

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИ[1-ТРИМЕТИЛСИЛИЛ-1-ПРОПИН]А: ВЛИЯНИЕ ВНЕДРЕННЫХ В МАТРИЦУ ПОЛИМЕРА ПОРИСТЫХ АРОМАТИЧЕСКИХ КАРКАСОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РЕАКЦИИ ФРИДЕЛЯ–КРАФТСА

© Д. С. Бахтин¹, Л. А. Куликов^{1,2}, А. Л. Максимов^{1,2}, А. В. Волков¹

¹ Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН,
119991, г. Москва, Ленинский пр., д. 29

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119991, г. Москва, микрорайон Ленинские горы, д. 1, стр. 3
E-mail: db2@ips.ac.ru

Поступила в Редакцию 12 декабря 2019 г.

После доработки 16 января 2020 г.

Принята к публикации 17 января 2020 г.

Изучено влияние внедренных в матрицу стеклообразного полимера поли[1-триметилсилил-1-пропин]а (ПТМСП) частиц пористых ароматических каркасов, синтезированных по реакции Фриделя–Крафтса (ПАК-ФК), на стабилизацию транспортных характеристик композиционных мембран с тонким селективным слоем (2.0–2.2 мкм). В качестве сравнения рассмотрены образцы композиционных мембран с селективным слоем на основе ПТМСП и ПТМСП, наполненного частицами ПАК-11, синтезированных по реакции Сузуки. Все образцы композиционных мембран демонстрировали снижение абсолютных значений газопроницаемости по всем газам во времени вследствие релаксации неравновесного свободного объема ПТМСП, при этом наибольшее снижение наблюдается в течение первой тысячи часов с момента создания мембран. Стабилизация транспортных характеристик композиционных мембран с ПТМСП/ПАК-ФК наблюдается по прошествии 5000 ч с момента создания мембран, далее производительность по диоксиду углерода сохраняется на уровне $8\text{--}9\text{ м}^3\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ в течение 9200 ч. Аналогичные значения производительности для состаренных композиционных мембран на основе ПТМСП и ПТМСП/ПАК-11 составили около $1.5\text{ м}^3\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$.

Ключевые слова: пористые ароматические каркасы; ПТМСП; физическое старение; газоразделение; композиционные мембраны

DOI: 10.31857/S0044461820020140

Наиболее распространенным мембранным материалом, используемым в производстве промышленных газоразделительных мембран, являются аморфные стеклообразные полимеры благодаря оптимальной комбинации проницаемости и селективности, а также хорошим механическим свойствам самого полимерного материала, позволяющим сохранять заданную

структуру мембраны в условиях эксплуатации, особенно при высоких давлениях [1–3]. Стеклообразные полимеры представляют собой неравновесные системы, характеризующиеся определенной долей свободного объема, ограниченные в матрице материала. Тенденция таких материалов к релаксации избыточного свободного объема за счет сегментальной под-

вижности и перегруппировки макроцепей (так называемый эффект «физического старения») приводит к снижению газотранспортных характеристик мембран во времени. Основными способами предотвращения или минимизации снижения газопроницаемости полимерного материала во времени являются ограничение подвижности макроцепей или дополнительное увеличение доли свободного объема за счет введения наполнителей. Так, в последние годы активно исследуется новый тип наполнителей — пористые ароматические каркасы (ПАК) с различным дизайном и структурой [4–9]. Эффект внедрения ПАК в матрицу полимера с целью минимизации влияния физического старения на газотранспортные характеристики был успешно продемонстрирован для образцов, изготовленных из ПТМСП, поли[4-метил-2-пентен]а (ПМП) и полибензодиоксана РИМ-1 толщиной 30–150 мкм [4, 5, 7, 10, 11], а также мембран композиционного типа с селективным слоем толщиной 1–6 мкм [8, 9].

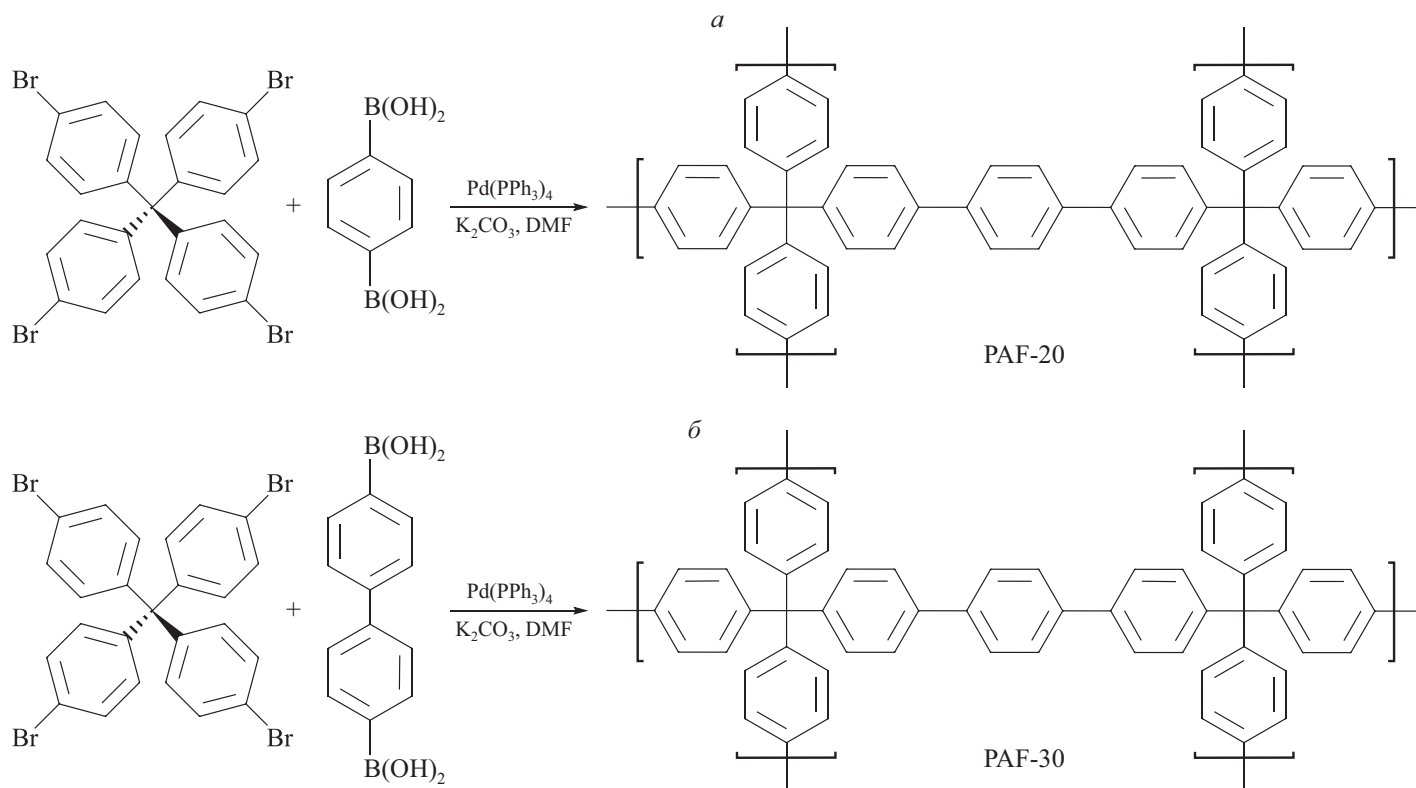
С практической точки зрения ПТМСП-подобные материалы могут использоваться в газоразделительных мембранах в качестве верхнего слоя толщиной микрометрового уровня, поэтому исследование влияния наполнителя ПАК на характеристики тонкопле-

ночных композитных (TFC) мембран представляет интерес как с практической, так и с фундаментальной точки зрения. Насколько нам известно, большинство опубликованных исследований по физическому старению материала ПТМСП проводились с плотными пленками толщиной от 30 мкм [12–21].

Ранее синтез ПАК для создания мембран со смешанной матрицей осуществляли с помощью реакции кросс-сочетания Сузуки между тетракис-(*n*-бромфенил)метаном и бифенилдиборной кислотой (см. схему). Недостаток данного метода — использование в большом количестве дорогостоящих реагентов, таких как ацетат палладия и бифенилдиборная кислота. Альтернатива данному методу синтеза ПАК — сшивка ароматических фрагментов молекул-мономеров с помощью реакции Фриделя–Крафтса (ПАК-ФК) [20–22]. Достоинства нового метода заключаются в значительно более низкой стоимости реагентов и простоте проведения синтеза.

Целью данной работы являлось создание тонкослойных композиционных мембран на основе ПТМСП с добавлением синтезированных по реакции Фриделя–Крафтса частиц ПАК-ФК и исследование их физического старения.

Схема синтеза классических пористых ароматических каркасов ПАК-11 (а) и нового типа пористых ароматических каркасов ПАК-ФК (б)



Экспериментальная часть

Синтез пористых ароматических каркасов с помощью реакции Фриделя–Крафтса (ПАК-ФК) проводили по методике, описанной ранее [22].

В данной работе использовался образец партии ПТМСП, синтез которого был описан ранее [22] и выполнен в лаборатории «Синтез селективно-проницаемых полимеров» (ИНХС РАН).

В качестве подложек для последующего создания композиционных мембран были выбраны микрофилтрационные промышленные мембраны производства ЗАО НТЦ «Владипор» МФФК-1. Тонкий верхний селективный слой ПТМСП наносили на пористую подложку из 0.5 мас%-ного раствора полимера в хлороформе (марка х.ч., Химмед, Россия) методом частичного погружения подложки в формовочную ванну [23]. Полученные композиционные мембраны представляли собой полотно 0.1–0.35 м. Процесс нанесения осуществлялся при комнатной температуре 20–23°C. Скорость протяжки подложки строго контролировалась и составляла 1.8 м·мин^{−1}.

Распределение ПАК в полимерной матрице получаемых образцов мембран исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) высокого разрешения (Hitachi Tabletop Microscope TM3030Plus), оснащенного приставкой Bruker Silicon Drift Detector (SDD) для проведения анализа методом энергодисперсионной спектроскопии (EDXS). С помощью настольного напылителя DSR-1 производства компании «Nanostructured Coatings Co.» подготовленные образцы в специальной камере при вакуумном разряжении (около 50 мТорр) покрывались тонким (~50 Å) слоем золота. Подготовка образцов мембран

заключалась в предварительном импрегнировании в изопропанол и последующем криогенном разламывании в жидком азоте.

Газопроницаемость композиционных мембран по индивидуальным газам (в строгом порядке: N₂, O₂, затем CO₂) измеряли объемным методом при комнатной температуре. Газы подавались на мембрану под давлением до 2.0 бар, со стороны пермеата поддерживалось атмосферное давление. Предварительное вакуумирование образцов перед измерением не проводили. Площадь рабочей поверхности мембраны составляла 12.6 см². Селективные свойства мембран характеризовали величинами идеальной селективности проницаемости по паре газов CO₂/N₂.

Обсуждение результатов

В ходе работы были получены два идентичных образца композиционных мембран размером 10 × 30 см с селективным слоем на основе ПТМСП с добавлением 10 мас% ПАК-ФК. СЭМ-микрофотографии поперечных сколов композиционных мембран показали отсутствие в образцах видимого проникновения материала селективного слоя в пористую структуру подложечного слоя, а также отсутствие скопления агломератов частиц ПАК-ФК в матрице ПТМСП (рис. 1). Также с помощью фотографий стало возможным оценить толщину селективного слоя на поверхности микрофилтрационной подложки МФФК, среднее значение которого для всех исследованных образцов составило 2.0 ± 0.1 и 2.2 ± 0.1 мкм для мембран ПАН/ПТМСП + 10% ПАК-ФК (1) и ПАН/ПТМСП + 10% ПАК-ФК (2) соответственно.

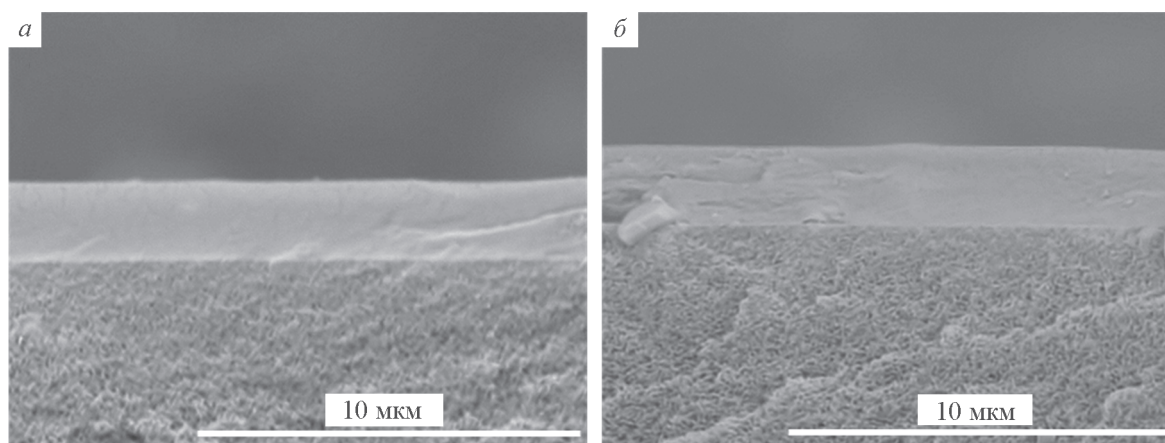


Рис. 1. Микрофотографии сканирующего электронного микроскопа поперечных слоев композиционных мембран с 10 мас% добавки ПАК-ФК.

Образец: а — ПАН/ПТМСП + 10% ПАК-ФК (1), б — ПАН/ПТМСП + 10% ПАК-ФК (2).

С целью сопоставления влияния различных типов ПАК на стабилизацию газотранспортных свойств тонких слоев на основе ПТМСП мы сравнили данные по изменению во времени производительности мембран по диоксиду углерода и идеальной селективности разделения для пар газов диоксид углерода/азот для композиционных мембран (рис. 2, 3), полученных на основе ПТМСП (толщина селективного слоя 2.8 мкм) и ПТМСП с содержанием частиц ПАК-ФК (данная работа) и ПАК-11 (толщина селективного слоя 2.1 мкм) [8]. Оба образца композиционных мембран с селективным слоем на основе ПТМСП + 10% ПАК-ФК демонстрировали исходную производительность по диоксиду углерода на уровне $40.4 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, значения аналогичного показателя для композиционных мембран на основе ПТМСП и ПТМСП + 10% ПАК-11 составляли 42.4 и $52.5 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ соответственно.

Все образцы композиционных мембран демонстрируют снижение транспортных характеристик во времени, при этом наибольшее падение наблюдается на начальном этапе (рис. 2). Так, в течение первых 1000 ч с момента создания мембран происходит снижение производительности по диоксиду углерода на 50–55% для двух образцов ПТМСП + 10% ПАК-ФК, 60% для ПТМСП и 88% для ПТМСП + 10% ПАК-11. Стабилизация транспортных характеристик композиционных мембран, полученных в рамках данной работы, наблюдается на уровне $8\text{--}9 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ по прошествии порядка 5000 ч с момента получения мембран. Важно отметить, что производительность

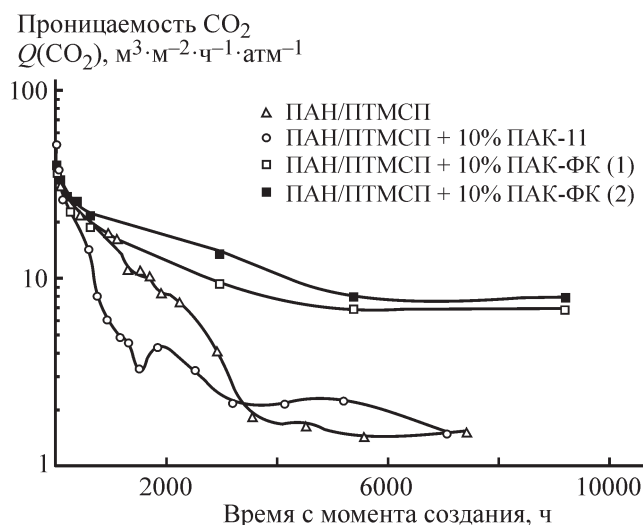


Рис. 2. Зависимость проницаемости CO_2 от времени с момента создания композиционных мембран на основе поли[1-триметилсилил-1-пропин]а и наполнителей семейства пористых ароматических каркасов.



Рис. 3. Зависимость идеальной селективности по паре газов CO_2/N_2 от времени жизни композиционных мембран на основе поли[1-триметилсилил-1-пропин]а и наполнителей семейства пористых ароматических каркасов.

мембран ПТМСП + 10% ПАК-ФК стабилизируется на более высоком уровне по сравнению с ранее исследованными мембранами. Постепенное увеличение значений идеальной селективности разделения для пар газов диоксид углерода/азот при падении производительности по всем газам для ранее исследованных образцов свидетельствовало о продолжении процесса уплотнения полимерной матрицы, уменьшении доли свободного объема и количества адсорбционных центров, отрицательно влияющих на скорость газопереноса в стеклообразных полимерах. Снижение идеальной селективности спустя 5000 ч с момента создания для образцов ПТМСП и ПТМСП + 10% ПАК-11 скорее всего свидетельствовало об образовании дефектов на поверхности селективного слоя и начале его разрушения вследствие многократного зажима образца в ячейке при проведении каждого измерения газопроницаемости, что и стало причиной для приостановления дальнейшего периодического измерения данных образцов.

Следует отметить, что изменение газотранспортных свойств всех тонкослойных композиционных мембран независимо от толщины слоя ПТМСП может быть описано в терминах релаксации неравновесного свободного объема. Снижение газопроницаемости обычно сопровождается увеличением идеальной селективности газа, что соответствует классическому процессу уплотнения полимерной матрицы. Кроме того, релаксация избыточной доли свободного объема в стеклообразных полимерах может рассматриваться

как «диффузия» элементов свободного объема из материала к ее поверхности. В связи с этим в литературе было предложено использовать второй закон Фика при анализе процесса релаксации, например, в тонких сплошных мембранах на основе полисульфона, полиимида Matrimid® 5218 или поли[2,6-диметил-1,4-фениленоксид]а [24]. В результате для ряда стеклообразных полимеров было показано, что коэффициент газопроницаемости, зависящий прямо пропорционально от свободного объема (FFV), может быть представлен как функция одного параметра — нормированного на квадрат толщины селективного слоя времени старения t/l^2 , имеющего единицу измерения обратного коэффициента диффузии [$\text{с} \cdot \text{см}^{-2}$] [24].

Все образцы композиционных мембран демонстрируют общую тенденцию изменения коэффициентов газопроницаемости по диоксиду углерода (рис. 4) в течение первых 650 ч с момента создания, что позволяет сделать предположение о схожести процессов релаксации цепей ПТМСП. Различие в транспортных характеристиках образцов со смешанной матрицей ПТМСП с ПАК-ФК проявляется по прошествии 650 ч, при этом образцы с селективным слоем на основе ПТМСП и ПТМСП + 10% ПАК-11 продолжают сохранять общую тенденцию большей потери газотранспортных характеристик с течением времени. Данные результаты могут быть объяснены с точки зрения различия в пористости двух наполнителей. Так, в частности, площади поверхности ПАК-11 и ПАК-ФК, оцененные методом низкотемпературной адсорбции азота, различаются более чем

в 3 раза — 240 и 770 $\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ соответственно. Таким образом, можно сделать заключение, что частицы ПАК не позволяют предотвратить сегментальную подвижность на начальном этапе релаксации, но в случае с наполнителем ПАК-ФК, более развитая пористая структура которого позволяет минимизировать дальнейшую релаксацию стеклообразного полимера, становится возможным стабилизировать газотранспортные свойства мембранного материала в долгосрочной перспективе.

Выводы

Впервые показано, что введение наночастиц пористых ароматических каркасов, полученных в ходе одностадийного синтеза по реакции Фриделя–Крафтса, позволяет замедлить процесс релаксации макроцепей в тонком селективном слое (2.0–2.2 мкм) стеклообразного полимера поли[1-триметилсилил-1-пропин]а. Значения производительности по диоксиду углерода снижаются в первые 5000 ч до уровня 8–9 $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, что составляет 17–20% от начальных значений, и далее практически не изменяются в течение 9200 ч с момента получения мембран. Изученные ранее аналогичные наночастицы ПАК-11, полученные в ходе двустадийного синтеза по реакции Сузуки, показали меньшую эффективность, так как производительность по диоксиду углерода спустя 7100 ч составляла 1.5 $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ (2.9% от начальных значений). Таким образом, предложенный подход позволяет не только упростить синтез и одновременно увеличить пористость получаемых частиц ПАК (внутренняя поверхность 770 $\text{м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$), но и достигнуть большей эффективности в стабилизации газотранспортных характеристик тонких селективных слоев на основе стеклообразных полимеров.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В. Н. Кривовой за помощь в проведение характеризации газотранспортных свойств композиционных мембран, центру коллективного пользования «Новые нефтехимические процессы, полимерные композиты и адгезивы» за предоставленное оборудование для проведения исследований.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00738).

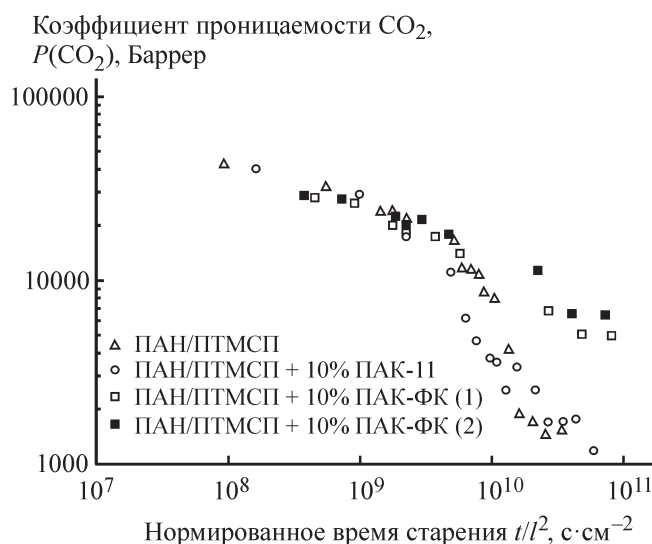


Рис. 4. Зависимость коэффициента проницаемости CO_2 от нормированного времени старения.

Конфликт интересов

Соавтор А. Л. Максимов заявляет, что он является главным редактором Журнала прикладной химии, у остальных соавторов конфликт интересов отсутствует.

Информация об авторах

Бахтин Данила Станиславович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8619-8326>

Куликов Леонид Андреевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7665-5404>

Максимов Антон Львович, д.х.н., чл.-корр. РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9297-4950>

Волков Алексей Владимирович, д.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4524-4597>

Список литературы

- [1] Volgin I. V., Andreeva M. V., Larin S. V., Didenko A. L., Vaganov G. V., Borisov I. L., Volkov A. V., Klushin L. I., Lyulin S. V. Transport properties of thermoplastic R-BAPB polyimide: molecular dynamics simulations and experiment // *Polymers*. 2019. V. 11. N 1. ID. 1775. <https://doi.org/10.3390/polym11111775>
- [2] Trubyanov M. M., Drozdov P. N., Atlaskin A. A., Battalov S. V., Puzanov E. S., Vorotyntsev A. V., Vorotyntsev I. V. Unsteady-state membrane gas separation by novel pulsed retentate mode for improved membrane module performance: Modelling and experimental verification // *J. Membr. Sci.* 2017. V. 530. P. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.01.064>
- [3] Апелъ П. Ю., Бобрешова О. В., Волков А. В., Волков В. В., Никоненко В. В., Стенина И. А., Филиппов А. Н., Ямпольский Ю. П., Ярославцев А. Б. Перспективы развития мембранной науки // *Мембраны и мембран. технологии*. 2019. Т. 9. № 2. С. 59–80. <https://doi.org/10.1134/S2218117219020020>
- [4] Bermeshev M. V., Chapala P. P. Addition polymerization of functionalized norbornenes as a powerful tool for assembling molecular moieties of new polymers with versatile properties // *Prog. Polym. Sci.* 2018 V. 84. P. 1–46. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.06.003>
- [5] Zhang Y., Li B., Ma S. Addition polymerization of functionalized norbornenes as a powerful tool for assembling molecular moieties of new polymers with versatile properties // *Chem. Commun.* 2014. V. 50. N 62. P. 8507–8510. <https://doi.org/10.1039/C4CC04012K>
- [6] Wang L., Jia J., Faheem M., Tian Y., Zhu G. Fabrication of triazine-based Porous Aromatic Framework (PAF) membrane with structural flexibility for gas mixtures separation // *J. Ind. Eng. Chem.* 2018. V. 67. P. 373–379. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.07.011>
- [7] Ben T., Ren H., Ma S., Cao D., Lan J., Jing X., Qiu S. Targeted synthesis of a porous aromatic framework with high stability and exceptionally high surface area // *Angew. Chem.* 2009. V. 121. N 50. P. 9621–9624. <https://doi.org/10.1002/anie.200904637>
- [8] Bakhtin D. S., Kulikov L. A., Legkov S. A., Khotimskiy V. S., Levin I. S., Borisov I. L., Maksimov A. L., Volkov V. V., Karakhanov E. A., Volkov A. V. Crosslinking and stabilization of nanoparticle filled poly(1-trimethylsilyl-1-propyne) nanocomposite membranes for gas separations // *J. Membr. Sci.* 2018. V. 554. P. 211–220. <https://doi.org/10.1002/app.30320>
- [9] Бахтин Д. С., Куликов Л. А., Бондаренко Г. Н., Василевский В. П., Максимов А. Л., Волков А. В. Стабилизация газотранспортных свойств композиционных мембран с тонким разделительным слоем на основе ПТМСР добавкой наночастиц пористых ароматических каркасов и одновременной сшивкой полимера // *Мембраны и мембран. технологии*. 2018. Т. 8. № 4. С. 1–8. <https://doi.org/10.1134/S221811721804003X>
- [10] Cheng Y., Ying Y., Japip S., Jiang S. D., Chung T. S., Zhang S., Zhao D. Advanced porous materials in mixed matrix membranes // *Adv. Mater.* 2018. V. 30. N 47. ID. 1802401. <https://doi.org/10.1002/adma.201802401>
- [11] Yushkin A., Grekhov A., Matson S., Bermeshev M., Khotimsky V., Finkelstein E., Budd P. M., Volkov V., Vlugt T. J. H., Volkov A. Study of glassy polymers fractional accessible volume (FAV) by extended method of hydrostatic weighing: Effect of porous structure on liquid transport // *React. Funct. Polym.* 2015. V. 86. P. 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.06.010>
- [12] Volkov A. V., Bakhtin D. S., Kulikov L. A., Terenina M. V., Golubev G. S., Bondarenko G. N., Legkov S. A., Shandryuk G. A., Volkov V. V., Khotimskiy V. S., Belogorlov A. A., Maksimov A. L., Karakhanov E. A. Stabilization of gas transport properties of PTMSP with porous aromatic framework: Effect of annealing // *J. Membr. Sci.* 2016. V. 517. P. 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.06.033>
- [13] Dorkenoo K. D., Pfromm P. H. Accelerated physical aging of thin poly[1-(trimethylsilyl)-1-propyne] films

- // *Macromolecules*. 2000. V. 33. N 10. P. 3747–3751.
<https://doi.org/10.1021/ma9921145>
- [14] *Tasaka S., Inagaki N., Igawa M.* Effect of annealing on structure and permeability of poly [(1-trimethylsilyl)-1-propyne] // *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* 1991. V. 29. N. 6. P. 691–694.
<https://doi.org/10.1002/polb.1991.090290607>
- [15] *Morlière N., Vallières C., Perrin L., Roizard D.* Impact of thermal ageing on sorption and diffusion properties of PTMSP // *J. Membr. Sci.* 2006. V. 270. N 1. P. 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.06.048>
- [16] *Olivieri L., Ligi S., De Angelis M.G., Cucca G., Pettinau A.* Effect of graphene and graphene oxide nanoplatelets on the gas permselectivity and aging behavior of poly(trimethylsilyl propyne) (PTMSP) // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2015. V. 54. N 44. P. 11199–11211. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03251>
- [17] *Lau C. H., Nguyen P. T., Hill M. R., Thornton A. W., Konstas K., Doherty C. M., Mulder R. J., Bourgeois L., Liu A. C. Y., Sprouster D. J., Sullivan J. P., Bastow T. J., Hill A. J., Gin D. L., Noble R. D.* Ending aging in super glassy polymer membranes // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2014. V. 53. P. 5322–5326.
<https://doi.org/10.1002/anie.201402234>
- [18] *Lau C. H., Konstas K., Doherty C. M., Kanehashi S., Ozcelik B., Kentish S. E., Hill M. R.* Tailoring physical aging in super glassy polymers with functionalized porous aromatic frameworks for CO₂ capture // *Chem. Mater.* 2015. V. 27. N. 13. P. 4756–4762.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b01537>
- [19] *Kelman S. D., Rowe B. W., Bielawski C. W., Pas S. J., Hill A. J., Paul D. R., Freeman B. D.* Crosslinking poly[1-(trimethylsilyl)-1-propyne] and its effect on physical stability // *J. Membr. Sci.* 2008. V. 320. N 1. P. 123–134.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.03.064>
- [20] *Lau C. H., Konstas K., Thornton A. W., Liu A. C., Mudie S., Kennedy D. F., Hill M. R.* Gas-separation membranes loaded with porous aromatic frameworks that improve with age // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2015. V. 54 N 9. P. 2669–2673.
<https://doi.org/10.1002/anie.201410684>
- [21] *Li L., Ren H., Yuan Y., Yu G., Zhu G.* Construction and adsorption properties of porous aromatic frameworks via AlCl₃-triggered coupling polymerization // *J. Mater. Chem. A*. 2014. V. 2. N 29. P. 11091–11098.
<https://doi.org/10.1039/C4TA01252F>
- [22] *Luo Q., Zhao C., Liu G., Ren H. A.* A porous aromatic framework constructed from benzene rings has a high adsorption capacity for perfluorooctane sulfonate // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. N 1. ID. 20311.
<https://doi.org/10.1038/srep20311>
- [23] *Куликов Л. А., Бахтин Д. С., Полевая В. Г., Бальнин А. В., Максимов А. Л., Волков А. В.* Синтез новых пористых ароматических каркасов по реакции Фриделя–Крафтса для стабилизации газотранспортных свойств высокопроницаемых стеклообразных полимеров // *ЖПХ*. 2019. Т. 92. № 2. С. 168–176.
<https://doi.org/10.1134/S0044461819020051>
[*Kulikov L. A., Bakhtin D. S., Poleyaya V. G., Balynin A. V., Maksimov A. L., Volkov A. V.* Friedel–Crafts synthesis of new porous aromatic frameworks for stabilizing gas transport properties of highly permeable glassy polymers // *Russ. J. Appl. Chem.* 2019. V. 92. N 2. P. 199–207.
<https://doi.org/10.1134/s1070427219020058>]
- [24] *Dibrov G. A., Volkov V. V., Vasilevsky V. P., Shutova A. A., Bazhenov S. D., Khotimsky V. S., Runstraat A., Goetheer E. L. V., Volkov A. V.* Robust high-permeance PTMSP composite membranes for CO₂ membrane gas desorption at elevated temperatures and pressures // *J. Membr. Sci.* 2014. V. 470. P. 439–450.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.07.056>