

Применение метода ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕПОЛЮСОВКИ для снижения концентрационной ПОЛЯРИЗАЦИИ МЕМБРАН в процессе **ЭЛЕКТРОДИАЛИЗА**

Рассмотрен метод импульсной переполюсовки в процессе электродиализа как один из наиболее эффективных безреагентных способов решения проблемы осадкообразования. Найдены токовые режимы проведения процесса, при которых применение реверсного электродиализа будет оставаться технологически и экономически выгодным. Представлена общая математическая постановка задачи, справедливая в произвольной многоионной мембранной системе. Проведена верификация построенного теоретического описания с использованием экспериментальных данных, а также данных, известных из литературы.



Введение

Трудности создания эффективных электромембранных методов переработки сточных вод в первую очередь связаны с осадкообразованием на поверхности мембран в растворе секции концентрирования электродиализатора.

Естественная «склонность» к образованию осадков, блокирующих мембраны, усугубляется наложением электрического тока, промотирующего осадкообразование.

◆ Осадки образуются преимущественно на анионообменных мембранах;

◆ Кальцификация типична и протекает в две стадии. Вначале образуется рыхлый налет, который со временем «цементируется» и приобретает «состояние камня».

На стадии рыхлого налета отложения с мембран легко удаляются водой или слабым раствором соляной кислоты. Если эта стадия упущена, удаление отложений представляет значительные трудности. В некоторых слу-

Е.С. Гуляева*,
аспирант
Московского
государственного
университета
инженерной экологии

М.Г. Беренгартен,
кандидат химических
наук, профессор,
проректор,
заведующий
кафедрой ЮНЕСКО
Техника экологически
чистых производств
Московского
государственного
университета
инженерной экологии

чаях цементированный налет не удаляется даже при суточной циркуляции 5 %-го раствора соляной кислоты и наложении тока. Для получения необходимого результата требуется ручная обработка мембран щетками в кислотном растворе [1].

Существуют три принципиальных способа обработки воды перед электродиализом для удаления компонентов карбонатного осадка:

- ◆ Реагентный (содовый или известковый)
- ◆ Электрохимический
- ◆ Ионообменный

Реагентная обработка требует развитых систем, значительных капитальных затрат и вводит в процесс дополнительные ионы. Электрохимическая технология требует значительных эксплуатационных и капитальных затрат. Предварительное ионообменное умягчение перед электродиализом примени-

* Адрес для корреспонденции: egulyaeva@mail.ru

мо только для водных растворов с небольшой жесткостью и может быть обосновано только для теплоэнергетики [2]. Все эти технологии требуют завоза реагентов или дополнительного оборудования для производства щелочи, соды и кислоты, что существенно усложняет процесс обработки воды.

В этой связи особый интерес представляет разработка технологии электродиализного опреснения без предварительного умягчения.

Одним из эффективных методов борьбы с осадкообразованием является реверсный электродиализ. Реверсный электролиз относится к перспективным методам электрообработки водных сред [3, 4]. Путем варьирования формой, амплитудой и частотой тока (либо потенциалом) можно управлять электрохимическим процессом электродиализа [5]. Использование реверсных режимов электродиализа эффективно для предотвращения отложений на мембранах соединений, способных образовывать пересыщенные растворы. Если время задержки кристаллизации осадка из пересыщенного раствора у отдающей поверхности мембраны не превышает времени подачи прямого тока, то последующее переключение полярности тока позволяет снизить локальное пересыщение раствора, предотвратив кристаллизацию осадка на мембране.

Проведенный анализ литературы показывает, что теоретические и экспериментальные оценки времени протекания прямого и обратного импульса, а также значения плотностей тока в этих импульсах отсутствуют.

Результаты и их обсуждение

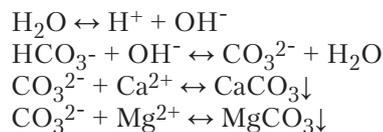
Реверсный электродиализ. Необходимым условием вовлечения ионов H^+ и OH^- в перенос через мембрану, находящуюся в растворе соли с нейтральным значением pH, является наступление предельного состояния в мембранной системе [6]. Это состояние достигается на межфазной границе, по разные стороны которой числа переноса ионов соли имеют разные значения. Прохождение электрического тока через мембранную систему вызывает изменение концентраций ионов соли на межфазной границе, а также в прилегающих к ней областях вследствие различия чисел переноса ионов в соседних фазах.

По современным представлениям в мембранной системе вблизи предельного тока концентрация электролита на межфазной границе снижается не до нуля, а достигает значений 10^{-3} – 10^{-4} М, снижаясь на 1–2 порядка от концентрации электролита в глу-

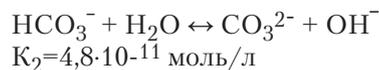
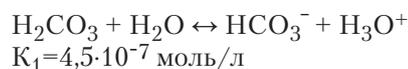
Ключевые слова:

электродиализ,
осадкообразование,
перенос,
анионообменная
мембрана,
катионообменная
мембрана

бине раствора [6]. В это время начинается процесс диссоциации воды. При этом гидроксил-ионы, генерируемые на границе мембраны с обедненным раствором, мигрируют через мембрану в камеру концентрирования (рис. 1), где вступают в реакцию с гидрокарбонатными ионами:



Образующийся осадок карбонат кальция и магния осаждается на поверхности мембраны, тем самым уменьшая ее эффективную (рабочую) поверхность. В гидрокарбонатных растворах имеют место следующие реакции, характеризующиеся соответствующими константами равновесия [7]



В соответствии с константами химического равновесия, раствор содержит максимальные значения $CO_2 \cdot H_2O$, HCO_3^- , CO_3^{2-} , близкие к 100 %, при значениях pH, равных, соответственно, 4,0, 8,4, 12,6 (рис. 2). Гидролиз является обратимым процессом,

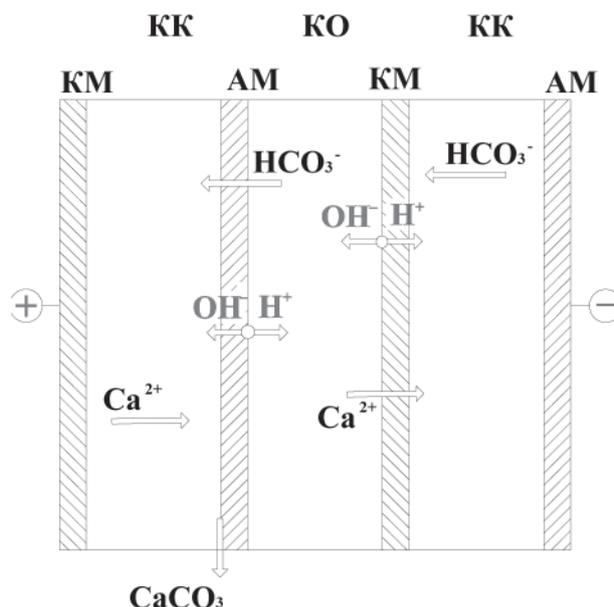


Рис. 1. Схема образования осадка карбоната кальция в электродиализаторе:

КМ – катионообменная мембрана; АМ – анионообменная мембрана; КК – камера концентрирования; КО – камера обессоливания.

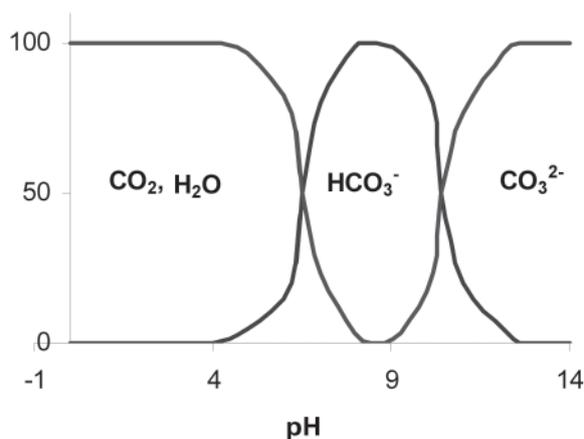
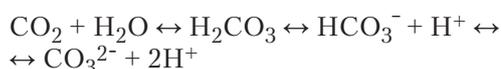


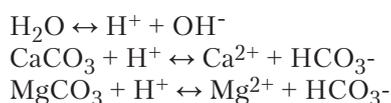
Рис. 2. Содержание в растворе CO_2 и ионов HCO_3^- , CO_3^{2-} (%) в зависимости от pH.

поэтому сдвиг pH приводит к изменению соотношения концентраций находящихся в нем ионных форм и молекул.

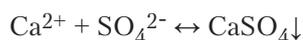
Переход одних ионов в другие описывается так называемым углекислотным равновесием [7]:



Для растворения данного осадка необходимо уменьшить концентрацию ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и CO_3^{2-} и/или сместить pH в камере концентрирования в сторону более кислых растворов. Для этого достаточно пропустить импульс положительной полярности. При пропускании мощного короткого импульса тока положительной полярности происходит снижение концентрации раствора вблизи мембраны в камере концентрирования практически до нуля, вызывая тем самым диссоциацию воды на этой границе. При этом в камере концентрирования раствор подкисляется и протекают следующие химические реакции:



При электродиализе воды сульфатного класса в камерах концентрирования образуется труднорастворимый осадок сульфата кальция:



Следует отметить, что растворение данного осадка путем смещения pH практически невозможно. Сам по себе реверсный режим электродиализа позволяет избежать осадкообразования лишь в том случае, когда содержание сульфата кальция в рассоле не превы-

шает предела его растворимости. Реверсный электродиализ позволяет увеличить степень концентрирования рассола, однако сохраняется зависимость содержания в обессоливаемой воде Ca^{2+} и SO_4^{2-} . Короткий импульс снимает локальное пересыщение раствора, предотвратив кристаллизацию сульфата кальция на мембране.

Таким образом, можно полагать, что оптимальным будет режим, при котором плотность тока в прямом направлении равна предельной или несколько выше ее. Длительность воздействия – пока на поверхности мембраны в камере обессоливания концентрация не достигнет значений, при которых начинается диссоциация воды. При этом обратный импульс должен быть как можно короче, чтобы меньшей толщины слой приповерхностного раствора был поврежден концентрационными изменениями. Плотность тока обратного импульса должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить снижение приповерхностной концентрации рассола, при которой начинается генерация ионов H^+ и OH^- в обратном направлении.

Применение данного способа обработки воды позволяет изменять временные интервалы прямого импульса, что накладывает некоторые ограничения:

- ◆ Длительность прямого импульса должна быть равной или больше времени пребывания воды в аппарате;
- ◆ Величина обратного импульса должна сочетать в себе оптимальную длительность обратного импульса и максимальное значение амплитуды обратного импульса;
- ◆ Амплитуда обратного импульса приводит к повышению минерализации в диализном тракте.





Математическое описание

Рассмотрим проточную ячейку, т.е. растворы справа и слева от мембраны все время обновляются за счет рециркуляции. Тогда концентрация на внешних границах диффузионных слоев не изменяется во времени, т.е. концентрация на внешних границах системы постоянна.

Для нахождения потока ионов в системе составим математическое описание процесса. Модель основывается на уравнениях Нернста-Планка для трехслойной системы: диффузионный слой/мембрана/диффузионный слой. Используется предположение о локальном химическом и термодинамическом равновесии, а также условие локальной электронейтральности. Для определенности рассмотрим анионообменную мембрану, с обеих сторон которой находится раствор, содержащий ионы Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , H^+ , OH^- и молекулы H_2CO_3 . Диссоциацию воды принимаем во внимание, т.к. концентрация ионов H^+ , OH^- может достигать значительных величин. Рассматриваемая задача достаточно сложна для решения, т.к. включает семь различных компонентов, переносимых диффузией и миграцией через трехслойную мембранную систему и участвующих в химических реакциях. Принимая условие, что прямой ток должен быть такой длительностью, чтобы не допустить начала диссоциации воды на поверхности мембраны, рассмотрением потоков ионов Ca^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} можно пренебречь, т.к. их концентрации в объеме раствора достаточно малы по сравнению с концентрациями Na^+ , SO_4^{2-} . Таким образом, достаточно описать перенос четырех ионов SO_4^{2-} , Na^+ , H^+ , OH^- , обозначенных индексами от 1 до 4, соответственно.

Согласно микрогетерогенной модели [8], ионообменная мембрана представляет собой мелкодисперсную систему и в общем случае

включает в себя три различающихся по термодинамическим и кинетическим свойствам фазы, гелевые участки-ассоциаты из гидратированных ионогенных групп, подвижных ионов и воды (ионные кластеры); межгелевые промежутки – микропоры, полости и другие дефекты структуры, не содержащие фиксированных ионов и заполненные раствором электролита инертные участки – скопление гидрофобных цепей полимера или фаза инертного связующего (полиэтилен). В мембранах микрофазы расположены хаотично. Будем считать, что на границе раздела гель/межгель соблюдается локальное термодинамическое равновесие, а в каждой из фаз выполняются условия электронейтральности.

Для описания переноса ионов запишем систему уравнений Нернста-Планка в диффузионном слое, образованном для определенности вблизи анионообменной мембраны в камере обессоливания:

$$J_1 = -D_1 \left(\frac{dc_1}{dX} - z_1 \cdot C_1 \frac{F}{R \cdot T} E \right) \quad (1)$$

$$J_2 = -D_2 \left(\frac{dc_2}{dX} - z_2 \cdot C_2 \frac{F}{R \cdot T} E \right) \quad (2)$$

$$J_3 = -D_3 \left(\frac{dc_3}{dX} - z_3 \cdot C_3 \frac{F}{R \cdot T} E \right) \quad (3)$$

$$J_4 = -D_4 \left(\frac{dc_4}{dX} - z_4 \cdot C_4 \frac{F}{R \cdot T} E \right) \quad (4)$$

Ток в системе складывается из потока ионов:

$$i = F(J_1 + J_2 + J_3 + J_4) \quad (5)$$

Условие электронейтральности:

$$z_1 C_1 + z_2 C_2 + z_3 C_3 + z_4 C_4 = 0 \quad (6)$$

Где: J_i – плотность потока ионов, C_i – концентрация ионов i ; $E = d\varphi / dX$ – напряженность электрического поля; i – плотность тока; F – постоянная Фарадея; R – газовая постоянная; T – температура (К); X – координата, перпендикулярная поверхности мембраны, $X=0$ соответствует внешней границе диффузионного слоя, $X=\delta$ – границе с мембраной. Система уравнений (1) – (6) может быть записана в любом поперечном сечении канала на расстоянии y от входа. При ее анализе следует учитывать, что толщина диффузионного слоя δ , плотность тока i , а также концентрации ионов в ядре потока являются в общем случае функциями продольной координаты y .

В стационарном состоянии плотности потока ионов соли не изменяются по координате

X ($dJ_i/dX=0$), а потоки ионов H^+ и OH^- являются переменными вследствие протекания химической реакции с их участием (генерация или рекомбинация этих ионов в объеме диффузионного слоя), однако величина $J_w=J_3J_4$ остается постоянной по X , поскольку количество ионов H^+ , появляющихся или исчезающих в точке X в ходе химической реакции, в точности равно соответствующему количеству ионов OH^- . Считаем мембрану непроницаемой для коионов ($J_2=0$).

На левой внешней границе диффузионного слоя ($X=0$) концентрации всех компонентов известны (соответствуют концентрации компонентов в перемешиваемом растворе): $C_i(0)=C_i^0$, причем C_i^0 удовлетворяют условиям $C_1^0-C_2^0+C_3^0-C_4^0=0$ и $C_3^0C_4^0=n_0^2$ ($n_0 \approx 10^{-7}M$). Принимаем допущение, что условие равновесия химической реакции ($C_3C_4=n_0^2$) остается справедливым по всей толщине электронейтральной области. В этом случае сумма (C_3+C_4) отличается от разности $|C_3-C_4|$ не более, чем на $2n_0$, и поскольку $|C_3-C_4| = |C_1-C_2|$ (условие электронейтральности), то (C_3+C_4) в рассматриваемой области не превышает суммы

$$(2n_0 + C_1 + C_2): C_3 + C_4 \leq 2n_0 + |C_3 - C_4| = 2n_0 + |C_1 - C_2| \leq 2n_0 + C_1 + C_2.$$

Учитывая характер изменения концентраций ионов соли в диффузионном слое ($(C_1+C_2)X=\delta \ll (C_1^0+C_2^0)$) и малость n_0 , в качестве условия на правой границе, примем равенство

$$(C_1+C_2+C_3+C_4)X=\delta \ll (C_1^0+C_2^0+C_3^0+C_4^0) \quad (7)$$

Поделим каждый из потоков J_i в уравнениях (1) – (4) на D_i и просуммируем результаты

$$\frac{J_1}{D_1} + \frac{J_3}{D_3} + \frac{J_4}{D_4} = -\frac{d}{dX} \cdot (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) + \frac{F}{RT} E \cdot (C_1 - C_2 + C_3 - C_4) \quad (8)$$

С учетом условия электронейтральности и принятых граничных условий после интегрирования уравнения (8) по всей толщине диффузионного слоя получим:

$$\frac{J_1}{D_1} \delta + \int_0^\delta \left(\frac{J_3}{D_3} + \frac{J_4}{D_4} \right) dX = C_1^0 + C_2^0 + C_3^0 + C_4^0 \quad (9)$$

Преобразуем интегральное слагаемое в (9), введя замену $J_4=J_3J_w$

$$\int_0^\delta \left(\frac{J_3}{D_3} + \frac{J_4}{D_4} \right) dX = \frac{J_w}{D_4} \delta + \frac{D_3 + D_4}{D_3 D_4} \int_0^\delta J_3 dX \quad (10)$$

С учетом проведенных оценок и сделав замену $C_1^0 + C_2^0 + C_3^0 + C_4^0 = 2(C_1^0 + C_3^0)$, из (9) находим выражение для потока ионов:

$$J_1 = \frac{2 \cdot (C_1^0 + C_3^0) \cdot D_1}{\delta} + \left(1 - \frac{D_3 + D_4}{D_3} \cdot \frac{X}{\delta} \right) \cdot \frac{D_1}{D_4} J_w \quad (11)$$

Основное условие, которое накладываем для расчета длительности импульса, сводится к следующему:

- ◆ короткий импульс тока должен приводить к резкому изменению концентраций на поверхностях мембран;
- ◆ концентрация в объеме раствора должна оставаться неизменной;
- ◆ вышеуказанное позволяет избежать существенных потерь электрической энергии в ходе процесса.

Для решения поставленной задачи применяем численный метод дискретизации. Разбиваем систему на заданное количество отрезков. Поскольку в начальный момент времени $t=0$ концентрации ионов известны, по уравнению (11) рассчитываем плотности потоков. Затем находим концентрации в системе для момента времени $t=\Delta t$:

$$C_n = C_n - \frac{J_i \cdot F_m \cdot \tau}{V} \quad (12)$$

Используя данные значения концентраций, находим плотности потоков для момента времени $t=\Delta t$, затем процедура циклически повторяется. При этом количество итерации-



онных циклов определяется необходимой степенью точности выходных параметров.

В работе [9] есть указание на то, что диссоциация воды в диффузионном слое начинается при снижении концентрации электролита у поверхности мембраны на два порядка. Это условие принято для переключения полярности тока. При этом плотность тока обратного импульса превосходит предельную плотность тока в 10-50 раз. Длительность короткого импульса рассчитывается из условия начала диссоциации воды на анионообменной мембране в камере концентрирования аналогично.

Для примера рассмотрим характеристики импульса, рассчитанные для раствора $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ с начальной концентрацией Na_2SO_4 0,5 моль/л и $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 1,8 ммоль/л (концентрация кальция в водопроводной воде) (рис. 3).

Длительность прямого импульса составила 22 с, длительность обратного импульса 0,02 с, при этом выход по току составил 0,97, что является очень хорошим значением для данного процесса.

Верификация модели

Верификация модели проведена с помощью аналитического решения Санда и с помощью экспериментальных данных.

Сандом было получено решение для полубесконечной нестационарной диффузии электролита в растворе вблизи поверхности электрода [10]. При этом считалось, что развитие диффузионного слоя неограниченно. Если перенести условия, принятые Сандом, на мембранные системы, то для нахождения концентрации на границе мембрана/раствор имеем следующее выражение:

$$C(0,t) = C_0 - \frac{2 \cdot I}{z \cdot F \cdot D} \cdot (T_i - t_i) \sqrt{\frac{D_s \cdot t}{\pi}} \quad (13)$$

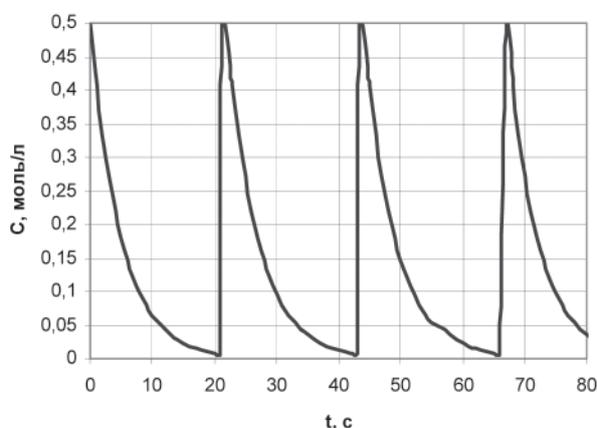


Рис. 3. Зависимость граничной концентрации электролита от времени (наше аналитическое решение для $C_H=0,5M$).

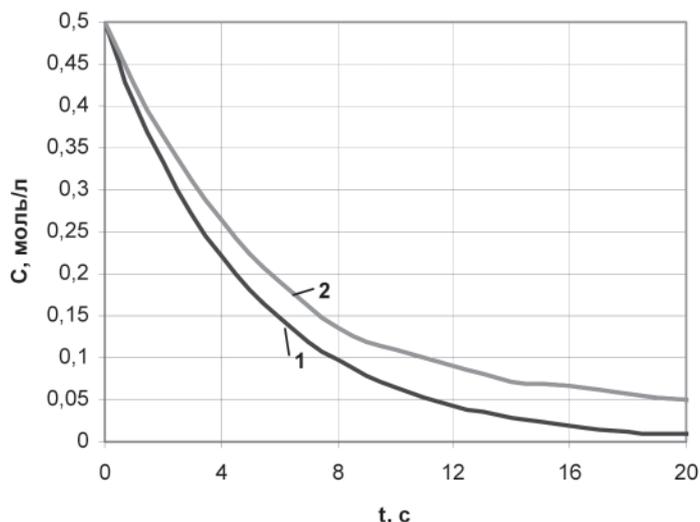


Рис. 4. Граничная концентрация электролита как функция времени:

1 – наше численное решение; 2 – решение Санда ($C_H=0,5M$).

где I – плотность тока, D – коэффициент диффузии электролита, T – эффективное число переноса ионов на границе мембрана/раствор, t – число переноса этих ионов в растворе.

Согласно этому решению переходное время (момент времени, в который происходит смена механизма доставки ионов к поверхности мембраны из объема раствора) соответствует:

$$\tau = \left(\frac{\pi \cdot D}{4} \right) \cdot \left(\frac{C_i^0 \cdot z_i \cdot F}{T_i - t_i} \right) \cdot \frac{1}{i^2} \quad (14)$$

На рис. 4 представлены зависимости граничной концентрации ионов в растворе ($x=0$) от времени, найденные численно с помощью разрабатываемой модели и аналитики по уравнению Санда (13).

Различие в величине граничной концентрации можно объяснить тем, что на поверхности гетерогенной мембраны линии тока сгущаются на хорошо проводящих участках («эффект воронки»), локальная плотность тока существенно выше, а граничная концентрация гораздо ниже. При этом концентрация электролита вблизи проводящих участков падает быстрее и состояние, соответствующее переходному времени, наступает в системе быстрее. Характер изменения концентрации в численном решении совпал с аналитическим решением, что говорит об определенной степени надежности использованного численного метода решения. Проведенная проверка не является достаточным условием справедливости постановки задачи и метода ее решения, поэтому дальнейшая верификация проведена с использованием экспериментальных данных.

Эксперименты были проведены на лабораторной установке, состоящей из насоса, блока питания и электродиализного модуля фильтр-прессного типа с гетерогенными ионообменными мембранами российского производства (МА-40, МК-40). Блок питания включает генератор, который вырабатывает короткие импульсы (0,2 с) положительной полярности. Период следования импульсов можно регулировать с помощью резистора в пределах 0,2 с – 1,8 с. Длительность прямого импульса изменялась в диапазоне 10-90 с. В качестве модельных растворов использовали бинарные растворы электролитов $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$. Электропроводность и величина pH исследуемых водных растворов измерялись кондуктометрическим и потенциометрическим методами, соответственно. Независимо состав раствора контролировался путем прямого химического анализа. Концентрация сульфат-иона определялась турбодиметрическим методом, концентрация карбонат-иона и гидрокарбонат-иона определялась титрованием 0,005М раствором соляной кислоты в присутствии индикаторов фенолфталеина и метилового оранжевого, соответственно.

Критерием в выборе приемлемого режима являлось отсутствие на мембранах осадка.

Величина концентрации иона или произведения концентрации ионов, выпадающих в осадок, задавалась, исходя из растворимости, при которой возникает опасность осадкообразования на поверхности мембраны.

Например, осадок гидроксида магния выпадает при условии

$$[\text{Mg}^{2+}][\text{OH}^-]^2 > \text{ПР} \quad (15)$$

где ПР – величина произведения растворимости гидроксида магния, равная $6 \cdot 10^{-10}$. Зная pH раствора в камере концентрирования (из ранее полученных результатов), с помощью ионного произведения воды вычисляем концентрацию гидроксильных ионов, а затем неравенство (15) дает возможность рассчитать концентрацию ионов магния.

Наибольшую вероятность имеет осадкообразование карбоната кальция.

$$[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] > \text{ПР} \quad (16)$$

Произведение растворимости карбоната имеет значение $3,8 \cdot 10^{-9}$. Хотя условие его осаждения не включает непосредственно концентрацию гидроксильных ионов или водородных ионов, однако концентрация карбонатных ионов является функцией кон-

центрации водородных ионов, следовательно, и концентрации гидроксильных ионов. Если для области образования осадка карбоната кальция ограничиться второй ступенью диссоциации угольной кислоты, имеющей константу $K_2 = 4,8 \cdot 10^{-11}$, то, используя соотношение (16), получаем:

$$[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{HCO}_3^-] > \frac{[\text{H}^+] \cdot \text{ПР}}{K_2} \quad (17)$$

В результате экспериментов оценивалась степень очистки раствора от ионов (относительная убыль вещества в камерах обессоливания и относительный прирост вещества в камерах концентрирования). Вычислялась величина выхода по току, которая определяет эффективность использования электрической энергии в данном процессе.

$$\eta = \frac{I_1 \cdot t_1}{I_1 \cdot t_1 + I_2 \cdot t_2} \quad (18)$$

где, η – выход по току; I_1 – плотность тока прямого импульса, t_1 – длительность прямого импульса, I_2 – плотность тока обратного импульса, t_2 – длительность обратного импульса.

Зависимость выхода по току от длительности прямого и обратного импульса приведена на рис. 5.

Достоверность предложенного математического описания импульсного электродиализа подтверждается хорошим согласованием

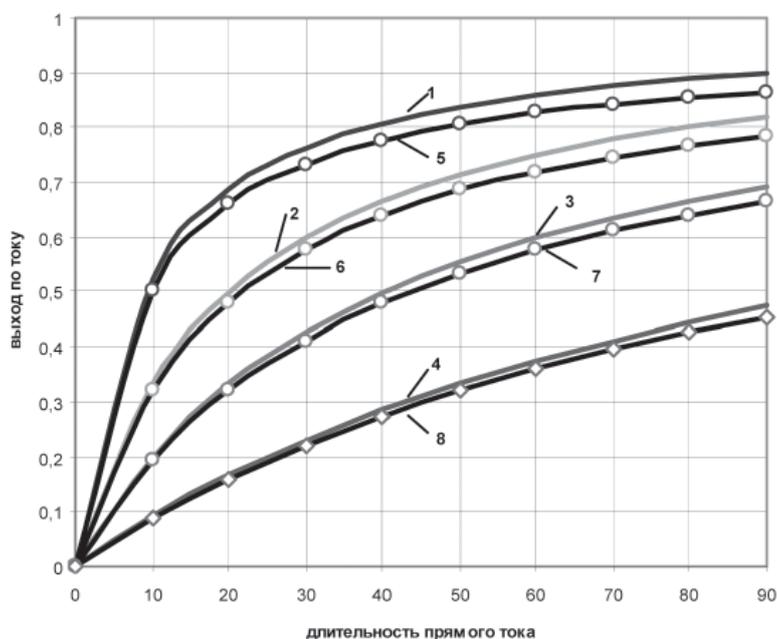


Рис. 5. Зависимость выхода по току от длительности прямого тока:

1, 5 – длительность импульса 0,2 с; 2, 6 – длительность импульса 0,4 с; 3, 7 – длительность импульса 0,8 с; 4, 8 – длительность импульса 2 с; 1, 2, 3, 4 – результаты аналитического решения; 5, 6, 7, 8 – результаты эксперимента.

расчетных и экспериментальных данных. Для большинства опытов относительная погрешность вычисления составила менее 7%.

Заключение

В результате проведенных исследований теоретически и экспериментально обоснована возможность использования метода импульсной переполосовки для снижения концентрационной поляризации. Определены токовые режимы, при которых, с одной стороны, снижается риск осадкообразования на поверхности мембраны, а с другой – сохраняется высокое значение выхода по току.

Литература

1. Липовецкий Я.М. Электрохимические способы очистки питьевых и сточных вод / Липовецкий Я.М., Рапопорт Я.Д. // ЦБНТИ Минжилкомхоза РСФСР (Водоснабжение и канализация), 1985.
2. Пилат Б.В. Основы электродиализа. М.: Авваллон, 2004.
3. Костин Н.А. Импульсный электролиз / Костин Н.А., Кублановский В.С., Заблудовский В.А. //К.: Наукова думка, 1989.



4. Винник А.Ф., Бойко А.В., Слюсаревская Т.В. Некоторые вопросы теории и практики импульсного электролиза /Винник А.Ф., Бойко А.В., Слюсаревская Т.В // Прикл. электрохимия: Теория, технология и защитные свойства гальванических покрытий. Казанский хим.-технол. Ин-т. Казань, 1991.
5. Вурдова Н.Г. Электродиализ природных и сточных вод / Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т// АСВ. – Москва, 2001.
6. Деминерализация методом электродиализа / под ред. Дж.Уилсона. М.:Госатомиздат, 1963.
7. Кульский Л.А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды. Киев.: Наукова думка, 1971.
8. Забольцкий В.И. НАЗВАНИЕ / Забольцкий В.И., Гнусин Н.П., Мешечков А.И., Дворкина Г.А // Электрохимия. т. 21. С. 1044, 1985.
9. Forgacs C. Interferometric study of concentration profiles in solutions near membrane surfaces /Forgacs C., Leibovitz I., O'Brien R.N., Spiegler K.S // Electrochim. Acta. 1995. V. 20.- P. 555.
- 10/ Фиттер, К. Электрохимическая кинетика / Пер. с нем.: под ред. Я.М. Колотыркина. М.: Химия, 1967.



E.S. Gulaeva, M.G. Berengarten

METHOD OF PULSE POLARITY FOR MEMBRANE CONCENTRATION POLARIZATION DECREASE IN ELECTRODIALYSIS PROCESS

Method of pulse polarity in the process of electro dialysis as one of the most effective reagent-free ways to deal with sediment, found current regimes of the process under which the use of reverse electro dialysis will remain technologically and

economically feasible is examined. A general mathematical formulation, valid in an arbitrary multi-ion membrane system is represented. The verification of the constructed theoretical description using the experimental data, as well as data

known from literature has been carried out.

Key words: electro dialysis, sedimentation, transport, anion-exchange membrane, cation-exchange membrane