

Краткие сообщения

УДК 631.86+631.811.6

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-304-309>

EDN: СВAXRU



Новые протонпроводящие материалы на основе трековой полиэтилентерефталатной мембраны, модифицированной N,P-содержащей ионной жидкостью

Ю.Ю. Титова*, А.Н. Чеснокова**✉, А.С. Суханов**, Н.А. Иванов**

*Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

**Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время одной из актуальных задач является разработка новых мембранных материалов для альтернативных, экологически чистых источников энергии – водородных топливных элементов. В данной статье представлены результаты разработки подходов к созданию протонпроводящих мембран из промышленной полиэтилентерефталатной (ПЭТФ) диэлектрической трековой пленки. В качестве модифицирующего агента использовалась N,P-содержащая ионная жидкость, полимеризация которой осуществлялась непосредственно в трековых отверстиях мембраны ПЭТФ. Основой для синтеза ионной жидкости послужил новый подход к направленному синтезу фосфорорганических соединений из элементного фосфора по реакции Трофимова–Гусаровой, разработанный в Иркутском институте химии им. А.Е. Фаворского СО РАН. Характеризация N,P-содержащей ионной жидкости проведена с помощью ЯМР- и ИК-спектроскопии. Показано, что после ее нанесения на ПЭТФ мембрану результирующая композиция обладает необходимыми механическими параметрами для эксплуатации в качестве протонпроводящих мембран. Установлено, что новые протонпроводящие материалы обладают высокой протонной проводимостью, которая составляет при 353 К 77,76 мСм·см⁻¹. Полученные результаты открывают новые перспективы для применения полученных протонпроводящих мембран в технологии водородных топливных элементов и могут способствовать развитию эффективных альтернативных источников энергии.

Ключевые слова: ионная жидкость, мембрана, протонная проводимость, топливный элемент

Для цитирования: Титова Ю.Ю., Чеснокова А.Н., Суханов А.С., Иванов Н.А. Новые протонпроводящие материалы на основе трековой полиэтилентерефталатной мембраны, модифицированной N,P-содержащей ионной жидкостью // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 2. С. 304–309. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-304-309>. EDN: СВAXRU.

Brief communication

Novel proton-conducting materials based on a polyethylene terephthalate track-etched membrane modified with an N, P-containing ionic liquid

Yulia Yu. Titova*, Alexandra N. Chesnokova**✉, Alexander S. Sukhanov**, Nikolai A. Ivanov**

*A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

**Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The development of novel membrane materials for hydrogen fuel cells, a promising environmentally friendly technology, represents a relevant research task. In this work, we propose an approach to creating proton-conducting membranes from an industrial polyethylene terephthalate (PET) dielectric track-etched film. An N, P-containing ionic liquid was used as a modifying agent, whose polymerization was carried out directly in the PET membrane pores. The ionic liquid was obtained using a novel approach to the directed synthesis of organophosphorus compounds from elemental phosphorus via the Trofimov-Gusarova reaction developed at the A.E. Favorsky Institute of Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The ionic liquid properties were characterized by NMR and IR spectroscopy. The application of

the obtained N, P-containing ionic liquid onto a PET membrane was shown to yield a material exhibiting the required mechanical parameters for operation as proton-conducting membranes. The novel proton-conducting materials demonstrate a high proton conductivity of $77.76 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ at 353 K. The obtained proton-conducting membranes seem promising for application in hydrogen fuel cells, thus contributing to the development of effective alternative energy sources.

Keywords: ionic liquid, membrane, proton conductivity, fuel cell

For citation: Titova Yu.Yu., Chesnokova A.N., Sukhanov A.S., Ivanov N.A. Novel proton-conducting materials based on a polyethylene terephthalate track-etched membrane modified with an N, P-containing ionic liquid. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(2):304-309. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-304-309>. EDN: CBAXRU.

ВВЕДЕНИЕ

Двигатели внутреннего сгорания транспортных средств и традиционная энергетика являются основными загрязнителями окружающей среды [1–3]. В связи с этим развитие альтернативных источников энергии становится актуальной задачей. Одним из перспективных экологически чистых источников энергии можно назвать водородные топливные элементы (ТЭ), осуществляющие прямое преобразование химической энергии топлива в электрическую [4, 5]. Ключевой компонент таких систем – протонпроводящие мембраны, которые выполняют функции разделения электродов и обеспечивают транспорт протонов от анода к катоду [6–9]. Промышленные перфторированные мембраны являются дорогостоящими, что ограничивает широкое распространение ТЭ. Поэтому разработка альтернативных протонпроводящих материалов становится актуальной задачей.

Цель работы заключалась в разработке новых подходов к синтезу протонпроводящих мембран путем УФ-индуцированной полимеризации N,P-содержащей ионной жидкости с подвижным протоном в трековых порах мембраны из полиэтилентерефталата.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Протонпроводящая мембрана была получена пропитыванием трековой ПЭТФ пленки ионной жидкостью (ИЖ), полученной на основе 1-винил-3H-имидазола и фосфорноватистой кислоты согласно работам [1–4].

Для проведения синтеза ИЖ в эквимольных количествах при комнатной температуре смешивали 1-винил-3H-имидазол и H_3PO_2 (Sigma-Aldrich). Взаимодействие между компонентами осуществлялось в течение 30 мин, о ходе процесса судили по данным мультядерной ЯМР-спектроскопии на ядрах ^1H , ^{31}P и ^{15}N .

Далее полученную вязкую ИЖ равномерным слоем наносили на ПЭТФ пленку. Пропитанная ИЖ ПЭТФ пленка выдерживалась при УФ-излучении с длиной волны 265 нм в течение 30 мин. Затем полученные мембраны сушили при вакууме при $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ и $P = 4 \text{ мм рт. ст.}$ в течение 48 ч.

ИК-спектры записаны на инфракрасном Фурье-спектрометре Excalibur HE 3100 Varian (Varian, США). ЯМР-спектры регистрировали на ЯМР-спектрометре DPX 400 Bruker (Bruker, США).

Для определения протонной проводимости полученных образцов пленок использовали метод импедансной спектроскопии согласно исследованию [10]. Погрешность измерений ионной проводимости и

расчета энергии активации проводимости была равна погрешностям прибора и составляла 5–7%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Придание протонпроводящих свойств промышленно производимым трековым полимерным пленкам путем их допирования ИЖ является одним из новых подходов для получения мембранных материалов для топливных элементов [11]. В качестве полимерной матрицы в данной работе использовали пленку из ПЭТФ, обладающую хорошими механическими характеристиками и широко применяемую в промышленности в качестве микро-, ультра-, микрофильтрационных мембран [12], в установках обратного осмоса [13, 14], а также в качестве мембран для получения наноструктур [15, 16] и в других областях.

1-Винилимидазол и фосфорноватистая кислота служили исходными компонентами для получения N,P-содержащей ИЖ. Методика синтеза ИЖ основана на подходе, развиваемом в Иркутском институте химии им. А.Е. Фаворского СО РАН, для реализации направленного синтеза фосфорорганических соединений непосредственно из элементного фосфора (реакция Трофимова–Гусаровой) [17–20] по следующей схеме:

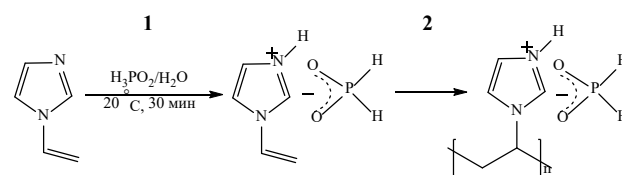
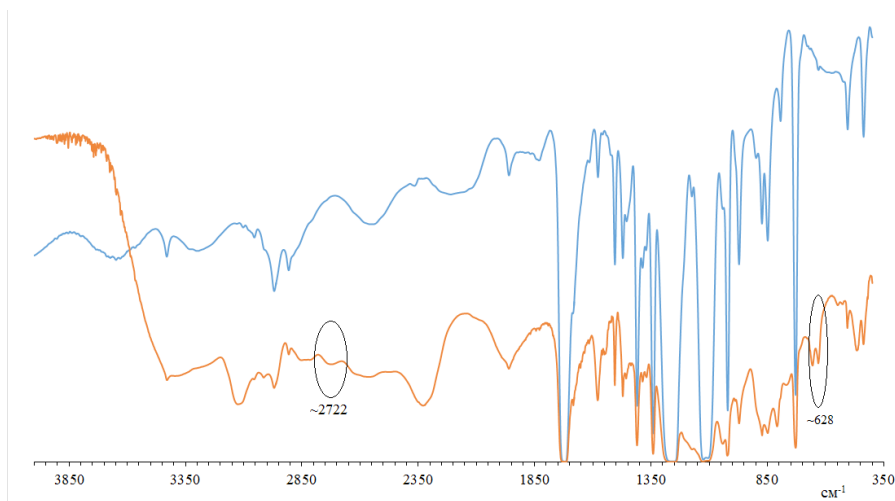


Схема синтеза N,P-содержащей ионной жидкости

Взаимодействие между компонентами проводили 30 мин, о завершении процесса судили по данным ЯМР-спектроскопии на ядрах ^1H , ^{31}P и ^{15}N . Так, в ^1H ЯМР-спектре наблюдалось появление новых сигналов в области 1–3 м.д., который соответствует продукту полимеризации винильного фрагмента, а в ^{15}N ЯМР-спектре – новый сигнал в области 200 м.д., который соответствует фрагменту N-H^+ . ^{31}P ЯМР-спектр свидетельствует о формировании H_2PO_2^- -фрагмента. Увеличение вязкости результирующего раствора обусловлено способностью 1-винил-3H-имидазола даже в таких мягких условиях к олиго- и/или полимеризации. Для ускорения процессов полимеризации осуществляли обработку мембраны, пропитанной ИЖ, с помощью УФ-излучения [21].



ИК-спектры полиэтилентерефталатной пленки (синий) и полиэтилентерефталатной пленки со слоем гипофосфита 1-винил-3H-имидазолия (красный)

IR spectra of a polyethylene terephthalate film (blue) and a polyethylene terephthalate film with a layer of 1-vinyl-3H-imidazolium hypophosphite (red)

Удельная электропроводность и энергия активации протонного переноса трековых ПЭТФ мембран, допированных N,P-содержащей ионной жидкостью, и коммерческих перфторированных мембран МФ-4СК

Specific conductivity and activation energy of proton transfer of track PET membrane doped with N,P-containing ionic liquid and commercial perfluorinated MF-4SK membrane

Температура, К	Экспериментальные мембраны		МФ-4СК	
	Протонная проводимость, мСм·см ⁻¹	Энергия активации, кДж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	Протонная проводимость, мСм·см ⁻¹	Энергия активации, кДж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹
303	29,16	18,37	13,9	18,63
313	25,92		22,3	
323	33,33		24,8	
333	46,66		27,9	
343	51,84		37,2	
353	77,76		44,6	

Доказательством существования на поверхности ПЭТФ пленки слоя гипофосфита 1-винил-3H-имидазолия служат результаты ИК-спектроскопии. Появление новых сигналов в области ~2722 и ~630 см⁻¹ соответствует образованию новой связи N-H и PO₂-фрагменту соответственно (рисунок)¹ [22].

Установлено, что мембраны с ИЖ на основе 1-винил-3H-имидазол и H₃PO₂ характеризуются высокой протонной проводимостью (таблица). Протонная проводимость экспериментальных образцов при 303 К в 2 раза выше по сравнению с коммерческой перфторированной мембраной МФ-4СК при близких значениях энергии активации протонного переноса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый подход к синтезу протонпроводящих мембран, синтезированных на основе фосфорсодержащей винильной ИЖ (N,P-содержащей ИЖ) с подвижным протоном, а также трековых мембран из крупнотоннажного синтетического полимера (полиэтилентерефталат). Получены образцы мембран, потенциально перспективные для дальнейшего исследования в составе твердополимерных топливных элементов. Они обладают протонной проводимостью, в 2 раза превышающей коммерческие перфторированные мембраны МФ-4СК и сравнимой с ними энергией активации протонного переноса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nieuwlaar E. Life cycle assessment and energy systems, reference module in earth systems and environmental sciences. In: Reference module in Earth systems and environmental sciences. Elsevier, 2013. P. 647–654. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.01334-8>.

2. Breeze P. The environmental impact of energy storage technologies. In: Power system energy storage technologies. Academic Press, 2018. P. 79–84. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812902-9.00009-2>.

3. Letyagina E. On Assessing the impact of au-

¹Mistry B. Handbook of spectroscopic data: chemistry – UV, IR, PMR, CNMR and Mass spectroscopy. Oxford Book Company, 2009. 250 p.

tomotive transport on the environment of urban agglomerations using the Krasnoyarsk Territory as an example // *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 68. P. 505–510. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.068>.

4. Maiti J., Kakati N., Lee S.H., Jee S.H., Viswanathan B., Yoon Y.S. Where do poly(vinyl alcohol) based membranes stand in relation to Nafion® for direct methanol fuel cell applications? // *Journal of Power Sources*. 2012. Vol. 216. P. 48–66. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.057>.

5. Dhanapal D., Xiao M., Wang S., Meng Y. A review on sulfonated polymer composite/organic-inorganic hybrid membranes to address methanol barrier issue for methanol fuel cells // *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9, no. 5. P. 668. <https://doi.org/10.3390/nano9050668>.

6. Oliveira P.N., Catarino M., Müller C.M.O., Brandão L., Tanaka P.D.A., Bertolino J.R., et al. Preparation and characterization of crosslinked PVAL membranes loaded with boehmite nanoparticles for fuel cell applications // *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. Vol. 131, no. 8. P. 40148. <https://doi.org/10.1002/app.40148>.

7. Beydaghi H., Javanbakht M., Badiei A. Cross-linked poly(vinyl alcohol)/sulfonated nanoporous silica hybrid membranes for proton exchange membrane fuel cell // *Journal of Nanostructure in Chemistry*. 2014. Vol. 4. P. 97. <https://doi.org/10.1007/s40097-014-0097-y>.

8. Gahlot S., Sharma P.P., Kulshrestha V., Jha P.K. SGO/SPES-based highly conducting polymer electrolyte membranes for fuel cell application // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2014. Vol. 6, no. 8. P. 5595–5601. <https://doi.org/10.1021/am5000504>.

9. Lebedeva O.V., Pozhidaev Y.N., Chesnokova A.N., Malakhova E.A., Raskulova T.V., Kulshrestha V., et al. Sodium p-styrene sulfonate-1-vinylimidazole copolymers for acid-base proton-exchange membranes // *Membranes and Membrane Technologies*. 2020. Vol. 2, no. 2. P. 76–84. <https://doi.org/10.1134/S2517751620020079>.

10. Чеснокова А.Н., Жамсаранжапова Т.Д., Заркачевский С.А., Кулшреста В., Скорникова С.А., Макаров С.С. [и др.]. Влияние содержания цеолита на протонную проводимость и технические характеристики мембран на основе сшитого поливинилового спирта // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2020. Т. 10. N 2. С. 360–367. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-360-367>.

11. Седых Н.М., Сухов Б.Г., Чеснокова А.Н., Максименко С.Д., Иванов Н.А., Паперный В.Л. [и др.]. Дизайн новых протонпроводящих материалов // *Материалы Юбилейной международной молодежной конференции по люминесценции и лазерной физике, посвященной 50-летию первой школы по люминесценции в Иркутске (г. Иркутск, 01–06 июня 2019 г.)*. Иркутск: ИГУ, 2019. С. 85–86.

12. Hanot H., Ferain E. Industrial applications of ion track technology // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2009. Vol. 267, no. 6. P. 1019–1022. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.02.011>.

13. Курахмедов А.Е., Иванов И.А., Александренко В.В., Козловский А.А., Архангельский Е., Здоровец М.В. Асимметричные трековые мембраны, получаемые методом двустороннего облучения на циклотроне ДЦ-60 // *Мембраны и мембранные технологии*. 2017. Т. 7. N 3. С. 155–164. <https://doi.org/10.1134/S2218117217030051>.

14. Manickam S.S., McCutcheon J.R. Model thin film composite membranes for forward osmosis: demonstrating the inaccuracy of existing structural parameter models // *Journal of Membrane Science*. 2015. Vol. 483. P. 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.01.017>.

15. Waheed A., Forsyth D., Watts A., Saad A.F., Mitchell G.R., Farmer M., et al. The track nanotechnology // *Radiation Measurements*. 2009. Vol. 44, no. 9-10. P. 1109–1113. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.10.055>.

16. Chakarvarti S.K. Track-etch membranes enabled nano-/microtechnology: a review // *Radiation Measurements*. 2009. Vol. 44, no. 9-10. P. 1085–1092. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.10.028>.

17. Трофимов Б.А., Рахматулина Т.Н., Гусарова Н.К., Малышева С.Ф. Системы элементный фосфор-сильные основания в синтезе фосфорорганических соединений // *Успехи химии*. 1991. Т. 60. N 12. С. 2619–2632.

18. Гусарова Н.К., Михалева А.И., Шмидт Е.Ю., Малькина А.Г. Химия ацетилена: новые главы. Новосибирск: Наука, 2013. 368 с.

19. Малышева С.Ф., Белогорлова Н.А., Куимов В.А., Литвинцев Ю.И., Гоголева Н.М., Сухов Б.Г. [и др.]. Синтез новых протонпроводящих ионных жидкостей из 1-Н- и 1-алкилимидазолов и гипофосфористой кислоты // *Бутлеровские сообщения*. 2017. Т. 52. N 10. С. 50–55.

20. Литвинцев Ю.И., Белогорлова Н.А., Малышева С.Ф. Новый подход к N,P-содержащим ионным жидкостям // *Современные проблемы химической науки и фармации: сб. материалов VI Всероссийской конференции с международным участием (г. Чебоксары, 23–24 ноября 2017 г.)*. Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 2017. С. 66.

21. Hawker C., Schlüter D.A., Sakamoto J. Synthesis of polymers: new structures and methods. Wiley-VCH, 2012. 1184 p.

22. Шагидуллин Р.Р., Чернова А.В., Виноградова В.С., Мухаметов Ф.С. Атлас ИК-спектров фосфорорганических соединений. М.: Наука, 1990. 343 с.

REFERENCES

1. Nieuwlaar E. Life cycle assessment and energy systems, reference module in earth systems and environmental sciences. In: *Reference module in Earth systems and environmental sciences*. Elsevier; 2013, p. 647-654. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.01334-8>.

2. Breeze P. The environmental impact of energy storage technologies. In: *Power system energy storage technologies*. Academic Press; 2018, p. 79-84. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812902-9.00009-2>.

3. Letyagina E. On Assessing the impact of automotive transport on the environment of urban agglomer-

ations using the Krasnoyarsk Territory as an example. *Transportation Research Procedia*. 2023;68:505-510. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.068>.

4. Maiti J., Kakati N., Lee S.H., Jee S.H., Viswanathan B., Yoon Y.S. Where do poly(vinyl alcohol) based membranes stand in relation to Nafion® for direct methanol fuel cell applications? *Journal of Power Sources*. 2012;216:48-66. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.057>.

5. Dhanapal D., Xiao M., Wang S., Meng Y. A review on sulfonated polymer composite/organic-inorganic hybrid membranes to address methanol barrier issue for methanol fuel cells. *Nanomaterials*. 2019;9(5):668. <https://doi.org/10.3390/nano9050668>.

6. Oliveira P.N., Catarino M., Müller C.M.O., Brandão L., Tanaka P.D.A., Bertolino J.R., et al. Preparation and characterization of crosslinked PVAL membranes loaded with boehmite nanoparticles for fuel cell applications. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014;131(8):40148. <https://doi.org/10.1002/app.40148>.

7. Beydaghi H., Javanbakht M., Badiei A. Cross-linked poly(vinyl alcohol)/sulfonated nanoporous silica hybrid membranes for proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Nanostructure in Chemistry*. 2014;4:97. <https://doi.org/10.1007/s40097-014-0097-y>.

8. Gahlot S., Sharma P.P., Kulshrestha V., Jha P.K. SGO/SPES-based highly conducting polymer electrolyte membranes for fuel cell application. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2014;6(8):5595-5601. <https://doi.org/10.1021/am5000504>.

9. Lebedeva O.V., Pozhidaev Y.N., Chesnokova A.N., Malakhova E.A., Raskulova T.V., Kulshrestha V., et al. Sodium p-styrene sulfonate-1-vinylimidazole copolymers for acid-base proton-exchange membranes. *Membranes and Membrane Technologies*. 2020;2(2):76-84. <https://doi.org/10.1134/S2517751620020079>.

10. Chesnokov A.N., Zhamsaranzhapova T.D., Zarkarchevskiy S.A., Kulshrestha V., Skornikova S.A., Markarov S.S., et al. Effect of zeolite content on proton conductivity and technical characteristics of the membranes based on crosslinked polyvinyl alcohol. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(2):360-367. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-360-367>.

11. Sedykh N.M., Sukhov B.G., Chesnokova A.N., Maksimenko S.D., Ivanov N.A., Papernyi V.L., et al. Design of new proton-conducting materials. In: *Materialy Yubileinoi mezhdunarodnoi molodezhnoi konferentsii po lyuminesentsii i lazernoi fizike, posvyashchennoi 50-letiyu pervoi shkoly po lyuminesentsii v Irkutske = Materials of the Anniversary International Youth Conference on Luminescence and Laser Physics, dedicated to the 50th anniversary of the first luminescence school in Irkutsk*. 01-06 June 2019, Irkutsk. Irkutsk: IGU; 2019, p. 85-86. (In Russian).

12. Hanot H., Ferain E. Industrial applications of ion track technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2009;267(6):1019-1022. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.02.011>.

13. Kurakhmedov A.E., Ivanov I.A., Aleksandrenko V.V., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V., Arkhangel'skiy E. Asymmetrical track-etched membranes prepared by double-sided irradiation on the DC-60 cyclotron. *Membrany i membrannye tekhnologii = Petroleum Chemistry*. 2017;7(3):155-164. (In Russian). <https://doi.org/10.1134/S2218117217030051>.

14. Manickam S.S., McCutcheon J.R. Model thin film composite membranes for forward osmosis: demonstrating the inaccuracy of existing structural parameter models. *Journal of Membrane Science*. 2015;483:70-74. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.01.017>.

15. Waheed A., Forsyth D., Watts A., Saad A.F., Mitchell G.R., Farmer M., et al. The track nanotechnology. *Radiation Measurements*. 2009;44(9-10):1109-1113. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.10.055>.

16. Chakarvarti S.K. Track-etch membranes enabled nano-/microtechnology: a review. *Radiation Measurements*. 2009;44(9-10):1085-1092. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.10.028>.

17. Trofimov B.A., Rakhmatulina T.N., Gusarova N.K., Malysheva S.F. Elemental phosphorus-strong base systems in the synthesis of organophosphorus compounds. *Uspekhi khimii = Russian Chemical Reviews*. 1991;60(12):2619-2632. (In Russian).

18. Gusarova N.K., Mikhaleva A.I., Shmidt E.Yu., Mal'kina A.G. *Chemistry of acetylene: new chapters*. Novosibirsk: Nauka; 2013. 368 p. (In Russian).

19. Malysheva S.F., Belogorlova N.A., Kuimov V.A., Litvintsev Yu.I., Gogoleva N.M., Sukhov B.G., et al. Synthesis of new proton-conducting ionic liquids from 1-H and 1-alkylimidazoles and hypophosphorous acid. *Butlerovskie soobshcheniya = Butlerov Communications*. 2017;52(10):50-55. (In Russian).

20. Litvintsev Yu.I., Belogorlova N.A., Malysheva S.F. A new approach to N,P-containing ionic liquids. In: *Sovremennye problemy khimicheskoi nauki i farmatsii: sb. materialov VI Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Modern problems of chemical science and pharmacy: Sat. materials of the All-Russian conference with international participation*. 23-24 November 2017, Cheboksary. Cheboksary: ChGU im. I.N. Ul'yanova; 2017, p. 66. (In Russian).

21. Hawker C., Schlüter D.A., Sakamoto J. *Synthesis of polymers: new structures and methods*. Wiley-VCH; 2012. 1184 p.

22. Shagidullin R.R., Chernova A.V., Vinogradova V.S., Mukhametov F.S. *Atlas of IR spectra of organophosphorus compounds*. Moscow: Nauka; 1990. 343 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Титова Юлия Юрьевна,
д.х.н., заведующая лабораторией
функциональных наноматериалов,
Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского
СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1,
Российская Федерация,
ytitova60@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0934-8930>

Чеснокова Александра Николаевна,
к.х.н., доцент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
✉chesnokova@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-0326-7224>

Суханов Александр Сергеевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
baizile@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1445-667X>

Иванов Николай Аркадьевич,
к.ф.-м.н., доцент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
ivnik@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-9066-4174>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 30.05.2023.
Одобрена после рецензирования 15.06.2023.
Принята к публикации 15.06.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yulia Yu. Titova,
Dr. Sci. (Chemistry), Head of the Laboratory
of Functional Nanomaterials,
A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry
SB RAS,
1, Favorsky St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
ytitova60@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0934-8930>

Alexandra N. Chesnokova,
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
✉chesnokova@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-0326-7224>

Alexander S. Sukhanov,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
baizile@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1445-667X>

Nikolai A. Ivanov,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics),
Associate Professor,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
ivnik@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-9066-4174>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding
the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved by all
the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 30.05.2023.
Approved after reviewing 15.06.2023.
Accepted for publication 15.06.2023.