

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ МЕМБРАННОЙ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ОТ СУЛЬФАТА МЕДИ И ТРИНАТРИЙФОСФАТА

© 2019 г. **О.А. Абоносимов, С.И. Лазарев, С.И. Котенев, И.В. Селиванов, К.К. Полянский**

Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ)

Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова

Статья поступила в редакцию 06.03.18 г., доработана 26.04.18 г., подписана в печать 04.05.18 г.

Рассмотрены возможности практического применения электрохимического мембранного метода в процессе очистки технологических вод от сульфата меди и тринатрийфосфата. Объектами исследования были технологические растворы, содержащие сульфат меди и тринатрийфосфат, и полупроницаемые мембраны полимерного вида с различными селективно-проницаемыми характеристиками. Изучено влияние трансмембранных параметров проведения электрохимического процесса разделения на основные кинетические характеристики мембран МГА-95П и ОПМ-К при очистке технологических вод медеплавильного производства. Получены аппроксимационные выражения для расчета коэффициента задержания мембраны в зависимости от физико-химической основы полимера полупроницаемой мембраны, величины трансмембранного давления, концентрации и температуры технологического раствора. Определены эмпирические коэффициенты, позволяющие рассчитывать и прогнозировать значения коэффициента задержания, которые могут быть использованы в проектировании лабораторных, пилотных и промышленных установок, применяемых в производственных процессах разделения, очистки и концентрирования технологических и сточных вод. Разработана математическая модель массопереноса электрохимического мембранного разделения с учетом принятых допущений на основе решений уравнений Нернста—Планка и Пуассона—Больцмана, позволяющая физически описать процесс и рассчитать поля концентраций в межмембранном канале и изменения концентраций в трактах пермеата и ретентата. Проведена проверка адекватности математической модели путем сравнения экспериментальных данных по коэффициенту задержания с его теоретическими значениями. Расхождение между ними оказалось в пределах ошибки эксперимента и погрешности расчетных величин.

Ключевые слова: кинетические зависимости, мембрана, разделение, электрохимический аппарат.

Абоносимов О.А. — докт. техн. наук, доцент кафедры прикладной геометрии и компьютерной графики ТГТУ (392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106). E-mail: abontam@inbox.ru.

Лазарев С.И. - докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой прикладной геометрии и компьютерной графики ТГТУ. E-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru.

Котенев С.И. — магистрант кафедры прикладной геометрии и компьютерной графики ТГТУ. E-mail: kotenev.igor@yandex.ru.

Селиванов И.В. — соискатель кафедры прикладной геометрии и компьютерной графики ТГТУ. E-mail: selivanov@transstal.ru.

Полянский К.К. — докт. техн. наук, профессор кафедры коммерции и товароведения Воронежского филиала Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова (394030, г. Воронеж, ул. Карла Маркса, 67А). E-mail: tovar201@list.ru.

Для цитирования: Абоносимов О.А., Лазарев С.И., Котенев С.И., Селиванов И.В., Полянский К.К. Эффективность электрохимической мембранной очистки технологических растворов от сульфата меди и тринатрийфосфата. *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2019. No. 1. С. 75–81. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-75-81.

Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Kotenev S.I., Selivanov I.V., Polyanskiy K.K.

Efficiency of electrochemical membrane cleaning of process solutions from copper sulphate and trisodium phosphate

The paper considers the potential practical application of an electrochemical membrane method in the process of copper sulfate and trisodium phosphate removal from industrial water. The research objects were process solutions containing copper sulfate and trisodium phosphate and semipermeable polymeric membranes with various selective permeability characteristics. The study covers the effect that the transmembrane parameters of electromembrane separation have on the main kinetic characteristics of MGA-95P and OPM-K membranes in the process of copper smelting production water treatment. Approximation expressions were obtained to calculate membrane rejection rate depending on the physicochemical basis of the semipermeable membrane polymer, transmembrane pressure as well as process solution concentration and temperature. Empirical coefficients were determined to calculate and predict rejection

rate values that can be used in the design of laboratory, pilot and industrial units used in the separation, treatment and concentration of industrial and waste water. The mathematical model of mass transfer was developed for electrochemical membrane separation taking into account assumptions made based on the solutions of the Nernst–Planck and Poisson–Boltzmann equations. This model allows for process physical description and calculations of concentration fields in the intermembrane channel and concentration changes in permeate and retentate lines. The mathematical model was checked for adequacy by comparing experimental data on retention rate with theoretical values where discrepancies between the experimental and theoretical data were within the limits of the experimental error and the error of calculated values.

Keywords: kinetic dependencies, membrane, separation, electromembrane apparatus.

Abonosimov O.A. – Dr. Sci. (Tech.), associate prof., Department of applied geometry and computer graphics, Tambov State Technical University (TSTU) (392000, Russia, Tambov, Sovetskaya str., 106).
E-mail: abontam@inbox.ru.

Lazarev S.I. – Dr. Sci. (Tech.), prof., head of the Department of applied geometry and computer graphics, TSTU.
E-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru.

Kotenev S.I. – postgraduate student of the Department of applied geometry and computer graphics, TSTU.
E-mail: kotenev.igor@yandex.ru.

Selivanov I.V. – applicant of the Department of applied geometry and computer graphics, TSTU. E-mail: selivanov@transstal.ru.

Polyanskiy K.K. – Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of commerce and commodity science, Voronezh Branch of the Russian Economic University n.a. G.V. Plekhanov (394030, Russia, Voronezh, Karl Marx str., 67A). E-mail: tovar201@list.ru.

Citation: *Abonosimov O.A., Lazarev S.I., Kotenev S.I., Selivanov I.V., Polyanskiy K.K.* Efficiency of electrochemical membrane cleaning of process solutions from copper sulphate and trisodium phosphate. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 1. P. 75–81 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-1-75-81.

Введение

Отечественные предприятия цветной металлургии ежедневно используют воду в объеме 8–10 млн м³, и в результате образуются сточные воды, содержащие токсичные загрязняющие вещества — ионы тяжелых металлов, фосфаты, различные органические реагенты.

Современные требования к сбросу промышленных сточных вод обуславливают поиск и разработку более эффективных решений в области их очистки [1, 2]. Наиболее рациональный путь для достижения этих целей — создание локальной системы очистки с возможностью извлечения ценных компонентов и применения очищенных вод в оборотном цикле [3–5].

Наибольший успех в отношении эффективности и технологичности выделения цветных металлов из сточных вод достигнут при использовании методов мембранного разделения, в частности обратного осмоса, ультрафильтрации и электрохимических мембранных процессов [6–11]. Для расчета процесса электрохимического мембранного разделения необходимо иметь экспериментальные данные по кинетическим параметрам и характеристикам процесса. Одними из основных показателей, характеризующих эффективность процесса при электрохимическом мембранном разлении, являются выходная удельная производительность и коэффициент задержания мембраны [6].

Цель настоящей работы состояла в исследовании эффективности электрохимической мембранной очистки технологических растворов от сульфата меди и тринатрийфосфата.

Методика эксперимента

Для исследования использовалась лабораторная электрохимическая мембранная установка, схема которой и методика проведения эксперимента подробно рассмотрены в работе [12]. При изучении кинетических характеристик процесса электрохимического мембранного разделения применялись отечественные мембраны — ацетатцеллюлозная МГА-95П и полиамидная ОПМ-К, промышленно выпускаемые ЗАО НТЦ «Владипор» (г. Владимир). При выборе мембран учитывалось наиболее оптимальное соотношение удельной производительности и задерживающей способности, обеспечивающее требования к качеству пермеата.

В качестве объектов для проведения экспериментов служили модельные растворы, имитирующие технологические воды Среднеуральского медеплавильного завода [13]. Для их приготовления использовались сульфат меди и тринатрийфосфат (табл. 1), являющиеся основными компонентами технологических вод.

Таблица 1
Основные характеристики модельных растворов

Вещество	Хим. формула	Концентрация, кг/м ³	Температура, °С
Сульфат меди	CuSO ₄	0,02–0,06	5–20
Тринарийфосфат	Na ₃ PO ₄	0,5–2,0	5–20

По данным, полученным в ходе рабочих опытов, определяли коэффициент задержания мембраны по формуле

$$R = 1 - c_{\text{п}}/c_{\text{исх}}, \quad (1)$$

где $c_{\text{п}}$ и $c_{\text{исх}}$ — концентрации растворенного вещества в пермеате и исходном растворе соответственно.

Выходной удельный поток растворителя рассчитывали по следующему уравнению:

$$J = \frac{V_{\text{п}}}{S_{\text{м}} \tau}, \quad (2)$$

где $V_{\text{п}}$ — объем пермеата, м³; $S_{\text{м}}$ — рабочая площадь мембраны, м²; τ — время проведения эксперимента, с.

Результаты и их обсуждение

Коэффициент задержания мембраны (R) и выходной удельный поток растворителя (J) находятся в определенной зависимости от материала мембран, природы растворенных веществ и их концентраций в исходном растворе, а также от давления, при котором происходит процесс разделения, и плотности тока [14–16].

Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты по влиянию этих параметров на величину R при электрохимическом мембранном разделении водных растворов меди и тринатрийфосфата представлены на рис. 1 и 2. Из приведенных данных следует, что при увеличении выходного удельного потока растворителя

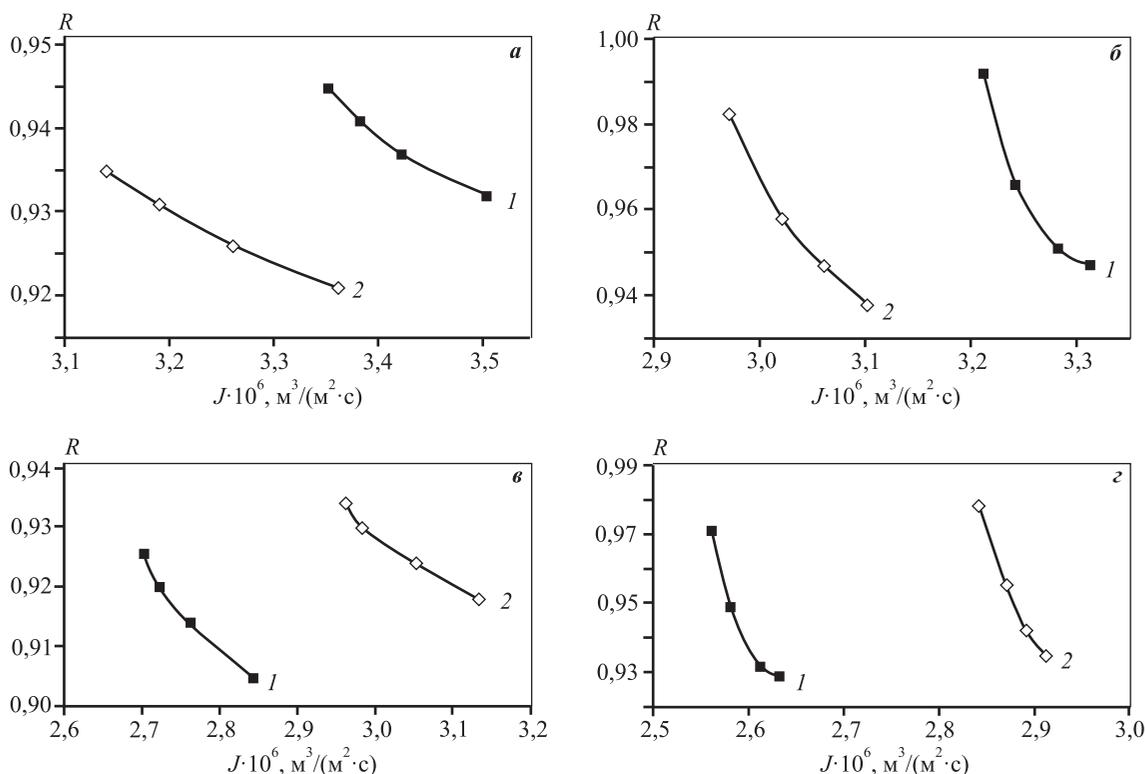


Рис. 1. Зависимости коэффициента задержания от выходного удельного потока растворителя прикатодной (а, в) и прианодной (б, г) мембран МГА-95П для растворов сульфата меди (а, б) и тринатрийфосфата (в, г)

а, б — $c_{\text{исх}} = 0,02 \text{ кг/м}^3$ (1) и $0,03 \text{ кг/м}^3$ (2)

в, г — $c_{\text{исх}} = 1,0 \text{ кг/м}^3$ (1) и $0,5 \text{ кг/м}^3$ (2)

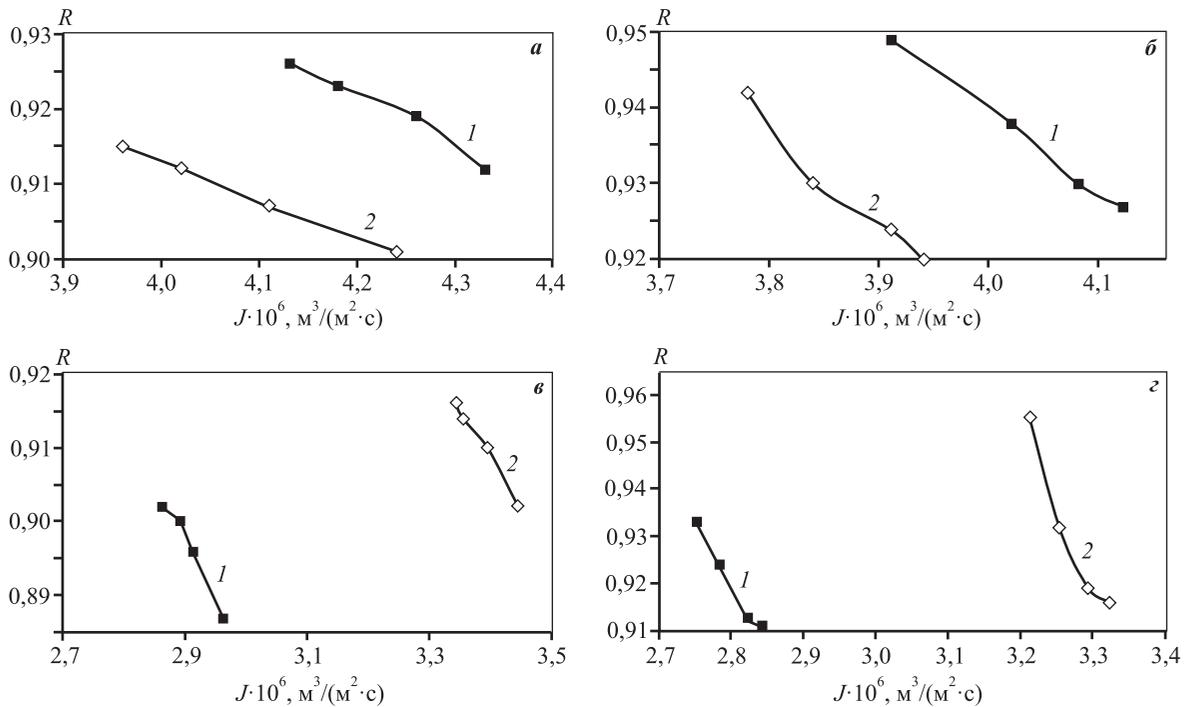


Рис. 2. Зависимости коэффициента задержания от выходного удельного потока растворителя прикатодной (а, в) и прианодной (б, г) мембран ОПМ-К для растворов сульфата меди (а, б) и тринатрийфосфата (в, г)

а, б – $c_{\text{исх}} = 0,02 \text{ кг/м}^3$ (1) и $0,03 \text{ кг/м}^3$ (2)
 в, г – $c_{\text{исх}} = 1,0 \text{ кг/м}^3$ (1) и $0,5 \text{ кг/м}^3$ (2)

через мембрану коэффициент задержания снижается для всех представленных зависимостей. Это явление объясняется тем, что перенос растворенного вещества через мембрану обусловлен в основном конвективным потоком растворителя.

С ростом концентрации исходного раствора коэффициент задержания снижается, что объясняется преимущественным переносом растворителя относительно растворенного вещества. На величину R большее влияние оказывает концентрация, чем давление [12], а также природа матрицы полупроницаемых мембран, что подтверждается нашими экспериментальными данными.

При электрохимическом мембранном разделении коэффициент задержания находится в линейной зависимости от плотности тока, однако отмечается различное поведение кривых $R(i)$ для прианодных и прикатодных мембран, что может быть вызвано «блокировкой» пор последних за счет отвода основной группы ионов [17, 18].

Для теоретического расчета коэффициента задержания с наложением электрического тока применялось выражение [19, 20]:

$$R = 1 - \left\{ 1 + \left(\frac{1}{k_1 k_p} - 1 \right) \times \left[1 - \exp \left(- \frac{k_2 J k_p i \eta}{D k_p i \eta} \right) \right] \exp(-k_3 J) \right\}^{-1}, \quad (3)$$

где k_1, k_2, k_3 — эмпирические коэффициенты (табл. 2); i — плотность тока, А/м^2 ; η — выход по току, %; k_p — коэффициент распределения мембран; D — коэффициент диффузии, м/с.

Приведенное уравнение (3) использовалось при разработке математической модели массопереноса в электрохимическом мембранном аппарате [21].

При математическом описании электрохимического мембранного процесса применен подход, основанный на уравнениях Нернста—Планка и Пуассона—Больцмана, а гидродинамическая обстановка в межмембранном канале учитывалась критериальным уравнением через критерий Рейнольдса.

На рис. 3 приведена схема массопереноса в плоском межмембранном канале.

Запишем математическую задачу в следующем виде:

$$\nabla[\nabla(\nabla u + (\nabla u)^T)] + \rho(\nabla u)u + \nabla P = 0, \quad (4)$$

Таблица 2
Значения эмпирических коэффициентов для выражения (3)

Наименование	Мембрана*	k_1	k_2	k_3
Раствор меди	МГА-95П (п/а)	$8,7 \cdot 10^{-8}$	0,99	0,80
	МГА-95П (п/к)	$9,4 \cdot 10^{-8}$	0,99	0,86
	ОПМ-К (п/а)	0,08	1,0	93537
	ОПМ-К (п/к)	0,1	1,0	90709
Раствор тринатрийфосфата	МГА-95П (п/а)	$4,9 \cdot 10^{-8}$	0,41	0,72
	МГА-95П (п/к)	0,06	1,0	259423
	ОПМ-К (п/а)	0,05	1,0	252150
	ОПМ-К (п/к)	0,06	1,0	259423

* Мембрана прианодная (п/а) и прикатодная (п/к).

$$\nabla u = 0, \tag{5}$$

$$\nabla(-D\nabla c - z u_m F \nabla U) = -u \nabla c, \tag{6}$$

$$-\nabla \epsilon_0 \epsilon_p \nabla U = \theta, \tag{7}$$

где η — кинематическая вязкость раствора, Н/м²; T — параметрический коэффициент, учитывающий влияние температуры; ρ — плотность раствора, кг/м³; P — давление в канале, Па; D — коэффициент диффузии растворенных веществ в канале, м²/с; z — валентность иона; u_m — подвижность

иона в мембране, м²/(В·с); F — число Фарадея; U — электрический потенциал, В; ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ_p — диэлектрическая постоянная раствора; θ — функциональный коэффициент.

Задача по гидродинамике течения раствора в межмембранном канале для ламинарного, стационарного и установившегося режимов описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial P(x, y)}{\partial x} - \frac{\partial \pi(x, y)}{\partial x} \right), \tag{8}$$

где μ — коэффициент динамической вязкости раствора (Па·с), π — осмотическое давление (Па), с граничными условиями

$$u(x, r_y) = 0, \tag{9}$$

$$u(x, -r_y) = 0. \tag{10}$$

Так как трансмембранное давление изменяется только вдоль оси плоского канала, то можно записать

$$\frac{d^2 u}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dP}{dx} - \frac{d\pi}{dx} \right). \tag{11}$$

Для решения уравнения (11) находят выражения распределения скоростей по длине и высоте канала, а также давления по его длине, которые используются в уравнении Нернста—Планка. В результате система уравнений, описывающая закономерности массопереноса, принимает следующий вид:

уравнение Нернста—Планка:

$$\begin{aligned} \nabla[-D\nabla c(x, y) - z u_m F \nabla U(x, y)] = \\ = \left[-u(x, y) \frac{\partial c(x, y)}{\partial x} + v(x, y) \frac{\partial c(x, y)}{\partial y} \right] \end{aligned} \tag{12}$$

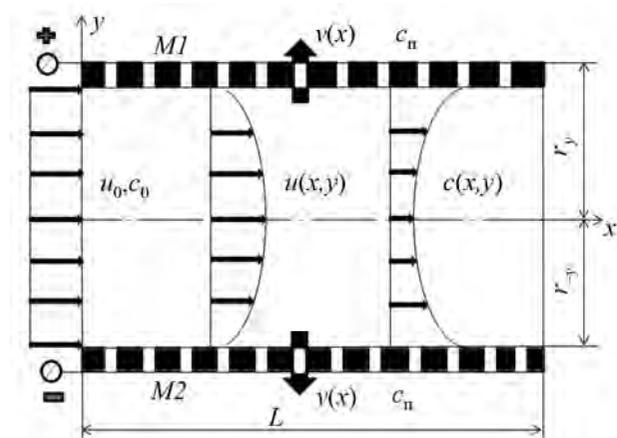


Рис. 3. Схема массопереноса в плоском электрохимическом межмембранном канале $M1, M2$ — полупроницаемые мембраны; L — длина мембранного канала в мембранном элементе, м; r_y — параметр по полувысоте межмембранного канала, м; c и c_n — параметры, характеризующие концентрации растворенного вещества в исследуемом растворе и прикатодном или прианодном пермеате соответственно, кг/м³; u — продольная скорость течения раствора в мембранном элементе, м/с; v — поперечная скорость течения раствора в мембранном элементе, м/с

с граничными условиями

$$c(0, y) = c_0, \tag{13}$$

$$Rv(x, -R)c(x, -R) = D\nabla c(x, -r_y) + z u_M F c(x, -r_y) \nabla U(x, -r_y), \tag{14}$$

$$Rv(x, R)c(x, R) = D\nabla c(x, r_y) + z u_M F c(x, r_y) \nabla U(x, r_y); \tag{15}$$

уравнение Пуассона—Больцмана:

$$-\nabla \epsilon_0 \epsilon_p \nabla U(x, y) = \theta \tag{16}$$

с граничными условиями

$$U(x, -r_y) = -v_0, \quad U(x, r_y) = -v_0, \tag{17}$$

$$U(L, y) = 0, \quad U(0, y) = 0. \tag{18}$$

Разработанную математическую модель, представленную системой уравнений (12)—(18), решали методом конечных разностей с определением поля концентраций $c(x, y)$. При этом применяли программу счета, специально разработанную на языке Delphi.

Адекватность математической модели оценивали путем сравнения расчетных значений удельного потока растворителя с экспериментальными данными, полученными при электрохимическом мембранном разделении растворов, содержащих ионы меди для мембран ОПМ-К и МГА-95П.

Расчетные и экспериментальные данные по изменению удельного потока растворителя в зависимости от трансмембранного давления и плотности тока представлены на рис. 4. Видно, что расхождение между ними не превышает 15 %, что свидетельствует об адекватности усовершенствованной математической модели электрохимического мембранного процесса.

Выводы

1. Получены и интерпретированы экспериментальные данные по коэффициенту задержания и выходному удельному потоку растворителя технологических растворов в зависимости от концентрации разделяемого раствора, трансмембранного давления и плотности тока.

2. Выявлена аппроксимационная зависимость и вычислены значения эмпирических коэффициентов для теоретического расчета коэффициента задержания электрохимического мембранного

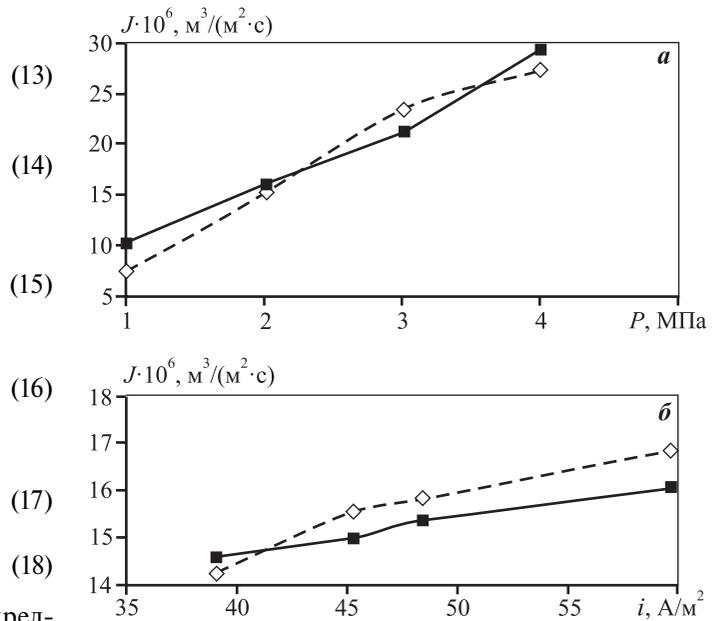


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных удельного потока растворителя для прикатодной мембраны ОПМ-К от трансмембранного давления (а) и плотности тока (б) для раствора сульфата меди
Сплошные линии – экспериментальные данные, штриховые – расчет

процесса разделения технологических растворов в зависимости от их концентрации, физико-химической природы мембраны, трансмембранного давления и плотности тока.

3. Разработана математическая модель электрохимической мембранной очистки растворов на основе решений уравнений Нернста—Планка и Пуассона—Больцмана, позволяющая рассчитывать величину концентраций в трактах пермеата и ретентата. Полученные результаты позволяют оценивать и прогнозировать эффективность электрохимической мембранной очистки технологических растворов от сульфата меди и тринатрийфосфата.

Литература/References

1. Gogina E., Makisha N. Information technologies in view of complex solution of waste water problems. *Appl. Mech. Mater.* 2014. Vol. 587—589. P. 636—639.
2. Сажия В.В., Полковников А.Б., Селдяс И. Проблемы экологии и рационального природопользования в контексте экономического развития России. *Успехи в химии и химической технологии.* 2009. No. 12 (105). С. 94—108.

- Sazhiya V.V., Polkovnikov A.B., Seldias I.* Problems of ecology and rational nature management in the context of Russia's economic development. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2009. No. 12 (105). P. 94–108 (In Russ.).
3. *Колесников В.А., Ильин В.И., Кучеров А.А.* Очистка сточных вод на металлургических предприятиях. *Экология производства*. 2010. No. 3. С. 31–36.
Kolesnikov V.A., Ilyin V.I., Kuchеров A.A. Wastewater treatment at metallurgical enterprises. *Ekologiya proizvodstva*. 2010. No. 3. P. 31–36 (In Russ.).
 4. *Павлов Д.В., Колесников В.А.* Очистка сточных вод различных производств с применением наилучших доступных технологий. *Чистая вода: Проблемы и решения*. 2010. No. 3. С. 74–78.
Pavlov D.V., Kolesnikov V.A. Wastewater treatment of various industries using the best available technologies. *Chistaya voda: Problemy i resheniya*. 2010. No. 3. P. 74–78 (In Russ.).
 5. *Комягин Е.А., Мынин В.Н., Ляпин И.Ф.* Пути решения проблемы очистки сточных вод от тяжелых и радиоактивных металлов. *Экология и пром-сть России*. 2008. No. 11. С. 21–23.
Komyagin E.A., Myinin V.N., Lyapin I.F. Ways of solving the problem of wastewater treatment from heavy and radioactive metals. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2008. No. 11. P. 21–23 (In Russ.).
 6. *Paidar M., Fateev V., Bouzek K.* Membrane electrolysis — History, current status and perspective. *Electrochim. Acta*. 2016. Vol. 209. P. 737–756.
 7. *Aliano A., Cicero G.* AC Electroosmosis: Basics and lab-on-a-chip applications. In: *Encyclopedia of nanotechnology*, 2012. P. 25–30.
 8. *Yoshinobu T.* Ion exchange membranes: Fundamentals and applications. Elsevier, 2015.
 9. *Borchmann A., Rosenwinkel K.H., Gubanov L.N., Katraeva I.V.* Einbindung der Membrantechnik in die Abwasserreinigung mittels Anaerobtechnik. Statusseminar Membrantechnik-10. Hannover: Hannoversche Industrieabwasser Tagung (HIT), 2007. Heft 139.
 10. *Tanninen J., Mänttari M., Nyström M.* Nanofiltration of concentrated acidic copper sulphate solutions. *Desalination: Int. J. Sci. Technol. Water Desalt*. 2008. No. 1–3. P. 92–96.
 11. *Su X., Alan Hatton T.* Electrosorption. In: *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*, 2016. P. 1–11.
 12. *Лазарев С.И., Ковалев С.В., Казаков В.Г.* Электробаромембранная очистка промывных вод производства 2,2'-дибензотиазолдисульфида. *Вестн. ТГТУ*. 2013. Т. 19. No. 3. С. 614–618.
Lazarev S.I., Kovalev S.V., Kazakov V.G. Electrobaromembrane purification of wash water produced by 2,2'-dibenzothiazole disulfide. *Vestnik TGTU*. 2013. Vol. 19. No. 3. P. 614–618 (In Russ.).
 13. *Макушев Д.Ю.* Влияние сточных вод Среднеуральского медеплавильного завода на реку Чусовую. *Изв. УрГТУ*. 2003. Вып. 18. С. 291–297.
Makushev D.Yu. Impact of sewage of the Sredneuralsk copper smelter on the Chusovaya river. *Izv. UrGGU*. 2003. Iss. 18. P. 291–297 (In Russ.).
 14. *Simone S., Figoli A., Criscuoli A., Carnevale M.C., Rosselli A., Drioli E.* Preparation of hollow fibre membranes from PVDF/PVP blends and their application in VMD. *J. Membr. Sci.* 2010. Vol. 364. P. 219–232.
 15. *Ковалев С.В.* Повышение эффективности электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа. *Хим. и нефтегаз. машиностроение*. 2014. No. 1. С. 13–17.
Kovalev S.V. Increase in the efficiency of an electro-barrier-type apparatus of a flat-chamber type. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2014. No. 1. P. 13–17 (In Russ.).
 16. *Pabby A.K., Rizvi S., Requena A.* Handbook of membrane separations: Chemical, pharmaceutical, food, and biotechnological applications. 2-nd ed. CRC Press, 2015.
 17. *Konturri K., Murtomäki L., Manzanares J.A.* Ionic transport processes in electrochemistry and membrane science. Oxford University Press, 2008.
 18. *Shestakov K.V., Firpo R., Bottino A., Comite A.* Preliminary study of electro dialysis with model salt solutions and industrial wastewater. In: *Proc. Int. Conf. «Frontiers in Wastewater Treatment and Modelling»*. Palermo, 2017. P. 656–662.
 19. *Лазарев С.И., Абоносимов О.А., Рябинский М.А., Горбачёв А.С.* Модель расчета массопереноса в электробаромембранных аппаратах рулонного типа. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2008. Т. 51. Вып. 5. С. 109–111.
Lazarev S.I., Abonosimov O.A., Ryabinsky M.A., Gorbachev A.S. Model for calculating the mass transfer in electro-barreled devices of a roll type. *Izv. vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2008. Vol. 51. Iss. 5. P. 109–111 (In Russ.).
 20. *Головашин В.Л.* Математическая модель совместного электротепломассопереноса в электробаромембранных системах. *Вестн. ТГТУ*. 2014. Т. 20. No. 4. С. 734–746.
Golovashin V.L. Mathematical model of joint electrothermal and heat transfer in electrobaromembrane systems. *Vestnik TGTU*. 2014. Vol. 20. No. 4. P. 734–746 (In Russ.).
 21. *Абоносимов О.А., Кузнецов М.А., Ковалева О.А., Поликарпов В.М., Дмитриев В.М.* Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на предприятиях. *Вестн. ТГТУ*. 2017. Т. 23. No. 4. С. 641–655.
Abonosimov O.A., Kuznetsov M.A., Kovaleva O.A., Polikarpov V.M., Dmitriev V.M. Kinetic dependencies and technological efficiency of electrochemical membrane separation of wastewater at enterprises. *Vestnik TGTU*. 2017. Vol. 23. No. 4. P. 641–655 (In Russ.).