

EDN: BVYFOE

УДК 66.067.124

## High Strength Porous Ceramics Based on Disperse Microspheres of Fly Ash and Pearlite

Galina V. Akimochkina<sup>a</sup>, Elena V. Fomenko<sup>\*a</sup>,  
Nataliia P. Fadeeva<sup>a, b</sup>, Ivan A. Kharchenko<sup>b</sup>, Iliia I. Ryzhkov<sup>b</sup>,  
Mikhail V. Pavlov<sup>c</sup>, Viacheslav F. Pavlov<sup>c</sup> and Aleksandr G. Anshits<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS*

<sup>b</sup>*Institute of Computational Modeling SB RAS*

<sup>c</sup>*Institute of Space Technologies, FRC KSC SB RAS  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 24.05.2024, received in revised form 04.07.2024, accepted 30.07.2024

**Abstract.** New high-strength ceramic materials with improved microstructure have been developed based on a narrow fraction of dispersed microspheres with  $d_{av} = 9 \mu\text{m}$  and  $d_{99} = 27 \mu\text{m}$ , separated from fly ash from pulverized coal combustion, and the perlite fraction with  $d_{av} = 14 \mu\text{m}$  and  $d_{99} = 49 \mu\text{m}$ , obtained by grinding natural raw resources. Determination of the physicochemical characteristics of the resulting materials, including open porosity, acid resistance, liquid permeability, and strength properties, showed that they are promising for use as filtration membranes. The degree of purification during microfiltration of aqueous suspensions was  $\sim 100 \%$ . The research results can be used to create resource-saving technologies for the integrated processing of large-scale thermal energy waste, purification of liquid and gaseous media in various industries.

**Keywords:** dispersed microspheres, fly ash, perlite, ceramic materials, filtration membranes.

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the state assignment of ICCT SB RAS (project No. FWES-2021–0013), IST FRC KSC SB RAS (project No. FWES-2021–0029), FRC KSC SB RAS (project No. FWES-2024–0032) using the equipment of the Krasnoyarsk Regional Center for Collective Use of FRC KSC SB RAS.

Citation: Akimochkina G. V., Fomenko E. V., Fadeeva N. P., Kharchenko I. A., Ryzhkov I. I., Pavlov M. V., Pavlov V. F., Anshits A. G. High strength porous ceramics based on disperse microspheres of fly ash and perlite. J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2024, 17(3), 339–349. EDN: BVYFOE



## Высокопрочная пористая керамика на основе дисперсных микросфер летучих зол и перлита

Г. В. Акимочкина<sup>а</sup>, Е. В. Фоменко<sup>а</sup>, Н. П. Фадеева<sup>а, б</sup>, И. А. Харченко<sup>б</sup>,  
И. И. Рыжков<sup>б</sup>, М. В. Павлов<sup>в</sup>, В. Ф. Павлов<sup>в</sup>, А. Г. Аншиц<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт химии и химической технологии СО РАН

<sup>б</sup> Институт вычислительного моделирования СО РАН

<sup>в</sup> Институт космических технологий ФИЦ КНЦ СО РАН  
Российская Федерация, Красноярск

**Аннотация.** На основе узкой фракции дисперсных микросфер с  $d_{cp} = 9$  мкм и  $d_{99} = 27$  мкм, выделенной из золы-уноса от пылевидного сжигания угля, и фракции перлита с  $d_{cp} = 14$  мкм и  $d_{99} = 49$  мкм, полученной измельчением природного сырья, получены новые высокопрочные керамические материалы с улучшенной микроструктурой. Определение физико-химических характеристик полученных материалов, включая открытую пористость, кислотостойкость, жидкостную проницаемость, прочностные свойства, показало, что они являются перспективными для применения в качестве фильтрационных мембран. Степень очистки при микрофильтрации водных суспензий составила  $\sim 100\%$ . Результаты исследований могут быть использованы при создании ресурсосберегающих технологий комплексной переработки крупнотоннажных отходов тепловой энергетики, очистки жидких и газовых сред в различных отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** дисперсные микросферы, летучая зола, перлит, керамические материалы, фильтрационные мембраны.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность Мазуровой Е. В. за проведение СЭМ-ЭДС исследований образцов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХХТ СО РАН (проект № FWES-2021–0013), ИКТ ФИЦ КНЦ СО РАН (проект № FWES-2021–0029), ФИЦ КНЦ СО РАН (проект № FWES-2024–0032) с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

Цитирование: Акимочкина Г. В., Фоменко Е. В., Фадеева Н. П., Харченко И. А., Рыжков И. И., Павлов М. В., Павлов В. Ф., Аншиц А. Г. Высокопрочная пористая керамика на основе дисперсных микросфер летучих зол и перлита. Журн. Сиб. федер. ун-та. Химия, 2024, 17(3). С. 339–349. EDN: BVYFOE

### Введение

Тепловые электростанции, вырабатывая энергию в процессе пылевидного сжигания угля, образуют большие объемы зольных отходов и занимают одно из ведущих мест среди загрязнителей по выбросам и размещению техногенных отходов. Основным направлением снижения негативного воздействия деятельности ТЭС на окружающую среду является повышение эффективности улавливания твердых аэрозольных частиц и уровня утилизации зол [1]. Со-

став летучих зол неоднороден и значительно варьируется, поэтому утилизация исходных зол без предварительной классификации традиционно включает крупнотоннажное использование в строительной индустрии, сельском хозяйстве, автодорожном строительстве [2–5]. Для определения областей масштабного применения зол обычно используется простая классификация по макрокомпонентному химическому составу согласно стандарту ASTM C 618, в котором регламентированы два класса летучих зол: класс F (алюмокремнистая) и класса С (высококальциевая). Алюмокремнистые золы можно использовать в качестве пуццолановых добавок к цементам и бетонам, заполнителей в дорожных основаниях, при получении огнеупорных, водо- и кислотостойких материалов. Высококальциевые золы применимы как компонент клинкера и активная добавка при производстве портландцемента, частичный заместитель цемента и добавка в бетонных изделиях, строительных растворах, сухих вяжущих смесях, для нейтрализации кислых почв, стабилизации грунтов [2–5].

Качественное разделение летучих зол на фракции определенного размера и состава [6–8] позволяет превратить крупнотоннажные отходы теплоэнергетики в ценное минеральное сырье техногенного происхождения [9–11]. В частности, при разработке керамических материалов с определенными свойствами в зависимости от предназначения на основе фракций дисперсных микросфер  $PM_{2.5}$  высококальциевых летучих зол получены хорошо консолидированные образцы шпинелевой керамики с магнитными свойствами, открытой пористостью 4 %, кажущейся плотностью 3,2 г/см<sup>3</sup>, прочностью при сжатии 100 МПа [10]. Из фракций дисперсных микросфер летучих зол алюмокремнистого типа получены керамические пористые подложки для фильтрационных мембран с открытой пористостью 24 %, кажущейся плотностью 1,9 г/см<sup>3</sup>, прочностью 159 МПа, степень очистки при микрофильтрации водных суспензий составила ~100 % [11].

Перспективность дисперсных микросфер для получения керамических фильтрационных мембран [12–15] определяется составом зольных частиц, включающим макрокомпоненты  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ , высоким содержанием стеклофазы, морфологией и микроструктурой частиц порошкового образца [16–18]. Основными критериями при получении керамических мембран являются их технические характеристики – пористость, прочность, проницаемость, химическая стойкость и экономические показатели. Использование техногенных отходов позволяет существенно снизить стоимость фильтрационных и мембранно-разделительных материалов на их основе.

Целью данной работы является разработка новых высокопрочных пористых керамических материалов на основе фракций дисперсных микросфер летучих зол алюмокремнистого типа и перлита, перспективных для применения в качестве микрофильтрационных мембран. Выбор исходного сырья обусловлен возможностью использования крупнотоннажных дисперсных отходов и доступностью природных ресурсов для получения композиционных материалов с улучшенной микроструктурой, высокой механической прочностью, термической и химической устойчивостью.

### Материалы и методы

Для получения керамических материалов использовали два типа исходного сырья: техногенные отходы от промышленного пылевидного сжигания угля – узкая фракция дисперсных микросфер летучих зол, и доступное природное сырье вулканического происхождения – фракция измельченного перлита. Фракции дисперсных зольных микросфер и измельченного пер-

лита были охарактеризованы распределением частиц по размеру, определены их химический и фазовый составы [6, 7, 19].

Немагнитную узкую фракцию дисперсных микросфер получали в процессе одностадийного аэродинамического разделения золы-уноса от пылевидного сжигания каменного угля с последующей магнитной сепарацией. Аэродинамическое разделение было реализовано на центробежном лабораторном классификаторе 50 АТР (Hosokawa Alpine, Германия). Подробно схема классификатора и принцип его действия изложены в работах [6, 7, 19]. Магнитную сепарацию выполняли в дистиллированной воде с использованием неодимового магнита (NdFeB, F = 24 lb). Для удаления из немагнитной фракции дисперсных микросфер частиц несгоревшего углерода, присутствующего в золах от сжигания угля, образцы отжигали при 815 °С в окислительной атмосфере в течение 1 часа по методике определения зольности [20].

Порошковая фракция перлита <50 мкм получена в результате измельчения частиц природного перлита размером от 0,63 до 0,16 мм в мельнице МЛШ-КМ-1 (г. Лейпциг, Германия) с последующим отсевом на виброприводе (ООО Вибротехник, г. Санкт-Петербург, Россия), использовалось сито с ячейкой 0,05 мм, длительность рассева составляла 30 минут, частота – 70 Гц.

Немагнитная фракция дисперсных микросфер характеризуется узким распределением глобул по размеру (рис. 1а) со следующими характеристиками (мкм):  $d_{cp} = 9$ ,  $d_{10} = 2$ ,  $d_{50} = 9$ ,  $d_{90} = 18$ ,  $d_{99} = 27$ . На рис. 2а представлен СЭМ-снимок узкой фракции. Большая часть частиц имеют сферическую форму с гладкой поверхностью. Макрокомпонентный состав фракции дисперсных микросфер представлен (мас.%): SiO<sub>2</sub>–53,7, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–24,5, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–7,7, CaO – 4,1, MgO – 0,6, Na<sub>2</sub>O – 0,1, K<sub>2</sub>O – 2,4. Фазовый состав включает 91 мас.% рентгеноаморфной стеклофазы алюмосиликатного состава, из кристаллических фаз идентифицирован муллит и кварц, на уровне примесей присутствуют гематит и кальцит.

Распределение частиц по размеру для фракции измельченного перлита показано на рис. 1б:  $d_{cp} = 14$ ,  $d_{10} = 1$ ,  $d_{50} = 11$ ,  $d_{90} = 33$ ,  $d_{99} = 49$  мкм. СЭМ-снимок фракции перлита приведен на рис. 2б. Частицы представляют собой угловатые конгломераты неправильной формы. Химический состав перлита (мас.%): SiO<sub>2</sub>–76,0, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–11,7, K<sub>2</sub>O – 6,4, Na<sub>2</sub>O – 2,4, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–1,3, CaO – 1,1. По данным РФА образец перлита является рентгеноаморфным.

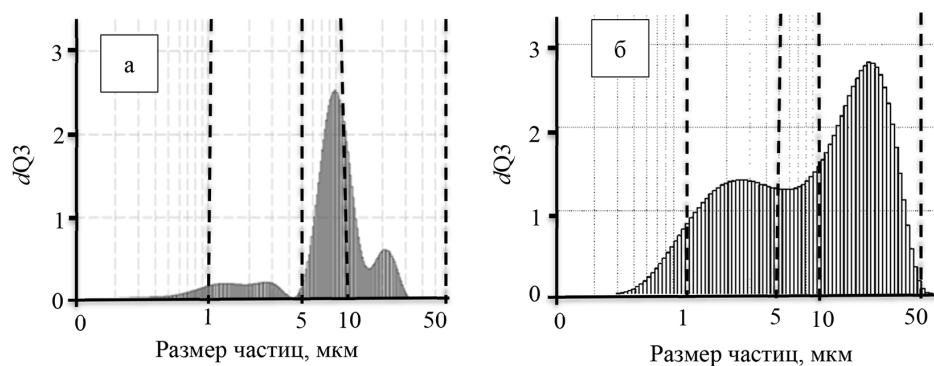


Рис. 1. Распределение частиц по размеру в дифференциальной  $dQ3(x)$  форме для фракций дисперсных микросфер (а) и перлита (б)

Fig. 1. Particle size distribution in differential  $dQ3(x)$  form for fractions of dispersed microspheres (a) and pearlite (b)

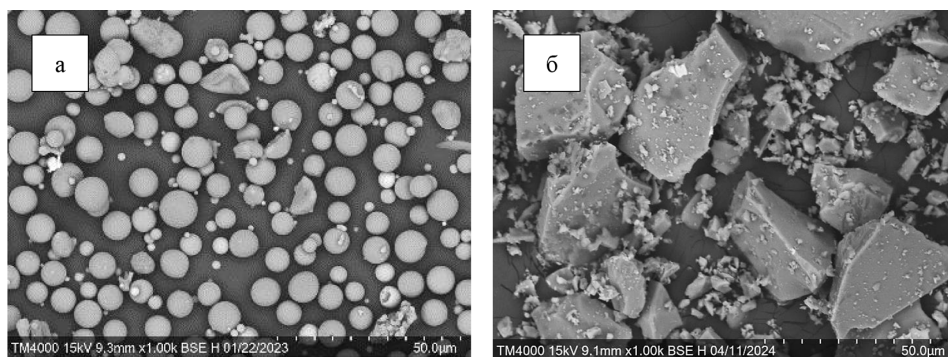


Рис. 2. СЭМ-снимки фракций дисперсных микросфер (а) и перлита (б)

Fig. 2. SEM images of fractions of dispersed microspheres (a) and pearlite (b)

Получение керамических материалов осуществлялось на основе следующих составов исходного сырья: (а) 100 % узкая фракция дисперсных зольных микросфер, (б) 100 % фракция измельченного перлита –0.05 мм, (в) композиция фракций «дисперсные микросферы / перлит» при соотношении компонентов 1:1. Формирование образцов плоских керамических мембран осуществляли методом компактирования порошковых материалов путем холодного статического одноосного прессования с последующим высокотемпературным обжигом [21]. Плоские мембраны диаметром 28 мм и толщиной 4 мм были получены при давлении 40 МПа в закрытой жесткой пресс-форме с добавлением 10 % дистиллированной воды. Перед спеканием в муфеле спрессованные образцы сушили при температуре 115 °С в течение 1 часа для удаления влаги. Обжиг в муфельной печи проводили при температуре 1000 и 1020 °С с выдержкой в течение 2 часов. Выбор данных температур обжига осуществлен после предварительных экспериментов, которые показали, что прокалка трех исследуемых составов при 900 °С не позволяет получить хорошо консолидированные материалы, пригодные для последующего определения их характеристик. После температурной обработки при 1050 °С образцы представляют собой сильно оплавленные монолиты, не представляющие интерес для применения в качестве фильтрационных мембран по причине отсутствия открытой пористости.

Исследования морфологии порошковых образцов и керамических материалов выполняли на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM4000 Plus (Япония) в режиме обратно отраженных электронов при ускоряющих напряжениях 15 и 20 кВ. Химический состав образцов определяли методом СЭМ-ЭДС с применением сканирующего электронного микроскопа TM-4000 (Hitachi, Japan), оснащенного системой микроанализа Quantax 70 с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (ЭДС) Bruker XFlash 430H по методике [22].

Для керамических материалов были определены стандартные характеристики согласно соответствующим ГОСТам [23–26], устанавливающим методики определения, аппаратное оформление и метрологические нормы точности: кажущаяся плотность, открытая пористость, предел прочности при сжатии, кислотостойкость. Кажущаяся плотность ( $\text{г/см}^3$ ) определяется как отношение массы образца ( $\text{г}$ ) к его общему объему ( $\text{см}^3$ ) согласно ГОСТ 7025–91 [23]. Открытая пористость (%) – это отношение объема доступных пор в образце к его общему объему, объем доступных пор определяется путем водонасыщения материала согласно ГОСТ

2409–2014 [24]. Предел прочности при сжатии (МПа)  $\sigma_{сж} = F/S$  – напряжение, соответствующее сжимающей нагрузке, при которой происходит разрушение испытуемого образца цилиндрической формы диаметром 10 мм и высотой 15 мм, рассчитывается как отношение разрушающей нагрузки  $F$  (Н) к площади поперечного сечения образца  $S$  (мм<sup>2</sup>) согласно ГОСТ 24409–80 [25]; значение  $F$  определялось на лабораторном гидравлическом прессе #4350 (Carver, США). Кислотостойкость (%) определяется по отношению массы измельченного керамического изделия после обработки его 20,4 % раствором соляной кислоты при кипячении в течение 1 часа к массе исходного образца согласно ГОСТ 473.1–2023 [26].

Проницаемость плоских керамических мембран измеряли с помощью установки, прокачивающей дистиллированную воду через мембрану под давлением. Исследование пористой структуры образцов проводили на порометре капиллярного потока Porolux 1000 (Porometer, Бельгия). Подробно методика определения проницаемости и принцип действия порометра описаны в работе [11].

Исследование фильтрационных свойств керамических мембран проводили в лабораторной вакуумной установке для фильтрации. Водная суспензия дисперсных микросфер, выделенных из летучей золы, с  $d_{ср} = 2,5$  мкм (1 г на 150 мл H<sub>2</sub>O) подавалась при атмосферном давлении на исследуемую мембрану, с обратной стороны которой при помощи водоструйного насоса создавалось разрежение.

### Результаты и обсуждение

СЭМ-снимки поперечного слома плоских керамических мембран, полученных при 1000 °С из узкой фракции дисперсных зольных микросфер, фракции измельченного перлита –0.05 мм и композиции из этих фракций при соотношении компонентов «дисперсные микросферы / перлит» = 1:1, приведены на рис. 3. Характеристики полученных в этой работе керамических материалов приведены в табл. 1 в сравнении с литературными данными для материалов из подобного сырья [11, 27]. Следует отметить, что при температуре спекания 1000 °С на основе индивидуальных фракций дисперсных микросфер мёньшего размера и измельченного перлита получены более прочные керамические материалы (табл. 1, № 1, № 2) с прочностью при сжатии 42 и 209 МПа, соответственно, по сравнению с известными керамиками из аналогичного сырья (табл. 1, № 5, № 6), для которых эти показатели составили 9,5 и 50 МПа. При этом значения открытой пористости заметно уменьшились только в случае зольных фракций – от 40 до 26 %, для измельченного перлита – от 29 до 23 %.

По совокупности характеристик лучшие показатели среди исследуемых материалов достигнуты для композиции на основе фракций «дисперсные микросферы / перлит»: открытая пористость 32 %, прочность 114 МПа (табл. 1, № 3). Наблюдаемое увеличение характерных показателей по сравнению с индивидуальными фракциями (табл. 1, № 1, 2) обусловлено формированием улучшенной микроструктуры композитного керамического материала, сочетающей высокую прочность и пористость. Дисперсные зольные микросферы, располагаясь между частицами перлита, образуют определённый структурный каркас (рис. 3) и отвечают за формирование пористой структуры, прочность которой определяется оплавленными при термообработке агрегатами перлита. Увеличение температуры спекания этой композиции до 1020 °С (табл. 1, № 4) приводит к заметному увеличению прочности, однако пористость при этом снижается. Кислотостойкость керамических мембран, полученных при 1000 °С, составляет 98 %.

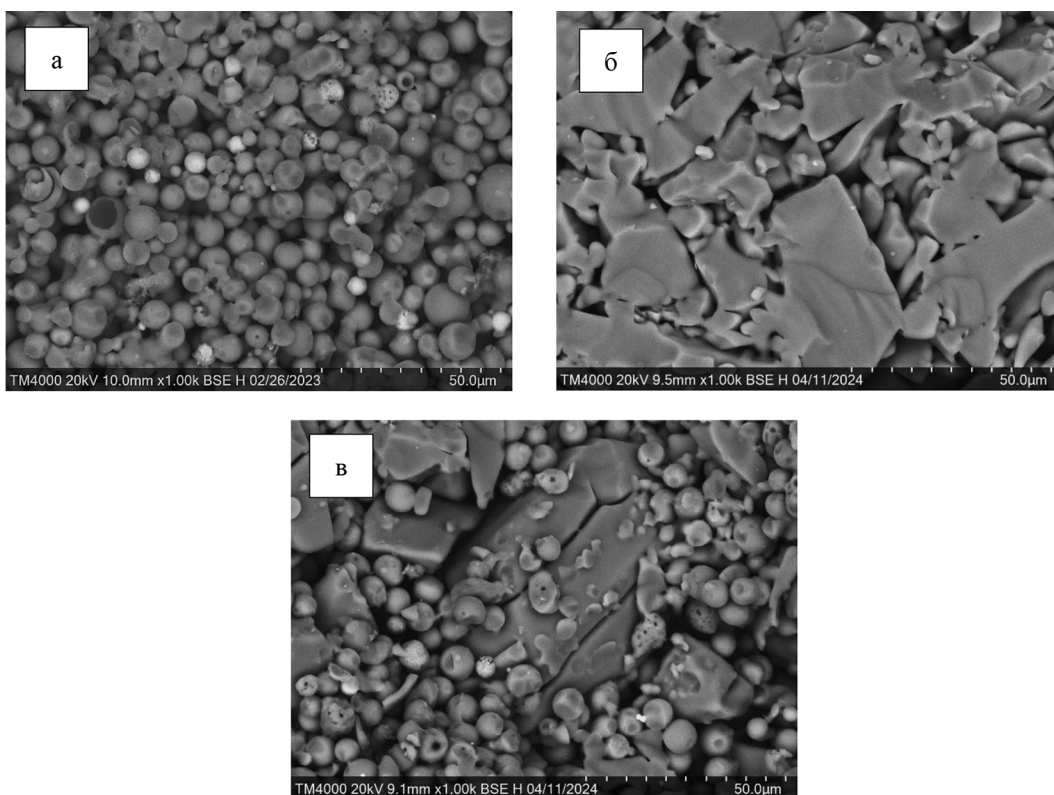


Рис. 3. СЭМ-снимки керамических мембран, полученных при 1000 °С из фракции дисперсных микросфер (а), фракции перлита –0.05 мм (б), композиции фракций «дисперсные микросферы / перлит» = 1:1 (в)

Fig. 3. SEM images of ceramic membranes obtained at 1000 °C from fraction of dispersed microspheres (a), fraction of perlite –0.05 mm (b), composition of fractions "dispersed microspheres / perlite" = 1:1 (c)

Таблица 1. Характеристики керамических материалов на основе фракций дисперсных микросфер летучих зол и перлита, полученных в данной работе (№№ 1–4), в сравнении с литературными данными (№ 5, № 6)

Table 1. Characteristics of ceramic materials based on fraction of dispersed fly ash microspheres and perlite obtained in this work (№№ 1–4), in comparison with literature data (№ 5, № 6)

№	Температура спекания, °С	Материал	Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	Открытая пористость, %	Прочность при сжатии, МПа
1	1000	Узкая фракция дисперсных микросфер $d_{cp} = 9$ мкм, $d_{99} = 27$ мкм	1,4	26	42
2	1000	Фракция измельченного перлита $d_{cp} = 14$ мкм, $d_{99} = 49$ мкм	1,8	23	209
3	1000	Композиция фракций «дисперсные микросферы / перлит» = 1:1	1,6	32	114
4	1020	Композиция фракций «дисперсные микросферы / перлит» = 1:1	1,8	20	253
5	1000 [11]	Узкая фракция дисперсных микросфер $d_{cp} = 14$ мкм, $d_{99} = 32$ мкм	1,35	40	9,5
6	900–1100 [27]	Фракция перлита 70–300 мкм	–	29	50

На рис. 4 представлены распределения пор по размерам для керамических мембран, полученных при 1000 °С. Из зольной фракции дисперсных микросфер с характерно узким распределением частиц по размерам (рис. 1а) получена керамика со сквозными порами в узком диапазоне (рис. 4а). Керамика из фракции перлита характеризуется порами в широком диапазоне (рис. 4б), как и частицы исходного сырья (рис. 1б). Для керамического материала из композиции фракций «дисперсные микросферы / перлит» характерна бимодальная пористая структура (рис. 5в). Минимальный, средний и максимальный размер сквозных пор в полученных керамических материалах приведен в табл. 2. При близком  $D_{\min}$  и  $D_{\text{ср}}$  наблюдается увеличение  $D_{\max}$  сквозных пор для образцов из фракции перлита и композиции фракций по сравнению с керамикой из фракции дисперсными микросферами.

На рис. 5 приведены зависимости объемного потока воды через полученные керамические мембраны при давлении 1 атм. Наибольшие значения объемного потока наблюдаются для композиции на основе фракций «дисперсные микросферы / перлит», синтезированной при 1000 °С, а наименьшее – для этой же композиции, но полученной при 1020 °С, что хорошо согласуется с данными по открытой пористости (табл. 1).

Для определения фильтрующей способности полученных керамических мембран применялась водная суспензия дисперсных микросфер летучей золы с  $d_{\text{ср}} = 2,5$  мкм. В процессе

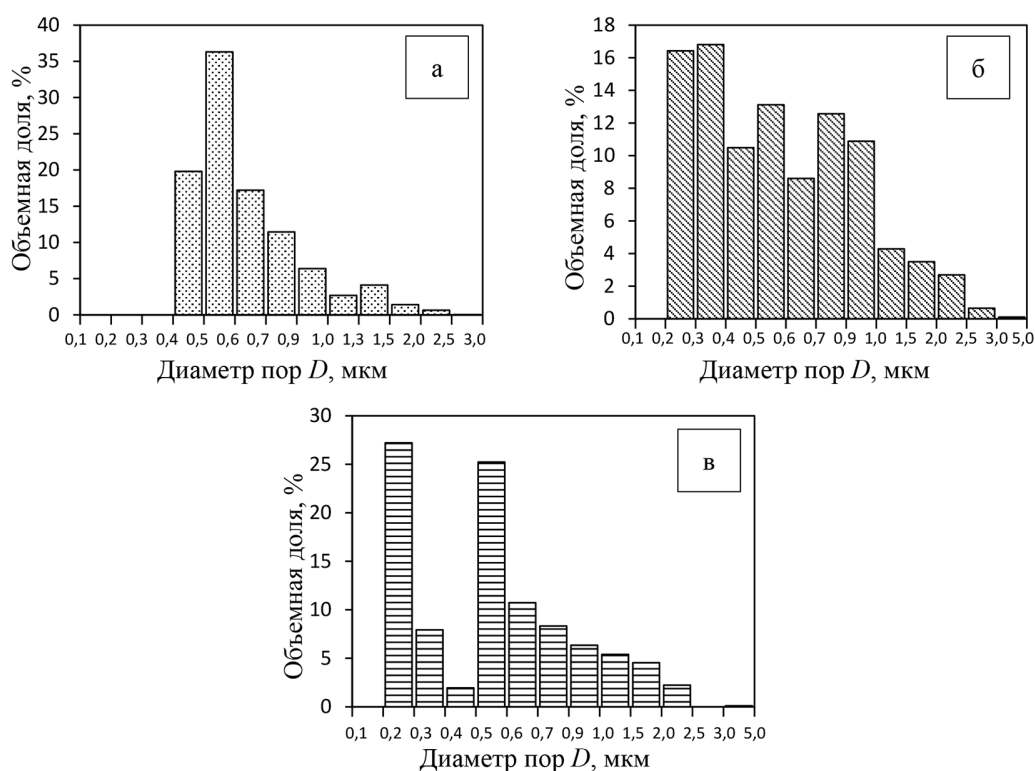


Рис. 4. Распределение пор по размеру для керамических мембран, полученных при 1000 °С из фракции дисперсных микросфер (а), фракции перлита –0.05 мм (б), композиции фракций «дисперсные микросферы / перлит» = 1:1 (в)

Fig. 4. Pore size distribution for ceramic membranes obtained at 1000 °С from fraction of dispersed microspheres (а), perlite fraction –0.05 mm (б), composition of fractions “dispersed microspheres / perlite” = 1:1 (с)



Таблица 2. Минимальный, средний и максимальны размер пор (мкм) в керамических материалах, полученных при 1000 °С из фракций дисперсных микросфер и перлита

Table 2. Minimum, average and maximum pore sizes ( $\mu\text{m}$ ) in ceramic materials obtained at 1000 °C from fractions of dispersed microspheres and perlite

Материал	$D_{\min}$	$D_{\text{cp}}$	$D_{\max}$
Узкая фракция дисперсных зольных микросфер $d_{\text{cp}} = 9 \text{ мкм}$ , $d_{99} = 27 \text{ мкм}$	0,3	0,8	1,9
Фракция измельченного перлита –0.05 мм $d_{\text{cp}} = 14 \text{ мкм}$ , $d_{99} = 49 \text{ мкм}$	0,4	1,2	3,0
Композиция фракций «дисперсные микросферы / перлит» = 1:1	0,3	1,1	4,8

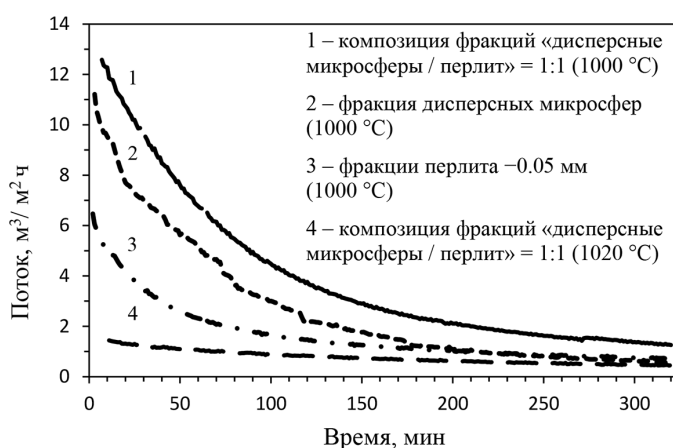


Рис. 5. Зависимость объемного потока воды через керамические мембраны от времени

Fig. 5. Dependence of the volume flow of water through the ceramic membranes

фильтрации твердые частицы были успешно отделены, фильтрованная вода стала прозрачной, степень очистки составила ~100 %. Осаждение твердых частиц происходит на поверхности керамических мембран без проникновения в объем; после механической очистки фильтры пригодны для повторного использования. Средняя скорость фильтрации составила 38 и 46 л/м<sup>2</sup>·ч для мембран, полученных из зольной фракции дисперсных микросфер и композиции фракций «дисперсные микросферы / перлит» соответственно.

### Заключение

На основе фракций дисперсных микросфер летучих зол алюмокремнистого типа и природного перлита получены новые керамические материалы с улучшенной пористой микроструктурой, высокой механической прочностью, термической и химической устойчивостью, перспективные для применения в качестве микрофильтрационных мембран.

## Список литературы / References

- [1] Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 г. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р, <https://minenergo.gov.ru/node/18038> [Energy Strategy of the Russian Federation for the period until 2035, Order of the Government of the Russian Federation No. 1523-r of 09.06.2020, <https://minenergo.gov.ru/node/18038>]
- [2] Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science* 2010. Vol. 36 (3), P. 327–363. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>.
- [3] Blissett R. S., Rowson N. A. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel* 2012. Vol. 97, P. 1–23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.024>.
- [4] Yao Z. T., Ji X. S., Sarker P. K., Tang J. H., Ge L. Q., Xia M. S., Xi Y. Q. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Sci. Rev.* 2015. Vol. 141, P. 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
- [5] Gollakota A. R. K., Volli V., Shu C. M. Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. *Science of the Total Environment* 2019. Vol. 672, P. 951–989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>.
- [6] Fomenko E. V., Anshits N. N., Kushnerova O. A., Akimochkina G. V., Kukhtetskiy S. V., Anshits A. G. Separation of nonmagnetic fine narrow fractions of PM<sub>10</sub> from coal fly ash and their characteristics and mineral precursors. *Energy and Fuels* 2019. Vol. 33(4), P. 3584–3593. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00097>.
- [7] Fomenko E. V., Akimochkina G. V., Anshits A. G. Narrow dispersed fractions of high-calcium fly ash produced from the pulverized combustion of irsha-borodinsky coal. *Thermal Engineering* 2019. Vol. 66 (8), P. 560–568. [https://doi.org/10.1134/S\\_0040601519080020](https://doi.org/10.1134/S_0040601519080020).
- [8] Fomenko E., Anshits N., Akimochkina G., Solovyov L., Kukhtetskiy S., Anshits A. The composition and origin of PM<sub>1-2</sub> microspheres in high-calcium fly ash from pulverized lignite combustion. *Energies* 2022. Vol. 15, P. 5551. <https://doi.org/10.3390/en15155551>
- [9] Akimochkina G. V., Rogovenko E. S., Gareeva A. S., Fomenko E. V. Aerodynamic separation of dispersed microspheres PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> from fly ash of lignite combustion for production of new materials. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry* 2022. Vol. 15 (3), P. 387–397. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0302>
- [10] Fomenko E., Akimochkina G., Knyazev Y., Semenov S., Yumashev V., Solovyov L., Anshits A. Characterization and Magnetic Properties of Sintered Glass-Ceramics from Dispersed Fly Ash Microspheres. *Magnetochemistry* 2023. Vol. 9 (7), P. 177. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry9070177>
- [11] Fomenko E. V., Akimochkina G. V., Anshits A. G., Fadeeva N. P., Kharchenko I. A., Elsuf'ev E. V., Shabanova K. A., Maksimova A. A., Ryzhkov I. I. Ceramic substrates for filtration membranes based on fine fly ash microspheres. *Membranes and Membrane Technologies* 2024. Vol. 6 (2), P. 71–83. [https://doi.org/10.1134/S\\_2517751624020033](https://doi.org/10.1134/S_2517751624020033)
- [12] Abdullayev A., Bekheet M. F., Hanaor D. A. H., Gurlo A. Materials and Applications for Low-Cost Ceramic Membranes. *Membranes* 2019. Vol. 9, P. 105. <https://doi.org/10.3390/membranes9090105>.
- [13] Goswami K. P., Pakshirajan K., Pugazhenth G. Process intensification through waste fly ash conversion and application as ceramic membranes: A review. *Science of the Total Environment* 2022. Vol. 808, P. 151968. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151968>

[14] Huang J., Chen H., Yang J., Zhou T., Zhang H. Effects of particle size on microstructure and mechanical strength of a fly ash based ceramic membrane. *Ceramics International* 2023. Vol. 49 (10), P. 15655–15664. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.157>.

[15] Zhang Z., Yang J., Qi R., Huang J., Chen H., Zhang H. Development of hydrophobic coal-fly-ash-based ceramic membrane for vacuum membrane distillation. *Materials* 2023. Vol. 16, P. 3153. <https://doi.org/10.3390/ma16083153>

[16] Erol M., Kücükbayrak S., Ersoy-Mericboyu A. Comparison of the properties of glass, glass-ceramic and ceramic materials produced from coal fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 2008. Vol. 153 (1–2), P. 418–425. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.08.071>

[17] Wang S., Zhang C., Chen J. Utilization of coal fly ash for the production of glass-ceramics with unique performances: A brief review. *Journal of Materials Science and Technology* 2014. Vol. 30 (12), P. 1208–1212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2014.10.005>

[18] Choo T.F., Mohd Salleh M.A., Kok K.Y., Matori K.A., Abdul Rashid S. A Study on the Utilization of Coal Fly Ash Derived Grog in Clay Ceramics. *Materials* 2020. Vol. 13, P. 5218. <https://doi.org/10.3390/ma13225218>

[19] Kushnerova O. A., Akimochkina G. V., Fomenko E. V., Rabchevskii E. V., Anshits A. G. Single-stage aerodynamic separation of fly ash produced after pulverized combustion of coal from the Ekibastuz basin. *Solid Fuel Chemistry* 2018. V. 52, P. 188–200. [https://doi.org/10.3103/S\\_0361521918030059](https://doi.org/10.3103/S_0361521918030059)

[20] ГОСТ Р 55661–2013. Топливо твердое минеральное. Определение зольности. М., 2014. [GOST P 55661–2013. Solid mineral fuel. Determination of ash content. M., 2014. (In Russ)]

[21] Glass S.J., Ewsuk K.G. Ceramic Powder Compaction. *MRS Bulletin* 1997. Vol. 22 (12), P. 24–28. [https://doi.org/10.1557/S\\_0883769400034709](https://doi.org/10.1557/S_0883769400034709)

[22] Fomenko E. V., Anshits N. N., Solovyov L. A., Knyazev Y. V., Semenov S. V., Bayukov O. A., Anshits A. G. Magnetic fractions of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>2.5–10</sub>, and PM<sub>10</sub> from coal fly ash as environmental pollutants. *ACS Omega* 2021. Vol. 6 (30), P. 20076–20085. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03187>

[23] ГОСТ 7025–91. Кирпич и камни керамические и силикатные. М., 2006. [GOST 7025–91. Bricks and stones ceramic and silicate. M., 2006. (In Russ)]

[24] ГОСТ 2409–2014. Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. М., 2014. [GOST 2409–2014. Refractories. Method for determination of apparent density, open and total porosity, water absorption. M., 2014. (In Russ)]

[25] ГОСТ 24409–80. Материалы керамические электротехнические. Методы испытаний. М., 1986. [GOST 24409–80. Ceramic electrotechnical materials. Test methods. M., 1986. (In Russ)]

[26] ГОСТ 473.1–2023. Изделия химически стойкие и термостойкие керамические. Метод определения кислотостойкости. М., 2023. [GOST 473.1–2023. Chemical-resistant and heat-resistant ceramic products. Method for determination of acid resistance. M., 2023. (In Russ)]

[27] Фадеева Н. П., Павлов М. В., Харченко И. А., Симунин М. М., Шабанова К. А., Павлов В. Ф., Рыжков И. И. Высокопрочные керамические подложки на основе перлита и пеносиликатов для фильтрационных мембран. *Мембраны и мембранные технологии* 2022. Т. 12 (3), с. 192–199. [https://doi.org/10.31857/S\\_221811722203004X](https://doi.org/10.31857/S_221811722203004X) [Fadeeva N. P., Pavlov M. V., Kharchenko I. A., Simunin M. M., Shabanova K. A., Pavlov V. F., Ryzhkov I. I. High-strength ceramic substrates based on perlite and foam silicates for filtration membranes. *Membranes and Membrane Technologies* 2022. Vol. 12 (3), P. 192–199. (In Russ)]