

## СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕМБРАН И КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОНАНОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОЦЕССА ЛАТУНИРОВАНИЯ

И.В. Хорохорина, С.И. Лазарев, Ю.М. Головин, Д.С. Лазарев

Ирина Владимировна Хорохорина \*

Кафедра природопользования и защиты окружающей среды, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, Тамбов, Российская Федерация, 392000

E-mail: kotelnikovirina@yandex.ru \*

Сергей Иванович Лазарев

Кафедра прикладной геометрии и компьютерной графики, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, Тамбов, Российская Федерация, 392000

E-mail: lazarev.sergey.1962@mail.ru

Юрий Михайлович Головин

Кафедра физики, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, Тамбов, Российская Федерация, 392000

E-mail: golovin\_um@mail.ru

Дмитрий Сергеевич Лазарев

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, ул. Интернациональная, 33, Тамбов, Российская Федерация, 392000

E-mail: dimamt2010@mail.ru

*Исследованы основные структурные характеристики мембран и кинетические зависимости электронанофильтрационного разделения сточных вод процесса латунирования. Рассчитаны коэффициент задержания и удельный выходной поток для прианодной и прикатодной мембраны. Проанализированы зависимости коэффициента задержания и удельного выходного потока от трансмембранного давления и плотности тока и отмечается, что прианодная мембрана в результате наложения на систему «мембрана-раствор» постоянного электрического потенциала начинает закупориваться, и на ее поверхности образуется слой осадка из-за протекания электрохимического процесса. Приведено сравнение задерживающей способности мембран ОПМН-П и ОПМН-К для реального отработанного технологического раствора после процесса латунирования и модельного раствора, содержащего такие же концентрации ионов меди ( $\text{Cu}^{2+}$ ) и цинка ( $\text{Zn}^{2+}$ ), как и в реальном стоке. Исследованы и проанализированы структурные характеристики нанофильтрационных мембран типа ОФАМ-К и ОПМН-П. Рассмотрены изменения кристаллической и аморфной фазы активного слоя и подложки мембраны. Изменение кристаллических параметров в кристаллитах можно объяснить лишь особенностями строения макромолекул полиамида и их ориентацией при кристаллизации. Под действием трансмембранного давления и транспорта молекул воды происходит полиморфизм упаковки кристаллической решетки. Плотность упаковки аморфных фаз рабочей мембраны уменьшается, что влияет на транспортные и селективные свойства мембраны. Фактически деформация аморфно-кристаллического полимера приводит к перестройке структуры не только в ориентации макромолекул аморфной, но и кристаллической фазах мембран. Также отмечено, что плотность упаковки аморфных фаз рабочей мембраны уменьшается, что влияет на транспортные и селективные свойства мембраны.*

**Ключевые слова:** удельный выходной поток, коэффициент задержания, структура мембраны, электронанофильтрация

## STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF MEMBRANES AND KINETIC DEPENDENCES OF ELECTRONANOFILTRATION WASTE WATER TREATMENT OF LATINATING PROCESS

I.V. Khorokhorina, S.I. Lazarev, Yu.M. Golovin, D.S. Lazarev

Irina V. Khorokhorina \*

Department of Nature Management and Environmental Protection, Tambov State Technical University, Sovetskaya st., 106, Tambov, 392000, Russia  
E-mail: kotelnikovirina@yandex.ru \*

Sergey I. Lazarev

Department of Applied Geometry and Computer Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya st., 106, Tambov, 392000, Russia  
E-mail: lazarev.sergey.1962@mail.ru

Yuri M. Golovin

Department of Physics, Tambov State Technical University, Sovetskaya st., 106, Tambov, 392000, Russia  
E-mail: golovin\_um@mail.ru

Dmitry S. Lazarev

Tambov State University named G.R. Derzhavin, Internationalnaya st., 33, Tambov, 392000, Russia  
E-mail: dimamt2010@mail.ru

*The basic structural characteristics of the membrane and kinetic dependences of the electron-filtration separation of wastewater of the brassing process are investigated. The retention factor and the specific output flow for the near-anode and near-cathode membrane were calculated. The dependences of the retention factor and the specific output flow on the transmembrane pressure and current density are analyzed, and it is noted that the anode membrane as a result of the application of a constant electric potential to the membrane-solution system starts to clog and a sludge layer forms on its surface due to the electrochemical process. A comparison is made of the retention capacity of OPMN-P and OPMN-K membranes for a real spent technological solution after the process of brazing and a model solution containing the same concentrations of copper ions ( $\text{Cu}^{2+}$ ) and zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ) as in real runoff. The structural characteristics of nanofiltration membranes of the type OFAM-K and OPMN-P were studied and analyzed. Changes in the crystalline and amorphous phases of the active layer and the membrane substrate are considered. The change in crystalline parameters in crystallites can be explained only by the structural features of macromolecules of polyamide and their orientation during crystallization. Under the action of transmembrane pressure and transport of water molecules, the polymorphism of the packing of the crystal lattice occurs. The packing density of the amorphous phases of the working membrane decreases, which affects the transport and selective properties of the membrane. In fact, the deformation of an amorphous-crystalline polymer leads to a restructuring of the structure not only in the orientation of the macromolecules of the amorphous, but also the crystalline phases of the membranes. It was also noted that the packing density of the amorphous phases of the working membrane decreases, which affects the transport and selective properties of the membrane.*

**Key words:** specific output flux, retention coefficient, membrane structure, electronnanofiltration

### Для цитирования:

Хорохорина И.В., Лазарев С.И., Головин Ю.М., Лазарев Д.С. Структурные характеристики мембран и кинетические зависимости электронанофильтрационной очистки сточных вод процесса латунирования. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 7. С. 95–102

### For citation:

Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Lazarev D.S. Structural characteristics of membranes and kinetic dependences of electronnanofiltration waste water treatment of latinating process. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 7. P. 95–102

## ВВЕДЕНИЕ

В гальванической промышленности только 30-40% использованных металлов фактически наносятся на изделия, в то время как остальные остаются в технологической воде в форме ионов [1-3].

Наиболее распространенным процессом очистки таких сточных вод является химическое осаждение, при котором ионы тяжелых металлов сначала образуют сульфиды, гидроксиды или другие соли путем добавления определенных реагентов, а затем осаждаются из сточных вод. После этого осадки отделяются от воды путем фильтрации, оставляя стоки с очень низкой концентрацией ионов тяжелых металлов [4, 5].

В работе [6] рассматривается использование сорбента на основе доломитового сырья для очистки сточных вод, содержащих ионы  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ . Результаты исследования сорбционных свойств природного модифицированного материала показывают, что это высокоэффективный сорбент, являющийся относительно дешевым природным минералом, может обеспечить очистку от комплексного загрязнения ионами тяжелых металлов до необходимых параметров при регенерации оборотной воды, но его свойства резко снижаются в кислых средах.

Также для сточных вод гальванических производств применяется ионообменная очистка [4, 7-9]. Этот метод эффективен только при низких концентрациях тяжелых металлов в растворах и требует предварительного отделения органических веществ.

Последние направления исследований, которые сосредоточены главным образом на различных технологиях (экстракция жидкость-жидкость, нанофильтрация, электродиализ, обратный осмос, ионный обмен и т. д.), разрабатываются с целью извлечения как металлов, так и кислот [10-14]. С точки зрения экологических проблем, необходим процесс очистки сточных вод, который позволит полностью возвращать очищенную воду в производственные линии. По сравнению с другими процессами электромембранные характеризуются высокой эффективностью разделения и низкими капитальными и эксплуатационными затратами на проведение процесса. Поэтому целью данной работы является исследование кинетических и структурных характеристик электронанофильтрационной регенерации сточных вод процесса латунирования.

В качестве объектов исследования были выбраны сточные воды от процесса латунирования предприятия ОАО «Электроприбор», г. Тамбов, содержащие ионы меди в концентрации

1030 мг/л и ионы цинка в концентрации 460 мг/л, модельные растворы с такими же концентрациями ионов и нанофильтрационные мембраны, производство ЗАО «Владипор», г. Владимир.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения кинетических характеристик нанофильтрационных мембран исследовались такие параметры, как коэффициент задержания и удельный выходной поток растворителя [15, 16].

$$R = 1 - \frac{C_{пер}}{C_{исх}}, \quad (1)$$

где  $R$  – коэффициент задержания;  $C_{пер}$  – концентрация растворенного вещества в пермеате, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{исх}$  – концентрация растворенного вещества в исходном растворе, кг/м<sup>3</sup>.

$$J = \frac{V}{F \cdot \tau}, \quad (2)$$

где  $V$  – объем пермеата, м<sup>3</sup>;  $F$  – рабочая площадь мембран, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время проведения эксперимента, с.

С целью более детального исследования механизма разделения отработанных технологических растворов после процесса латунирования были исследованы изменения степени кристалличности и аморфности полимерных нанофильтрационных мембран с использованием дифрактометра типа ДРОН, который измеряет параметры в широком диапазоне углов рассеивания. Эксперимент по исследованию кристалличности полимерных мембран проводился в диапазоне сканирования от 2° до 40°. Использовалась медная рентгеновская трубка ( $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda = 1,545 \text{ \AA}$ ), рабочее напряжение Ni-фильтра 30 кВ, ток канала 20 мА.

Исследовались сухие и влажные отработанные образцы мембран.

Степень кристалличности (СК) определяли по методике, детально описанной в работе [17, 18]. Для этого кривую распределения интенсивности рассеяния мембран разбивали на две части – кристаллические пики и рассеяния аморфной составляющей. Согласно [17], СК рассчитывали по отношению интегральной интенсивности кристаллических пиков к общей интенсивности под кривой рассеяния, за вычетом фонового рассеяния:

$$СК = \frac{I_0 - I_a}{I_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $I_0$  – интегральная интенсивность рассеяния под всей кривой рассеяния,  $I_a$  – интегральная интенсивность рассеяния под выделенной аморфной составляющей.

Расчет областей когерентного рассеяния (ОКР) проводили по соотношению Селякова – Шеррера [19, 20]:

$$L_{окр} = \frac{k\lambda}{\beta \cdot \cos 2\theta}, \quad (4)$$

где  $\beta$  – полуширина пика, радиан;  $\lambda = 1,542$  – длина волны рентгеновского излучения, Å;  $k = 0,94$  – безразмерный коэффициент (постоянная Шеррера);  $2\theta$  – угол дифракции.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные зависимости по удельному выходному потоку и задерживающей способности мембран ОПМН-П и ОПМН-К при проведении процесса электронанофильтрационного разделения растворов гальванических стоков представлены на рис. 1 и 2 по ионам:  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  при варьировании трансмембранного давлением и при постоянной плотности тока.

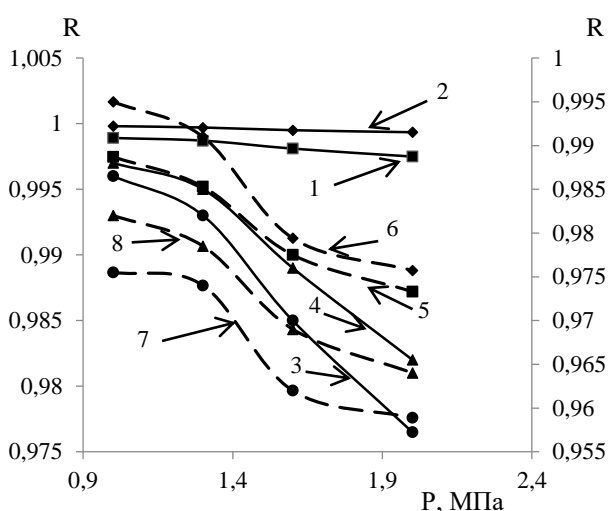


Рис. 1. Зависимость коэффициента задержания от давления при постоянной плотности тока  $12,8 \text{ A/m}^2$  для технологического раствора, содержащего ионы  $\text{Cu}$  в концентрации  $1,030 \text{ кг/м}^3$ , ионы  $\text{Zn}$  в концентрации  $0,460 \text{ кг/м}^3$  для прианодной (ПА) и прикатодной (ПК) мембран типа ОПМН-П (сплошная), ОПМН-К (штриховая): 1,5- ионы  $\text{Cu}$ , ПА; 2,6- ионы  $\text{Cu}$ , ПК; 3,7- ионы  $\text{Zn}$ , ПА; 4,8-ионы  $\text{Zn}$ , ПК

Fig. 1. Dependence of the retention coefficient on pressure at a constant current density of  $12.8 \text{ A/m}^2$  for a process solution containing  $\text{Cu}$  ions at a concentration of  $1.030 \text{ kg/m}^3$ ,  $\text{Zn}$  ions at a concentration of  $0.460 \text{ kg/m}^3$  for anode (PA) and cathode (PK) membranes of type OPNM-P (solid), OPNM-K (dashed line): 1, 5 -  $\text{Cu}$  ions, PA; 2,6  $\text{Cu}$  ions, PK; 3,7 -  $\text{Zn}$  ions, PA; 4,8-  $\text{Zn}$  ions, PK

Электробаромембранное разделение гальванического раствора на мембранах ОПМН-П и ОПМН-К показало, что наблюдается миграционный перенос к прикатодной мембране преимущественно катионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , и отталкивание этих ионов от прианодной мембраны. Из экспериментальных данных, представленных на рис. 1 и 2, видно, что при незначительном повышении трансмембранного давления коэффициент задержания и удельный выходной поток для исследуемого раствора почти не изменяется. А при увели-

чении трансмембранного давления выше  $1,5 \text{ МПа}$  идет резкое увеличение по коэффициенту задержания и удельному выходному потоку. При проведении электронанофильтрационного процесса разделения исследуемый раствор нагревается, снижается его вязкость, что ведет к увеличению удельного выходного потока, что отмечается в [21]. Также с повышением давления увеличивается усилие на активный слой мембраны, которая в результате деформации уплотняется.

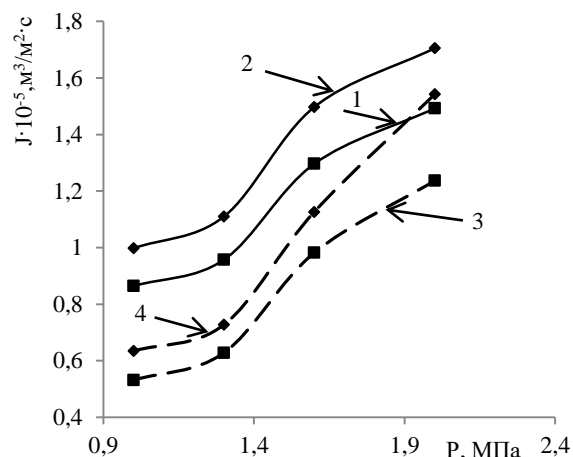


Рис. 2. Зависимость удельного выходного потока от трансмембранного давления при постоянной плотности тока  $12,8 \text{ A/m}^2$  для технологического раствора, содержащего ионы  $\text{Cu}$  в концентрации  $1,030 \text{ кг/м}^3$ , ионы  $\text{Zn}$  в концентрации  $0,460 \text{ кг/м}^3$  для прианодной (ПА) и прикатодной (ПК) мембран типа ОПМН-П (сплошная), ОПМН-К (штриховая): 1, 3 - ПА; 2, 4 - ПК

Fig. 2. Dependence of the specific output flux on pressure at a constant current density of  $12.8 \text{ A/m}^2$  for a process solution containing  $\text{Cu}$  ions at a concentration of  $1.030 \text{ kg/m}^3$ ,  $\text{Zn}$  ions at a concentration of  $0.460 \text{ kg/m}^3$  for anode (PA) and cathode (PK) membranes of type OPNM-P (solid), OPNM-K (dashed line): 1, 3 - PA; 2, 4 - PK

Экспериментальные зависимости задерживающей способности мембран ОПМН-П и ОПМН-К при проведении процесса электронанофильтрационного разделения растворов гальванических стоков представлены на рис. 3 по ионам:  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  при варьировании плотности тока и при постоянном трансмембранном давлении.

Из экспериментальных данных, изображенных на рис. 3, видно, что с увеличением плотности электрического тока коэффициент задержания падает как для прианодных, так и для прикатодных мембран по обоим видам исследуемых ионов. В начальные моменты времени соли, содержащие ионы цинка и меди, в растворе интенсивно диссоциируют на ионы. Анионы активно переносятся сквозь поры мембраны и в виде кислоты отводятся в раствор прианодного пермеата, далее при постепенном нагреве раствора за счет

разогрева прикатодного электрода происходит электрохимическая реакция образования гидроксида цинка на этом электроде в виде нерастворимого осадка. Постепенный нагрев оставшегося в тракте ретентата заставляет его диссоциировать на ионы, далее выделяя через прианодную мембрану анион в виде раствора кислоты [21].

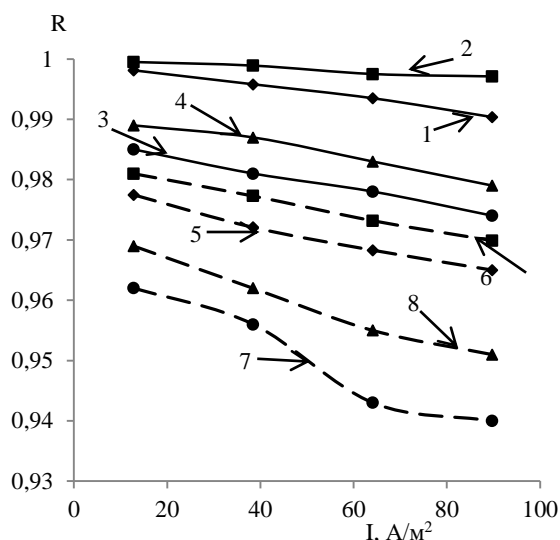


Рис. 3. Зависимость коэффициента задержания мембраны от плотности тока при постоянном трансмембранном давлении мембраны  $P=1,6$  МПа для технологического раствора, содержащего ионы Cu в концентрации  $1,030$  кг/м<sup>3</sup>, ионы Zn в концентрации  $0,460$  кг/м<sup>3</sup> для прианодной (ПА) и прикатодной (ПК) мембран типа ОПМН-П (сплошная), ОПМН-К (штриховая): 1, 5- ионы Cu, ПА; 2, 6- ионы Cu, ПК; 3, 7- ионы Zn, ПА; 4, 8- ионы Zn, ПК

Fig. 3. Dependence of the membrane retention coefficient on the current density at a constant working pressure of the membrane  $P=1.6$  MPa for a process solution containing Cu ions at a concentration of  $1.030$  kg/m<sup>3</sup>, Zn ions at a concentration of  $0.460$  kg/m<sup>3</sup> for anode (PA) and cathode (PK) membranes of type OPNM-P (solid), OPNM-K (dashed line): 1, 5 - Cu ions, PA; 2, 6 Cu ions, PC; 3, 7 - Zn ions, PA; 4, 8- Zn ions, PC

Транспортные и селективные свойства композиционных мембран во многом определяются структурой активного слоя и ее подложки. Поэтому на рис. 4 представлены рентгенограммы исходного образца мембран ОФАМ-К и ОПМН-П для подложки и активного слоя. Отметим, что на рентгенограмме подложки мембраны ОФАМ-К из фенилона С-4 регистрируются три интенсивные рефлекса при  $2\theta = 17,66^\circ$ ;  $22,8^\circ$ ;  $25,61^\circ$ , и малой интенсивности при  $2\theta = 20^\circ$  на фоне аморфного гало. Рентгеновская степень кристалличности составляет 57%. Активный слой мембраны ОФАМ-К является полностью аморфным с центром тяжести гало-рефлекса, при угле  $2\theta = 22^\circ$  [17] и совпадает с аморфным гало подложки (рис. 4).

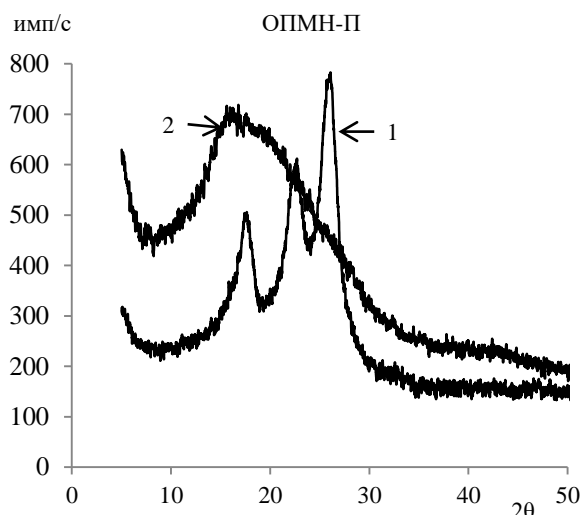


Рис. 4. Интенсивность рентгеновского рассеяния мембраны ОПМН-П: 1 – исходная, 2 – рабочая

Fig. 4. The intensity of X-ray scattering of the OPNM-P membrane: 1 – initial, 2 – working

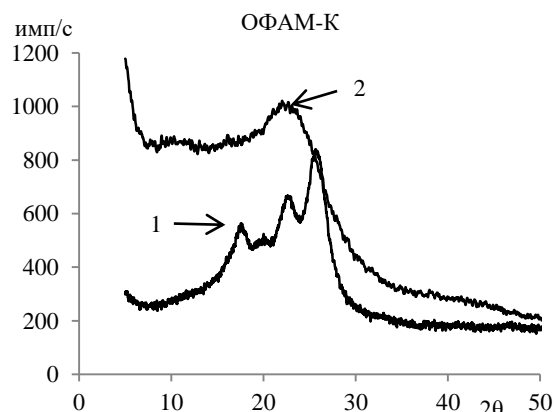


Рис. 5. Интенсивность рентгеновского рассеяния мембраны ОФАМ-К: 1 – исходная, 2 – рабочая

Fig. 5. The intensity of X-ray scattering of the OFAM-K membrane: 1 – initial, 2 – working

Рентгенограмма полиамидной подложки ОПМН-П мембраны имеет три интенсивные пика при углах  $2\theta = 17,9^\circ$ ;  $22,6^\circ$ ;  $25,95^\circ$  (рис. 4). Рентгеновская степень кристалличности составляет 70%. Активный слой из полипропилена для данной мембраны имеет аморфное гало с центром тяжести при угле  $2\theta = 14,8^\circ$  [19, 22]. На рентгенограммах образцов мембраны ОПМН-П фиксируются на фоне аморфного гало три интенсивных рефлекса при углах  $2\theta = 7,9^\circ$ ;  $22,6^\circ$ ;  $25,95^\circ$  для исходной и при углах  $2\theta = 14,72^\circ$ ;  $22,2^\circ$ ;  $25,63^\circ$  – рабочей мембраны.

Данные (таблица) полнопрофильного анализа образцов мембраны ОПМН-П свидетельствуют о значительных структурных перестройках в полимере. Прежде всего, смещение рефлекса

$2\theta = 17,72^\circ$  в исходном образце в область угла  $2\theta = 14,79^\circ$  рабочего образца является признаком полиморфизма упаковки. Изменение кристаллических параметров решетки в кристаллитах можно

объяснить лишь особенностями строения макромолекул полиамида и их ориентацией при кристаллизации [17].

Таблица

Микроструктурные параметры мембраны ОПМН-П и ОФАМ-К  
Table. Microstructural parameters of the OPMN-P and OFAM-K membranes

Мембрана ОПМН-П	Исходный образец					Отработанный образец				
Эксп. при $2\theta$		17,9	22,6		25,95		14,72		22,2	25,63
Угол ПША $2\theta$	17,22	17,72	22,62	13,33	26,04	11,24	14,79	21,88	21,95	25,3
$d_{(abc)}$ , Å	5,72	5,51	4,38	4,24	3,82	8,71	6,7	4,49	4,41	4,0
$\beta_{\text{град}}$	6,08	0,86	2,82	12,6	1,67	3,59	3	7,56	1,93	1,47
$L_{(\text{ОКР})}$ , Å	14,68	103,84	32,99	2,13	54,31	29,86	29,86	12,04	47,4	60,7
$I/I_{25,95}$	1,4	0,1	1,26	2,8	1	4,5	4,5	6,8	3	1
Крист			44%					55%		
Мембрана ОФАМ-К	Исходный образец					Отработанный образец				
Эксп. при $2\theta$	17,66	20	22,8		25,61	17,8	22,89		25,58	
Угол ПША $2\theta$	17,62	20,46	22,56	22,96	25,55	17,52	22,38	25,3	25,81	36,81
$d_{(abc)}$ , Å	5,59	4,94	4,33	4,3	3,86	5,55	4,31	3,9	3,86	2,78
$\beta_{\text{град}}$	1,75	1,12	1,13	6,89	1,38	3,95	2,97	8,95	1,84	11,9
$L_{(\text{ОКР})}$ , Å	51,9	82,2	79,5	13,07	65,6	25,9	30,14	10,11	47,7	7,77
$I/I_{25,95}$	0,54		0,6	2,5	1	1,9	1,3	4,4	1	3
Крист			49%					36%		

Тем не менее, полуширина и интенсивность рефлекса при  $2\theta = 25,95^\circ$  уменьшаются, т.е. при воздействии трансмембранного давления на мембрану происходит упорядочение структуры вдоль оси зигзагообразной молекулы полиамида и, как следствие, увеличение размеров кристаллитов в направлении кристаллографической оси с 54,31 до 60,7 Å. Напротив, микроструктурные параметры для  $2\theta = 22,6^\circ$  показывают, что интегральная интенсивность по отношению к интенсивности рефлекса  $2\theta = 25,95^\circ$  увеличивается в три раза. Размеры кристаллитов в рабочем образце мембраны изменяются с 32,99 до 47,4 Å. Подобные структурные превращения можно объяснить дополнительным структурированием молекул аморфной фазы, прилегающих к кристаллитам за счет образования водородных связей между карбонильными и свободными амидными группами, всегда существующими в аморфной фазе. Смещение рефлекса при  $2\theta = 17,9^\circ$  в образце исходной мембраны в сторону меньшего угла  $2\theta = 14,72^\circ$  для образца рабочего пористого композитного материала ОПМН-П свидетельствует о кардинальной перестройке кристаллической решетки в направлении оси. Согласно литературным данным [17, 18, 20], наиболее слабые взаимодействия макромолекулы полиамида испытывают в направлении кристаллографической оси, а дефекты лока-

лизуются между плоскостями. Поэтому в образце рабочей мембраны под действием трансмембранного давления и транспорта молекул воды происходит полиморфизм упаковки кристаллической решетки. Бреговский период между плоскостями увеличивается с  $d = 5,72$  Å до  $d = 6,7$  Å, что указывает на более рыхлую структуру кристаллитов, а рост интенсивности свидетельствует об увеличении данной кристаллической фазы в полиамиде (таблица).

## ВЫВОДЫ

Выполненный комплекс экспериментальных и теоретических исследований структурных характеристик мембран и кинетических зависимостей электронанофильтрационной очистки, позволяет сделать следующие выводы:

1. Анализ зависимостей по коэффициенту задержания и удельному выходному потоку электронанофильтрационного разделения растворов латунирования от трансмембранного давления и плотности тока отмечает, что прианодная мембрана в результате наложения на систему «мембрана-раствор» постоянного электрического потенциала начинает закупориваться, и на ее поверхности образуется слой осадка из-за протекания электрохимического процесса, что ведет к более низким показателям коэффициента задержания

ния и удельного выходного потока для прианодной мембраны, чем для прикатодной.

2. Сопоставление полученных данных по структуре позволяет отметить, что аморфные фазы являются межмолекулярными образованиями и относятся к активному слою и подложке, соответственно. При этом важно заметить, что плотность

упаковки аморфных фаз рабочей мембраны уменьшается, что влияет на транспортные и селективные свойства мембраны. Фактически, деформация аморфно-кристаллического полимера приводит к перестройке структуры не только в ориентации макромолекул аморфной, но и кристаллической фаз мембран.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Павлов Д.В., Колесников В.А.** Очистка сточных вод гальванического производства: новые решения. *Водоснаб. и санитар. техника*. 2012. № 6. С. 66-69.
2. **Истомина Н.В., Сосновская Н.Г., Ковалюк Е.Н.** Оборудование электрохимических производств. Ангарск: АГТА. 2010. 100 с.
3. **Хранилов Ю.П.** Экология и гальванотехника: проблемы и решение. Киров: изд. ВятГТУ. 2000. 97 с.
4. **Беренгартен М.Г., Гуляева Е.С.** Перенос ионов через ионообменные мембраны в процессе электродиализного концентрирования. *Вода: химия и экология*. 2011. № 10. С. 77-81.
5. **Колесников А.В.** Катодные и анодные процессы в растворах сульфата цинка в присутствии поверхностно-активных веществ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 1. С. 53-56.
6. **Дубровская О.Г., Кулагина В.А., Курилина Т.А., Либ Ф.-Ч.** Применение модифицированного сорбционного материала для эффективной очистки сточных вод гальванического производства. *Журн. Сибир. федерал. ун-та. Техника и технологии*. 2017. Т. 10. Вып. 5. С. 621-630. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-5-621-630.
7. **Kuzina O., Pankratov E., Tkachev V.** Modelling of organizational and technological parameters of the informational model of municipal infrastructure facilities subject to reorganization. *MATEC Web of Conferences*. 2016. V. 86. UNSP 05023. DOI: 10.1051/mateconf/20168605023.
8. **Makisha N., Gogina E.** Methods of biological removal of nitrogen from waste water and ways to its intensification. *Appl. Mech. Mater.* 2014. V. 587-589. P. 644-647. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.644.
9. **Зенин Б.С., Слосман А.И.** Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий. Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та. 2012. 120 с.
10. **Volesky B.** Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*. 2001. N 59. P. 203-216. DOI: 10.1016/S0304-386X(00)00160-2.
11. **Navarro P., Alguacil F.J.** Purification of copper electrowinning solutions by means of solvent extraction with tributylphosphate. *Can. Metall. Q.* 1996. N 35. P. 133-141. DOI: 10.1179/cm.1996.35.2.133.
12. **Жамская Н.Н., Шапкин Н.П., Поломарчук Т.А.** Способ очистки сточных вод от токсичных металлов сточными водами пищевых предприятий. *Изв. вузов. Пищевая технология*. 2003. № 2-3. С. 40-41.
13. **Пугачева И.Н., Карманов А.В., Зуева С.Б., De Michelis I., Ferella F., Молоканова Л.В., Vegliò F.** Удаление тяжелых металлов текстильными отходами на основе целлюлозы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 105-110. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6098.

## REFERENCES

1. **Pavlov D.V., Kolesnikov V.A.** Sewage treatment of electroplating: new solutions. *Vodosnab. Sanitar. Tekhn.* 2012. N 6. P. 66-69 (in Russian).
2. **Istomina N.V., Sosnovskaya N.G., Kovalyuk E.N.** Equipment for electrochemical production. Angarsk: AGTA. 2010. 100 p. (in Russian).
3. **Khranilov Yu.P.** Ecology and electroplating: problems and solutions. Kirov: Izd. VyatGTU. 2000. 97 p. (in Russian).
4. **Berengarten M.G., Gulyaeva E.S.** Ion transfer through ion exchange membranes during electrodiagnosis concentration. *Voda: Khim. Ekolog.* 2011. N 10. P. 77-81 (in Russian).
5. **Kolesnikov A.V.** Cathodic and anodic processes in solutions of zinc sulfate in the presence of surfactants. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]*. 2016. V. 59. N 1. P. 53-56 (in Russian).
6. **Dubrovskaya O.G., Kulagina V.A., Kurilina T.A., Lib F.Ch.** The use of modified sorption material for effective wastewater treatment of electroplating production. *Zhurn. Sibir. Fed. Uni-ta. Tekhn. Tekhol.* 2017. V. 10. N 5. P. 621-630 (in Russian). DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-5-621-630.
7. **Kuzina O., Pankratov E., Tkachev V.** Modelling of organizational and technological parameters of the informational model of municipal infrastructure facilities subject to reorganization. *MATEC Web of Conferences*. 2016. V. 86. UNSP 05023. DOI: 10.1051/mateconf/20168605023.
8. **Makisha N., Gogina E.** Methods of biological removal of nitrogen from waste water and ways to its intensification. *Appl. Mech. Mater.* 2014. V. 587-589. P. 644-647. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.644.
9. **Zenin B.S., Slosman A.I.** Modern technologies of surface hardening and coating. Tomsk: Izd. Tomsk. Politekh. Un-ta. 2012. 120 p. (in Russian).
10. **Volesky B.** Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*. 2001. N 59. P. 203-216. DOI: 10.1016/S0304-386X(00)00160-2.
11. **Navarro P., Alguacil F.J.** Purification of copper electrowinning solutions by means of solvent extraction with tributylphosphate. *Can. Metall. Q.* 1996. N 35. P. 133-141. DOI: 10.1179/cm.1996.35.2.133.
12. **Zhamskaya N.N., Shapkin N.P., Polomarchuk T.A.** A method for treating wastewater from toxic metals with wastewater from food enterprises. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Pishchev. Technol.* 2003. N 2-3. P. 40-41 (in Russian).
13. **Pugacheva I.N., Karmanov A.V., Zueva S.B., De Michelis I., Ferella F., Molokanova L.V., Vegliò F.** Heavy metal removal by cellulose-based textile waste product. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]*. 2020. V. 63. N 2. P. 105-110. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6098.

14. **Кахраманов Н.Т., Гаджиева Р.Ш., Кахраманлы Ю.Н., Арзуманова Н.Б.** Сорбция тяжелых металлов многокомпонентными пенополимерными сорбентами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 5. С. 110-117. DOI: 10.6060/ivkkt.20196205.5769.
15. **Мулдер М.** Введение в мембранную технологию. М.: Мир. 1999. 513 с.
16. **Лазарев С.И.** Методы электробаромембранного разделения растворов. Тамбов: изд. Тамб. гос. техн. ун-та. 2007. 84 с.
17. **Арисова В.Н.** Структура и свойства КМ. Волгоград: ВолГТУ. 2008. 94 с.
18. **Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А.** Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М: Metallurgiya. 2002. 360 с.
19. **Гречин О.В., Смирнов П.Р.** О происхождении малоугловых максимумов на кривых интенсивности рентгеновского рассеяния водных растворов электролитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 6. С. 72-77.
20. **Уманский Н.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев П.Н.** Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Metallurgiya. 1982. 632 с.
21. **Ковалева О.А.** Расчет технологических и конструктивных характеристик нанопольтрационного и электро-нанопольтрационного аппарата плоскокамерного типа. *Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки*. 2017. Т. 22. Вып. 5. С. 1154-1160. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1154-1160.
22. **Федотов Ю.А., Смирнова Н.Н.** Ароматические полиамиды с ионогенными группами: синтез, свойства, области применения. *Пласт. массы*. 2008. № 8. С. 18-21.
14. **Kakhramanov N.T., Arzumanova N.B., Gahramanly J.N., Gadjeva R.S.** Sorption of heavy metals by multi-component foams. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]*. 2019. V. 62. N 5. P. 110-117 DOI: 10.6060/ivkkt.20196205.5769.
15. **Mulder M.** Introduction to membrane technology. M.: Mir. 1999. 513 p. (in Russian).
16. **Lazarev S.I.** Methods of electrobaromembrane separation of solutions. Tambov: Izd. Tamb. Gos. Tekh. Un-ta. 2007. 84 p. (in Russian).
17. **Arisova V.N.** Structure and properties of KM. Volgograd: VolgGTU. 2008. 94 p. (in Russian).
18. **Gorelik S.S., Rastorguev L.N., Skakov Yu.A.** X-ray and electron-optical analysis. M.: Metallurgiya. 2002. 360 p. (in Russian).
19. **Grechin O.V., Smirnov P.R.** X-ray scattering intensity curves of electrolyte solutions. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V.59. N 6. P. 72-77 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20165906.5374k.
20. **Umansky N.S., Skakov Yu.A., Ivanov A.N., Rastorguev P.N.** Crystallography, radiography and electron microscopy. M.: Metallurgiya. 1982. 632 p. (in Russian).
21. **Kovaleva O.A.** Calculation of the technological and structural characteristics of the nanofiltration and flat-chamber type electron-filtration apparatus. *Vestn. Tamb. Un-ta. Ser. Estestv. Tekhn. Nauki*. 2017. V. 22. N 5. P. 1154-1160 (in Russian). DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1154-1160.
22. **Fedotov Yu.A., Smirnova N.N.** Aromatic polyamides with ionic groups: synthesis, properties, applications. *Plast. Massy*. 2008. N 8. P. 18-21 (in Russian).

Поступила в редакцию 12.09.2019  
Принята к опубликованию 28.04.2020

Received 12.09.2019  
Accepted 28.04.2020