

УДК 666.3-127.7

**Ю. Г. Павлюкевич<sup>1</sup>, Н. Н. Гундилович<sup>1</sup>, Л. Н. Николаевич<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси**МИКРОФИЛЬТРУЮЩАЯ КВАРЦЕВАЯ КЕРАМИКА  
ДЛЯ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ КРОВИ**

Проведены исследования процессов формирования структуры пористой проницаемой кварцевой керамики для фракционирования компонентов крови. Рассмотрен механизм спекания оксидной керамики на основе  $\text{SiO}_2$  с использованием полифенилсилоксановой смолы, заключающийся в цементации каркасообразующих частиц по зонам контакта аморфным оксидом кремния, образующимся при пиролизе кремнийорганических соединений. Установлено, что пары воды, формирующиеся при термическом разложении полифенилсилоксана, могут взаимодействовать с оксидом кремния  $\text{SiO}_2$ , образуя неассоциированные гидроксильные OH-группы в структуре материала, препятствующие развитию индукционного периода кристаллизации кристаболита и замедляющие его нежелательное образование при термообработке. Подавление кристаллизации кремнезема позволяет достичь высокой механической прочности материала. Полученная при  $1200^\circ\text{C}$  двухслойная микрофильтрующая керамика характеризуется открытой пористостью – 27,4–30,1%, коэффициентом проницаемости –  $(1,62–1,73) \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ , механической прочностью при сжатии – 18–20 МПа, средним эквивалентным диаметром пор – 1–4 мкм.

На базе лаборатории клеточных технологий Института физиологии НАН Беларуси проведены исследования возможности использования двухслойных пористых проницаемых материалов для фракционирования опухолевых клеток, циркулирующих в крови. Установлено, что разработанные материалы не оказывают цитотоксического действия на клетки и позволяют дифференцировать опухолевые клетки по размерам.

**Ключевые слова:** кварцевая керамика, микрофильтрация, полифенилсилоксан, кристаллизация, проницаемость, многослойная мембрана.

**Yu. G. Pavlyukevich<sup>1</sup>, N. N. Gundilovich<sup>1</sup>, L. N. Nikolaevich<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus**MICROFILTRATION QUARTZ CERAMICS  
FOR FRACTIONING OF BLOOD COMPONENTS**

The processes of structure formation of a porous permeable quartz ceramics on the basis of quartz glass for microfiltration of blood components. Sintering mechanism of oxide ceramics based on  $\text{SiO}_2$  using a polyphenylsiloxane resin has been established, cementation of the structure-forming particles proceeds through contact zones with amorphous silicon oxide formed during pyrolysis of organosilicon compounds. It was found that the water vapor formed during the thermal decomposition of polyphenylsiloxane can interact with  $\text{SiO}_2$ , forming non-associated OH-groups in the material structure, which hinders the development of the induction period of crystallobalite crystallization and retards its undesirable formation during heat treatment. Suppression of silica crystallization allows achieving high mechanical strength of the material. Two-layer microfiltration ceramics obtained at  $1200^\circ\text{C}$  are characterized by an open porosity of 27.4–30.1%, a permeability coefficient of  $(1.62–1.73) \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ , a mechanical compressive strength of 18–20 MPa, an average equivalent pore diameter of 1–4  $\mu\text{m}$ .

The feasibility of using two-layer porous permeable materials for the fractionation of cancer blood cells was carried out in the Cell Technologies Laboratory of the NAS of Belarus. It is established that the developed materials do not exert a cytotoxic effect on the cells and allow differentiating blood cells according to their sizes.

**Key words:** quartz ceramics, microfiltration, polyphenylsiloxane, crystallization, permeability, multi-layer membrane.

**Введение.** Разработка высокоэффективных материалов для систем фракционирования клеток крови по размерам является одним из актуальных и перспективных направлений развития материаловедения. Производственная трансфузиология нуждается в качественном и безопас-

ном сырье для обеспечения производства препаратов крови. Современные методики разработки противоопухолевых препаратов основаны на выделении целевой группы клеток из крови для изучения непосредственного воздействия препарата на них.

Фракционирование компонентов крови является процессом микрофльтрации, который позволяет отделять частицы размером 0,1–10,0 мкм. При выборе материала для получения пористых проницаемых фильтрующих материалов для микрофльтрации особое внимание уделяется чистоте материала, биоинертности, селективности и механической прочности. Одним из перспективных материалов, обеспечивающих рассмотренные свойства, является кварцевая керамика.

Цель настоящей работы заключается в синтезе, исследовании физико-химических свойств и процессов, происходящих при спекании микрофилтрующих кварцевых керамических материалов для фракционирования компонентов крови.

**Основная часть.** Разработка новых высокоэффективных микрофилтрующих материалов идет в направлении создания многослойных пористых проницаемых структур, которые в сравнении с традиционными однослойными обладают улучшенными транспортными свойствами, что позволяет значительно повысить эффективность процесса микрофльтрации [1, 2].

Создание многослойных мембранных фильтров включает в себя несколько этапов: получение макропористой подложки и синтез мембранного покрытия.

В качестве наполнителя для синтеза кварцевых керамических пористых проницаемых подложек применялось кварцевое стекло (ГОСТ 2142–90) фракций 63–100, 100–250 и 250–500 мкм, в качестве связующего – полифенилсилоксановая смола.

В работе использовалось кварцевое стекло (ГОСТ 2142–90, Республика Беларусь) производства ОАО «Коралл», получаемое газопламенным методом из жильного кварца. Оно применяется для изготовления труб, капилляров, штабиков, кварцевой оснастки, ситалловых подложек, кварцевых оболочек, пластин, оптических заготовок, смотровых стекол, химико-лабораторной посуды, наконечников и чехлов для термопар и др. Предприятие заинтересовано в расширении области применения производимого кварцевого стекла.

Для введения полифенилсилоксановой смолы использовался лак кремнийорганический марки КО-815 (ГОСТ 11066–74, Россия), представляющий собой смесь раствора полифенилсилоксановой смолы и глифталевого лака в толуоле или ксилоле. Массовая доля нелетучих веществ составляет 33–37%. Условная вязкость при нормальных условиях по вискозиметру ВЗ-1 (сопло 2,5 мм) – 12–16 с.

Кремнийорганический лак в количестве 5–15% смешивался с кварцевым стеклом до образования однородного пресс-порошка. Прессование

осуществлялось на гидравлических прессах при давлении 60 МПа. Образцы подвергались обжигу в лабораторной электрической печи фирмы Nabertherm (Германия) при 1100–1300°C с выдержкой при максимальной температуре на протяжении 1–3 ч.

Для получения мембранного покрытия применялся тонкодисперсный порошок кварцевого стекла, полученный путем мокрого помола стекла фракции 63–100 мкм в планетарной шаровой мельнице RETSCH PM 100 (Германия) в течение 1 ч. Влажность шликера при помолке составляла 40–45%, соотношение мелющих тел к сухой массе размалываемого материала – 1,5 : 1. Полученная суспензия использовалась для нанесения мембранного покрытия на поверхность обожженных подложек. Нанесение покрытия осуществлялось методом окунания путем частичного погружения образца на 3 с в суспензию тонкодисперсного порошка кварцевого стекла. Образец с нанесенным покрытием подвергался сушке в сушилке SNOL (Литва) при температуре 95°C на протяжении 3 ч, затем поступал на обжиг. Обжиг производился в лабораторной электрической печи фирмы Nabertherm при 1200–1300°C с выдержкой при максимальной температуре в течение 1 ч.

Основной трудностью при получении кварцевой керамики является обеспечение высокой механической прочности, которое может осложняться нежелательным процессом кристаллизации кристобалита. Процессы кристаллизации проявляются при температурах обжига более 1100°C, причем с повышением температуры интенсивность процесса возрастает. Образование кристобалита в материале может привести к его разрушению и разупрочнению, вызванному процессами фазообразования и полиморфными превращениями, сопровождающимися объемными изменениями около 5% [3, 4].

Процесс кристаллизации кварцевого стекла происходит в два этапа. На первой стадии тепловой обработки, которая называется индукционным периодом, на поверхности стекла образуются отдельные микроскопические зародыши, наблюдается их рост и слияние, вплоть до образования сплошного кристаллического слоя. Во время второй стадии происходит рост толщины кристаллического слоя [5].

Введение активных добавок, а также наличие примесей в кварцевой керамике оказывает значительное влияние на процессы кристаллизации. Поэтому при выборе связующих веществ и добавок, интенсифицирующих спекание, необходимо рассматривать их влияние во взаимосвязи с кристаллизацией кварцевого стекла. Среди добавок, представляющих интерес при получении кварцевой керамики,

особую группу составляют кремнийорганические соединения.

Для изучения процессов, протекающих при обжиге материала, выполнен термический анализ полифенилсилоксановой смолы. Исследование проводилось на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 404 F3 Pegasus (Netzsch, Германия) в интервале температур 30–1300°C, среда – аргон. Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии полифенилсилоксановой смолы представлены на рис. 1.

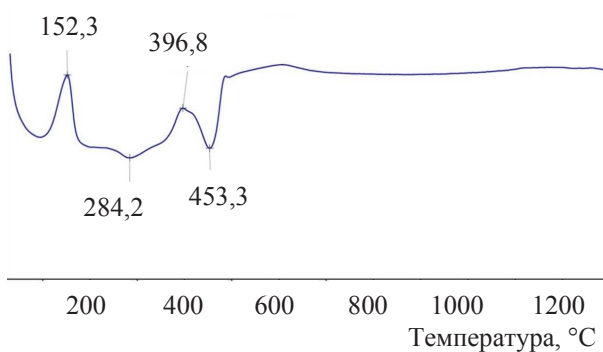
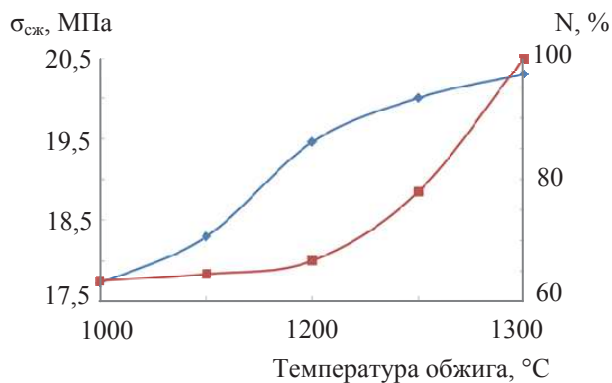


Рис. 1. Дифференциальная сканирующая калориметрия полифенилсилоксановой смолы

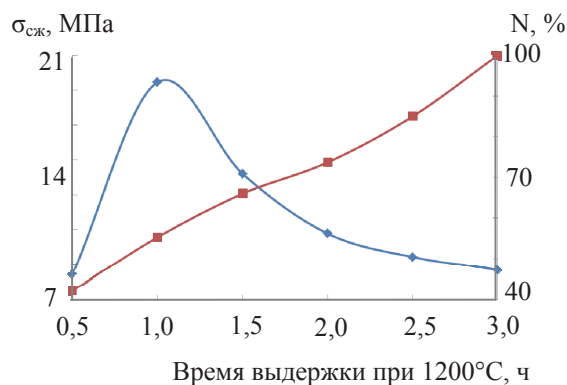
Термический анализ полифенилсилоксановой смолы позволил установить, что в интервале температур 120–200°C наблюдается экзотермический эффект, который объясняется незавершенностью процессов поликонденсации полифенилсилоксанов. При температурах 200–300°C происходит перегруппировка внутри молекул полифенилсилоксанов с выделением летучих циклов, углеводородов и продуктов их диссоциации с образованием твердых жестких остатков неорганических полимеров типа  $(\text{SiO}_2)_n$ . При дальнейшем нагревании в интервале температур 300–500°C завершаются процессы разложения и выгорания органической части полифенилсилоксановой смолы с образованием оксида кремния  $\text{SiO}_2$ . При термическом разложении полифенилсилоксановой смолы оксид кремния переходит из молекулярно-дисперсного в конденсированное состояние. Его осаждение происходит в зоне контакта частиц на вогнутых поверхностях, характеризующихся низким давлением пара над поверхностью, а также отрицательным капиллярным давлением.

Таким образом, механизм спекания кварцевой керамики с использованием полифенилсилоксановой смолы заключается в цементации каркасообразующих частиц по зонам контакта аморфным оксидом кремния, образующимся при пиролизе полифенилсилоксановой смолы.

Установлено, что фазовый состав материала оказывает значительное влияние на механическую прочность при сжатии и определяется режимом обжига. Зависимость механической прочности материала от температуры обжига, продолжительности выдержки и содержания кристобалита представлена на рис. 2.



a



b

- ◆ Механическая прочность при сжатии, МПа
- Относительная интенсивность дифракционных максимумов кристобалита, %

Рис. 2. Зависимость механической прочности пористых проницаемых подложек от температуры (a), продолжительности выдержки при обжиге (b) и содержания кристобалита

Увеличение продолжительности обжига от 0,5 до 1,0 ч приводит к росту механической прочности образцов, что обусловлено процессами спекания материала. При дальнейшем увеличении продолжительности выдержки при максимальной температуре интенсивно происходят процессы кристаллизации, протекающие с изменением объема и плотности, что вызывает снижение механической прочности вследствие возникновения внутренних напряжений в материале, которые в случае превышения предела прочности материала обуславливают зарождение и рост трещин. Оптимальное сочета-

ние между физико-химическими свойствами и степенью кристалличности кварцевой керамики обеспечивается при температуре обжига 1200°C и продолжительности обжига 1 ч.

Гидроксильные группы, содержащиеся в полифенилсилоксане, способны оказывать влияние на процессы кристаллизации кварцевого стекла. Пары воды, формирующиеся при пиролизе полифенилсилоксана, могут взаимодействовать с оксидом кремния  $\text{SiO}_2$ , образуя устойчивые гидроксильные группы в структуре материала. Рассмотренный процесс протекает на поверхности частиц ввиду низкого значения коэффициента диффузии воды в кварцевом стекле. Известно [5], что увеличение содержания структурной воды в кварцевом стекле приводит к росту кристаллизационной устойчивости материала до температур 1300°C. В области температур выше 1300°C наибольшей кристаллизационной устойчивостью обладают стекла, содержащие низкое количество (около 0,04%) ОН-групп.

С другой стороны, рост парциального давления воды в газовой среде вызывает сокращение индукционного периода и увеличение скорости роста кристаллического слоя на поверхности кварцевого стекла. Для предотвращения нежелательной кристаллизации кристобалита необходимо создать условия, при которых пары воды, образующиеся при пиролизе полифенилсилоксановой смолы, встраиваются в структуру стекла, препятствуя развитию индукционного периода кристаллизации.

Для исследования поведения гидроксильных групп в составе материала проведена инфракрасная спектроскопия образцов пористых проницаемых подложек, полученных с применением полифенилсилоксановой смолы и исходного кварцевого стекла.

Инфракрасные спектры кварцевого стекла и пористого проницаемого кварцевого керамического материала, обожженного при 1200°C, имеют схожий характер. Наблюдаются интенсивные полосы поглощения в области 1097–1101 и 467–480  $\text{см}^{-1}$ , которые относятся к внутренним активным колебаниям атомов кремнекислородного тетраэдра  $[\text{SiO}_4]$ , причем первые обусловлены валентными колебаниями, а вторые – деформационными. Из рис. 3 видно, что полоса поглощения кварцевого стекла, относящаяся к валентным колебаниям атомов кремнекислородного тетраэдра 1101  $\text{см}^{-1}$ , значительно шире и интенсивнее по сравнению с пористым проницаемым материалом на его основе, что свидетельствует о большем содержании материала с каркасной структурой в составе стекла [6, 7]. Полоса поглощения в высокочастотной области 1097  $\text{см}^{-1}$  подтверждает наличие кар-

касной структуры с высокой степенью полимеризации кремнекислородных тетраэдров. Полосы поглощения в области 792–799  $\text{см}^{-1}$  обычно связывают с образованием шестичленных кольцевых структур из кремнекислородных тетраэдров. Наличие полос поглощения в области 1199 и 621  $\text{см}^{-1}$  характерно для  $\alpha$ -кристобалита. Слабые полосы поглощения в области 3357 и 1887  $\text{см}^{-1}$  свидетельствуют о присутствии небольшого количества гидроксильных групп в структуре материала. Причем частота 3357  $\text{см}^{-1}$  характерна для неассоциированных ОН-групп [6] (рис. 3).

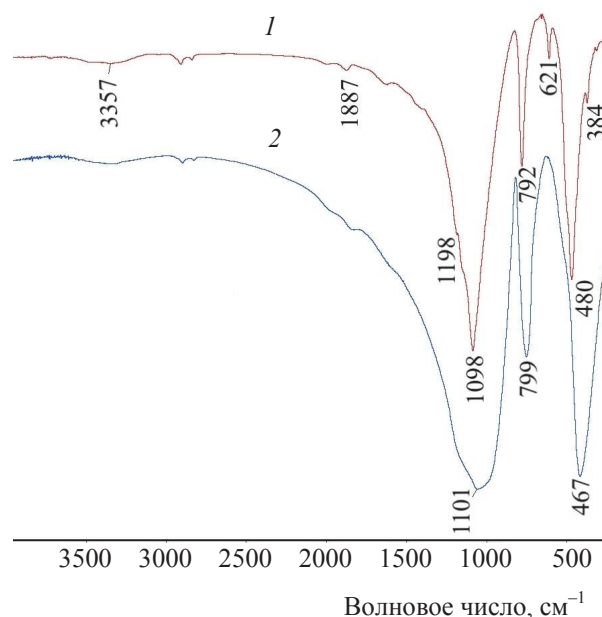


Рис. 3. ИК-спектры пористого проницаемого кварцевого керамического материала (1) и исходного кварцевого стекла (2)

Из рис. 3 видно, что введение полифенилсилоксановой смолы привело к увеличению интенсивности полос поглощения, характерных для гидроксильных групп.

Фракционный состав кварцевого стекла оказывает значительное влияние на открытую пористость и проницаемость подложек. Для подложек, полученных с использованием фракций 250–500 мкм, открытая пористость составила 29,40–30,06%, 100–250 мкм – 27,24–27,99%, 63–100 мкм – 25,60–26,05%. При уменьшении размера применяемой фракции кварцевого стекла наблюдается резкое снижение коэффициента проницаемости пористых проницаемых кварцевых керамических подложек. Так, при фракции кварцевого стекла 250–500 мкм коэффициент проницаемости составил  $(5,27–7,12) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ , 100–250 мкм –  $(1,73–2,44) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ , 63–100 мкм –  $(0,68–1,02) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ . Рост удельной поверхности порошков при снижении размера пор приводит к интенсификации процесса



спекания и снижению открытой пористости материала. Изменение коэффициента проницаемости связано с уменьшением открытой пористости, а также значительным снижением размера пор, которое обуславливает рост гидравлического сопротивления материала.

Результаты определения открытой пористости и коэффициента проницаемости образцов при различном содержании кремнийорганического лака позволяют сделать вывод, что увеличение содержания лака от 5 до 15% в составе керамических масс для получения подложек сопровождается снижением открытой пористости от 22,54 до 20,86% и коэффициента проницаемости от  $22,8 \cdot 10^{-16}$  до  $7,1 \cdot 10^{-16}$  м<sup>2</sup> образцов соответственно (после обжига при 1200°C). Рассмотренное явление объясняется увеличением количества аморфного SiO<sub>2</sub>, образующегося при разложении лака, который заполняет поровое пространство между частицами кварцевого стекла, снижая открытую пористость и проницаемость материала.

Установлено, что повышение температуры обжига материала с 1100 до 1300°C приводит к незначительному снижению открытой пористости от 27,99 до 27,24% и коэффициента проницаемости от  $2,44 \cdot 10^{-15}$  до  $1,73 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>.

По результатам исследований для получения многослойных мембранных керамических фильтров выбран состав подложки, включающий, мас. %: кварцевое стекло (фракция 100–250 мкм) – 90; лак кремнийорганический – 10. Состав позволяет синтезировать при температуре 1200°C материал, характеризующийся оптимальным сочетанием физико-химических свойств: коэффициент проницаемости –  $(2,1–2,5) \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>; открытая пористость – 27,4–30,1%; механическая прочность при сжатии – 18–20 МПа.

Многослойный микрофильтрующий материал получен на основе разработанной подложки оптимального состава в соответствии с описанной выше методикой.

Исследование структуры многослойного пористого проницаемого керамического материала проводилось с применением метода электронной микроскопии, которая осуществлялась на сканирующем электронном микроскопе JEOL 7600F (Япония) с системой химического анализа EDXJED-2201 JEOL.

Из рис. 4 видно, что образец представлен двухслойным пористым материалом. Частицы кварцевого стекла имеют неправильную форму, вследствие чего образуют систему пор щелевидной формы. Поровая структура подложки состоит из взаимосвязанных поровых каналов, средний эквивалентный диаметр которых составляет 10–40 мкм. Мембранное покрытие имеет толщину 150–200 мкм, при этом наблю-

дается проникновение частиц мембранного слоя в поры подложки на глубину 20–40 мкм. Структура мембранного слоя характеризуется большей пористостью в сравнении с подложкой, представлена сетью открытых каналобразующих пор щелевидной формы. Средний эквивалентный диаметр порового канала составляет 1–4 мкм, что позволяет использовать материал для микрофильтрации дисперсных систем (рис. 4).



Рис. 4. Структура многослойного микрофильтрующего материала (а) и мембранного покрытия (б)

На базе лаборатории клеточных технологий НАН Беларуси выполнены исследования возможности использования двухслойных пористых проницаемых материалов для фракционирования субпопуляций опухолевых клеток головного мозга. Исследования проводились на образцах двухслойных микрофильтрующих материалов диаметром 25 мм, толщиной 1,5 мм. Материалы синтезированы методом пленочного литья на подложки оптимального состава, толщина микрофильтрующего покрытия составляла 150–200 мкм, размер пор – 4–8 мкм.

На экспериментальной модели глиобластомы человека (клеточная линия глиомы крысы С6)

результаты исследований показали, что пропускание клеток через пористые проницаемые материалы на основе кварцевой керамики не вызывает их гибели по сравнению с контролем. Фракционирование клеток глиомы крысы С6 на субпопуляции проводили поэтапно: 1-й этап – исходную гетерогенную популяцию клеток С6 пропускали через пористую проницаемую подложку с диаметром пор 10–40 мкм (первая фракция клеток); 2-й этап – первую фракцию клеток пропускали через двухслойный материал с диаметром пор 4–8 мкм (вторая фракция). На рис. 5 показаны насадка на шприц и многослойный микрофильтрующий материал, предназначенный для фракционирования компонентов крови.

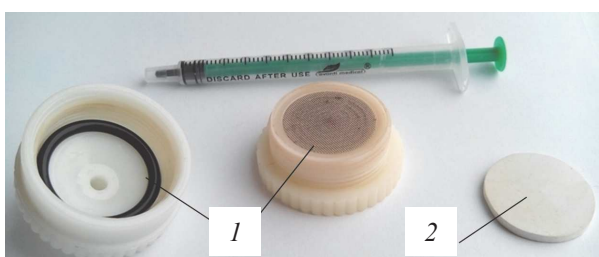


Рис. 5. Насадка на шприц (1) и мембранный фильтр (2) для фракционирования субпопуляций опухолевых клеток, циркулирующих в крови, с целью ранней диагностики злокачественных новообразований

Выявлено, что субпопуляции клеток во фракциях различаются не только морфологией клеток (протоплазматические и волокнистые астроциты, олегодендроциты), но и пролиферацией. Первая фракция протоплазматических астроцитов с размером в диапазоне 10–40 мкм характеризуется высоким индексом пролиферации по сравнению с контролем ( $2,80 \pm 0,1$  и  $2,16 \pm 0,06$  соответственно,  $p < 0,05$ ). Пролиферация волокнистых (фиброзных) астроцитов и олегодендроцитов во второй фракции (4–8 мкм) незначительно ниже контрольного уровня исходной гетерогенной популяции С6 ( $1,53 \pm 0,05$ ,  $p < 0,05$ ).

Проведенные исследования позволили установить, что разработанные материалы не оказывают цитотоксического действия на клетки и позволяют дифференцировать опухолевые клетки по размерам.

**Заключение.** Механизм спекания кварцевой керамики с использованием полифенилсилоксановой смолы заключается в цементации каркасообразующих частиц по зонам контакта аморфным оксидом кремния, образующимся

при пиролизе полифенилсилоксановой смолы. При термическом разложении полифенилсилоксановой смолы оксид кремния переходит из молекулярно-дисперсного в конденсированное состояние. Его осаждение происходит в зоне контакта частиц на вогнутых поверхностях, характеризующихся низким давлением пара над поверхностью, а также отрицательным капиллярным давлением.

Пары воды, формирующиеся при пиролизе полифенилсилоксана, могут взаимодействовать с оксидом кремния  $\text{SiO}_2$ , образуя неассоциированные гидроксильные ОН-группы в структуре материала. Структурная вода в кварцевом стекле может препятствовать развитию индукционного периода кристаллизации, что замедляет нежелательную кристаллизацию кристобалита при термообработке.

Фазовый состав материала оказывает значительное влияние на механическую прочность при сжатии и определяется режимом обжига. Увеличение продолжительности обжига от 0,5 до 1,0 ч приводит к росту механической прочности образцов, что обусловлено процессами спекания материала. При дальнейшем увеличении продолжительности выдержки при максимальной температуре интенсивно происходят процессы кристаллизации, протекающие с изменением объема и плотности, что вызывает снижение механической прочности в результате возникновения внутренних напряжений в материале, которые в случае превышения предела прочности материала обуславливают зарождение и рост трещин. Оптимальное сочетание между физико-химическими свойствами и степенью кристалличности кварцевой керамики обеспечивается при температуре обжига  $1200^\circ\text{C}$  и продолжительности обжига 1 ч.

На базе лаборатории клеточных технологий Института физиологии НАН Беларуси проведены исследования возможности использования двухслойных пористых проницаемых материалов для фракционирования опухолевых клеток, циркулирующих в крови. Установлено, что разработанные материалы не оказывают цитотоксического действия на клетки и позволяют дифференцировать опухолевые клетки по размерам.

Двухслойные микрофильтрующие материалы, полученные при  $1200^\circ\text{C}$ , характеризуются открытой пористостью – 27,4–30,1%, коэффициентом проницаемости –  $(1,62–1,73) \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$ , механической прочностью при сжатии – 18–20 МПа, средним эквивалентным диаметром пор – 1–4 мкм.

### Литература

1. Burggraaf A. J. Fundamentals of inorganic membrane science and technology // Elsevier science. 1996. 709 p.

2. Wang He-Yi, Fu Yi-Bei, Xing Pi-Feng. Preparation of asymmetric microporous composite ceramic membranes // *Institute of Nuclear Physics and Chemistry*. 2000. No. 8. P. 1015–1021.
3. Пивинский Ю. Е., Ромашин А. Г. Кварцевая керамика. М.: Металлургия, 1974. 264 с.
4. Алоян Р. М., Матинян С. С., Ветренко Т. Г. О процессе спекания и кристаллизации кварцевой керамики. М.: Издательский дом «Наука образования», 2011. С. 30–34.
5. Ходкевич Л. П., Лeko В. К. Кварцевое стекло в производстве электровакуумных изделий. М.: Энергоиздат, 1981. 88 с.
6. Суздальцев Е. И. Объемно-модифицированная кварцевая керамика и области ее применения // Наука и технологии ООО: Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 10. С. 2–10.
7. Бобкова Н. М. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов. Минск: Вышэйшая школа, 2007. 304 с.

### References

1. Burggraaf A. J. Fundamentals of inorganic membrane science and technology. *Elsevier science*. 1996. 709 p.
2. Wang He-Yi, Fu Yi-Bei, Xing Pi-Feng. Preparation of asymmetric microporous composite ceramic membranes. *Institute of Nuclear Physics and Chemistry*, 2000, no. 8, pp. 1015–1021.
3. Pivinskiy Yu. E., Romashin A. G. *Kvartsevaya keramika* [Quartz ceramics]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1974. 264 p.
4. Aloyan R. M., Matinyan S. S., Vetrenko T. G. *O protsesse spekaniya i kristallizatsii kvartsevoy keramiki* [The process of sintering and crystallization of quartz ceramics]. Moscow, Izdatel'skiy dom "Nauka obrazovaniya" Publ., 2011, pp. 30–34.
5. Khodkevich L. P., Leko V. K. *Kvartsevoye steklo v proizvodstve elektrovakuumnykh izdeliy* [Quartz glass in the manufacture of electrovacuum products]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 88 p.
6. Suzdal'tsev E. I. Volume-modified quartz ceramics and its applications. *Nauka i tekhnologii OOO: Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [Science and Technology LLC: All materials. Encyclopedic Guide], 2007, no. 10, pp. 2–10 (In Russian).
7. Bobkova N. M. *Fizicheskaya khimiya tugoplavkikh nemetallicheskih i silikatnykh materialov* [Physical chemistry of refractory nonmetallic and silicate materials]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 2007. 304 p.

### Информация об авторах

**Павлюкевич Юрий Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии стекла и керамики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: pauliukevich@belstu.by

**Гундилович Николай Николаевич** – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: gundilovich@belstu.by

**Николаевич Лариса Николаевна** – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией клеточных технологий. Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси (220072, г. Минск, ул. Академическая, 28, Республика Беларусь). E-mail: nikolarisa@tut.by

### Information about the authors

**Pavlyukevich Yuriy Gennad'yevich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Glass and Ceramics Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pauliukevich@belstu.by

**Gundilovich Nikolay Nikolaevich** – PhD student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gundilovich@belstu.by

**Nikolaevich Larisa Nikolaevna** – PhD (Biology), Head of the Cell Technology Laboratory. Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus (28, Akademicheskaya str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikolarisa@tut.by

Поступила 16.05.2017