

## ЭЛЕКТРОМЕМБРАННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ ИОНОВ $\text{Cr}^{6+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{Cl}^-$

С.И. Лазарев, О.А. Ковалева, Р.В. Попов, С.В. Ковалев, Н.Н. Игнатов

Сергей Иванович Лазарев, Ольга Александровна Ковалева, Роман Викторович Попов,  
Сергей Владимирович Ковалев \*, Николай Николаевич Игнатов

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

E-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru, solomina-oa@yandex.ru, geometry@mail.nnn.tstu.ru, sseedd@mail.ru \*, system\_52@mail.ru

*В работе получены данные по коэффициенту задержания, и величине удельного потока растворителя при нанофильтрационной и электронанофильтрационной очистке сточных вод гальванических производств от ионов  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ . Представлена интерпретация экспериментальных данных в зависимости от величины трансмембранного давления, фиксированного значения плотности тока и типа полупроницаемой мембраны. Установлено, что с повышением величины трансмембранного давления возрастает коэффициент задержания из-за уплотнения мембран, а при фиксированном значении плотности тока осуществляется избирательный перенос присутствующих в стоках катионов  $\text{Zn}^{2+}$  и анионов  $\text{SO}_4^{2-}$ ;  $\text{Cl}^-$  преимущественно к прикатодным и прианодным мембранам ОПМН-П и АМН-П соответственно. Величина удельного потока растворителя с повышением давления увеличивается в диапазоне  $P = (1,0 - 1,4)$  МПа, так как возрастает движущая сила процесса, и раствор разогревается при действии на систему разности электрических потенциалов, и незначительно снижается при  $P = (1,4 - 1,6)$  МПа, из-за накопления отложений на поверхности мембран при увеличенном потоке. В исследовании отмечается, что при электронанофильтрации раствор нагревается из-за того, что является проводником 2-го рода и в нем сосредоточено основное электрическое сопротивление, в отличие от металлических электродов (проводников 1 рода), изготовленных из платинированного титана. Различия удельного потока мембран ОПМН-П (1) и АМН-П (2) от рабочего давления при дополнительно наложенном электрическом потенциале связаны с материалом, из которого изготовлен их активный слой (полиамид, эфир целлюлозы соответственно), и различной их пористой структурой, распределением пор по поверхности, формой и ориентацией*

**Ключевые слова:** процесс, мембрана, сточная вода, удельный поток растворителя, коэффициент задержания, очистка, катион, анион

## ELECTROMEMBRANE PURIFICATION OF WASTE WATER OF CHEMICAL PRODUCTION FROM IONS $\text{Cr}^{6+}$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{Cl}^-$

S.I. Lazarev, O.A. Kovaleva, R.V. Popov, S.V. Kovalev, N.N. Ignatov

Sergey I. Lazarev, Olga A. Kovaleva, Roman V. Popov, Sergey V. Kovalev \*, Nikolay N. Ignatov

Department of Applied Geometry and Computer Graphics, Tambov State Technical University, Tambov,  
Sovetskaya st., 106, 392000, Russia

E-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru, solomina-oa@yandex.ru, geometry@mail.nnn.tstu.ru, sseedd@mail.ru \*, system\_52@mail.ru

*Data on the retention factor, and the specific solvent flow during nanofiltration and electron-nanofiltration purification of sewage of galvanic plants from  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  ions were obtained. The interpretation of the experimental data depending on the transmembrane pressure, the fixed value of the current density and the type of semipermeable membrane is presented. It was established that the retention factor increases with increasing in transmembrane pressure because of the sealing of membranes, and selective migration of cations  $\text{Zn}^{2+}$  and anions  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ , which are inside of wastewater, occurs at the fixed value of current density mainly to the membranes OPMN-P and AMN-P near the cathode and the anode, respectively. The value of the flow is increased in the range of  $P = (1.0 - 1.4)$  MPa with increasing pressure, because the driving force of the process increases and the solution is heated due to the action of the electrical potential difference, and slightly decreases at  $P = (1.4 - 1.6)$  MPa due to the accumulation of sediments on the membrane surface at the increased flow. The study notes that in the case of electron-nanofiltration, the solution heats up because it is a conductor of the second kind and the main electrical resistance is concentrated in it, in contrast to the metal electrodes (conductors of the 1st kind) made from platinized titanium. Differences in the specific flow of the OPMN-P and AMN-P membranes from the operating pressure at an additional electrolyte potential are related to the material from which their active layer (polyamide, cellulose ether, respectively) is prepared and their different porous structure, distribution of pores over the surface, shape and orientation*

**Key words:** nanofiltration, electronnanofiltration, membrane, flow, retention coefficient, pressure, cation, anion

**Для цитирования:**

Лазарев С.И., Ковалева О.А., Попов Р.В., Ковалев С.В., Игнатов Н.Н. Электромембранная очистка сточных вод химических производств от ионов  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ . *Иzv. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 4-5. С. 119–125

**For citation:**

Lazarev S.I., Kovaleva O.A., Popov R.V., Kovalev S.V., Ignatov N.N. Electromembrane purification of waste water of chemical production from ions  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ . *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 4-5. P. 119–125

**ВВЕДЕНИЕ**

Очистка сточных вод химических и гальванических производств с помощью методов мембранной технологии является актуальной задачей, так как вещества, содержащиеся в них, являются токсикантами. Попадание катионов тяжелых металлов в окружающую среду нарушает процесс жизнедеятельности всех живых организмов, что отражается и на здоровье самого человека. Применение перспективных мембранных методов очистки растворов позволяет использовать преимущества процессов баромембранного и электромембранного разделения растворов, которые применяются на финишном этапе очистки технологических растворов и сточных вод [1-10]. Поэтому целью работы явилось исследование электронанофильтрационной очистки сточных вод гальванических производств от ионов  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ .

**МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Экспериментальные исследования электронанофильтрационной очистки сточных вод гальванических производств АО «Тамбовполимермаш» от исследуемых ионов (состав представлен в табл. 1)

проводились на установке и по методике, представленной в работе [11], при варьировании ряда рабочих параметров электронанофильтрационного процесса.

**Таблица 1**

**Состав сточной воды исследуемого производства**  
**Table 1. Waste water composition of the production under study**

| Катион или анион | Хлориды, мг/дм <sup>3</sup> | Цинк, мг/дм <sup>3</sup> | Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup> | Хром, мг/дм <sup>3</sup> | ХПК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> |
|------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|--|
| Среднее значение | 77-116                      | 0,02-0,44                | 79-462                       | 0,3-0,65                 | 98-660                                 |

Удельный поток растворителя рассчитывался [12]:

$$J = \frac{V}{F_m \cdot \tau}; \quad (1)$$

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

Значение коэффициента задержания растворенного вещества полупроницаемой мембраной рассчитывалось по формуле [12]:

$$R = 1 - \frac{c_{\text{пер}}}{c_{\text{исх}}}; \quad (2)$$

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

Концентрации катионов и анионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cr<sup>6+</sup> в сточных водах исследуемого производства и пробах пермеата определялись на основе аттестованных методик [13-16].

При проведении процесса баромембранного разделения технологического раствора гальванического производства температура обрабатываемой жидкости оставалась постоянной  $T = 293$  К, а при электронанофильтрационном разделении раствор несколько подогревался около 3-7 °С, что соответственно приводило к подогреву некоторых элементов установки (плунжера насоса, трубопроводов, пористых платинированных электродов, дренажных металлических сеток, крышек (фланцев) аппарата.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные и расчетные зависимости удельного потока растворителя от рабочего давления при очистке сточной воды гальванического производства АО «Завод Тамбовполимермаш» для мембран ОПМН-П (1, 3) и АМН-П (2, 4) представлены на рис. 1, а для нанофильтрационной прикатодной ОПМН-П (1, 3) и прианодной мембраны АМН-П (2, 4) при плотности постоянного электрического тока  $i = 25,64$  А/м<sup>2</sup>, рис. 2 [17].

Анализируя зависимости удельного потока растворителя для мембран ОПМН-П (1, 3) и АМН-П (2, 4) от рабочего давления (рис. 1) и плотности тока (рис. 2) можно отметить, что с ростом градиента давления (разности рабочего и осмотического давления до и после мембраны) возрастает удельный поток растворителя [17].

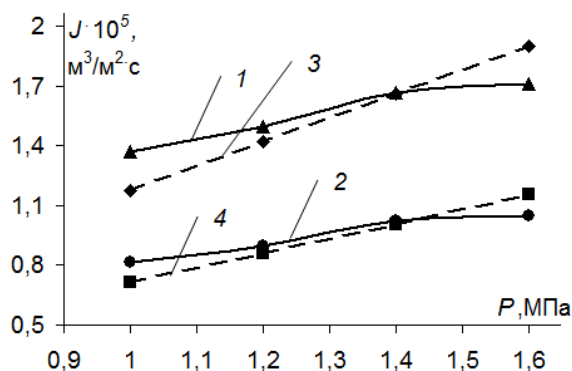


Рис. 1. Зависимость удельного потока растворителя от рабочего давления для мембраны: 1 – ОПМН-П, 2 – АМН-П (эксперимент); 3 – ОПМН-П; 2 – АМН-П (расчет)

Fig. 1. The dependence of specific flow of solvent on working pressure for the membrane: 1 - OPMN-P; 2 - AMN-P (experiment); 3 - OPMN-P; 4 - AMN-P (calculation)

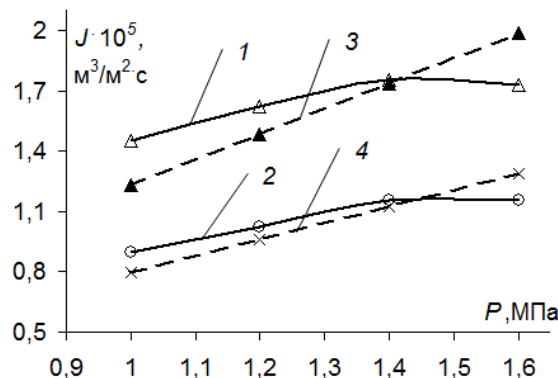


Рис. 2. Зависимость удельного потока растворителя от рабочего давления и при постоянной плотности тока (25,64 А/м<sup>2</sup>) для мембраны: 1 – ОПМН-П (прикатодная), 2 – АМН-П (прианодная) (эксперимент); 3 – ОПМН-П (прикатодная), 4 – АМН-П (прианодная) (расчет)

Fig. 2. The dependence of specific flow of solvent on working pressure and at constant current density (25.64 A/m<sup>2</sup>) for the membrane: 1 - OPMN-P (near-cathode), 2 - AMN-P (near-anode) (experiment); 3 - OPMN-P (near-cathode), 4 - AMN-P (near-anode) (calculation)

При наложении на исследуемую систему (мембрана-раствор) постоянного электрического тока  $i = 25,64$  А/м<sup>2</sup> наблюдается повышение удельного потока растворителя в диапазоне давления  $P = (1,0-1,4$  МПа), что объясняется нагревом исследуемого раствора гальванического производства, при котором снижаются вязкость и плотность раствора (рис. 2), и как следствие, растворитель легче проникает сквозь поры мембраны. Исследуемый раствор нагревается из-за того, что является проводником 2-го рода, и в нем сосредоточено основное электрическое сопротивление, в отличие от металлических электродов (проводников 1 рода), изготовленных из платинированного титана. Различия удельного потока мембран ОПМН-П (1, 3) и АМН-П (2, 4) от рабочего давления (рис. 1) при дополнительно наложенном электрическом потенциале (рис. 2) связаны с материалом, из которого изготовлен их активный слой (полиамид, эфир целлюлозы соответственно), и различной их пористой структурой, распределением пор по поверхности, формой и ориентацией [17].

Снижение удельного потока растворителя (рис. 2) наблюдается в диапазоне давления  $P = (1,4-1,6$  МПа при постоянной плотности тока  $i = 25,64$  А/м<sup>2</sup> для прикатодной ОПМН-П (1, 3) и прианодной мембраны АМН-П (2, 4), это связано с образованием на поверхности мембран отложений из-за присутствующих в воде ионов жесткости Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>, так как забор раствора производился в колодце после цеха гальванообработки. Нагревание раствора связано с электрическим сопротивлением, а также с наличием на поверхности мембран

различных отложений в процессе электронанофильтрации исследуемого раствора.

Принимая во внимание это обстоятельство, проводился расчет общего электрического сопротивления по основе закона Ома:

$$R_c = \frac{U}{I}, \quad (3)$$

где  $R_c$  – общее электрическое сопротивление мембранного элемента, расположенного на участке цепи, Ом;  $U$  – напряжение, подаваемое на клеммы аппарата, В;  $I$  – сила тока, А.

При проведении экспериментальных исследований значение силы тока поддерживалось постоянным – 0,2 А. Напряжение в процессе работы аппарата корректировалось в сторону увеличения. Данная коррекция может быть объяснена фактором наличия отложений на поверхности мембран и, как следствие, приводит к возрастанию общего сопротивления мембранного элемента при постоянном давлении  $P = 1,6$  МПа и плотности тока  $i = 25,64$  А/м<sup>2</sup> при действии двух движущих сил, что, в свою очередь, приводит к обрастанию прикатодных и прианодных мембран.

Большую роль для снижения осадка играет процесс дросселирования раствора в канале аппарата, то есть гидродинамическая обстановка в аппарате.

При перекрывании части пор отложениями различной природы на систему разделяемый раствор – мембрана приходится накладывать все большую разность электрических потенциалов.

Кроме ионов, исследуемых в растворе  $Cr^{6+}$ ;  $Zn^{2+}$ ;  $Cl^-$ ;  $SO_4^{2-}$ , через мембрану могут переноситься ионы  $H^+$  или  $OH^-$ , образующиеся на электродах в виде встречных потоков, направленных через мембраны из пермеатов, противоположных по направлению к конвективному потоку растворителя. Данные потоки, соответственно, изменяют pH обрабатываемого раствора у поверхности мембран, около прианодной мембраны раствор подкисляется, а у прикатодной подщелачивается, и в результате выпадают гидроксиды металлов, ионы которых склонны гидролизу [12,18].

На основе анализа экспериментальных данных о влиянии лимитирующей движущей силы на процесс электронанофильтрационного разделения растворов (трансмембранного давления) была предложена усовершенствованная формула, описывающая удельный поток растворителя через мембрану (отклонение расчетных значений от экспериментальных не превышало  $\pm 15\%$ ):

$$J_{атпрокс.} = \alpha \cdot n \cdot (\Delta P - m \cdot \Pi), \quad (4)$$

Осмотическое давление рассчитывается по формуле:

$$\Pi = Y \cdot c \cdot R \cdot T, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент гидродинамической проницаемости полимерной мембраны применяемого типа, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·с·МПа;  $Y$  – изотонический коэффициент;  $\Delta P$  –

рабочее давление, МПа;  $c = \sum_{z=1}^z c_z$  – концентрация

растворенных компонентов в сточной воде, моль/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура раствора при проведении эксперимента, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/моль К;  $n$ ,  $m$  – эмпирические коэффициенты.

Значения эмпирических коэффициентов для уравнения (4) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов  $n$ ,  $m$  для уравнения (4)

Table 2. The values of the coefficients  $n$ ,  $m$  for equation (4)

| Процесс разделения    | Мембрана             | $n$   | $m$   |
|-----------------------|----------------------|-------|-------|
| Нанофильтрация        | ОПМН-П               | 0,431 | 1,006 |
|                       | АМН-П                | 0,436 | 1,007 |
| Электронанофильтрация | ОПМН-П (прикатодная) | 0,452 | 1,005 |
|                       | АМН-П (прианодная)   | 0,488 | 1,006 |

В литературе [19] показано, что разделение растворов в интенсивном электрическом поле может влиять на структуру мембран и, следовательно, на процесс образования отложений на поверхности пористых мембран или их полную блокировку, что подтверждают полученные экспериментальные данные.

Применение небольшого значения постоянной плотности электрического тока меньше 100 А/м<sup>2</sup> в настоящей работе оправдано тем, что анизотропные мембраны со слоистой структурой имеют самую низкую электрическую прочность на пробой, что показано в работе [20]. В этой же работе отмечается, что размер выборки и температура влияют на электрический пробой мембран, связанный с дефектностью некоторых участков [19,20].

Анализируя зависимости коэффициента задержания мембран ОПМН-П и АМН-П от рабочего давления при нанофильтрационном разделении сточной воды гальванического производства АО «Завод Тамбовполимермаш», (рис. 3, 4) можно отметить, что мембрана уплотняется при увеличении давления со стороны активного слоя мембранной перегородки, которая напрямую влияет на движущую силу процесса мембранного разделения данного вида раствора и увеличивает коэффициент задержания ионов (1 –  $Cl^-$ ; 2 –  $Zn^{2+}$ ; 3 –  $SO_4^{2-}$ ; 4 –  $Cr^{6+}$ )

[7], удерживание и пропускание которых может быть связано с взаимодействием указанных ионов с мембраной.

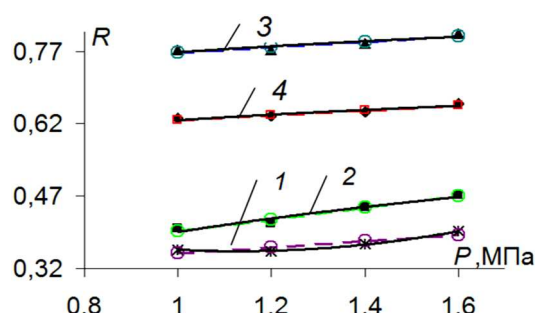


Рис. 3. Зависимость коэффициента задержания от рабочего давления для мембраны ОПМН-П по ионам (1 – Cl<sup>-</sup>; 2 – Zn<sup>2+</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 4 – Cr<sup>6+</sup>)

Fig. 3. The dependence of retention factor on working pressure for the membrane OPMN-P for ions (1 – Cl<sup>-</sup>; 2 – Zn<sup>2+</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 4 – Cr<sup>6+</sup>)

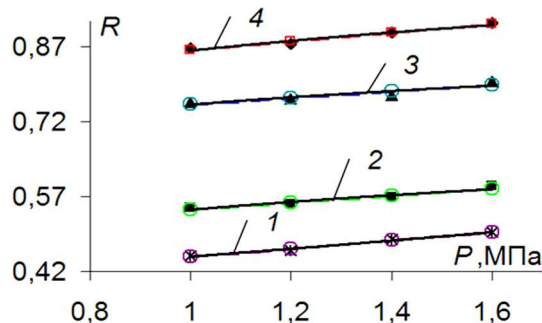


Рис. 4. Зависимость коэффициента задержания от рабочего давления для мембраны АМН-П по ионам (1 – Cl<sup>-</sup>; 2 – Zn<sup>2+</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 4 – Cr<sup>6+</sup>)

Fig. 4. The dependence of retention factor on working pressure for the membrane AMN-P for ions (1 – Cl<sup>-</sup>; 2 – Zn<sup>2+</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 4 – Cr<sup>6+</sup>)

На рис. 5 и 6 представлены зависимости коэффициента задержания от рабочего давления при электронанофильтрационном разделении сточной воды гальванического производства АО «Завод Тамбовполимермаш» при  $i = 25,64 \text{ A/m}^2$  для прикатодной ОПМН-П и прианодной АМН-П мембраны по ионам (1 – Cl<sup>-</sup>; 2 – Zn<sup>2+</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

В отличие от процесса нанофильтрационного разделения технологического раствора гальванического производства на мембранах ОПМН-П и АМН-П (рис. 3, 4), при электронанофильтрационном разделении на мембранах ОПМН-П (прикатодной) (рис. 5) и АМН-П (прианодной) (рис. 6) наблюдается следующее явление: прикатодная мембрана преимущественно пропускает катионы (2 – Zn<sup>2+</sup>) и задерживает анионы (1 – Cl<sup>-</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), а прианодная мембрана преимущественно пропускает анионы (1 – Cl<sup>-</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) и задерживает катионы (2 – Zn<sup>2+</sup>) [17], причем их задерживание и про-

пускание связано с рыхлостью (порозностью) отложений на стороне активного слоя мембран при определенном давлении. Данное утверждение показывает, что ресурс пропускания электрического тока через разделяемую систему с мембранами и раствором ограничен способностью к полному блокированию пор, решением при этом является проведение периодических процедур реверсирования электродов.

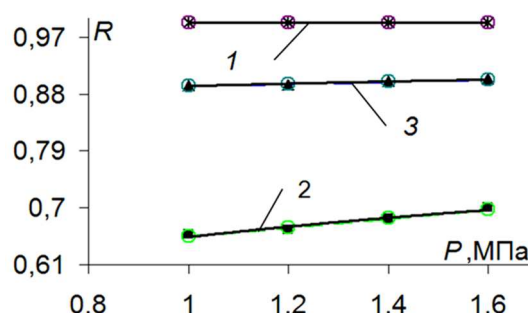


Рис. 5. Зависимость коэффициента задержания от рабочего давления при  $i = 25,64 \text{ A/m}^2$  для прикатодной мембраны ОПМН-П по ионам (1 – Cl<sup>-</sup>; 2 – Zn<sup>2+</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 4 – Cr<sup>6+</sup>)

Fig. 5. The dependence of retention factor on working pressure at  $i = 25.64 \text{ A/m}^2$  for the membrane OPMN-P (near-cathode) for ions (1 – Cl<sup>-</sup>; 2 – Zn<sup>2+</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 4 – Cr<sup>6+</sup>)

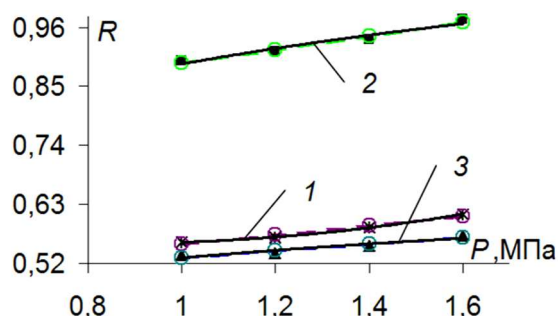


Рис. 6. Зависимость коэффициента задержания от рабочего давления при  $i = 25,64 \text{ A/m}^2$  для прианодной мембраны АМН-П по ионам (1 – Cl<sup>-</sup>; 2 – Zn<sup>2+</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 4 – Cr<sup>6+</sup>)

Fig. 6. The dependence of retention factor on working pressure at  $i = 25.64 \text{ A/m}^2$  for the membrane AMN-P (near-anode) for ions (1 – Cl<sup>-</sup>; 2 – Zn<sup>2+</sup>; 3 – SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 4 – Cr<sup>6+</sup>)

На основе полученных экспериментальных зависимостей коэффициента задержания от градиента давления при воздействии на систему мембрана-раствор электрического потенциала, предложено использовать следующую формулу для композитных эфирцеллюлозных и полиамидных перегородок:

$$R_{расч} = a_1 \cdot \frac{P}{\Pi} + a_2, \quad (6)$$

где  $a_1$ ,  $a_2$  – эмпирические коэффициенты для данной системы мембрана-раствор.

Значения эмпирических коэффициентов для уравнения (6) представлены в табл. 3. Отклонение расчетных значений коэффициента задержания от экспериментальных данных не превышает  $\pm 10\%$ .

**Таблица 3**  
**Значения коэффициентов  $a_1$ ,  $a_2$  для уравнения (6)**  
**при  $P = 1,0; 1,2; 1,4; 1,6$  МПа**  
**Table 3. The values of the coefficients  $a_1$ ,  $a_2$  for equation**  
**(6) at  $P = 1.0; 1.2; 1.4; 1.6$  MPa**

| Мембрана                | Ионы                           | $a_1$                 | $a_2$ |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------|
| 1                       | 3                              | 4                     | 5     |
| ОПМН-П                  | Cl <sup>-</sup>                | 0,0012                | 0,29  |
|                         | Zn <sup>2+</sup>               | 0,0023                | 0,27  |
|                         | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  | 0,0011                | 0,71  |
|                         | CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 0,0010                | 0,58  |
| АМН-П                   | Cl <sup>-</sup>                | 0,0015                | 0,37  |
|                         | Zn <sup>2+</sup>               | 0,0013                | 0,47  |
|                         | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  | 0,0012                | 0,69  |
|                         | CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 0,0016                | 0,78  |
| ОПМН-П<br>(прикатодная) | Cl <sup>-</sup>                | 1,19·10 <sup>-5</sup> | 1,00  |
|                         | Zn <sup>2+</sup>               | 0,0014                | 0,58  |
|                         | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  | 0,0003                | 0,87  |
| АМН-П<br>(прианодная)   | Cl <sup>-</sup>                | 0,0017                | 0,47  |
|                         | Zn <sup>2+</sup>               | 0,0025                | 0,76  |
|                         | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  | 0,0012                | 0,47  |

### ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментальные исследования по очистке сточной воды гальванического

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Manawi Y., Kochkodan V., Hussein M.A.** Can carbon-based nanomaterials revolutionize membrane fabrication for water treatment and desalination? *Desalination*. 2016. V. 391. P. 69-88.
2. **Daer S., Kharraz J., Giwa A.** Recent applications of nanomaterials in water desalination: A critical review and future opportunities. *Desalination*. 2015. V. 367. P. 37-48.
3. **Wenten I.G., Khoiruddin.** Reverse osmosis applications: Prospect and challenges. *Desalination*. 2016. V. 391. P. 112-125.
4. **Belaissaoui B., Claveria-Baro J., Lorenzo-Hernando A.** Potentialities of a dense skin hollow fiber membrane contactor for biogas purification by pressurized water absorption. *J. Membr. Sci.* 2016. V. 513. P. 236-249.
5. **Thakur V.K., Voicu S.I.** Recent advances in cellulose and chitosan based membranes for water purification: A concise review. *Carbohydrate Polymers*. 2016. V. 146. P. 148-165.
6. **Zhang F., Gao S., Zhu Y., Jin. J.** Alkaline-induced superhydrophilic/underwater superoleophobic polyacrylonitrile membranes with ultralow oil-adhesion for high-efficient oil/water separation. *J. Membr. Sci.* 2016. V. 513. P. 67-73.
7. **Liu J., Yuan J., Ji Z.** Concentrating brine from seawater desalination process by nanofiltration–electrodialysis integrated membrane technology. *Desalination*. 2016. V. 390. P. 53-61.
8. **Yan F., Chen H., Yang L., et al.** Improving the water permeability and antifouling property of thin-film composite polyamide nanofiltration membrane by modifying the active layer with triethanolamine. *J. Membr. Sci.* 2016. V. 513. P. 108-116.
9. **Shaffer D.L., Yip N.Y., Gilron J., Elimelech M.** Seawater desalination for agriculture by integrated forward and reverse osmosis: improved product water quality for potentially less energy. *J. Membr. Sci.* 2012. V. 415-416. P. 1-8.

производства от ионов Cl<sup>-</sup>, Zn<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cr<sup>6+</sup> нанофильтрацией и электронанофильтрацией с применением мембран ОПМН-П, АМН-П показывают, что совместное использование давления и электрического потенциала при разделении растворов увеличивает удельный поток растворителя в диапазоне  $P = (1,0-1,4)$  МПа, зависящий от роста движущей силы процесса (градиента давления) и разогрева раствора, а при  $P = (1,4-1,6)$  МПа он снижается, что связано с наличием отложений на мембранах из-за присутствующих в воде ионов жесткости Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>, так как забор раствора производился в колодце после цеха гальванообработки.

Увеличение коэффициента задержания для исследуемых ионов при очистке растворов гальванических производств с применением мембран ОПМН-П и АМН-П происходит при возрастании рабочего давления, а при дополнительном фиксированном использовании электрического потенциала осуществляется направленный перенос исследуемых катионов и анионов через соответствующие мембраны в пермеат при наличии отложений на поверхности мембран.

### REFERENCES

1. **Manawi Y., Kochkodan V., Hussein M.A.** Can carbon-based nanomaterials revolutionize membrane fabrication for water treatment and desalination? *Desalination*. 2016. V. 391. P. 69-88.
2. **Daer S., Kharraz J., Giwa A.** Recent applications of nanomaterials in water desalination: A critical review and future opportunities. *Desalination*. 2015. V. 367. P. 37-48.
3. **Wenten I.G., Khoiruddin.** Reverse osmosis applications: Prospect and challenges. *Desalination*. 2016. V. 391. P. 112-125.
4. **Belaissaoui B., Claveria-Baro J., Lorenzo-Hernando A.** Potentialities of a dense skin hollow fiber membrane contactor for biogas purification by pressurized water absorption. *J. Membr. Sci.* 2016. V. 513. P. 236-249.
5. **Thakur V.K., Voicu S.I.** Recent advances in cellulose and chitosan based membranes for water purification: A concise review. *Carbohydrate Polymers*. 2016. V. 146. P. 148-165.
6. **Zhang F., Gao S., Zhu Y., Jin. J.** Alkaline-induced superhydrophilic/underwater superoleophobic polyacrylonitrile membranes with ultralow oil-adhesion for high-efficient oil/water separation. *J. Membr. Sci.* 2016. V. 513. P. 67-73.
7. **Liu J., Yuan J., Ji Z.** Concentrating brine from seawater desalination process by nanofiltration–electrodialysis integrated membrane technology. *Desalination*. 2016. V. 390. P. 53-61.
8. **Yan F., Chen H., Yang L., et al.** Improving the water permeability and antifouling property of thin-film composite polyamide nanofiltration membrane by modifying the active layer with triethanolamine. *J. Membr. Sci.* 2016. V. 513. P. 108-116.
9. **Shaffer D.L., Yip N.Y., Gilron J., Elimelech M.** Seawater desalination for agriculture by integrated forward and reverse osmosis: improved product water quality for potentially less energy. *J. Membr. Sci.* 2012. V. 415-416. P. 1-8.

10. **Martinetti C.R., Childress A.E., Cath T.Y.** High recovery of concentrated RO brines using forward osmosis and membrane distillation. *J. Membr. Sci.* 2009. V. 331. I. 1-2. P. 31-39.
11. **Лазарев С.И., Ковалев С.В., Казаков В.Г.** Исследования кинетических и структурных характеристик электробаромембранной очистки промывных вод производства 2,2' - дибензотиазолилдисульфида. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2016. Т. 59. Вып. 2. С. 34-40.
12. **Свитцов А.А.** Введение в мембранную технологию. М.: ДеЛи принт. 2007. 208 с.
13. ПНД Ф 14.1:2.107-97. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций сульфатов в пробах природных и очищенных сточных вод титрованием солью бария в присутствии ортанилового К. Москва. (Издание 2012 г). 18 с.
14. ПНД Ф 14.1:2.96-97 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации хлоридов в пробах природных и очищенных сточных вод argentометрическим методом. Москва. (Издание 2011 г.). 19 с.
15. ПНД Ф 14.1:2.195-2003 Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов цинка в природных и сточных водах фотометрическим методом с сульфарсазеном. Москва. (Издание 2012 г). 16 с.
16. ПНД Ф 14.1:2.452-96 Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации ионов хрома в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с дифенилкарбазидом. Москва. (Издание 2011 г). 20 с.
17. **Ковалева О.А., Лазарев С.И., Ковалев С.В., Попов Р.В.** Практическое применение баромембранных и электробаромембранных методов разделения технологических растворов химических производств. Сб. докладов. Всероссий. научн.-практич. конф. с междунар. участием. Воронеж: ВГУИТ. 2016. С. 121-124.
18. **Рябчиков Б.Е.** Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. М.: Дели принт. 2004. 328 с.
19. **Darestani M.T., Chilcott T.C., Coster H.G.L.** Changing the microstructure of membranes using an intense electric field: filtration performance. *J. Membr. Sci.* 2014. V. 449. Issue 1. P. 158–168.
20. **Darestani M.T., Chilcott T.C., Coster H.G.L.** Changing the microstructure of membranes using intense electric fields: dielectric strength studies. *J. Membr. Sci.* 2014. V. 452. Issue 2. P. 367–378.
10. **Martinetti C.R., Childress A.E., Cath T.Y.** High recovery of concentrated RO brines using forward osmosis and membrane distillation. *J. Membr. Sci.* 2009. V. 331. I. 1-2. P. 31-39.
11. **Lazarev S.I., Kovalev S.V., Kazakov V.G.** Studies of the kinetic and structural characteristics of the electrobaric membrane cleaning of washing water of 2,2'-dibenzothiazolyl disulphide production. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 2. P. 34-40 (in Russian).
12. **Svitsov A.A.** Introduction to membrane technology. M.: DeLi print. 2007. 208 p. (in Russian).
13. PND F 14.1:2.107-97. Quantitative chemical analysis of waters. Method for performing measurements of mass concentrations of sulfates in samples of natural and purified sewage by titration with a barium salt in the presence of ortanil K. M.: (Izdanie 2012 y.). 18 p. (in Russian).
14. PND F 14.1:2.96-97 Quantitative chemical analysis of waters. Method for performing measurements of the mass concentration of chlorides in samples of natural and treated wastewater using an argentometric method. M.: (Izdanie 2011 y.). 19 p. (in Russian).
15. PND F 14.1:2.195-2003 Quantitative chemical analysis of waters. Method for performing measurements of the mass concentration of zinc ions in natural and waste waters by photometric method with sulfarsazene. Moskva. (Izdanie 2012). 16 p. (in Russian).
16. PND F 14.1:2.452-96 Quantitative chemical analysis of waters. Method for measuring the mass concentration of chromium ions in drinking, surface and waste waters by photometric method with diphenylcarbazide. M.: (Izdanie 2011). 20 p. (in Russian).
17. **Kovaleva O.A., Lazarev S.I., Kovalev S.V., Popov R.V.** Practical application of baromembrane and electrobaromembrane methods of separation of technological solutions of chemical industries. All-Russia Sci.-Pract. Conf. with Int. Participation. Voronezh: VGUIT. 2016. P. 121-124 (in Russian).
18. **Ryabchikov B.E.** Modern methods of preparing water for industrial and domestic use. M.: Deli print. 2004. 328 p. (in Russian).
19. **Darestani M.T., Chilcott T.C., Coster H.G.L.** Changing the microstructure of membranes using an intense electric field: filtration performance. *J. Membr. Sci.* 2014. V. 449. Issue 1. P. 158–168.
20. **Darestani M.T., Chilcott T.C., Coster H.G.L.** Changing the microstructure of membranes using intense electric fields: dielectric strength studies. *J. Membr. Sci.* 2014. V. 452. Issue 2. P. 367–378.

Поступила в редакцию 03.04.2017  
Принята к опубликованию 20.02.2018

Received 03.04.2017  
Accepted 20.02.2018