

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
И НАНОМАТЕРИАЛЫ

УДК 546.06

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КЕРАМИЧЕСКИХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ
И ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА, МАРГАНЦА, ЦИРКОНИЯ

© 2022 г. А. Л. Шкуратов^а *, Н. П. Шапкин^а, В. И. Разов^а, И. Г. Хальченко^а, Е. К. Папынов^а

^аДальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, 690922 Россия

*e-mail: anton_hq@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2022 г.

После доработки 31.03.2022 г.

Принята к публикации 04.04.2022 г.

Получены керамические мембраны на основе природных алюмосиликатов с использованием отожженной рисовой шелухи и солей железа, марганца, циркония. Показано, что при небольших количествах солей по сравнению с вермикулитом, цеолитом, рисовой шелухой и силикатом натрия значительную роль в формировании керамики и влиянии на ее свойства играют добавки солей железа, марганца и циркония. Исследовано влияние соотношения марганца и циркония на твердость и производительность мембран. Показано, что высокое содержание рисовой шелухи в керамике приводит к увеличению удельной поверхности и удельного внутреннего объема, в то же время резко снижается твердость. Данные позитронной аннигиляционной спектроскопии позволили выявить зависимости между механической прочностью, производительностью и размерами “ловушек”, временами жизни позитрония, которые связаны с пористостью и интенсивностью аннигиляции позитрония.

Ключевые слова: природные алюмосиликаты, керамические мембраны, пористость, твердость, позитронная аннигиляционная спектроскопия

DOI: 10.31857/S0044457X22090136

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых высокоэффективных мембранных материалов и внедрение их в различные химические и технологические производства в последние несколько десятилетий представляют большой интерес для исследователей по всему миру. Это связано с невысокой энергозатратностью мембранных технологий, их высокой эффективностью, значительной компактностью и относительной простотой оборудования. При этом в некоторых областях, таких как обратноосмотическое опреснение морской воды [1], фильтрация поверхностных и сточных вод [2], разделение и очистка веществ в фармацевтической отрасли, гемодиализ, производство батарей и топливных элементов и др., мембраны играют ключевую роль уже многие годы [3].

Одной из наиболее значимых и определяющих характеристик мембраны является материал для ее изготовления, в качестве которого могут быть использованы как неорганические (металлические шарики, стекло- и графитопласты, керамика и металлокерамика), так и органические материалы и вещества [4]. При этом в экстремальных

условиях (при высоких или низких температурах и давлении, в агрессивных средах и органических растворителях) применение полимерных органических мембран сильно ограничено; главным недостатком большинства керамических мембран является их хрупкость. Таким образом, перспективной представляется разработка мембранных материалов с высокой прочностью и твердостью, проницаемостью, химической инертностью, изготовленных на основе материалов с невысокой рыночной стоимостью.

Одним из основных компонентов при создании неорганических керамических мембран являются различные природные минералы, такие как каолинит, цеолит, доломит, перовскит [5] и др. Это объясняется их невысокой стоимостью и широкой доступностью, повышенной термо- и химической стойкостью и упорядоченной структурой пор. Использование каолинита в качестве структурообразующего компонента керамических мембран обеспечивает таким материалам высокую механическую и термическую стабильность, низкую пластичность [6, 7]. Мембраны, созданные на основе цеолитов, имеют трехмерную упорядоченную систему однородных пор мо-

лекулярного размера, благодаря чему проявляют молекулярно-ситовые свойства; такие материалы могут быть использованы, например, для обратноосмотического обессоливания воды [8] или в процессах газоразделения [9].

Материалы на основе различных сельскохозяйственных отходов также все чаще используются при создании различных мембран [10, 11], что обусловлено их невысокой стоимостью, четкой структурой скелета и высокой пористостью получаемых материалов за счет выгорания органической части при термической обработке. Одним из таких материалов является рисовая шелуха, отожженная при определенной температуре. На основе данного компонента возможно получение муллитовой керамики [12], а мембраны, полученные из смеси такой шелухи и различных органических веществ, могут быть использованы для очистки вод от различных ионов металлов как по сорбционному, так и по молекулярно-ситовому механизму [13].

Добавление соединений металлов позволяет получать различные металлокерамические мембраны, соединяющие в себе полезные свойства керамики (устойчивость к агрессивным средам, высоким температурам и коррозии) и полимерных мембран (гибкость и высокую производительность) [14]. Добавление наночастиц меди к смеси оксида алюминия и рисовой шелухи в значительной степени повышает прочность получаемой керамики [15]; мембраны на основе оксидов марганца и кремния обладают повышенной гибкостью [16], на основе соединений висмута и редкоземельных металлов – стабильностью при высоких температурах [17]. Распространено использование соединений циркония для получения прочных микро- и ультрафильтрационных мембран с высокой удельной поверхностью, термической стабильностью [18, 19] и ионной проводимостью [20].

Получаемые керамические мембраны могут служить подложкой для нанесения дополнительного слоя какого-либо органического или неорганического компонента. Нанесение такого слоя придает получаемым композитным мембранам необходимые свойства для повышения удерживающей способности за счет пор строго определенного размера, изменения гидрофильно-гидрофобного баланса или заряда поверхности, ее адсорбционных свойств. Процесс нанесения может быть осуществлен различными способами: путем осаждения из раствора взвешенных мелкодисперсных частиц органического [21] или неорганического [22] соединения, золь-гель методом [23], газофазным осаждением атомных слоев [24] и др.

Керамические мембраны на основе описанных выше природных минералов, отходов про-

мышленности и сельского хозяйства, соединений распространенных металлов имеют относительно невысокую себестоимость и поэтому могут быть использованы в тех сферах, где необходимы большие их количества и площади фильтрующих поверхностей. Наиболее распространенной областью применения такого типа мембран является очистка различных типов вод от всевозможных загрязняющих веществ: ионов тяжелых металлов [25], хлорида натрия из высокосолевых растворов [26], масляных эмульсий [27, 28], бактерий [29]. Поскольку в большинстве таких случаев необходимо очищение больших объемов воды и применение высоких давлений, такие мембраны должны обладать повышенной прочностью, проницаемостью и удерживающей способностью, в связи с чем при создании новых их видов внимание исследователей должно быть обращено на улучшение данных характеристик.

Цель исследования – получение керамических мембранных материалов на основе природных силикатов, связующего вещества и добавок различных соединений металлов, исследование физико-химических характеристик полученных изделий и возможности их применения для очистки вод от различных загрязнителей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для изготовления керамических мембранных материалов были использованы различные природные алюмосиликаты: цеолит Чугуевского месторождения Приморского края, вермикулит Ковдорского месторождения Мурманской области, а также каолинит различного происхождения. Рисовая шелуха была отожжена в муфельной печи в токе воздуха при температурах 300 и 900°C. Данные материалы перед смешиванием были измельчены и просеяны через сито с диаметром отверстий 0.25 мм. В качестве связующего вещества был использован технический силикат натрия. К различным смесям описанных исходных компонентов прибавляли некоторые соединения металлов (все марки “х. ч.”) производства “Реахим”: хлорид железа шестиводный (образцы 1, 2), оксихлорид циркония восьмиводный (образцы 4–8), перманганат калия (образцы 3, 6–9). Смеси подвергали размолу на кавитаторе, высушивали, размалывали и просеивали через сито с диаметром отверстий 0.2 мм. Полученный порошок прессовали при давлении 10 МПа и обжигали в муфельной печи при температурах 600–900°C.

Определение элементного состава керамических мембран выполняли на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре EDX-800HS (Shimadzu, Япония). Минеральный состав определяли на порошковом дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker ($\text{CuK}\alpha$ -излучение) с

Таблица 1. Элементный состав керамических мембран 1–4

№ мембраны	Содержание элементов в пересчете на оксидную форму, мас. %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	Cl	CaO	ZrO ₂	C	следы
1	71.7	9.5	2.4	6.3	–	1.8	1.7	–	2.9	3.1
2	69.7	4.0	0.9	21.6	–	1.2	1.4	–	2.3	0.5
3	60.9	11.7	9.8	2.1	7.5	2.3	2.4	–	2.4	0.4
4	55.8	15.7	3.2	6.5	–	4.1	2.9	7.5	3.8	0.7

Таблица 2. Состав мембран, минеральные компоненты, мас. %

№ мембраны	Каолинит	Цеолит	SiO ₂ (рисовая шелуха)	Вермику- лит	FeCl ₃	Na ₂ SiO ₃	ZrCl ₂	KMnO ₄
1	25.8	25.9	7.8	2.5	3.8	33.8	–	–
2	15.3	15.2	4.5	1.5	17.5	17.5	–	–
3	10.1	13.6	9.2	9.4	–	20.2	–	25.1
4	–	16.8	16.8	25.3	–	33.7	7.5	–

Таблица 3. Физико-химические характеристики мембран 1–4

№ мембраны	$S_{уд}$, м ² /г	$V_{уд}$, см ³ /г	Твердость, кг/см ²	τ_3 , нс	I_3 , %	K , 1/с	Производи- тельность, дм ³ /(ч м ²)
1	2.7	0.028	260.0	0.802	8.0	37.7	2530
2	2.5	0.018	285.0	0.685	6.7	25.7	1600
3	1.3	0.010	525.0	0.432	4.6	18.3	1090
4	1.9	0.013	450.0	1.161	4.0	13.5	3120

0.02 (θ) разрешением в диапазоне углов $2^\circ < 2\theta < 90^\circ$. Удельную поверхность образцов определяли по сорбции азота на анализаторе ASAP 2020 (Micromeritics Instrument Corporation, США). Изображения микрообластей поверхностей мембран получали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения Cross-Beam 1540 XB (Carl Zeiss, Германия) с приставкой для энергодисперсионного спектрального анализа (ЭДС). Измерения времени жизни и интенсивности аннигиляций позитронов проводили на спектрометре быстро-быстрых задержанных совпадений при помощи сцинтилляционных пластических детекторов размером 25 × 15 мм и ФЭУ 87 на базе анализатора NOKIA-LP-4840; расчеты на основе полученных данных выполнены согласно модели, описанной в работе [30]. Размеры и содержание коллоидных частиц в растворе определяли на анализаторе Mastersizer 3000 (Malvern, Великобритания).

Твердость по Бринеллю определяли согласно ГОСТ 9012-59, в соответствии с которым закрепленный стальной шарик диаметром 2.0 мм упирался в поверхность испытуемого твердого образца. К наконечнику применяли нагрузку, равную воздействию массы 5 кг. Исходя из диаметра полученного углубления вычисляли твердость образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При одинаковых условиях ($T_{обжига} = 900^\circ\text{C}$, $P_{прессования} = 10$ МПа, $d_{зерна} < 0.20$ мм) были получены образцы керамических мембран, элементный и минеральный состав которых приведен в табл. 1, 2.

Мембраны 1–4, полученные при одинаковых условиях, были исследованы с помощью адсорбции азота и метиленового голубого, определена производительность по воде при избыточном давлении 0.15 атм, плотность пикнометрическим методом в гексане, твердость по Бринеллю и исследованы структурные параметры с помощью позитронной аннигиляционной спектроскопии, данные приведены в табл. 3.

Из представленных данных можно заключить, что введение в состав соли циркония (мембрана 4) приводит к повышению твердости, а увеличение количества SiO₂ за счет рисовой шелухи – к повышению производительности, что коррелирует с диаметром пор. Введение в состав перманганата калия (мембрана 3) приводит к повышению твердости и, соответственно, к уменьшению производительности.

По данным позитронной аннигиляционной спектроскопии (τ_3 и I_3) можно проследить тенденции изменения времени жизни третьей ком-

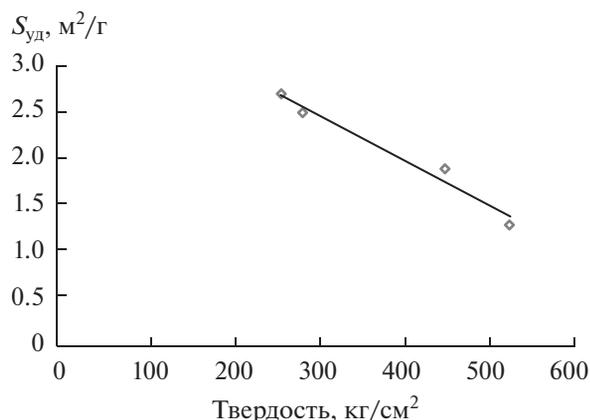


Рис. 1. Зависимость удельной поверхности от твердости по Бринеллю.

поненты (τ_3), интенсивности (I_3) и константы скорости аннигиляции в зависимости от количества и природы изменяющих структуру мембран добавок, в частности, увеличение содержания оксидов железа приводит к уменьшению всех параметров аннигиляции и одновременно к увеличению плотности и, соответственно, к уменьшению производительности. Необходимо отметить, что третья компонента спектра аннигиляции отвечает образованию позитрония (Ps) в неупорядоченных областях мембраны [30, 31]. Кроме того, наблюдается обратно пропорциональная зависимость удельной поверхности мембран от твердости (рис. 1).

Поскольку время жизни (τ_3) обычно коррелирует с размерами пор, а интенсивность (I_3) – с их количеством, по зависимости времени жизни (τ_3) от удельного объема пор можно судить об увеличении или уменьшении размеров и количества свободных полостей вследствие добавления того или иного вещества: соли железа, циркония или перманганата [32] (рис. 2).

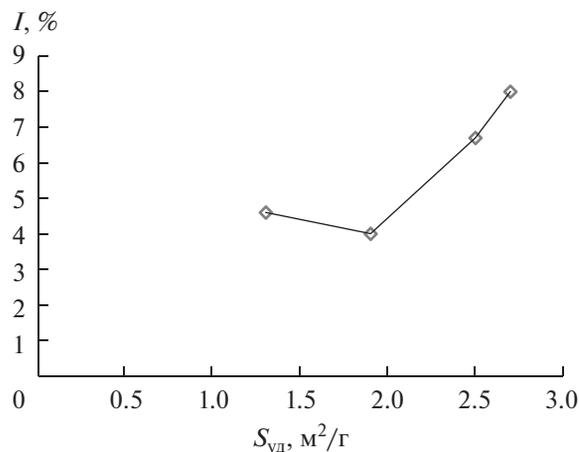


Рис. 2. Зависимость интенсивности аннигиляции позитрония от удельной поверхности.

Таким образом, при увеличении времени жизни третьей компоненты снижается удельный объем пор мембраны, что, по-видимому, связано с наличием оксида циркония, который увеличивает размер пор, уменьшая при этом их количество, что видно по уменьшению интенсивности аннигиляции. Исходя из полученных данных, можно заключить, что введение марганца увеличивает твердость, но понижает другие параметры ($S_{уд}$, $V_{уд}$), в то же время введение циркония незначительно снижает твердость мембраны, увеличивая при этом ее производительность. В связи с этим было исследовано влияние соотношения количеств оксида марганца, оксида циркония и рисовой шелухи на характеристики получаемых керамических материалов. Рисовая шелуха была термически обработана при 350°C и содержала ~44% углерода при $S_{уд} = 110$ м²/г, ее структура имела регулярное строение согласно данным сканирующей электронной микроскопии (рис. 3).

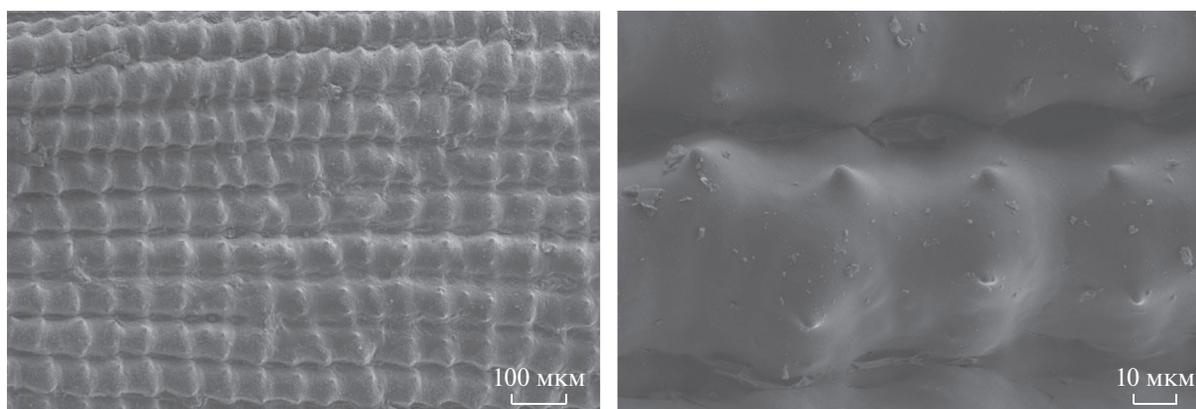


Рис. 3. Морфология рисовой шелухи, обработанной при 350°C.

Таблица 4. Элементный состав мембран 5–9, мас. %

№ мембраны	Содержание элементов в пересчете на оксиды, мас. %									
	SiO ₂	ZrO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Cl	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO ₂	C
5	62.4	12.9	4.8	3.1	2.4	2.2	1.9	1.7	–	8.8
6	54.1	7.2	13.6	4.2	2.5	4.1	2.2	2.1	4.2	6.1
7	54.8	5.3	8.4	5.6	1.8	6.5	2.1	1.7	9.4	3.7
8	54.2	2.4	6.4	6.5	1.5	6.8	1.5	1.7	11.1	2.8
9	61.3	–	9.1	6.6	–	8.4	–	2.2	12.7	2.1

Таблица 5. Физико-химические характеристики мембран 5–9

№ мембраны	$S_{уд}$, м ² /г	$d_{пор}$, нм	$V_{уд}$, Å ³ (согласно ПАС)	$Ne^+ \times 10^{20}$, 1/см ³	$S_{пор}$, м ² /г	$V_{уд}$, см ³ /г	Производительность, дм ³ /(ч м ²)	Твердость, кг/см ²
5	48.9	8.0	268.9	63.3	12.8	0.045	2140	30
6	16.4	9.0	189.6	50.1	9.2	0.016	1600	150
7	7.4	16.6	137.7	71.4	6.7	0.028	1400	400
8	5.1	10.9	296.4	30.8	1.3	0.005	23.4	600
9	1.5	10.8	248.5	53.8	1.6	0.005	0.011	1300

Содержание рисовой шелухи изменяли в пределах от 30 до 5% для определения оптимальных параметров мембранных материалов. Химический состав данных образцов приведен в табл. 4.

Образцы, содержащие соединения марганца, были сформованы при различных давлениях прессования. Увеличение давления выше 20 МПа не имеет практического смысла, так как при этом не наблюдается значительного возрастания твердости образцов. Удельный объем неупорядоченных областей различных вариантов образца 9, полученных при разных давлениях прессования, коррелирует со значениями твердости: увеличение давления при формовании образца с 5 до 20 МПа приводит к повышению твердости обожженных композитов с 1100 до 1400 кг/см², т.е. на 27.3%; при этом наблюдается уменьшение объема неупорядоченных областей на 29.8% (с 325 до 228 Å³), что говорит об уплотнении структуры образца с увеличением давления прессования. Несмотря на достаточно низкую производительность, данный тип мембран обладает сопоставимой с образцами 1–4 удельной площадью поверхности: вычисленная по методу БЭТ она составляет 1.54 м²/г. Это можно объяснить меньшим размером пор по сравнению с более производительными образцами 1–4. Вычисления, сделанные по десорбции азота с использованием метода БДХ, показывают значительное преобладание пор с диаметром 4 ± 0.5 нм (рис. 4). Большинство пор, по всей видимости, являются глухими, что не позволяет жидкости проходить через

мембрану и вызывает столь низкую производительность.

При высоком содержании углерода в образце за счет рисовой шелухи и отсутствии оксида марганца прочность мембраны 5 равна 25–30 кг/см², что не позволяет ее использовать в дальнейшем. Плавное повышение содержания соединений марганца приводит к резкому возрастанию твердости, однако при этом резко снижается удельная поверхность и, как следствие, производительность (табл. 5). Наблюдается прямая зависимость между площадью пор ($S_{пор}$) и производительностью мембран 5–9. Рассчитанный удельный объем неупорядоченных областей ($V_{уд}$ согласно ПАС) и количество аннигиляций позитрона (Ne^+), отвечающее за число таких неупорядоченных областей, не находятся в прямой зависимости от содержания соединений марганца в образцах.

Исходя из представленных зависимостей, можно сделать вывод о том, что при увеличении содержания оксида марганца образуются более легкоплавкие компоненты, появление которых приводит к закрытым порам с одного конца [33]. Об этом свидетельствует низкая производительность образца 9 и в то же время большее количество и размер пор согласно данным позитронной спектроскопии.

Исследована возможность применения описанных мембран, полученных с добавлением солей циркония, для очистки коллоидных растворов на примере полимагнийфенилсилоксана со средним размером частиц в области 350 нм. Рас-

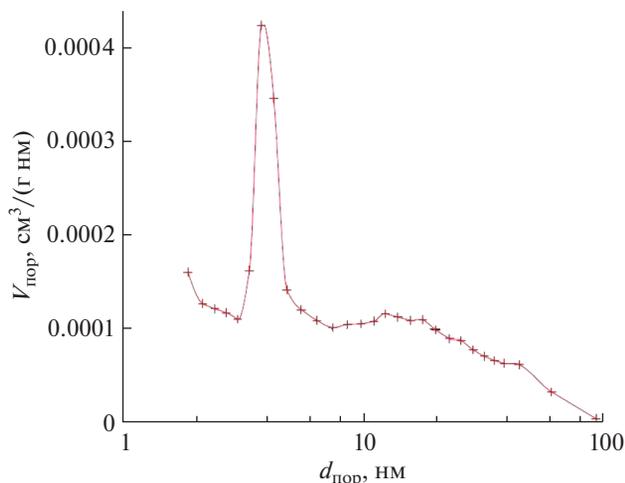


Рис. 4. Изменение суммарного объема пор образца 9 в зависимости от их диаметра.

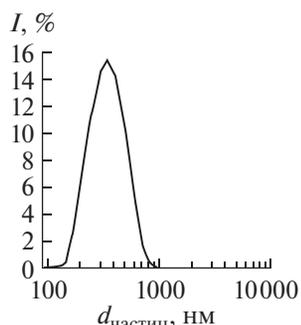


Рис. 5. Распределение по размеру коллоидных частиц полимагнийфенилсилоксана в растворе до очистки.

пределение таких частиц в исходном растворе по размерам приближено к распределению Гаусса с минимальным размером в области 130 нм (рис. 5). После прохождения через мембрану исследуемый раствор не содержит коллоидных частиц любых размеров, которые полностью задерживаются на

поверхности мембраны, что можно отчетливо наблюдать на СЭМ-снимках этой поверхности после фильтрации (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены керамические мембраны с использованием природных алюмосиликатов, частично отожженной рисовой шелухи, силиката натрия и солей железа, циркония и марганца. При относительно близких соотношениях цеолита, вермикулита, рисовой шелухи значительную роль в формировании свойств мембран определяют оксиды железа, марганца и циркония. С использованием данных позитронной аннигиляционной спектроскопии, механической прочности, производительности по воде было показано, что твердость и производительность находятся в прямо пропорциональной взаимосвязи от размеров “ловушек” позитрония, времени жизни позитрония, а количество пор (т.е. интенсивность аннигиляции позитрония) связано с производительностью мембран. Показано, что мембраны, полученные добавлением соединений марганца, обладают твердостью, сравнимой с твердостью металлических мембран, и могут быть использованы при высоких давлениях. Мембраны, полученные с использованием природного цеолита, рисовой шелухи и оксихлорида циркония, обладают хорошим соотношением прочностных характеристик и производительности, данные материалы подходят для очистки растворов от различных загрязнителей, в частности, коллоидных частиц.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 00657-2020-0006). В работе использовано оборудование объединенного ЦКП ДВФУ и междисциплинарного центра в области нанотехнологий и новых функциональных материалов (ФГАОУ ВО “ДВФУ”, Владивосток, Россия)

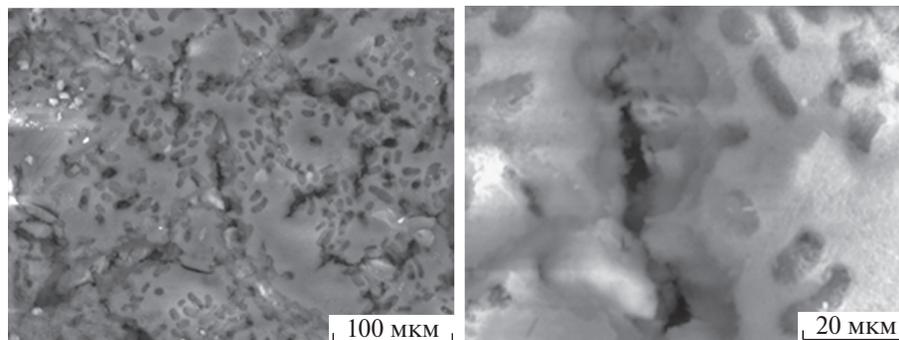


Рис. 6. Поверхность мембраны после фильтрации коллоидного раствора полимагнийфенилсилоксана.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dzyubenko V.G.* // Membr. Membr. Technol. 2020. V. 2. № 4. P. 217. [*Дзюбенко В.Г.* // Мембр. и мембр. технол. 2020. Т. 10. № 4. С. 232.] <https://doi.org/10.1134/S2517751620040034>
2. *Pervov A.G., Shirkova T.N., Tikhonov K.V.* Membr. Membr. Technol. 2020. V. 2. № 5. P. 296. [*Первов А.Г., Ширкова Т.Н., Тихонов К.В.* // Мембр. и мембр. технол. 2020. Т. 2. № 5. С. 309.] <https://doi.org/10.1134/S2517751620050054>
3. *Thangarasu S., Hwan Oh T.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2021. V. 46. № 77. P. 38381. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.081>
4. *Apel P.Yu., Bobreshova O.V., Volkov A.V. et al.* // Membr. Membr. Technol. 2019. V. 1. № 2. P. 45. [*Апель П.Ю., Бобрешова О.В., Волков А.В. и др.* // Мембр. и мембр. технол. 2019. Т. 1. № 2. С. 59.] <https://doi.org/10.1134/S2517751619020021>
5. *Shubnikova E.V., Nemudry A.P.* // Membr. Membr. Technol. 2021. V. 3. № 6. P. 377. [*Шубникова Е.В., Немудрый А.П.* // Мембр. и мембр. технол. 2020. Т. 11. № 6. С. 422.] <https://doi.org/10.1134/S251775162106007X>
6. *Das B., Chakrabarty B., Barkakati P.* // Ceram. Int. 2016. № 42. P. 14326. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.125>
7. *Tatar I., Ediz N., Aydin A.* // J. Aust. Ceram. Soc. 2017. № 53. P. 253. <https://doi.org/10.1007/s41779-017-0031-0>
8. *Setiawan H., Khairani R., Rahman M.A. et al.* // J. Aust. Ceram. Soc. 2017. № 53. P. 531. <https://doi.org/10.1007/s41779-017-0064-4>
9. *Li L., Wang C., Wang N. et al.* // J. Mater. Sci. 2015. № 50. P. 2561. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-8819-1>
10. *Ali M.S., Azmahhanim M.A., Tahir S.M. et al.* // Adv. Mater. Sci. Eng. 2017. № 8. P. 1. <https://doi.org/10.1155/2017/2586026>
11. *Nkayem D.N., Mbey J., Diffo B.K. et al.* // J. Build. Eng. 2016. № 5. P. 254. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.01.006>
12. *Singhapong W., Srinophakun P., Jaroenworoluck A.* // J. Aust. Ceram. Soc. 2017. № 53. P. 811. <https://doi.org/10.1007/s41779-017-0094-y>
13. *Hubadillah S.K., Othman M.H.D., Harun Z. et al.* // Ceram. Int. 2017. № 43. P. 4716. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.122>
14. *Novikov V.I., Kryachko V.V., Tarasov Yu.I. et al.* // Membr. Membr. Technol. 2019. V. 1. № 3. P. 127. [*Новиков В.И., Крячко В.В., Тарасов Ю.И. и др.* // Мембр. и мембр. технол. 2019. Т. 1. № 3. С. 155.] <https://doi.org/10.1134/S251775161903003X>
15. *Ali M.S., Hanim M.A.A., Tahir S.M. et al.* // J. Aust. Ceram. Soc. 2017. № 53. P. 963. <https://doi.org/10.1007/s41779-017-0112-0>
16. *Wang X., Dou L., Yang L. et al.* // J. Hazard. Mater. 2017. № 324. P. 203. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.050>
17. *Dergacheva P.E., Kul'bakin I.V., Ashmarin A.A. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 8. P. 1229. [*Дергачева П.Е., Кульбакин И.В., Ашмарин А.А. и др.* // Журн. неорганической химии. 2021. Т. 66. № 8. С. 1126.] <https://doi.org/10.1134/S0036023621080040>
18. *Lu Y., Chen T., Chen X. et al.* // J. Membr. Sci. 2016. № 514. P. 476. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.04.074>
19. *Zielińska M., Cydzik-Kwiatkowska A., Bułkowska K. et al.* // Water, Air, Soil Pollut. 2017. № 228. P. 282. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3450-1>
20. *Karavanova Yu.A., Golubenko D.V., Yaroslavtsev A.B.* // Membr. Membr. Technol. 2020. V. 2. № 4. P. 251. [*Караванова Ю.А., Голубенко Д.В., Ярославцев А.Б.* // Мембр. и мембр. технол. 2020. Т. 10. № 4. С. 257.] <https://doi.org/10.1134/S2517751620040071>
21. *Fazullin D.D., Mavrin G.V., Salakhova A.N.* // Membr. Membr. Technol. 2020. V. 2. № 2. P. 115. [*Фазуллин Д.Д., Маврин Г.В., Салахова А.Н.* // Мембр. и мембр. технол. 2020. Т. 10. № 2. С. 131.] <https://doi.org/10.1134/S2517751620020067>
22. *Meng X., Liu Z., Deng C. et al.* // J. Hazard. Mater. 2016. № 320. P. 495. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.068>
23. *Wang F., Lee J., Ha J.H. et al.* // Mater. Lett. 2017. № 191. P. 200. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.12.063>
24. *George S.M.* // Chem. Rev. 2010. № 110. P. 111. <https://doi.org/10.1021/cr900056b>
25. *Kumar R.V., Pugazhenti G.* // J. Water Reuse Desal. 2017. V. 7. № 3. P. 365. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.096>
26. *Liu T., Lei L., Gu J. et al.* // J. Eur. Ceram. Soc. 2017. № 37. P. 2431. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.02.001>
27. *Das B., Chakrabarty B., Barkakati P.* // Korean J. Chem. Eng. 2017. V. 34. № 10. P. 2559. <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0185-z>
28. *Zhu L., Chen M., Dong Y. et al.* // Water Res. 2016. № 90. P. 277. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.035>
29. *Novikov V.I., Muradova A.G., Sharapaev A.I.* // Pet. Chem. 2017. V. 57. № 11. P. 929. <https://doi.org/10.1134/S0965544117090079>
30. *Razov V.I., Trukhin V.V.* // Adv. Mater. Res. 2014. V. 894. P. 177. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.894.177>
31. *Brand F.* // Appl. Phys. 1974. V. 5. P. 1.
32. *Goldanskiy A.V., Onischuk V.A., Shantarovich V.P.* // Phys. Status Solidi A. 1987. V. 102. P. 559.
33. *Rouquerol J., Avnir D., Fairbridge C.W. et al.* // Pure Appl. Chem. 1994. V. 66. № 8. P. 1739. <https://doi.org/10.1351/pac199466081739>