ТЕХНОЛОГИЯ РЕДКИХ, РАССЕЯННЫХ И РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-3-37-43

УДК 519.876.6:004.942:544.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИФФУЗИОННОГО ТРАНСПОРТА ИОНОВ ХЛОРИДНОГО КОМПЛЕКСА РОДИЯ В КАТОДНОЙ КАМЕРЕ МЕМБРАННОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

MATHEMATICAL MODELLING FOR THE ELECTRO DIFFUSIVE TRANSPORT OF IONS OF THE CHLORIDE COMPLEX RHODIUM IN THE CATHODE CAMERA OF MEMBRANE ELECTROLYZER

Аринова Алиса Бейбитовна,
аспирант, e-mail: ab.arinova@mail.ru
Alisa B. Arinova,
postgraduate student

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634034, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin avenue, Tomsk, Russia, 634034

Аннотация:

При разработке конструкции электролизера с ионообменными мембранами возникла необходимость в построении математических моделей электродиффузионного транспорта ионов хлоридного комплекса родия в катодной камере с целью последующего прогнозирования процесса восстановления родия и оптимизации параметров технологического процесса с учетом полученных результатов моделирования. При построении математической модели переноса ионов хлоридного комплекса родия используются методы численного и математического моделирования. Для решения задачи построения математической модели использованы уравнения Нернста-Планка и Пуассона. Определена физическая область процесса электролиза родия в электролизере, подлежащая математическому моделированию, определен ионный состав процесса. Визуализация результатов исследования проведена с использованием программной среды моделирования научно-технических задач Comsol Multiphysics. В результате исследования разработана математическая модель процесса стационарного массопереноса хлоридного комплекса родия в катодной камере мембранного электролизера через границу раздела фаз «ионообменная мембрана – раствор». Построены концентрационные профили катиона H^+, анионов $RhCl_6^{3-}$, Cl^- и плотности пространственного заряда в диффузионном слое у поверхности катионообменной мембраны при различных значениях падения потенциала электрического поля (0,05 В; 0,1 В; 0,3 В) в электролизере.

Ключевые слова: *математическое моделирование; уравнения Нернста-Планка и Пуассона; электролизер; катионообменная мембрана; хлоридный комплекс родия.*

Abstract:

The necessity appears to build mathematical models of the electro diffusive transport of ions of chloride complex rhodium in a cathode camera when designing an electrolyzer with ion-exchange membranes in order to further predict the rhodium recovery process and optimize the process parameters taking into account the simulation results. Methods of numerical and mathematical modeling are used to build a mathematical model for the transport of ions of the chloride complex rhodium. The Nernst-Planck's and Poisson's equations were used to solve the problem of constructing a mathematical model. The physical area of the rhodium electrolysis process in the electrolyzer was determined to be mathematically modeled; the ionic composition of the process was determined. The visualization of the research results was carried out using the Comsol Multiphysics software for modeling scientific and technical problems. As a result of the study, a mathematical model has been developed for the stationary mass transfer of the rhodium chloride complex in the cathode chamber of a membrane electrolyzer

through the "ion-exchange membrane – solution" phase interface. Concentration profiles of a cation of H^+, anions $RhCl_6^{3-}$, Cl^-, and density of a spatial charge in a diffusive layer at a surface of a cation-exchange membrane was constructed at various values of falling of potential electric fields (0.05 V; 0.1 V; 0.3 V) in the electrolyzer.

Key words: *mathematical modeling; Nernst-Planck's and Poisson's equationcs; electrolyzer; cation-exchange membrane; chloride complex of rhodium.*

Введение

Мембраны и мембранные системы относится к приоритетным направлениям развития науки и все шире используются в различных отраслях промышленности для разделения смесей [1-3]. Переход от традиционной технологии электрохимического восстановления родия к мембранной технологии позволяет улучшить технические характеристики процесса и осажденного родия.

При разработке конструкции мембранного электролизера возникает необходимость в построении математических моделей процессов с целью оптимизации технологического процесса восстановления родия, конструкции мембранного электролизера и основных параметров процесса. В жидкофазных мембранных системах возникает движущая сила ионного разделения, являющаяся результатом взаимодействий собственных ионов в рабочем растворе. Движущая сила ионного разделения гораздо больше силы, обусловленной только градиентом концентраций. Это дает возможность осуществления «перекачивание» ионов из разбавленного раствора в раствор с высокой концентрацией выделяемого вещества. Однако такое разделение ограниченно принципом Доннановского равновесия. Поэтому становится невозможным выделение ионов, превышающее равновесную концентрацию [4,5].

Математическое моделирование явлений переноса является одним из важных аспектов, эффективно содействующим прогрессу в области мембранной технологии. Математическое моделирование дает возможность глубже понять механизм массопереноса и необходимо для инженерных расчетов [6,7].

Математическое моделирование стационарного массопереноса хлоридного комплекса родия в катодной камере мембранного электролизера

Моделируемая система представляет собой область диффузионного слоя раствора хлоридного комплекса родия у поверхности мембраны катионообменной (МК). Толщина диффузионного слоя может меняться от x = 0 до δ', где x – это координата по оси, перпендикулярная к плоскости мембраны, а δ' – межфазная граница с МК.

Уравнение Нернста-Планка [11] описывает плотность потока растворимых компонентов для одномерного массопереноса вдоль оси, обусловленного их миграцией в электрическом поле, диффузией и конвекцией.

Математическая модель массопереноса хлоридного комплекса родия без предположения об электронейтральности имеет вид

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = -div\left(-\frac{F}{RT} z_1 D_1 C_1 \nabla\varphi - D_1 \nabla C_1 + C_1 v\right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = -div\left(-\frac{F}{RT} z_2 D_2 C_2 \nabla\varphi - D_2 \nabla C_2 + C_2 v\right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = -div\left(-\frac{F}{RT} z_3 D_3 C_3 \nabla\varphi - D_3 \nabla C_3 + C_3 v\right), \quad (3)$$

$$\Delta\varphi = -\frac{F}{\varepsilon} \sum_{i=1}^{3} z_i C_i , \quad (4)$$

где C_1 – концентрация катионов H^+; C_2 – концентрация анионов $RhCl_6^{3-}$; C_3 – концентрация анионов Cl^-; D_1, D_2, D_3 – коэффициенты диффузии анионов и катионов; z_1, z_2, z_3 – зарядовые числа катионов и анионов; ε – диэлектрическая проницаемость электролита; ∇φ – градиент потенциала электрического поля; φ – потенциал электрического поля; t – время; F – постоянная Фарадея; T – абсолютная температура; R – универсальная газовая постоянная; v – скорость течения электролита; ∇C_i - градиент концентрации частицы i.

Конвективную электродиффузию катионов H^+ и анионов $RhCl_6^{3-}$, Cl^- описывают уравнения Нернста-Планка (1) – (3). Уравнение (4) – это уравнение Пуассона для потенциала электрического поля [12-14].

В данной работе разработана одномерная модель стационарного массопереноса хлоридного комплекса родия. Математическая модель массопереноса процесса восстановления родия в мембранном электролизере при допущении $v=0$ принимает вид

$$\frac{d}{dx}\left(-\frac{z_1 F}{RT} C_1 \frac{\partial\varphi}{\partial x} - \frac{\partial C_1}{\partial x}\right) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d}{dx}\left(-\frac{z_2 F}{RT} C_2 \frac{\partial\varphi}{\partial x} - \frac{\partial C_2}{\partial x}\right) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{d}{dx}\left(-\frac{z_3 F}{RT} C_3 \frac{\partial\varphi}{\partial x} - \frac{\partial C_3}{\partial x}\right) = 0, \quad (7)$$

$$\Delta\varphi = -\frac{F}{\varepsilon}(z_1 C_1 + z_2 C_2 + z_3 C_3), \quad (8)$$

где z_1 – зарядовое число катионов H^+, z_2 – зарядовое число анионов $RhCl_6^{3-}$, z_3 – зарядовое число анионов Cl^-; C_1 – концентрация катионов H^+, C_2 – концентрация анионов $RhCl_6^{3-}$, C_3 –

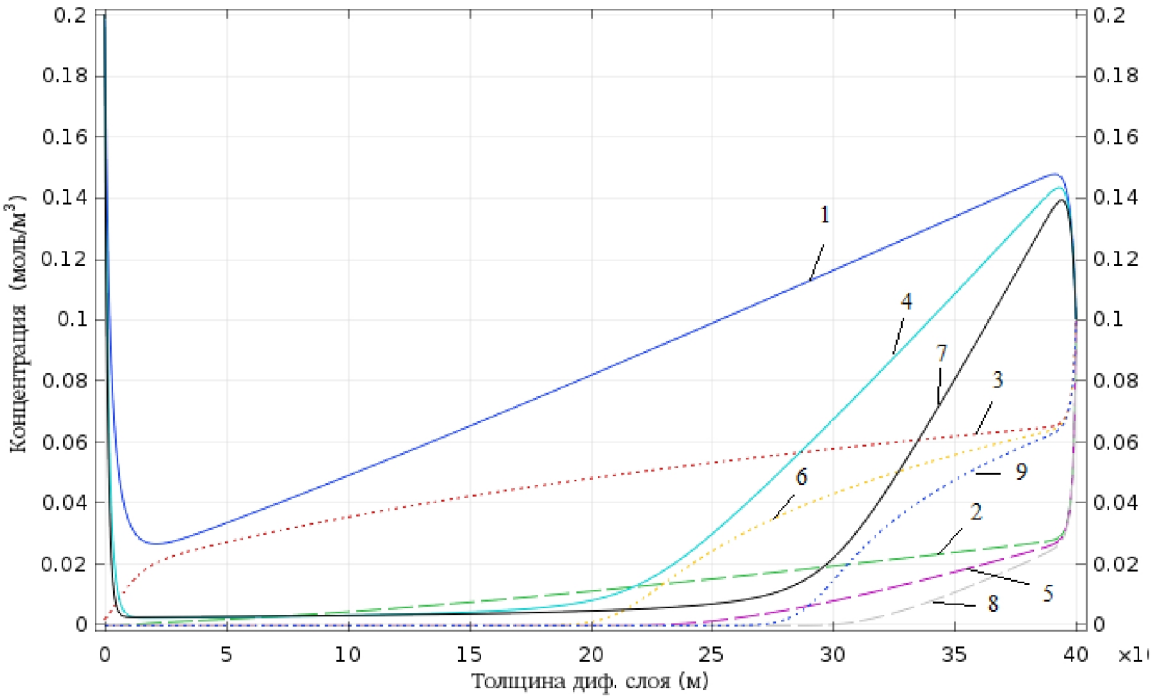


Рис. 1. Концентрации ионов, рассчитанные при различных значениях разности потенциалов: 1 – концентрация катионов H^+ при 0,05 В; 2 – концентрация анионов $RhCl_6^{3-}$ при 0,05 В; 3 – концентрация анионов Cl^- при 0,05 В; 4 – концентрация катионов H^+ при 0,1 В; 5 – концентрация анионов $RhCl_6^{3-}$ при 0,1 В; 6 – концентрация анионов Cl^- при 0,1 В; 7 – концентрация катионов H^+ при 0,3 В; 8 – концентрация анионов $RhCl_6^{3-}$ при 0,3 В; 9 – концентрация анионов Cl^- при 0,3 В

Fig. 1. Ion concentration, calculated for different values of the potential difference: 1 – cation concentration H^+ for 0,05 V; 2 – anion concentration $RhCl_6^{3-}$ for 0,05 V; 3 – anion concentration Cl^- for 0,05 V; 4 – cation concentration H^+ for 0,1 V; 5 – anion concentration $RhCl_6^{3-}$ for 0,1 V; 6 – anion concentration Cl^- for 0,1 V; 7 – cation concentration H^+ for 0,3 V; 8 – anion concentration $RhCl_6^{3-}$ for 0,3 V; 9 – anion concentration Cl^- for 0,3 V

концентрация анионов Cl^-.

На внешней границе диффузионного слоя (x=0) предположительно выполняется условие электронейтральности $(z_1C_1 + z_2C_2 + z_3C_3) = 0$ и задана концентрация электролита C_0. Тогда известна концентрация катионов и анионов.

На поверхности МК x=0, $y \epsilon [0,\delta]$ принимаем граничную концентрацию катионов равной фиксированному заряду внутри мембраны. Тогда из (5) получаем

$$C_1|_{x=0} = p_1, C_1|_{x=\delta} = C_0, \quad (9)$$

где p_1 – концентрация электролита на границе «катионнообменная мембрана – раствор».

Предположим, что мембрана непроницаема для анионов, то есть идеально селективна. Тогда из (6) и (7) получаем

$$\left(-\frac{z_2F}{RT}C_2\frac{\partial\varphi}{\partial x} - \frac{\partial C_2}{\partial x}\right)\Big|_{x=0} = 0, \quad (10)$$

$$C_2|_{x=\delta} = C_0;$$

$$\left(-\frac{z_3F}{RT}C_3\frac{\partial\varphi}{\partial x} - \frac{\partial C_3}{\partial x}\right)\Big|_{x=0} = 0, \quad (11)$$

$$C_3|_{x=\delta} = C_0.$$

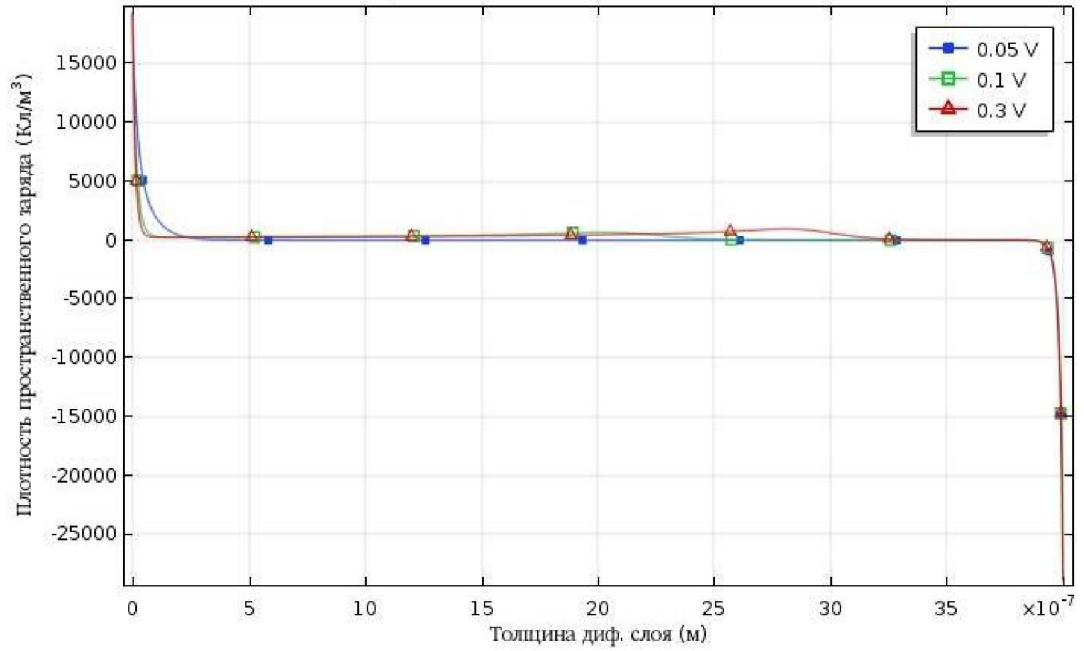
Система уравнений (5) – (8) включает потенциал электрического поля в форме производных по координате, значит существенным является только падение потенциала. Принимаем

$$\varphi|_{x=0} = -V, \varphi|_{x=\delta} = 0,$$
(12)

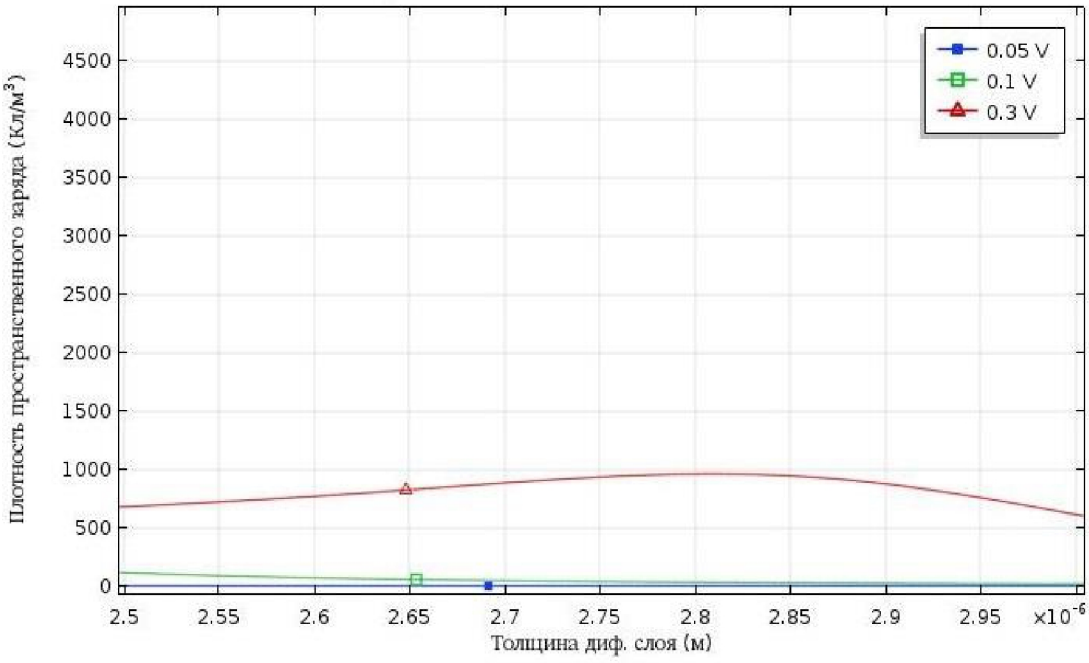
где V – падение потенциала в диффузионном слое.

На рис. 1 представлена графическая визуализация математической модели (9) – (12), разработанная в COMSOL Multiphysics. Смоделирован возможный характер распределения концентраций ионов H^+, $RhCl_6^{3-}$, Cl^- в диффузионом слое ($0 \le x < \delta$').

Повышение концентрационной поляризации приводит к увеличению толщины диффузионного слоя, это происходит из-за увеличения напряжения на электродах при постоянной скорости прокачки



а)



б)

Рис. 2. Зависимость плотности пространственного заряда для хлоридного комплекса родия от толщины диффузионного слоя а) плотность пространственного заряда при значениях падения потенциала 0,05 В; 0,1 В; 0,3 В с учетом минусовых значений пространственного заряда; б) увеличение масштаба графика для положительной области зарядов

Fig. 2. Dependence of a spatial charge density for the chloride complex rhodium from thickness of a diffusive layer a) a spatial charge density for values of falling of potential 0.05 V; 0.1 V; 0.3 V taking into account minus values of a spatial charge; b) scaling up the graph for a positive charge range

раствора [18,19]. График свидетельствует о том, что при увеличении напряжения на электродах происходит интенсификация массопереноса ионов в диффузионном слое.

Для анализа результатов расчетов при последовательности значений падений потенциала V = 0,05 В; 0,1 В; 0,3 В полученные концентрации ионов показаны на одном графике (рис. 1).

Распределение плотности пространственного заряда [15-17] при различных значениях падения потенциала в диффузионном слое определяется

$$\rho = F \cdot (z_1 C_1 + z_2 C_2 + z_3 C_3). \quad (13)$$

Модель позволяет рассчитать распределение плотности пространственного заряда в диффузионном слое раствора. На рис. 2 представлен результат моделирования распределения, и показано, что с увеличением падения потенциала в диффузионном слое локальный максимум плотности пространственного заряда увеличивается и отдаляется от поверхности мембраны. Затем величина плотности пространственного заряда резко падает, что происходит вследствие уменьшения концентрации электролита у поверхности МК в растворе по длине секции. Показано распределение плотности пространственного заряда для хлоридного комплекса родия при значениях падения потенциала 0,05 В; 0,1 В; 0,3 В в диффузионном слое. График изменения потенциала поля показывает, что при переходе через мембрану возникают кинетические затруднения, приводящие к увеличению потенциала, а, следовательно, и напряжения на электролизной ячейке.

Заключение

Результаты моделирования сравнивались с результатами моделирования и поведением бинарных систем в диффузионном слое. На основе сравнения сделаны выводы, что разработанная математическая модель массопереноса родиевого хлоридного электролита в мембранном электролизере позволяет прогнозировать степень извлечения родия. В результате математического моделирования получены концентрационные профили раствора хлоридного комплекса родия в диффузионном слое, позволяющие судить о достижении предельных режимов разделения. Математическая модель дает возможность спрогнозировать и рассчитать концентрационные профили ионов хлоридного комплекса родия в диффузионном слое, в свою очередь это применимо при оценке степени концентрационной поляризации на границе «раствор – мембрана». По профилю концентраций ионов хлоридного комплекса родия можно судить о влиянии таких параметров как напряжение на электродах, начальная концентрация компонентов раствора на величину диффузионного слоя, объемный расход растворов. Величина плотности объемного пространственного заряда позволяет сделать вывод об объемной плотности тока и рассчитать материальный баланс процесса [20-22]. Таким образом, предложенная математическая модель процесса массопереноса ионов в диффузионном слое может быть использована для разработки методики материального расчета промышленного мембранного электролизера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко А.В., Бостанов Р.А., Лайпанова З.М., Уртенов М.Х. Моделирование гальванодинамического режима для одномерного нестационарного бинарного электролита // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12–2. – С. 273–277.

2. Письменский А.В., Коваленко А.В., Уртенов М.Х. Моделирование и экспериментальное гравитационной конвекции в электромембранной ячейке // Электрохимия. – 2012. – Т. 48. – С. 830–840.

3. Узденова А.М., Уртенов М. Х. Косвенный метод математического моделирования гальванодинамического режима массопереноса в диффузионном слое у ионообменной мембраны // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 9–1. – С. 105–111.

4. Бурчу М.П. Извлечение сульфата натрия из раствора мономера в электромембранном аппарате: автореф. дис. …канд. техн. наук. – Иваново, 2015. – 22 с.

5. Permikin D.V., Zverev V.S. Mathematical model on surface reaction diffusion in the presence of front chemical reaction // International journal of heat and mass transfer. – 2013. – V. 57. – № 1. – P. 215–221.

6. Shobunkov A.V., Maximos D.S. Exact steady state solution in symmetrical Nernst–Plank–Poisson electrodiffusive models // Journal of mathematical chemistry. – 2014. – V. 52. – № 5. – P. 1338–1349.

7. Newman J. The polarized diffuse double layer // Trans. Faraday Soc. – 1965. – V. 61. – № 10. – P. 2229–2237.

8. Промышленный мембранный электролиз / А.Ф. Мазданко, Г.М. Камарьян, О.П. Ромашин. – М.: Химия, 1989. – 204 с.

9. Афзалетдинова Н.Г., Муринов Ю.И. Электроэкстракция родия (III) из растворов хлористоводородной кислоты сульфоксидами // Журнал неорг. химиии. – 2011. – Т. 56. - № 7. – С. 1212 – 1221.

10. Аринова А.Б. Разработка новой технологии электрохимического восстановления родия без выделения газообразного хлора // Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация:

Материалы международной научно–практической конференции. – Санкт–Петербург: СПБ НИЦ МС, 2019. – №2. – С. 93–96.

11. Заболоцкий В.И., Никоненко В.В. Перенос ионов в мембранах. – М.: Наука, 1996. – 392 с.

12. Rubinstein I., Zaltzman B., Lerman I. Electroconvective instability in concentration polarization and nonequilibrium electro–osmotic slip // Physical review E. – 2005. – V. 72, 011505. – P. 1–19.

13. Nagy E., Borbely G. Mass transport through anisotropic membrane layer // Desalination. – 2009. – V. 240. – № 1–3. – P. 54–63.

14. Mishchuk N. Concentration polarization of interface and non–linear electrokinetic phenomena // Adv. Colloid. Interface Sci. – 2010. – V. 160. – № 1–2. – P. 16–39.

15. Коваленко А.В., Узденова А.М., Уртенов М.Х., Никоненко В.В. Математическое моделирование физико-химических процессов в среде COMSOL Multiphysics 5.2. Спб.: Издательство «Лань», 2017. – 228 с.

16. Gardner Carl L., Nonner Wolfgang, Eisenberg Robert S. Electrodiffusion model simulation of ionic channels: 1D simulation // Journal of computational electronics. – 2004. – V. 3. – № 1. – P. 25–31.

17. Butylskii D.Y., Mareev S.A., Pismenskaya N.D., Nikonenko V.V., Apel P.Y., Polezhaeva O.A. Phenomenon of two transition time in chronopotentiometry of electrically inhomogeneous ion exchange membranes // Electrochimica Acta. – 2018. – V. 273. – P. 289–299.

18. Рыбалкина О.А., Мельникова Е.Д., Письменский А.В. Влияние Гравитационной конвекции на вольтамперные характеристики электромембранного пакета в растворе дигидрофосфата натрия // Мембраны и мембранные технологии. – 2018. – Т. 8. - № 1. – С. 15–23.

19. Nagy E. Mass transfer through a convection flow catalytic membrane layer with dispersed nanometer–sized catalyst // Industrial and engineering chemistry research. – 2010. – V. 49. – № 3. – P. 1057–1062.

20. Zabolotskii V.I., Sharafan M.V., Shel'deshov N.V. The dissociation rate of water molecules in systems with cation– and anion–exchange membranes // Russian Journal of Electrochemistry. – 2012. – V. 48. – № 5. – P. 550–555.

21. Zourmand Z., Faridirad F., Kasiri N., Mohammadi T. Mass transfer modeling of desalination through an electrodialysis cell // Desalination. – 2015. – V. 359. – P. 41–51.

22. Drljaca A., Hardie M., Ness T., Raston C. Rhodium aqua ion salts of ambivalent self-assembled superanion capsules // Eur. J. Inorg. Chem. – 2000. – № 10. – P. 2221–2229.

REFERENCES

1. Kovalenko A.V., Bostanov R.A., Laypanova Z.M., Urtenov M.Kh. Simulation of galvan dynamic mode for one–dimensional nonstationary transfer binary electrolyte. Fundamental research, 2015, no. 12–2, pp. 273–277. In Rus.

2. Pismenskiy A.V., Kovalenko A.V., Urtenov M.Kh. Modeling and experimental gravitational convection in an electromembrane cell. Russian Journal of Electrochemistry, 2012, vol. 48, pp. 830–840. In Rus.

3. Uzdenova A.M., Urtenov M. Kh. Indirect method of mathematical modeling of mass transfer in the diffusion layer at ion–exchange membrane for the galvanodynamic mode. Fundamental research, 2017, no. 9–1, pp. 105–111. In Rus.

4. Burchu M.P. Izvlecheniye sulfata natriya iz rastvora monomera v elektromembrannom apparate. Avtoref. Kand. nauk [Sodium sulfate extraction from monomer solution in the electromembrane device. Dr. Diss. Abstract]. Ivanovo, 2015. 22 p.

5. Permikin D.V., Zverev V.S. Mathematical model on surface reaction diffusion in the presence of front chemical reaction. International journal of heat and mass transfer, 2013, vol. 57, no. 1, pp. 215–221.

6. Shobunkov A.V., Maximos D.S. Exact steady state solution in symmetrical Nernst–Plank–Poisson electrodiffusive models. Journal of mathematical chemistry, 2014, vol. 52, no. 5, pp. 1338–1349.

7. Newman J. The polarized diffuse double layer. Trans. Faraday Soc., 1965, vol. 61, pp. 2229–2237.

8. Mazdanko A.F., Kamarian G.M., Romashin O.P. Promyshlennyy membrannyy elektroliz [Industrial membrane electrolysis]. Moscow, Chemistry Publ., 1989. 240 p.

9. Afzaletdinova N.G., Murinov Yu.I. Extraction of rhodium (III) with sulfoxides from hydrochloric acid

solutions. Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2011, vol. 56, no. 7, pp. 1143–1152. In Rus.

10. Arinova A.B. Razrabotka novoy tekhnologii elektrokhimicheskogo vosstanovleniya rodiya bez vydeleniya gazoobraznogo [Development of new technology of electrochemical restoration of rhodium without release of gaseous chlorine]. Mashiny. agregaty i protsessy. Proyektirovaniye. sozdaniye i modernizatsiya: Materialy mezhdunarodnoy nauchno–prakticheskoy konferentsii [Machines, units and processes. Design, creation and modernization: Materials of the international scientific and practical conference]. St. Petersburg, 2019, no. 2, pp. 93–96.

11. Zabolotskiy V.I., Nikonenko V.V. Perenos ionov v membranakh [Transfer of ions in membranes]. Moscow, Nauka Publ., 1996. 392 p.

12. Rubinstein I., Zaltzman B., Lerman I. Electroconvective instability in concentration polarization and nonequilibrium electro–osmotic slip. Physical review E., 2005, vol. 72, 011505, pp. 1–19.

13. Nagy E., Borbely G. Mass transport through anisotropic membrane layer. Desalination, 2009, vol. 240, no. 1–3, pp. 54–63.

14. Mishchuk N. Concentration polarization of interface and non–linear electrokinetic phenomena. Adv. Colloid. Interface Sci., 2010, vol. 160, no. 1–2, pp. 16–39.

15. Kovalenko A.V.. Uzdenova A.M.. Urtenov M.Kh.. Nikonenko V.V. Matematicheskoye modelirovaniye fiziko-khimicheskikh protsessov v srede COMSOL Multiphysics 5.2 [Mathematical modeling of physical and chemical processes in the environment of COMSOL Multiphysics 5.2]. St. Petersburg, Lan Publ., 2017. 228 p.

16. Gardner Carl L., Nonner Wolfgang, Eisenberg Robert S. Electrodiffusion model simulation of ionic channels: 1D simulation. Journal of computational electronics, 2004, vol. 3, no. 1, pp. 25–31.

17. Butylskii D.Y., Mareev S.A., Pismenskaya N.D., Nikonenko V.V., Apel P.Y., Polezhaeva O.A. Phenomenon of two transition time in chronopotentiometry of electrically inhomogeneous ion exchange membranes. Electrochimica Acta, 2018, vol. 273, pp. 289–299.

18. Rubalkina O.A., Melnikova E.D., Pismenskii A.V. Of gravitational convection influence on current–voltage characteristics of the electromembrane package in Monosodium Phosphate Solution. Membranes and membrane technologies, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 15–23. In Rus.

19. Nagy E. Mass transfer through a convection flow catalytic membrane layer with dispersed nanometer–sized catalyst. Industrial and engineering chemistry research, 2010, vol. 49, no. 3, pp. 1057–1062.

20. Zabolotskii V.I., Sharafan M.V., Shel'deshov N.V. The dissociation rate of water molecules in systems with cation– and anion–exchange membranes. Russian Journal of Electrochemistry, 2012, vol. 48, no. 5, pp. 550–555.

21. Zourmand Z., Faridirad F., Kasiri N., Mohammadi T. Mass transfer modeling of desalination through an electrodialysis cell. Desalination, 2015, vol. 359, pp. 41–51.

22. Drljaca A., Hardie M., Ness T., Raston C. Rhodium aqua ion salts of ambivalent self-assembled superanion capsules. Eur. J. Inorg. Chem, 2000, no. 10, pp. 2221–2229.

Поступило в редакцию 22.04.2019
Received 22 April 2019