

**КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЦЕССА  
МАССОПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННОГО  
РАЗДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ  
ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ**

**О. А. Абоносимов<sup>1</sup>, С. И. Лазарев<sup>1</sup>, И. В. Зарапина<sup>2</sup>,  
С. И. Котенев<sup>1</sup>, Н. Н. Игнатов<sup>1</sup>**

*Кафедры: «Механика и инженерная графика» (1),  
«Химия и химические технологии» (2),  
geometry@mail.nnn.tstu.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** критериальные зависимости; мембрана; разделение; электробаромембранный аппарат.

**Аннотация:** Рассмотрена возможность применения электробаромембранного разделения при очистке технологических растворов от тяжелых металлов. В целях изучения влияния параметров проведения процесса разделения на основные кинетические характеристики проведены экспериментальные исследования удельной производительности и коэффициента задержания мембран МГА-95 и МГА-100 при очистке технологических вод от ионов тяжелых металлов Cu(II), Cd(II), Pb(II). Разработана математическая модель кинетики массопереноса при электробаромембранном разделении, используемая в методике расчета электробаромембранного аппарата для удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод. Предложены к использованию критериальные зависимости расчета массопереноса электробаромембранного разделения технологических растворов от тяжелых металлов.

---

Отечественные предприятия цветной металлургии ежедневно используют воду в объеме  $(8...10) \times 10^6 \text{ м}^3$ , 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 данных целей – создание локальной системы очистки с возможностью извлечения ценных компонентов и использования 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 элек-

трохимического мембранного разделения необходимо иметь экспериментальные данные по кинетическим параметрам и характеристикам процесса. Одними из основных параметров, характеризующих эффективность процесса при электрохимическом мембранном разделении, являются выходная удельная производительность и коэффициент задержания мембраны [6].

Цель работы— исследование процесса массопереноса электрохимической мембранной очистки технологических растворов от тяжелых металлов. В целях исследования основных параметров электробаромембранного разделения проведен эксперимент по очистке сточных вод с промышленных объектов г. Тамбова, взятых на ОАО РКС «Тамбовводоканал», от ионов тяжелых металлов Cu(II), Cd(II), Pb(II). Для исследования использовали лабораторную электробаромембранную установку, рабочей частью которой служит плоскокамерная ячейка. Методика проведения и результаты экспериментальных исследований подробно представлены в работе [12].

Проведенный анализ зависимости удельного потока от давления показал, что с увеличением давления возрастает величина проницаемости мембран, так как увеличивается эффективная движущая сила процесса [13]. Мембрана МГА-95 имеет большую величину удельного потока по сравнению с МГА-100, что объясняется различной пористой структурой активного слоя мембран [14]. В тех случаях, когда мембрана не изменяет своей структуры под действием давления, проницаемость воды линейно возрастает с увеличением эффективной движущей силы. Однако при повышенных давлениях реальные полимерные мембраны не сохраняют свою первоначальную структуру и уплотняются. В связи с этим, начиная с некоторой величины рабочего давления, проницаемость снижается и при определенных давлениях достигает максимума. При дальнейшем увеличении давления проницаемость снижается [15].

Анализ зависимости удельного потока от концентрации показал, что удельный поток через исследуемые мембраны незначительно уменьшается с ростом концентрации для всех веществ. По значениям концентраций исследуемых растворов их можно отнести к разбавленным. Для таких растворов характерно незначительное влияние роста концентрации на проницаемость мембран. В зависимости от типа мембран отмечается большая удельная производительность мембраны МГА-95, чем МГА-100.

Рассмотрение зависимости удельного потока растворителя от плотности тока показало неоднозначное поведение кривых для прикатодных и прианодных мембран. Данный факт можно объяснить различными величинами групп ионов различных зарядов, влияющих на перенос воды через исследуемые мембраны.

Для теоретического расчета удельного потока растворителя предложено уравнение [16]

$$J = k \left( \Delta P - (k_1 + i^m k_2) C \right) \exp(k_3 C^n) \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент водопроницаемости мембраны, (м/с)·МПа;  $\Delta P$  – перепад трансмембранного давления, МПа;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $n$ ,  $A$  – числовые коэффициенты;  $i$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $C$  – концентрация, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура, К.

В таблице 1 представлены значения эмпирических коэффициентов для уравнения (1).

Анализ зависимости коэффициента задержания от градиента давления показал, что с ростом давления увеличиваются коэффициент задержания и усилие на активный слой мембраны, которая в результате деформации уплотняется [17, 18].

Таблица 1

## Значения эмпирических коэффициентов для уравнения (1)

Мембрана	$k_1$	$m$	$k_2$	$k_3$	$n$	$A$
МГА-95 (прианодная)	-0,94	0,51	0,10	6,54	1,00	6,54
МГА-95 (прикатодная)	0,14	0,75	-0,04	6,54	1,00	6,54
МГА-100 (прианодная)	0,73	-0,20	4,29	7,16	4,72	4,74
МГА-100 (прикатодная)	7,30	-0,82	8,64	5,48	1,00	5,48

Отмечено, что с ростом концентрации растворов для всех исследуемых веществ коэффициенты задержания незначительно уменьшаются, что характерно для баромембранного разделения весьма разбавленных растворов, к которым можно отнести исследуемые растворы.

Коэффициент находится в линейной зависимости от плотности тока, однако, отмечается различное поведение кривых коэффициента задержания для прикатодных и прианодных мембран. Данное явление вызвано «блокировкой» пор прикатодных мембран за счет отвода основной группы ионов [19].

Для теоретического расчета коэффициента задержания с наложением электрического тока получено выражение следующего вида [20]

$$K = 1 - \left( 1 + \left( \frac{1}{k_1 k_p} - 1 \right) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{k_2 J k_p i \eta}{D k_p i \eta} \right) \right] \exp(-k_3 J) \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – эмпирические коэффициенты;  $i$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $\eta$  – выход по току;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $k_p$  – коэффициент распределения;  $J$  – удельный поток растворителя, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с).

В таблице 2 представлены значения эмпирических коэффициентов для уравнения (2).

Таблица 2

## Значения эмпирических коэффициентов уравнения (2)

Раствор	Мембрана	$k_1$	$k_2$	$k_3$
Pb(II)	МГА-95 (прианодная)	0,31	1,28	1,06
	МГА-95 (прикатодная)	0,23	1,25	1,01
	МГА-100 (прианодная)	2,32	0,51	11,42
	МГА-100 (прикатодная)	2,22	0,25	10,27
Cd(II)	МГА-95 (прианодная)	0,49	1,25	1,00
	МГА-95 (прикатодная)	0,43	1,68	1,34
	МГА-100 (прианодная)	1,82	0,38	11,20
	МГА-100 (прикатодная)	1,93	0,31	9,19
Cu(II)	МГА-95 (прианодная)	0,054	1,012	32,14
	МГА-95 (прикатодная)	0,082	1,008	27,70
	МГА-100 (прианодная)	4,12	0,24	1,08
	МГА-100 (прикатодная)	6,23	0,15	1,28

Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента задержания показало их удовлетворительное совпадение.

Полученные выражения для расчета удельного потока и коэффициента задержания использованы в математическом описании массопереноса в электробаромембранных аппаратах, основанном на уравнении гидродинамики движения раствора и уравнения конвективной диффузии в канале, подробно представленном в работе [12].

Конечная задача представлена в следующем виде:

$$f_1(x)((b/2)^2 - y^2) \frac{\partial C}{\partial x} + f_2(x) \frac{\partial C}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}; \quad (3)$$

граничные условия:

$$C(x, b/2) f_2(x) = m \frac{\partial C(x, b/2)}{\partial y}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial C(x, 0)}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

$$C_0(0, y) = C_0, \quad (6)$$

где

$$f_1(x) = \frac{\sqrt{|\lambda|}}{2\mu} [\operatorname{ch}(\sqrt{|\lambda|}(L-x)) - \operatorname{arch}(x\sqrt{|\lambda|})]; \quad (7)$$

$$f_2(x) = K [\operatorname{ch}(\sqrt{|\lambda|}(L-x)) + \operatorname{arch}(x\sqrt{|\lambda|})]; \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{D \operatorname{sh}(L\sqrt{|\lambda|})}{\Delta P_k}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial x} = \frac{D \operatorname{sh}(L\sqrt{|\lambda|})}{K \Delta P_H}, \quad (10)$$

где  $\Delta P_k$ ,  $\Delta P_H$  – конечное и начальное трансмембранные давления.

Полученная система уравнений (3) – (6) решается методом конечных разностей с нахождением поля концентраций  $C(x, y)$ . Для решения составлена программа счета (на языке Delphi), реализованная на персональном компьютере. Зная поле концентраций  $C(x, y)$ , можно рассчитать локальные эффективные коэффициенты массоотдачи вдоль по длине канала по уравнению

$$\beta = D \frac{\partial C(x, b/2)}{\partial y} / (C(x, b/2) - \tilde{C}(x)), \quad (11)$$

где  $\tilde{C}(x)$  – средняя по сечению концентрация раствора в межмембранном канале

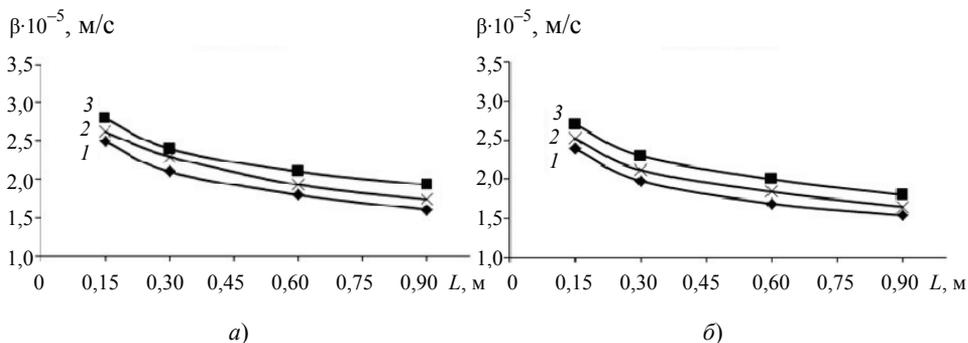
$$\tilde{C}(x) = \frac{1}{b\tilde{U}} \int C(x, y) U(y) dy, \quad (12)$$

где  $\tilde{U}$  – средняя скорость потока жидкости в межмембранном канале

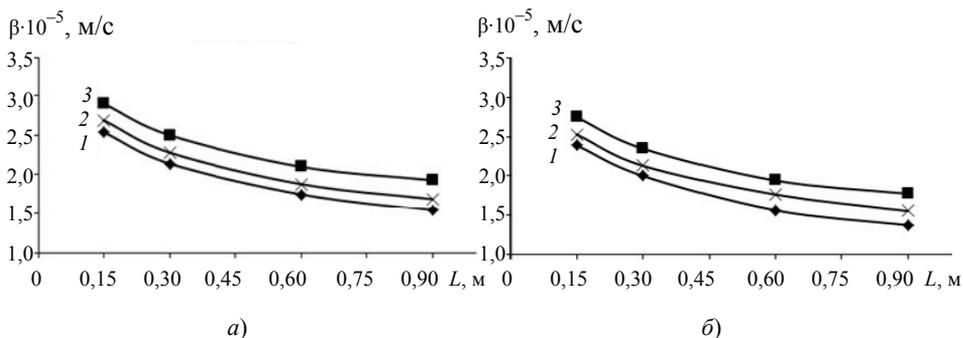
$$\tilde{U} = \frac{1}{b} \int U(x, y) dy. \quad (13)$$

На рисунках 1 – 3 и 4 – 6 представлены зависимости локальных эффективных коэффициентов массоотдачи для исследуемых растворов от критерия Re и давления соответственно.

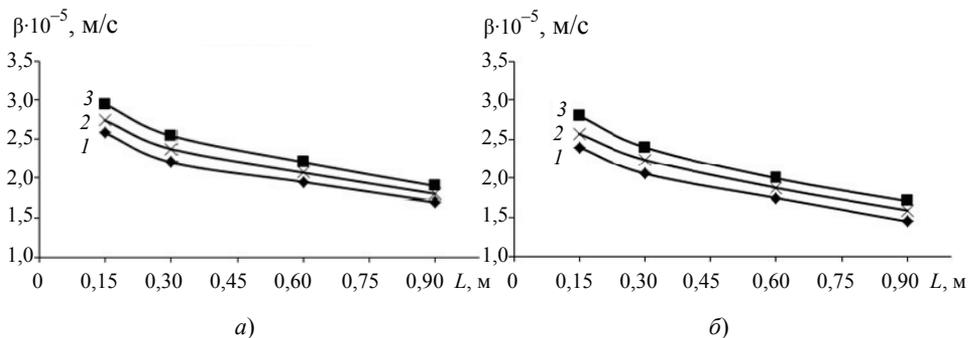
Анализ расчетно-аналитических данных по локальным коэффициентам массоотдачи позволил получить приближенные аппроксимационные соотношения для средних коэффициентов массоотдачи по длине канала. Откорректировав данные



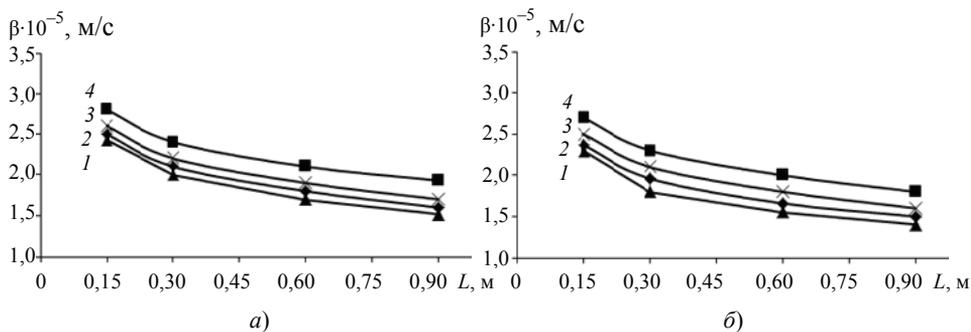
**Рис. 1.** Графики зависимости коэффициента массоотдачи от критерия Re по длине межмембранного канала для раствора  $\text{CdSO}_4$  при концентрации  $C_{\text{исх}} = 0,20 \text{ кг/м}^3$ : а – МГА-95; б – МГА-100; 1 – Re = 20; 2 – Re = 36; 3 – Re = 55



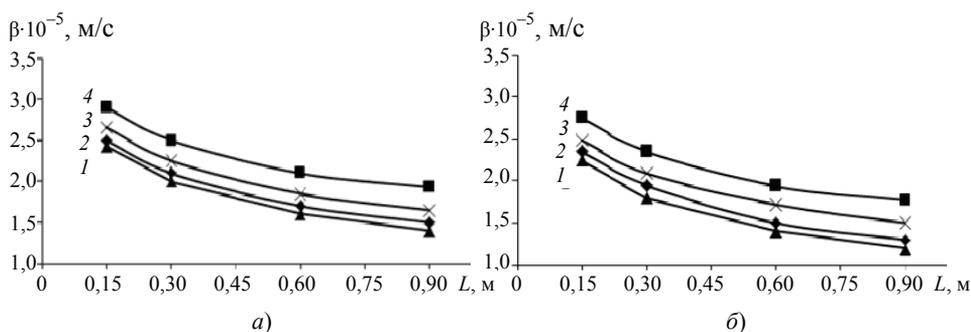
**Рис. 2.** Графики зависимости коэффициента массоотдачи от критерия Re по длине межмембранного канала для раствора  $\text{CuSO}_4$  при концентрации  $C_{\text{исх}} = 0,30 \text{ кг/м}^3$ : а – МГА-95; б – МГА-100; 1 – Re = 20; 2 – Re = 36; 3 – Re = 55



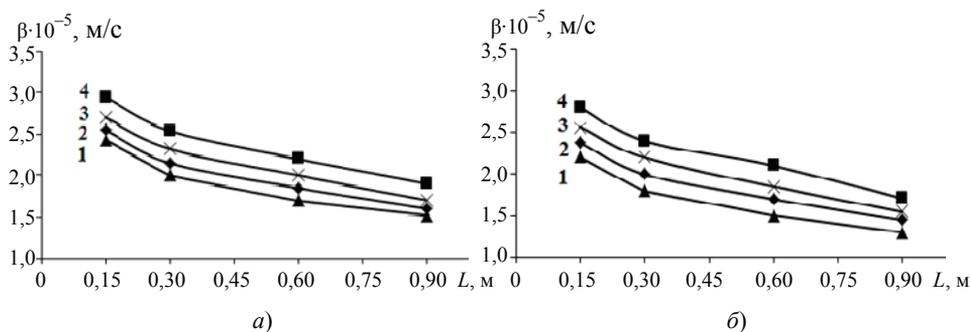
**Рис. 3.** Графики зависимости коэффициента массоотдачи от критерия Re по длине межмембранного канала для раствора  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  при концентрации  $C_{\text{исх}} = 0,22 \text{ кг/м}^3$ : а – МГА-95; б – МГА-100; 1 – Re = 20; 2 – Re = 36; 3 – Re = 55



**Рис. 4. Графики зависимости коэффициента массоотдачи от давления  $P$  для раствора  $\text{CdSO}_4$  с концентрацией  $C_{\text{исх}} = 0,20 \text{ кг/м}^3$ :  
 а – МГА-95; б – МГА-100; 1 –  $P = 1 \text{ МПа}$ ; 2 –  $P = 2 \text{ МПа}$ ; 3 –  $P = 3 \text{ МПа}$ ; 4 –  $P = 4 \text{ МПа}$**



**Рис. 5. Графики зависимости коэффициента массоотдачи от давления  $P$  для раствора  $\text{CuSO}_4$  с концентрацией  $C_{\text{исх}} = 0,30 \text{ кг/м}^3$ :  
 а – МГА-95; б – МГА-100; 1 –  $P = 1 \text{ МПа}$ ; 2 –  $P = 2 \text{ МПа}$ ; 3 –  $P = 3 \text{ МПа}$ ; 4 –  $P = 4 \text{ МПа}$**



**Рис. 6. Графики зависимости коэффициента массоотдачи от давления  $P$  для раствора  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  с концентрацией  $C_{\text{исх}} = 0,22 \text{ кг/м}^3$ :  
 а – МГА-95; б – МГА-100; 1 –  $P = 1 \text{ МПа}$ ; 2 –  $P = 2 \text{ МПа}$ ; 3 –  $P = 3 \text{ МПа}$ ; 4 –  $P = 4 \text{ МПа}$**

соотношения по результатам экспериментов, вывели расчетное уравнение (погрешность составляет  $\pm 7\%$ )

$$\text{Nu} = k \text{Re}^m K_{\Delta P}^n, \quad (14)$$

$$K_{\Delta P} = \text{Eu} \text{Re}^2 = \Delta P \rho L^2 / \mu^2, \quad (15)$$

где  $k, m, n$  – эмпирические коэффициенты.

Значения эмпирических коэффициентов уравнения (14)

Раствор	Мембрана	$k \cdot 10^{-3}$	$m$	$n$
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	МГА-95	1,88	0,30	0,18
	МГА-100	1,70	0,23	0,17
CdSO <sub>4</sub>	МГА-95	1,80	0,32	0,17
	МГА-100	1,61	0,24	0,16
CuSO <sub>4</sub>	МГА-95	1,84	0,33	0,18
	МГА-100	1,63	0,25	0,17

В таблице 3 представлены значения эмпирических коэффициентов для уравнения (14).

На основании проведенных исследований можно сделать следующие 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. Выявлены аппроксимационные зависимости и вычислены значения эмпирических коэффициентов для теоретического расчета удельного потока и коэффициента задержания электробаромембранного процесса разделения технологических растворов в зависимости от физико-химической природы мембраны, концентрации, трансмембранного давления и плотности тока.

3. Разработанная математическая модель позволяет получить приближенные аппроксимационные соотношения для средних коэффициентов массоотдачи по длине межмембранного канала.

4. Представленные критериальные зависимости могут быть использованы при прогнозировании и разработке лабораторных, пилотных и промышленных электробаромембранных аппаратов и установок.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания № 10.4798.2017/БЧ.*

#### Список литературы

1. Gogina, E. Information Technologies in View of Complex Solution of Waste Water Problems / E. Gogina, N. Makisha // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 587-589. – P. 636 – 639.

2. Проблемы экологии и рационального природопользования в контексте экономического развития России / В. Б. Сажин [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2009. – Т. 23, № 12 (105). – С. 94 – 108.

3. Ильин, В. И. Очистка сточных вод на металлургических предприятиях / В. И. Ильин, В. А. Колесников, А. А. Кучеров // Экология производства. – 2010. – № 3. – С. 56 – 59.

4. Колесников, В. А. Очистка сточных вод различных производств с применением наилучших доступных технологий / В. А. Колесников, С. О. Вараксин, Д. В. Павлов // Чистая вода: проблемы и решения. – 2010. – № 2-3. – С. 50 – 59.

5. Пути решения проблемы очистки сточных вод от тяжелых и радиоактивных металлов / Е. А. Комягин [и др.] // *Экология и промышленность России*. – 2008. – № 11. – С. 21 – 23.
6. Paidar, M. Membrane Electrolysis – History, Current Status and Perspective / M. Paidar, V. Fateev, K. Bouzek // *Electrochimica Acta*. – 2016. – Vol. 209. – P. 737 – 756.
7. Garcia-Sanchez, P. AC Electroosmosis : Basics and Lab-on-a-Chip Applications / P. Garcia-Sanchez, A. Ramos // *Encyclopedia of Nanotechnology*. – 2012. – P. 25 – 30.
8. Yoshinobu, T. Ion Exchange Membranes : Fundamentals and Applications / T. Yoshinobu. – Elsevier Science, 2015. – 522 p.
9. Einbindung der Membrantechnik in die Abwasserreinigung mittels Anaerob-technik / A. Borchmann [et al.] // *Statusseminar Membrantechnik-10 : Hannoversche Industrieabwasser Tagung (HIT)*. – Hannover, 2007. – Heft 139.
10. Tanninen, J. Nanofiltration of Concentrated Acidic Copper Sulphate Solutions / J. Tanninen, M. Mänttari, M. Nyström // *Desalination*. – 2006. – Vol. 189, No. 1-3. – P. 92 – 96.
11. Su, X. Electrosorption / X. Su, T. A. Hatton // *Kirk-Othmer encyclopedia of Chemical Technology*. – 2016. – P. 1 – 11.
12. Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на предприятиях / О. А. Абоносимов [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 641 – 655. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.641-655
13. Платэ, Н. А. Мембранные технологии – авангардное направление развития науки и техники XXI века / Н. А. Платэ // *Мембраны. Серия : Критические технологии*. – 1999. – № 1. – С. 4 – 13.
14. Дубяга, В. П. Нанотехнологии и мембраны (обзор) / В. П. Дубяга, И. Б. Бесфамильный // *Мембраны. Серия : Критические технологии*. – 2005. – № 3. – С. 11 – 16.
15. Лазарев, К. С. Исследования кинетических коэффициентов обратнo-осмотического разделения растворов на мембранах МГА-95, МГА-100 и ОПМ-К / К. С. Лазарев, С. В. Ковалев, А. А. Арзамасцев // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2011. – Т. 17, № 3. – С. 726 – 734.
16. Лазарев, С. И. Теоретические и прикладные основы электробаромембранных методов разделения многокомпонентных растворов : учеб. пособие / С. И. Лазарев. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – 104 с.
17. Шапошник, В. А. История мембранной электрохимии / В. А. Шапошник // *Электрохимия*. – 2002. – Т. 38, № 8. – С. 900 – 905.
18. Акулинчев, А. М. Исследование электробаромембранного разделения промышленных технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов Pb, Cd, Fe / А. М. Акулинчев, О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 120 – 128. doi: 10.17277/vestnik.2017.01.pp.120-128
19. Березина, Н. П. Модельное описание электротранспорта воды в ионообменных мембранах / Н. П. Березина, Н. П. Гнусин, О. А. Демина // *Электрохимия*. – 1990. – Т. 26, № 9. – С. 1098 – 1104.
20. Хорохорина, И. В. Кинетика и структурные характеристики мембран электроультрафильтрационной очистки промышленных растворов от анионных поверхностно-активных веществ : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / И. В. Хорохорина. – Тамбов, 2014. – 130 с.

## Criteria Dependences of the Mass Transfer Process of the Electrobaromembrane Separation of Technological Solutions from Heavy Metals

O. A. Abonosimov<sup>1</sup>, S. I. Lazarev<sup>1</sup>, I. V. Zarapina<sup>2</sup>,  
S. I. Kotenev<sup>1</sup>, N. N. Ignatov<sup>1</sup>

*Departments of Mechanics and Engineering Graphics (1),  
Chemistry and Chemical Technology (2),  
geometry@mail.nnn.tstu.ru, TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** criteria dependencies; membrane; separation; electrobarometric membrane apparatus.

**Abstract:** The possibility of using electrobaromembrane separation when cleaning technological solutions from heavy metals is considered.

In order to study the influence of the parameters of the separation process on the basic kinetic characteristics, experimental studies of the specific productivity and retention coefficient of the MGA-95 and MGA-100 membranes during the treatment of industrial waters from heavy metal ions Cu (II), Cd (II), Pb (II). A mathematical model of the kinetics of mass transfer in the electrobaromembrane separation is developed, which is used in the calculation method of the electrobaromembrane apparatus for removing heavy metal ions from wastewater. Criteria dependences of calculating the mass transfer of the electrobaromembrane separation of technological solutions from heavy metals are proposed for use.

### References

1. Gogina E., Makisha N. Information Technologies in View of Complex Solution of Waste Water Problems, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 587-589, pp. 636-639.
2. Sazhin V.B., Polovnikov A.B., Seldinas I., Belousov A.S., Seldinas O., Tarasenko T.A., Sazhin V.V., Matushkina Ye.V., Sazhina M.B., Batalov Ye.G., Tikhonov A.V. [Problems of ecology and environmental management in the context of the economic development of Russia], *Uspexhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Successes in Chemistry and Chemical Technology], 2009, vol. 23, no. 12 (105), pp. 94-108. (In Russ.)
3. Il'in V.I., Kolesnikov V.A., Kucherov A.A. [Wastewater treatment at metallurgical enterprises], *Ekologiya proizvodstva* [Ecology of production], 2010, no. 3, pp. 56-59. (In Russ.)
4. Kolesnikov V.A., Varaksin S.O., Pavlov D.V. [Sewage treatment of various industries with the use of the best available technologies], *Chistaya voda: problemy i resheniya* [Pure water: problems and solutions], 2010, no. 2-3, pp. 50-59. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Komyagin Ye.A., Mynin V.N., Lyapin I.F., Averina Yu.M., Lopatyuk Yu.Yu., Terpugov G.V., Terpugov D.G. [Ways of solving the problem of wastewater treatment from heavy and radioactive metals], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2008, no. 11, pp. 21-23. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Paidar M., Fateev V., Bouzek K. Membrane Electrolysis—History, Current Status and Perspective, *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 209, pp. 737-756.
7. Garcia-Sanchez P., Ramos A. AC Electroosmosis: Basics and Lab-on-a-Chip Applications, *Encyclopedia of Nanotechnology*, 2012, pp. 25-30.

8. Yoshinobu T. Ion exchange membranes: Fundamentals and applications, *Elsevier Science*, 2015, 522 p.
9. Borchmann A., Rosenwinkel K.H., Gubanov L.N., Katraeva I.V. Einbindung der Membrantechnik in die Abwasserreinigung mittels Anaerobtechnik, Statusseminar Membrantechnik-10: Hannoversche Industrieabwasser Tagung (HIT), Hannover, 2007, Heft 139.
10. Tanninen J., Mänttari M., Nyström M. Nanofiltration of concentrated acidic copper sulphate solutions, *Desalination*, 2006, vol. 189, no. 1-3, pp. 92-96.
11. Su X., Hatton T.A. Electrosorption, *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*, 2016, pp. 1-11.
12. Abonosimov O.A., Kuznetsov M.A., Kovaleva O.A., Polikarpov V.M., Dmitriyev V.M. [Kinetic dependencies and technological efficiency of electrochemical membrane separation of wastewater in enterprises], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 641-655, doi: 10.17277/vestnik.2017.04. pp.641-655 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Plate N.A. [Membrane technologies - the avant-garde direction of development of science and technology of the XXI century], *Membrany. Seriya: Kriticheskie tekhnologii* [Membrane. Series: Critical Technology], 1999, no. 1, pp. 4-13. (In Russ.)
14. Dubyaga V.P., Besfamil'nyi I.B. [Nanotechnology and membrane (review)], *Membrany. Seriya: Kriticheskie tekhnologii* [Membrane. Series: Critical Technology], 2005, no. 3, pp. 11-16. (In Russ.)
15. Lazarev K.S., Kovalev S.V., Arzamastsev A.A. [Investigations of the kinetic coefficients of reverse osmotic separation of solutions on MGA-95, MGA-100 and OPM-K membranes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 726-734. (In Russ., abstract in Eng.)
16. Lazarev S.I. *Teoreticheskie i prikladnye osnovy elektrobaromembrannykh metodov razdeleniya mnogokomponentnykh rastvorov : uchebnoe posobie* [Theoretical and applied bases elektrobaromembrannykh methods for separating multicomponent solutions: a tutorial], Tambov: Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta, 2008, 104 p. (In Russ.)
17. Shaposhnik V.A. [History of membrane electrochemistry], *Elektrokhimiya* [Electrochemistry], 2002, vol. 38, no. 8, pp. 900-905. (In Russ., abstract in Eng.)
18. Akulinchev A.M., Abonosimov O.A., Lazarev S.I. [Investigation of Electrobaromembrane Separation of Industrial Process Solutions Containing Heavy Metal Ions Pb, Cd, Fe], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 120-128, doi: 10.17277/vestnik.2017.01. pp.120-128 (In Russ., abstract in Eng.)
19. Berezina N.P., Gnusin N.P., Demina O.A. [Model Description Electric water in ion exchange membranes], *Elektrokhimiya* [Electrochemistry], 1990, vol. 26, no. 9, pp. 1098-1104. (In Russ.)
20. Khorokhorina I.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2014, 130 p. (In Russ.)

---

### **Kriteriums-Abhängigkeiten für den Massentransferprozess der Elektrobarmembran-Trennung der technologischen Lösungen von Schwermetallen**

**Zusammenfassung:** Es ist die Möglichkeit der Elektrobarmembrantrennung bei der Reinigung der technologischen Lösungen von Schwermetallen betrachtet. Um den Einfluss der Parameter des Trennprozesses auf die grundlegenden kinetischen Eigenschaften zu untersuchen, wurden experimentelle Studien der spezifischen Leistung und des Retentionskoeffizienten der MGA-95- und MGA-100-Membranen bei der Reinigung der Industrierwässer von Schwermetall-Ionen Cu(II), Cd(II), Pb(II)

durchgeführt. Es ist ein mathematisches Modell der Stoffübergangskinetik bei der Elektrobarmembrantrennung entwickelt, das in der Berechnungsmethode der Elektrobarmembran-Apparatur zur Entfernung der Schwermetall-Ionen aus dem Abwasser verwendet wird. Es sind Kriteriums-Abhängigkeiten für die Berechnung des Stofftransfers bei der Elektrobarmembrantrennung der technologischen Lösungen von Schwermetallen vorgeschlagen.

---

### **Les dépendances de référence du procédé de transfert de masse de la séparation électro-barométrique des solutions de traitement des métaux lourds**

**Résumé:** Est considérée la possibilité de l'application de la séparation électro-barométrique lors du nettoyage des solutions technologiques de métaux lourds. Afin d'étudier l'effet des paramètres de séparation sur les caractéristiques cinétiques fondamentales, des études expérimentales ont été menées sur la performance spécifique et le taux de rétention des membranes MGA-95 et MGA-100 lors du traitement des eaux des traitement des ions de métaux lourds Cu(II), Cd(II), Pb(II). Est élaboré le modèle mathématique de la cinétique du transfert de masse lors de la séparation électro-baromembrane, utilisé dans la méthode de calcul d'un appareil électro-baromembrane pour éliminer les ions de métaux lourds des eaux usées. Sont proposées pour l'utilisation les dépendances de référence du calcul du transfert de masse de la séparation électro-baromembrane des solutions technologiques des métaux lourds.

---

**Авторы:** *Абоносимов Олег Аркадьевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»; *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика»; *Зарипина Ирина Вячеславовна* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химия и химические технологии»; *Котенев Сергей Игоревич* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Игнатов Николай Николаевич* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Кузнецов Михаил Александрович* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.