



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.034;544.725.2

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12513

Диффузионная проницаемость гетерогенной мембраны МК-40 с разным размером частиц сульфокатионообменной смолы

**Яна Романовна Беспалова[✉], Светлана Викторовна Добрыдень,
Вера Ивановна Васильева**

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, bespalova.yana2003@yandex.ru[✉]

Аннотация. Главным свойством ионообменных мембран является селективность, основанная на способности мембраны пропускать ионы одного знака, задерживая ионы противоположного знака заряда. Путем варьирования состава и структуры мембран можно достичь снижения диффузионной проницаемости, что положительно отразится на их селективности в процессах электромембранного обессоливания и концентрирования. В работе выполнен сравнительный анализ физико-химических и диффузионных свойств экспериментальных образцов гетерогенной сульфокатионообменной мембраны МК-40 (ООО «Инновационное предприятие «Щекиноазот», Россия). Цель работы состояла в изучении влияния изменения размера частиц ионообменной смолы на диффузионные свойства мембраны. Диаметр частиц помола ионообменной смолы, заявленный заводом-изготовителем, находился в трех диапазонах: <20 мкм, 20-32 мкм и 56-71 мкм. Установлено, что с увеличением размеров частиц ионообменной смолы влагосодержание уменьшается на 12%, полная обменная емкость практически не изменяется. При этом толщина мембран в сухом и набухшем состоянии падает на 4-5%. Показано, что увеличение диаметра частиц помола ионообменной смолы вызывает уменьшение величины плотности диффузионного потока хлорида натрия через исследуемые мембраны. Получены линейные концентрационные зависимости плотности потока диффузии соли в билогарифмических координатах с близкими к единице значениями коэффициентов детерминации. С использованием полученных данных определен эмпирический коэффициент β , величина которого свидетельствовала о выпуклой форме концентрационного профиля хлорида натрия в фазе мембраны МК-40. С ростом диаметра частиц помола ионообменной смолы от <20 до 56-71 мкм величина коэффициента β возрастает от 1.14 до 1.20. На основании экспериментально определенных значений интегрального коэффициента диффузионной проницаемости и коэффициента β рассчитаны величины дифференциального коэффициента диффузионной проницаемости мембраны. Концентрационные зависимости интегрального и дифференциального коэффициентов диффузионной проницаемости всех исследуемых экспериментальных образцов мембраны МК-40 в растворе хлорида натрия имели традиционный возрастающий характер. С увеличением размера частиц ионообменной смолы установлено падение величины дифференциального коэффициента диффузионной проницаемости более, чем в 2 раза.

Ключевые слова: гетерогенная катионообменная мембрана, размер частиц ионообменной смолы, диффузионная проницаемость, физико-химические свойства.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-19-00397, <https://rscf.ru/project/21-19-00397/>

Для цитирования: Беспалова Я.Р., Добрыдень С.В., Васильева В.И. Диффузионная проницаемость гетерогенной мембраны МК-40 с разным размером частиц сульфокатионообменной смолы // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 5. С. 744-752. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12513>

Original article

Diffusion permeability of heterogeneous MK-40 membrane with different particle sizes of ion-exchange resin

Yana R. Bespalova[✉], Svetlana V. Dobryden, Vera I. Vasilyeva

Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, bespalova.yana2003@yandex.ru[✉]

© Беспалова Я. Р., Добрыдень С. В., Васильева В. И., 2024



Abstract. The main property of ion-exchange membranes is selectivity based on the membrane's ability to pass ions of the same charge while delaying ions of the opposite charge. By varying the composition and structure of membranes, diffusion permeability can be decreased, which will have a positive effect on their selectivity in the processes of electromembrane desalination and concentration. The paper presents a comparative analysis of the physico-chemical and diffusion properties of experimental samples of the heterogeneous sulphocation MK-40 exchange membrane (Innovative Enterprise Shchekinoazot, Russia). The goal of the work was to study the effect of changes in the particle size of ion-exchange resin on the diffusion properties of the membrane. There were three ranges of diameter of the ion-exchange resin grinding particles as declared by the manufacturer: $<20 \mu\text{m}$, $20\text{-}32 \mu\text{m}$, and $56\text{-}71 \mu\text{m}$. It was found that with an increase in the particle size of the ion-exchange resin, the moisture content decreased by 12%, and the total exchange capacity practically did not change. Meanwhile the thickness of the membranes in the dry and swollen states dropped by 4-5%. It was shown that an increase in the diameter of the ion-exchange resin grinding particles caused a decrease in the density of the diffusion flux of sodium chloride through the studied membranes. We obtained linear concentration dependences of the density of the salt diffusion flux in bilogarithmic coordinates with values of determination coefficients close to one. Using the data obtained, we determined the empirical coefficient β , the value of which indicated the convex shape of the sodium chloride concentration profile in the MK-40 membrane phase. With an increase in the diameter of the ion-exchange resin grinding particles from <20 to $56\text{-}71 \mu\text{m}$, the value of the β coefficient increases from 1.14 to 1.20. Based on experimentally determined values of the integral coefficient of diffusion permeability and the coefficient β , we calculated the values of the differential coefficient of diffusion permeability of the membrane. The concentration dependences of the integral and differential coefficients of diffusion permeability of all studied experimental samples of the MK-40 membrane in a sodium chloride solution had a traditional increasing character. With an increase in the particle size of the ion-exchange resin, we found a decrease in the value of the differential coefficient of diffusion permeability by more than twice.

Keywords: heterogeneous cation exchange membrane, particle size of ion-exchange resin, diffusion permeability, physico-chemical properties.

Acknowledgments: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 21-19-00397, <https://rscf.ru/project/21-19-00397/>

For citation: Bepalova Ya.R., Dobryden S.V., Vasilyeva V.I. Diffusion permeability of heterogeneous MK-40 membrane with different particle sizes of ion-exchange resin. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2024. 24(5): 744-752. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12513>

Введение

Механизм и скорость переноса ионов в ионообменных мембранах играют ключевую роль в их практическом применении [1]. Селективность ионообменных мембран является одной из основных технологических характеристик, определяющих перспективность и экономичность диализных и электродиализных процессов. При анализе возможного использования мембран необходимо учитывать такое свойство, как диффузионная проницаемость, которая может снижать их селективность [2-6]. Применение мембран с заданными характеристиками, например, способных предотвращать обратную диффузию веществ, может значительно увеличить эффективность электромембранных процессов и уменьшить потери целевых продуктов.

В основе процессов переноса ионов лежат три механизма: диффузия, миграция и конвекция. Литература по экспериментальным методам определения диффузионных характеристик мембранных материалов достаточно обширна [7, 8]. Метод изучения диффузии раствора электролита через мембрану в «чистую воду» является одним из наиболее простых и удобных подходов. Этот метод позволяет наблюдать процесс диффузии ионов и оценивать диффузионные характеристики мембраны без необходимости использования сложного оборудования и экспериментальных методик [9].

Диффузионные свойства мембраны в стационарных условиях характеризуются как через диффузионный поток вещества через мембрану J , так и через интегральный коэффициент диффузионной проницаемости P_m . Величина P_m является более показательной величиной оценки интен-

сивности диффузионного транспорта через мембрану, так как учитывает влияние толщины мембраны на массоперенос:

$$P_m = \frac{J \cdot d}{c_1 - c_2}, \quad (1)$$

где P_m – интегральный коэффициент диффузионной проницаемости, $\text{м}^2/\text{с}$; J – плотность диффузионного потока электролита через мембрану, $\text{моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; d – толщина мембраны, м ; c_1 – концентрация исходного раствора электролита, $\text{моль}/\text{м}^3$; c_2 – концентрация раствора пермеата, $\text{моль}/\text{м}^3$.

Интегральный коэффициент диффузионной проницаемости является функцией внешних концентраций растворов (в случае соблюдения стационарного состояния). Корректной количественной характеристикой диффузионного переноса электролита через мембрану является дифференциальный коэффициент диффузионной проницаемости P_m^* , который связан с плотностью диффузионного потока в мембране J [9]:

$$J = -P_m^* \cdot \frac{dc}{dx}, \quad (2)$$

где c – концентрация вещества в виртуальном растворе, то есть в гипотетическом электронейтральном растворе, находящемся в локальном равновесии с малым объемом мембраны в точке с координатой x .

Для оценки величины P_m^* с использованием значений интегрального коэффициента диффузионной проницаемости P_m , измеренных непосредственно в эксперименте, используют выражение:

$$P_m^* = P_m \cdot \beta, \quad (3)$$

где P_m^* – дифференциальный коэффициент диффузионной проницаемости, $\text{м}^2/\text{с}$; β – эмпирический коэффициент (наклон зависимости диффузионного потока компонента от его концентрации в растворе в билогарифмических координатах).

Стоит отметить, что информация о величинах P_m^* и β необходима для расчета предельной плотности тока в мембранной системе по уточненному уравнению

Пирса для учета вклада обратной диффузии и оценки чисел переноса ионов в мембране при совместном использовании данных по удельной электропроводности мембран и др. [10].

Высокая диффузионная проницаемость мембраны может снижать её селективность, что особенно важно в таких процессах, как электродиализ и обратный осмос [11]. Однако в процессах диализа основным механизмом переноса является именно диффузия, и разделение компонентов происходит благодаря их различной скорости диффузии. Это различие в скорости может быть обусловлено разницей в молекулярных массах и размерах молекул, а также их заряде и форме [12].

Эффективность конкретных мембранных процессов разделения зависит от разнообразных факторов, среди которых наиболее важными являются свойства используемых мембран. Цель работы состояла в изучении влияния изменения размера частиц ионообменной смолы в экспериментальных гетерогенных мембранах МК-40 на их диффузионные свойства.

Экспериментальная часть

Объекты исследования. Объектами исследования являлись экспериментальные образцы гетерогенных сульфокатионообменных мембран МК-40 с заданным при производстве размером частиц ионообменной смолы в трех диапазонах: меньше 20 мкм, 20-32 мкм и 56-71 мкм. Исследуемые мембраны были произведены на ООО «Инновационное предприятие «Щекиноазот», Россия. Мембрана МК-40 представляет собой композит тонкодисперсных частиц полиэтилена (5 мкм) и частиц катионообменной смолы КУ-2. Последняя представляет собой сульфированный сополимер стирола и дивинилбензола (8%). Соотношение ионообменной смолы и полиэтилена в составе экспериментальных мембран МК-40 являлось традиционным и составляло 65 к

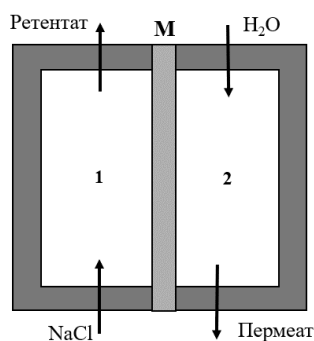


Рис.1. Схема ячейки для измерения диффузионной проницаемости мембран: 1 – отдающая секция, 2 – принимающая секция, М – мембрана

Fig. 1. Scheme of the cell for measuring diffusion permeability of membranes: 1 – giving section, 2 – receiving section, М – membrane

35 масс. %. Мембрана изготовлена вальцовкой с последующим прессованием полученных листов с армирующей тканью (капрон). Фиксированными группами выступают сульфогруппы. Для каждого из образцов мембран была проведена кислотно-щелочная подготовка, которая осуществлялась путем выдерживания образца в растворах хлорида натрия, а затем в растворах соляной кислоты и щелочи разной концентрации [13].

Методы исследования. Физико-химические свойства определяли согласно стандартным методам испытаний ионообменных мембран [14]. Измерение полной обменной емкости мембран Q проводили в статических условиях методом кислотно-основного титрования с определением общего количества противоионов, вступивших в ионный обмен по реакции нейтрализации. Расчет полной обменной емкости проводился с учетом влагосодержания W , которое определялось методом воздушно-тепловой сушки образцов мембран при температуре 100°C до постоянного веса. Толщина l набухших образцов мембран измерялась микрометром с точностью до 5 мкм после удаления воды с поверхности образцов с помощью фильтровальной бумаги.

Диффузионная проницаемость мембран изучалась традиционным методом оценки количества электролита, перенесенного из раствора соли заданной концентрации под влиянием диффузионных

сил через исследуемую мембрану в так называемую «чистую воду» [13].

Экспериментальная часть работы по изучению переноса хлорида натрия через ионообменные мембраны была выполнена в двухсекционном диализаторе непрерывного действия (рис. 1). Высота разделяющей секции мембраны составляла 4.2 см, глубина секции – 0.6 см, ширина рабочей части мембраны – 1.7 см.

Исходный раствор хлорида натрия подавали с помощью регулируемых зажимов в секцию 1 диализного аппарата снизу вверх, а через смежную приемную секцию 2 в режиме противотока пропускали дистиллированную воду. По объему вытекающей жидкости измерялась объемная и рассчитывалась линейная скорость подачи растворов. Дистиллированная вода подавалась в секцию ячейки с линейной скоростью $9 \cdot 10^{-5}$ м/с. Раствор электролита пропусклся со скоростью $40 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Измерения осуществляли в стационарном режиме, достижение стационарного состояния определялось по постоянству концентрации компонентов в растворе приемной секции (пермеате). Концентрация хлорида натрия в пермеате определялась с помощью метода пламенной фотометрии.

Расчет диффузионного потока вещества через мембрану и интегрального коэффициента диффузионной проницаемо-

Таблица 1. Физико-химические свойства мембраны МК-40 с разным диаметром частиц помола сульфокатионообменной смолы

Table 1. Physico-chemical properties of МК-40 membrane with different diameter of grinding particles of sulfonated cation exchange resin

$d_{\text{помола}}$, МКМ	Q , ммоль/Г _{сух}	W , %	$l_{\text{сух}}$, МКМ	$l_{\text{набух}}$, МКМ
<20	2.54±0.02	40.4±0.6	400±20	525±9
20-32	2.52±0.02	38.4±0.9	384±19	514±5
56-71	2.54±0.03	35.7±0.6	386±17	497±14

сти проводился на основании экспериментального определения концентрации хлорида натрия в принимающей секции:

$$J = \frac{C \cdot V_{\text{об.}}}{S}, \quad (4)$$

где J – плотность потока хлорида натрия через мембрану, моль/(м²·с); S – площадь рабочей поверхности мембраны, м²; C – концентрация хлорида натрия в принимающей секции, моль/м³; $V_{\text{об}}$ – объемная скорость раствора в принимающей секции, м³/с.

Обсуждение результатов

Физико-химические свойства мембраны МК-40 с различным размером частиц ионообменной смолы. В ходе исследования экспериментальных образцов катионообменной мембраны МК-40 было выявлено влияние изменения диаметра частиц помола ионообменной смолы на их физико-химические свойства. Установлено, что с увеличением размеров частиц ионообменной смолы полная обменная емкость Q мембран практически не изменяется (менее 1%), влагосодержание W уменьшается на 12%. При этом толщина мембран в сухом и набухом состоянии падает на 3.7% и 5.3% соответственно (табл.1).

Следует отметить, что представленные результаты получены для образцов мембран после их кислотно-щелочного кондиционирования. Использование солевой подготовки мембран обуславливает их заниженные физико-химические характеристики, представленные в работе [15].

Выявленное уменьшение влагосодержания исследуемых образцов обусловлено значительным падением пористости

сульфокатионообменных мембран при росте размера ионообменных частиц [16].

Диффузионные свойства мембраны МК-40 с различным размером частиц ионообменной смолы. Полученные в билогарифмических координатах концентрационные зависимости диффузионных потоков через мембраны с различным размером частиц ионообменной смолы представлены на рис.2.

Известно, что величина диффузионного потока через мембрану лимитируется потоком коинов и зависит от концентрации функциональных групп в мембране Q и концентрации внешнего раствора [8]. Установлено, что с уменьшением размера ионообменных частиц при практически постоянной обменной емкости экспериментальных мембран и с увеличением концентрации раствора хлорида натрия и влагосодержания мембран величина диффузионного потока растет (рис. 2). Так как рост влагосодержания снижает соответствующие стерические затруднения для диффундирующих частиц и вызывает ослабление их взаимодействий с фиксированными группами мембраны. В билогарифмических координатах все концентрационные зависимости диффузионного потока характеризуются близкими к единице значениями коэффициентов детерминации R^2 и имеют линейный вид (табл. 2). Полученные зависимости описываются корреляционными функциями вида $-\lg(J, \text{ моль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})) = \beta \cdot (-\lg(C, \text{ моль}/\text{дм}^3)) + a$.

Величина тангенса угла наклона β полученных зависимостей изменяется от 1.14 до 1.20 в зависимости от размера частиц ионообменной смолы (табл. 2). Полученные величины β соответствуют диа-

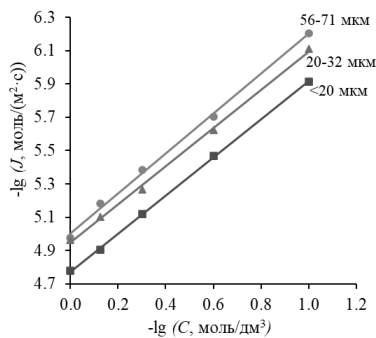


Рис. 2. Концентрационные зависимости плотности диффузионного потока хлорида натрия через мембрану МК-40 с разным диаметром частиц помола ионообменной смолы в билогарифмических координатах

Fig. 2. Concentration dependences of the diffusion flux density of sodium chloride through the MK-40 membrane with different diameter of grinding particles of ion-exchange resin in bilogarithmic coordinates

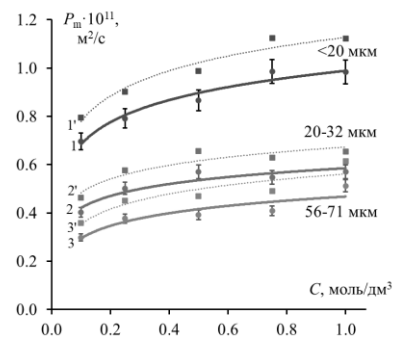


Рис. 3. Концентрационные зависимости интегрального P_m (1, 2, 3) и дифференциального P_m^* (1', 2', 3') коэффициентов диффузионной проницаемости мембраны МК-40 с разным диаметром частиц помола ионообменной смолы в растворах хлорида натрия

Fig. 3. Concentration dependences of integral P_m (1, 2, 3) and differential P_m^* (1', 2', 3') diffusion permeability coefficients of MK-40 membrane with different diameter of grinding particles of ion-exchange resin in sodium chloride solutions

Таблица 2. Характеристики билогарифмической концентрационной зависимости плотности диффузионного потока хлорида натрия через мембрану МК-40 с разным диаметром частиц помола ионообменной смолы

Table 2. Characteristics of the bilogarithmic concentration dependence of the diffusion flux density of sodium chloride through the MK-40 membrane with different diameter of grinding particles of ion-exchange resin

$d_{\text{помола}}, \text{ мкм}$	$-\lg J = \beta \cdot (-\lg C) + a$	R^2
<20	$-\lg J = 1.14 \cdot (-\lg C) + 4.77$	0.999
20-32	$-\lg J = 1.15 \cdot (-\lg C) + 4.95$	0.998
56-71	$-\lg J = 1.20 \cdot (-\lg C) + 5.01$	0.997

пазону изменения этой величины в зависимости от типа мембран и природы электролита [17]. Например, при проведении диффузионного диализа растворов хлорида натрия через коммерческую мембрану МК-40 величина параметра β составляет 1.25 [18].

Теоретический анализ концентрационного профиля диффундирующего вещества в мембране, сделанный в работах Н.П. Гнусина и др. [17, 19], показал, что при $\beta > 1$ концентрационный профиль вещества в фазе мембраны выпуклый, а величина P_m растет с увеличением концентрации раствора. При $\beta < 1$ концентрационный профиль вогнутый, при этом величина P_m уменьшается с ростом концентрации диффундирующего компонента в

растворе. Случай $\beta = 1$ отвечает линейному характеру концентрационного профиля, а величина P_m не зависит от концентрации.

Выявленное значение параметра β для каждого из образцов экспериментальной катионообменной мембраны МК-40 больше единицы и увеличивается на 5% по мере увеличения размеров частиц ионообменной смолы.

Известно, что плотность диффузионного потока электролита через мембрану с ростом концентрации раствора всегда увеличивается. Однако интегральный и дифференциальный коэффициенты диффузионной проницаемости могут при этом не только возрасти, но и уменьшаться или оставаться постоянными [20].

Установлено, что величина интегрального и дифференциального коэффициентов диффузионной проницаемости исследуемых мембран в растворах хлорида натрия с увеличением его концентрации растет (рис. 3). Полученные результаты соответствуют рассчитанным величинам $\beta > 1$.

Найденные значения интегрального коэффициента диффузионной проницаемости принадлежат диапазону изменения данной величины для различных типов ионообменных мембран: $10^{-12} < P_m < 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ [21].

Полученные результаты согласуются с изменением физико-химических и структурных характеристик поверхности исследуемых экспериментальных мембран [16]. В работе [15] для образцов мембран после солевой предподготовки с увеличением размера частиц ионообменной смолы установлено уменьшение влагосодержания и поверхностной пористости, вследствие чего уменьшается диффузионная проницаемость.

Заключение

Исследовано влияние размера частиц сульфокатионообменной смолы на физико-химические характеристики и диффузионные свойства мембран МК-40. Сравнительный экспериментальный анализ физико-химических свойств мембран с разным диаметром частиц помола вы-

явил, что с ростом размера частиц ионообменной смолы влагосодержание падает на 12%, толщина мембран в сухом и набухшем состоянии уменьшается на 3.7 и 5.3% соответственно. При этом полная обменная емкость мембран практически не зависит от размера частиц ионообменной смолы.

Установлено, что с уменьшением диаметра частиц помола ионообменной смолы и ростом концентрации раствора хлорида натрия плотность диффузионного потока, интегральный и дифференциальный коэффициенты диффузионной проницаемости мембран растут. Изменение диффузионных характеристик согласуется с изменениями физико-химических свойств и структурных параметров поверхности исследуемых образцов мембран. Таким образом, увеличение размера частиц ионообменной смолы может способствовать увеличению селективности мембраны в электрообменных процессах разделения и концентрирования за счет снижения диффузионного переноса электролита.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы/References

1. Yaroslavtsev A.B., Nikonenko V.V., Zabolotskii V.I. Ionnyi perenos v membranakh i ionoobmennyykh materialakh. *Uspekhi khimii*. 2003; 72(5): 438-470. <https://doi.org/10.1070/rc2003v072n05abeh000797> (In Russ.)
2. Vasil'eva V.I., Shaposhnik V.A., Grigorochuk O.V., Metaie M., Ovcharenko E.O. Raspredelenie kontsentratsii aminokislot pri diffuzii cherez kationoobmennuyu membranu. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 2000; 74(5): 937-941. (In Russ.)

3. Berezina N.P., Karpenko L.V. Perkol'yatsionnye efekty v ionoobmennyykh materialakh. *Kolloidnyi zhurnal*. 2000; 62(6): 749-757. (In Russ.)

4. Gnusin N.P., Parshikov S.B., Demina O.A. Reshenie zadachi elektrodifuzionnogo perenosa cherez ionoobmennuyu membranu pri proizvod'noi kontsentratsii vneshnego rastvora. *Elektrokhimiya*. 1998; 34(11): 1316-1319. (In Russ.)

5. Falina I. V., Demina O. A., Kononenko N. A., Myakinchenko I. A. A Model Description of Diffusion Permeability of Bilayer Ion-Exchange Membranes. *Colloid*



- Journal*. 2020; 82(2): 200-207. <https://doi.org/10.1134/S1061933X20010044>
6. Shutkina E. A., Nevakshenova E.E., Pis'menskaya N.D., Mareev S.A., Nikonenko V.V. Diffuzionnaya pronitsaemost' anionoobmennyykh membran v rastvorakh digidrofosfata natriya. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy*. 2015; 17(4): 566-578. (In Russ.)
7. Yaroslavtsev A.B. [et al]. Membrany i membrannyye tekhnologii. Moscow, Nauchnyi mir, 2013, 611 p. (In Russ.)
8. Nikolaev N.I. Diffuziya v membranakh. Moscow, Khimiya, 1980, 232 p.
9. Zabolotskii V.I., Nikonenko V.V. Perenos ionov v membranakh. Moscow, Nauka, 1996, 392 p. (In Russ.)
10. Kononenko N.A., Demina O.A., Loza N.V., Dolgopolov S.V., Timofeev S.V. Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie predelnogo diffuzionnogo toka v sistemakh s modifitsirovannymi perfortirovannymi sul'fokationitovymi membranami. *Elektrokhimiya*. 2021; 57(5): 283-300. <https://doi.org/10.31857/S0424857021050066> (In Russ.)
11. Zabolotskii V.I., Berezina N.P., Nikonenko V.V., Shudrenko A.A. Razvitiye membrannykh tekhnologii na osnove elektrodializa v Rossii. *Nauka Kubani*. 2010; 3: 4-10. (In Russ.)
12. Iordanskii A.L., Shterenzon A.L., Moiseev Yu.B., Zaikov G.E. Diffuziya elektrolitov v polimerakh. *Uspekhi khimii*. 1979; 48(8): 1460-1491. <https://doi.org/10.1070/RC1979v048n08ABEH002411> (In Russ.)
13. Berezina N.P., Kononenko N.A., Dyomina O.A., Gnusin N.P. Characterization of ion-exchange membrane materials: properties vs structure. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2008; 139(1-2): 3-28. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.01.002>
14. Kononenko N.A., Demina O.A., Loza N.V., Falina I.V., Shkirskaya S.A. Membrannaya elektrokhimiya. Krasnodar, Kubanskii gosudarstvennyi universitet, 2015, 290 p. (In Russ.)
15. Vasil'eva V.I., Meshcheryakova E.E., Chernyshova O.I., Brovkina M.A., Falina I.V., Akberova E.M., Dobryden' S.V. Transport and structural characteristics of heterogeneous ion-exchange membranes with varied dispersity of the ion exchanger. *Membranes and Membrane Technologies*. 2024; 6(2): 120-131. <https://doi.org/10.1134/S2517751624020082>
16. Dobryden' S. V., Vasil'eva V. I., Akberova E. M., Mamonov D. R., Bepalova Ya. R. Vliyanie razmera chastits sul'fokationoobmennoi smoly na fiziko-khimicheskie svoystva i morfologiyu poverkhnosti geterogennoi membrany MK-40. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy*. 2024; 26(2): 356-361. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/12044> (In Russ.)
17. Gnusin N.P., Berezina N.P., Shudrenko A.A., Ivina O.P. Diffuziya elektrolita cherez ionoobmennyye membrany. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 1994; 68(3): 565-570. (In Russ.)
18. Veisov B.K., Grebenyuk V.D. Diffuzionnaya pronitsaemost' geterogennykh ionitovykh membran MA-40 i MK-40. *Khimiya i tekhnologiya vody*. 1985; 7(3): 32-35. (In Russ.)
19. Gorobchenko A.D., Gil' V.V., Nikonenko V.V., Sharafan M.V. Matematicheskoe modelirovanie selektivnogo perenosa odnozaryadnykh ionov cherez mnogoslounuyu kompozitnuyu ionoobmennuyu membranu v protsesse elektrodializa. *Membrany i membrannyye tekhnologii*. 2022; 12(6): 480-490. <https://doi.org/10.31857/S2218117222060049> (In Russ.)
20. Filippov A.N. Yachechnaya model' ionoobmennoi membrany. Elektrodifuzionnyi koeffitsient i diffuzionnaya pronitsaemost'. *Kolloidnyi zhurnal*. 2021; 83(3): 360-372. <https://doi.org/10.31857/S002329122103006X> (In Russ.)
21. Berezina N.P. Elektrokhimiya membrannykh sistem. Krasnodar, Kubanskii gosudarstvennyi universitet, 2009, 137 p. (In Russ.)



Информация об авторах / Information about the authors

Я.Р. Беспалова – студент кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

С.В. Добрыдень – магистрант кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

В.И. Васильева – д. х. н., профессор кафедры аналитической химии Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

Ya.R. Bepalova – student of the Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: bepalova.yana2003@yandex.ru

S.V. Dobryden – master's student of the Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: dobryden_00@mail.ru

V.I. Vasil'eva – Dr. Sci. (Chem.), Professor at the Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: viv155@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.06.2024; одобрена после рецензирования 05.08.2024; принята к публикации 07.08.2024.

The article was submitted 22.06.2024; approved after reviewing 05.08.2024; accepted for publication 07.08.2024.