

## КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО МЕМБРАННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

О. А. Абоносимов<sup>1</sup>, М. А. Кузнецов<sup>1</sup>, О. А. Ковалева<sup>1</sup>,  
В. М. Поликарпов<sup>2</sup>, В. М. Дмитриев<sup>3</sup>

*Кафедры: «Прикладная геометрия и компьютерная графика» (1); «Физика» (2); «Безопасность и правопорядок» (3), ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; geometry@mail.nnn.tstu.ru*

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

**Аннотация:** Рассмотрена возможность применения электрохимического мембранного разделения растворов при очистке технологических вод от ионов 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 Fe(II), Cd(II), Pb(II). Разработана математическая модель кинетики массопереноса при электрохимическом мембранном разделении, используемая в методике расчета электрохимического мембранного аппарата для удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод. Предложены к использованию разработанные и модернизированные технологические схемы очистки сточных вод очистных сооружений.

---

Загрязнение окружающей среды, в том числе источников водоснабжения, является реальным фактором, который оказывает отрицательное влияние на здоровье людей. Более 90 % сточных вод, поступающих через коммунальные сети в поверхностные водные объекты, сбрасываются неочищенными. Все более жесточающиеся требования к сбросу промышленных сточных вод требуют поиска и разработки более эффективных решений в области очистки технологических и сточных вод. Один из наиболее рациональных путей для достижения этих целей – создание локальных систем очистки с извлечением ценных компонентов и использованием очищенных вод в оборотном цикле [1, 2].

Наибольшие успехи в отношении эффективности и технологичности выделения цветных металлов из сточных вод достигнуты при использовании методов мембранного разделения, в частности, обратного осмоса, ультра- и электроосмофльтрации [3, 4]. При инженерных методиках расчета процесса электрохимического разделения необходимо иметь экспериментальные данные по кинетическим параметрам массопереноса. Одними из составляющих массопереноса при электрохимическом мембранном разделении являются удельная производительность мембран и коэффициент задержания [3].

В целях исследования основных параметров электрохимического мембранного разделения проведен эксперимент по очистке сточных вод с промышленных объектов г. Тамбова, взятых на ООО РКС «Тамбовводоканал», от ионов тяжелых металлов Fe(II), Cd(II), Pb(II). Для исследования использовали лабораторную электрохимическую мембранную установку, рабочей частью которой служит плоско-камерная ячейка. Схема электрохимической мембранной установки и методика проведения эксперимента подробно рассмотрены в работе [5].

Значение удельного потока мембраны  $J$  рассчитывали по зависимости [5]

$$J = \frac{V_{\text{пер}}}{F_M \tau}, \quad (1)$$

где  $J$  – удельный поток через мембрану,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $V_{\text{пер}}$  – объем собранного пермеата,  $\text{м}^3$ ;  $F_M$  – площадь мембраны,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – время проведения эксперимента, с.

Коэффициент задержания определяли по формуле

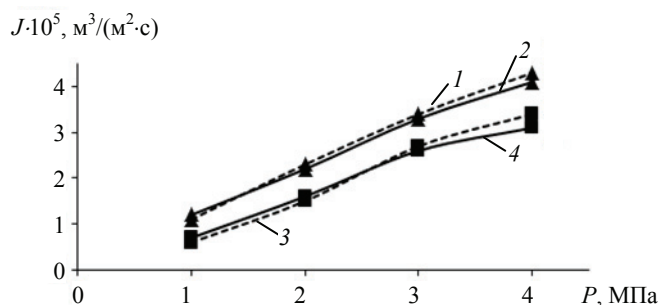
$$K = 1 - \frac{C_{\text{пер}}}{C_{\text{исх}}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{пер}}$ ,  $C_{\text{исх}}$  – полученная концентрация растворенного вещества в пермеате и исходном растворе соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

На рисунках 1 – 8 представлены зависимости удельного потока и коэффициента задержания мембран МГА-95 и МГА-100 в зависимости от давления, концентрации и плотности тока (штриховая линия – расчет, сплошная – экспериментальные данные).

Анализ зависимости удельного потока от давления (см. рис. 1) показал, что с увеличением давления возрастает величина проницаемости мембран, так как увеличивается эффективная движущая сила процесса [6]. Мембрана МГА-95 имеет большую величину удельного потока по сравнению с МГА-100, что объясняется различной пористой структурой активного слоя мембран [7].

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. Начиная с некоторой величины рабочего давления, проницаемость повышается и при определенных давлениях достигает максимума. При дальнейшем увеличении давления проницаемость снижается [8].



**Рис. 1. Зависимость удельного потока растворителя через мембраны МГА-95 (1, 2) и МГА-100 (3, 4) многокомпонентного водного раствора от давления при удалении катионов:**  
 $C_{\text{исх}}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ : Pb(II), Cd(II) – 0,20; Fe(II) – 0,15

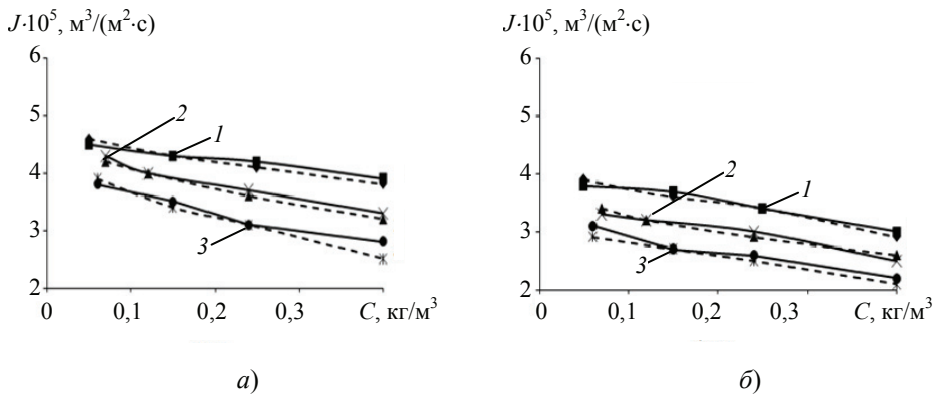


Рис. 2. Зависимость удельного потока растворителя через мембраны МГА-95 (а), МГА-100 (б) при давлении  $P = 4,0$  МПа и температуре  $T = 295$  К от концентрации раствора: 1 – Cd(II); 2 – Pb(II); 3 – Fe(II)

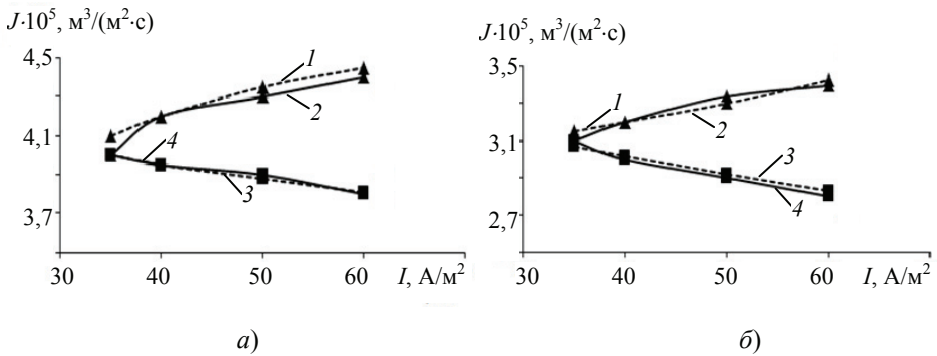


Рис. 3. Зависимости удельного потока растворителя от плотности тока при  $P = 4$  МПа многокомпонентного водного раствора для прикатодной (1, 2) и прианодной (3, 4) мембран МГА-95 (а), МГА-100 (б)

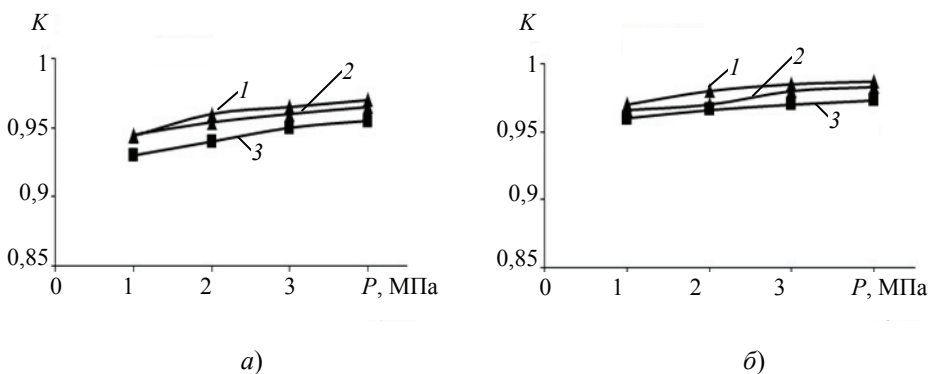


Рис. 4. Зависимости коэффициента задержания мембран МГА-95 (а), МГА-100 (б) по многокомпонентному водному раствору от давления при удалении катионов: 1 – Pb(II), 2 – Cd(II), 3 – Fe(II); исходная концентрация катионов,  $\text{kg}/\text{m}^3$ : Pb – 0,22; Cd – 0,20; Fe – 0,15

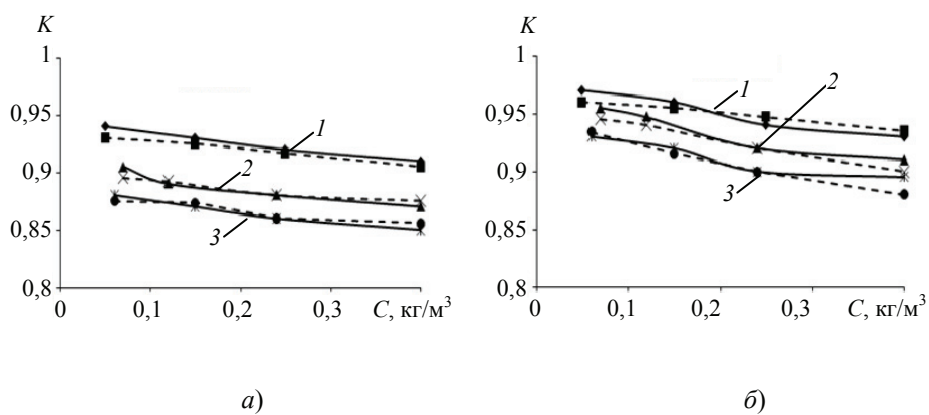


Рис. 5. Зависимости коэффициента задержания мембран МГА-95 (а), МГА100 (б) при постоянном давлении  $P = 4,0$  МПа и температуре  $T = 295$  К от концентрации раствора:  
1 – Cd(II); 2 – Pb(II); 3 – Fe(II)

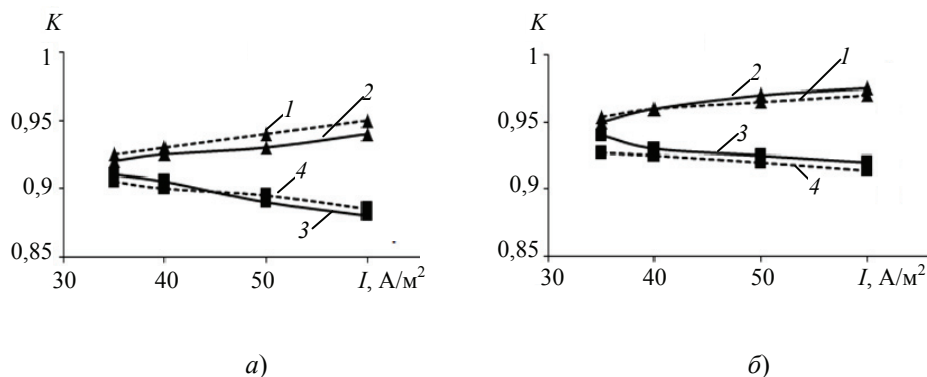


Рис. 6. Зависимости коэффициента задержания от плотности тока при  $P = 4$  МПа катионов Pb(II) прианодной (1, 2) и прикатодной (3, 4) мембран МГА-95 (а), МГА-100 (б)

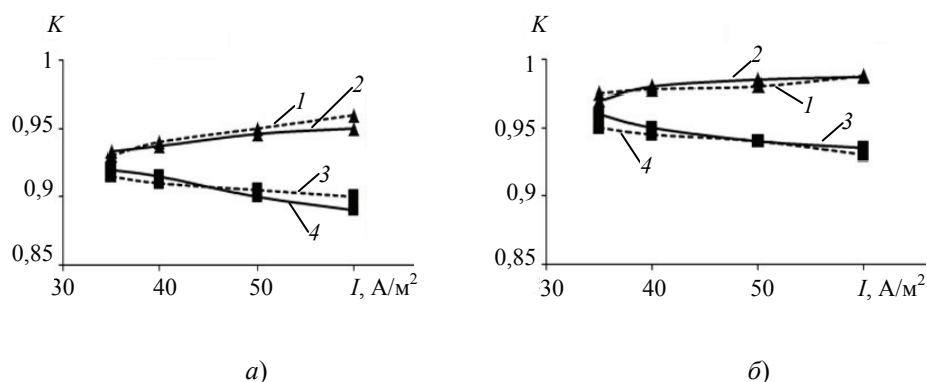
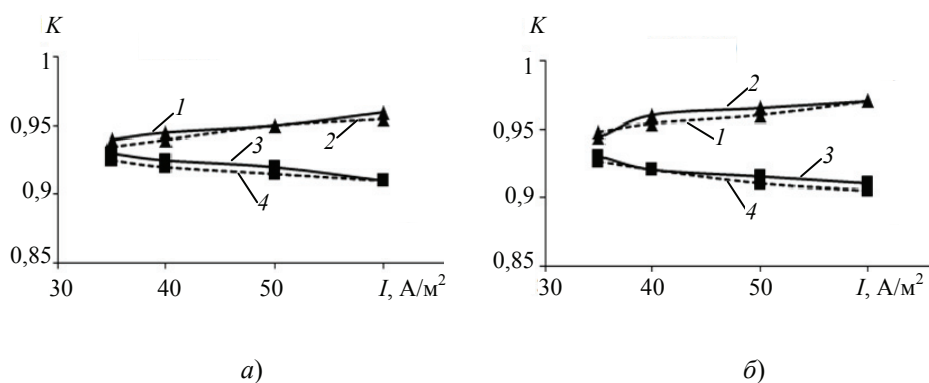


Рис. 7. Зависимости коэффициента задержания от плотности тока при  $P = 4$  МПа катионов Cd(II) прианодной (1, 2) и прикатодной (3, 4) мембран МГА-95 (а), МГА-100 (б)



**Рис. 8.** Зависимости коэффициента задержания от плотности тока при  $P = 4$  МПа катионов Fe(II) прианодной (1, 2) и прикатодной (3, 4) мембран МГА-95 (а), МГА-100 (б)

Анализируя зависимости удельного потока от концентрации (см. рис. 2), можно заметить, 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.

Рассматривая зависимости удельного потока растворителя от плотности тока (см. рис. 3), необходимо отметить 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 следующего вида [9]

$$J = k(\Delta P - (k_1 + i^m k_2)C) \exp(k_3 C^n) \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (3)$$

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

В таблице 1 представлены значения эмпирических коэффициентов для уравнения (3).

Анализируя зависимости коэффициента задержания от градиента давления (см. рис. 4), можно отметить увеличение коэффициента задержания с ростом давления, так как увеличивается усилие на активный слой мембраны, которая в результате деформации уплотняется [10, 11].

Анализ зависимостей (см. рис. 5), показал, что с ростом концентрации растворов для всех исследуемых веществ коэффициенты задержания незначительно уменьшаются, что характерно для электрохимического мембранного разделения разбавленных растворов.

Коэффициент задержания также находится в линейной зависимости от плотности тока (см. рис. 6 – 8), однако отмечается различное поведение кривых коэффициента задержания для прианодных и прикатодных мембран. Данное явление вызвано «блокировкой» пор прикатодных мембран за счет отвода основной группы ионов [12].

Таблица 1

**Значения эмпирических коэффициентов уравнения (3)**

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

Для теоретического расчета коэффициента задержания с наложением электрического тока получено выражение следующего вида [13]

$$K = 1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{k_1 k_p} - 1 \right) \left[ 1 - \exp\left( -\frac{k_2 J k_p i \eta}{D k_p i \eta} \right) \right] \exp(-k_3 J)} \quad (4)$$

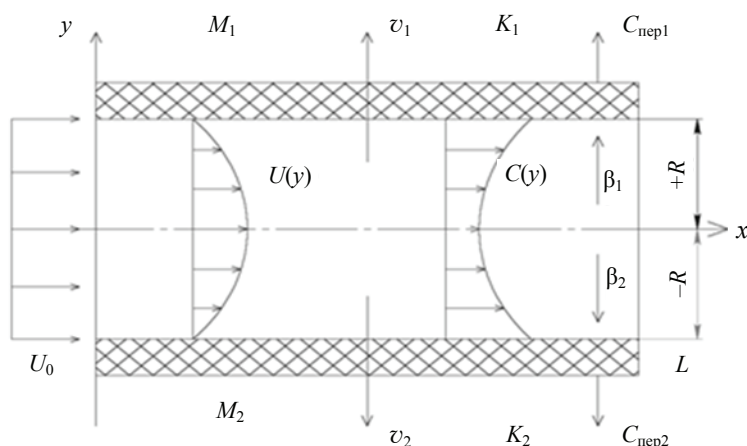
где  $k_1, k_2, k_3$  – эмпирические коэффициенты;  $\eta$  – выход по току;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

В таблице 2 представлены значения эмпирических коэффициентов для уравнения (4).

Таблица 2

**Значения эмпирических коэффициентов уравнения (4)**

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
Fe(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



**Рис. 9. Схема разделения раствора в межмембранном канале электрохимического мембранного аппарата:**

$M_1, M_2$  – обратноосмотические мембраны;  $L$  – длина межмембранного канала, м;  $R$  – полувысота межмембранного канала, м;  $C_{пер1}, C_{пер2}$  – концентрация разделяемого раствора и пермеата соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $U_0$  – скорость потока раствора, м/с;  $v_1, v_2$  – скорости потока пермеата, м/с;  $\beta_1, \beta_2$  – коэффициенты массоотдачи от раствора к мембране, м<sup>2</sup>/с;  $K_1, K_2$  – коэффициенты задержания мембран

Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента задержания показало их удовлетворительное совпадение. Для математического описания массопереноса в электрохимических мембранных аппаратах разработана математическая модель, основанная на уравнении гидродинамики движения раствора и уравнении конвективной диффузии в канале. Схема разделения раствора в межмембранном канале электрохимического мембранного аппарата представлена на рис. 9.

В модели приняты следующие допущения: диффузионное сопротивление со стороны пермеата незначительно; стенки межмембранного канала плоскопараллельны; режим течения жидкости ламинарный  $Re < 2300$ ; насос обеспечивает постоянный расход раствора.

Математическая запись модели массопереноса в обратноосмотических аппаратах:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}; \quad (6)$$

$$U \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}, \quad (7)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость раствора, м<sup>2</sup>/с.

Начальные и граничные условия:

$$C(0, y) = C_{исх}; \quad (8)$$

$$U(x, R/2) = 0; \quad U(x, 0) = 0; \quad (9)$$

$$K_1 C(x, R/2) v(x, R/2) = D \frac{\partial C(x, R/2)}{\partial y}; \quad K_2 C(x, 0) v(x, 0) = D \frac{\partial C(x, 0)}{\partial y}, \quad (10)$$

где  $K_1(x)$ ,  $K_2(x)$  – коэффициенты задержания для обратноосмотических мембран, которые определяют по формуле

$$K(x) = 1 - \frac{C_{\text{пер}}(x)}{C(x, b/2)}; \quad (11)$$

$C(x, R/2)$  – концентрация растворенного вещества у поверхности мембран со стороны канала; для рассматриваемого обратноосмотического аппарата задача симметрична, то есть  $K_1(x) = K_2(x)$ , вследствие того, что мембраны одинаковы.

Выражение для продольной скорости раствора, получаемое из уравнения движения жидкости в межмембранном канале, имеет следующий вид [14]

$$U(x, R/2) = -\frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) \left( (R/2)^2 - y^2 \right). \quad (12)$$

Скорость фильтрации, полученная из уравнения проницаемости, имеет следующий вид

$$v = K \Delta P_{\text{H}} - \frac{\text{sh}(\sqrt{\lambda}(L-x)) + \text{ash}(x\sqrt{\lambda})}{\text{sh}(L\sqrt{\lambda})}, \quad (13)$$

где  $\lambda = -\frac{3\mu k}{(R/2)^3}$ ;  $a = \frac{\Delta P_{\text{K}}}{\Delta P_{\text{H}}}$ ;  $\Delta P_{\text{H}}$ ,  $\Delta P_{\text{K}}$  – начальный и конечный перепады трансмембранного давления соответственно, МПа.

Выражение для перепада давления по длине канала имеет следующий вид

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial x} = \frac{\Delta P_{\text{H}} \sqrt{\lambda}}{\text{sh}(L\sqrt{\lambda})} \left[ \text{ch}(\sqrt{\lambda}(L-x)) - \text{ach}(x\sqrt{\lambda}) \right]. \quad (14)$$

Используя уравнения (12) – (14) в уравнении конвективной диффузии (7), получаем конечную задачу

$$f_1(x) \left( (R/2)^2 - y^2 \right) \frac{\partial C}{\partial x} + f_2(x) \frac{\partial C}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}, \quad (15)$$

граничные условия:

$$C(x, R/2) f_2(x) = m \frac{\partial C(x, R/2)}{\partial y}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial C(x, 0)}{\partial y} = 0; \quad (17)$$

$$C_0(0, y) = C_0, \quad (18)$$

где



$$f_1(x) = \frac{\sqrt{|\lambda|}}{2\mu} [\operatorname{ch}(\sqrt{|\lambda|}(L-x)) - \operatorname{ach}(x\sqrt{|\lambda|})]; \quad (19)$$

$$f_2(x) = K [\operatorname{ch}(\sqrt{|\lambda|}(L-x)) + \operatorname{ach}(x\sqrt{|\lambda|})]; \quad (20)$$

$$\varepsilon = \frac{D \operatorname{sh}(L\sqrt{|\lambda|})}{\Delta P_K}; \quad (21)$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial x} = \frac{D \operatorname{sh}(L\sqrt{|\lambda|})}{K \Delta P_H}. \quad (22)$$

Полученная система уравнений (15) – (18) решается методом конечных разностей с нахождением поля концентраций  $C(x, y)$ . Для решения была составлена программа счета (на языке Delphi), реализованная на персональном компьютере. Зная поле концентраций  $C(x, y)$  можно рассчитать локальные эффективные коэффициенты массоотдачи по длине канала по уравнению

$$\beta = \frac{D \frac{\partial C(x, R/2)}{\partial y}}{C(x, R/2) - \tilde{C}(x)}, \quad (23)$$

где  $\tilde{C}(x)$  – средняя по сечению концентрация раствора в межмембранном канале, кг/м<sup>3</sup>,

$$\tilde{C}(x) = \frac{1}{b\tilde{U}} \int C(x, y) U(y) dy, \quad (24)$$

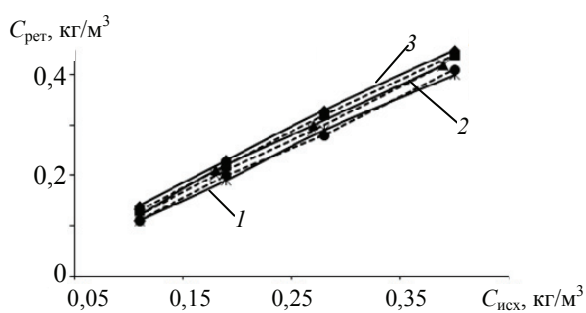
где  $\tilde{U}$  – средняя скорость потока жидкости в межмембранном канале, м/с,

$$\tilde{U} = \frac{1}{b} \int U(x, y) dy. \quad (25)$$

Проверку адекватности разработанной математической модели осуществляли путем сравнения экспериментальных данных и расчетных значений. Разработанная математическая модель в процессе счета позволяет получить среднее значение концентрации на выходе из элемента и величины локальных эффективных коэффициентов массоотдачи по длине межмембранного канала.

Сравнение проводилось по концентрационным зависимостям ретентата от концентрации исходного раствора при различных скоростях потока раствора в межмембранном канале. При проверке использовали экспериментальные данные, полученные при разделении модельных растворов сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов Fe(II), Cd(II), Pb(II): FeSO<sub>4</sub>, CdSO<sub>4</sub>, Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> на лабораторной электрохимической мембранной установке с мембраной МГА-95.

Эксперименты проводились на однокомпонентных растворах при различном трансмембранном давлении растворов. Результаты экспериментов и расчетных данных представлены зависимостями концентраций ретентата от концентрации исходного раствора при различном трансмембранном давлении (рис. 10). Совпадение расчетных и экспериментальных величин не превышает 15 %, что свидетельствует о приемлемой адекватности разработанной математической модели реальным процессам массопереноса в электрохимических мембранных аппаратах.



**Рис. 10. Сравнение расчетных (пунктирные линии) и экспериментальных (сплошные линии) концентрационных зависимостей от давления  $P$ , МПа, при температуре  $T = 293$  К для раствора Fe(II):**  
 $1 - 2,0$ ;  $2 - 3,0$ ;  $3 - 4,0$

Представленная математическая модель применялась для разработки инженерной методики расчета как электрохимических, так и обратноосмотических установок. Для инженерных расчетов предельную плотность тока оценивали по следующему уравнению

$$i_{\text{пр}} = \frac{FDC_{\text{исх}}}{(\bar{i} - t)d_{\text{экв}}} k \text{Re}^n \text{Pr}^m, \quad (26)$$

где  $\text{Re}$  – критерий Рейнольдса;  $\text{Pr}$  – критерий Прандтля;  $F$  – число Фарадея;  $C_{\text{исх}}$  – концентрация раствора,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\bar{i}, t$  – числа переноса в мембране и растворе соответственно;  $d_{\text{экв}}$  – характерный размер, м;  $m, n$  – экспериментальные постоянные.

Площадь мембраны определяли, используя основное уравнение массопередачи

$$F_M = M / \Delta P k. \quad (27)$$

Коэффициент массопередачи найдем по следующему выражению

$$k = \left( \frac{1}{\beta} + \frac{\delta}{P_d} \right)^{-1}, \quad (28)$$

где  $\delta$  – толщина мембраны, м;  $P_d$  – диффузионная проницаемость,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Оценив рабочую площадь одного разделяющего элемента и при условии, что аппарат включает в себя два элемента, рассчитаем общее число аппаратов в мембранной установке

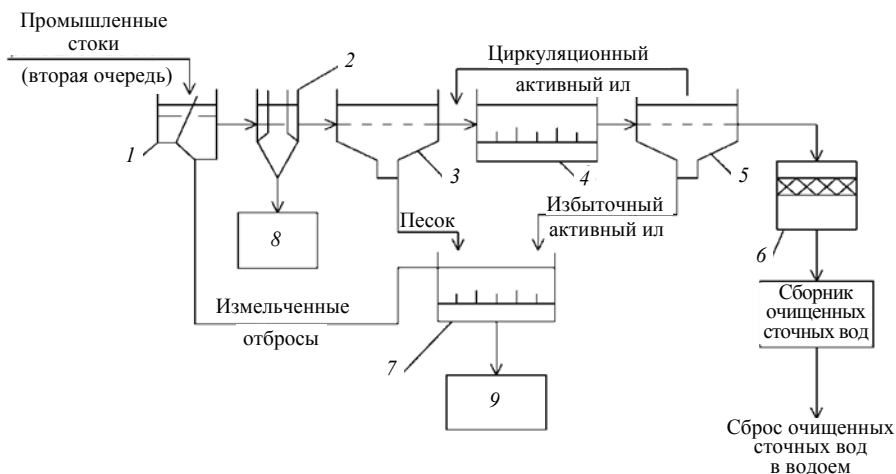
$$n = F / 2F_3. \quad (29)$$

Экономическую эффективность электрохимической мембранной установки находили через общий расход энергии, необходимый для ведения процесса разделения по следующей формуле

$$W_3 = V_{\text{р.р}} P / K_{\text{КПД}}, \quad (30)$$

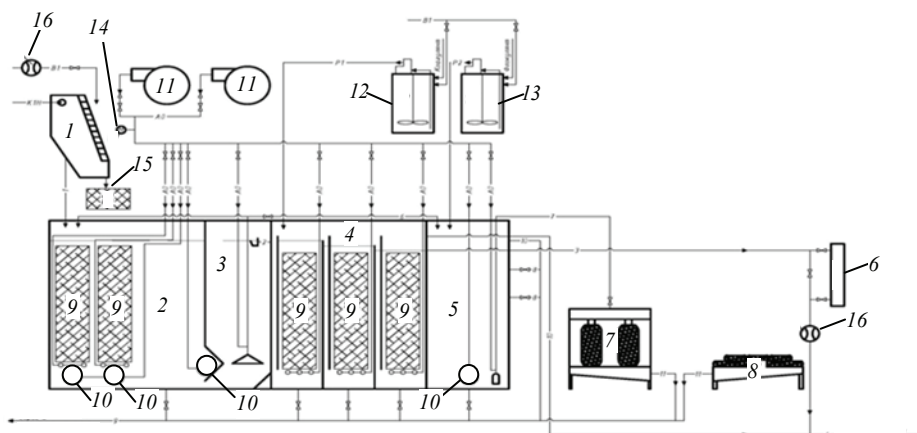
где  $V_{\text{р.р}}$  – объем разделяемого раствора,  $\text{м}^3$ ;  $P$  – рабочее давление, МПа.

Сравнение с другими методами разделения, например, дистилляцией, показывает, что затраты энергии при мембранном разделении в 10 – 15 раз меньше. Предложенная на основе математической модели массопереноса инженерная методика расчета может использоваться при технологическом расчете электрохимических мембранных аппаратов, применяемых в процессах разделения сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов Fe(II), Cd(II) и Pb(II).



**Рис. 11. Модернизированная схема очистных сооружений  
ОАО «РКС Тамбовводоканал»:**

1 – решетки; 2 – горизонтальные песколовки с круговым движением воды;  
3 – первичный радиальный отстойник; 4 – аэротенк-вытеснитель с естественной аэрацией; 5 – вторичный радиальный отстойник; 6 – промышленная электрохимическая мембранная установка; 7 – аэробный стабилизатор; 8 – песковые площадки;  
9 – иловые площадки



**Рис. 12. Модернизированная технологическая схема КОС-50:**

1 – самоочищающаяся решетка (СОР); 2 – биореактор; 3 – вторичный отстойник;  
4 – биореактор доочистки; 5 – аэробный илоуплотнитель-стабилизатор; 6 – электробаромембранный аппарат; 7 – мешковый обезвоживатель; 8 – поддон для мешков; 9 – кассета с синтетической загрузкой; 10 – аэратор мелкопузырчатый; 11 – воздушовулка; 12 – узел приготовления и дозации раствора коагулянта; 13 – узел приготовления и дозации раствора флокулянта; 14 – манометр; 15 – лоток для сбора кека; 16 – расходомер

На основе проведенных исследований по электрохимическому мембранному разделению промышленных сточных вод, отобранных на очистных сооружениях Тамбовводоканал филиала ОАО «Тамбовские коммунальные системы» (г. Тамбов), сделаны выводы о возможности применения метода электрохимического разделения и модернизации существующей технологической схемы с внедрением в нее стадии мембранного разделения. Результаты проведенных исследований и модернизированная технологическая схема (рис. 11) очистки промышленных сточных вод предложены ОАО «РКС Тамбовводоканал» (г. Тамбов) для проектирования очистных сооружений с использованием выпускаемого отечественного мембранного оборудования.

В результате исследований по электрохимическому мембранному разделению сточных вод предложено модернизировать технологическую схему канализационных очистных сооружений КОС-50, принципиальным отличием которой является замена установки ультрафиолетового обеззараживания электробаромембранным аппаратом (рис. 12). Отмечено, что с помощью наложения электрического поля можно эффективно управлять процессом электрохимического мембранного разделения исследуемых технологических растворов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания № 1222.*

#### *Список литературы*

1. Родионов, А. И. Технологические процессы экологической безопасности / А. И. Родионов, В. Н. Клущин, В. Г. Систер. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. – 800 с.
2. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении / А. М. Когановский [и др.]. – М.: Химия, 2005. – 288 с.
3. Шапошник, В. А. История мембранной науки. Ч. 2. Баромембранные и электромембранные процессы / В. А. Шапошник // Крит. технологии. Мембраны. – 2001. – № 10. – С. 9 – 17.
4. Removal of Arsenic and Pesticides from Drinking Water by Nanofiltration Membranes. Sep Purification Technol / K. Kosutic [et al.] // Separation and Purification Technology. – 2005. – Vol. 42, No. 2. – P. 137 – 144.
5. Кинетика электробаромембранного разделения водных сульфатосодержащих растворов / С. И. Лазарев [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 29 – 34.
6. Дубяга, В. П. Нанотехнологии и мембраны / В. П. Дубяга, И. Б. Бесфамильный // Крит. технологии. Мембраны. – 2005. – № 3. – С. 11 – 16.
7. Дытнерский, Ю. И. Мембранные процессы разделения жидких смесей: учебное пособие / Ю. И. Дытнерский // – М.: Химия, 1995. – 232 с.
8. Лазарев, К. С. Исследование кинетических коэффициентов обратно-осмотического разделения растворов на мембранах МГА-95, МГА-100, ОПМ-К / К. С. Лазарев, С. В. Ковалев, А. А. Арзамасцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 3. – С. 726 – 734.
9. Лазарев, С. И. Теоретические и прикладные основы электробаромембранных методов разделения многокомпонентных растворов: учебное пособие / С. И. Лазарев. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – 104 с.

10. Шапошник, В. А. Мембранная электрохимия / В. А. Шапошник // Смазочно-охлаждающая жидкость. – 2002. – № 8. – С. 38 – 42.

11. Акулинчев, А. М. Исследование электробаромембранного разделения промышленных технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов Pb, Ca, Fe / А. М. Акулинчев, О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 120 – 128.

12. Березина, Н. П. Модельное описание электротранспорта воды в ионообменных мембранах / Н. П. Березина, Н. П. Гнусин, О. А. Дёмина // Электрохимия. – 1990. – Т. 26, № 9. – С. 1098 – 1104.

13. Хорохорина, И. В. Кинетика и структурные характеристики мембран электроультрафильтрационной очистки промышленных растворов от анионных поверхностно-активных веществ: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. технич. наук (12.12.2014) / И. В. Хорохорина; Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2014. – 130 с.

14. Лойцянский, Н. Г. Механика жидкости и газа / Н. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1987. – 840 с.

---

## Kinetic Dependencies and Technological Effectiveness of Electrochemical Membrane Separation of Sewage Waters at Enterprises

O. A. Abonosimov<sup>1</sup>, M. A. Kuznetsov<sup>1</sup>, O. A. Kovaleva<sup>1</sup>,  
V. M. Polikarpov<sup>2</sup>, V. M. Dmitriev<sup>3</sup>

*Department of Applied Geometry and Computer Graphics (1); Department of Physics (2);  
Department of Security and Law (3), TSTU, Tambov, Russia;  
geometry@mail.nnn.tstu.ru*

**Keywords:** kinetic dependencies; membrane; separation; electric baromembrane apparatus.

**Abstract:** The possibility of using electrochemical membrane separation of solutions during the purification of wastewaters from heavy metal ions is considered. In order to study the influence of the parameters of the separation process on the main kinetic characteristics, the experimental studies of the specific productivity and retention factor of the MGA-95 and MGA-100 membranes were carried out for the treatment of process waters from heavy metal ions Fe(II), Cd(II), Pb(II). A mathematical model of the kinetics of mass transfer during electrochemical membrane separation has been developed. It is used in the calculation procedure of an electrochemical membrane apparatus for removing heavy-metal ions from sewage. The designed and modernized process schemes for wastewater treatment are proposed.

### References

1. Rodionov A.I., Klushnn V.N., Sister V.G. *Tekhnologicheskie protsessy ekologicheskoi bezopasnosti* [Technological processes of ecological safety], Kaluga: izd-vo N. Bochkarevoi, 2000, 800 p. (In Russ.)

2. Koganovskii A.M., Klimenko A.N., Levchenko T.M., Roda I.G. *Ochistka i ispol'zovanie stochnykh vod v promyshlennom vodosnabzhenii* [Wastewater treatment and use in industrial water supply], Moscow: Khimiya, 2005, 288 p. (In Russ.)

3. Shaposhnik V.A. [History of membrane science. part 2. baromembrane and electromembrane processes], *Kriticheskie tekhnologii. Membrany* [Critical Technologies. Membranes], 2001, no. 10, pp. 9-17. (In Russ.)

4. Kosutic K., Furac L., Sipos L., Kunst B. Removal of Arsenic and Pesticides from Drinking Water by Nanofiltration Membranes, *Separation and Purification Technology*, 2005, vol. 42, no. 2, pp. 137-144.

5. Lazarev S.I., Gorbachev A.S., Kormil'tsin G.S., Abonosimov O.A. [Kinetics of electrobarromembrane separation of aqueous sulfate-containing solutions], *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznye granitsy* [Condensed Media and Interface Boundaries], 2008, vol. 10, no. 1, pp. 29-34. (In Russ.)

6. Dubyaga, V.P., Besfamil'nyi I. B. Nanotechnologies and membranes, *Kriticheskie tekhnologii. Membrany* [Critical Technologies. Membranes], 2005, no. 3, pp. 11-16. (In Russ.)

7. Dytner'skii Yu.I. *Membrannyye protsessy razdeleniya zhidkikh smesey: uchebnoe posobie* [Membrane processes of separation of liquid mixtures. Textbook], Moscow: Khimiya, 1995, 232 p. (In Russ.)

8. Lazarev K.S., Kovalev S.V., Arzamastsev A.A. [Study of the Kinetic Coefficients of Reverse-Osmotic Separation of Solutions on Membranes MGA-95, MGA-100, OPM-K], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 726-734. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Lazarev S.I. [Theoretical and Applied Fundamentals of Electrobarome-Brane Methods for Separation of Multicomponent Solutions. Textbook], *Transactions of the Tambov State Technical University*, Tambov: 2008, 104 p. (In Russ.)

10. Shaposhnik V.A. [Membrane Electrochemistry], *Smazochno-okhlazhdayushchaya zhidkost'* [Lubricating-cooling Liquid], 2002, no. 8, pp. 38-42. (In Russ.)

11. Akulinchev A.M., Abonosimov O.A., Lazarev S.I. [Investigation of the Electrobarromembrane Separation of Industrial Process Solutions Containing Heavy Metal Ions Pb, Ca, Fe], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 120-128. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Berezina N.P., Gnusin N.P., Demina O.A. [Model description of electric water transport in ion-exchange membranes], *Elektrokimiya* [Electrochemistry], 1990, vol. 26, no. 9, pp. 1098-1104. (In Russ.)

13. Khorokhorina I.V. *Kinetika i strukturnyye kharakteristiki membran elektrolit'nykh i anionnykh ochistki promyshlennykh rastvorov ot anionnykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Kinetics and structural characteristics of membranes of electro-ultrafiltration purification of industrial solutions from anionic surfactants: the author's abstract of dissertations for the academic degree of candidate of technical sciences], Tambov, 2014, 130 p. (In Russ.)

14. Loitsyanskii N.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas], Moscow: Nauka, 1987, 840 p. (In Russ.)

---

## **Kinetische Abhängigkeiten und technologische Effizienz der elektrochemischen Membrantrennung der Abwasserentsorgungsanlagen**

**Zusammenfassung:** Es ist die Möglichkeit der Anwendung der elektrochemischen Membrantrennung der Lösungen bei der Reinigung technologischer Abwässer von Schwermetallionen betrachtet. Um die Wirkung der Parameter des Trennprozesses auf die kinetischen Haupteigenschaften zu untersuchen, sind experimentelle Studien spezifischer Leistung und Studien des Koeffizienten der Membranretention MGA-95 und MGA-100 bei der Reinigung technologischer Abwässer von Schwermetallionen Fe(II), Cd(II), Pb(II). durchgeführt. Es ist ein mathematisches Modell der Massentransferkinetik bei der elektrochemischen Membrantrennung ausgearbeitet, das in dem Verfahren der Berechnung der elektrochemischen Membranvorrichtung für Entfernung der Schwermetallionen aus Abwasser benutzt wird. Es sind die entwickelten und modernisierten technologischen Schemas der Abwasserreinigung durch Kläranlagen zur Verwendung. vorgeschlagen.

## **Dépendances cinétiques et efficacité technologique de la séparation électrochimique de membrane des entreprises de rectification des eaux usées**

**Résumé:** Est considérée la possibilité de l'application de la séparation électrochimique de membrane des solutions lors de la rectification des eaux technologiques des ions de métaux lourds. Afin d'étudier l'influence des paramètres de la réalisation du processus de la séparation suivant les caractéristiques cinétiques principales sont effectuées les études expérimentales de la productivité spécifique et du coefficient de la détention des membranes AR-95 et AR-100 lors de la rectification des eaux technologiques des ions de métaux lourds Fe(II), Cd(II), Pb(II). Est élaboré un modèle mathématique de la cinétique du transfert de masse lors de la séparation électrochimique de membrane utilisé dans la méthode de calcul de l'appareil électrochimique de membrane pour l'élimination des ions des métaux lourds à partir des eaux usées. Sont proposés des schémas technologiques conçus et modernisés pour le traitement des eaux usées des installations d'épuration.

---

**Авторы:** *Абоносимов Олег Аркадьевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Кузнецов Михаил Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Ковалева Ольга Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика»; *Поликарпов Валерий Михайлович* – доктор химических наук, профессор кафедры «Физика»; *Дмитриев Вячеслав Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность и правопорядок», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---