

УДК 541.135.5

UDC 541.135.5

02.00.00 Химические науки

Chemistry

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА
КОРРЕКЦИИ pH УМЯГЧЕННОЙ ВОДЫ В
ДЛИННЫХ КАНАЛАХ
ЭЛЕКТРОДИАЛИЗАТОРОВ С
БИПОЛЯРНЫМИ МЕМБРАНАМИ**

**MATHEMATICAL MODEL OF THE
CORRECTION OF PH SOFTENED WATER IN
A LONG CHANNEL OF ELECTRODIALYSIS
WITH BIPOLAR MEMBRANE**

Василенко Полина Александровна
Аспирант

Vasilenko Polina Aleksandrovna
Postgraduate

Утин Станислав Викторович
к.х.н.

Utin Stanislav Victorovich
Cand.Chem.Sci.

Заболоцкий Виктор Иванович
д.х.н., профессор

Zabolotsky Victor Ivanovich
Dr.Sci.Chem., Professor

Лебедев Константин Андреевич
д.ф.-м.н., доцент
*Кубанский государственный университет, Россия
350040, Краснодар, Ставропольская, 149*

Lebedev Konstantin Andreevich
Dr.Sci.Phys-Math., Professor
Kuban State University, Krasnodar, Russia

Теоретически и экспериментально исследован процесс коррекции pH природной воды гидрокарбонатного класса в электродиализаторе с биполярными мембранами с длиной канала 40 см. Экспериментально измерены концентрации компонентов, pH растворов в щелочной и кислотных каналах электродиализатора в зависимости от плотности тока. Разработана математическая модель для длинных каналов, причём для масштабирования массообменных характеристик процесса был применён и верифицирован метод компартиментации, что дало возможность рассчитать зависимости компонент по длине канала при разных скоростях протока раствора. Численные расчёты сравниваются с экспериментальными данными на электродиализаторах длины 10 см и 40 см

Theoretically and experimentally, we investigated the process of adjusting the pH of natural water of hydrocarbonate class electrodialyzer with bipolar membranes with channel length of 40 cm. We experimentally measured concentration of components, pH of the solutions in alkaline and acid channels of electrodeposition depending on the current density. The article describes a mathematical model for long channels; to scale the mass transfer characteristics of the process there was applied and verified a method of compartmentalization, which gave the possibility to calculate the dependence of the component along the channel length at different velocities of flow of the solution. Numerical calculations were compared with experimental data on electrodialyser of 10 cm and 40 cm length

Ключевые слова: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОЦЕСС ПЕРЕНОСА, УМЯГЧЕНИЕ, КАНАЛ, pH РАСТВОРА

Keywords: MATHEMATICAL MODELING, TRANSPORT PROCESSES, SOFTENING, CHANNEL, pH OF SOLUTION

Doi: 10.21515/1990-4665-126-002

ВВЕДЕНИЕ

Практическая востребованность электромембранных технологий способствует поиску оптимальных конструкций аппаратов, обеспечивающих наибольшую их эффективность, и развитию методов инженерных расчётов процессов с их применением. Прогнозирование и расчёт массообменных характеристик промышленных

<http://ej.kubagro.ru/2017/02/pdf/02.pdf>

электродиализаторов является актуальной задачей современной мембранной технологии. Однако большинство теоретических подходов, позволяющих рассчитывать массообменные характеристики электродиализаторов, дают адекватные результаты в случае каналов с длиной порядка 10 см. В каналах электродиализаторов большей длины происходит существенное изменение концентрации раствора и плотности тока по длине канала.

Основным методом исследования в данной работе является математическое моделирование. Используются математические методы масштабирования параметров электродиализаторов, позволяющие на основании основных характеристик процесса, полученных при исследовании лабораторных электродиализаторов, рассчитывать массообменные характеристики промышленных аппаратов. Одним из таких методов масштабирования является метод компартиментации, развитый в работах Никоненко и соавторов [1-3] применительно к электродиализаторам для обессоливания разбавленных растворов в условиях развития сопряженных эффектов концентрационной поляризации. Основным принцип этого метода заключается в разбиении длинного мембранного канала на достаточно большое число каналов меньшей длины, расположенных перпендикулярно направлению течения раствора. Расчёт осуществляется таким образом, что выходные расчётные данные на предыдущем участке являются входными данными для последующего участка. Такой подход позволяет осуществлять послойный расчёт состава раствора при его прохождении по каналу и находить таким образом локальное значение концентраций ионов, рН, плотности тока и эффективных чисел переноса ионов через мембраны. Следует отметить, что метод компартиментации был апробирован не только для оптимизации параметров электродиализных установок [4], но и для расчёта суммарной площади мембран обратноосмотических модулей [5]. Для корректного

<http://ej.kubagro.ru/2017/02/pdf/02.pdf>

масштабирования необходимо соблюдать ряд условий при тестировании электродиализаторов [1,6]. Во-первых, исследования необходимо проводить в потенциостатическом режиме при неизменной средней линейной скорости потока раствора через исследуемый длинный канал. Во-вторых, толщина диффузионного слоя, много меньшая длины канала, принимается равной по всей длине канала за исключением небольшого входного участка, где имеют место краевые эффекты и его длиной можно пренебречь. Авторы [1] получили полуэмпирические уравнения, позволяющие рассчитывать коэффициент массопереноса как функцию четырех параметров (входной концентрации раствора, скачка потенциала на парной камере аппарата, объемной скорости потока раствора и длины канала). Причем такой расчет вполне применим для аппаратов с каналами различной конструкции (пустой канал, с турбулизирующей сеткой, с ионообменной насадкой) - при этом лишь меняются эмпирические коэффициенты в соответствующих уравнениях. Для масштабирования по длине канала был применен метод компартиментации, который показал хорошее согласие с экспериментальными данными, полученными в независимых экспериментах.

Немногочисленные работы, посвящённые использованию метода компартиментации для масштабирования характеристик электродиализаторов, демонстрируют удовлетворительные результаты при электродиализном обессоливании разбавленных растворов простых солей. В тоже время активное развитие электродиализа с биполярными мембранами вызывает необходимость поиска математических походов, позволяющих масштабировать и прогнозировать характеристики длинных мембранных каналов с биполярными мембранами. По аналогии с электродиализным обессоливанием, где при сверхпредельных токовых режимах проведения процесса наблюдается значительное смещение рН раствора от исходного значения, можно предположить, что процесс

корректировки рН однокомпонентного раствора бинарного электролита электродиализом с биполярными мембранами вполне удовлетворительно может быть описан с помощью такого метода. Однако при переходе к переработке реальных природных вод процесс электродиализа значительно осложняется за счет наличия большого числа компонентов и протекания химических реакции между разнозарядными ионами присутствующих в растворе солей и продуктами диссоциации молекул воды, образующимися в биполярной мембране [7]. Известна работа [8], в которой авторы показали, что применение метода компартиментации позволяет прогнозировать и масштабировать массообменные характеристики промышленных электродиализаторов-концентраторов при переработке сокового пара аммиачной селитры.

Целью данной работы являлось теоретическое и экспериментальное исследование процесса коррекции рН природной воды гидрокарбонатного класса в электродиализаторе с биполярными мембранами с длиной канала 40 см. Для масштабирования и прогнозирования массообменных характеристик процесса был применен и верифицирован метод компартиментации.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектами исследования являлись щелочная и кислотная камеры электродиализатора (рис. 1), образованные гетерогенными биполярными мембранами МБ-3 и анионообменной мембраной МА-40 (производства ОАО «Щекиноазот», Россия). Рабочая длина канала составляла 40 см, ширина – 10 см, межмембранное расстояние – 0,8 мм, между мембранами располагался турбулизирующий поток сепаратор. Аппарат содержал 10 парных камер. Исследовался процесс электродиализной коррекции рН умягченной воды гидрокарбонатного класса, состав которой представлен в

таблице 1. Процесс проводился в гальваностатическом режиме при трех различных объемных скоростях потока раствора ($W=5, 10$ и 15 л/час) через кислотную и щелочную камеры электродиализатора (линейные скорости – $2,5, 5$ и $7,5$ см/с соответственно). Концентрации карбонатного, гидрокарбонатного иона и угольной кислоты в анализируемых растворах определялись кислотно-основным титрованием с потенциометрической индикацией точки эквивалентности. Концентрации хлорид-ионов и сульфат-ионов определялись методом жидкостной хроматографии. Все измерения проводились при достижении стационарного состояния в электродиализной ячейке, о наступлении которого судили по равенству суммарной концентрации хлорид- и сульфат-ионов на входе в кислотную (1) и щелочную (2) камеры их суммарной концентрации на выходе из этих камер, а также по равенству суммарной концентрации всех форм угольной кислоты на входе и выходе указанных камер.

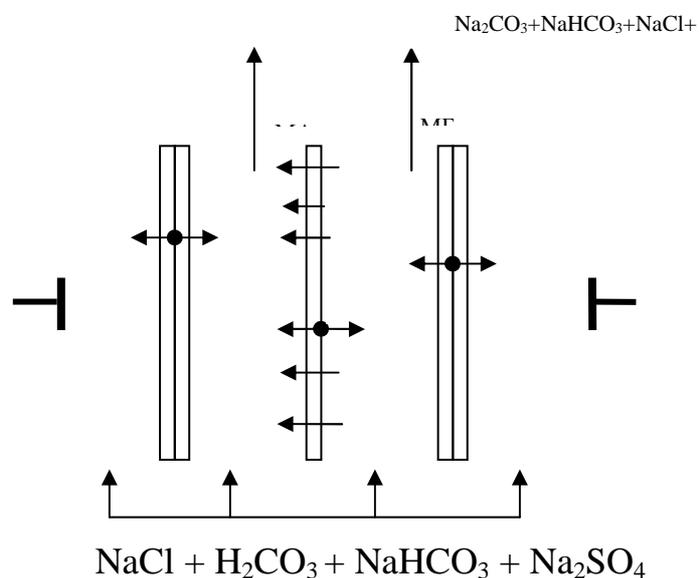


Рисунок 1 – Схема элементарного звена электродиализатора для исследования коррекции pH умягченной воды. 1 - кислотная камера, 2 - щелочная камера

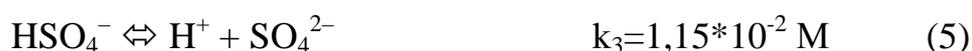
Таблица 1 Компонентный состав исходной умягченной воды

Исходные компоненты в умягченной воде	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	H ₂ CO ₃	SO ₄ ²⁻	Na ⁺
Концентрация, мг/л	55	261	7	80	168

Процесс электродиализа умягчённой воды осложнён химическими реакциями с участием одно- и двухзарядных ионных форм угольной кислоты при изменении рН в кислотной и щелочной камерах. В присутствии гидрокарбонатных ионов в умягчённой воде их взаимодействие с ионами гидроксила и водорода, образующимися в биполярной мембране, описывается реакциями, характеризующимися соответствующими константами равновесия:



Кроме того в умягченной воде содержится значительное число сульфат-ионов, присутствие различных форм которых также зависит от рН. При рН < 4 в умягченной воде наряду с сульфат-ионами (SO₄²⁻) присутствуют также ионы гидросульфата (HSO₄⁻). В этом случае расчет концентраций осуществляется на основе реакции диссоциации серной кислоты (по двум ступеням):



При расчете концентрации всех компонентов, присутствующих в щелочной и кислотной камерах электродиализной ячейки с длиной канала 10 см вполне можно воспользоваться простой кинетической моделью, <http://ej.kubagro.ru/2017/02/pdf/02.pdf>

предложенной в работе [9]. При длинах 40 см и больше необходимо использовать более сложные математические подходы.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Принцип моделирования в длинных каналах заключается в разбиении длины мембранного канала на достаточно большое число участков меньшей длины, расположенных перпендикулярно направлению течения раствора. Расчёт осуществляется таким образом, что выходные расчётные данные на предыдущем участке являются входными данными для последующего участка. Метод позволяет осуществлять послойный расчёт состава раствора при его прохождении по каналу и находить таким образом локальное значение концентраций ионов, рН, плотности тока и эффективных чисел переноса ионов через мембраны. Кроме того разработанная модель позволяет получать зависимость рН раствора от длины канала электродиализатора. Математическая модель представляет собой совокупность алгебраических уравнений отражающих химические равновесия в растворе и материальный баланс для каждого из ионов в щелочной и кислотной камерах. Числа переноса противоионов через анионообменную мембрану рассчитывались на основании теоретического подхода, развитого в работе [10]. Плотность протекающего тока при напряжении U рассчитывается из формулы:

$$i = \frac{F^2}{RT} \frac{U - \frac{RT}{F} \ln \frac{c_{H^+}^2}{c_{H^+}^1}}{\left(\sum_j \frac{1}{z_j^2 D_j c_j^1} + \sum_j \frac{1}{z_j^2 D_j c_j^2} \right) h} \quad (6)$$

где $c_{H^+}^1, c_{H^+}^2$ – концентрации ионов водорода в первой и второй камере соответственно; h – расстояние между мембранами. Поскольку электрическая проводимость раствора меняется по длине канала, то меняется и плотность протекающего тока i . В числителе стоит падение напряжения на парной камере за минусом падения на анионообменной мембране, в знаменателе проводимость растров в щелочной и кислотных камерах соединённых, как проводники тока, последовательно. Расчёты проводились сначала в щелочной камере, находились числа переноса и затем вычисления проводились в кислотной камере. Для сокращения расчётов производилось распараллеливание расчётов. Созданы две программы, работающие одновременно для обеих камер. В кислотной камере проводился расчёт с учётом переноса полученных на предыдущем шаге, и затем уточнялся с расчётными числами переноса в щелочной камере.

Через электромембранную систему, представляющую собой двухкамерную элементарную ячейку (рис. 1) перпендикулярно поверхности мембран протекает постоянный электрический ток плотности i . Исследуемая умягченная вода содержит 9 различных компонентов j , где j_0 соответствует H_2CO_3 , $j_1 - HCO_3^-$, $j_2 - CO_3^{2-}$, $j_3 - OH^-$, $j_4 - H^+$; $j_5 - Na^+$; $j_6 - Cl^-$, $j_7 - SO_4^{2-}$, $j_8 - HSO_4^-$. Введем обозначения: c_j ($j=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$) – концентрация j -го компонента в смеси растворов, моль/см³, v_i ($i=0, 1, 2, 3, 4, 5$) – скорость образования молекул веществ, моль/с, W – объемная скорость течения раствора через каждую камеру, см³/с, v_0 – линейная скорость течения раствора через каждую камеру, см/с (рассчитывалась по формуле: $v_0 = \frac{W}{a \cdot h \cdot g}$, где $a=3$ см, $h=0,1$ см, g (порозность канала). Величина g рассчитывается как отношение объема камеры не занятого спейсером к полному объему камеры, для указанного спейсера $g = 0,9$. S_0 – площадь

поперечного сечения камеры, см^2 , S_m – площадь мембраны, см^2 , $p = \frac{S_m}{S_0V_0}$ – параметр, учитывающий конструкционные и гидродинамические характеристики электродиализной ячейки, с/см , F – постоянная Фарадея, Кл/моль , $c_j^{(0)}$ – концентрации j -го компонента на входе в исследуемые камеры электродиализной ячейки, $c_j^{(1)}$ и $c_j^{(2)}$ – концентрации j -го компонента на выходе из кислотной и щелочной камер соответственно. Числа переноса через биполярную мембрану T_j^{AK} принимались равными 1. Числа переноса продуктов диссоциации молекул воды через анионообменные мембраны T_j^{A} принимались равными экспериментальным, полученными в [10] при соответствующих значениях рН и плотности тока. В условиях достаточно низкой концентрации ионов в умягченной воде переносом коионов через анионообменную мембрану можно пренебречь. В таком случае сумма чисел переноса анионов через анионообменную мембрану равна единице:

$$T_{\text{Cl}^-}^{\text{A}} + T_{\text{HCO}_3^-}^{\text{A}} + T_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{A}} + T_{\text{OH}^-}^{\text{A}} + T_{\text{SO}_4^{2-}}^{\text{A}} + T_{\text{HSO}_4^-}^{\text{A}} = 1 \quad 7)$$

Подход, первоначально использованный для расчёта процессов с внешнедиффузионным характером кинетики [10], применим и в случае коррекции рН умягченной воды. Заключение о возможности использования уравнений (5-7) сделано на основании того, что концентрация электролитов в природных водах мала ($C \approx 0,01\text{M}$), а плотности токов, используемых при электродиализной коррекции рН умягченной воды близки или превышают предельный диффузионный ток. С использованием уравнений химических реакций (2) и (3), описывающих равновесие различных ионных форм угольной кислоты, реакций (4) и (5),

описывающих диссоциацию серной кислоты, а также уравнения диссоциации молекул воды



введем уравнения для констант термодинамического равновесия соответствующих реакций:

$$c_4^{(1)} c_1^{(1)} - k_1 c_0^{(1)} = 0, \quad 9)$$

$$c_4^{(1)} c_2^{(1)} - k_2 c_1^{(1)} = 0, \quad 10)$$

$$c_4^{(1)} c_8^{(1)} - k_3 c_7^{(1)} = 0, \quad 11)$$

$$c_4^{(1)} c_3^{(1)} - k_w = 0 \quad 12)$$

где $k_1=4,5 \cdot 10^{-7}$, $k_2=4,8 \cdot 10^{-11}$, $k_3=1,15 \cdot 10^{-2}$, $k_w=1 \cdot 10^{-14}$.

Принимая во внимание условие локальной электронейтральности в растворе

$$c_1^{(1,2)} + 2c_2^{(1,2)} + c_3^{(1,2)} + c_6^{(1,2)} + c_7^{(1,2)} + 2c_8^{(1,2)} - c_4^{(1,2)} - c_5^{(1,2)} = 0 \quad 13)$$

и условие равенства суммарной молярной концентрации всех форм угольной кислоты на входе и выходе исследуемых камер

$$\Sigma C^{(0)} - c_0^{(1)} - c_1^{(1,2)} - c_2^{(1,2)} + (\pm T_1^A \pm \frac{T_2^A}{2}) \frac{i}{F} p = 0, \quad 14)$$

(здесь знак «+» соответствует кислотной камере, знак «-» соответствует щелочной камере)

Составляем уравнения материального баланса для каждого компонента в кислотной камере и щелочной камерах (1,2):

$$c_0^{(0)} + \frac{\gamma_0}{W} - c_0^{(1)} = 0 \quad (15)$$

$$c_1^{(0)} + \frac{\gamma_1}{W} - c_1^{(1,2)} \pm T_1^A \frac{i}{F} p = 0 \quad (16)$$

$$c_2^{(0)} + \frac{\gamma_2}{W} - c_2^{(1,2)} \pm \frac{T_2^A}{2} \frac{i}{F} p = 0 \quad (17)$$

$$c_3^{(0)} + \frac{\gamma_3}{W} - c_3^{(1,2)} + (T_{OH^-}^{BPM} \pm T_3^A) \frac{i}{F} p = 0 \quad (18)$$

$$c_4^{(0)} + \frac{\gamma_4}{W} - c_4^{(1,2)} + (T_{H^+}^{BPM} \mp T_4^A) \frac{i}{F} p = 0 \quad (19)$$

$$c_5^{(0)} - c_5^{(1,2)} \mp T_5^A \frac{i}{F} p = 0 \quad (20)$$

$$c_6^{(0)} - c_6^{(1,2)} \pm T_6^A \frac{i}{F} p = 0 \quad (21)$$

$$c_7^{(0)} + \frac{\gamma_5}{W} - c_7^{(1,2)} \pm T_7^A \frac{i}{F} p = 0 \quad (22)$$

$$c_8^{(0)} + \frac{\gamma_5}{W} - c_8^{(1,2)} \pm T_8^A \frac{i}{F} p = 0 \quad (23)$$

В уравнениях 16-23 знак «±» сверху относится к кислотной камере, снизу к щелочной. Числа переноса через биполярную мембрану

$T_{OH^-}^{BPM}$ принимались равными 1 в случае щелочной камеры и 0 для кислотной камеры, числа переноса $T_{H^+}^{BPM}$ 1 для кислотной камеры и 0 для щелочной. В каждой камере на выходе имеется 15 неизвестных для определения которых имеется 15 уравнений. Задача сводилась к безразмерному виду и уравнения решались регуляризованным методом Ньютона с выбором коэффициента шага и параметра регуляризации, обеспечивающей релаксационную сходимость вычислительного процесса [11]. Уравнения могут применяться не только для каналов разной длины. Если длина канала превышает 10 см, то он считается длинным и точечные модели теряют адекватность. Длинный канал можно представить как последовательность «коротких» каналов, и учитывая, что скачок потенциала на парной камере не зависит от длины канала, уравнения применяются последовательно к каждому фрагменту «длинного» канала, считая выходные концентрации компонентов для предыдущего канала, входными для последующего фрагмента. Модель реализована в виде программы и позволяет рассчитать распределение концентраций отдельных компонентов раствора по длине каналов щелочной и кислотных камер, в зависимости от протекающего в электромембранной системе тока, вычислить соответствующее падение напряжения на камерах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В сверхпредельных токовых режимах процесс умягчения сопровождается увеличением генерации H^+ , OH^- ионов на катионо- и анионообменной мембранах. Источником этих ионов является процесс диссоциации воды с участием каталитически активных фиксированных групп мембран.

Сравнение экспериментальных данных значений pH с рассчитанными по модели показывает приемлемое согласие по обеим камерам (рис. 2). В щелочной камере она возрастает, а в кислотной убывает. Некоторое расхождение на начальном участке при малых токах возможно объясняется неучтёнными равновесиями по ионам Mg^{2+} и Ca^{2+} , которые

могут образовывать соединения в реальных водах, возможностью выпадения осадков карбоната кальция и магниевых соединений.

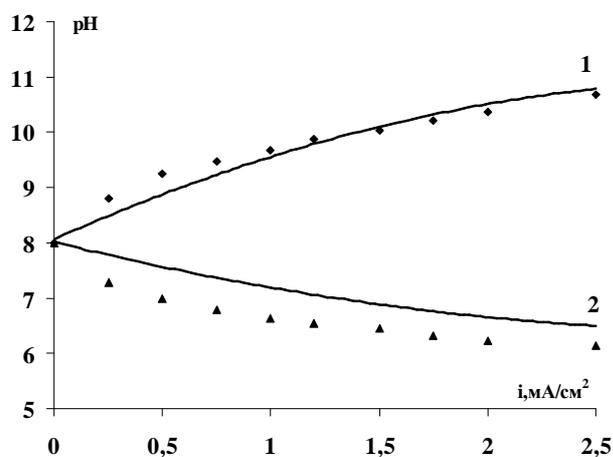
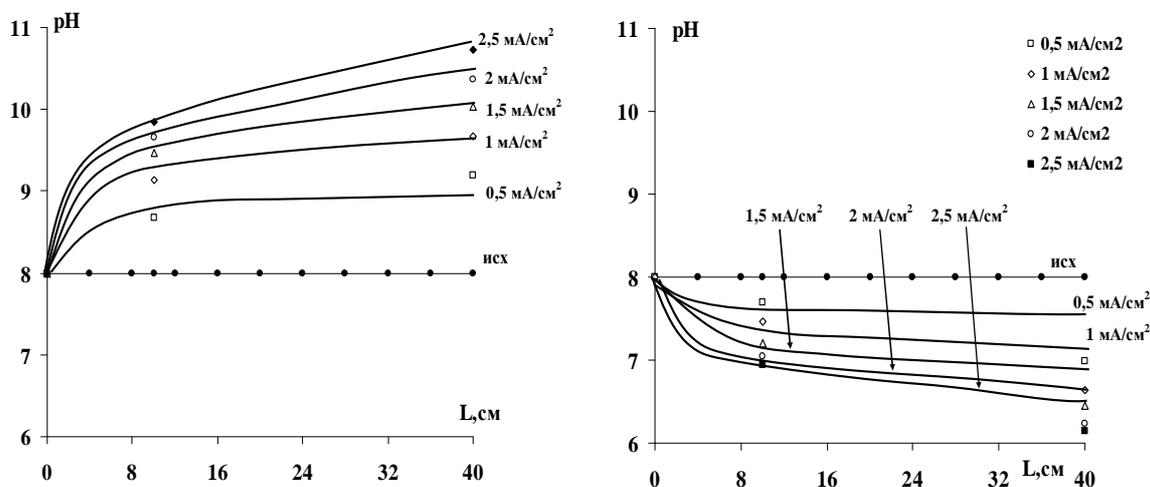


Рисунок 2 – Зависимость pH от плотности тока в щелочной (1) и кислотной (2) камерах ЭДС с длиной 4 дм при линейной скорости 2,5 см/с. Точки - экспериментальные данные, кривые - данные, рассчитанные по модели

На рисунках 3 и 4 представлены зависимости pH от длины канала. Теоретический расчёт показывает, что основное изменение pH раствора на выходе из кислотных и щелочных камерах происходит на начальном участке длиной до 10 см, что согласуется с экспериментальными данными (рис. 3).

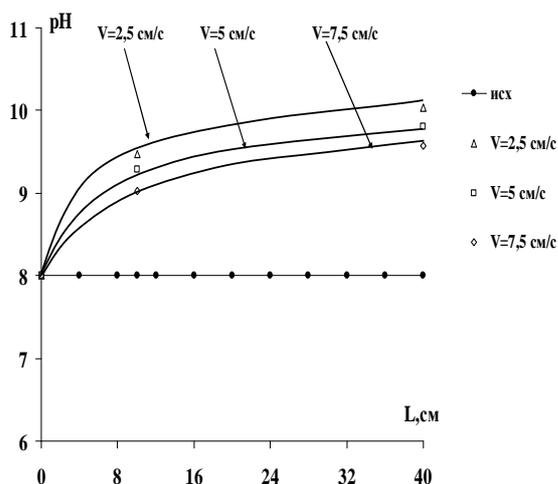


а

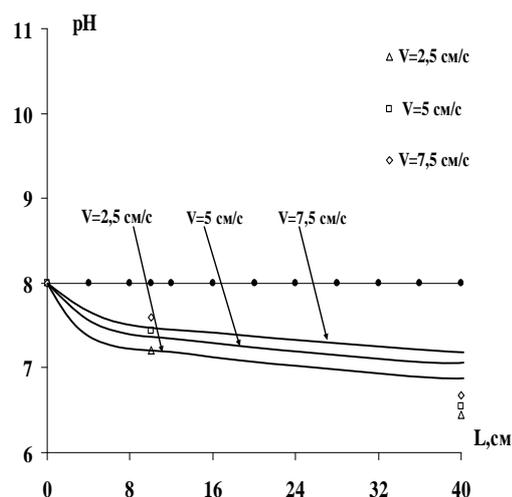
б

Рисунок 3 – Зависимость рН раствора на выходе из щелочной (а) и кислотной (б) камер электродиализатора с биполярными мембранами от длины канала при различных плотностях тока; Точки – экспериментальные значения, кривые – расчёт по модели

С увеличением линейной скорости протока раствора через камеры электродиализатора смещение рН раствора на выходе из камер от исходного значения менее значительно (рис. 4). При этом математическая модель хорошо описывает экспериментальные данные при различных скоростях протока раствора в щелочной камере. В кислотной камере на выходе канала 40 см экспериментальные значения находятся ниже расчётных. Это может быть обусловлено тем, что математическая модель использует равновесные соотношения, справедливые для разбавленных растворов в отсутствии тока, тогда как процесс ведётся в сильно неравновесных условиях, и необходимо учитывать коэффициенты активности.



а



б

Рисунок 4 – Зависимость рН раствора на выходе из щелочной (а) и

кислотной (б) камер электродиализатора с биполярными мембранами от длины канала при различных скоростях протока раствора; Точки – экспериментальные значения, кривые – расчёт по модели

Выводы

Разработана математическая модель ионных равновесий и создана программа для её реализации. Разработан метод решения совокупности уравнений равновесий и материальных балансов. Применение модели для обработки экспериментальных данных показало с одной стороны адекватность разработанной модели, с другой позволило выявить и дать вероятное объяснение некоторым расхождениям. Показано, что ионные равновесия в разбавленных многокомпонентных растворах электролитов могут быть удовлетворительно описаны простой моделью без применения для расчёта коэффициентов активности. Показано, что модель электродиализа многокомпонентных растворов, основанная на термодинамических уравнениях ионных равновесий, уравнениях материального баланса, кинетических уравнениях для расчёта чисел переноса и метода, заключающейся в разбиении каналов на участки, может быть применена для моделирования длинных каналов. При решении полученной системы уравнений используется метод Ньютона с выбором коэффициента шага и параметра регуляризации, обеспечивающей релаксационную сходимость вычислительного процесса [11]. Для ускорения сходимости также применялся метод распараллеливания, путём независимого решения уравнений в щелочной и кислотной камерах. Установлено, что данная модель адекватно описывает процесс электродиализной корректировки рН многокомпонентных растворов с учетом протекающих в них химических реакций в сверхпредельных токовых режимах при различной скорости течения раствора через каналы электродиализатора.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и администрации Краснодарского края №16-48-230433р_а

Литература

1. Никоненко В.В., Письменская Н.Д., Истошин А.Г., Заболоцкий В.И., Шудренко А.А. Обобщение и прогнозирование массообменных характеристик электродиализаторов в сверхпредельных токовых режимах с использованием принципов теории подобия и метода компартиментации // Электрохимия. 2007. Т.43. №9. С.1125-1136.
2. Zabolotsky V.I., Pismenskaya N.D., Laktionov E.V., Nikonenko V.V. Prediction of the behavior of long electro dialysis desalination channels through testing short channels // Desalination. 1996. V.107. P.245-250.
3. Nikonenko V.V., Pismenskaya N.D., Istoshin A.G., Zabolotsky V.I., Shudrenko A.A. Description of mass transfer characteristics of ED and EDI apparatuses by using the similarity theory and compartmentation method // Chemical Engineering and Processing. 2008. V.47. P.1118-1127.
4. Evangelista. F. A graphical method for the design of an electro dialysis stack // Desalination. 1987. V.64. P.353-365.
5. Evangelista. F. Improved graphical-analytical method for the design of reverse osmosis plants // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 1986. V. 25. P. 211-223.
6. Laktionov E.V., Pismenskaya N.D., Nikonenko V.V., Zabolotsky V.I. Method of electro dialysis stack testing with the feed solution concentration regulation // Desalination. 2002. V.151. P.101-116.
7. Заболоцкий В.И., Утин С. В., Лебедев К. А., Василенко П. А., Шельдешов Н. В. Исследование процесса коррекции рН разбавленных хлоридно-карбонатных растворов электролитов электродиализом с ионообменными мембранами // Электрохимия 2012. Т.48. №7. С.842-847.
8. Заболоцкий В. И., Мельников С. С., Демина Д. А. Прогнозирование массообменных характеристик промышленных электродиализаторов-концентраторов // Электрохимия. 2014. Т. 50, № 1. С.38-44.
9. Заболоцкий В.И., Утин С.В., Шельдешов Н.В., Лебедев К.А., Василенко П.А. Исследование процесса коррекции рН разбавленных растворов электролитов электродиализом с биполярными мембранами // Электрохимия. 2011. Т.47. №3. С.343-348.
10. Лебедев К.А., Никоненко Н.В., Заболоцкий В.И., Гнусин Н.П. Стационарная электродиффузия трёх сортов ионов через ионообменную мембрану // Электрохимия, 1986, Т. 22. № 5. С.638-643.
11. Лебедев К.А. Экологически частые электродиализные технологии. Математическое моделирование переноса ионов в многослойных мембранных системах. Краснодар. 2002. С. 1-141.

References

1. Nikonenko V.V., Pis'menskaja N.D., Istoshin A.G., Zabolockij V.I., Shudrenko A.A. Obobshhenie i prognozirovanie massoobmennyykh harakteristik jelektrodializatorov v sverhpredel'nyh tokovykh rezhimakh s ispol'zovaniem principov teorii podobija i metoda kompartmentacii // Jelektrohimija. 2007. T.43. №9. S.1125-1136.

2. Zabolotsky V.I., Pismenskaya N.D., Laktionov E.V., Nikonenko V.V. Prediction of the behavior of long electro dialysis desalination channels through testing short channels // Desalination. 1996. V.107. P.245-250.

3. Nikonenko V.V., Pismenskaya N.D., Istoshin A.G., Zabolotsky V.I., Shudrenko A.A. Description of mass transfer characteristics of ED and EDI apparatuses by using the similarity theory and compartmentation method // Chemical Engineering and Processing. 2008. V.47. P.1118-1127.

4. Evangelista. F. A graphical method for the design of an electro dialysis stack // Desalination. 1987. V.64. P.353-365.

5. Evangelista. F. Improved graphical-analytical method for the design of reverse osmosis plants // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 1986. V. 25. P. 211-223.

6. Laktionov E.V., Pismenskaya N.D., Nikonenko V.V., Zabolotsky V.I. Method of electro dialysis stack testing with the feed solution concentration regulation // Desalination. 2002. V.151. P.101-116.

7. Zabolockij V.I., Utin S. V., Lebedev K. A., Vasilenko P. A., Shel'deshov N. V. Issledovanie processa korrekcii rN razbavlenykh hlорidno-karbonatnykh rastvorov jelektrolitov jelektrodializom s ionoobmennymi membranami // Jelektrohimija 2012. T.48. №7. S.842-847.

8. Zabolockij V. I. , Mel'nikov S. S., Demina D. A. Prognozirovanie massoobmennыkh harakteristik promыshlennykh jelektrodializatorov–koncentratorov // Jelektrohimija. 2014. T. 50, № 1. S.38-44.

9. Zabolockij V.I., Utin S.V., Shel'deshov N.V., Lebedev K.A., Vasilenko P.A. Issledovanie processa korrekcii rN razbavlenykh rastvorov jelektrolitov jelektrodializom s bipolarnyimi membranami // Jelektrohimija. 2011. T.47. №3. S.343-348.

10. Lebedev K.A., Nikonenko N.V., Zabolockij V.I., Gnusin N.P. Stacionarnaja jelektrodiffuzija trjох sortov ionov cherez ionoobmennuju membranu // Jelektrohimija, 1986, T. 22. № 5. S.638-643.

11. Lebedev K.A. Jekologicheski chastye jelektrodializnyе tehnologii. Matematicheskoe modelirovanie perенosa ionov v mnogосlojnykh membrannykh sistemah. Krasnodar. 2002. S. 1-141.