

УДК 665.662

## ВЫСОКОПРОЧНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОДЛОЖКИ НА ОСНОВЕ ПЕРЛИТА И ПЕНОСИЛИКАТОВ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН

© 2022 г. Н. П. Фадеева<sup>a, b</sup>, М. В. Павлов<sup>c</sup>, И. А. Харченко<sup>a, f</sup>, М. М. Симунин<sup>d, e</sup>,  
К. А. Шабанова<sup>f</sup>, В. Ф. Павлов<sup>c</sup>, И. И. Рыжков<sup>a, e, \*</sup>

<sup>a</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН, Академгородок 50, стр. 44, Красноярск, 660036 Россия

<sup>b</sup>Институт химии и химической технологии СО РАН, Академгородок 50, стр. 24, Красноярск, 660036 Россия

<sup>c</sup>Специализированное конструкторско-технологическое бюро “Наука” ФИЦ КНЦ СО РАН,  
Академгородок 50, стр. 45, Красноярск, 660036 Россия

<sup>d</sup>Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр СО РАН”,  
Академгородок 50, Красноярск, 660036 Россия

<sup>e</sup>Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041 Россия

<sup>f</sup>Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Академгородок 50, стр. 38, Красноярск, 660036 Россия

\*e-mail: rii@icm.krasn.ru

Поступила в редакцию 28.12.2021 г.

После доработки 18.01.2022 г.

Принята к публикации 09.02.2022 г.

Получены образцы двухслойных керамик на основе полидисперсного порошка минерала перлита и пеносиликатов, обладающие высокой прочностью на сжатие до 50 МПа, термической устойчивостью до 1150°C и проницаемостью по воде 272 м<sup>3</sup>/ч м<sup>2</sup> бар. Материал несущей подложки является рентгеноаморфным по данным рентгенофазового анализа. Средний размер пор несущей подложки составляет 40 мкм, а средний размер пор модифицирующего слоя – 17 мкм по данным метода пузырька и электронной микроскопии. Полученные материалы являются перспективными для использования в качестве подложек при создании микро-, ультра- и нанофильтрационных мембран.

**Ключевые слова:** перлит, пеносиликат, керамические мембраны, подложки, проницаемость по воде

**DOI:** 10.31857/S221811722203004X

### ВВЕДЕНИЕ

Пористые керамические материалы находят широкое применение в мембранных технологиях разделения смесей и получения чистых веществ, а также каталитических процессах очистки [1]. Одним из наиболее важных приложений керамических мембран является водоподготовка и очистка сточных вод [2, 3]. По сравнению с полимерными, керамические материалы имеют большую механическую прочность, химическую и биологическую устойчивость, стабильность в широком диапазоне температур и более продолжительный срок службы [4]. Кроме этого, они зачастую характеризуются более узким распределением пор по размеру и большей пористостью.

В баромембранных процессах (микро-, ультра- и нанофильтрация) используются многослойные керамические мембраны, в которых размер пор и толщина слоя уменьшаются при переходе от слоя к слою [5, 6]. В качестве основы (подложки) применяют крупнопористую керамику, на поверхности которой послойно формируют мак-

ро- и мезопористые покрытия. Для фильтрационных приложений основными характеристиками подложки являются пористость, механическая прочность и жидкостная проницаемость. Разработка керамических материалов с оптимальным сочетанием указанных свойств является одной из актуальных задач мембранной науки [7].

Ранее в работах [8, 9] были предложены керамические мембраны-подложки на основе порошка марокканского перлита с органическими добавками и водой, обладающие высокой термостойкостью до 1000°C и пористостью до 40%. Нанесение микрофильтрационного слоя методом шликерного литья из более дисперсного порошка перлита позволило добиться высокого сцепления с подложкой. Показано, что полученные мембраны обеспечивали задержание коллоидных красителей, используемых в кожевенной и текстильной промышленности, а также частиц в водных суспензиях, получаемых в процессе резки кремниевых панелей. В работах [10–12] были получены высокопористые проницаемые керамические материалы трубчатой формы с макропори-

**Таблица 1.** Распределение масс частиц порошка перлита в граммах по размерам

Размеры ячеек сит, мм	Содержание, мас. %.
+0.315	5.0
-0.315 + 0.2	17.5
-0.2 + 0.16	19.9
-0.16 + 0.1	26.2
-0.1 + 0.071	10.7
-0.071 + 0.044	9.0
-0.044 + 0	11.7

стым поверхностным слоем. В качестве исходного материала использовался порошок кристаллического диоксида кремния и применялось алюмосиликатное связующее. Показано, что полученные материалы характеризуются высокой проницаемостью и механической прочностью, гидролитической и кислотной устойчивостью, а также могут эффективно использоваться для удаления ионов трехвалентного железа [13]. Модификация полученных мембран путем нанесения мезопористых селективных слоев с помощью золь-гель метода была осуществлена в работе [14]. Авторы работы [15] разработали методику получения микро- и ультрафильтрационных мембран с использованием суспензий на основе водных и спиртово-водных растворов карбоксиметилцеллюлозы, осаждаемых на алюмосиликатную подложку. Возможность получения нанопористых мембран путем нанесения нанопорошков оксидов титана, алюминия и магния на керамические подложки с макропорами была продемонстрирована в [16]. Методика создания каталитических слоев из оксидов церия и циркония на поверхности трубчатых микрофильтрационных мембранах разработана в [17]. Следует также отметить работу [18], где были получены асимметричные керамические мембраны с промежуточным и активным слоями на основе нановолокон оксида титана и бемита. Использование нановолокнистых материалов приводит к существенному увеличению проницаемости по сравнению с традиционными методиками на основе сферических наночастиц. Симметричные керамические мембраны на основе нановолокон оксида алюминия с проводящим углеродным покрытием были предложены в [19]. Продемонстрирована возможность изменения ионной селективности мембран путем варьирования электрического потенциала, приложенного к проводящей поверхности [20, 21]. Однако, применение подобных технологий в фильтрационных процессах требует размещения проводящего селективного слоя на прочной макропористой подложке.

Целью данной работы является разработка новых типов высокопрочных керамических материалов на основе перлита и пеносиликатов для применения в качестве подложек при создании микро-, ультра- и нанопористых мембран. Выбор исходных материалов обусловлен их высокой термостойкостью, механической прочностью и химической инертностью к слабым кислотам и слабым щелочам. Важным аспектом является коммерческая доступность и распространенность перлита, а также экологичность пеносиликата – материала, полученного в результате переработки техногенного сырья [22, 23]. Проведена характеристика полученных образцов керамик, исследованы их прочностные свойства и проницаемость по воде.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного материала для формирования макропористой подложки использовался перлит следующего химического состава, мас. %: SiO<sub>2</sub> – 76.0, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 11.7, Na<sub>2</sub>O – 2.41, Cl – 0.64, K<sub>2</sub>O – 6.38, CaO – 1.13, TiO<sub>2</sub> – 0.19, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 1.33. Образцы массой 2 г, диаметром 26 мм и высотой 3 мм были сформованы из полидисперсного порошка перлита фракций 0.315–0.044 мм, прошедших через сита, указанные в табл. 1 при усилии прессования 10 кН на установке ИР-5047-50-03 (ОАО “Точприбор”, г. Иваново). В качестве связующего материала использовалась вода в количестве 5 мас. %. Гранулометрическое распределение частиц порошка определяли методом ситового анализа ГОСТ 9758-86 [24].

Обжиг образцов подложек проводили в электропечи типа ВТП 06 М1 00 (ЗАО “ИЭЦ ВНИИ-ЭТО”, г. Истра) при температуре 1100°С с выдержкой 20 мин при заданной температуре в атмосфере печи. Модифицирующий слой пеносиликата наносили накатыванием порошка на подложку с последующей термообработкой при 900°С. Порошок пеносиликата состоял из частиц правильной сферической формы размером 10–20 мкм.

Рентгенофазовый анализ исходного порошка перлита и образцов пористой керамики, полученных после термообработки, проводили на установке ДРОН-3 (АО “ИЦ Буревестник”, г. Санкт-Петербург) с использованием CuKα излучения в диапазоне углов 2θ 10°–70°. Термоаналитические измерения проводились на оборудовании STA-449C компании NETZSCH (Германия) с использованием дифференциально сканирующей калориметрии (DSC) с одновременным измерением изменения массы образца и теплового потока, а также регистрацией масс-спектров выделяемых газов (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O).

Структуру поверхности, морфологию, а также линейные размеры элементов микро рельефа ско-

лов пористых образцов керамики оценивали при помощи сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM4000 Plus (Япония) в режиме обратно отраженных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ. Механическую прочность на сжатие определяли с помощью установки ИР-5047-50-03 на образцах цилиндрической формы диаметром 10 мм и высотой 20 мм по величине давления, при котором происходит их разрушение. Химический состав перлита установили методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре Bruker S2 RANGER (Германия).

Открытую пористость материала измеряли по увеличению массы образца при пропитке водой. Размер пор определяли методом пузырька в воде (ГОСТ Р 50516-93) [25]. Максимальный и средних размеры пор рассчитывались по формуле:

$$D = 4\gamma \cos \theta / p,$$

где  $D$  – размер пор (м),  $\gamma$  – поверхностное натяжение жидкости (для воды 72 мН/м),  $\theta$  – краевой угол смачивания материала (как правило, для воды принимается равным нулю, так как вода практически идеально смачивает силикатную керамику),  $p$  – давление (Па). Измерение проводили следующим образом: закрепленный в держателе образец пропитывали водой и помещали в емкость с водой на глубину 7–10 см. Затем во внутреннюю полость образца подавали воздух и плавно повышали его давление. Фиксировали давление, при котором на поверхности образца открывается не менее трех пор (в слое жидкости образуется соответствующее количество цепочек пузырьков газа). Это давление соответствует раскрытию пор максимального размера. Дальнейшее увеличение давления газа в полости образца приводит к интенсивному выходу пузырьков газа по всей поверхности образца, что соответствует раскрытию пор среднего размера.

Проницаемость мембран измеряли с помощью установки, прокачивающей дистиллированную воду через мембрану. Давление создавалось компрессором, регулировалось с помощью регулятора давления AW20-F01C-A B (SMC, Япония) и контролировалось с помощью прецизионного датчика давления ISE40A (SMC, Япония). Объем воды, прошедшей через мембрану, определяли по весам GX-800 (AND, Япония) (производилась автоматическая запись массы один раз в минуту). Объемный поток (скорость) воды ( $\text{м}^3/\text{с м}^2$ ) рассчитывали по формуле

$$J = V/S,$$

где  $V$  – объем воды, прошедшей через мембрану за одну секунду ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $S$  – площадь мембраны ( $\text{м}^2$ ). Для аппроксимации экспериментальной зависимости объемного потока  $J$  от приложенной

разности давлений  $\Delta p$  (Па) использовался закон Дарси

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k} J \quad (1)$$

или его обобщение на случай нелинейной фильтрации (закон Форхгеймера) [26]

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k} J + \frac{\beta \rho}{\sqrt{k}} J^2. \quad (2)$$

Здесь  $L$  – толщина мембраны,  $\mu$  – динамическая вязкость воды,  $k$  – коэффициент проницаемости,  $\beta$  – константа пористой среды. Закон (2) описывает отклонения от закона Дарси, связанные с проявлением инерционных сил при высоких скоростях фильтрации. Эти отклонения возникают, когда число Рейнольдса

$$Re = \frac{J D}{\mu/\rho}$$

превышает некоторое критическое значение [26].

В области применимости закона Дарси проницаемость мембран ( $\text{м}^3/\text{ч м}^2$  бар) рассчитывалась по формуле

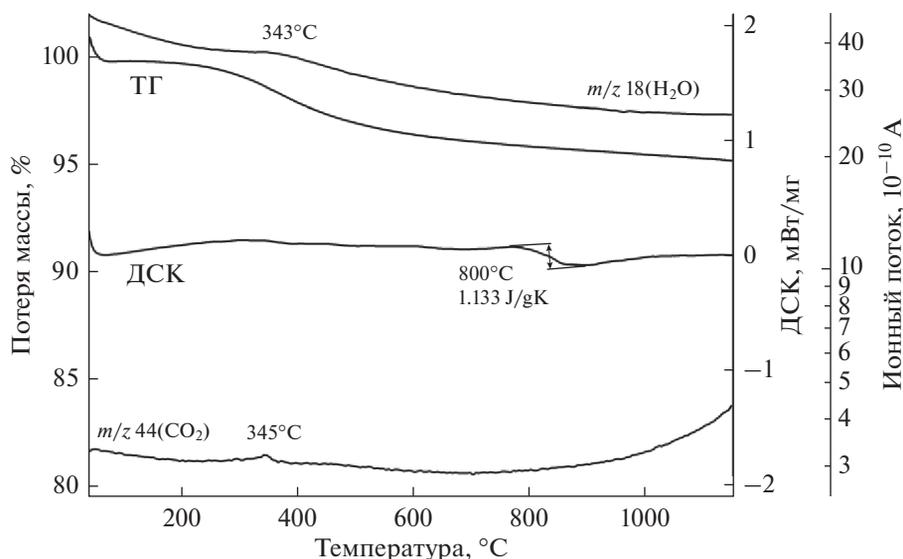
$$K = \frac{k}{\mu L}. \quad (3)$$

С учетом (3) закон Дарси (1) можно переписать в виде  $J = K \Delta P$ . В расчетах ниже использовались следующие значения параметров:  $L = 3$  мм для подложек из перлита и  $L = 3.2$  мм для модифицированных подложек,  $\mu = 0.89 \times 10^{-3}$  Па с.

Физические свойства полученных мембран (механическая прочность, пористость, размер пор, проницаемость по воде) исследовались на основе серии из 5 образцов подложек и 5 образцов двухслойных мембран, изготовленных в одинаковых условиях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что на пористость керамических материалов существенно влияет температура термической обработки [1, 3]. Для определения оптимальной температуры спекания макропористой подложки из перлита был проведен синхронный термический анализ. На кривой ДСК (рис. 1) наблюдаются несколько тепловых эффектов. В области от 300 до 400°C присутствует слабый экзотермический эффект, обусловленный горением углерода с поверхности образца с выделением углекислого газа (кривая  $m/z$  44). Общая потеря массы в этой области температур, равная 3.1%, состоит из потери углекислого газа и сорбционной воды (кривая  $m/z$  18). Выделение углекислого газа в широкой области температур 700–1150°C вероятно обусловлено выгоранием углерода с внутренней



**Рис. 1.** Кривые ТГ и ДСК для образцов перлита, совмещенные с масс-спектром выделяющихся при нагревании продуктов ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ).

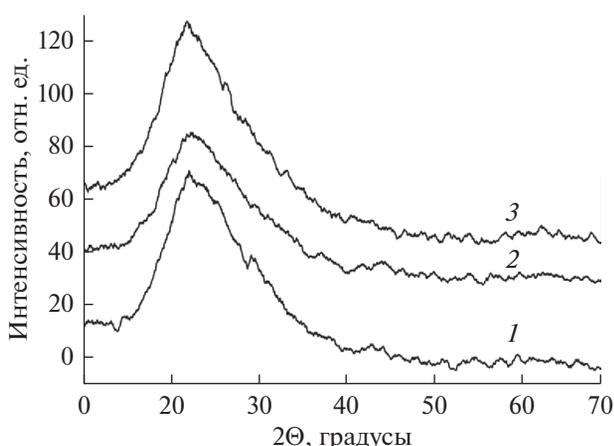
поверхности образца, что, в свою очередь, связано с недостаточной окислительной способностью окружающей среды. Такое поведение сопровождается растянутостью и пологой формой экзотермического эффекта на кривой ДСК. Как следует из рис. 1, область температур 750–850°C соответствует переходу образца в пиропластическое состояние с изменением его теплоемкости. Из данных термоанализа следует, что в области температур 1000–1150°C не наблюдается изменения массы образца, при этом экзо- и эндотермические эффекты также отсутствуют. Это послужило основанием для выбора температуры обжига образцов в указанном диапазоне (1100°C). Из литературных данных [8, 9, 27–29] известно, что при спекании

подложек из перлита при температуре более 1000°C происходит резкая, практически полная, потеря пористости образцов. Это может быть связано, во-первых, с использованием различных связующих и добавок, а, во-вторых, обусловлено более мелкодисперсным фракционным составом исходной шихты. В данной работе применение более высокой температуры отжига связано с использованием более крупных фракций исходного порошка перлита в диапазоне 0.315–0.044 мм.

Выбор температуры обжига пеносиликатного слоя обусловлен температурой размягчения пеносиликата в области 750–910°C [30]. В результате спекания при 900°C происходит размягчение пеносиликата, что способствует его хорошей адгезии к подложке. При этом сохраняется сферическая морфология частиц, что позволяет сформировать пористый проницаемый слой (рис. 3б и 3г).

По данным РФА, дифрактограммы образцов перлита до и после отжига при 812°C и 1100°C (рис. 2, кривые 1, 2 и 3 соответственно), не имеют четко выраженных пиков. Таким образом, эти образцы являются рентгеноаморфными.

Анализ РЭМ изображений мембран (рис. 3а и 3в) показывает, что зазоры между каркас-образующими частицами подложки расположены относительно равномерно по поверхности образца. Это указывает на однородный характер получаемой пористой структуры. Максимальный размер пор составляет порядка 50 мкм. Кроме того, из представленного снимка видно, что после термообработки наблюдаются многочисленные контакты между частицами. Спекание частиц в жидкофазном состоянии за счет сил поверхностного натяжения без изменения объемного содержания областей



**Рис. 2.** Дифрактограммы образцов перлита до термообработки (кривая 1) и после термообработки при 812°C (кривая 2), 1100°C (кривая 3).

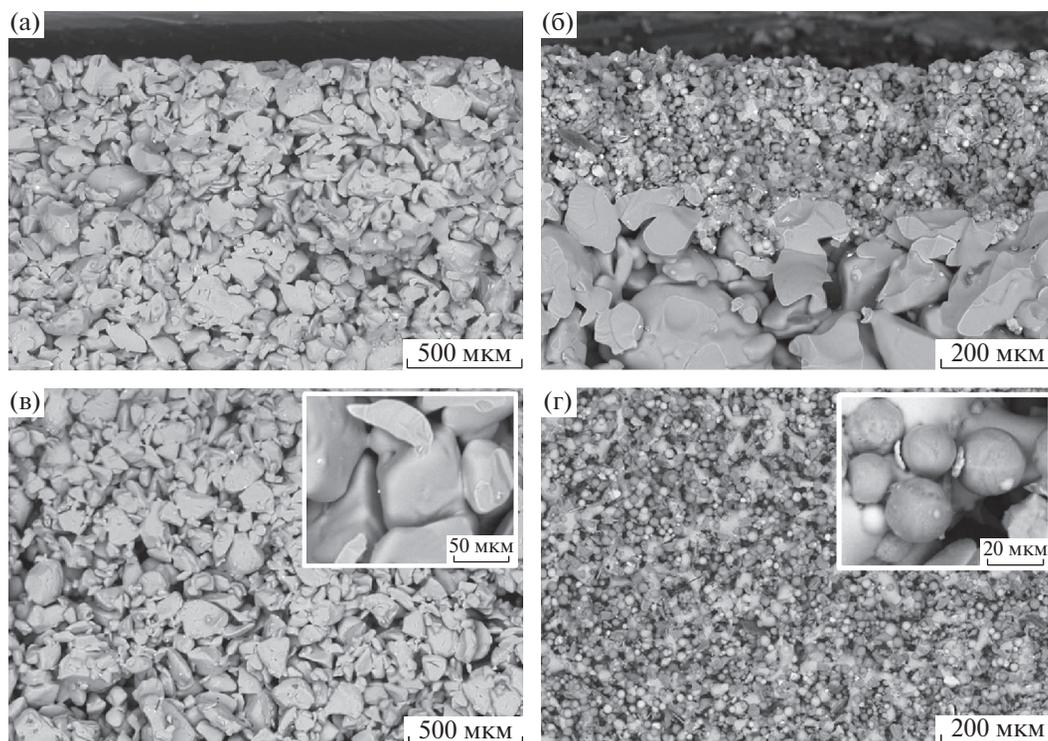


Рис. 3. РЭМ изображения поперечного среза (а) и поверхности (в) подложки из перлита, и поперечного среза (б) и поверхности (г) подложки из перлита, модифицированной слоем пеносиликата.

твердой фазы свидетельствует о компенсации усадочных явлений при спекании вспениванием образца за счет выделения углекислого газа. Спекание без изменения химического состава частиц, как следует из результатов работы, способствует увеличению прочности пористой керамики.

После нанесения на несущие подложки модифицирующего слоя пеносиликата с размером частиц 10–20 мкм достигается равномерное покрытие толщиной около 200 мкм (рис. 3б, 3г), сглаживающее рельеф несущей подложки. В процессе термообработки происходит спекание частиц пеносиликата с образованием пористого слоя.

Данные по измерению размеров пор методом пузырька представлены в табл. 2. Диаметр крупных пор для подложек из пеносиликата составляет  $50.1 \pm 3.1$  мкм, а диаметр средних пор –  $39.6 \pm 3.3$  мкм. После модификации подложек пеносиликатом эти значения заметно снижаются и составляют  $19.6 \pm 0.6$  мкм для крупных пор и  $16.8 \pm 0.7$  мкм для средних пор, что согласуется с данными электронной микроскопии.

Предел прочности мембран на сжатие составляет  $50 \pm 0.6$  МПа для подложек из перлита, в то время как образцы из пеносиликата такого же размера имеют предел прочности до  $420 \pm 5$  МПа в зависимости от усилия прессования. Поскольку прочность изделия, как правило, лимитируется пределом прочности на сжатие наиболее хрупко-

го слоя, то предполагается, что предел прочности подложек из перлита, модифицированных слоем пеносиликата имеет похожее значение прочности на сжатие и составляет также  $50 \pm 0.6$  МПа. Открытая пористость незначительно уменьшается в результате модификации подложек и составляет  $30 \pm 1$  и  $29 \pm 1\%$  до и после модификации соответственно.

На рис. 4 приведены зависимости объемного потока воды через полученные керамические мембраны от разности давлений в диапазоне 0.01–2 бар. В области малых давлений (до 0.8 бар) результаты для подложек из перлита хорошо описываются законом Дарси (1) (кривая 1, коэффициент проницаемости  $k = 3.6 \times 10^{-12}$  м<sup>2</sup>, проницаемость по воде  $K = 485$  м<sup>3</sup>/ч м<sup>2</sup> бар), однако с увеличением давления наблюдается отклонение от линейного закона. Зависимость объемного потока от разности давлений во всем рассмотренном диапазоне давлений хорошо описывается законом Форхгеймера (2) с параметрами  $k = 5.1 \times 10^{-12}$  м<sup>2</sup> и  $\beta = 2$  (кривая 2). Значение числа Рейнольдса, соответствующее объемному потоку воды  $J = 366$  м<sup>3</sup>/ч м<sup>2</sup> при разности давлений  $\Delta P = 0.8$  бар и среднему размеру пор подложки  $D = 39.6$  мкм составляет  $Re = 4.03$ . Это значение находится в диапазоне критических значений числа

**Таблица 2.** Физико-технические характеристики керамических подложек, полученных в данной работе (1, 2) и других работах (3–9)

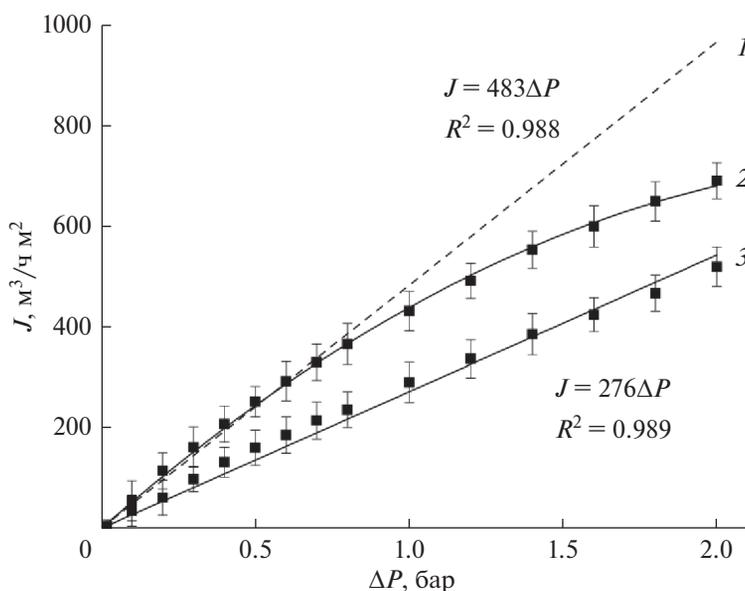
№	Материал подложки	$D_{\text{макс}}$ , мкм	$D_{\text{ср}}$ , мкм	Проницаемость, $\text{м}^3/\text{ч м}^2 \text{бар}$	Прочность на сжатие, МПа	Открытая пористость, %	Размер фракции, мкм	Термостойкость, °С
1	Перлит	$50.1 \pm 3.1$	$39.6 \pm 3.3$	485	$50 \pm 0.6$	$30 \pm 1$	44–315	1150
2	Перлит + слой пеносиликата	$19.6 \pm 0.6$	$16.8 \pm 0.7$	272	$50 \pm 0.6$	$29 \pm 1$	44–315, 10–20	1150
3	Кварцевый песок [31]	20.6	25.3	89	5.05	26–28	200–400	850
4	Кварцевый песок + промежуточный слой [31]	23.1	12.6	83	2.65	26–28	200–400, 40–70	850
5	Кварцевый песок и 30% доломита [32]	–	18	53.6	16.2	45	0.3–60	1400
6	Перлит [27]	–	13	0.01	28.9	24.53	<180	1025
7	Перлит [8, 9]	–	6.64	1.797	1.2	41.8	200	1000
8	Перлит [28]	–	1.70	1.433	21.68	52.11	<45	950
9	Перлит + бентонит [29]	–	$13 \times 10^{-3}$	0.03	21	52	–	–

Рейнольдса  $Re = 3-10$ , определяющих верхнюю границу применимости закона Дарси [26].

Для подложек, модифицированных слоем пеносиликата, зависимость объемного потока от разности давлений хорошо описывается законом Дарси (кривая 3, коэффициент проницаемости  $k = 2.1 \times 10^{-12} \text{ м}^2$ , проницаемость по воде  $K = 272 \text{ м}^3/\text{ч м}^2 \text{ бар}$ ). Таким образом, модификация подложек из перлита слоем пеносиликата

приводит к уменьшению жидкостной проницаемости (см. табл. 1). Число Рейнольдса, соответствующее объемному потоку воды при разности давлений  $\Delta P = 2 \text{ бар}$  и среднему размеру пор модифицированной подложки  $D = 16.8 \text{ мкм}$ , составляет  $Re = 2.36$  и лежит ниже верхней границы применимости закона Дарси.

Для сравнения в табл. 2 приведены характеристики керамических материалов, полученных в



**Рис. 4.** Зависимость объемного потока воды от разности давлений для подложки из перлита (кривые 1 и 2) и подложки из перлита, модифицированной слоем пеносиликата (кривая 3).

работах других авторов. В работе [31] предложены подложки из кварцевого песка с модифицирующим слоем из частиц  $\text{SiO}_2$ . Фракционный состав применяемых материалов близок к использованному в данной работе. Полученные мембраны обладают схожей пористостью и размером пор модифицирующего слоя, но имеют более низкие значения прочности, термостойкости и жидкостной проницаемости. В случае формирования подложек из кварцевого песка и доломита [32] использовалось сырье более дисперсного фракционного состава. Авторам удалось добиться высокой пористости 45% и термостойкости  $1400^\circ\text{C}$ . Однако, значения прочности и жидкостной проницаемости были невысокими относительно данной работы. В работе [27] были изготовлены образцы подложек из перлита, имеющего сходный фракционный состав ( $<180$  мкм) и размер пор около 13 мкм, однако существенно меньшее значение водопроницаемости ( $0.01 \text{ м}^3/\text{ч м}^2 \text{ бар}$ ) по сравнению с данной работой. Авторами работы [7] были получены образцы на основе перлита, обладающие высокой пористостью 41.8% и размером пор 6.64 мкм. Они характеризуются относительно низкими значениями прочности и жидкостной проницаемости. Вероятно, эти особенности связаны с применением органических добавок, которые увеличивают пористость, но сильно снижают прочность и проницаемость из-за формирования достаточно узких пор в результате термообработки. В работах [28, 29] получены подложки из перлита с высокой пористостью 52%, достаточно хорошей механической прочностью и низкой водопроницаемостью, которая обусловлена средним размером пор 1.7 мкм. Для синтеза мембран использовалась фракция порошка перлита с размером частиц менее 45 мкм. Далее проводилось нанесение ультрафильтрационного слоя с размером пор порядка 13 нм из бентонитовой глины с последующим использованием полученных мембран для очистки водных растворов от красителей.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены и отработаны методики получения новых типов высокопрочных и термостойких керамических материалов на основе перлита и пеносиликатов. Установлено, что максимальное значение прочности и пористости имеют подложки, полученные из перлита гранулометрического состава в диапазоне 44–315 мкм с содержанием водного связующего в количестве 5 мас. % и сформованные при усилии прессования 10 кН. Величина пористости после термообработки составляет 30%, а предела прочности на сжатие – 50 МПа. Модификация подложек слоем пеносиликата с размером частиц 10–20 мкм с целью уменьшения размера пор и сглаживания рельефа подложек не приводит к снижению пористости и прочности об-

разцов. Показано, что нанесение модифицирующего слоя вызывает снижение водопроницаемости подложек с 485 до  $272 \text{ м}^3/\text{ч м}^2 \text{ бар}$ , что объясняется уменьшением размеров сквозных пор почти в два раза. Зависимость объемного потока от разности давлений в диапазоне до 2 бар для модифицированных подложек хорошо описываются законом Дарси, в то время как для подложек из перлита наблюдаются отклонения от этого закона при давлениях, превышающих 0.8 бар.

По сравнению с аналогичными материалами, представленными в литературе, разработанные керамики характеризуются более высокой проницаемостью по воде, прочностью на сжатие и термической устойчивостью. Полученные материалы могут быть использованы в качестве основы при создании микро-, ультра- и наночистотных мембран.

Работа выполнена с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН. Работа частично поддержана грантом РФФИ 18-29-19078. Авторы выражают благодарность к. ф. м. н. Л.С. Тарасовой за выполнение термоанализа образцов, полученных в данной работе, и д. х. н. А.И. Иванцу за обсуждение результатов и полезные замечания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li K. Ceramic membranes for separation and reaction. John Wiley & Sons. Chichester. England. 2007. 316 p.
2. Гороховский А.В., Третьяченко Е.В., Гоффман В.Г. и др. // Стекло и керамика. 2011. № 6. С. 20–23.
3. Arumugham T., Kaleekkal N.J., Gopal S. et al. // J. Environmental Management. 2021. V. 293. 112925.
4. Gitis V., Rothenberg G. Ceramic membranes: new opportunities and practical applications. Wiley-VCH. Weinheim. Germany. 2016. 396 p.
5. Almandoz M.C., Pagliero C.L., Ochoa N.A. et al. // Ceram Int. 2015. V. 41. P. 5621–5633.
6. Гармаш И.П., Крючков Ю.Н., Павликов В.Н. // Стекло и керамика. 1995. Т. 6. С. 19–22.
7. Zhang X., Bai C., Qiao Y. et al. // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2021. V. 150. 106629.
8. Majouli A., Alami Younssi S., Tahiri S. et al. // Desalination. 2011. V. 277. P. 61–66.
9. Majouli A., Tahiri S., Alami Younssi S. et al. // Ceramics International. 2012. V. 38. P. 4295–4303.
10. Ратько А.И., Иванец А.И., Азарова Т.А. и др. // Защита металлов. 2008. Т. 44. № 2. С. 217–222.
11. Ратько А.И., Иванец А.И., Степанова Е.А. и др. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2009. Т. 45. № 2. С. 222–227.
12. Иванец А.И., Агабеков В.Е. // Мембраны и мембранные технологии. 2017. Т 7. № 1. С. 3–13.

13. Ратько А.И., Иванец А.И., Сахар И.О. и др. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2012. Т. 48. № 5. С. 470–473.
14. Ратько А.И., Иванец А.И., Кузнецова Т.Ф. и др. // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2010. Т. 46. № 2. С. 195–198.
15. Салихов Т.П., Кан В.В., Уразаева Э.М. и др. // Стекло и керамика. 2014. № 8. С. 22–27.
16. Аверина Ю.М., Курбатов А.Ю., Сахаров Д.А. и др. // Стекло и керамика. 2020. № 3. С. 22–27.
17. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В., Ситник А.С. и др. // Стекло и керамика. 2015. № 7. С. 11–15.
18. Ke X.B., Zhu H.Y., Gao X.P. et al. // Advanced Materials. 2007. V. 19. P. 785–790.
19. Лебедев Д.В., Шиверский А.В., Симунин М.М. и др. // Мембраны и мембранные технологии. 2017. Т. 7. № 2. С. 86–98.
20. Лебедев Д.В., Солодовниченко В.С., Симунин М.М. и др. // Мембраны и мембранные технологии. 2018. Т. 8. № 3. С. 157–165.
21. Ryzhkov I.I., Shchurkina M.A., Mikhлина E.V. et al. // Electrochimica Acta. 2021. V. 375. 137970.
22. Павлов В.Ф., Шабанов В.Ф. // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 12. С. 14–18.
23. Tsybul'skaya O.N., Ksenik T.V., Yudakov A.A. et al. // Environmental Technology & Innovation. 2021. V. 23. 101567.
24. ГОСТ 9758-86. Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний. М.: Стандартинформ. 2006.
25. ГОСТ Р 50516-93. Мембраны полимерные. Метод определения точки пузырька плоских мембран. М.: Издательство стандартов. 1993.
26. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Розенберг Г.Д. Подземная гидромеханика. М., 2005.
27. Al-Harbi O.A., Özgür C., Khan M.M. // J. Ceramic Processing Research. 2016. V. 17. № 4. P. 275–280.
28. Saja S., Bouazizi A., Achiou B. et al. // J. Environmental Chemical Engineering. 2018. V. 6. № 1. P. 451–458.
29. Saja S., Bouazizi A., Achiou B. et al. // J. European Ceramic Society. 2020. V. 40. № 6. P. 2453–2462.
30. Павлов В.Ф., Шефер А.А., Шабанов В.Ф. // Физика и химия стекла. 2008. Т. 34. № 4. С. 610–615.
31. Ivanets A.I., Azarova T.A., Agabekov V.E. et al. // Ceramics International. 2016. V. 42. P. 16571–16578.
32. Kadiri C., Harabi A., Bouzerara F. et al. // J. Aust. Ceram Soc. 2020. V. 56. P. 379–387.

## High Strength Ceramic Substrates Based on Perlite and Foam Silicates for Filtration Membranes

N. P. Fadeeva<sup>1, 2</sup>, M. V. Pavlov<sup>3</sup>, I. A. Kharchenko<sup>1, 6</sup>, M. M. Simunin<sup>4, 5</sup>,  
K. A. Shabanova<sup>6</sup>, V. F. Pavlov<sup>3</sup>, and I. I. Ryzhkov<sup>1, 5, \*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Modeling SB RAS, 50/44 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036 Russia

<sup>2</sup>Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS, 50/24 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036 Russia

<sup>3</sup>Specialized Design and Technological Bureau “Nauka” FRC KSC SB RAS, 50/45 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036 Russia

<sup>4</sup>Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center SB RAS, 50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036 Russia

<sup>5</sup>Siberian Federal University, Svobodny st., 79, Krasnoyarsk, 660041 Russia

<sup>6</sup>Kirensky Institute of Physics SB RAS, 50/38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036 Russia

\*e-mail: rii@icm.krasn.ru

Samples of two-layer ceramics based on polydisperse powder of the perlitic mineral and foam silicates possessing high compressive strength up to 50 MPa, thermal stability up to 1150°C, and water permeability of 272 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> are obtained. According to the X-ray diffraction analysis, the supporting substrate material is X-ray amorphous. The average pore size of the supporting substrate is 40 μm, while the average pore size of the modifying layer is 17 μm according to the bubble method and electron microscopy. The obtained materials are promising for use as substrates of micro-, ultra- and nanofiltration membranes.

**Keywords:** perlitic, foam silicate, ceramic membranes, substrates, water permeability