

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗА

И. А. ТИХОМИРОВ, В. Т. ДОРНИН, А. П. ВЕРГУН

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

Для отыскания оптимальных режимов электродиализа полезно знать связь коэффициента полезного действия электродиализатора с другими параметрами, в частности, с параметрами, которые могут быть легко определены или непосредственно замерены. Настоящая работа является попыткой дать некоторые из этих связей и относится к электродиализу с использованием ионообменных мембран.

Принципиальная схема процесса представлена на рис. 1. Направления потоков указаны стрелками, К — мембрана катионитовая, А — мембрана анионитовая.

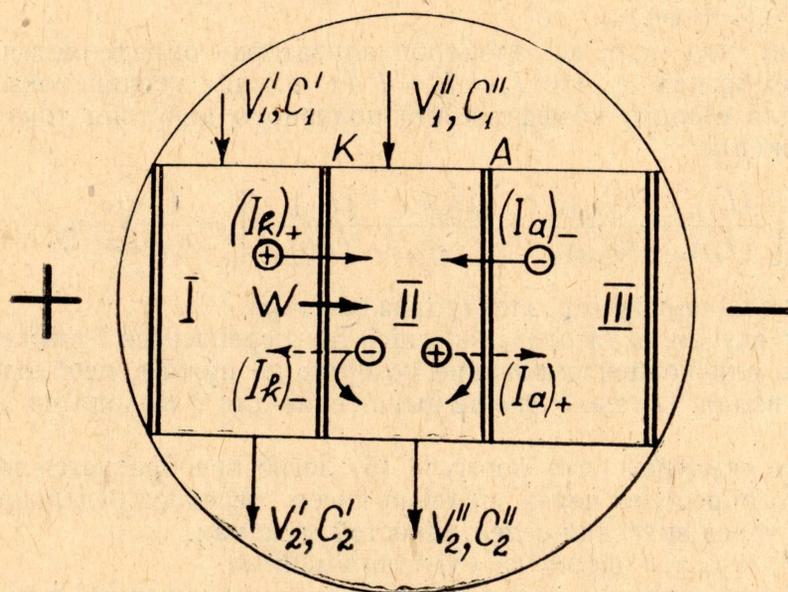


Рис. 1. Схема электродиализа

При указанном на рис. 1 расположении камер анионы двигаются налево, катионы следуют направо. В камере II происходит концентрирование, а в камерах I и III — обессоливание. Перенос вещества в электро-

диализаторе описывается законом Фарадея, который может быть записан в виде:

$$G = \eta \cdot G_{\text{теор}} = \frac{\mathcal{E}}{F} I \eta, \quad (1)$$

где

G — действительный перенос вещества, г/сек;

$G_{\text{теор}}$ — теоретический перенос вещества, г/сек;

η — коэффициент полезного действия;

\mathcal{E} — эквивалентное количество превращенного вещества;

I — электрический ток, а;

F — постоянная Фарадея, а·сек/эквивалент.

Учитывая, что ток через мембраны определяется электрическими потоками положительных ионов (ток I_+) и отрицательных ионов (I_-), найдем суммарные токи через мембраны:

$$I_a = (I_a)_- + (I_a)_+ \text{ — для анионитовых мембран,} \quad (2)$$

$$I_k = (I_k)_+ + (I_k)_- \text{ — для катионитовых мембран.}$$

Полезная транспортировка вещества через мембраны осуществляется токами:

$$I'_a = (I_a)_- - (I_a)_+ \quad (3)$$

$$I'_k = (I_k)_+ - (I_k)_-,$$

тогда к. п. д. тока ионитовых мембран запишутся в виде

$$\eta_a = \frac{(I_a)_- - (I_a)_+}{(I_a)_- + (I_a)_+} \text{ — для анионитовых мембран,} \quad (4)$$

$$\eta_k = \frac{(I_k)_+ - (I_k)_-}{(I_k)_+ + (I_k)_-} \text{ — для катионитовых мембран.}$$

Считая, что к. п. д. электродиализатора определяется к. п. д. токов в мембранах и что $I_a = I_k = I$ (т. е. нет утечки тока), можно записать для общего коэффициента полезного действия тока следующее выражение:

$$\eta = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n \left[\frac{(I_{aj})_- - (I_{aj})_+}{(I_{aj})_- + (I_{aj})_+} + \frac{(I_{kj})_+ - (I_{kj})_-}{(I_{kj})_+ + (I_{kj})_-} \right] = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n (\eta_{aj} + \eta_{kj}), \quad (5)$$

где n — число пар камер электродиализатора.

В том случае, если электрический ток переносится также ионами, извлечение или концентрирование которых не нужны, необходимо учитывать их вклад. В таком случае выражение для η выводится аналогично.

Можно усмотреть, что формула (5) легко преобразуется так, чтобы к. п. д. был определен через значения чисел переноса отдельного типа ионов или через значения селективностей мембран.

При $I_a \neq I_k \neq I$ формула (5) неприменима.

Используя методики определения к. п. д., изложенные в работах [1] и [2], можно решить задачу для более общего случая.

Найдем выражение для величины обессоливания и коэффициента полезного действия электродиализатора в зависимости от параметров процесса — величины электрического тока, перетечек воды, скорости потока, разницы гидростатических давлений и концентраций в камерах.

Для параметров процесса введем следующие обозначения (см. рис. 1):

v_1' — объемная скорость потока, поступающего в камеру обессоливания I, *мл/сек*;

v_2' — объемная скорость обессоленного потока, *мл/сек*;

v_1'' — объемная скорость потока, поступающего в камеру концентрирования II, *мл/сек*;

v_2'' — объемная скорость потока, выходящего из камеры концентрирования, *мл/сек*;

C_1', C_2', C_1'', C_2'' — соответственно концентрации растворов, *г/мл*;

W — объемная скорость переноса воды из камеры обессоливания, *мл/сек*;

G — скорость переноса вещества, *г/сек*.

Используя указанные обозначения, соотношения вида

$$v_1' = v_2' + W, \quad (6)$$

$$v_1'' = v_2'' - W, \quad (7)$$

$$C_1'v_1' = G + C_2'v_2', \quad (8)$$

$$C_1''v_1'' = C_2''v_2'' - G \quad (9)$$

и соотношение (1), можем записать:

$$\eta = \frac{[C_1'(v_2' + W) - C_2'v_2'] \cdot F}{\partial I}. \quad (10)$$

Будем считать, что в широких пределах

$$\frac{\partial W}{\partial \eta} = 0, \quad W \ll v_2' \quad \text{и} \quad W \ll v_2''.$$

Тогда вместо выражения (10) получим

$$\eta = \frac{Fv_2'\Delta C'}{\partial I}, \quad (11)$$

где принято:

$$\Delta C' = C_1' - C_2'.$$

Следует отличать действительный перенос вещества

$$G = \eta G_{\text{теор}} = C_1'(v_2' + W) - C_2'v_2' \quad (12)$$

от кажущегося

$$G_1 = C_1'v_2' - C_2'v_2' = v_2'\Delta C'. \quad (13)$$

Последний используют на практике для определения к. п. д. электродиализатора η_1 .

Между действительным переносом вещества G и кажущимся G_1 существует связь:

$$G = G_1 + C_1'W, \quad (14)$$

$$G_1 = G - C_1'W = \eta G_{\text{теор}} - C_1'W. \quad (15)$$

Между к. п. д. тока и обычно измеряемым на практике к. п. д. электродиализатора (кажущимся к. п. д.) η_1 связь запишется в виде:

$$\eta_1 = \frac{G_1}{G_{\text{теор}}} = \eta - \frac{C_1'W}{G_{\text{теор}}}; \quad (16)$$

$$\eta_1 = \eta \left(1 - \frac{C_1'W}{G} \right) = \eta \left(1 - \frac{C_1'W}{v_2'\Delta C' + C_1'W} \right); \quad (17)$$

$$\eta_1 = \eta \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{v_2' \Delta C'}{W C_1'}} \right). \quad (18)$$

Из последней формулы можно сделать следующий вывод: кажущийся коэффициент полезного действия электродиализатора пропорционален к. п. д. тока и возрастает с увеличением обессоливания и скорости потока, а также с уменьшением перетечек воды и концентрации потока.

Для оценки зависимости кажущегося к. п. д. электродиализатора от величины тока и от разницы гидростатических давлений в камерах, выразим входящие в формулу (18) величины W , $\Delta C'$ и v_2' через ток I и гидростатические давления.

Согласно [3] и [4] перетечки воды могут быть записаны как:

$$W = W_I + W_p, \quad (19)$$

где W_I — объемная скорость переноса воды благодаря электроосмосу, *мл/сек*;

W_p — объемная скорость переноса воды под действием гидростатической разницы давлений, *мл/сек*.

В свою очередь для токов ниже предельных согласно [4] имеем:

$$W_I = k_1 I, \quad (20)$$

где

k_1 — объем электроосмотически перенесенной воды за 1 *сек* при величине тока 1 А, и

$$W_p = k_2 (P' - P''), \quad (21)$$

где

P' — гидростатическое давление слева от рассматриваемой мембраны, *см вод. ст.*;

P'' — гидростатическое давление справа от мембраны, *см вод. ст.*;

k_2 — объем воды, перенесенной через мембрану под действием разницы гидростатических давлений в один *см вод. ст.* за одну секунду, *мл/сек* \times *см вод. ст.*

$$k_2 = \frac{kS}{\delta v}, \quad (22)$$

где

k — абсолютный коэффициент протекания;

S — полезная площадь протекания мембраны, *см²*;

δ — толщина мембраны, *см*;

v — вязкость воды (для дистиллированной воды $v = 1$).

Выражение (19) с учетом (20) и (21) запишется

$$W = k_1 I + k_2 (P' - P''). \quad (23)$$

Кроме того, действительный перенос вещества можно записать в виде

$$G = k_3 I + k_4 (P' - P''), \quad (24)$$

где k_3 и k_4 — постоянные.

Изменение концентрации $\Delta C'$ запишется:

$$\Delta C' = \frac{(k_3 - k_1 C_1') I + (k_4 - k_2 C_1') (P' - P'')}{v_1 - k_1 I - k_2 (P' - P'')} \quad (25)$$

Объемная скорость обессоленного потока определяется выражением:

$$v_2' = v_1 - k_1 I - k_2 (P' - P'') \quad (26)$$

и формула (18) принимает вид:

$$\frac{\eta_1}{\eta} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{(k_3 - k_1 C_1') I + (k_4 - k_2 C_1') (P' - P'')}{[k_1 I + k_2 (P' - P'')] C_1'}} \quad (27)$$

Все параметры, входящие в формулу (27), легко определяются практически.

Из выражения (27) видно, что при отсутствии перетечек воды от перепада гидростатических давлений в камерах электродиализатора отношение кажущегося к. п. д. электродиализатора к коэффициенту полезного действия тока не зависит от силы электрического тока.

Если выражение

$$\eta_1 = \frac{v_2 \Delta C'}{G_{\text{теор}}} = \frac{v_2 \Delta C'}{\partial I} F \quad (28)$$

преобразовать к виду

$$\Delta C' = \eta_1 \frac{\partial I}{F v_2} = \frac{1}{v_2} \left\{ \frac{\partial I \eta}{F} - [k_1 I + k_2 (P' - P'')] C_1' \right\}, \quad (29)$$

то для случая, когда $k_2 (P' - P'') = 0$, получим

$$\Delta C' = \frac{I}{v_2} \left(\frac{\partial \eta}{F} - k_1 C_1' \right). \quad (30)$$

Из последнего выражения легко заметить, что в этом случае при постоянных значениях η и C_1' степень обессоливания определяется не по отдельности значениями силы тока и скорости протекания обессоленного раствора, а отношением I/v_2 . Степень обессоливания растет прямо пропорционально I/v_2 . Но повышать величину I/v_2 можно ограниченно, так как при критическом значении этой величины наступает концентрационная поляризация мембран, падает к. п. д. тока и замедляется рост степени обессоливания.

Все вышеуказанное относится к паре камер электродиализатора с любой схемой соединения (по потоку) камер обессоливания и концентрирования. Введением величины n (число пар камер электродиализатора) в основные выведенные соотношения учитывается схема соединения камер.

Выводы

1. Найдено соотношение между кажущимся коэффициентом полезного действия электродиализатора и коэффициентом полезного действия тока в зависимости от силы электрического тока, разности гидростатических давлений в камерах электродиализатора и концентрации раствора, поступающего в камеру обессоливания.

2. Приведено соотношение для величины обессоливания раствора в зависимости от концентрации раствора, поступающего в камеру обессоливания, и параметров, указанных в п. 1.

Показано, что при отсутствии перетечек воды от разницы гидростатических давлений в камерах электродиализатора степень обессоливания определяется отношением силы электрического тока к скорости обессоленного раствора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Р. Уилсон. Деминерализация методом электродиализа, под ред. Б. Н. Ласкорина и Ф. Н. Раузен, Госатомиздат, М., 1963.
2. Kalman I., Sipos I. и Mikes I. A. Chem. Techn., 18, № 7, 411—413, 1966.
3. Б. Н. Ласкорин, Н. М. Смирнова, М. Н. Гантман. Ионообменные мембраны и их применение, Госатомиздат, М., 1961.
4. Oda, Jawataja. Bull. Chem. Soc. Japan, 30, 3, 1957.