

Краткие сообщения / Brief communication
УДК 621.352.6:547.42:547.478.2:547-32:549.67
DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-360-367>

Влияние содержания цеолита на протонную проводимость и технические характеристики мембран на основе сшитого поливинилового спирта

© А.Н. Чеснокова*, Т.Д. Жамсаранжапова*, С.А. Закарчевский*, В. Кулшреста**, С.А. Скорникова*, С.С. Макаров*, Ю.Н. Пожидаев*

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

**Научно-исследовательский институт соли и морских химических соединений, г. Бхавнагар, Индия

Резюме: Ионообменные мембраны на основе поливинилового спирта (ПВС) представляют собой перспективную группу материалов для применения в твердополимерных топливных элементах (ТПТЭ) благодаря высокой гидрофильности, способности к пленкообразованию, низкой стоимости, хорошим механическим свойствам и возможности сшивания ПВС различными химическими реагентами. В качестве сшивающих агентов, приводящих к образованию геля, используются соединения с карбоксильной или карбонильной функцией, такие как многоосновные кислоты и их ангидриды. Сшивающие реагенты могут содержать в своем составе ионогенные группы, например, сульфокислотные, индуцирующие протонную проводимость ПВС в составе мембран. В качестве допантов, улучшающих технические характеристики таких мембран, используются керамические материалы на основе оксидов алюминия, кремния, титана, олова, циркония и др., способные повысить ионную проводимость, химическую и термическую стабильность, а также механическую прочность мембран. В настоящей работе сообщается о получении новых биоразлагаемых протоннообменных мембран для ТПТЭ, полученных на основе сшитого сульфоянтарной кислотой поливинилового спирта, допированного частицами цеолита типа бета. Содержание цеолита в составе мембран варьировали в интервале от 1 до 25 %. Исследовано влияние содержания цеолита на протонную проводимость, ионообменную емкость, влагосодержание, коэффициент набухания, проницаемость по топливу (метанолу) и механические свойства мембран. Повышение содержания цеолита от 1 до 25 % приводит к увеличению ионообменной емкости мембран от 1,5 до 2,9 ммоль/г, понижению влагосодержания с 38 до 28 % и проницаемости по метанолу – от $2,27 \cdot 10^{-6}$ до $6,91 \cdot 10^{-7}$ см² с⁻¹. Изучена температурная зависимость протонной проводимости композитных мембран в диапазоне от 30 до 80 °С при относительной влажности 100 %. Наибольшее значение удельной электропроводности продемонстрировала мембрана, содержащая 25 % цеолита ВЕА, протонная проводимость которой составила 23,2 мСм·см⁻¹.

Ключевые слова: протоннообменная мембрана, поливиниловый спирт, цеолит, сульфоянтарная кислота, ионообменная ёмкость, влагосодержание, механические свойства

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00718).

Информация о статье: Дата поступления 29 января 2020 г.; дата принятия к печати 29 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

Для цитирования: Чеснокова А.Н., Жамсаранжапова Т.Д., Закарчевский С.А., Кулшреста В., Скорникова С.А., Макаров С.С., Пожидаев Ю.Н. 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>

Effect of zeolite content on proton conductivity and technical characteristics of the membranes based on crosslinked polyvinyl alcohol

Alexandra N. Chesnokova*, Tatyana D. Zhamsaranzhapova*, Sergey A. Zakarchevskiy*, Vaibhav Kulshrestha**, Svetlana A. Skornikova*, Sviatoslav S. Makarov*, Yuriy N. Pozhidaev*

* Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

** CSIR-Centre Salt & Marine Chemicals Research Institute, Bhavnagar, India

Abstract: Polyvinyl alcohol (PVA)-based ion-exchange membranes are a promising group of materials for use in solid polymer fuel cells (SPFC) due to their high hydrophilicity, film forming ability, low cost, good mechanical properties and the possibility of crosslinking PVA with various chemicals. The compounds with a carboxyl or carbonyl functional group, such as polybasic acids and their anhydrides, were used as cross-linking agents resulting in the formation of a gel. Cross-linking reagents may contain ionic groups, for example, sulfonic, inducing the proton conductivity of PVA in membranes. Ceramic materials based on the oxides of aluminum, silicon, titanium, tin, zirconium, etc. serve as dopants in order to improve the technical characteristics of such membranes, such as to increase ionic conductivity, chemical and thermal stability, as well as the mechanical strength of the membranes. In this work, we report on the preparation of new biodegradable proton exchange membranes for SPFCs based on polyvinyl alcohol crosslinked with sulfosuccinic acid and doped with beta zeolite particles. The content of zeolite in the composition of the membranes was varied from 1 to 25 %. The effect of the zeolite content on proton conductivity, ion-exchange capacity, moisture content, swelling coefficient, fuel (methanol) permeability and mechanical properties of membranes was studied. An increase in zeolite content from 1 to 25 % leads to an increase in the ion-exchange capacity of membranes from 1.5 to 2.9 mmol/g, a decrease in moisture content from 38 to 28 % and a methanol permeability from $2.27 \cdot 10^{-6}$ to $6.91 \cdot 10^{-7}$ cm² s⁻¹. The temperature dependence of the proton conductivity of composite membranes in the range from 30 to 80 °C at the relative humidity of 100 % was studied. The highest value of electrical conductivity was demonstrated by a membrane containing 25 % of BEA zeolite, whose proton conductivity was 23.2 mS·cm⁻¹.

Keywords: proton exchange membrane, polyvinyl alcohol, zeolite, sulfosuccinic acid, ion-exchange capacity, moisture content, mechanical properties

Acknowledgments: The studies were carried out with the financial support of the Russian Federal Property Fund (project No. 18-08-00718).

Information about the article: Received January 29, 2020; accepted for publication May 29, 2020; available online June 30, 2020.

For citation: Chesnokova AN, Zhamsaranzhapova TD, Zakarchevskiy SA, Kulshrestha V, Skornikova SA, Makarov SS, Pozhidaev YuN. 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>

ВВЕДЕНИЕ

Перспективы использования твердополимерных топливных элементов (ТПТЭ) связаны с высокой эффективностью преобразования энергии и отсутствием вредных выбросов [1, 2], что в большей степени определяется типом электролитной мембраны. Используемые в качестве электролита полимерные мембраны должны обладать высокой протонной проводимостью, ионообменной ёмкостью, низ-

ким коэффициентом набухания и проницаемостью для топлива, хорошей химической и механической стабильностью. Коммерческие перфторированные мембраны Nafion во многом отвечают этим требованиям, но являются дорогостоящими и имеют низкую электропроводность при пониженной влажности и высоких температурах, а также высокую проницаемость при использовании метанола в качестве топлива [2].

В последние годы предложены альтернативные нефторированные протонпроводящие мембраны, в том числе на основе поливинилового спирта (ПВС) [1, 3]. ПВС представляет собой водорастворимый, полукристаллический, полностью биоразлагаемый и нетоксичный полимер с отличными пленкообразующими свойствами [3]. Однако низкая стойкость ПВС к растворителям, недостаточная прочность и термостойкость [3, 4] не позволяют использовать его в качестве матрицы ионообменных мембран. Указанные препятствия легко устранимы в результате химического сшивания ПВС дикарбоновыми кислотами (щавелевая, яблочная, фумаровая, лимонная и др.) [1].

Различные сульфорирующие агенты, такие как концентрированная серная, сульфоглутаровая, сульфоглуконная, хлорсульфоновая, сульфоянтарная и др. кислоты, могут быть использованы для индуцирования протонпроводящих свойств ПВС [4–13]. Химическая модификация ПВС сшивающими агентами, содержащими сульфогруппы, позволяет перевести поливиниловый спирт в нерастворимый гель, обладающий протонобменной активностью. Так, мембраны на основе ПВС, сшитые сульфоянтарной кислотой [5], показали значения протонной проводимости в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-2} См·см⁻¹ и продемонстрировали отличные электрохимические характеристики. Однако мембраны ПВС/СЯК могут эффективно работать только при низкой температуре, поскольку процесс дегидратации, происходящий при температуре выше 80 °С, может вызвать проблемы с переносом протона.

В качестве протонпроводящих мембран в дегидратирующих средах, то есть при высоких температурах и пониженной относительной влажности, ряд преимуществ имеют композитные органико-неорганические мембраны [5]. Добавление неорганического материала в полимерную мембрану часто повышает химическую и механическую стабильность, улучшает поглощение воды при более высоких температурах, повышая рабочую температуру мембран [14].

Х. Бейдаги и соавторы разработали органико-неорганические композитные мембраны на основе ПВС, сшитого глутаровым альдегидом и допированного сульфированным кремнеземом. Модифицированные сульфокремнеземом композитные мембраны демонстрируют более высокое поглощение воды и протонную проводимость [15].

М.А. Наварра и соавторы исследовали влияние функционализованного кремнеземного наполнителя, имеющего концевую группу $-SO_3H$, на сшитые мембраны ПВС. Результатом введения кремнеземного наполнителя явилось повышение стабильности мембран,

уменьшение кристаллической фазы полимерной матрицы, повышение влагосодержания. Значения электропроводности мембран составили от 10^{-2} до 10^{-1} См·см⁻¹. Испытания топливных элементов с использованием разработанных композитных мембран в качестве электролитов показали уровни тока и мощности, которые сравнимы с уровнями, полученными в тех же самых рабочих условиях при использовании коммерческих мембран Nafion 117 [16].

В настоящей работе представлены результаты исследования мембран из сшитого сульфоянтарной кислотой ПВС, допированных цеолитом ВЕА, также изучено влияние содержания цеолита на физико-химические и механические свойства композитных мембран.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

10 %-й раствор ПВС готовили растворением препарата в дистиллированной воде при 90 °С в течение 6 ч при постоянном перемешивании. Цеолит бета (ВЕА) перед применением активировали 0,5 М раствором серной кислоты при температуре 70 °С в течение 4 ч. В работе использовали образец цеолита ВЕА с мольным соотношением $SiO_2/Al_2O_3 = 25$, площадью удельной поверхности – 562 м²/г, суммарным объемом пор – 0,374 см³/г, размером частиц – 0,5–1,2 мкм. Композитные мембраны ПВС/СЯК/ВЕА получали перемешиванием 10 %-го раствора ПВС с сульфоянтарной кислотой (СЯК) (масс. отношение ПВС:СЯК = 10:1) в течение 1 ч при 40 °С. К полученной смеси добавляли цеолит бета (ВЕА) (1, 3, 5, 25 % масс.) и гомогенизировали до образования однородной массы. Контрольный образец мембраны ПВС/СЯК не содержал цеолита. Мембраны формировали методом литья из раствора на полиэтилентерефталатную пленку. После выпаривания растворителя мембраны выдерживали в сушильном шкафу при 100 °С в течение 1 ч.

Присутствие в составе композитных мембран ПВС/СЯК/ВЕА каждого из трех компонентов подтверждено данными ИК-спектроскопии.

По данным термогравиметрического анализа композитные мембраны ПВС/СЯК/ВЕА термически стабильны до 200 °С.

Влагосодержание, степень набухания и ионообменную емкость мембран определяли стандартными методами по аналогии с [17].

Протонную проводимость мембран исследовали методом импедансной спектроскопии в интервале температур 30–80 °С при относительной влажности 100 на приборе Z-3000 (Елинс, Россия) в симметричных ячейках. Измерения проводили в диапазоне частот 500–5 кГц.

Механические свойства мембран изучали на универсальной испытательной машине

Shimadzu AGS-X. Образцы для испытаний готовили в форме прямоугольника размером 25×60 мм. Образцы предварительно выдерживали при 23 °С и относительной влажности 50 % в течение 24 ч. Непрерывное измерение нагрузки и удлинения образцов проводили в автоматическом режиме. Модуль упругости определяли с помощью специального программного обеспечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Модификация ПВС сульфоянтарной кислотой посредством реакции между гидроксильными группами ПВС и карбоксильными группами СЯК привела к получению нерастворимой в воде и метаноле полимерной матрицы ПВС/СЯК (рисунок). При массовом соотношении в реакционной смеси ПВС:СЯК = 10:1 удельное содержание сульфогрупп в поперечном сечении полимера составило 1,7 ммоль/г.

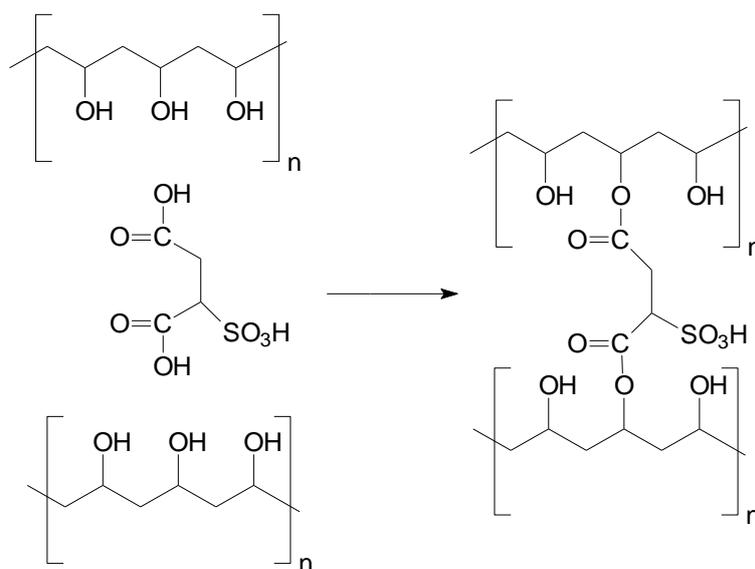
Добавку цеолита ВЕА, модифицированного раствором серной кислоты, вводили в полимерную матрицу ПВС-СЯК в виде порошка. Цеолит ВЕА представляет собой крупнопористый алюмосиликат, содержащий в качестве структурообразующего агента бромид тетраэтиламмония [18]. Структура цеолита характеризуется наличием каналов нанометровых размеров (диаметр каналов составляет от 0,56 до 0,77 нм), что обеспечивает хорошую доступность активных центров для реагентов. Высокое содержание кремнезема в составе цеолита ВЕА определяет его химическую стабильность.

Допирование полимерной матрицы ПВС/СЯК активированным серной кислотой цеолитом ВЕА привело к значительному повышению ионообменной активности мем-

бран. Ионообменная емкость мембраны ПВС/СЯК без цеолитной добавки составила 0,95 ммоль/г, что совпадает с литературными данными для подобных мембран [12]. Значения ИОЕ для мембран с содержанием ВЕА 1, 3, 5 и 25 % составили 1,5; 2,4; 2,8 и 2,9 ммоль/г соответственно.

Влагосодержание мембран играет важную роль в процессе миграции протонов, а также влияет на их механические свойства. Увеличение содержания цеолита в составе мембраны от 1 до 25 % привело к уменьшению поглощения воды с 38 до 28 %. Поглощение воды сопровождалось увеличением линейных размеров мембран на 2–5 %, а толщина увеличивалась на 13–29 % в зависимости от содержания цеолита. При этом значения коэффициента набухания понижались с увеличением содержания цеолита, что хорошо коррелируется с количеством поглощенной воды.

Одной из основных характеристик мембран является протонная проводимость. Введение цеолита ВЕА в состав мембран приводит к увеличению протонной проводимости (таблица). Наилучший результат продемонстрировала мембрана, содержащая 25 % цеолита ВЕА, протонная проводимость которой составила 23,2 мСм·см⁻¹. Повышение протонной проводимости полимерных мембран путем допирования керамическими наполнителями было отмечено в ряде исследований, например [1, 19]. Известно, что ионообменные мембраны, состоящие из дисперсной керамической фазы и непрерывной фазы ПВС, характеризуются образованием дополнительных протонных транспортных каналов вдоль границы раздела полимер–керамика [1].



Этерификация поливинилового спирта сульфоянтарной кислотой
Polyvinyl alcohol esterification with sulfosuccinic acid

Удельная электропроводность, энергия активации протонного переноса
и механические характеристики мембран

Proton conductivity, proton transfer activation energy
and mechanical characteristics of membranes

Мембрана	σ (80 °C), мСм·см ⁻¹	E_a , кДж·моль ⁻¹ ·К ⁻¹	Прочность на разрыв, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
ПВС/СЯК	10,9	23	3	290
ПВС/СЯК/ВЕА(1 %)	18,7	27	4	91
ПВС/СЯК/ВЕА(3 %)	11,9	26	5	87
ПВС/СЯК/ВЕА(5 %)	8,6	16	10	54
ПВС/СЯК/ВЕА(25 %)	23,2	26	12	52

Согласно температурной зависимости протонной проводимости энергия активации протонного переноса, E_a , рассчитана с использованием уравнения Аррениуса. По сравнению с Nafion ($E_a = 22,8$ кДж·моль⁻¹) энергия активации протонного переноса для композитных мембран ПВС/СЯК/ВЕА немного выше и имеет значения 26–27 кДж·моль⁻¹ (см. таблицу). Исключение составляет мембрана ПВС/СЯК/ВЕА (5 %), для которой $E_a = 16$ кДж·моль⁻¹, что значительно ниже, чем для Nafion. Следовательно, содержание цеолита оказывает существенное влияние как на протонную проводимость, так и на энергию активации протонного переноса.

Механические свойства мембран были исследованы при температуре 23 °С и относительной влажности 50 %. Прочность мембран ПВС/СЯК/ВЕА увеличивается с повышением содержания цеолита ВЕА. По сравнению с контрольной мембраной ПВС/СЯК при добавлении 25 % ВЕА прочность на разрыв увеличивается в 4 раза, а относительное удлинение при разрыве уменьшается более чем в 5 раз.

В дополнение к высокой протонной проводимости основным требованием для применения протонообменной мембраны в твердополимерном топливном элементе, работающем на метаноле, является высокая стойкость к проникновению топлива [20]. Обнаружено, что проницаемость по метанолу мембран

ПВС/СЯК/ВЕА уменьшается при повышении содержания ВЕА. Цеолит действует как барьер для движения метанола, который может быть вызван образованием системы каналов в структуре композитных мембран. Установлено, что проницаемость по метанолу мембраны ПВС/СЯК составляет $2,27 \cdot 10^{-6}$ см²·с⁻¹, а для образца ПВС/СЯК/ВЕА(25 %) этот показатель снижается до $6,91 \cdot 10^{-7}$ см²·с⁻¹.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены биоразлагаемые протонообменные композитные мембраны из поливинилового спирта, сульфоянтарной кислоты и цеолита ВЕА для прямого твердополимерного топливного элемента. Поливиниловый спирт сшивали с сульфоянтарной кислотой для улучшения его физико-химических свойств и введения ионогенных групп -SO₃H в структуру мембран. Увеличение содержания цеолита в мембране приводит к повышению ионообменной емкости мембран, снижению их водопоглощения и проницаемости по метанолу. Изучена температурная зависимость протонной проводимости композитных мембран в диапазоне от 30 до 80 °С при относительной влажности 100 %. Наилучший результат продемонстрировала мембрана, содержащая 25 % цеолита ВЕА, протонная проводимость которой составила $23,2$ мСм·см⁻¹.

REFERENCE

1. Maiti J, Kakati N, Lee SH, Jee SH, Viswanathan B, Yoon YS. 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>
2. 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;9:668. <https://doi.org/10.3390/na->

- no9050668
3. Wong CY, Wong WY, Loh KS, Daud WRW, Lim KL, Khalid M., et al. Development of development of poly(vinyl alcohol)-based polymers as proton exchange membranes and challenges in fuel cell application: A Review. *Polymer Reviews*. 2019;60(1):171–202. <https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1641514>
4. Ghorbel N, Kallel A, Boufi S, Molecular dynamics of poly(vinyl alcohol)/cellulose nanofibrils nanocomposites highlighted by dielectric relaxa-

tion spectroscopy. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*. 2019;124:105465. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.05.033>

5. Oliveira PN, Catarino M, Müller CMO, Brandão L, Tanaka DAP, Bertolino JR, et al. Preparation and characterization of crosslinked PVAL membranes loaded with boehmite nanoparticles for fuel cell applications. *Journal of Applied Polymer Science*. 2013;131:40148. <https://doi.org/10.1002/app.40148>

6. Tutgun MS, Sinirlioglu D, Celik SU, Bozkurt A. Investigation of nanocomposite membranes based on crosslinked poly(vinyl alcohol)-sulfosuccinic acid ester and hexagonal boron nitride. *Journal of Polymer Research*. 2015;22(4). Article number 47; 11 p. <https://doi.org/10.1007/s10965-015-0678-6>

7. Kakati N, Das G Yoon Y-S. Proton-conducting membrane based on epoxy resin-poly(vinyl alcohol)-sulfosuccinic acid blend and its nanocomposite with sulfonated multiwall carbon nanotubes for fuel-cell application. *Journal of the Korean Physical Society*. 2016;68:311–316. <https://doi.org/10.3938/jkps.68.311>

8. Tomas M., Tomáš R, Gholami F. The determination of effective diffusion coefficient from the electrochemical impedance spectra of composite poly (vinyl alcohol) membranes. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 2019;38(5):13195. <https://doi.org/10.1002/ep.13195>

9. Ajith C, Deshpande AP, Varughese S. Proton conductivity in crosslinked hydrophilic ionic polymer system: Competitive hydration, crosslink heterogeneity, and ineffective domains. *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*. 2016;54 (11):1087–1101. <https://doi.org/10.1002/polb.24012>

10. Li HQ, Liu XJ, Wang H, Yang H, Wang ZZ, He J. Proton exchange membranes with cross-linked interpenetrating network of sulfonated polyvinyl alcohol and poly(2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid): Excellent relative selectivity. *Journal of Membrane Science*. 2020;595:117511. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117511>

11. Zhou T, Li Y, Wang WW, He L, Cai L, Zeng C. Application of a novel PVA-based proton exchange membrane modified by reactive black KN-B for low-temperature fuel cells. *International Journal of Electrochemical Science*. 2019;14:8514–8531. <https://doi.org/10.20964/2019.09.16>

12. Boroglu MS, Çelik SÜ, Bozkurt A, Boz I. The synthesis and characterization of anhydrous

proton conducting membranes based on sulfonated poly(vinyl alcohol) and imidazole. *Journal of Membrane Science*. 2011;375(1-2):157–164. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.03.041>

13. Kim DS, Park HB, Rhim JW, Lee YM. Preparation and characterization of crosslinked PVA/SiO₂ hybrid membranes containing sulfonic acid groups for direct methanol fuel cell applications. *Journal of Membrane Science*. 2004;240(1):37–48. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.04.010>

14. Tripathi BP, Shahi VK. Functionalized organic-inorganic nanostructured N-p-carboxy benzyl chitosan-silica-PVA hybrid polyelectrolyte complex as proton exchange membrane for DMFC applications. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2008;112:15678–15690. <https://doi.org/10.1021/jp806337b>

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

16. Navarra MA, Fericola A, Panero S, Martinelli AA, Matic A. Effect of functionalized silica particles on cross-linked poly(vinyl alcohol) proton conducting membranes. *Journal of Applied Electrochemistry*. 2008;38(7):931–938. <https://doi.org/10.1007/s10800-008-9498-2>

17. Lebedeva OV, Pozhidaev YuN, Malakhova EA, Raskulova TV, Chesnokova AN, Kulshrestha V, et al. Sodium *p*-styrene sulfonate-1-vinylimidazole copolymers for acid-base proton-exchange membranes. *Membranes and Membrane Technologies*. 2020;2:76–84. <https://doi.org/10.1134/S2517751620020079>

18. Rodionova LI, Knyazeva EE Konnov SV, Ivanova II. Application of nanosized zeolites in petroleum chemistry: synthesis and catalytic properties. *Petroleum Chemistry*. 2019;59:455–470. <https://doi.org/10.1134/S096554419040133>

19. Marcos-Madrado A, Casado-Coterillo C, García-Cruz L, Iniesta J, Simonelli L, Sebastián V, et al. Preparation and identification of optimal synthesis conditions for a novel alkaline anion-exchange membrane. *Polymers*. 2018;10(8):913. <https://doi.org/10.3390/polym10080913>

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

Критерии авторства

Чеснокова А.Н., Жамсаранжапова Т.Д., Закарчевский С.А., Кулшреста В., Скорникова С.А., Макаров С.С., Пожидаев Ю.Н. выполнили экспериментальную работу. Авторы совместно обобщили результаты, написали рукопись, имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чеснокова Александра Николаевна,
к.х.н., заведующая лабораториями,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
* e-mail: chesnokova@istu.edu

Жамсаранжапова Татьяна Дмитриевна,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: tanyazham@mail.ru

Закарчевский Сергей Андреевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: serzh94lan@mail.ru

Кулшреста Вайбхав,
к.х.н., старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт соли
и морских химических соединений,
364002, г. Бхавнагар, Гиджубхай Бадхека
Марг, Индия,
e-mail: vaibhavphy@gmail.com

Скорникова Светлана Афанасьевна,
к.х.н., доцент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: sskornikova@mail.ru

Contribution

Alexandra N. Chesnokova, Tatyana D. Zhamsaranzhapova, Sergey A. Zakarchevskiy, Vaibhav Kulshrestha, Svetlana A. Skornikova, Sviatoslav S. Makarov, Yuriy N. Pozhidaev carried out the experimental work. The authors on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. All authors have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

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 AUTHORS

Alexandra N. Chesnokova,
Cand. Sci. (Chemistry), Head of Laboratories,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
e-mail: chesnokova@istu.edu

Tatyana D. Zhamsaranzhapova,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
e-mail: tanyazham@mail.ru

Sergey A. Zakarchevskiy,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
e-mail: serzh94lan@mail.ru

Vaibhav Kulshrestha
Ph. D (Chemistry), Senior Scientist,
CSIR-Centre Salt & Marine Chemicals
Research Institute,
Gijubhai Badheka Marg, Bhavnagar, 364002
(Guj.) India,
e-mail: vaibhavphy@gmail.com

Svetlana A. Skornikova,
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
e-mail: sskornikova@mail.ru

Макаров Святослав Станиславович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: makarov@mail.ru

Пожидаев Юрий Николаевич,
д.х.н., профессор,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: pozhid@istu.edu

Sviatoslav S. Makarov,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
e-mail: makarov@mail.ru

Yuriy N. Pozhidaev
Dr. Sc (Chemistry), Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
e-mail: pozhid@istu.edu