



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.64

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/10717

Особенности сорбции и массопереноса гидрофильных веществ через гидрофобный изотактический полипропилен

Надежда Львовна Струсовская^{1✉}, Наталия Николаевна Матушкина¹

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

Аннотация. В последние годы в литературе исследованию модификации промышленных полимеров уделяется большое внимание. Модифицированные системы и полимерные композиционные материалы на основе крупнотоннажных полимеров позволяют эффективно расширить марочный ассортимент полимерных материалов и существенно улучшить их технологические и эксплуатационные свойства, создавать новые виды продукции для новых областей применения. В техническом плане перспективным является изотактический полипропилен (ПП), который, в частности, показал хорошие результаты в процессе первапорации при разделении смеси толуол – н-бутанол. Он широко используется в качестве одного из компонентов композитных мембран. В работе продолжены исследования сорбции и массопереноса в процессе первапорации сорбатов двух классов на мембранах из модифицированного изотактического промышленного гидрофобного ПП марки 01030 (ГОСТ 26996-86). Модификацию проводили, обрабатывая пленки ПП жидкими алканами с увеличивающимся числом атомов углерода C₆-C₉ несколькими способами, названными нами маршрутами. Суть их сводится к набуханию ПП в одном сорбате (алканы) с последующим набуханием (сразу или после высушивания) в другом сорбате (ацетон, изопропанол). Величина сорбции гидрофильных ацетона и изопропанола зависит, как от маршрута модификации, так и от количества атомов углерода в молекуле алкана, вызывающего изменение в структуре полимера. В работе показано, что модификация ПП пленки алканами приводит к увеличению проницаемости ацетона и изопропанола в процессе первапорации. Наибольшее повышение величины проницаемости достигается при обработке пленки гексаном по всем маршрутам. На процесс массопереноса оказывает влияние способ модификации мембраны: поверхностная, когда модификация проводится в первапорационной установке и алканы сорбируются на стороне мембраны, обращенной к жидкости, и объемная, при которой мембрана набухает в алканах в свободном состоянии вне первапорационной установки. В случае объемной модификации изменение структуры мембраны происходит по всей толщине, что приводит к увеличению свободного объема полимера и возрастанию проницаемости ацетона и изопропанола. Повышение температуры в процессе первапорации также приводит к увеличению проницаемости исследуемых растворителей.

Ключевые слова: сорбция, первапорация, мембраны, полипропилен.

Для цитирования: Струсовская Н.Л., Матушкина Н.Н. Особенности сорбции и массопереноса гидрофильных веществ через гидрофобный изотактический полипропилен // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022. Т. 22, № 5. С. 748-759. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10717>

Original article

Features of sorption and the mass transfer of hydrophilic substances through hydrophobic isotactic polypropylene

Nadezhda L. Strusovskaya^{1✉}, Natalia N. Matushkina¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, nlsHOME@yandex.ru[✉]



Abstract. Recently, a lot of attention has been paid to the study of the modification of industrial polymers in the literature. Modified systems and polymer composite materials based on large-tonnage polymers make it possible to effectively expand the brand range of polymer materials and significantly improve their technological and operational properties, create new types of products for new areas of application. In technical terms, isotactic polypropylene (PP), which, in particular, showed good results in the pervaporation process during the separation of a mixture of toluene- n-butanol is promising. It is widely used as one of the components of composite membranes. In this work, the research of sorption and mass transfer in the pervaporation process of two classes of sorbates on membranes made of modified isotactic industrial hydrophobic PP brand 01030 (GOST 26996-86) was continued. The modification was carried out processing PP films with liquid alkanes with an increasing number of carbon atoms C6-C9 in several ways, which we called routes. Their essence is swelling of PP in one sorbate (alkanes) followed by swelling (immediately or after drying) in another sorbate (acetone, isopropanol). The sorption value of hydrophilic (acetone and isopropanol) depends both on the route of modification and on the number of carbon atoms in the alkane molecule causing a change in the polymer structure. It was shown that the modification of a PP film with alkanes led to an increase in the permeability of acetone and isopropanol during pervaporation. The greatest increase in the permeability value was achieved when the film was treated with hexane along all routes. The process of mass transfer was affected by the method of membrane modification: surface modification, when modification was carried out using pervaporation unit and alkanes were sorbed on the side of the membrane facing the liquid, and volumetric, in which the membrane swells in alkane in a free state outside the pervaporation unit. In the case of volume modification, the membrane structure changed throughout the thickness, which led to an increase in the free volume of the polymer and an increase in the permeability of acetone and isopropanol. An increase in temperature during pervaporation also led to an increase in the permeability of the studied solvents.

Keywords: sorption, pervaporation, membranes, polypropylene.

For citation: Strusovskaya N.L., Matushkina N.N. Features of sorption and the mass transfer of hydrophilic substances through hydrophobic isotactic polypropylene. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(5): 748-759. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10717>

Введение

Исследованию модифицированных полимеров в настоящее время уделяется большое внимание. Как отмечено в работе [1], производство полимерных материалов развивается ускоренными темпами (годовой объем >300 млн. т), при этом основными валобразующими продуктами становятся не впервые синтезируемые, а модифицированные системы и полимерные композиционные материалы на основе крупнотоннажных полимеров. Эффективное расширение марочного ассортимента полимерных материалов достигается за счет их направленной модификации, что позволяет существенно улучшить их технологические и эксплуатационные свойства, создавать новые виды продукции для новых областей применения [1-3].

В техническом плане наиболее важным и перспективным является изотактический полипропилен. В зависимости от молекулярной массы и изотактического

содержания свойства полипропилена могут варьироваться в широком диапазоне. Наибольший промышленный интерес представляет полипропилен с молекулярной массой 80 000-200 000 и изотактическим содержанием 80-98%. Благодаря своей кристаллической структуре стереорегулярный полипропилен сохраняет хорошие механические свойства и форму до точки плавления, химически устойчив и не трескается при воздействии окружающей среды. ПП широко используется в качестве микрофильтрационной мембраны для очистки химически активных сред от микропримесей одного из компонентов композитных мембран [4-6]. Исходя из этого, промышленный изотактический ПП марки 01030 (ГОСТ 26996-86) был выбран в качестве модельного образца для модификации.

Ранее было показано [7, 8], что модификация пленок ПП с использованием гидрофобных веществ может приводить к увеличению сорбции и проницаемости гидрофильной воды, аналогично тому, что происходило с

полиамидами. Продолжая работу в этом направлении, мы изучили модификацию ПП пленок путем обработки их жидкими алканами с увеличивающимся числом атомов углерода с целью выявления влияния гидрофобных веществ на сорбцию и массоперенос ацетона и изопропанола при первапорации.

Экспериментальная часть

Объекты исследования. Объектами исследования были промышленные пленки ПП марки 01030 (ГОСТ 26996–86) с толщиной 20 мкм, степенью кристалличности 52.1% [9] и следующие сорбаты 1: гексан, гептан, н-нонан и сорбаты 2: ацетон, изопропанол, их характеристики представлены в таблице 1.

Методы исследования. Сорбцию жидкостей ПП проводили весовым методом, погружая исследуемые образцы в жидкость при атмосферном давлении и температуре 20°C по методике, описанной в [8]. Степень набухания полимера α_∞ (%) определяли гравиметрически с точностью $\pm 10^{-4}$ г до достижения постоянной массы:

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

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

Нами было показано [16], что степень набухания полимера (α_∞) можно увели

чить, если провести предварительную обработку его “хорошим” растворителем. Она зависит от маршрута проведения сорбционного процесса. Были разработаны 4 маршрута проведения эксперимента:

маршрут № 1: погружают пленки в сорбат 1, через определенные промежутки времени их вынимают, промокают фильтровальной бумагой и взвешивают в эксикаторе. Процедуру повторяют вплоть до достижения постоянной массы;

маршрут № 2: пленку, набухшую в сорбате 1, высушивают на воздухе и вновь погружают эту пленку в сорбат 1 (степень набухания определяли относительно массы сухой пленки);

маршрут № 3 отличается от маршрута № 2 тем, что повторное набухание пленки происходит в сорбате 2. Степень набухания в сорбате 2 определяли относительно массы высохшей после набухания в первом сорбате пленки;

маршрут № 4: пленку, набухшую в сорбате 1, погружают в сорбат 2 и взвешивают до постоянных значений. Степень набухания в сорбате 2 определяли относительно массы исходной пленки.

Температурную зависимость проницаемости пленок ПП изучали методом первапорации в вакуум на установке с площадью мембраны 0.002 м². В этом процессе прошедшие через мембрану пары

Таблица 1. Характеристики объектов исследования
 Table 1. Characteristics of the objects of study

| Объекты исследования | Параметр растворим. δ_p , (мДж/м ³) ^{1/2} | Дипольн. момент, D | Мол. масса | ρ , г/см ³ | $T_{кип}$, °C | Динам. вязкость, сП | Поверхн. натяж. при 20°C, $\sigma \times 10^3$, Н/м |
|----------------------|---|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|---------------------|--|
| ПП | 18.8-19.2 | – | (75-300) · 10 ³ | 0.90-0.92 | – | – | – |
| Сорбаты 1 [7] | | | | | | | |
| Гексан | 14.8 | 0.08 | 86 | 0.65 | 68.7 | 0.3 | 18.4 |
| Гептан | 15.1 | 0 | 100 | 0.68 | 98.4 | 0.4 | 20.1 |
| н-Нонан | 15.7 | 0 | 128 | 0.72 | 150.8 | 0.7 | 23.0 |
| Сорбаты 2 [10-15] | | | | | | | |
| Ацетон | 19.9 | 2.85 | 58 | 0.79 | 56.0 | 0.00032 | 23.7 |
| Изопропанол | 23.5 | 1.68 | 60 | 0.78 | 82.6 | 0.00239 | 21.7 |



конденсировались в ловушке, охлаждаемой жидким азотом [17].

Плотность первапорационного потока J ($\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$) определяли по количеству пенетранта, выделившегося через единицу площади мембраны в единицу времени.

Изучение влияния модификации полимера на массоперенос в процессе первапорации проводили по маршрутам, согласованным с сорбционными методиками:

маршрут № 1: первапорация сорбата 1 через исходную (сухую) пленку;

маршрут № 2: первапорация сорбата 2 после достижения стационарного потока сорбата 1 по маршруту № 1;

маршрут № 3: первапорация сорбата 2 после набухания пленки в сорбате 1 в чашке Петри до постоянной массы и сушки в первапорационной установке для предотвращения усадки пленки;

маршрут № 4: аналогичен предыдущему маршруту, но сушку пленки не производили.

Количество параллельных опытов во всех экспериментах было не меньше пяти. Полученные результаты обрабатывали по теории ошибок. Доверительный интервал рассчитывали для уровня значимости 0.05.

Обсуждение результатов

На механизм сорбционного процесса влияют как структура и свойства самого

полимера и исследуемых веществ, так и взаимодействия между ними [18]. При набухании полимера проходят следующие процессы: диффузия вещества внутрь, приводящая к уменьшению массы за счет вымывания пластификатора и других примесей, оставшихся в полимере в процессе синтеза, и увеличение массы за счет сорбции, сопровождающееся релаксацией объема к равновесному состоянию [19]. Известно, что наличие таких примесей и способ их удаления значительно влияют на физико-химические свойства пленок [20, 21].

В таблице 2 представлены результаты набухания ПП в различных сорбатах и их проницаемость через ПП мембраны. Вещества выбраны таким образом, чтобы можно было проследить зависимость сорбции от параметров растворимости компонентов смеси и их дипольных моментов. Алканы располагаются по степени набухания в них гидрофобного изотактического ПП в ожидаемом порядке: с увеличением числа атомов углерода в них возрастают силы межмолекулярного взаимодействия с полимером, следовательно, возрастает и степень его набухания.

В работах ряда авторов [24-26] предложено учитывать относительную

Таблица 2. Сорбция и проницаемость ПП в исследованных сорбатах
Table 2. Sorption and permeability of PP in the studied sorbates

| Сорбаты | Ст. набух., α_{∞} , % | Колич. удаленных примесей, % | Сорбция, S , % | J , $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ | Мольный объем растворителя, $\text{см}^3/\text{моль}$ [22, 23] |
|-------------|--------------------------------------|------------------------------|---------------------|---|--|
| Сорбаты 1 | | | | | |
| Гексан | 7.0 | 0 | 8.0 | 0.0610 | 130.7; 131.3 |
| Гептан | 9.7 | 0 | 10.0 | 0.0130 | 146.6; 147.5 |
| н-Нонан | 13.9 | 0 | 14.0 | 0.0022 | 178.8 |
| Сорбаты 2 | | | | | |
| Ацетон | -0.1 | 4.8 | 4.6 | 0.0012 | 73.89 |
| Изопропанол | 2.2 | 0.5 | 3.0 | 0.0015 | 76.96 |

массу вымываемых примесей и считать сорбцию по формуле:

$$S = \Delta m + |\Delta m_b|, \quad (2)$$

где $\Delta m = \alpha_\infty$ (уравнение 1), Δm_b (%) – относительная масса примесей, вымываемых из пленок в жидкую среду в процессе сорбции, которую рассчитывали по формуле:

$$\Delta m_b = \frac{m_0 - m_c}{m_0} \cdot 100, \quad (3)$$

где m_c – масса образца в конце опыта после высушивания его до постоянной массы при атмосферном давлении и температуре 20°C.

Для того, чтобы рассчитать количество вымытых примесей (уравнение 3), необходимо провести эксперимент по маршруту № 1, а затем высушить пленку до постоянной массы. Как показали проведенные исследования, масса набухших в алканах пленок после высушивания не изменилась, т.е. количество вымытых примесей равно нулю (табл. 2).

При набухании ПП в гидрофильных ацетоне и изопропанолe (с дипольными моментами 2.85 и 1.66 Д, соответственно), которые содержат по две гидрофобные метильные группы, наблюдается уменьшение массы высушенной пленки после проведения эксперимента по маршруту №1. Для пленки, предварительно набухшей в ацетоне, оно примерно в 10 раз (табл. 2), больше, чем набухшей в изопропанолe. Вероятно, это связано с большей величиной динамической вязкости и мольного объема последнего, как ассоциированной жидкости. Сорбция, рассчитанная с учетом вымытых примесей по уравнению (2), для ацетона также возрастает (табл. 2).

В процессе проведения эксперимента по маршруту № 2 происходит кондиционирование полимера. Последующее набухание такой пленки в этом растворителе не приводит к изменению значений величины сорбции.

На рис. 1 показано, как изменяется сорбция ацетона при проведении экспериментов по маршрутам № 3 и 4 в

зависимости от того, каким алканом была предварительно обработана пленка ПП.

Известно, что при набухании полимеров молекулы низкомолекулярной жидкости проникают в небольшие промежутки, имеющиеся между макромолекулами полимера, и раздвигают молекулярные цепи. Поэтому в результате высокого поглощения сорбата 1 межцепные расстояния в ПП увеличиваются. При последующей десорбции алканов образовавшаяся структура, по-видимому, сохраняется. При полном удалении ранее растворенного вещества (гексан) остаются «пустоты», через которые возможно проникновение сорбата 2 (ацетон) по маршруту № 3 (рис. 1, кривая 1). В то же время гептан и н-нонан полностью не удаляются [7]. Перенос веществ с высоким мольным объемом медленнее, чем для растворителей с меньшим мольным объемом, независимо от их полярности и совместимости с материалом мембраны [27]. При этом параметр растворимости не имеет решающего значения в явлениях переноса. Кроме того, при увеличении длины цепочки алканов растет и их мольный объем (табл. 2), поэтому свободного объема в пленках остается меньше и сорбат 2 проникает в ПП в меньшей степени.

При изучении процесса первапорации для целенаправленной модификации полимера необходимо знать специфику массопереноса через полимерную мембрану, на который можно влиять, изменяя свойства самой мембраны. Механизм массопереноса состоит из последовательных стадий сорбции, диффузии, десорбции [28]. Интенсификация любой из них должна увеличить производительность процесса первапорации. Данные температурной зависимости проницаемости ацетона и изопропанолa, представленные рис. 3 и 4, показывают влияние модификации полимера на процесс массопереноса.

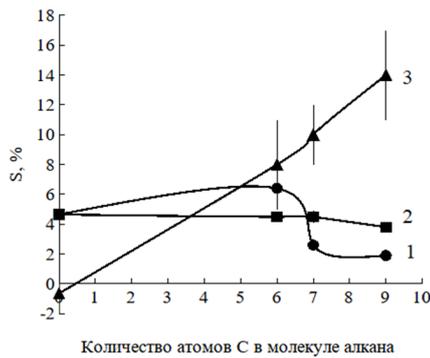


Рис. 1. Изменение величины сорбции ацетона ПП при проведении процесса набухания по маршрутам № 3 (кривая 1) и 4 (кривая 2). На кривой 3 показаны величины сорбции исходных веществ ПП (маршрут № 1).
 Fig. 1. Change in the sorption of acetone by PP during swelling via routes No. 3 (curve 1) and 4 (curve 2). The sorption of starting materials by PP is shown in curve 3 (route No. 1).

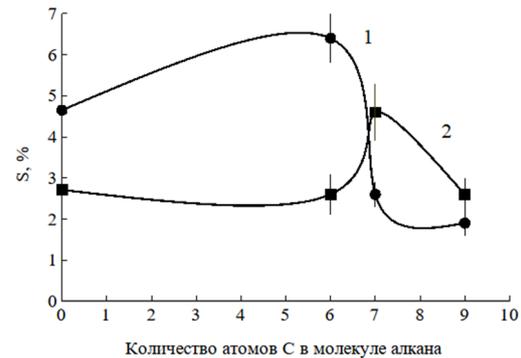


Рис. 2. Изменение величины сорбции ацетона (кривая 1) и изопропанола (кривая 2) ПП при проведении эксперимента по маршруту № 3.
 Fig. 2. Change in the sorption of acetone (curve 1) and isopropanol (curve 2) by PP during the experiment proceeding via route No. 3.

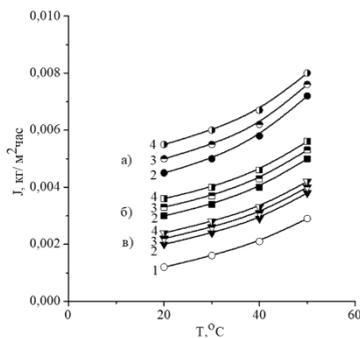


Рис. 3. Температурная зависимость проницаемости ацетона (1) после сорбции гексана – а), гептана – б), н-нонана – в) по маршрутам: № 2 – кривые 2, № 3 – кривые 3, № 4 – кривые 4.
 Fig. 3. Temperature dependence of the permeability of acetone (1) after sorption of hexane - a), heptane - b), n-nonane - c) via routes: No. 2 – curves 2, No. 3 – curves 3, No. 4 – curves 4

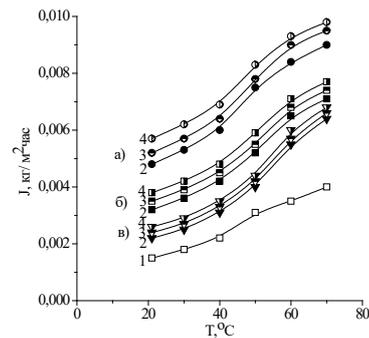


Рис. 4. Температурная зависимость проницаемости изопропанола (1) после сорбции гексана – а), гептана – б), н-нонана – в) по маршрутам: № 2 – кривые 2, № 3 – кривые 3, № 4 – кривые 4.
 Fig. 4. Temperature dependence of the permeability of isopropanol (1) after sorption of hexane - a), heptane - b), n-nonane - c) via routes: No. 2 – curves 2, No. 3 – curves 3, No. 4 – curves 4.

При проведении модификации структуры ПП по маршруту № 2 алканы сорбируются на стороне мембраны, обращенной к жидкости. Обратная сторона, за счет постоянного отвода пермеата в виде пара не набухает, и структура полимера изменяется не по всей толщине мембраны. Реализуется поверхностная модификация мембраны [29, 30], при которой происходит

снижение поверхностной энергии и увеличение проницаемости ацетона и изопропанола. В маршрутах № 3 и № 4 происходит объемная модификация мембраны [30], при которой структура полимера изменяется по всей толщине мембраны. При набухании в алканах происходит увеличение свободного объема полимера и проницаемость ацетона и изопропанола возрастает.

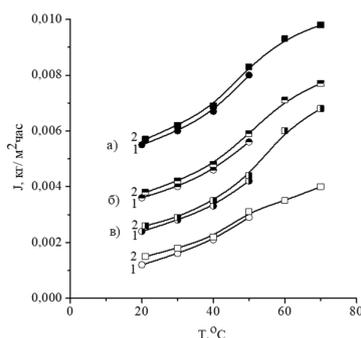


Рис. 5. Температурная зависимость проницаемости ацетона (кривые 1) и изопропанола (кривые 2) после сорбции гексана – а), гептана – б), н-нонана – в) по маршруту № 4.

Fig. 5. Temperature dependence of the permeability of acetone (curves 1) and isopropanol (curves 2) after sorption of hexane – a), heptane – b), n-nonane – c) via route No. 4.

Проницаемость ацетона и изопропанола в маршруте № 3 несколько меньше, чем в маршруте № 4. Это происходит потому, что, с одной стороны, жесткое закрепление мембраны в установке препятствует ее усадке и изменению надмолекулярной структуры, а с другой, полимер в механически напряженном состоянии обладает меньшей проницаемостью.

Как отмечено в работах [25, 26], наличие остаточного растворителя в мембране, в нашем случае сорбата 1, который является своеобразным пластификатором, проникая между макромолекулами или надмолекулярными структурами, влияет на подвижность цепей и звеньев, разрыхляет упаковки цепей, что приводит к увеличению проницаемости сорбата 2 в маршруте № 4. При высушивании пленки в напряженном состоянии после сорбции в маршруте № 3 происходит испарение сорбата 1, что способствует упорядочению упаковки цепей и формированию структуры с пониженной проницаемостью к сорбату 2.

Представленные данные показывают, что модификация мембраны по всем маршрутам приводит к повышению проницаемости ацетона и изопропанола в среднем в 3.5 раза, но объемная модификация позволяет достичь более высоких потоков. Следует отметить, что

разница в величинах проницаемости ацетона и изопропанола при разных маршрутах уменьшается от гексана к н-нонана. Как было показано [7], это связано с тем, что гептан и н-нонан полностью из полимера не удаляются, в отличие от гексана. Данная закономерность наблюдалась нами при изучении проницаемости воды в аналогичных условиях [7].

Известно [31], что проницаемость растворителей зависит от параметра растворимости, полярности (диэлектрической проницаемости), поверхностного натяжения и вязкости. В работе [27] показано, что вязкость и полярность имеют большее влияние на массоперенос, чем другие параметры. На рис. 5 представлена температурная зависимость проницаемости ацетона и изопропанола для маршрута № 4, в котором модификация приводит к наибольшему увеличению потока растворителей по сравнению с маршрутами № 1-3.

Данные табл. 1 показывают, что ацетон и изопропанол имеют близкие физико-химические параметры и, соответственно, проницаемость (рис. 5). Однако, изопропанол проникает лучше, чем ацетон, что возможно, связано с его более низким поверхностным натяжением.



Полученные в работе данные показывают, что с повышением температуры проницаемость исследуемых растворителей возрастает примерно в 1.5-2.0 раза. Происходит снятие напряжений после перегруппировки сегментов цепей в набухшем состоянии, которое сопровождается структурными перестройками в полимере [32]. Учитывая сложноступенчатый механизм образования структуры и разрушения ее под действием температуры и растворителя, что имеет место в процессе первапарации, можно предположить, что повышение температуры приводит к увеличению равновесных значений сорбции и, соответственно, к увеличению первапарационного потока.

Заключение

В работе показано, что модификация мембран из изотактического промышленного ПП гидрофобными веществами,

Список литературы

1. Озерин А.Н. Новые типы материалов на основе крупнотоннажных полимеров // «Полимеры в стратегии научно-технического развития РФ «Полимеры-2020», сборник тезисов Восьмой Всероссийской Каргинской конференции, 09–13 ноября 2020 г., Москва, ООО «МЕСОЛ». 2020, С. 42.

2. Любимов А.Г., Прокопчук Н.Р., Мануленко А.Ф. Особенности модификации полипропилена для изготовления пленочной нити // *Химия и технология органических веществ, материалов и изделий. Труды БГТУ*. 2011. № 4. С. 59-63

3. Абдукаримова С.А., Бозорова Н.Х., Тураев Э.Р. Особенности модификации полипропилена // *Universum: технические науки, электрон. научн. журн.* 2022. 1(94). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12949>

4. Кравец Л.И., Дмитриев С.Н., Апель П.Ю. Полипропиленовые трековые мембраны для микро- и

проведенная по предложенным маршрутам, может быть использована для увеличения сорбции и проницаемости по отношению к гидрофильным веществам. Модификация полимера проводилась по четырем маршрутам при разных температурах. Установлено, что объемная модификация полимера, приводит к более заметному возрастанию проницаемости ацетона и изопропанола по сравнению с поверхностной модификацией.

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.

ультрафильтрации химически агрессивных сред. I. Травление треков высокоэнергетичных ионов в полипропилене // *Мембраны*. 2000. № 7. С. 13-28.

5. Dai Z.-W., Wan L.-S., Xu Z.-K. Glycopolymer-filled microporous polypropylene membranes for pervaporation dehydration // *J. of Membrane Science*. 2010. Vol. 348, no. 1-2. P. 245-251.

6. Shahverdi M., Baheri B., Rezakazemi M., Motaee E., Mohammadi T. Pervaporation Study of Ethylene Glycol Dehydration Through Synthesized (PVA-4A)/Polypropylene Mixed Matrix Composite Membranes // *Polymer Engineering and Science*. 2013. Vol. 53, no. 7. P. 1487-1493.

7. Струсовская Н.Л., Матушкина Н.Н. Влияние модификации изотактического полипропилена на его транспортные свойства // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2020. Т. 20, № 2. С. 335-342.

8. Агеев Е.П., Струсовская Н.Л., Долгова А.А. Влияние сорбционной предыстории и процесса крейзования на



- набухание пленок алифатических полиамидов // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2011. Т. 11, № 2. С. 211-219.
9. Смирнов А.В., Федоров Б.А., Темнов Д.Э., Фомичева Е.Е. Структурные и электретные свойства полипропилена с различным содержанием аморфного диоксида кремния // *Наносистемы: Физика, химия, математика*. 2012. Т. 3, № 2. С. 65-72.
10. Стекольщиков М.Н. Углеродные растворители: Свойства, производство, применение: Справочное изд. М.: Химия, 1986, 120 с.
11. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Ленинград: Химия, 1977. 376 с.
12. Химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1988, т.1. 625 с.
13. Краткий справочник физико-химических величин. Изд. 8. Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. Ленинград: Химия, 1983. 231 с.
14. Кондратов А.П., Журавлева Г.Н. Физика и химия материалов и технологических процессов. М.: МГУП имени Ивана Федорова, 2016. 52 с. (С. 12).
15. Филиппов В.В. Теплообмен в химической технологии. Теория. Основы проектирования: учеб. Пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. 197 с.
16. Струсовская Н.Л., Агеев Е.П. Роль сорбционной предыстории в набухании полиамидных пленок // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2015. Т. 15, № 5. С. 600-606.
17. Агеев Е.П., Матушкина Н.Н., Струсовская Н.Л. Особенности поведения пленок изотактического полипропилена в процессе первапорации // *Коллоидный журнал*. 2018. Т. 80. С.41-46.
18. Крижановская О.О., Синяева Л.А., Карпов С.И., Селеменев В.Ф., Бородин Е.В., Рёсснер Ф. Кинетические модели при описании сорбции жирорастворимых физиологически активных веществ высокоупорядоченными неорганическими кремнийсодержащими материалами // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2014. Т. 14, № 5. С. 784-794.
19. Schott H. Kinetics of swelling of polymers and their gels // *J. Pharmaceutical Sci.* 1990. Vol. 5, no. 81. P. 467-470.
20. Hu C.-C., Fu Y.-J., Qui H.-Z., Lee K.-R., Lai J.-Y. Effects of residual solvent on gas separation properties of polyimide membranes // *Separation and Purification Technology*. 2008. Vol. 62. P. 175-182.
21. Guan R., Dai H., Li C., Liu J., Xu J. Effect of casting solvent on the morphology and performance of sulfonated polyethersulfone membranes // *J. Membrane Sci.* 2006. Vol. 277. P. 148-156.
22. Урядов В.Г., Аристова Н.В. Офицеров Е.Н. Численная характеристика структуры органической молекулы. Часть 10. Определение численной характеристики структуры алканов нормального строения по экспериментальным данным // *Бутлеровские сообщения*. 2010. Т. 19, № 1. С. 66-73.
23. Зевацкий Ю.Э. Модель сольватации и ассоциации в растворах неэлектролитов // *Журнал общей химии*. 2019. Т. 89, № 11. С. 1724-1731.
24. Лирова Б.И., Лютикова Е.А., Васильева Н.В. и др. Влияние наполнителя на процессы миграции из пластифицированных композиций на основе поливинилхлорида // *Журнал прикладной химии*. 2008. Т. 81. Вып. 2. С. 308-313.
25. Костина Ю.В., Бондаренко Г.Н., Алентьев А.Ю., Ямпольский Ю.П. Изменение структуры и газоразделительных свойств полиэфиримидов под действием хлороформа // *Высокомолекулярные соединения. А*. 2006. Т. 48, №1. С. 41-48.
26. Пулялина А.Ю., Полоцкая Г.А., Калюжная Л.М. и др. Сорбция и транспорт водных растворов изопропанола в композитах из полиимида и поли(анилин-СО-антрапиловой



кислоты) // *Журнал прикладной химии*. 2011. Т. 84, Вып. 5. С. 810-817.

27. Darvishmanesh S., Degreve J., van der Bruggen B. Physicochemical characterization of transport in nanosized membrane structures // *a European journal of chemical physics and physical chemistry*. 2010. Vol. 11, no. 2. P. 404-411.

28. Волков В.В. Разделение жидкости испарением через полимерные мембраны // *Известия Академии наук, серия химическая*. 1994. №2. С. 208-218.

29. Миронюк А.В., Придатко А.В., Сиволапов П.В., Свидерский В.А. Особенности оценки смачивания полимерных поверхностей // *Восточно-Европейский журн. передовых технологий. Технологии органических и неорганических веществ*. 2014. Т. 1, №6 (67). С. 23-26.

30. Тимакова К.А., Тарасов А.В., Федотов Ю.А., Лепешин С.А., Панов Ю.Т. Модификация полимерных пленок, покрытий и мембран // *Мембраны и мембранные технологии*. 2012. Т. 2, № 2. С.74-84.

31. Хванг С.Т., Каммермейер К. *Мембранные процессы разделения*. М.: Химия, 1981. 464 с.

32. Дытнерский Ю.И. Мембранные процессы разделения жидких смесей. М. Химия, 1975. 232 с.

References

1. Ozerin A.N. Novye tipy materialov na osnove krupnotonnazhnyh polimerov." *Polimery v strategii nauchno-tehnicheskogo razvitija RF "Polimery-2020"*, sbornik tezisov Vos'moj Vserossijskoj Karginskoj konferencii, 09-13 nojabrja 2020 g., М. Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvenost'ju "MESOL", 2020, P 42. (In Russ.)

2. Ljubimov A.G., Prokopchuk N.R., Manulenko A.F. Osobennosti modifikacii polipropilena dlja izgotovlenija plenochnoj niti. *Himija i tehnologija organicheskikh veshhestv, materialov i izdelij. Trudy BGTU*. 2011; 4: 59-63. (In Russ.)

3. Abdugarimova S.A., Bozorova N.H., Turaev Je.R. Osobennosti modifikacii polipropilena. *Universum: tehnicheckie nauki, jelektron. nauchn. Zhurn.* 2022; 1(94). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12949>. (In Russ.)

4. Kravec L.I., Dmitriev S.N., Apel P.Yu. *Polipropilenovye trekovye membrany dlya mikro- i ultrafiltracii himicheskii agressivnyh sred. I. Travlenie trekov vysokoenergetichnyh ionov v polipropilene, Membrany*, 2000, No 7, pp. 13-28.

5. Dai Z.-W., Wan L.-S., Xu Z.-K. Glycopolymer-filled microporous polypropylene membranes for pervaporation dehydration. *J. of Membrane Science*. 2010; 348(1-2): 245-251. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.11.007>

6. Shahverdi M., Baheri B., Rezakazemi M., Motaee E., Mohammadi T. Pervaporation Study of Ethylene Glycol Dehydration Through Synthesized (PVA-4A)/Polypropylene Mixed Matrix Composite Membranes. *Polymer Engineering and Science*. 2013; 53(7): 1487-1493. <https://doi.org/10.1002/PEN.23406>

7. Strusovskaja N.L., Matushkina N.N., Vlijanie modifikacii izotakticheskogo polipropilena na ego transportnye svojstva. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2020; 20(2): 335-342. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2020.20/2870> (In Russ.)

8. Ageev E.P., Strusovskaja N.L., Dolgova A.A. Vlijanie sorbcionnoj predystorii i processa krejzovaniya na nabuhanie plenok alifaticeskikh poliamidov. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2011; 11(2): 211-219. (In Russ.)

9. Smirnov A.V., Fedorov B.A., Temnov D.Je. Fomicheva E.E. Strukturnye i jelektretnye svojstva polipropilena s razlichnym sodержaniem amorfno go dioksida kremnija. *Nanosistemy: Fizika, himija, matematika*. 2012; 3(2): 65-72. (In Russ.)

10. Stekol'shnikov M.N. Uglevodородnye rastvoriteli: Svojstva,



- производство, primeneniye: Spravochnoe izd. M. Himija Publ.; 1986. 120 p. (In Russ.)
11. Rabinovich V.A., Havin Z.Ja. *Kratkij himicheskij spravochnik*. Leningrad, Himija Publ.; 1977. 376 p. (In Russ.)
 12. *Himicheskaja jenciklopedija*. M. Sovetskaja jenciklopedija Publ.; 1988; 1. 625 p. (In Russ.)
 13. *Kratkij spravochnik fiziko-himicheskikh velichin*. Izd. 8. Pod red. A.A. Ravdelja i A.M. Ponomarevoj. Leningrad. Himija Publ.; 1983. 231 p. (In Russ.)
 14. Kondratov A.P., Zhuravleva G.N. *Fizika i himija materialov i tehnologicheskikh processov*. M. MGUP imeni Ivana Fedorova Publ.; 2016. 52 p. (In Russ.)
 15. Filippov V.V. *Teploobmen v himicheskoi tehnologii. Teorija. Osnovy proektirovaniya: ucheb. Posobie*. Samara. Samar. gos. tehn. Un-t Publ.; 2014. 197 p. (In Russ.)
 16. Strusovskaja N.L., Ageev E.P. Rol' sorbcionnoj predystorii v nabuhanii poliamidnykh plenok. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2015; 15(5): 600-606. (In Russ.)
 17. Ageev E.P., Matushkina N.N., Strusovskaja N.L. Osobennosti povedeniya plenok izotakticheskogo polipropilena v processe pervaporacii. *Kolloidnyj zhurnal*. 2018; 80: 41-46. <https://doi.org/10.7868/S0023291218010032> (In Russ.)
 18. Krizhanovskaja O.O., Sinjaeva L.A., Karpov S.I., Selemenev V.F., Borodina E.V., Rjossner F. Kineticheskie modeli pri opisani sorbcii zhirorastvorimyh fiziologicheskii aktivnykh veshhestv vysokouporjadochennymi neorganicheskimi kremnijsoderzhashchimi materialami. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2014; 14(5): 784-794. (In Russ.)
 19. Schott H. Kinetics of swelling of polymers and their gels. *J. Pharmaceutical Sci.* 1990; 5(81): 467-470.
 20. Hu C.-C., Fu Y.-J., Qui H.-Z., Lee K.-R., Lai J.-Y. Effects of residual solvent on gas separation properties of polyimide membranes. *Separation and Purification Technology*. 2008; 62: 175-182. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.01.008>
 21. Guan R., Dai H., Li C., Liu J., Xu J. Effect of casting solvent on the morphology and performance of sulfonated polyethersulfone membranes. *J. Membrane Sci.* 2006; 277: 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.10.025>
 22. Urjadov V.G., Aristova N.V., Oficerov E.N. Chislennaja harakteristika struktury organicheskoi molekuly. Chast' 10. Opredelenie chislennoi harakteristiki struktury alkanov normal'nogo stroeniya po jeksperimental'nym dannym. *Butlerovskie soobshhenija*. 2010; 19(1): 66-73. (In Russ.)
 23. Zevackij Ju.Je. Model' sol'vatsii i asociacii v rastvorah nejelektrolitov. *Zhurnal obshhej himii*. 2019; 89(11): 1724-1731. <https://doi.org/10.1134/S0044460X19110131> (In Russ.)
 24. Lirova B.I., Ljutikova E.A., Vasil'eva N.V. et al. Vlijanie napolnitelja na processy migracii iz plastificirovannykh kompozicij na osnove polivinilhlorida. *Zhurnal prikladnoj himii*. 2008; 81(2): 308-313. (In Russ.)
 25. Kostina Yu.V., Bondarenko G.N., Alent'ev A.Ju., Jampol'skij Ju.P. Izmenenie struktury i gazorazdelitel'nykh svojstv polijefirimidov pod dejstviem hlороформа. *Vysokomolekuljarnye soedinenija A*. 2006; 48(1): 41-48. (In Russ.)
 26. Puljalina A.Ju., Polockaja G.A., Kaljuzhnaja L.M. et al. Sorbcija i transport vodnykh rastvorov izopropanola v kompolzitatih iz poliimida i poli(anilin-SO-antranilovoi kisloty). *Zhurnal prikladnoj himii*. 2011; 84(5): 810-817. (In Russ.)
 27. Darvishmanesh S., Degreve J., van der Bruggen B. Physicochemical characterization of transport in nanosized membrane structures. *a European journal of chemical physics and physical chemistry*. 2010; 11(2): 404-411. (In Russ.)
 28. Volkov B.B. Razdelenie zhidkosti isparenijem cherez polimernye membrany. *Izvestija Akademii nauk, serija himicheskaja*. 1994; 2: 208-218. (In Russ.)



29. Mironjuk A.V., Pridatko A.V., Sivolapov P.V., Sviderskij V.A. Osobennosti ocenki smachivaniya polimernyh poverhnostej. *Vostochno-Evropejskij zhurn. peredovyh tehnologij, Tehnologii organicheskikh i neorganicheskikh veshhestv.* 2014; 1(6(67)): 23-26. (In Russ.)
30. Timakova K.A., Tarasov A.V., Fedotov Ju. A., Lepeshin S.A., Panov Ju.T., Modifikacija polimernyh plenok, pokrytij i membrane. *Membrany i membrannye tehnologii.* 2012; 2(2): 74-84. (In Russ.)
31. Hvang S.T., Kammermejer K. Membrannye processy razdelenija. M., Himija Publ.; 1981. 464 p. (In Russ.)
32. Dytnerskij Ju.I. Membrannye processy razdelenija zhidkih smesej. M. Himija Publ.; 1975. 232 p. (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, Russian Federation, 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, Moscow, Russian Federation, e-mail: mnnmsu1958@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.05.2022; одобрена после рецензирования 04.10.2022; принята к публикации 26.10.2022.
The article was submitted 16.05.2022; approved after reviewing 04.10.2022; accepted for publication 26.10.2022.