



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.64

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11697

Сорбционные и транспортные свойства ароматического (со)полиамида

Надежда Львовна Струсовская¹✉,

Наталья Николаевна Матушкина¹, Олеся Николаевна Забегаева²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,
nlshome@yandex.ru✉

²Институт элементоорганических соединений Российской Академии наук им. А.Н. Несмеянова,
Москва, Россия

Аннотация. Разделение водно-спиртовых растворов и дегидратация N,N-диметилацетамида (ДМАА), образующих азеотропы, важно для получения полимерных материалов, обезвоженных спиртов для медицины, топливной, пищевой и др. отраслей промышленности. В настоящее время в мире в эксплуатации находятся около ста первапорационных модулей, большинство из которых предназначены для дегидратации различных растворителей, таких как этанол, изопропанол и др. Известно, что полиамидные и полиимидные пленки из-за их высокой термической стабильности, хорошей механической прочности и высокой устойчивости к органическим растворителям рассматриваются как перспективные мембранные материалы. Нами был синтезирован (со)полиамид низкотемпературной поликонденсацией хлорангидрида терефталевой кислоты с 4,4'-диаминодифенилоксидом и 3,5-диаминобензойной кислотой в N-метил-2-пирролидоне (N-МП). Были изучены транспортные характеристики мембран, отлитых из этого (со)полиамида (СПА). Показано, что после вымачивания образцов в воде масса пленки уменьшается больше, чем после вымачивания в изопропанол. Возможно, это связано с разной полярностью молекул применяемых растворителей. Проверено утверждение, что учет вымытых примесей из полимера дает истинную величину сорбции, присущую ему. Методом первапорации было изучено разделение смеси вода-изопропанол в интервале концентраций 0-100 масс.% воды при разных температурах. Показано, что во всем диапазоне исследуемых концентраций пермеат обогащен водой. Коэффициенты разделения для мембран СПА сравнимы с мембранами PIM и TFC. На пленках СПА была изучена температурная зависимость сорбции, проницаемости и селективности водных растворов ДМАА (5:1). Показано, что сорбция раствора полимером не изменяется в пределах 20-50°C, затем уменьшается, а проницаемость разделяемой смеси возрастает в 2-3 раза, причем пермеат содержит только воду. Таким образом, (со)полиамид СПА может рассматриваться как основа для получения селективных мембран при дегидратации спиртов и органических растворителей.

Ключевые слова: сорбция, первапорация, мембраны, полиамиды, изопропанол, N,N-диметилацетамид.

Благодарности: работа выполнена в рамках работ по теме № 121031300090-2 госзадания. Часть работы по получению и характеристики (со)полиамида была выполнена в рамках Государственного задания №075-03-2023-642 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации с использованием научного оборудования Центра исследования строения молекул ИНЭОС РАН.

Для цитирования: Струсовская Н.Л., Матушкина Н.Н., Забегаева О.Н. Сорбционные и транспортные свойства ароматического (со)полиамида // *Сорбционные и хроматографические процессы. 2023. Т. 23, № 5. С. 762-771.* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11697>



Original article

Sorption and transport properties of aromatic (co)polyamide

Nadezhda L. Strusovskaya¹✉, Nataliya N. Matushkina¹, Olesya N. Zabegaeva²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, nlshome@yandex.ru✉

²Nesmeyanov Institute of Organo-Element Compounds of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The separation of aqueous-alcohol solutions and dehydration of N,N-dimethylacetamide (DMAA), which form azeotropes, is important for the production of polymer materials, anhydrous alcohols for medicine, fuel, food and other industries. Currently, there are about one hundred pervaporation modules in operation around the world, most of which are designed for the dehydration of various solvents, such as ethanol, isopropanol, etc. It is known that polyamide and polyimide films, due to their high thermal stability, good mechanical strength, and high resistance to organic solvents, are considered promising membrane materials. We synthesized (co)polyamide by low-temperature polycondensation of terephthalic acid chloride with 4,4'-diaminodiphenyloxide and 3,5-diaminobenzoic acid in N-methyl-2-pyrrolidone (N-MP). The transport characteristics of membranes cast from this (co)polyamide (SPA) were studied. It was shown that after soaking the samples in water, the weight of the film decreased more than after soaking in isopropanol. This may be due to the different polarity of the molecules of the solvents used. The statement, taking into account the washed out impurities from the polymer, provides the true value of sorption was verified. The separation of a water-isopropanol mixture in the concentration range of 0-100 wt. % water at different temperatures was studied using the pervaporation method. It was shown that over the entire range of concentrations studied, the permeate is enriched with water. Separation coefficients for SPA membranes are comparable with those for PIM and TFC membranes. The temperature dependence of sorption, permeability and selectivity of aqueous solutions of DMAA (5:1) was studied for SPA films. It has been shown that the sorption of the solution by the polymer did not change within 20-50°C, then decreases, and the permeability of the separated mixture increased by 2-3 times, and the permeate contained only water. Thus, SPA (co)polyamide can be considered as a basis for obtaining selective membranes during the dehydration of alcohols and organic solvents.

Keywords: sorption, pervaporation, membranes, polyamides, isopropanol, N,N-dimethylacetamide

Acknowledgments: the work was carried out as part of the work on the topic No. 121031300090-2 of the state task. Part of the work on the preparation and characterization of (co)polyamide was performed within the framework of State Task No.075-03-2023-642 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation using scientific equipment of the INEOS RAS Molecular Structure Research Center.

For citation: Strusovskaya N.L., Matushkina N.N., Zabegaeva O.N. Sorption and transport properties of aromatic (co)polyamide. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(5): 762-771. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11697>

Введение

Разделение водно-спиртовых растворов, часто образующих азеотропы, важно для получения обезвоженных спиртов для медицины, топливной, пищевой и др. отраслей промышленности. Также большое значение имеет N,N-диметилацетамид (ДМАА) – высокоэффективный апротонный растворитель, особенно для выпуска полимерных материалов, таких, как пластмассы, пленки, лаки, краски, российские высокопрочные термостойкие синтетические арамидные волокна. Он также образует с водой азеотроп, устойчивый до 100°C [1-5]. Пervaporation является актуальным мембранным

процессом для дегидратации водно-спиртовых смесей. В настоящее время в мире в эксплуатации находятся около ста pervaporationных модулей, большинство из которых предназначены для дегидратации различных растворителей, таких как этанол, изopropanол и др. [6].

Необходимость очистки, концентрирования и выделения органических растворителей требует создания новых материалов с высокой проницаемостью и селективностью. Известно, что полиамидные и полиимидные пленки из-за их высокой термической стабильности, хорошей механической прочности и высокой устойчивости к органическим растворителям

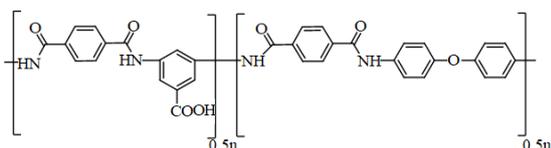
телям рассматриваются как перспективные мембранные материалы [7]. Вопросу создания новых мембранных материалов для подобных целей уделяется большое внимание [8].

В этой статье изучали первапорационные характеристики мембран, полученных из (со)полиамида на основе хлорангидрида терефталевой кислоты, 4,4'-диаминодифенилоксида и 3,5-диаминобензойной кислоты для разделения водно-спиртовых растворов и дегидратации растворов ДМАА.

Экспериментальная часть

Объектами исследования были пленки, сформованные из ароматического (со)полиамида на основе хлорангидрида терефталевой кислоты, 4,4'-диаминодифенилоксида и 3,5-диаминобензойной кислоты (1.0: 0.5: 0.5 мол.) (СПА) и следующие сорбаты: вода, изопропанол (осч. ТУ 2631-064-44493179-01), ДМАА (перегнанный над P₂O₅, содержание воды по Фишеру 0.034%) табл.1.

Получение (со)полиамида. (Со)полиамид следующего строения:



получали низкотемпературной поликонденсацией хлорангидрида терефталевой кислоты с 4,4'-диаминодифенилоксидом и 3,5-диаминобензойной кислотой в N-МП. В трёхгорлую сердцевидную колбу (250 см³), оснащённую механической верхнеприводной мешалкой и отводом для подачи аргона, загрузили диамины: 2.62 г (0.017 моль) 3,5-диаминобензойной кислоты, 3.45 г (0.017 моль) 4,4'-диаминодифенилоксида и 50 см³ сухого N-МП. Мономеры растворяли в токе аргона при комнатной температуре с перемешиванием. Затем раствор охладили смесью ацетона и жидкого азота до -25°C и порционно ввели 7.00 г (0.034 моль) твёрдого хлорангидрида терефталевой кислоты. Реакционную массу перемешивали при -

25°C до образования гомогенного раствора и вели реакцию ещё 2 часа. Далее температуру реакционной смеси повышали до комнатной (23-25°C) и продолжали перемешивание 1 час. Полученный вязкий раствор разбавили N-МП до 5% концентрации, и выделили полимер в виде волокон осаждением в пятикратный объём воды. Полимер отфильтровывали и многократно промывали дистиллированной водой, затем ацетоном в аппарате Сокслета в течение 48 часов. Продукт сушили на воздухе 12 часов, затем в вакуум-сушильном шкафу при 80°C 12 часов и окончательно при 100°C и 1 мм.рт.ст. двое суток. Выход 96% (10.15 г). Элементный анализ: вычислено для C₃₅H₂₄N₄O₇: С 68.63; Н 3.92; N 9.15, найдено: С 67.95; Н 4.31; N 9.02. ИК см⁻¹: 2500-3650 (О-Н), 1721 (С=О), 1648 (Амид I), 1604 (Амид II). η_{ln}=1.6 дл/г, T_c=310°C.

Получение пленок. Пленки СПА были изготовлены поливом 10 масс.% раствора полимера в N-МП на стеклянную подложку с последующим испарением растворителя при 70°C. Толщину образующихся пленок регулировали с помощью микрометра (толщина зазора 800 мкм). Затем полученные пленки (60 мкм) снимали со стеклянной подложки и сушили в вакууме (2 мм рт. ст.) при 70°C в течение 6 часов, 100°C – 2 часа и, наконец, при 150°C – 0.5 часа.

Методы исследования. ИК-спектры полимера регистрировали на приборе Vertex-70v Fourier (Bruker). Логарифмическую вязкость (η_{ln}) полимера определяли вискозиметрическим методом. Время истечения раствора 0.05 г образца в 10 см³ N-МП измеряли в вискозиметре Оствальда при 25°C. Температуру стеклования (T_c) определяли с помощью термомеханического анализа на приборе ТМА Q-400 при фиксированной нагрузке 0.034 МПа и скорости нагрева 5°C/мин. Термогравиметрический анализ проводили на воздухе на приборе STA 6000

Таблица 1. Характеристики объектов исследования
 Table 1. Characteristics of research objects

Объекты исследования	Мол. масса	ρ , г/см ³	$T_{\text{кип}}$, °С	Динам. вязкость, сП [9, 10]	Мольн. объем растворителя, см ³ /моль
Вода	18.0	1.00	100.0	1.000	18.10
Изопропанол	60.1	0.78	82.6	0.002	76.96
ДМАА	87.1	0.94	165.5	0.919	93.02

PerkinElmer при скорости нагрева 5°С/мин.

При первапарации, включающей в себя сорбцию исходного раствора на поверхности мембраны, диффузию сорбируемых молекул через мембрану и десорбцию проникающих молекул с другой стороны мембраны [11], сорбция компонентов является лимитирующей стадией [2]. Поэтому нами уделено большое внимание изучению сорбции.

Сорбцию жидкостей проводили весовым методом, погружая исследуемые образцы в жидкость при атмосферном давлении и различных температурах по методике, описанной в [12]. Степень набухания полимера Δm (%) определяли гравиметрически с точностью $\pm 10^{-4}$ г до достижения постоянного веса:

$$\Delta m = \frac{m_{\infty} - m_0}{m_0} \cdot 100, \quad (1)$$

где m_{∞} – масса образца при равновесии, m_0 – исходная масса образца.

Эксперименты по первапарации исследованных смесей проводили в режиме испарения в вакуум на установке площадью 0.002 м². Прошедшие через мембрану пары конденсировались в ловушке, охлаждаемой жидким азотом. Плотность первапарационного потока J (кг/м²·час) определяли по количеству пенетранта, выделившегося через единицу площади мембраны в единицу времени, избыточную плотность потока целевого компонента (воды) $J_{\text{изб}}$ определяли как поток воды, прошедшей через мембрану, отсчитанный от раствора исходной концентрации и рассчитывали по формуле:

$$J_{\text{изб}} = J(x' - x_0), \quad (2)$$

где x_0 и x' — массовая доля воды в растворе и паре соответственно. Коэффициент разделения:

$$\alpha = \frac{x'(1-x')}{x_0(1-x_0)} \quad (3)$$

Состав пенетранта анализировали рефрактометрическим методом (погрешность 0.2 об.%). Значения плотности потока принимали за стационарные после того, как результаты 5-7 последовательных взвешиваний были постоянны в пределах ошибки эксперимента [13].

Обсуждение результатов

Известно, что в исходном полимере остаются непрореагировавшие вещества, остатки катализатора, олигомеры и т.п., которые вымываются при контакте с жидкостью. При изучении сорбции воды и изопропанола обнаружен аномальный вид кинетических кривых с экстремумами, аналогичный наблюдавшемуся на полиимидах в работе [14]. Было высказано предположение, что изменение массы образцов, вероятно, является результатом двух процессов – уменьшения массы за счет вымывания примесей и увеличения массы за счет сорбции изучаемых сорбатов. Был показан путь учета этих примесей [14, 15]:

- определить Δm по уравнению (1);
- затем набухшую пленку высушить на воздухе и определить Δm_b – относительную массу выделившихся из пленок за время проведения опыта примесей:

$$\Delta m_b = \frac{m_0 - m_{\text{сух}}}{m_0} \cdot 100 \quad (4)$$

- тогда истинная сорбция полимером данного сорбата будет равна:

$$S = \Delta m + |\Delta m_b|. \quad (5)$$

Таблица 2. Проницаемость и сорбция исследованных сорбатов на СПА
 Table 2. Permeability and sorption of the studied sorbates on SPA

Сорбат	T, °C	$J \cdot 10^2$, кг/м ² ·час	Δm , %	$\Delta m'$, %	S, %	$\Delta m'$, %
Вода	24	3.0	-11.1±0.4	19.4±0.7	8±1	8.6±0.7
	50	12.4	-9.5±0.4	17.1±0.4	7.5±0.3	8.4±0.3
	70	16.0	-10.7±0.8	15.0±0.4	4.3±0.8	2.7±0.6
Изопропанол	24	0.20	4.1±0.4	11.0±0.9	15.6±0.6	16.0±0.7
	50	8.0	3.3±0.5	9.4±0.9	12.7±0.9	11.4±0.8

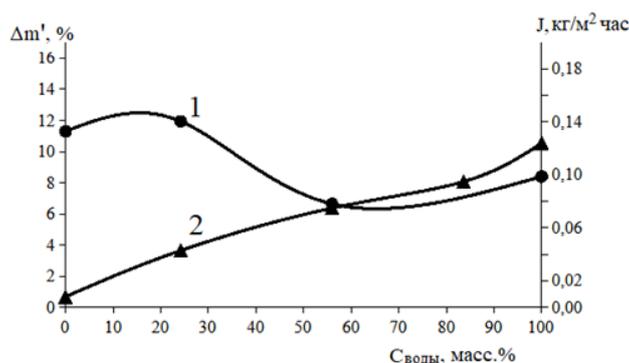


Рис. 1. Концентрационные зависимости сорбции (1) и плотности потока (2) в системе СПА-вода-изопропанол при 50°C.

Fig. 1. Concentration dependences of sorption (1) and flux density (2) in the SPA-water-isopropanol system at 50°C

Ранее мы показали, что при высушивании полимера поглощенный сорбат удаляется, а при повторном взаимодействии пленки с сорбатом все возможные объемы заполняются жидкостью [12]. При повторном измерении сорбции ($\Delta m'$):

$$\Delta m' = \frac{m_{\infty} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}}} \cdot 100. \quad (6)$$

в пределах ошибки эксперимента величины S и $\Delta m'$ совпадают (табл. 2). Таким образом, показано, что учет вымытых примесей из полимера дает истинную величину сорбции, присущую ему.

Следует отметить, что после вымачивания образцов в воде масса пленки уменьшается больше, чем после вымачивания в изопропанол (табл. 2, Δm). Подобная тенденция также наблюдалась для мембранных материалов на основе полиимидных композитов [14]. Возможно, это связано с разной полярностью молекул применяемых растворителей. Индексы

полярности воды, изопропилового спирта и N-МП составляют 10.2, 3.9 и 6.7 [16] соответственно. Вероятно, вода, как более полярный растворитель, легче вымывает N-МП по сравнению с менее полярным изопропиловым спиртом.

Известно, что структура водно-спиртовых растворов весьма неоднородна [17]. Молекулы спирта, имеющие больший размер, чем вода, проявляют одновременно гидрофобные и гидрофильные свойства. Углеводородные неполярные группы молекул спирта ($-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$) размещаются в пустотах структуры воды, а полярные гидроксильные ($-\text{OH}$) группы встраиваются в сетку водородных связей воды. При растворении небольших количеств спирта структура воды все же сохраняется, претерпевая лишь незначительную деформацию [18].

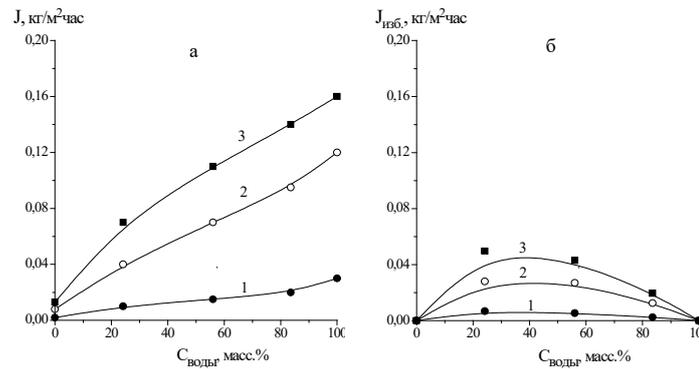


Рис. 2. Концентрационные зависимости плотности потоков J (а) и $J_{изб}$ (б) в системе СПА-вода-изопропанол в процессе первапорации при 24°C (1), 50°C (2) и 70°C (3)
 Fig. 2. Concentration dependences of flux density J (a) and J_{exc} (b) in the SPA-water-isopropanol system during pervaporation at 24°C (1), 50°C (2), and 70°C (3)

Таблица 3. Селективность и коэффициент разделения мембран СПА в процессе первапорации
 Table 3. Selectivity and separation coefficient of SPA membranes during pervaporation

Конц. воды в раств. масс. доля	Температура, °C					
	24		50		70	
	Конц. воды в паре, масс.доля	Коэфф. разделения	Конц. воды в паре, масс.доля	Коэфф. разделения	Конц. воды в паре, масс.доля	Коэфф. разделения
0.242	0.92	36	0.94	53	0.95	62
0.560	0.92	9	0.95	16	0.95	16
0.836	0.96	5	0.97	6	0.98	6

С дальнейшим повышением концентрации спирта структура воды нарушается. В области средних концентраций спирта устанавливается динамическое равновесие ассоциатов из одинаковых молекул, агрегатов из разнородных молекул и одиночных молекул спирта и воды. [19, 20]. Молекула изопропанола тяжелее молекулы воды в 3.3 раза, а его молярный объем в 4.2 раза больше. Полученные результаты показывают, что величина сорбции изопропанола больше, чем у воды (рис. 1, кривая 1). Показано, что увеличение концентрации воды в исходном растворе приводит к уменьшению степени набухания пленок СПА и одновременному росту проницаемости (рис. 1, кривая 2).

Методом первапорации было изучено разделение смеси вода-изопропанол в интервале концентраций 0-100 масс.% воды

при разных температурах. Полученные данные приведены на рис. 2 и в табл. 2-3. Недостатком исследуемых мембран является низкая величина плотности потока пермеата. Добиться увеличения плотности потока можно за счет уменьшения толщины мембраны. Данные табл. 3 показывают, что мембраны СПА селективны по отношению к воде, т.е. во всем диапазоне исследуемых концентраций пермеат обогащен водой. Коэффициенты разделения для мембран СПА сравнимы с мембранами РИМ [21], ТФС [22], но значительно меньше, чем для композитных полиамидных мембран [23]. Нами было показано [24], что избыточная плотность потока чистого целевого компонента (в данном случае воды), объединяющая в себе две основные характеристики процесса разделения: проницаемость (произ-

Таблица 4. Проницаемость и сорбция исследованных сорбатов на СПА

Table 4. Permeability and sorption of the studied sorbates on SPA

Сорбат	T, °C	$J \cdot 10^2$, кг/м ² ·час	Конц. воды в перме- ате, масс. %	$\Delta m'$, %	S, %
Вода-ДМАА (5:1)	24	0.61	100	7.5±0.2	9±2
	50	2.53	100	6.2±0.7	6±2
	70	4.42	100	5.1±0.3	4.6±0.7

водительность) и селективность (изменение концентрации целевого компонента в пермеате), является более информативной характеристикой процесса и может рассматриваться как критерий эффективности разделения. Она равна плотности потока чистого целевого компонента сверх исходного количества в данном растворе. Представленные на рис. 2б данные показывают, что максимальный критерий эффективности реализуется при проведении процесса разделения смеси вода-изопропанол при температуре 70°C.

Ранее считалось, что изменение температуры на несколько градусов практически не влияет на величину сорбции жидкостей полимерами. В последние годы появился интерес к температурным эффектам в адсорбции [25]. Было показано, что повышение температуры может приводить, как к увеличению сорбции, так и к уменьшению [26, 27]. В работе [7] установили, что с увеличением температуры с 20 до 40°C наблюдался рост сорбционной емкости полиамидных мембран на основе поли-м-фениленизофталамида по отношению к лизоциму куриных яиц. Нами было показано, что сорбция воды пленками СПА при 24 и 50°C не изменяется, а изопропанола становится меньше на 3% (табл. 2). С повышением температуры до 70°C сорбция воды полимером уменьшается почти в 2 раза. Обратный эффект наблюдали для сорбции воды целлюлозой в той же области температур 50-60°C, объясняя его конкуренцией двух тенденций: изменением структуры водородных связей (разрыв Н-связей между молекулами воды и ОН-группами целлюлозы и усилением взаимодействия между

собственными ОН-группами полимера) и ростом кинетической подвижности молекул, приводящем к увеличению совместимости воды с целлюлозой [27]. Известно, что повышение температуры в процессе первапорации водных растворов спиртов снижает вязкость воды, что приводит к увеличению проницаемости мембраны [26]. Приведенные на рис. 2а данные подтверждают этот факт. Наблюдается увеличение плотности потока в 4-7 раз в исследуемом диапазоне температур.

Исследование структуры водных растворов ДМАА имеет практическое значение для многих областей химии, химической технологии, биологии и медицины, так как известно, что в водных растворах ДМАА в зависимости от соотношения компонентов могут образовываться гидраты различного состава [28]. На пленках СПА была изучена температурная зависимость сорбции, проницаемости и селективности водных растворов ДМАА (5:1) (табл. 4). Следует отметить, что ДМАА растворяет пленку, а величина сорбции раствора снижается с ростом температуры.

Мембраны из СПА были успешно использованы для разделения водных растворов ДМАА (5:1), остающихся после выделения и промывки полимеров. Полученные данные показывают, что с повышением температуры проницаемость разделяемой смеси возрастает в 2-3 раза, а пермеат содержит только воду в исследуемом интервале температур. Следует отметить, что проницаемость водных растворов ДМАА (5:1) в 3 раза меньше, чем системы вода-изопропанол при таком же



содержании воды в смеси и при тех же температурах процесса. Как отмечается в [22] мольный объем проникающих веществ влияет на его диффузионные свойства. Вещества с большим мольным объемом труднее проникают через мембрану. Это приводит к снижению проницаемости и повышению селективности. Мольный объем воды наименьший по сравнению с изопропиловым спиртом и ДМАА (табл. 1), а мольный объем ДМАА больше, чем изопропилового спирта. Полученные нами результаты подтверждают этот факт.

Важным аспектом в работе мембран является их стабильность и долговечность в течение длительного периода времени [24]. Мембраны из СПА сохраняли свою производительность и селектив-

ность в течение 2-3 месяцев работы и могут использоваться в процессе первапарации при высокой температуре.

Заключение

В работе показано, что ароматический (со)полиамид на основе хлорангидрида терефталевой кислоты, 4,4'-диаминодифенилоксида и 3,5-диаминобензойной кислоты может рассматриваться как основа для получения селективных мембран при дегидратации спиртов и органических растворителей.

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. Fazlyev A.R. Diss. cand. tehn. nauk. Kazan', 2016, 119 p. (In Russ.)
2. Puljalina A.Ju., Shugurov S.M., Larkina A.A. Vlijanie zvezdoobraznyh modifikatorov na transportnye svojstva polimernyh kompozitov v processe degidracii butan-1-ola. *Zhurnal obshhej himii*. 2019; 89 (10): 1595-1605. (In Russ.)
3. Ivanov O.A., Zharkov A.S., Pevchenko B.V., Kopylov E.V.; Russkih G.I. Otrabotka kachestva dimetilacetamida primenitel'no k proizvodstvu aramidnyh volokon. *Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov*. 2015; 4: 26-28. (In Russ.)
4. Litjaeva Z.A., Zemljanuhina M.P., Pshenichnaja V.A. Analiticheskij kontrol' produktov rektifikacii dimetilacetamida. «*Gazovaja hromatografija*», *sbornik nauchnyh trudov*, Moskva, 1970; 13: 51-54. (In Russ.)
5. Rogovin Z.A. Osnovy himii i tehnologii himicheskikh volokon. M., Himija Publ.; 1974. 44 p. (In Russ.)
6. Dmitrenko M.E. Diss. cand. chem. nauk. Sankt-Peterburg, 2018, 249 p. (In Russ.)

7. Smirnova N.N., Nebukina I.A. Vlijanie prirody i koncentracii ionogennyh grupp na sorbcionnyye i razdelitel'nye svojstva ul'trafil'tracionnyh membran na osnove aromaticeskikh poliamidov po otnosheniju k lizocimu. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskie protsessy*. 2014; 14 (1): 150-158. (In Russ.)

8. Michele Galicia, Won Seok Chi, Zachary P. Smith 50th Anniversary Perspective: Polymers and Mixed Matrix Membranes for Gas and Vapor Separation: A Review and Prospective Opportunities. *Macromolecules*. 2017; 50: 7809-7843.

9. Perel'man V.I., Nekrasov B.V. *Kratkij spravochnik himika*. 3-e izd. M. Goshimizdat Publ.; 1954. 560 p. (In Russ.)

10. Passport bezopasnosti v sootvetstvii s Postanovleniem (EU) No. 1907/2006. 10.05.2023. (In Russ.)

11. Basile A., Figoli A., Khayet M. Pervaporation, vapour permeation and membrane distillation : principles and applications. Cambridge, Woodhead Publishing, 2015, 449 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16500-2>

12. Ageev E.P., Strusovskaja N.L., Dolgova A.A. Vlijanie sorbcionnoj



- predystorii i processa krejzovanija na nabuhanie plenok alifaticeskikh poliamidov. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2011; 11 (2): 211-219. (In Russ.)
13. Ageev E.P., Matushkina N.N., Strusovskaja N.L. Osobennosti povedenija plenok izotakticheskogo polipropilena v processe pervaporacii. *Kolloidnyj zhurnal*. 2018; 80: 41-46. <https://doi.org/10.7868/S0023291218010032>.
14. Puljalina A.Ju., Polockaja G.A., Kaljuzhnaja L.M. Sorbcija i transport vodnyh rastvorov izopropanola v kompozitah iz poliamida i poli(anilin-SO-antranilovoj kisloty) // *Zhurnal prikladnoj himii*. 2011; 84 (5): 810-817. (In Russ.)
15. Lirova B.I., Ljutikova E.A., Vasil'eva N.V. Vlijanie napolnitelja na processy migracii iz plastificirovannyh kompozicij na osnove polivinilhlorida. *Zhurnal prikladnoj himii*. 2008; 81 (2): 308-311. (In Russ.)
16. Barwick V.J. Strategies for solvent selection – a literature review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 1997; 16 (6): 293-309.
17. Krestov G.A. Termodinamika processov v rastvorah. L. Himija Publ.; 1984. 272 p. (In Russ.)
18. Chirkova V.Ju., Stas' I.E. Skorost' isparenija vody, spirtov S3-S5 i ih rastvorov, podvergshijsja jelektromagnitnoj obrabotke. *Vestnik VGU, serija: Fizika. Matematika*. 2016; 4: 60-71. (In Russ.)
19. Abramovich A.I., Lanshina L.V. Analiz struktury vodnyh rastvorov izopropanola na osnove dannyh po opticheskim i ob'emno-uprugim svojstvam. *Zhurnal fizicheskij himii*. 2015; 89 (7): 1116-1121. (In Russ.)
20. Osetrov S.B. Stroenie vodno-spirtovyh rastvorov. Available at: http://sergey-osetrov.narod.ru/Projects/Vodka/Spirit_ (accessed 7 december 2022). (In Russ.)
21. Kirk R.A., Putintseva M., Volkov A. The potential of polymers of intrinsic microporosity (PIMs) and PIM/graphene composites for pervaporation membranes. *BMC Chem. Eng.* 2019; 1: 18. <https://doi.org/10.1186/s42480-019-0018-4>
22. Huang S.H., Jiang G.J., Liaw D.J. Effects of the polymerization and pervaporation operating conditions on the dehydration performance of interfacially polymerized thin-film composite membranes. *J. Appl. Polym. Sci.* 2009; 114: 1511-1522.
23. Cheng Cheng, Peiyun Li, Ke Shen et al. Integrated polyamide thin-film nanofibrous composite membrane regulated by functionalized interlayer for efficient water/isopropanol separation. *Journal of Membrane Science* 2018; 553: 70-81.
24. Ageev E.P., Matushkina N.N., Strusovskaja N.L. K voprosu o kriterii jeffektivnosti processov razdelenija veshhestv. *Membrany i membrannye tehnologii*. 2013; 3 (1): 9-12. <https://doi.org/10.1134/S221811721301001X> (In Russ.)
25. Jel'tekov A.Ju., Jel'tekov Ju.A. Vlijanie temperatury na adsorbiciju i zhidkostnuju hromatografiju makromolekul polistirola. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2018; 18 (6): 810-815. (In Russ.)
26. Horohorina I.V. Diss. cand. tehn. nauk. Tambov, 2014, 130 p. (In Russ.)
27. Osovskaja I.I., Dobosh A.Ju. Gidrofil'nye svojstva rastitel'nyh polimerov. Gidrofil'nye svojstva prirodnyh polimerov: Uchebnoe posobie/ VShTJe SPbGUPTD. Spb. Publ.; 2020. 80. (In Russ.)
28. Majorov V.D., Voloshenko G.I., Kislina I.S., Tarakanova E.G. Sostav i struktura gidratov, obrazujushhijhsja v vodnyh rastvorah dimetilacetamida. *Himicheskaja fizika*. 2020; 39 (1): 7-18. (In Russ.)



Информация об авторах / Information about the authors

Н.Л. Струсовская – к.х.н., научн. сотр.,
Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра
физической химии, Москва, Россия

N.L. Strusovskaya – PhD, Researcher, Moscow
M.V. Lomonosov State University, Chemistry
Department, Division of Physical Chemistry. Postal
address: Chemistry Department, Moscow State
University, Moscow, Russia, E-mail:
nlshome@yandex.ru

Н.Н. Матушкина – к.х.н., ст. научн. сотр.,
Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова, химический факультет, кафедра
физической химии, Москва, Россия

N.N. Matushkina – PhD, Senior Researcher,
Moscow M.V. Lomonosov State University,
Chemistry Department, Division of Physical
Chemistry. Postal address: Chemistry Department,
Moscow State University, 119991, Moscow, Russia,
E-mail: mnnmsu1958@mail.ru

О.Н. Забегаява – к.х.н., Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Институт элементоорганических соединений им.
А.Н. Несмеянова Российской академии наук
(ИНЭОС РАН), Москва, Россия

O.N. Zabegaeva – PhD, Senior Researcher,
A.N.Nesmeyanov Institute of Organoelement
Compounds, Russian Academy of Sciences,, Moscow,
Russia, E-mail: pashkova81@list.ru

*Статья поступила в редакцию 10.07. 2023; одобрена после рецензирования 26.07.2023;
принята к публикации 02.08.2023.*

*The article was submitted 10.07. 2023; approved after reviewing 26.07.2023;
accepted for publication 02.08.2023.*