

КАЛОЇДНАЯ ХІМІЯ
COLLOIDAL CHEMISTRYУДК 661.183
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-25-32>Поступила в редакцию 17.11.2020
Received 17.11.2020**А. И. Иванец***Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОФИЛЬТРАЦИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МЕМБРАН**

Аннотация. Изучены основные факторы, влияющие на физико-химические свойства микрофильтрационных керамических мембран на основе природного кварцевого песка. Установлено, что образцы крупнопористой керамики с содержанием 11,0 мас.% алюмосиликатного связующего и 10,0 мас.% выгорающей добавки характеризуются средним размером пор $22\pm 3,02$ мкм, производительностью по воде $54\pm 5,0$ м³/(ч×м²×бар) и прочностью на разрыв $9,0\pm 0,6$ бар. Определены оптимальные условия нанесения мембранных слоев, что позволило получить микрофильтрационные керамические мембраны со средним размером пор $2,3\pm 0,2$ мкм, производительностью по воде $26\pm 1,0$ м³/(ч×м²×бар) и прочностью на разрыв $6,5\pm 0,3$ бар.

Ключевые слова: микрофильтрация, керамические мембраны, пористая керамика, оксид кремния

Для цитирования. Иванец, А. И. Получение микрофильтрационных керамических мембран / А. И. Иванец // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 25–32. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-25-32>

A. I. Ivanets*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***PREPARATION OF MICROFILTRATION CERAMIC MEMBRANES**

Abstract. The main factors affecting the physicochemical properties of microfiltration ceramic membranes based on natural quartz sand were studied. It was found that samples of large-porous ceramics with a content of 11.0 wt. % of the aluminosilicate binder and 10.0 wt. % of the burning additive are characterized by average pore size of 22 ± 3.02 μm, water capacity of 54 ± 5.0 m³/(h×m²×bar), and tensile strength of 9.0 ± 0.6 bar. The optimal conditions for membrane layers coating were determined, which allowed obtaining microfiltration ceramic membranes with average pore size of 2.3 ± 0.2 μm, water capacity of 26 ± 1.0 m³/(h×m²×bar) and tensile strength of 6.5 ± 0.3 bar.

Keywords: microfiltration, ceramic membranes, porous ceramics, silicon oxide

For citation. Ivanets A. I. Preparation of microfiltration ceramic membranes. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 25–32 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-25-32>

Введение. Благодаря высокой химической и термической стабильности керамические мембраны находят широкое применение в процессах очистки сточных вод [1–3]. Применение керамических мембран ограничено их невысокой производительностью по сравнению с полимерными мембранами и высокой температурой спекания традиционных оксидов металлов (Al₂O₃, ZrO₂, TiO₂), применяемых для их получения [4, 5]. Это обуславливает интерес исследователей к поиску более доступных материалов для создания керамических мембран. Наиболее привлекательно использование природных минералов и промышленных отходов [6, 7], что снижает стоимость керамических прекурсоров и температуру термообработки мембран. Для повышения механической прочности и снижения температуры спекания керамических мембран используются различные связующие вещества [8, 9]. Кроме того, для увеличения открытой пористости и транспортных характеристик мембран применяют порообразующие добавки, которые выгорают на стадии термообработки [10, 11].

Керамические мембраны обычно имеют асимметричную структуру: верхний тонкий слой обуславливает разделительные свойства и крупнопористая основа обеспечивает механическую прочность и повышенную проницаемость [12]. При этом, как правило, используется многостадийное спекание, что негативно сказывается на механических и транспортных свойствах и усложняет процесс изготовления мембран. Использование порошков с одинаковым химическим составом и различной дисперсностью для получения пористой основы и мембранных слоев позволяет обеспечить высокую адгезию и необходимые эксплуатационные характеристики керамических мембран [13].

Ранее показана возможность получения керамических микрофильтрационных мембран на основе природного оксида кремния. При этом основными факторами, определяющими механические и транспортные характеристики, являются природа и концентрация связующего и порообразующих добавок, а также химический и фазовый состав природного кварцевого песка, который значительно разнится в зависимости от месторождения [14, 15].

Цель работы – установление закономерностей получения микрофильтрационных керамических мембран на основе кварцевого песка месторождения Хэнань (Китай) в зависимости от содержания алюмосиликатного связующего и порообразователя, а также условий формирования мембранных слоев.

Материалы и методы исследований. Исходным сырьем для получения керамических мембран являлся природный кварцевый песок месторождения Хэнань (Китай), который, согласно данным рентгенофазового анализа, состоит из кварца с высокой степенью кристалличности, о чем свидетельствуют рассчитанные значения элементарной ячейки кварца, и не содержит других примесей кристаллических соединений (рис. 1).

При создании пористых материалов из частиц квазисферической формы размер исходных частиц должен превышать размер пор в 4–5 раз [16]. Поэтому для получения керамической подложки с размером пор 50–100 мкм целесообразно использовать фракцию 200–630 мкм, что составляет более 97 мас.% используемого природного кварцевого сырья (табл. 1).

В состав керамической смеси также входили: неорганическое связующее (водный раствор алюмосиликата натрия), органическая выгорающая добавка (мука ТУ РБ 00959441.005), пластификатор (глинистое минеральное сырье ТР 37328907-1.01-00) и 1,0 %-ный водный раствор неионогенного ПАВ ОС-20 (ГОСТ 10730-82).

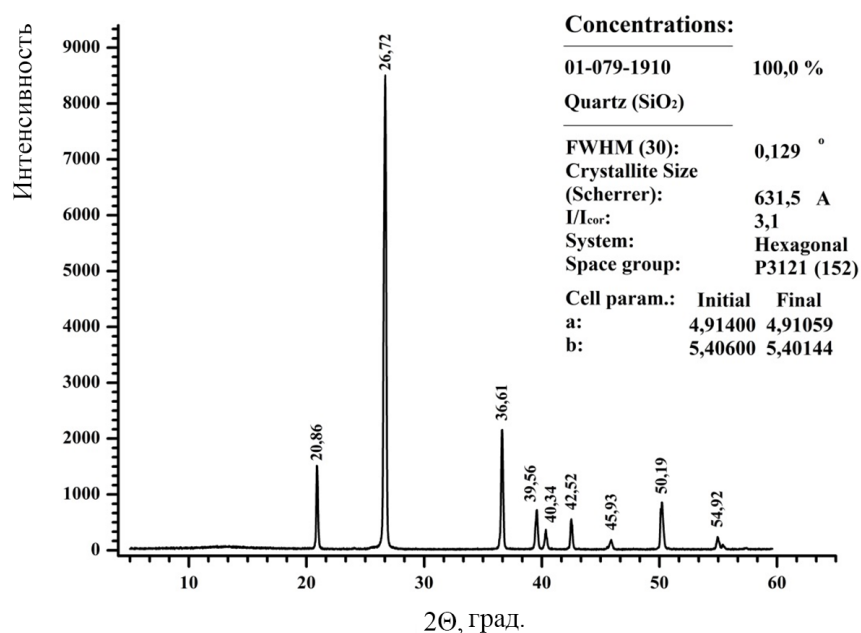


Рис. 1. Рентгенограмма природного кварцевого песка

Fig. 1. XRD pattern of natural quartz sand

Таблица 1. Фракционный состав кварцевого песка

Table 1. Fractional composition of quartz sand

Фракция, мкм	Содержание, мас.%
400–630	30,0
315–400	24,3
200–315	43,0
100–200	2,5
<100	0,2

Для оптимизации компонентного состава формуемой керамической смеси и режимов термообработки использовали образцы в форме таблеток (диаметр 19 мм, высота 12 мм), спрессованные на гидравлическом лабораторном прессе. Спекание образцов проводили в лабораторной печи SNOL 7,2/1100 в воздушной среде при 850 °С со скоростью нагрева 1,0 °С/мин. Крупнопористую керамическую подложку трубчатой формы (диаметр 65 мм, длина 500 мм, толщина стенки 3–4 мм) получали методом изостатического радиального прессования на установке УРП 02.00 при давлении прессования 40 МПа.

Микрофльтрационные мембранные слои наносили с использованием суспензии мелкодисперсного кристаллического оксида кремния в водном растворе алюмосиликатного связующего (5,0–15,0 мас.%): промежуточный слой формировали с использованием частиц 10–40 мкм, а мембранный – 0,5–2,0 мкм. Содержание порошка оксида кремния в суспензии составляло 30–50 мас.%. Закрепление мембранных слоев проводили путем их сушки при комнатной температуре в течение 24 ч с последующей термообработкой при 600 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин.

Рентгенофазовый анализ природного кварцевого песка проводили на дифрактометре Advanced D8 (Bruker, Germany) в CuK_α -монохроматизированном излучении в углах отражения 2θ от 20 до 80°. Первичную обработку полученных дифракционных данных и фазовую идентификацию смеси кристаллических соединений осуществляли с использованием базы рентгенографических порошковых стандартов «JCPDS PDF2» (Version 1.21, May-1999). Структуру поверхности, морфологию сколов образцов пористой керамики и микрофльтрационных мембран исследовали на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 LV, JEOL (Япония).

Сравнительную оценку прочности керамических материалов осуществляли по величине давления, разрушающего целостность образца в процессе испытания. В случае испытаний пористой керамики в форме таблеток определяли прочность на сжатие на лабораторном гидравлическом прессе. При испытании образцов трубчатой формы проводили измерение прочности на разрыв при подаче сжатого азота изнутри–наружу. Открытую пористость образцов определяли методом гидростатического взвешивания по увеличению массы образца при пропитке водой. Размер пор керамических мембран определяли методом «пузырька» в воде. Максимальный и средний размеры пор рассчитывали по формуле [17]:

$$r = 2\gamma \cos\theta / P, \quad (1)$$

где r – радиус пор, м; γ – поверхностное натяжение жидкости (для воды 72,0 Н/м); θ – краевой угол смачивания материала (для системы вода–керамика принимается равным нулю); P – давление (Па), при котором появляются первые пузырьки (раскрытие пор максимального размера), или давление, при котором наблюдается равномерный ток пузырьков со всей поверхности образца (раскрытие пор среднего размера).

Производительность по воде рассчитывали по формуле Дарси [17]:

$$Q = J / \Delta P \cdot S, \quad (2)$$

где Q – производительность по воде, $\text{м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{бар})$; J – объемный расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$; S – площадь мембраны, м^2 ; ΔP – перепад давления, бар.

Результаты и их обсуждение. Природа и содержание связующего и порообразователя оказывают значительное влияние на физико-химические свойства силикатной керамики. Для установления влияния концентрации связующего и порообразователя на пористость и механическую

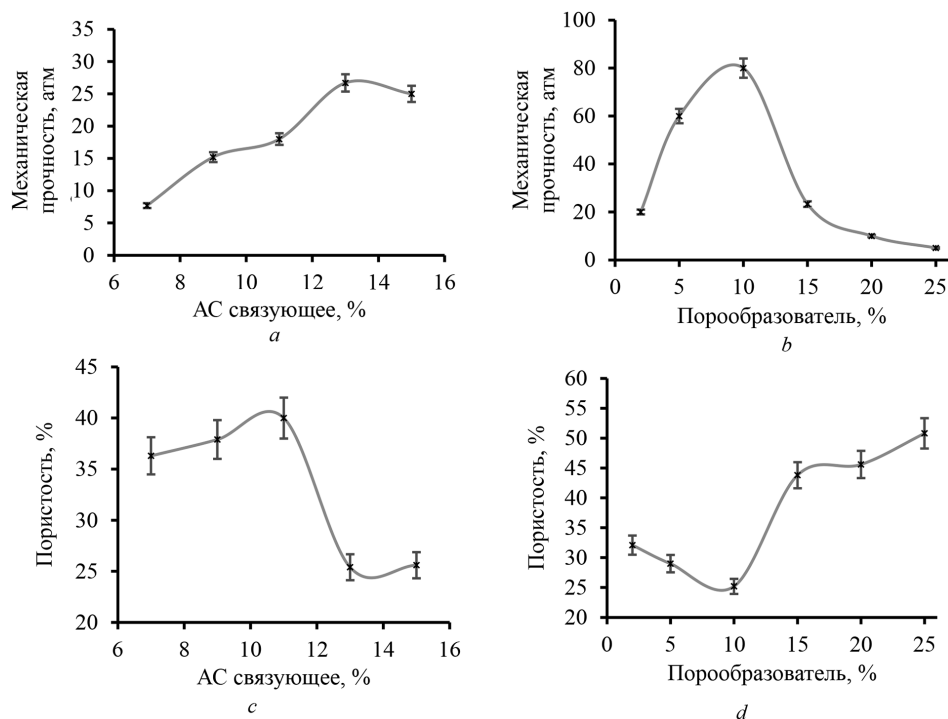


Рис. 2. Влияние содержания алюмосиликатного связующего (*a, c*) и порообразователя (*b, d*) на механическую прочность (*a, b*) и пористость (*c, d*) керамических образцов

Fig. 2. Effect of aluminosilicate binder (*a, c*) and pore-former (*b, d*) contents on mechanical strength (*a, b*) and porosity (*c, d*) of ceramic samples

прочность силикатной керамики получена серия образцов с содержанием алюмосиликата натрия от 7,0 до 15,0 мас.% и выгорающей добавки 2,0–25,0 мас.%.

Из рис. 2, *a* видно, что при увеличении содержания алюмосиликатного связующего от 7,0 до 13,0 мас.% происходит линейный рост механической прочности, дальнейшее увеличение концентрации приводит к незначительному снижению прочности. Это обусловлено формированием целостной и оптимальной по толщине пленки связующего на поверхности каркасообразующих частиц оксида кремния, что обеспечивает высокие механические характеристики керамических образцов. Механическая прочность снижается с увеличением содержания порообразователя, что обусловлено уменьшением количества межчастичных контактов формируемого пористого тела (рис. 2, *b*). При этом только образцы с содержанием 5,0–10,0 мас.% выгорающей добавки удовлетворяют механическим характеристикам, предъявляемым к пористой керамике фильтрационного назначения.

Пористость является важнейшим параметром, определяющим проницаемость и транспортные характеристики пористой керамики. При этом увеличение пористости, как правило, сопровождается снижением механических характеристик. Поэтому выбор оптимального состава необходимо проводить при сравнении заданных механических и транспортных характеристик получаемых материалов (рис. 2, *c, d*). Так, увеличение содержания связующего от 7,0 до 11,0 мас.% практически не оказывает влияния на пористость и составляет 35–40 %, что является достаточным для их практического использования в процессах фильтрации жидких сред. Дальнейший рост концентрации связующим приводит к резкому снижению пористости, что обусловлено заполнением связующего пористого пространства керамики (рис. 2, *c*). Пористость керамики ожидаемо растет с увеличением содержания порообразователя. При этом образцы с содержанием выгорающей добавки 10–15 мас.% характеризуются пористостью 25–45 % (рис. 2, *d*).

СЭМ изображения керамических образцов с различным содержанием связующего и выгорающей добавки представлены на рис. 3. Поверхность образцов с содержанием связующего 15,0 мас.%, а также с наименьшим содержанием порообразователя – 2,0 мас.% имеют неразвитую пористую

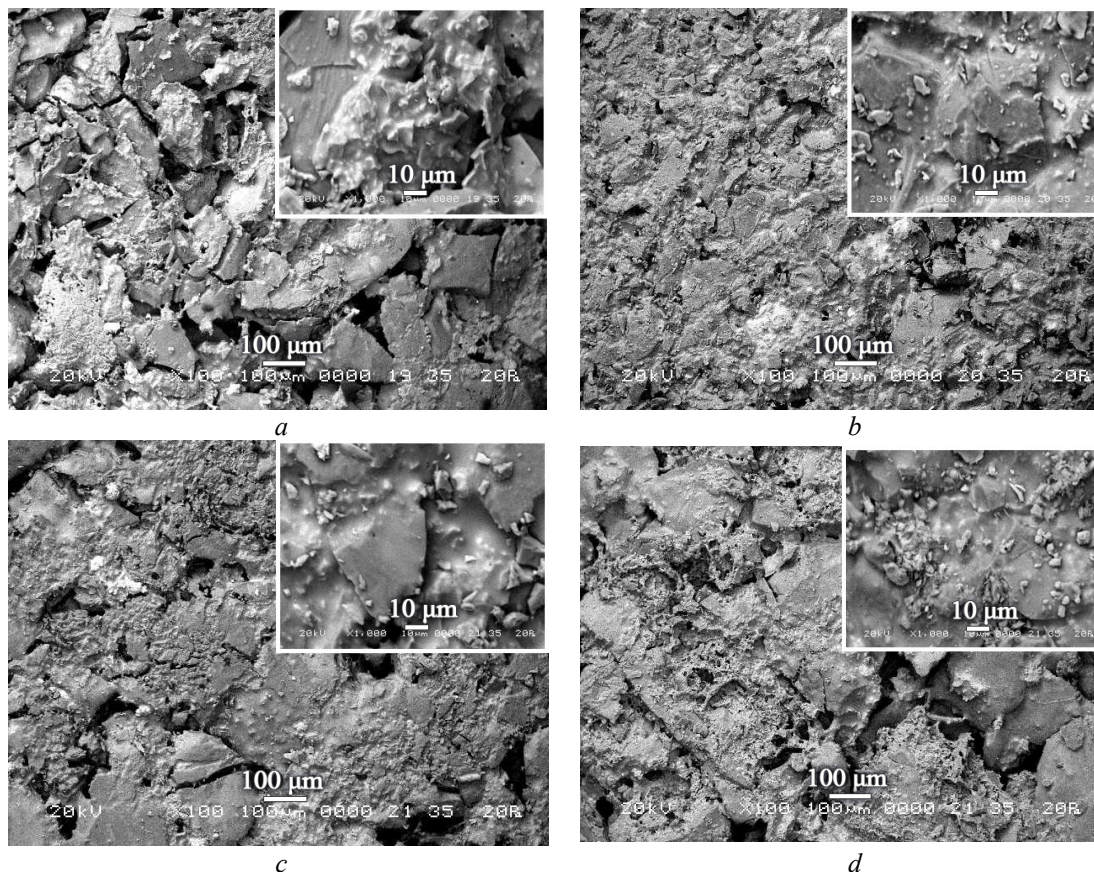


Рис 3. СЭМ изображения скола керамических образцов ($\times 100$ и $\times 1000$): содержание алюмосиликатного связующего 7,0 (a) и 15,0 (b) мас.%; содержание порообразователя 2,0 (c) и 25,0 (d) мас.%

Fig. 3. SEM images of ceramic samples ($\times 100$ and $\times 1000$): content of aluminosilicate binder of 7.0 (a) and 15.0 (b) wt.%; content of pore-former of 2.0 (c) and 25.0 (d) wt.%

структуру, что полностью согласуется с данными по влиянию состава керамики на пористость керамических образцов.

Предварительные исследования показали, что при формировании промежуточного и микрофильтрационного слоев на поверхности крупнопористой подложки оптимальные механические и транспортные характеристики достигаются при использовании суспензии с концентрацией алюмосиликатного связующего 15,0 мас.% и содержанием оксида кремния 30,0 мас.%. Из рис. 4, a видно, что толщина промежуточного слоя составляет 50–100 мкм, при этом в процессе нанесения суспензии оксида кремния происходит его частичное проникновение в пористое пространство. Поверхность образца с промежуточным слоем не полностью покрыта мелкодисперсными частицами размолотого кварцевого песка, при этом на СЭМ изображении четко идентифицируется присутствие значительного количества частиц размером ~ 40 мкм, которые в процессе спекания формируют наиболее крупные поры. Более мелкие частицы расположены в межчастичном пространстве между крупными частицами (рис. 4, b). Формирование микрофильтрационного слоя приводит к незначительному увеличению толщины мембраны, которая не превышает 150–200 мкм (рис. 4, c). Поверхность микрофильтрационного слоя является однородной и бездефектной (рис. 4, d).

Транспортные характеристики мембран и размер пор определяют их селективность и производительность. Производительность мембран является интегральной характеристикой, которая зависит от пористости, размера и морфологии пор (извилистость, форма, закрытые или открытые поры и т.д.). Согласно данным табл. 2, крупнопористая подложка характеризуется средним размером пор $22 \pm 3,02$ мкм, производительностью по воде $54 \pm 5,0$ м³/(ч·м²·бар) и прочностью на разрыв $9,0 \pm 0,6$ бар. При этом формирование промежуточного слоя приводит к закономерному

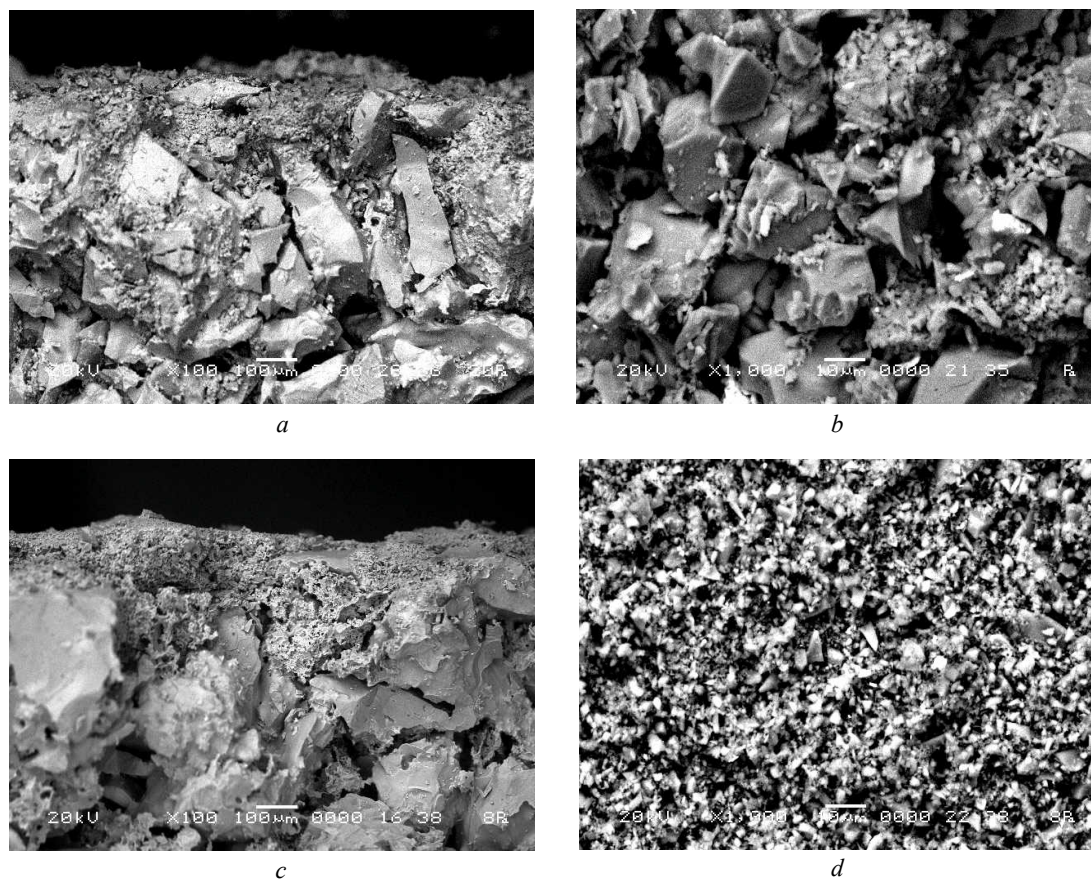


Рис. 4. СЭМ изображения скола (*a, c*) ($\times 100$) и поверхности (*b, d*) ($\times 1000$) керамических образцов с промежуточным (*a, b*) и микрофильтрационным (*c, d*) слоями

Fig. 4. SEM images of the cleavage (*a, c*) ($\times 100$) and surface (*b, d*) ($\times 1000$) of ceramic samples with an intermediate (*a, b*) and microfiltration (*c, d*) layers

снижению среднего размера пор до $9,2 \pm 0,5$ мкм, производительности по воде до $38 \pm 2,0$ м³/ч·м²·бар и механической прочности на разрыв до $7,8 \pm 0,4$ бар. Полученные микрофильтрационные керамические мембраны со средним размером пор $2,3 \pm 0,2$ мкм, производительностью по воде $26 \pm 1,0$ м³/(ч·м²·бар) и прочностью на разрыв $6,5 \pm 0,3$ бар соответствуют по своим характеристикам наиболее эффективным аналогам [18].

Таблица 2. Характеристики пористой основы и керамических мембран

Table 2. Characteristics of porous support and ceramic membranes

Образец	r_{cp} , мкм	R_{max} , мкм	Q , м ³ /ч·м ² ·бар	Механическая прочность, бар
Подложка	$22 \pm 3,0$	$29 \pm 4,0$	$54 \pm 5,0$	$9,0 \pm 0,6$
Промежуточный слой	$9,2 \pm 0,5$	$18,6 \pm 2,0$	$38 \pm 2,0$	$7,8 \pm 0,4$
Микрофильтрационная мембрана	$2,3 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,3$	$26 \pm 1,0$	$6,5 \pm 0,3$

Заключение. Установлены закономерности получения крупнопористой силикатной керамики на основе природного кварцевого песка месторождения Хэнань (Китай) в зависимости от состава. Оптимальным сочетанием пористости (>30 %) и механической прочности на сжатие (>35 МПа) обладают образцы с содержанием 11,0 мас.% алюмосиликатного связующего и 10,0 мас.% поробразователя. Установлено, что формирование сплошного и бездефектного мембранного слоя на поверхности трубчатых керамических подложек возможно при последовательном формировании промежуточного (фракция оксида кремния 40–70 мкм) и микрофильтрационного (фракция оксида кремния 0,5–5,0 мкм) слоев из суспензии оксида кремния (30,0 мас.%) и алюмосиликатного

связующего (15,0 мас.%). Разработанные микрофльтрационные керамические мембраны характеризуются средним размером пор $2,3 \pm 0,2$ мкм, производительностью по воде $26 \pm 1,0$ м³/(ч·м²·бар), прочностью на разрыв $6,5 \pm 0,3$ бар и перспективны для использования в процессах микрофльтрации жидких сред.

Благодарности. Автор выражает благодарность научным сотрудникам С. В. Шемченку и В. Г. Прозоровичу лаборатории адсорбентов и адсорбционных процессов Института общей и неорганической химии НАН Беларуси за помощь при получении керамических мембран и изучении их характеристик.

Acknowledgements. Author is grateful to the researchers of the laboratory of adsorbents and adsorption processes of IGIC NAS Belarus S. V. Shemchenok and V. G. Prozorovich for their assistance in obtaining ceramic membranes and studying their characteristics.

Список использованных источников

1. Ceramic-based membranes for water and wastewater treatment / Z. He [et al.] // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2019. – Vol. 578. – P. 123513. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.074>
2. Goswami, K. P. Credibility of polymeric and ceramic membrane filtration in the removal of bacteria and virus from water: A review / K. P. Goswami, G. Pugazhenthhi // *Journal of Environmental Management*. – 2020. – Vol. 268. – P. 110583. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110583>
3. Ceramic nanocomposite membranes and membrane fouling: A review / C. Li [et al.] // *Water Research*. – 2020. – Vol. 175. – P. 115674. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115674>
4. Development of high flux ultrafiltration polyphenylsulfone membranes applying the systems with upper and lower critical solution temperatures: Effect of polyethylene glycol molecular weight and coagulation bath temperature / T. Plisko [et al.] // *Journal of Membrane Science*. – 2018. – Vol. 565. – P. 266–280. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.08.038>
5. Каграманов, Г. Г. Керамические мембраны с селективными слоями на основе SiO₂, TiO₂ и ZrO₂ / Г. Г. Каграманов, В. В. Назаров // *Стекло и керамика*. – 2001. – № 5. – С. 12–14.
6. Emani, S. Cross flow microfiltration of oil–water emulsions using kaolin based low cost ceramic membranes / S. Emani, R. Uppaluri, M. K. Purkait // *Desalination*. – 2014. – Vol. 341. – P. 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.030>
7. Incorporation of zinc for fabrication of low-cost spinel-based composite ceramic membrane support to achieve its stabilization / L. Li [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2015. – Vol. 287. – P. 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.011>
8. Glass frit sealing method for macroscopic defects in Pd-based composite membranes with application in catalytic membrane reactors / S.T.B. Lundin [et al.] // *Separation and Purification Technology*. – 2017. – Vol. 172. – P. 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.041>
9. High-performance macro-porous alumina-mullite ceramic membrane supports fabricated by employing coarse alumina and colloidal silica / J. Ma [et al.] // *Ceramics International*. – 2019. – Vol. 45, N 14. – P. 17946–17954. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.012>
10. Effects of pore structure on thermal conductivity and strength of alumina porous ceramics using carbon black as pore-forming agent / J. Liu [et al.] // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42. – P. 8221–8228. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.02.032>
11. Ohji, T. Macro-porous ceramics: processing and properties / T. Ohji, M. Fukushima // *International Materials Review*. – 2013. – Vol. 57. – P. 115–131. <https://doi.org/10.1179/1743280411y.0000000006>
12. Permeability Asymmetry in Composite Porous Ceramic Membranes / I. M. Kurcharov [et al.] // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 72. – P. 156–161. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.045>
13. Ivanets, A. I. Ceramic microfiltration membranes based on natural silica / A. I. Ivanets, V. E. Agabekov // *Petroleum Chemistry*. – 2017. – Vol. 57. – P. 117–126. <https://doi.org/10.1134/s0965544117020037>
14. Preparation and properties of microfiltration membranes based on natural crystalline SiO₂ / A. I. Ivanets [et al.] // *Ceramics International*. – 2014. – Vol. 40. – P. 12343–12351. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.04.080>
15. Effect of phase composition of natural quartz raw material on characterization of microfiltration ceramic membranes / A. I. Ivanets [et al.] // *Ceramics International*. – 2016. – Vol. 42. – P. 16571–16578. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.077>
16. Elaboration of new ceramic membrane from spherical fly ash for microfiltration of rigid particle suspension and oil-in water emulsion / J. Fang [et al.] // *Desalination*. – 2013. – Vol. 311. – P. 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.11.008>
17. Brock, T. D. *Membrane Filtration* / T. D. Brock. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1983. – 381 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08650-6>
18. Samaei, S. M. The application of pressure-driven ceramic membrane technology for the treatment of industrial wastewaters: A review / S. M. Samaei, S. Gato-Trinidad, A. Altaee // *Separation and Purification Technology*. – 2018. – Vol. 200. – P. 198–220. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.02.041>

References

1. He Z., Lyu Z., Gu Q., Zhang L., Wang J. Ceramic-based membranes for water and wastewater treatment. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, vol. 578, pp. 123513. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.074>
2. Goswami K. P., Pugazhenthhi G. Credibility of polymeric and ceramic membrane filtration in the removal of bacteria and virus from water: A review. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 268, pp. 110583. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110583>

3. Li C., Sun W., Lu Z., Ao X., Li S. Ceramic nanocomposite membranes and membrane fouling: A review. *Water Research*, 2020, vol. 175, pp. 115674. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115674>
4. Plisko T., Bildyukevich A., Karslyan Ya., Ovcharova A. A., Volkov V. V. Development of high flux ultrafiltration polyphenylsulfone membranes applying the systems with upper and lower critical solution temperatures: Effect of polyethylene glycol molecular weight and coagulation bath temperature. *Journal of Membrane Science*, 2018, vol. 565, pp. 266–280. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.08.038>
5. Kagramanov G. G., Nazarov V. V. Ceramic membranes with selective layers based on SiO₂, TiO₂ and ZrO₂. *Glass and ceramics*, 2001, vol. 58, no. 5/6, pp. 166–168. <https://doi.org/10.1023/a:1012366309705>
6. Emani S., Uppaluri R., Purkait M. K. Cross flow microfiltration of oil–water emulsions using kaolin based low cost ceramic membranes. *Desalination*, 2014, vol. 341, pp. 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.030>
7. Li L., Dong X., Dong Y., Zhu L., You S. J., Wang Y. F. Incorporation of zinc for fabrication of low-cost spinel-based composite ceramic membrane support to achieve its stabilization. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, vol. 287, pp. 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.01.011>
8. Lundin S. T. B., Law J. O., Patki N. S., Wolden C. A., Way J. D. Glass frit sealing method for macroscopic defects in Pd-based composite membranes with application in catalytic membrane reactors. *Separation and Purification Technology*, 2017, vol. 172, pp. 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.041>
9. Ma J., Xi X., He C., Chen W., Tian W., Li J., Wang C., Luo B., Shui A., Hua K. High-performance macro-porous alumina-mullite ceramic membrane supports fabricated by employing coarse alumina and colloidal silica. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, pp. 17946–17954. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.012>
10. Liu J., Li Y., Li Y., Sang S., Li S. Effects of pore structure on thermal conductivity and strength of alumina porous ceramics using carbon black as poreforming agent. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, pp. 8221–8228. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.02.032>
11. Ohji T., Fukushima M. Macro-porous ceramics: processing and properties. *International Materials Review*, 2013, vol. 57, pp. 115–131. <https://doi.org/10.1179/1743280411y.00000000006>
12. Kurcharov I. M., Laguntsov N. I., Uvarov V. I., Kurchatova O.V. Permeability Asymmetry in Composite Porous Ceramic Membranes. *Physics Procedia*, 2015, vol. 72, pp. 156–161. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.045>
13. Ivanets A. I., Agabekov V. E. Ceramic microfiltration membranes based on natural silica. *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, pp. 117–126. <https://doi.org/10.1134/s0965544117020037>
14. Ivanets A. I., Rat'ko A. I., Azarova T. A., Azarov S. M., Al-Khowaiter S. H., Al-Harbi O., Shemchonok S. V., Dobysh V. A., Tarasevich V. A., Agabekov V. E., Rat'ko A. A. Preparation and properties of microfiltration membranes based on natural crystalline SiO₂. *Ceramics International*, 2014, vol. 40, pp. 12343–12351. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.04.080>
15. Ivanets A. I., Azarova T. A., Agabekov V. E., Azarov S. M., Batsukh Ch., Batsuren D., Prozorovich V. G., Rat'ko A. A. Effect of phase composition of natural quartz raw material on characterization of microfiltration ceramic membranes. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, pp. 16571–16578. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.077>
16. Fang J., Qin G., Wei W., Zhao X., Jiang L. Elaboration of new ceramic membrane from spherical fly ash for micro-filtration of rigid particle suspension and oil-in water emulsion. *Desalination*, 2013, vol. 311, pp. 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.11.008>
17. Brock T. D. *Membrane Filtration*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1983. 381 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08650-6>
18. Samaei S. M., Gato-Trinidad S., Altae A. The application of pressure-driven ceramic membrane technology for the treatment of industrial wastewaters – A review. *Separation and Purification Technology*, 2018, vol. 200, pp. 198–220. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.02.041>

Информация об авторе

Иванец Андрей Иванович – д-р хим. наук, доцент, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: andreiivanets@yandex.ru

Information about the author

Andrei I. Ivanets – D. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andreiivanets@yandex.ru