

Оригинальная статья

УДК 665.939.5, 66.081.6-278

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.590-602>**Использование аминных и полиэфираминных отвердителей в компаундах для торцевой герметизации половолоконных мембранных модулей****Н.П. Безруков[✉], В.П. Василевский, Д.Н. Матвеев, Ю.И. Матвеева, А.В. Власова, Т.С. Анохина, И.Л. Борисов, С.В. Антонов***Институт нефтехимического синтеза имени А.В. Топчиева Российской академии наук, Москва, Россия*[✉]bezrukov@ips.ac.ru**Аннотация**

Методом сканирующей электронной микроскопии исследована геометрия и структура половолоконной мембраны, полученной из полисульфона методом сухо-мокрой инверсии фаз. Рассмотрена возможность использования различных аминных отвердителей и бифункционального полиэфирамина в композициях герметизирующих составов. Проведена герметизация полученных половолоконных мембран в модельные мембранные модули эпоксидными герметизирующими составами, которые отличаются отвердителями. По наличию дефектов, возникающих при подаче газов под давлением в месте контакта половолоконная мембрана–эпоксидный состав, оценена практическая применимость этих материалов. Использование полиэфирамина в качестве аминного отвердителя эпоксидных систем не приводит к образованию дефектов в месте контакта половолоконных мембран и эпоксидного состава при подаче давления вплоть до 0.5 атм и позволяет достичь высоких значений селективности по паре газов He/N_2 для получаемых модельных мембранных модулей.

Ключевые слова: половолоконные мембраны, мембранный модуль, герметизация, полисульфон, эпоксидные составы, селективность, газоразделение.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-29-00708, <https://rscf.ru/project/25-29-00708/>).

Для цитирования: Безруков Н.П., Василевский В.П., Матвеев Д.Н., Матвеева Ю.И., Власова А.В., Анохина Т.С., Борисов И.Л., Антонов С.В. Использование аминных и полиэфираминных отвердителей в компаундах для торцевой герметизации половолоконных мембранных модулей // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2025. Т. 167, кн. 4. С. 590–602. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.590-602>.

Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.590-602>

The use of amine and polyetheramine hardeners in end sealing compounds for hollow fiber membrane modules

**N.P. Bezrukov[✉], V.P. Vasilevsky, D.N. Matveev, Yu.I. Matveeva, A.V. Vlasova,
T.S. Anokhina, I.L. Borisov, S.V. Antonov**

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

[✉]bezrukov@ips.ac.ru

Abstract

The geometry and structure of hollow fiber membranes fabricated from polysulfone by the dry-wet phase inversion method were studied with the help of scanning electron microscopy. Various amine hardeners and difunctional polyetheramines were analyzed as potential components of sealing compounds. The fabricated hollow fiber membranes were sealed in model membrane modules using epoxy sealing compounds with different hardeners. The applicability of these materials was assessed based on the presence of defects when gases were supplied under pressure at the contact point between the membrane and the epoxy. The use of polyetheramine as an amine hardener for the epoxy systems caused no defects at the point of contact between the hollow fiber membranes and the epoxy compound, even when pressures up to 0.5 atm were applied. This ensures high selectivity values for the He/N₂ gas pair in the resulting membrane modules.

Keywords: hollow fiber membranes, membrane module, sealing, polysulfone, epoxy compounds, selectivity, gas separation

Acknowledgments. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 25-29-00708, <https://rscf.ru/project/25-29-00708/>).

For citation: Bezrukov N.P., Vasilevsky V.P., Matveev D.N., Matveeva Yu.I., Vlasova A.V., Anokhina T.S., Borisov I.L., Antonov S.V. The use of amine and polyetheramine hardeners in end sealing compounds for hollow fiber membrane modules. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2025, vol. 167, no. 4, pp. 590–602. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.590-602>. (In Russian)

Введение

Половолоконные мембраны, впервые разработанные в 1960-х годах для процесса обратного осмоса, широко используются в настоящее время для фильтрационного разделения жидких и газовых сред [1, 2]. Одним из ключевых преимуществ половолоконных мембран по сравнению с плоскими или трубчатыми конфигурациями является высокая плотность упаковки полых волокон в модуле, которая может достигать 10000 м²/м³ и более [1]. Это обеспечивает высокую удельную производительность единицы объема аппарата.

Герметизация торцов мембранных модулей на основе половолоконных мембран является одной из важнейших операций при их изготовлении. Для этих целей используют различные герметизирующие составы, призванные обеспечить фиксацию мембранного материала

внутри корпуса мембранного модуля. К таким составам предъявляются следующие требования: непроницаемость для газов и жидкостей герметизируемых изделий, смачивание материалов мембраны и корпуса модуля, адгезия к материалу корпуса и мембраны, низкая усадка при отверждении, механическая прочность, теплостойкость, определенная эластичность и др. [3, 4].

В качестве основы современных полимерных герметизирующих составов используют эпоксидные смолы, полиэферы, полиуретаны, силиконовые каучуки [5], акриловые герметики (чаще всего полиметилметакрилаты), термопласты (полиолефины, полиэтилены [6], сополимеры полиолефинов, полиамиды, полистиролы, поливинилхлориды), полисульфиды [7]. Герметики также могут содержать теплопроводящие наполнители для улучшения теплоотвода при отверждении, пластификаторы, отвердители, модификаторы и др. [8]. Чаще всего для герметизации полых волокон применяют эпоксидные смолы. Они изначально находятся в форме низковязкой жидкости, которая способна затекать в межволоконное пространство и в поверхностные поры волокна с образованием прочной связи после отверждения материала герметика, происходящего под действием тех или иных веществ (отвердителей) и, зачастую, температуры. Этот тип герметизирующих составов обладает высокими механическими, адгезионными, электроизоляционными характеристиками, небольшой усадкой и способностью отверждаться практически без выделения летучих веществ [9].

В эпоксидных системах используют ангидридные, аминные, амидные отвердители и др., причем чаще выбирают ангидридные и аминные. Ангидридные отвердители, такие как малеиновый ангидрид [10], изометилтетрагидрофталевый ангидрид [11], метилэндиковый ангидрид [12] и др. относятся к так называемым отвердителям «горячего» отверждения. Их преимуществом по сравнению с аминными отвердителями является универсальность (возможность отверждать практически любую эпоксидную смолу), меньшая токсичность, большая жизнеспособность эпоксиангидридных систем при комнатной температуре. Однако отверждение эпоксидных систем этим типом соединений часто является весьма длительным процессом, который протекает при повышенных температурах. С целью сокращения времени отверждения используют ускорители, такие как кислоты [13] и основания [14] Льюиса, аминфенолы и их соли [15] и др., среди которых наиболее широко применяют третичные алифатические амины [16]. Однако они проявляют токсичные свойства. Другой важной группой отвердителей являются вещества, содержащие первичные и/или вторичные аминогруппы. К ним можно отнести алифатические (диэтилететрамин, триэтилететрамин (ТЭТА) [17], полиэтиленполиамин (ПЭПА) [18] и др.), ароматические (4,4'-диаминодифенилсульфон [19], 4,4'-диаминодифенилметан [20] и др.), алициклические (изофорондиамин (ИФДА) [21] и др.), гетероциклические амины (*N*-(аминоэтил)пиперазин [22]) и др. Представители этой группы отвердителей также являются токсичными. Алифатические амины характеризуются наибольшей реакционной способностью, обеспечивающей проведение отверждения при комнатной температуре.

Отверждение эпоксидных смол – это часто экзотермический процесс. При больших объемах заливки и с учетом низкой теплопроводности эпоксидной смолы разогрев реакционной массы может быть значительным, что способно привести к большим внутренним напряжениям, которые, в свою очередь, могут повлечь растрескивание заготовки и повреждение половолоконных мембран. После отверждения эпоксидного связующего производят отрез части отвержденного герметика с формированием торца мембранного модуля. При этой операции может происходить повреждение части полых волокон вследствие слишком вы-

сокой жесткости отвержденного материала. К другим недостаткам эпоксидных компаундов можно отнести низкие ударные характеристики и недостаточную трещиностойкость [23]. Одним из решений этих проблем может быть замедление отверждения или повышение теплопроводности системы. Для этих целей могут быть использованы полиэфирамины, позволяющие проводить отверждение при комнатной температуре и обладающие меньшей токсичностью и реакционной способностью по сравнению со стандартно используемыми алифатическими аминными отвердителями.

Таким образом, задача разработки заливочного компаунда на основе эпоксидных систем для герметизации мембранных модулей сводится к модификации эпоксидных связующих, в том числе, за счет подбора отверждающей системы. Цель работы состоит в разработке компаундов на основе эпоксидных систем для герметизации половолоконных мембран из полисульфона (ПСФ) в мембранном модуле. ПСФ является одним из наиболее часто используемых коммерческих мембранных материалов, что обусловлено его низкой стоимостью, высокой термической и механической стабильностью, а также высокой химической стойкостью [24].

1. Материалы и методы

1.1. Материалы. В работе использовали эпоксидную смолу ЭД-22 (АО «Химэкс Лимитед», Россия). Для отверждения применяли аминные отвердители: ТЭТА, ПЭПА, Л-20М, ИФДА, а также полиэфирамин Д-230 (ООО «СУПЕРПЛАСТ», Россия). Соотношение между эпоксидной смолой и отвердителями соответствовало стехиометрии отверждения. Показатели вязкости при 25 °С всех представленных выше компонентов согласно данным производителя составляют 11 и 7 Па·с для ЭД-22 и Л-20М, 14, 250, 15 и 12 мПа·с для ТЭТА, ПЭПА, ИФДА и Д-230 соответственно.

Для изготовления половолоконных мембран использовали ПСФ в гранулах марки Ultrason® S 6010 (BASF, Германия) и 99 %-ный (EP) *N*-метил-2-пирролидон (Acros Organics, Бельгия) в качестве основного полимера и растворителя соответственно.

1.2. Получение половолоконных мембран. Перед формованием половолоконной мембраны полимерный раствор фильтровали под давлением азота 1.8–2.0 бар через сетку из нержавеющей стали с ячейкой 4–5 мкм. После процедуры фильтрации раствор полимера охлаждали до комнатной температуры и дегазировали в течение ночи под вакуумом.

Половолоконные мембраны из ПСФ получали на исследовательской установке [25] методом сухо-мокрой инверсии фаз в варианте «свободного прядения», при котором сформованное полое волокно под действием силы тяжести поступает в приемную ванну с водой. В качестве внутреннего осадителя выступала дистиллированная вода. Для получения полых волокон использовали кольцевую формовочную фильеру с внешним и внутренним диаметрами 0.5 и 0.3 мм соответственно. В качестве исходных параметров формования были выбраны давление над раствором 200 кПа, расход внутреннего осадителя 0.45 мл/мин, воздушный зазор 0.5 м. После формования образцы половолоконных мембран помещали в воду на 5 дней, после чего в течение 24 ч сушили на воздухе при комнатной температуре и относительной влажности 60 %.

1.3. Методы исследования мембран. Геометрию и структуру полученных половолоконных мембран из ПСФ исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Hitachi Tabletop TM 3030 Plus с высокочувствительным низковакуумным детектором вторичных электронов (Hitachi High Technologies Corporation, Япония).

Сколы образцов получали в атмосфере жидкого азота, затем на них наносили слой золота при помощи напылителя DSR-1 (NSC, Иран), толщина которого составляла 50–100 Å.

1.4. Герметизация половолоконных мембранных модулей. Для приготовления эпоксидных систем все компоненты перед смешением выдерживали в вакуумном шкафу в течение 1 ч при 50 °С для удаления воды и других летучих примесей. Смешение компонентов проводили при комнатной температуре в течение 10 мин на магнитной мешалке IKA C-MAG HS 7 (IKA, Германия), после чего все смеси дегазировали в вакуумном шкафу в течение 10 мин при 25 °С. Отверждение проводили в течение 24 ч при 25 °С, что соответствует рекомендациям по использованию указанных отвердителей.

Оценку качества герметизации места контакта герметизирующего состава и половолоконных мембран проводили путем изготовления модельных мембранных модулей, состоящих из 10 половолоконных мембран на основе ПСФ (рис. 1, а), при использовании различных эпоксидных составов. Полученные модули присоединяли к системе подачи газа (азот) через цанговый соединитель трубок и погружали в стакан с водой таким образом, чтобы место контакта компаунда и половолоконных мембран оказалось под водой. Качество герметизации оценивали при давлениях 0.1–0.5 бар по наличию и количеству пузырей газа, появляющихся в воде (рис. 1, б).

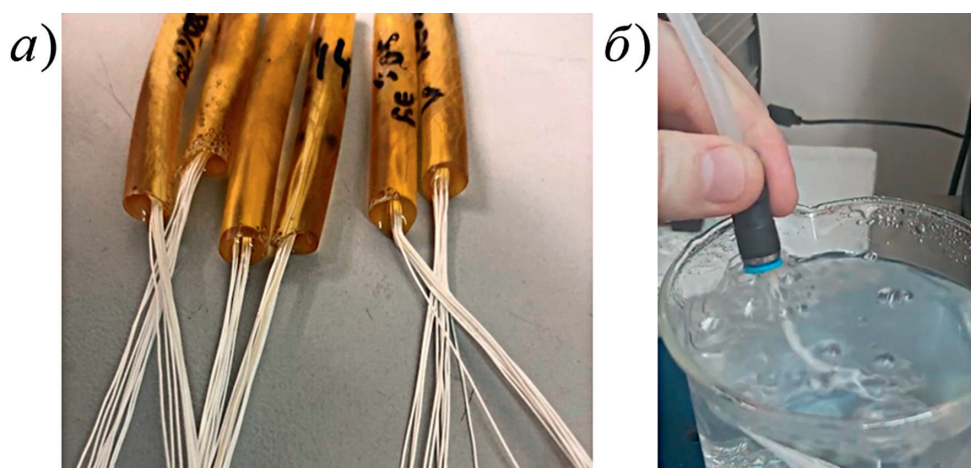


Рис. 1. Фотографии модельных мембранных модулей, используемых для оценки качества герметизации (а), и испытания совместимости эпоксидных составов и полых волокон из ПСФ (б)

Fig. 1. Photographs of the model membrane modules used to assess the quality of sealing (a) and to test the compatibility of epoxy compounds and hollow fibers from PSF (b)

1.5. Оценка газотранспортных свойств мембранных модулей. Для мембранных модулей, прошедших проверку на совместимость эпоксидного состава и половолоконных мембран, проводили оценку газотранспортных свойств волюметрическим методом с использованием индивидуальных газов (N_2 , He) при температуре 25 °С и давлении до 6.5 бар.

Расчет проницаемости проводили по уравнению 1

$$\frac{P}{l} = \frac{Q}{p \times S}, \quad (1)$$

где P – коэффициент проницаемости по индивидуальному газу, (л×м)/(м²×ч×бар), l – толщина разделяющего слоя мембраны, м, Q – объемный расход газа, который прошел через мембрану, м³/ч, p – трансмембранное давление, бар, S – площадь поверхности мембраны, м².

Идеальную селективность α по паре газов He/N_2 рассчитывали по уравнению 2

$$\alpha = \frac{\left(\frac{P}{l}\right)_1}{\left(\frac{P}{l}\right)_2} = \frac{P_1}{P_2}. \quad (2)$$

1.6. Статистическая обработка результатов. При определении проницаемости и идеальной селективности проводили пять независимых испытаний. Результаты представляли как среднее значение и стандартное отклонение, рассчитанные с помощью программного пакета Excel (Microsoft Corp., США).

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Половолоконные мембраны из ПСФ. Микрофотография изготовленной из ПСФ половолоконной мембраны, полученная с помощью СЭМ, представлена на рис. 2. Внешний диаметр мембраны составляет 300 мкм, а толщина стенки – 80 мкм.

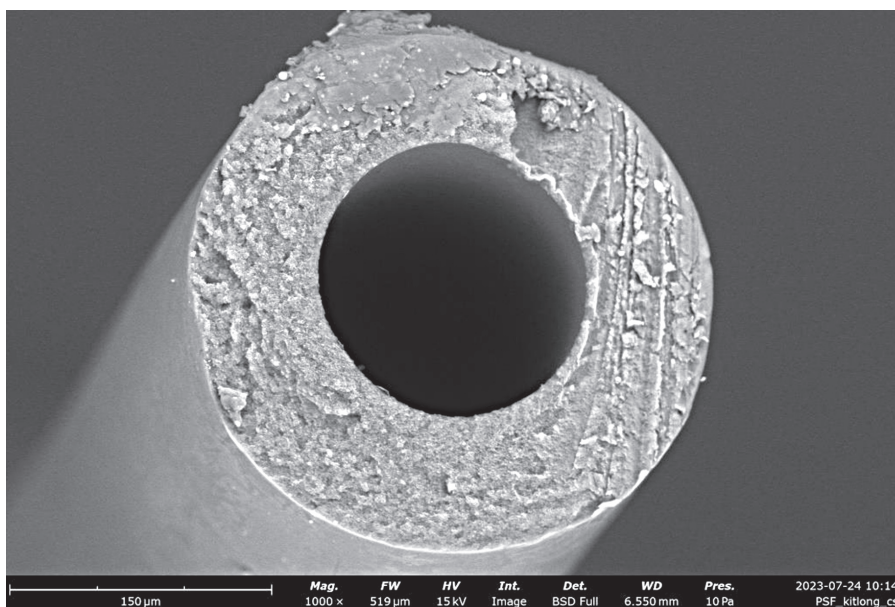


Рис. 2. СЭМ микрофотография исследуемой половолоконной мембраны из ПСФ

Fig. 2. SEM micrograph of the investigated hollow fiber membrane from PSF

2.2. Оценка совместимости эпоксидных систем и половолоконных мембран из ПСФ. Герметизация с использованием исследуемых составов на основе эпоксидной смолы ЭД-22 и различных аминных отвердителей приводит к повреждению половолоконных мембран, о чем свидетельствует наличие большого количества пузырей в месте контакта половолоконных мембран и эпоксидных составов (табл. 1). Только в случае применения в качестве отвердителя полиэфирамина Д-230 при подаче давления до 0.5 атм внутрь модельного мембранного модуля дефекты отсутствуют. Можно предположить, что меньшая активность полиэфирамина в реакции отверждения по сравнению с аминными отвердителями и, соответственно, более долгий период времени до желатинизации обеспечивает возможность устранения части дефектов. Таким образом, возможна дальнейшая оценка селективности половолоконных мембранных модулей, в которых используется герметизирующий состав на основе эпоксидной смолы ЭД-22 и отвердителя Д-230.

Табл. 1. Результаты оценки дефектов в месте контакта эпоксидных составов и полволоконных мембран

Table 1. Assessment of defects at the point of contact between the epoxy compounds and the hollow fiber membranes

Эпоксидный состав	Давление, атм	Наличие дефекта
ЭД-22 + ТЭТА	0.1	+
ЭД-22 + ПЭПА	0.1	+
ЭД-22 + ИФДА	0.1	+
ЭД-22 + Л-20М	0.1	+
ЭД-22 + Д-230	0.1	
	0.5	—

На рис. 3 представлена СЭМ микрофотография полволоконных мембран из ПСФ в эпоксидной системе ЭД-22 + Д-230, подтверждающая совместимость полволоконной мембраны и этого герметизирующего состава. Создание модельных полволоконных модулей с герметизацией на основе эпоксидной смолы ЭД-22 и аминных отвердителей ТЭТА, ПЭПА, ИФДА, Л-20М требует дальнейшей модификации эпоксидных составов.

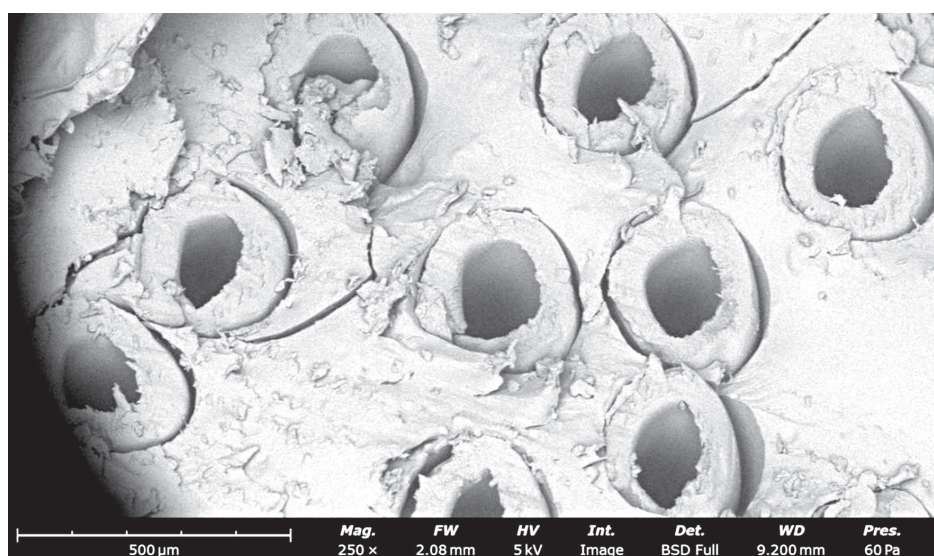


Рис. 3. СЭМ микрофотография полволоконных мембран из ПСФ в эпоксидной системе ЭД-22 + Д-230

Fig. 3. SEM micrograph of the hollow fiber membranes from PSF in the ED-22 + D-230 epoxy system

2.3. Оценка газотранспортных свойств полволоконных модулей. Оценку газотранспортных свойств проводили для полволоконных модулей с герметизацией с использованием состава из эпоксидной смолы ЭД-22 и аминного отвердителя Д-230. В табл. 2 представлены газотранспортные свойства полученного модуля на основе полых волокон из ПСФ и эпоксидного состава ЭД-22 + Д-230. Для сравнения использован полволоконный модуль с герметизацией эпоксидной системой ЭД-22 + ТЭТА, который имеет дефекты, выявленные в ходе предварительных испытаний. Близкие значения идеальных селективностей по паре газов He/N_2 для полученных газоразделительных мембранных модулей с

герметизацией системой ЭД-22 + Д-230 (49) и материала ПСФ (52) [26]) свидетельствуют об отсутствии дефектов у полученного мембранного модуля с рассматриваемой системой герметизации. Отсутствие селективности по паре газов He/N_2 для модуля с герметизацией системой ЭД-22 + ТЭТА подтверждают результаты предварительных испытаний и указывают на наличие дефектов на месте стыка эпоксидного состава с полым волокном из ПСФ.

Табл. 2. Газотранспортные свойства модулей из полых волокон на основе ПСФ и различных герметизирующих составов

Table 2. Gas transport properties of the hollow fiber modules based on PSF and various sealing compounds

Эпоксидный состав	Проницаемость P/l , л/(м ² ×ч×бар)		Идеальная селективность α
	N_2	He	He/N_2
ЭД-22 + ТЭТА	335 ± 30	535 ± 35	1.6 ± 0.3
ЭД-22 + Д-230	5.0 ± 0.4	245 ± 20	49 ± 2

Заключение

В работе исследована возможность использования различных эпоксиаминных составов в качестве герметизирующих при создании модельных половолоконных мембранных модулей на основе половолоконной мембраны из полисульфона. Показано, что модули, для которых в качестве отвердителя выступал полиэфирамин, характеризуются отсутствием дефектов и наибольшей идеальной селективностью по паре газов He/N_2 . Разработанные модули с половолоконными мембранами из ПСФ могут применяться не только для выделения гелия, но и для извлечения водорода из газовых смесей, а также для получения технического азота из атмосферного воздуха.

Таким образом, для создания бездефектных модельных половолоконных мембранных модулей на основе половолоконной мембраны из полисульфона при использовании эпоксиаминных систем можно использовать аминные отвердители, обладающие меньшей реакционной способностью по сравнению со стандартными отвердителями (такими как ТЭТА, ПЭПА, ИФДА). Дальнейшее развитие исследований может быть сфокусировано на использовании активных разбавителей, уменьшающих скорость протекания реакции отверждения эпоксидных смол.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Литература

1. Lau H.S., Lau S.K., Soh L.S., Hong S.U., Gok X.Y., Yi S., Yong W.F. State-of-the-art organic-and inorganic-based hollow fiber membranes in liquid and gas applications: Looking back and beyond // *Membranes*. 2022. V. 12, No 5. Art. 539. <https://doi.org/10.3390/membranes12050539>.
2. Lau H.S., Yong W.F. Recent progress and prospects of polymeric hollow fiber membranes for gas application, water vapor separation and particulate matter removal // *J. Mater. Chem. A*. 2021. V. 9, No 47. P. 26454–26497. <https://doi.org/10.1039/D1TA07093B>.
3. Skog T.G., Johansen S., Hägg M.-B. Method to prepare lab-sized hollow fiber modules for gas separation testing // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014. V. 53, No 23. P. 9841–9848. <https://doi.org/10.1021/ie4041059>.

4. Мандрик М.А., Садковский И.А., Антонов С.В. Способ изготовления половолоконного модуля // Патент РФ на изобретение № 2706302. 2019. Бюл. ФИПС № 32.
5. Anzai T., Kido T. Artificial lung and method for manufacturing artificial lung // Patent US 10758658. 2020.
6. Iyer G., Doh C. Blended potting resins and use thereof // Patent US 10981117. 2021.
7. Khakimullin Y.N., Kurkin A.I., Valeev R.R., Petlin I.A. New alternative to liquid thiokol in commercial sealants // Polym. Sci., Ser. D. 2017. V. 10, No 1. P. 1–3. <https://doi.org/10.1134/S1995421217010130>.
8. Bezrukov N.P., Antonov S.V., Smirnova N.M., Vlasova A.V., Melekhina V.Y., Makarova V.V., Tarasov V.N., Ermakov I.O. Adhesive compositions based on epoxy anhydride systems modified with poly alkenyl succinic anhydrides // Polym. Sci., Ser. D. 2025. V. 18, No 1. P. 6–15. <https://doi.org/10.1134/S1995421224701715>.
9. Bezrukov N.P., Smirnova N.M., Vlasova A.V., Melekhina V.Y., Makarova V.V., Antonov S.V. Application of polymers containing tertiary amino groups as curing accelerators and modifiers of epoxy-anhydride systems // Polym. Eng. Sci. 2025. V. 65, No 5. P. 2370–2380. <https://doi.org/10.1002/pen.27155>.
10. Lv J., Zhu C., Qiu H., Zhang J., Gu C., Feng J. Robust icephobic epoxy coating using maleic anhydride as a crosslinking agent // Progr. Org. Coat. 2020. V. 142. Art. 105561. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105561>.
11. Kychkin A., Anan'eva E., Kychkin A., Tuisov A. Research of influence carbon nano tubes on elastic-strength properties of epoxy resin // Procedia Struct. Integr. 2020. V. 30. P. 59–63. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.036>.
12. Fedoseev M.S., Derzhavinskaya L.F., Tsvetkov R.V., Lysenko S.N., Oshchepkova T.E., Borisova I.A. Enhancement of the heat resistance of polymers and composites by curing of epoxy resins with methylendic anhydride under the action of imidazoles // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92, No 9. P. 1190–1199. <https://doi.org/10.1134/S1070427219090027>.
13. Petrova A.P., Isaev A.Y., Smirnov O.I., Emel'yanov A.S. Main components composing domestic epoxy glues (review). Part I // Polym. Sci., Ser. D. 2023. V. 16, No 4. P. 799–809. <https://doi.org/10.1134/S1995421223040251>.
14. Chen S., Xu Y., Wang Z. Thermal analysis of epoxy resin matrix and carbon fiber epoxy laminate cured by imidazole // J. Therm. Anal. Calorim. 2022. V. 147, No 23. P. 13611–13623. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11584-1>.
15. Atyasova E.V., Samoilenko V.V., Blaznov A.N., Firsov V.V., Sakoshev Z.G. Optimizing an EDI epoxy binder using the Pareto method // Polym. Sci., Ser. D. 2022. V. 15, No 3. P. 394–399. <https://doi.org/10.1134/S1995421222030066>.
16. Li J., Aung H.H., Du B. Curing regime-modulating insulation performance of anhydride-cured epoxy resin: A review // Molecules. 2023. V. 28, No 2. Art. 547. <https://doi.org/10.3390/molecules28020547>.
17. Wang Z., Gnanasekar P., Nair S.S., Yi S., Yan N. Curing behavior and thermomechanical performance of bioepoxy resin synthesized from vanillyl alcohol: Effects of the curing agent // Polymers. 2021. V. 13, No 17. Art. 2891. <https://doi.org/10.3390/polym13172891>.
18. Osipova V.A., Gorbunova T.I., Barabanov M.A., Mekhaev A.V., Vichuzhanin D.I., Smirnov S.V., Pestov A.V. New epoxy resin polymerization catalysts based on *N,N*-dimethylaminoalkylamides of perfluoroalkanoic acids // Russ. J. Appl. Chem. 2022. V. 95, No 1. P. 53–58. <https://doi.org/10.1134/S1070427222010074>.
19. Ignatenko V.Y., Kostyuk A.V., Kostina J.V., Bakhtin D.S., Makarova V.V., Antonov S.V., Ilyin S.O. Heavy crude oil asphaltenes as a nanofiller for epoxy resin // Polym. Eng. Sci. 2020. V. 60, No 7. P. 1530–1545. <https://doi.org/10.1002/pen.25399>.
20. Li L., Cai Z. Flame-retardant performance of transparent and tensile-strength-enhanced epoxy resins // Polymers. 2020. V. 12, No 2. Art. 317. <https://doi.org/10.3390/polym12020317>.

21. Tkachuk A.I., Zagora A.G., Terekhov I.V., Mukhametov R.R. Isophorone diamine – a curing agent for epoxy resins: Production, application, prospects. A review // *Polym. Sci., Ser. D*. 2020. V. 15, No 2. P. 171–176. <https://doi.org/10.1134/S1995421222020289>.
22. Mochalova E.N., Galikhanov M.F., Mikryukova Y.K. Electret and strength properties of polymeric materials based on epoxy oligomer and amine curing agents // *Russ. J. Appl. Chem.* 2019. V. 92, No 11. P. 1492–1498. <https://doi.org/10.1134/S1070427219110041>.
23. Zhang J., Zhang Z., Huang R., Tan L. Advances in toughening modification methods for epoxy resins: A comprehensive review // *Polymers*. 2025. V. 17, No 9. Art. 1288. <https://doi.org/10.3390/polym17091288>.
24. Matveev D., Anokhina T., Raeva A., Borisov I., Grushevenko E., Khashirova S., Volkov A., Bazhenov S., Volkov V., Maksimov A. High-performance porous supports based on hydroxyl-terminated polysulfone and CO₂/CO-selective composite membranes // *Polymers*. 2024. V. 16, No 24. Art. 3453. <https://doi.org/10.3390/polym16243453>.
25. Matveev D.N., Kutuzov K.A., Vasilevsky V.P. Effect of draw ratio on the morphology of polysulfone hollow fiber membranes // *Membr. Membr. Technol.* 2020. V. 2, No 6. P. 351–356. <https://doi.org/10.1134/S2517751620060074>.
26. Aitken C.L., Koros W.J., Paul D.R. Effect of structural symmetry on gas transport properties of polysulfones // *Macromolecules*. 1992. V. 25, No 13, P. 3424–3434. <https://doi.org/10.1021/ma00039a018>.

References

1. Lau H.S., Lau S.K., Soh L.S., Hong S.U., Gok X.Y., Yi S., Yong W.F. State-of-the-art organic-and inorganic-based hollow fiber membranes in liquid and gas applications: Looking back and beyond. *Membranes*, 2022, vol. 12, no. 5, art. 539. <https://doi.org/10.3390/membranes12050539>.
2. Lau H.S., Yong W.F. Recent progress and prospects of polymeric hollow fiber membranes for gas application, water vapor separation and particulate matter removal. *J. Mater. Chem. A*, 2021, vol. 9, no. 47, pp. 26454–26497. <https://doi.org/10.1039/D1TA07093B>.
3. Skog T.G., Johansen S., Hägg M.-B. Method to prepare lab-sized hollow fiber modules for gas separation testing. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2014, vol. 53, no. 23, pp. 9841–9848. <https://doi.org/10.1021/ie4041059>.
4. Mandrik M.A., Sadkovskii I.A., Antonov S.V. Method for manufacturing a hollow fiber module. Patent RF no. 2706302. *Byull. FIPS*, 2015, no. 32. (In Russian)
5. Anzai T., Kido T. Artificial lung and method for manufacturing artificial lung. Patent US 10758658. 2020.
6. Iyer G., Doh C. Blended potting resins and use thereof. Patent US 10981117. 2021.
7. Khakimullin Y.N., Kurkin A.I., Valeev R.R., Petlin I.A. New alternative to liquid thiokol in commercial sealants. *Polym. Sci., Ser. D*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1134/S1995421217010130>.
8. Bezrukov N.P., Antonov S.V., Smirnova N.M., Vlasova A.V., Melekhina V.Y., Makarova V.V., Tarasov V.N., Ermakov I.O. Adhesive compositions based on epoxy anhydride systems modified with poly alkenyl succinic anhydrides. *Polym. Sci., Ser. D*, 2025, vol. 18, no. 1, pp. 6–15. <https://doi.org/10.1134/S1995421224701715>.
9. Bezrukov N.P., Smirnova N.M., Vlasova A.V., Melekhina V.Y., Makarova V.V., Antonov S.V. Application of polymers containing tertiary amino groups as curing accelerators and modifiers of epoxy-anhydride systems. *Polym. Eng. Sci.*, 2025, vol. 65, no. 5, pp. 2370–2380. <https://doi.org/10.1002/pen.27155>.
10. Lv J., Zhu C., Qiu H., Zhang J., Gu C., Feng J. Robust icephobic epoxy coating using maleic anhydride as a crosslinking agent. *Progr. Org. Coat.*, 2020, vol. 142, art. 105561. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105561>.

11. Kychkin A., Anan'eva E., Kychkin A., Tuisov A. Research of influence carbon nano tubes on elastic-strength properties of epoxy resin. *Procedia Struct. Integr.*, 2020, vol. 30, pp. 59–63. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.036>.
12. Fedoseev M.S., Derzhavinskaya L.F., Tsvetkov R.V., Lysenko S.N., Oshchepkova T.E., Borisova I.A. Enhancement of the heat resistance of polymers and composites by curing of epoxy resins with methylenedic anhydride under the action of imidazoles. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2019, vol. 92, no. 9, pp. 1190–1199. <https://doi.org/10.1134/S1070427219090027>.
13. Petrova A.P., Isaev A.Y., Smirnov O.I., Emel'yanov A.S. Main components composing domestic epoxy glues (review). Part I. *Polym. Sci., Ser. D*, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 799–809. <https://doi.org/10.1134/S1995421223040251>.
14. Chen S., Xu Y., Wang Z. Thermal analysis of epoxy resin matrix and carbon fiber epoxy laminate cured by imidazole. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2022, vol. 147, no. 23, pp. 13611–13623. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11584-1>.
15. Atyasova E.V., Samoilenko V.V., Blaznov A.N., Firsov V.V., Sakoshev Z.G. Optimizing an EDI epoxy binder using the Pareto method. *Polym. Sci., Ser. D*, 2022, vol. 15, no. 3, pp. 394–399. <https://doi.org/10.1134/S1995421222030066>.
16. Li J., Aung H.H., Du B. Curing regime-modulating insulation performance of anhydride-cured epoxy resin: A review. *Molecules*, 2023, vol. 28, no. 2, art. 547. <https://doi.org/10.3390/molecules28020547>.
17. Wang Z., Gnanasekar P., Nair S.S., Yi S., Yan N. Curing behavior and thermomechanical performance of bioepoxy resin synthesized from vanillyl alcohol: Effects of the curing agent. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 17, art. 2891. <https://doi.org/10.3390/polym13172891>.
18. Osipova V.A., Gorbunova T.I., Barabanov M.A., Mekhaev A.V., Vichuzhanin D.I., Smirnov S.V., Pestov A.V. New epoxy resin polymerization catalysts based on *N,N*-dimethylaminoalkylamides of perfluoroalkanoic acids. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2022, vol. 95, no. 1, pp. 53–58. <https://doi.org/10.1134/S1070427222010074>.
19. Ignatenko V.Y., Kostyuk A.V., Kostina J.V., Bakhtin D.S., Makarova V.V., Antonov S.V., Ilyin S.O. Heavy crude oil asphaltene as a nanofiller for epoxy resin. *Polym. Eng. Sci.*, 2020, vol. 60, no. 7, pp. 1530–1545. <https://doi.org/10.1002/pen.25399>.
20. Li L., Cai Z. Flame-retardant performance of transparent and tensile-strength-enhanced epoxy resins. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 2, art. 317. <https://doi.org/10.3390/polym12020317>.
21. Tkachuk A.I., Zagora A.G., Terekhov I.V., Mukhametov R.R. Isophorone diamine – a curing agent for epoxy resins: Production, application, prospects. A review. *Polym. Sci., Ser. D*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 171–176. <https://doi.org/10.1134/S1995421222020289>.
22. Mochalova E.N., Galikhanov M.F., Mikryukova Y.K. Electret and strength properties of polymeric materials based on epoxy oligomer and amine curing agents. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2019, vol. 92, no. 11, pp. 1492–1498. <https://doi.org/10.1134/S1070427219110041>.
23. Zhang J., Zhang Z., Huang R., Tan L. Advances in toughening modification methods for epoxy resins: A comprehensive review. *Polymers*, 2025, vol. 17, no. 9, art. 1288. <https://doi.org/10.3390/polym17091288>.
24. Matveev D., Anokhina T., Raeva A., Borisov I., Grushevenko E., Khashirova S., Volkov A., Bazhenov S., Volkov V., Maksimov A. High-performance porous supports based on hydroxyl-terminated polysulfone and CO₂/CO-selective composite membranes. *Polymers*, 2024, vol. 16, no. 24, art. 3453. <https://doi.org/10.3390/polym16243453>.
25. Matveev D.N., Kutuzov K.A., Vasilevsky V.P. Effect of draw ratio on the morphology of polysulfone hollow fiber membranes. *Membr. Membr. Technol.*, 2020, vol. 2, no. 6, pp. 351–356. <https://doi.org/10.1134/S2517751620060074>.
26. Aitken C.L., Koros W.J., Paul D.R. Effect of structural symmetry on gas transport properties of polysulfones. *Macromolecules*, 1992, vol. 25, no. 13, pp. 3424–3434. <https://doi.org/10.1021/ma00039a018>.

Информация об авторах

Николай Петрович Безруков, младший научный сотрудник лаборатории полимерных композитов и адгезивов (№ 27), Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: bezrukov@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9869-3834>

Владимир Павлович Василевский, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории полимерных мембран, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: vasilevskii@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3837-6930>

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>

Юлия Ивановна Матвеева, младший научный сотрудник лаборатории извлечения и утилизации диоксида углерода, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: ymatveeva@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5408-5823>

Анна Владимировна Власова, научный сотрудник лаборатории полимерных композитов и адгезивов (№ 27), Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: kostyuk@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5690-6555>

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>

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>

Сергей Вячеславович Антонов, кандидат химических наук, заведующий лабораторией полимерных композитов и адгезивов (№ 27), Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: antonov@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8966-7906>

Author Information

Nikolay P. Bezrukov, Junior Researcher, Laboratory of Polymer Composites and Adhesives (No. 27), A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: bezrukov@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9869-3834>

Vladimir P. Vasilevsky, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Laboratory of Polymeric Membranes, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: vasilevskii@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3837-6930>

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

E-mail: dmateveev@ips.ac.ru

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

Yulia I. Matveeva, Junior Researcher, Laboratory of Carbon Dioxide Extraction and Utilization, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: [ymatveeva@ips.ac.ru](mailto:yumatveeva@ips.ac.ru)

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

Anna V. Vlasova, Cand. Sci. (Chemistry), Researcher, Laboratory of Polymer Composites and Adhesives (No. 27), A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: kostyuk@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5690-6555>

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>

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>

Sergei V. Antonov, Cand. Sci. (Chemistry), Head of Laboratory of Polymer Composites and Adhesives (No. 27), A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: antonov@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8966-7906>

Поступила в редакцию 18.06.2025

Принята к публикации 11.08.2025

Received June 18, 2025

Accepted August 11, 2025