

Оригинальная статья

УДК 66.081.6-278

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.632-643>**Новый двухстадийный метод получения пористых мембран на основе полифениленсульфида****Д.Н. Матвеев¹✉, И.Л. Борисов¹✉, Т.С. Анохина¹, А.В. Волков¹, Д.А. Балькаев², Р.М. Ахмадуллин^{2,3}, И.С. Антипин², В.В. Волков¹**¹Институт нефтехимического синтеза имени А.В. Топчиеva Российской академии наук, г. Москва, Россия²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия³ООО НТЦ «Ахмадуллины», г. Казань, Россия✉ dmatveev@ips.ac.ru, Boril@ips.ac.ru**Аннотация**

Предложен новый двухстадийный способ получения пористой мембраны из полифениленсульфида (ПФС), заключающийся в получении пленок из ПФС с наполнителем на первом этапе и удалении наполнителя из пленки на втором этапе. В качестве наполнителя впервые изучены полиариленсульфоны, в частности полисульфон (ПСФ), полиэфирсульфон и полифениленсульфон (ПФСФ). Содержание порообразующей добавки составляло 30 % (масс.). Удаление наполнителя из пленок осуществляли методом термолиза в течение 12 ч в *N*-метил-2-пирролидоне (НМП) при различных температурах (70, 90 и 202 °C). Экспериментально установлены режимы термолиза, обеспечивающие полную экстракцию ПСФ и ПФСФ из пленки ПФС. Пористая структура полученных мембран из ПФС исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии, жидкостной порометрии и анализа газопроницаемости по индивидуальным газам (He, N₂, CO₂). Получены образцы пористых мембран из ПФС со средним размером пор 160 нм, соответствующим микрофильтрационному диапазону.

Ключевые слова: мембрана, полимер, полифениленсульфид, нефть, отработанное масло, регенерация, разделение вязких жидкостей, размер пор, газопроницаемость.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-63-00026, <https://rscf.ru/project/24-63-00026/>).

Для цитирования: Матвеев Д.Н., Борисов И.Л., Анохина Т.С., Волков А.В., Балькаев Д.А., Ахмадуллин Р.М., Антипин И.С., Волков В.В. Новый двухстадийный метод получения пористых мембран на основе полифениленсульфида // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2025. Т. 167, кн. 4. С. 632–643. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.632-643>.

Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.632-643>

A new two-stage method for producing porous membranes based on polyphenylene sulfide

D.N. Matveev¹ , I.L. Borisov¹ , T.S. Anokhina¹, A.V. Volkov¹, D.A. Balkaev², R.M. Akhmadullin^{2,3}, I.S. Antipin², V.V. Volkov¹

¹*A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

³*R&D LLC "AkhmadullinS", Kazan, Russia*

 dmatveev@ips.ac.ru, Boril@ips.ac.ru

Abstract

A new two-stage method for the fabrication of a porous membrane from polyphenylene sulfide (PPS) was proposed. The approach involves the production of PPS films with a filler and the subsequent removal of the filler material from the film to form a porous structure. Polyarylene sulfones, such as polysulfone (PSF), polyethersulfone, and polyphenylene sulfone (PPSU), were investigated as fillers for the first time. The concentration of the pore-forming additive was 30 % (wt.). The filler was extracted from the films through thermolysis in *N*-methyl-2-pyrrolidone (NMP) for 12 h at different temperatures (70, 90, and 202 °C). Thermolysis conditions for the complete removal of PSF and PPSU from the PPS film were found empirically. The porous structure of the resulting PPS membranes was examined using scanning electron microscopy, liquid porometry, and gas permeability testing for specific gases (He, N₂, and CO₂). The samples of porous membranes from PPS with an average pore diameter of 160 nm, corresponding to the range of microfiltration, were obtained.

Keywords: membrane, polymer, polyphenylene sulfide, petroleum, waste oil, regeneration, separation of viscous liquids, pore size, gas permeability

Acknowledgments. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 24-63-00026, <https://rscf.ru/project/24-63-00026/>).

For citation: Matveev D.N., Borisov I.L., Anokhina T.S., Volkov A.V., Balkaev D.A., Akhmadullin R.M., Antipin I.S., Volkov V.V. A new two-stage method for producing porous membranes based on polyphenylene sulfide. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2025, vol. 167, no. 4, pp. 632–643. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.632-643>. (In Russian)

Введение

Нефть и природный газ являются основными источниками углеводородов, которые используются в качестве сырья для производства нефтепродуктов, пластмасс и полимеров. Ежедневно нефтеперерабатывающие заводы по всему миру перерабатывают около 90 млн баррелей сырой нефти [1]. Большинство заводов используют атмосферную и вакуумную дистилляцию, которые требуют значительного количества энергии для нагрева и поддер-

жания заданной температуры в ректификационных колоннах для разделения соединений в соответствии с их точками кипения.

В качестве альтернативы дистилляции для разделения сырой нефти исследуются баромембранные процессы, такие как нано- и ультрафильтрация [2]. Мембранные фильтрации может быть более энергоэффективной и экологичной по сравнению с дистилляцией и другими термическими методами, ввиду отсутствия фазовых переходов, так как разделение происходит под действием перепада давления на мембране [1]. Впервые мембранные фильтрации была применена в качестве метода разделения вязких продуктов нефтяной промышленности для деасфальтизации и деметаллизации нефти в 80-годах прошлого века [3–4]. Однако высокая вязкость нефти затрудняет применение баромембранных процессов. В настоящее время существуют два основных способа снижения вязкости фильтруемой среды, которые могут быть использованы для фильтрации нефти и нефтепродуктов. Это повышение температуры разделяемой среды [5–7] и разбавление нефти легкими углеводородами, которые впоследствии могут быть сравнительно просто регенерированы [2–3, 8]. Другой важной задачей, решаемой с помощью баромембранных процессов, является регенерация отработанных пищевых, промышленных и моторных масел, которые используются без разбавления при высоких температурах [9–11].

Для эффективного применения баромембранных процессов при разделении нефти и регенерации отработанных масел необходима разработка мембран, обладающих высокой механической прочностью, термостабильностью, химической стойкостью, проницаемостью и устойчивостью к засорению. Для использования в качестве химически и термически стойких полимерных мембран перспективно применение конструкционного (инженерного) пластика полифениленсульфида (ПФС), благодаря его уникальным свойствам, таким как коррозионная стойкость, химическая и термическая стабильность [12]. Молекулярная структура ПФС характеризуется высокой прочностью, благодаря наличию бензольных колец в его структуре, а встраивание эфирной связи серы придает ему определенную гибкость, что может обуславливать высокие эксплуатационные характеристики [12]. ПФС является одним из наиболее термостойких полимеров среди термопластов. Его температура разложения на воздухе превышает 450 °С, а температура длительной эксплуатации составляет около 200 °С. Он находит широкое применение в автомобилестроении, электронике, машиностроении, химической и фармацевтической промышленности и др. Кроме того, ПФС обладает высокой химической стойкостью к коррозии, поскольку практически отсутствуют растворители, способные его растворить при температуре ниже 200 °С [13]. ПФС имеет высокую устойчивость к воздействию кислот, щелочей и концентрированных растворов солей [14]. Благодаря этому, изделия из ПФС могут быть широко использованы в экстремальных условиях, например, в специальных разделительных мембранах, сепараторах для аккумуляторов и электролитических элементах.

Мембранны на основе ПФС в основном получают методом термически индуцированного разделения фаз (Thermally Induced Phase Separation, TIPS), вследствие его высокой химической стойкости. Метод TIPS заключается в создании гомогенной смеси полимера и растворителя с ее последующим контролируемым охлаждением, которое вызывает разделение фаз полимера и растворителя и создание пористой структуры [15]. Высокий показатель текучести расплава ПФС сильно затрудняет его переработку методами экструзии и литья под давлением. Предварительная сшивка позволяет увеличить молекулярную массу и снизить текучесть расплава за счет термической полимеризации [16]. Под действием кислорода в

молекулярной цепи ПФС образуются многочисленные сульфоксидные и сульфоновые группы и формируется сшитая структура, содержащая арилэфирную связь [17]. Для снижения показателя текучести расплава помимо термической обработки ПФС можно использовать наполнители, например, стекловолокно, способствующее снижению текучести и повышению механической прочности композитов на основе ПФС [18]. Содержание стекловолокна в композитах может достигать 70 % по массе, что значительно улучшает механические свойства композитов [18].

Целью работы является создание пористых химически и термически устойчивых мембран на основе ПФС, которые могут быть использованы для фильтрации нефтепродуктов при высоких температурах. В отличие от распространенных технологических способов получения мембран из ПФС растворным методом, в рамках работы впервые использована термическая деструкция наполнителя полимерной природы, введенного в ПФС при повышенных температурах. В качестве порообразующей добавки впервые рассмотрены полиариленсульфоны (полисульфон (ПСФ), полиэфирсульфон (ПЭС) и полифениленсульфон (ПФСФ)).

1. Материалы и методы

1.1. Материалы. В качестве основы получаемых мембран использован порошок полифениленсульфида линейной структуры с индексом текучести расплава (MFI) 1011 г/10 мин (при 316 °C, 5 кг) производства ООО «НТЦ «Ахмадулины». Полимерными наполнителями выступали ПСФ марки Ultrason® S 6010, ПЭС марки Ultrason® E 6020 Р и ПФСФ марки Ultrason® Р 3010 (BASF, Германия). Исследование термической деструкции наполнителей проводили в N-метил-2-пирролидоне (НМП) марки х.ч. (Компонент-реактив, Россия).

1.2. Экструзия пленок ПФС-наполнитель. Для получения пленочных материалов из системы ПФС с наполнителем проводили грануляцию смеси на двухшнековом экструдере Scientific LTE 16–40 (Labtech Engineering Company LTD, Таиланд) с водяным охлаждением стренги. Температуры зон экструдера составляли (начало-конец) 290–295–300–305–310–310–315–315–320–325 °C. Содержание наполнителя (ПСФ, ПЭС и ПФСФ) в полученном грануляте составляло 30 % (масс.). Затем методом горячего прессования на ротационном реометре Discovery HR-1 (TA Instruments, США) при температурах плоскостей 330 °C и давлении 50 Н из гранулята получали пленочные материалы.

1.3. Получение пористых мембран ПФС. Получение пористых мембран из ПФС осуществляли путем деструкции наполнителя в НМП при температурах 70, 90 и 202 °C. Для этого образец помещали в расположенную на магнитной мешалке с нагревающей платформой колбу с НМП и проводили нагрев системы до заданной температуры. Система была снабжена обратным холодильником, через который пропускали водопроводную воду. Для предотвращения термоокислительных реакций с НМП, пространство в колбе над НМП было заполнено аргоном. Образец выдерживали в течение 12 ч в кипящем НМП, после чего помещали на ночь в дистиллиированную воду, а затем на 3 ч в сушильный шкаф, разогретый до 100 °C. До и после вышеописанных операций измеряли массу образца с использованием лабораторных весов SHIMADZU AUW-220 (SHIMADZU, Япония).

1.4. Сканирующая электронная микроскопия. Оценку поверхности и пористой структуры ПФС мембран осуществляли с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), используя настольный сканирующий электронный микроскоп Phenom XL G2 Desktop SEM (Thermo Fisher Scientific, США) при ускоряющем напряжении 15 кэВ. Сколы

мембран получали путем разламывания их в среде жидкого азота. СЭМ-изображения обрабатывали с использованием программного обеспечения Quantax 70 Microanalysis. Для установления элементного состава использована система энергодисперсионного анализа Bruker Quantax 70 EDS (Bruker, США).

1.5. Порометрия. Размер транспортных пор определяли на жидкостном порометре POROLIQ 1000 ML (Porometer, Бельгия). Принцип действия прибора основан на вытеснении смачивающей жидкости (насыщенный раствор воды в изобутаноле) не смачивающей жидкостью (насыщенный раствор изобутанола в воде). Межфазное поверхностное натяжение в такой системе составляет 2 дин/см. Для определения размера пор из мембраны вырезали образцы диаметром 2 см, которые помещали на 24 ч в изобутанол, насыщенный водой. Вымоченный в изобутаноле образец помещали в ячейку, после чего начинали измерение, в ходе которого наблюдали пошаговое увеличение трансмембранных давления от 0 до появления потока через мембрану, свидетельствующего об открытии пор наибольшего размера. Измерение проводили до стабилизации потока на одном уровне с точностью ± 1 мкл/мин в течение 180 с.

1.6. Измерение газопроницаемости. Для установления транспортной структуры полученных мембран из ПФС исследованы их газотранспортные свойства по индивидуальным газам (He, N₂, CO₂). Различия в молекулярных массах газов позволяют определить, какой режим течения (кнудсеновский или пуазейлевский) реализуется в порах определенного размера. При кнудсеновском течении размер пор составляет от 2 до 50 нм, а при пуазейлевском – более 50 нм. Это можно сделать на основе значений идеальных селективностей, то есть отношений коэффициентов проницаемости по индивидуальным газам. Газопроницаемость определяли объемным методом при комнатной температуре. На мембрану подавали газы под давлением до 2.0 бар, со стороны пермеата поддерживали атмосферное давление. Предварительное вакуумирование образцов перед измерением не проводили. Площадь рабочей поверхности мембраны в ходе измерений составляла 1.03 см².

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Извлечение наполнителя из пленки ПФС-наполнитель. Изучен процесс получения пористых мембран из ПФС путем деструкции наполнителя (ПСФ, ПЭСФ и ПФСФ) в НМП при различных температурах (70, 90 и 202 °C). Выбор температурных режимов обусловлен стремлением исследовать процесс извлечения наполнителей при температуре ниже температуры стеклования ПФС (70 °C), при температуре, равной температуре стеклования ПФС (90 °C), и при температуре кипения растворителя НМП, равной 202 °C.

В табл. 1 представлены данные по уменьшению массы образцов пленок ПФС-наполнитель при различных температурах экспозиции в течение 12 ч в НМП. Увеличение извлечения наполнителя из пленки ПФС наблюдается в ряду ПЭС < ПСФ < ПФСФ. Так, например, при экспозиции в НМП в течение 12 ч при температуре 90 °C потеря массы образца с наполнителем из ПЭС составила 13.6 %, ПСФ – 18.8 % и ПФСФ – 29.3 %. Следует отметить, что образцы, содержащие наполнитель ПЭС и ПФСФ, после 12 ч экспозиции в НМП при температуре 202 °C частично разрушились. Это может быть связано с механической нестабильностью этих образцов при воздействии на них кипящего НМП. Образец, содержащий в качестве наполнителя ПСФ, проявляет устойчивость при воздействии кипящего НМП (потеря массы составила 29.2 % от первоначальной). Потеря массы, сопоставимая

с содержанием наполнителя в образце ПФС (для ПСФ после 12 ч экспозиции при 202 °C, а для ПФСФ после 12 ч экспозиции при 90 °C), а также изменение окраски образца (рис. 1) могут указывать на вымывание наполнителя из образца ПФС–наполнитель.

Табл. 1. Изменение массы образцов пленок ПФС–наполнитель после 12 ч экспозиции в НМП
Table 1. Weight change of the PPS–filler film samples after 12 h of exposure to NMP

Наполнитель	Уменьшение массы образца от первоначальной, %		
	ПСФ	ПЭС	ПФСФ
70	10.0	7.8	23,8
90	18.8	13.6	29,3
202	29.2	—*	—*

* – образец частично разрушился



Рис. 1. Фотографии образца ПФС с 30 % ПСФ до экспозиции в НМП (а), после 12 ч экспозиции в НМП при 202 °C (б) и после 12 ч экспозиции в НМП при 202 °C в сравнении с образцом ПФС без наполнителя и образцом до экспозиции в НМП (в)

Fig. 1. Images of the PPS sample with 30 % PSF before exposure to NMP (a), after 12 h of exposure to NMP at 202 °C (b), and after 12 h of exposure to NMP at 202 °C in comparison to the PPS sample without filler and the test sample before exposure to NMP (c)

2.2. Исследование морфологии и пористой структуры. Пористая структура полученных образцов ПФС оценена с использованием СЭМ. На рис. 2 представлен пример пористой структуры образца ПФС с наполнителем ПСФ до и после 12 ч экспозиции в НМП при температуре 202 °C. Как видно из рис. 2, б, после извлечения наполнителя (в данном случае ПСФ) поверхность мембранны приобретает открытую пористость. СЭМ микрофотография скола поперечного сечения позволяет говорить о наличии крупной пористости в толще мембранны из ПФС (рис. 2, в).

Для оценки извлечения наполнителя из образцов ПСФ–наполнитель проведен энергодисперсионный анализ поверхности до и после экспозиции в НМП. Анализ проводили по следующим химическим элементам: углерод (C), сера (S), которые присутствуют в ПФС и выбранных наполнителях, а также кислород (O), который содержится в ПСФ, ПЭС и ПФСФ, но отсутствует в ПФС. На рис. 3 представлены результаты ЭДС-анализа образца ПФС с наполнителем ПСФ до и после 12 ч экспозиции в НМП при температуре 202 °C. Установлено, что после 12 ч экспозиции в кипящем НМП содержание кислорода на поверхности образца уменьшается в 1.5 раза. Это подтверждает извлечение ПСФ из образца ПФС при выбранном режиме экспозиции в НМП.

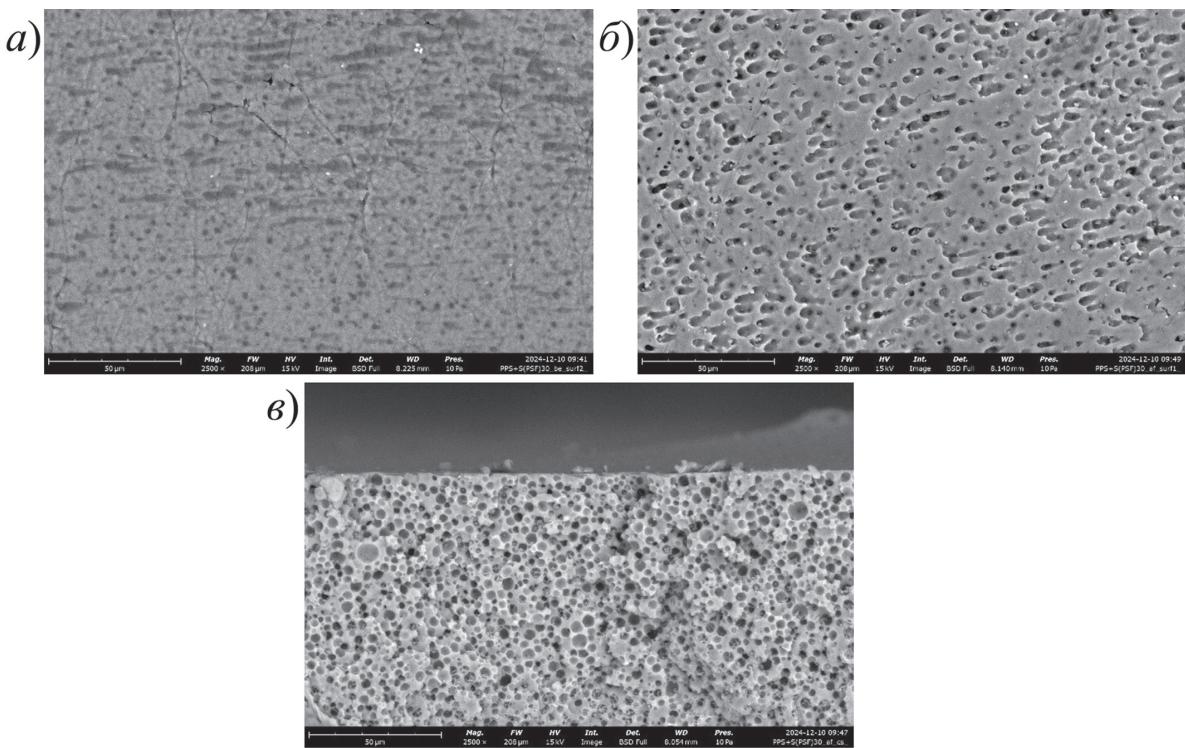


Рис. 2. СЭМ микрофотографии образца ПФС с 30 % ПСФ: поверхность до экспозиции в кипящем НМП (а); поверхность после 12 ч экспозиции в кипящем НМП (б); скол поперечного сечения образца после 12 ч экспозиции в кипящем НМП (в)

Fig. 2. SEM micrographs of the PPS sample with 30 % PSF: the surface before exposure to boiling NMP (a); the surface after 12 h of exposure to boiling NMP (b); the cross-section of the sample after 12 h of exposure to boiling NMP (c)

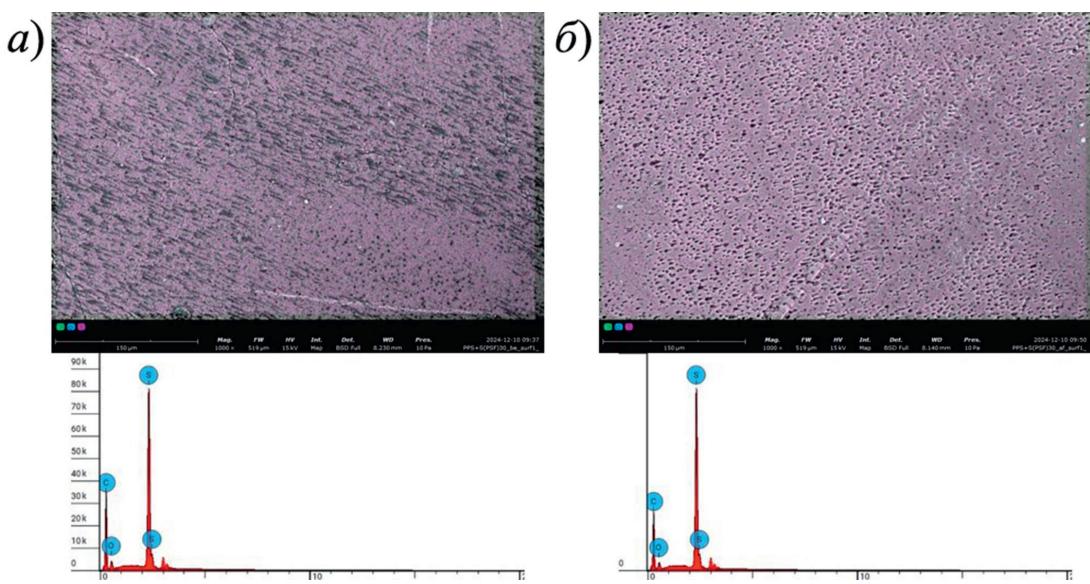


Рис. 3. СЭМ микрофотографии с элементным картированием и ЭДС спектры образца ПФС, содержащего 30 % ПСФ, до (а) и после (б) 12 ч экспозиции в кипящем НМП

Fig. 3. SEM micrographs with elemental mapping and EDS spectra of the PPS sample with 30 % PSF before (a) and after (b) 12 h of exposure to boiling NMP

2.3. Исследование газопроницаемости и размера пор. Для того, чтобы охарактеризовать транспортную пористость полученных мембран из ПФС, исследованы их газотранс-

портные свойства по индивидуальным газам (He , N_2 , CO_2). В табл. 2 представлены газотранспортные характеристики пористых мембран из ПФС, в которых наполнитель (ПСФ после 12 ч экспозиции в НМП при 202°C , а ПФСФ – при 90°C) был полностью удален. Для сравнения приведены газотранспортные свойства мембраны из ПФС, из которой наполнитель ПСФ был экстрагирован в НМП при температуре 90°C (потеря массы образца составила 18.8 %).

Табл. 2. Газотранспортные свойства пористых мембран ПФС

Table 2. Gas transport properties of the porous PPS membranes

Экстрагируемый наполнитель	$t_{\text{НМП}}$, $^\circ\text{C}$	Уменьшение массы образца ПФС–наполнитель, %	$P/l (\text{N}_2)$, л/($\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{атм}$)	$P/l (\text{CO}_2)$, л/($\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{атм}$)	$P/l (\text{He})$, л/($\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{атм}$)	$\alpha(\text{He}/\text{CO}_2)$
ПСФ	90	18.8	3.5	2.7	4.3	1.6
ПСФ	202	29.2	42	32	54	1.7
ПФСФ	90	29.3	37	30	48	1.6

Из табл. 2 видно, что при полном извлечении наполнителя из ПФС значения газопроницаемости близки. Например, для N_2 при извлечении наполнителя ПСФ (29.2%) газопроницаемость составила 32 л/($\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{атм}$), а при использовании наполнителя ПФСФ (29.3%) – 30 л/($\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{атм}$). При неполном извлечении наполнителя, например, ПСФ на 18.8%, газопроницаемость пористой мембранны значительно снижается (газопроницаемость по азоту составляет 3.5 л/($\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{атм}$)). Полученные значения идеальной селективности для всех исследуемых образцов ($\alpha(\text{He}/\text{CO}_2) = 1.6–1.7$) указывают на смешанный режим газового потока, то есть среднее между потоками Пуазейля ($\alpha = 1.0$ для пары газов He/CO_2) и Кнудсена ($\alpha = 3.3$ для пары газов He/CO_2). Эти результаты согласуются с данными жидкостной порометрии, с помощью которой оценены размеры транспортных пор в исследуемых образцах после экспозиции в НМП. Так, например, для образца ПФС с наполнителем ПСФ после 12 ч экспозиции в кипящем НМП размер наибольшей поры составляет 200 нм, а средний размер пор – 160 нм, что соответствует микрофильтрационному диапазону размера пор.

Заключение

В работе впервые реализован новый двухстадийный способ получения пористой мембраны из ПФС, который включает в себя получение пленок из ПФС и наполнителя (ПСФ, ПЭС, ПФСФ) с последующим удалением последнего методом термолиза. Установлено, что эффективность извлечения наполнителя возрастает в ряду ПЭС < ПСФ < ПФСФ. С использованием СЭМ и потоковой порометрии жидкость–жидкость показано, что после извлечения наполнителя поверхность мембранны приобретает открытую пористость. Разработанный метод позволил создать мембранны из ПФС с регулируемой пористостью, которые, благодаря уникальным свойствам ПФС, могут быть использованы в процессах микрофильтрации, в частности, для разделения нефти и регенерации отработанных масел. В рамках дальнейших исследований планируется увеличить значение пористости мембран из ПФС за счет повышения содержания наполнителя в исходном грануляте. Это, в свою очередь, может привести к улучшению транспортных характеристик разрабатываемых мембран.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. *Sholl D.S., Lively R.P.* Seven chemical separations to change the world // *Nature*. 2016. V. 532, No 7600. P. 435–437. <https://doi.org/10.1038/532435a>.
2. *Chisca S., Musteata V.-E., Zhang W., Vasylevskyi S., Falca G., Abou-Hamad E., Emwas A.-H., Altunkaya M., Nunes S.P.* Polytriazole membranes with ultrathin tunable selective layer for crude oil fractionation // *Science*. 2022. V. 376, No 6597. P. 1105–1110. <https://doi.org/10.1126/science.abm7686>.
3. *Kutowy O., Guerin P., Tweddle T.A., Woods J.* Use of membranes for oil upgrading // Proc. 35th Canadian Chemical Engineering Conf. Ottawa: Can. Soc. Chem. Eng., 1985. V. 1. P. 241.
4. *Kutowy O., Tweddle T.A., Hazlett J.D.* Method for the molecular filtration of predominantly aliphatic hydrocarbon liquids. Patent US 4814088. 1989.
5. *Ramirez-Corredores M.M.* The Science and Technology of Unconventional Oils: Finding Refining Opportunities. Cambridge, MA: Acad. Press, 2017. 761 p.
6. *Ashtari M., Ashrafizadeh S.N., Bayat M.* Asphaltene removal from crude oil by means of ceramic membranes // *J. Pet. Sci. Eng.* 2012. V. 82–83. P. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.01.001>.
7. *Barbier J., Marques J., Caumette G., Merdignac I., Bouyssiere B., Lobinski R., Lienemann C.-P.* Monitoring the behaviour and fate of nickel and vanadium complexes during vacuum residue hydrotreatment and fraction separation // *Fuel Process. Technol.* 2014. V. 119. P. 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.11.004>.
8. *Ching M.-J.T.M., Pomerantz A.E., Andrews A.B., Dryden P., Schroeder R., Mullins O.C., Harrison C.* On the nanofiltration of asphaltene solutions, crude oils, and emulsions // *Energy Fuels*. 2010. V. 24, No 9. P. 5028–5037. <https://doi.org/10.1021/ef100645b>.
9. *Sarrade S., Guizard C., Rios G.M.* New applications of supercritical fluids and supercritical fluids processes in separation // *Sep. Purif. Technol.* 2003. V. 32, Nos 1–3. P. 57–63. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(03\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(03)00054-6).
10. *Маркелов А.В.* Обобщение результатов исследований процессов ультрафильтрации для регенерации отработанных технических масел // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2023. № 3(75). С. 69–76. <https://doi.org/10.6060/snt.20237503.0009>.
11. *Widodo S., Ariono D., Khoiruddin K., Hakim A.N., Wenten I.G.* Recent advances in waste lube oils processing technologies // *Environ. Prog. Sustainable Energy*. 2018. V. 37, No 6. P. 1867–1881. <https://doi.org/10.1002/ep.13011>.
12. *Lu D., Mai Y.-W., Li R.K.Y., Ye L.* Impact strength and crystallization behavior of nano-SiO_x/poly(phenylene sulfide) (PPS) composites with heat-treated PPS // *Macromol. Mater. Eng.* 2003. V. 288, No 9. P. 693–698. <https://doi.org/10.1002/mame.200300088>.
13. *Gu J., Du J., Dang J., Geng W., Hu S., Zhang Q.* Thermal conductivities, mechanical and thermal properties of graphite nanoplatelets/polyphenylene sulfide composites // *RSC Adv.* 2014. V. 4, No 42. P. 22101–22105. <https://doi.org/10.1039/C4RA01761G>.
14. *Ma C.-C.M., Lee C.-L., Tai N.-H.* Chemical resistance of carbon fiber-reinforced poly(ether ether ketone) and poly(phenylene sulfide) composites // *Polym. Compos.* 1992. V. 13, No 6. P. 435–440. <https://doi.org/10.1002/pc.750130606>.
15. *Liu J., Qin J., Mo Y., Wang S., Han D., Xiao M., Meng Y.* Polyphenylene sulfide separator for high safety lithium-ion batteries // *J. Electrochem. Soc.* 2019. V. 166, No 8. P. A1644–A1652. <https://doi.org/10.1149/2.1041908jes>.
16. *Brady D.G.* The crystallinity of poly(phenylene sulfide) and its effect on polymer properties // *J. Appl. Polym. Sci.* 1976. V. 20, No 9. P. 2541–2551. <https://doi.org/10.1002/app.1976.070200921>.
17. *Yan P., Peng W., Yang F., Cao Y., Xiang M., Wu T., Fu Q.* Investigation on thermal degradation mechanism of poly(phenylene sulfide) // *Polym. Degrad. Stab.* 2022. V. 197. Art. 109863. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.109863>.

18. Zhao L., Yu Y., Huang H., Yin X., Peng J., Sun J., Huang L., Tang Y., Wang L. High-performance polyphenylene sulfide composites with ultra-high content of glass fiber fabrics // Composites, Part B. 2019. V. 174. Art. 106790. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.001>.

References

1. Sholl D.S., Lively R.P. Seven chemical separations to change the world. *Nature*, 2016, vol. 532, no. 7600, pp. 435–437. <https://doi.org/10.1038/532435a>.
2. Chisca S., Musteata V.-E., Zhang W., Vasylevskyi S., Falca G., Abou-Hamad E., Emwas A.-H., Altunkaya M., Nunes S.P. Polytriazole membranes with ultrathin tunable selective layer for crude oil fractionation. *Science*, 2022, vol. 376, no. 6597, pp. 1105–1110. <https://doi.org/10.1126/science.abm7686>.
3. Kutowy O., Guerin P., Tweddle T.A., Woods J. Use of membranes for oil upgrading. *Proc. 35th Canadian Chemical Engineering Conf.* Vol. 1. Ottawa, Can. Soc. Chem. Eng., 1985, p. 241.
4. Kutowy O., Tweddle T.A., Hazlett J.D. Method for the molecular filtration of predominantly aliphatic hydrocarbon liquids. Patent US 4814088. 1989.
5. Ramirez-Corredores M.M. *The Science and Technology of Unconventional Oils: Finding Refining Opportunities*. Cambridge, MA, Acad. Press, 2017. 761 p.
6. Ashtari M., Ashrafizadeh S.N., Bayat M. Asphaltene removal from crude oil by means of ceramic membranes. *J. Pet. Sci. Eng.*, 2012, vols. 82–83, pp. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.01.001>.
7. Barbier J., Marques J., Caumette G., Merdignac I., Bouyssiere B., Lobinski R., Lienemann C.-P. Monitoring the behaviour and fate of nickel and vanadium complexes during vacuum residue hydrotreatment and fraction separation. *Fuel Process. Technol.*, 2014, vol. 119, pp. 185–189. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.11.004>.
8. Ching M.-J.T.M., Pomerantz A.E., Andrews A.B., Dryden P., Schroeder R., Mullins O.C., Harrison C. On the nanofiltration of asphaltene solutions, crude oils, and emulsions. *Energy Fuels*, 2010, vol. 24, no. 9, pp. 5028–5037. <https://doi.org/10.1021/ef100645b>.
9. Sarrade S., Guizard C., Rios G.M. New applications of supercritical fluids and supercritical fluids processes in separation. *Sep. Purif. Technol.*, 2003, vol. 32, nos. 1–3, pp. 57–63. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(03\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(03)00054-6).
10. Markelov A.V. Generalization of the results of studies of ultrafiltration processes for the regeneration of used technical oils. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2023, no. 3(75), pp. 69–76. <https://doi.org/10.6060/snt.20237503.0009>. (In Russian)
11. Widodo S., Ariono D., Khoiruddin K., Hakim A.N., Wenten I.G. Recent advances in waste lube oils processing technologies. *Environ. Prog. Sustainable Energy*, 2018, vol. 37, no. 6, pp. 1867–1881. <https://doi.org/10.1002/ep.13011>.
12. Lu D., Mai Y.-W., Li R.K.Y., Ye L. Impact strength and crystallization behavior of nano-SiO_x/poly(phenylene sulfide) (PPS) composites with heat-treated PPS. *Macromol. Mater. Eng.*, 2003, vol. 288, no. 9, pp. 693–698. <https://doi.org/10.1002/mame.200300088>.
13. Gu J., Du J., Dang J., Geng W., Hu S., Zhang Q. Thermal conductivities, mechanical and thermal properties of graphite nanoplatelets/polyphenylene sulfide composites. *RSC Adv.*, 2014, vol. 4, no. 42, pp. 22101–22105. <https://doi.org/10.1039/C4RA01761G>.
14. Ma C.-C.M., Lee C.-L., Tai N.-H. Chemical resistance of carbon fiber-reinforced poly(ether ether ketone) and poly(phenylene sulfide) composites. *Polym. Compos.*, 1992, vol. 13, no. 6, pp. 435–440. <https://doi.org/10.1002/pc.750130606>.
15. Liu J., Qin J., Mo Y., Wang S., Han D., Xiao M., Meng Y. Polyphenylene sulfide separator for high safety lithium-ion batteries. *J. Electrochem. Soc.*, 2019, vol. 166, no. 8, pp. A1644–A1652. <https://doi.org/10.1149/2.1041908jes>.

16. Brady D.G. The crystallinity of poly(phenylene sulfide) and its effect on polymer properties. *J. Appl. Polym. Sci.*, 1976, vol. 20, no. 9, pp. 2541–2551. <https://doi.org/10.1002/app.1976.070200921>.
17. Yan P., Peng W., Yang F., Cao Y., Xiang M., Wu T., Fu Q. Investigation on thermal degradation mechanism of poly(phenylene sulfide). *Polym. Degrad. Stab.*, 2022, vol. 197, art. 109863. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.109863>.
18. Zhao L., Yu Y., Huang H., Yin X., Peng J., Sun J., Huang L., Tang Y., Wang L. High-performance polyphenylene sulfide composites with ultra-high content of glass fiber fabrics. *Composites, Part B*, 2019, vol. 174, art. 106790. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.001>.

Информация об авторах

Дмитрий Николаевич Матвеев, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории полимерных мембран, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: dmatveev@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8549-0886>

Илья Леонидович Борисов, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории полимерных мембран, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: Boril@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0406-6280>

Татьяна Сергеевна Анохина, кандидат химических наук, руководитель лаборатории полимерных мембран, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: tsanokhina@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6154-3709>

Алексей Владимирович Волков, доктор химических наук, профессор РАН, советник директора, главный научный сотрудник лаборатории полимерных мембран, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: avolkov@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4524-4597>

Динар Ансарович Балькаев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЛ «Синтетические полимерные материалы и композиты», Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: dinar.balkaev@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7546-7623>

Ренат Маратович Ахмадуллин, кандидат химических наук, старший научный сотрудник НИЛ «Синтетические полимерные материалы и композиты», Казанский (Приволжский) федеральный университет; генеральный директор ООО НТЦ «Ахмадуллины»

E-mail: ahmadullinr@gmail.com

Игорь Сергеевич Антипов, доктор химических наук, член-корреспондент РАН, профессор, профессор кафедры органической и медицинской химии Химического института им. А.М. Бутлерова, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: iantipin54@yandex.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9882-7035>

Владимир Васильевич Волков, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории полимерных мембран, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: vvolkov@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1106-2947>

Author Information

Dmitry N. Matveev, Cand. Sci. (Chemistry), Researcher, Laboratory of Polymeric Membranes, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: dmatveev@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8549-0886>

Il'ya L. Borisov, Dr. Sci. (Chemistry), Leading Researcher, Laboratory of Polymeric Membranes, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: Boril@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0406-6280>

Tatyana S. Anokhina, Cand. Sci. (Chemistry), Head of Laboratory of Polymeric Membranes, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: tsanokhina@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6154-3709>

Alexey V. Volkov, Dr. Sci. (Chemistry), Professor of Russian Academy of Sciences, Advisor to the Director, Chief Researcher, Laboratory of Polymeric Membranes, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: avolkov@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4524-4597>

Dinar A. Balkaev, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of Synthetic Polymeric Materials and Composites, Kazan Federal University

E-mail: dinar.balkaev@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7546-7623>

Renat M. Akhmadullin, Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher, Laboratory of Synthetic Polymeric Materials and Composites, Kazan Federal University; CEO of R&D LLC "AkhmadullinS"

E-mail: ahmadullinr@gmail.com

Igor S. Antipin, Dr. Sci. (Chemistry), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Professor, Department of Organic and Medicinal Chemistry, A.M. Butlerov Institute of Chemistry, Kazan Federal University

E-mail: iantipin54@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9882-7035>

Vladimir V. Volkov, Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Chief Researcher, Laboratory of Polymeric Membranes, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: vvvolkov@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1106-2947>

Поступила в редакцию 24.06.2025

Принята к публикации 14.08.2025

Received June 24, 2025

Accepted August 14, 2025