных. Сравнение производилось по концентрационным зависимостям ретената от концентрации исходного раствора при различных скоростях потока раствора в межмембранном канале. При этом использовались экспериментальные данные, полученные при разделении модельных растворов сточных вод, содержащих NiCl_2 , на промышленной обратноосмотической установке. Сравнение расчетных и экспериментальных данных представлено на рис. 2.

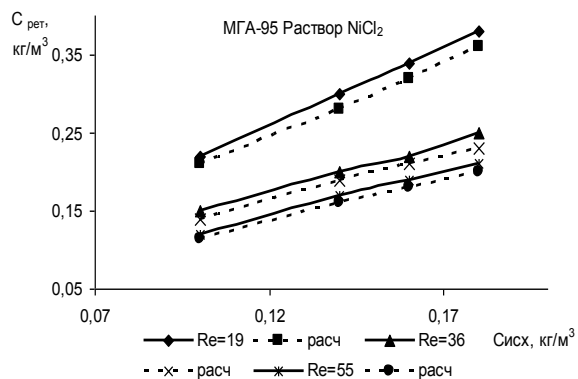


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных концентрационных зависимостей ретентата от концентрации исходного раствора NiCl₂

Как видно на рис. 2, совпадение расчетных и экспериментальных величин не превышает 15 %, что свидетельствует о приемлемой адекватности разработанной математической модели реальным процессам массопереноса в баромембранных аппаратах.

ВЫВОД

Разработана математическая модель кинетики массопереноса при баромембранном разделении гальваностокков.

Проверена адекватность математической модели массопереноса путем сравнения экспериментальных и расчетных концентрационных зависимостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет. М.: Химия, 1986. 272 с.
2. Абоносимов О.А., Коробов В.Б., Лазарев С.И. Обратноосмотическая очистка некоторых видов гальваностокков // Труды ТГУ: сборник научных статей молодых ученых и студентов. Тамбов: ТГУ, 1997. Вып. 1. С. 8-12.
3. Абоносимов О.А., Лазарев С.И., Ковалев С.В., Рябинский М.А. К вопросу математического моделирования массопереноса в обратноосмотических аппаратах рулонного типа // Химия и химическая технология. 2007. Т. 50. Вып. 8. С. 64-66.
4. Лойцянский Н.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2010–2012 гг.».

Поступила в редакцию 16 января 2012 г.

Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Akulinichev A.M., Abonosimov D.O. CALCULATION OF MASS TRANSFER IN DIVISION BAROMEMBRANES GALVANIC FLOWS

The article presents a mathematical model developed by the mass transfer baromembranes galvanic flows division, based on the equation of motion of hydrodynamics and solution of the convective diffusion equation in the channel. A check of the adequacy of the mathematical model by comparing the experimental and calculated data is made.

Key words: baromembranes vehicles; transport coefficients; mathematical model.