

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 666.3-127

**Гундилович
Николай Николаевич**

**ДВУХСЛОЙНЫЕ ПОРИСТЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ МИКРОФИЛЬТРАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.17.11 – технология силикатных
и тугоплавких неметаллических материалов

Минск 2020

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» на кафедре технологии стекла и керамики.

Научный руководитель **Павлюкевич Юрий Геннадьевич**, доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии стекла и керамики учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты: **Пилиневич Леонид Петрович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инженерной психологии и эргономики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Азаров Сергей Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии и методики преподавания Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация Государственное научное учреждение «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «17» апреля 2020 г. в 10⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.02 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет», 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, ауд. 240, корп. 4, тел. (8-017) 327-56-20, e-mail: dyadenko-mihail@mail.ru. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан 12 марта 2020 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



М. В. Дяденко

ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности одной из наиболее востребованных операций при разделении неоднородных систем является микрофильтрация, позволяющая отделять частицы размером 0,1–10 мкм. Использование процессов микрофильтрации в пищевой промышленности позволило проводить очистку либо концентрирование дисперсных систем без выпаривания или вымораживания, что привело к значительному снижению энергоемкости процессов обезвоживания, повысило качество и выход получаемых продуктов. Применение микрофильтрации на предприятиях молочной отрасли открыло принципиально новые возможности переработки молочного сырья, что позволило концентрировать или выделять компоненты молока с сохранением их биологической ценности и технологических характеристик, получать новые функциональные продукты с регулируемым составом и свойствами. Процессы микрофильтрации широко используются для очистки и обеззараживания воды, сепарации компонентов крови, стабилизации напитков и виноградных вин, пастеризации, концентрирования натуральных соков, извлечения ценных компонентов из технологических стоков различных производств.

Развитие и активное внедрение процессов микрофильтрации в пищевой, химической, нефтехимической и фармацевтической промышленности обусловило необходимость совершенствования существующих и создания новых фильтрующих материалов.

Современные микрофильтрующие керамические изделия обладают многослойной структурой, состоящей из крупнопористой подложки и тонкого микрофильтрующего слоя, что обеспечивает низкое гидравлическое сопротивление материала. К изделиям, предназначенным для осуществления процессов микрофильтрации, предъявляются высокие требования по химической устойчивости, механической прочности, проницаемости и степени однородности структуры. Одним из востребованных материалов для получения фильтрующих изделий являются корундовая и кварцевая керамика, которая обладает комплексом указанных физико-химических свойств.

Существующие технологии производства микрофильтрующих керамических изделий характеризуются высокой энергоемкостью, многостадийностью и предполагают использование дорогостоящих сырьевых компонентов. Основной сложностью при получении многослойных микрофильтрующих керамических изделий является создание микрофильтрующего слоя, что требует решения задач, связанных с получением узкофракционных тонкодисперсных порошков с заданной морфологией частиц, нанесением и закреплением микрофильтрующего слоя на поверхности пористых проницаемых подложек. При этом необходимо обеспечить прочное сцепление микрофильтрующего слоя с

подложкой и высокую однородность структуры на всех технологических этапах получения материала, что достигается разработкой оптимального шихтового, химического и гранулометрического состава, технологических параметров синтеза и выбором наиболее эффективного связующего.

Несмотря на значительную востребованность, керамические фильтрующие материалы и изделия в Республике Беларусь производятся в небольших количествах (ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа», ГНУ «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»). Потребность отечественных предприятий в вышеперечисленной продукции удовлетворяется за счет импортируемых изделий. Так, в 2018 г. в Республику Беларусь импортировано оборудования и устройств для фильтрации или очистки воды, напитков и прочих жидкостей в количестве 4040,3 тыс. шт. на сумму 45,4 млн долл. США.

Диссертационная работа посвящена комплексному изучению процессов формирования пористой структуры двухслойных микрофильтрующих керамических материалов во взаимосвязи с дисперсностью и формой каркасообразующих частиц, фазовым составом, природой и количеством связующего материала, что позволило разработать технологические параметры получения корундовых и кварцевых керамических изделий, обладающих высокими физико-химическими и эксплуатационными характеристиками, для микрофильтрации жидких и газообразных дисперсных систем.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа содержит научно обоснованные результаты экспериментальных исследований в области разработки микрофильтрующих керамических материалов, состоящих из пористой проницаемой подложки и мембранного слоя на основе тонкодисперсных керамических порошков, полученных в результате термически инициируемого взаимодействия компонентов в системе нитрат металла – карбамид.

Связь работы с научными программами, темами. Основные этапы диссертационной работы выполнялись в рамках государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» на 2016–2020 гг. (подпрограмма «Композиционные материалы», задание 5.3.08 «Исследование и разработка пористых материалов для мембранных процессов сепарации и концентрирования жидких и газообразных продуктов», № госрегистрации 20161143, 2016–2017 гг.); проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Т15ЛИТ-011 «Исследование процессов формирования микроструктуры проницаемой высокоглиноземистой керамики для микро- и ультрафильтрации

дисперсных гидросистем», № госрегистрации 20150584, 2015–2016 гг.; гранта Министерства образования Республики Беларусь для докторантов, аспирантов и студентов «Керамические мембраны с высокой химической устойчивостью», № госрегистрации 20141087, 2014 г.

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг. (Указ Президента Республики Беларусь от 22 апреля 2015 г. № 166 «О приоритетных направлениях научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы» и постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190 «О приоритетных направлениях научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы»): новые многофункциональные материалы, специальные материалы с заданными свойствами.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка составов и технологических параметров получения микрофильтрующих корундовых и кварцевых керамических материалов, а также установление закономерностей процесса формирования пористой проницаемой структуры во взаимосвязи с их физико-химическими свойствами, фазовым составом и эксплуатационными характеристиками.

Основные задачи исследования:

- изучение процессов формирования структуры и фазового состава пористых корундовых и кварцевых керамических фильтрующих материалов во взаимосвязи с дисперсностью и формой каркасообразующих частиц, природой и количеством связующего материала;
- выявление закономерностей процесса структурообразования частиц корундовой керамики при термически инициируемом взаимодействии компонентов в системе нитрат металла – карбамид;
- установление технологических параметров формирования микрофильтрующих покрытий на поверхности макропористых проницаемых корундовых и кварцевых керамических подложек;
- экспериментальные исследования возможности применения разработанных многослойных пористых проницаемых керамических материалов в процессах микрофильтрации дисперсных систем.

Научная новизна. Установлены особенности энергоэффективного процесса получения ультрадисперсных частиц для микрофильтрующего слоя на основе композиций $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZnO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CuO}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MnO}_2$, содержащих 97,0–99,5 мол. % Al_2O_3 , заключающиеся в термически инициируемом взаимодействии компонентов в системе нитрат металла – карбамид, сопровождающемся образованием самовоспламеняющейся смеси газов (NH_3 , HNCO , оксиды азота), что обеспечивает повышение температуры в реакционной зоне

до 1300–1600 °С и последующее формирование пористых чешуйчатых агрегатов размером 2–8 мкм.

Установлено, что керамические порошки, полученные при термически инициируемом взаимодействии компонентов в системе нитрат металла – карбамид, являются агрегированными полидисперсными системами частиц, которые характеризуются угловатой пластинчатой формой с наличием криволинейных плоскостей и острых углов, что позволяет создавать на их основе корпускулярные пористые проницаемые тела с плоскощелевидной и клиновидной формой пор, обладающих лабиринтообразным сообщением в смежных поровых каналах, для использования в качестве микрофильтрующих материалов.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность применения полифенилсилоксана в качестве связующего при получении макропористых корундовых и кварцевых подложек, что обусловлено его высокими пластифицирующими свойствами, обеспечивающими прочную связь каркасообразующих частиц и формирование пространственной пористой структуры материала, а также интенсификацией процесса спекания за счет формирования в области контакта каркасообразующих частиц тонкодисперсного аморфного оксида кремния, обладающего повышенной реакционной способностью, что позволило обеспечить механическую прочность при сжатии 17–22 МПа.

Экспериментально подтверждено, что использование метода пленочного литья суспензии из структурированных тонкодисперсных керамических порошков позволяет сформировать однородные микрофильтрующие покрытия толщиной 30–50 мкм на поверхности пористых проницаемых керамических подложек, при этом глубина проникновения частиц мембранного слоя в поры подложек составляет 5–10 мкм, а поровая структура покрытия сформирована в виде развитой сети открытых каналобразующих макропор щелевидной формы, средний эквивалентный диаметр которых равен 1–4 мкм.

Разработаны составы и технологические параметры получения двухслойных пористых проницаемых керамических материалов на основе макропористых корундовых и кварцевых подложек в сочетании с микрофильтрующим мембранным слоем, обеспечивающие высокие физико-химические и эксплуатационные характеристики изделий. Полученные результаты подтверждены испытаниями изготовленных опытных образцов на предприятиях и в организациях Республики Беларусь.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексные экспериментально-теоретические исследования по получению микрофильтрующих материалов на основе корундовой и кварцевой керамики, позволившие разработать физико-химические основы

регулируемого процесса формирования двухслойной пористой проницаемой структуры керамических корундовых и кварцевых материалов.

2. Установленные закономерности формирования структуры и физико-химических свойств двухслойной микрофильтрующей керамики во взаимосвязи с морфологией структурообразующих частиц, химическим и фазовым составом материала, архитектурой пор и технологическими параметрами получения изделий, состоящих из макропористой кварцевой или корундовой керамической подложки и мембранного микрофильтрующего слоя толщиной 30–60 мкм.

3. Установленные особенности энергоэффективного процесса получения ультрадисперсных частиц для микрофильтрующего слоя на основе композиций $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZnO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CuO}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MnO}_2$, содержащих 97,0–99,5 мол. % Al_2O_3 , заключающиеся в термически инициируемом взаимодействии компонентов в системе нитрат металла – карбамид, сопровождающемся образованием самовоспламеняющейся смеси газов (NH_3 , HNCN , оксиды азота), что обеспечивает повышение температуры в реакционной зоне до 1300–1600 °С и последующее формирование пористых чешуйчатых агрегатов размером 2–8 мкм.

4. Научно обоснованная и экспериментально подтвержденная целесообразность применения полифенилсилоксана в качестве связующего при получении макропористых корундовых и кварцевых подложек, что обусловлено его высокими пластифицирующими свойствами, обеспечивающими прочную связь каркасообразующих частиц и формирование пространственной пористой структуры материала, а также интенсификацией процесса спекания за счет формирования в области контакта каркасообразующих частиц тонкодисперсного аморфного оксида кремния, обладающего повышенной реакционной способностью, что позволило обеспечить механическую прочность при сжатии 17–22 МПа.

5. Разработанные составы и технологические параметры получения двухслойных пористых проницаемых керамических материалов на основе макропористых корундовых и кварцевых подложек в сочетании с микрофильтрующим мембранным слоем, обеспечивающие высокие физико-химические свойства: механическая прочность при сжатии – 17,6–22,3 МПа; средний эквивалентный диаметр пор мембранного слоя – 1–4 мкм; коэффициент проницаемости – $(1,6\text{--}1,7) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Личный вклад соискателя ученой степени. Личный вклад соискателя заключается в непосредственном участии в постановке и решении задач исследования, анализе научно-технических и патентно-информационных источников литературы, выборе областей составов, получении опытных образцов и изучении их свойств, структуры и фазового состава, обработке

экспериментальных данных, научной интерпретации и обобщении результатов исследования, разработке технологических параметров получения микрофильтрующих керамических изделий и осуществлении их апробации, подготовке научных публикаций и заявок на изобретения. Научный руководитель осуществлял общее научное руководство, определял направление исследований, принимал участие в обсуждении результатов работы и подготовке научных публикаций. Вклад соавторов публикаций состоял в участии в обсуждении экспериментальных результатов и научных выводов.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались автором на 92-м собрании-симпозиуме Немецкого керамического общества «92nd DKG Annual Meeting and Symposium on High Performance Ceramics» (Берлин, Германия, 2017 г.); 20-й Международной конференции молодых ученых «Science For Future» (Вильнюс, Литва, 2017 г.); 79-, 80- и 81-й научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов БГТУ (с международным участием) (Минск, 2015–2017 гг.); 2-м Белорусско-Прибалтийском форуме «Сотрудничество – катализатор инновационного роста» (Минск, 2016 г.); Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2015–2017 гг.); 12-й Международной конференции «Modern Building Materials, Structures and Techniques» (Вильнюс, Литва, 2016 г.); Международной научно-технической конференции «Новейшие достижения в области инновационного развития в химической промышленности и производстве строительных материалов» (Минск, 2015 г.); Всероссийской научно-технической конференции (с международным участием) «Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения» (Уфа, 2015 г.); 13-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2015 г.); Международной научно-технической конференции «Технология-2015» (Северодонецк, Украина, 2015 г.); Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты 2014» (Минск, 2014 г.); Белорусско-Литовской бирже деловых контактов «Тенденции интеграции образования, науки и бизнеса» (Минск, 2014 г.); Международной научно-технической конференции «Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии» (Минск, 2014 г.); специализированной выставке и республиканском семинаре «Перспективные направления использования новых материалов» (Минск, 2014 г.); III республиканской научно-технической конференции молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» (Гомель, 2014 г.).

Опубликованность результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 27 печатных работах, в том числе: в 5 научных рецензируемых журналах (2,9 авторского листа), в 13 сборниках материалов конференций, в 6 сборниках тезисов докладов. Получен 1 патент на изобретение Республики Беларусь, положительное решение на выдачу патента по 1 заявке, подана 1 заявка на предполагаемое изобретение Республики Беларусь. Общий объем публикаций составляет 6,1 авторского листа.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе содержится анализ научно-технических и патентно-информационных источников в области получения и исследования керамических материалов для фильтрации дисперсных систем: рассмотрены современные керамические фильтрующие материалы, их основные характеристики и области применения; изучены основные способы получения многослойных керамических фильтрующих материалов; обоснован выбор корундовой и кварцевой керамики для создания микрофильтрующих изделий с требуемыми свойствами.

Показано, что разработка составов и технологии получения микрофильтрующих керамических материалов является актуальной задачей, что обусловлено высокой востребованностью процессов микрофильтрации на предприятиях пищевой, химической, нефтехимической промышленности.

Подробный анализ существующих способов получения керамических фильтрующих материалов позволил установить, что для получения пористых проницаемых материалов строгой геометрической формы с заданным размером пор наиболее технологичными являются методы, основанные на применении порошков-наполнителей монофракционного или узкофракционного состава. Между размером пор и размером частиц наполнителя существует взаимосвязь, что позволяет проектировать пористые проницаемые материалы с необходимыми характеристиками и осуществлять выбор фракционного состава наполнителя. В качестве методов формования фильтрующих изделий простой геометрической формы используется полусухое прессование, для цилиндрических изделий – экструзия из пластических масс или изостатическое прессование.

Отмечено, что наименьшее гидравлическое сопротивление и энергозатраты при проведении процесса микрофильтрации достигаются при использовании многослойных фильтрующих материалов, состоящих из крупнопористой подложки и микрофильтрующего слоя толщиной 10–50 мкм. Основная функция керамических подложек заключается в обеспечении механической

прочности и высокой проницаемости материала, микрофильтрующее покрытие определяет размер отделяемых частиц в процессе фильтрации.

Для нанесения микрофильтрующих покрытий толщиной 1–100 мкм широкое распространение получили методы пленочного и ленточного литья из суспензий тонкодисперсных керамических порошков на поверхность пористых проницаемых керамических подложек.

Показано, что для создания керамических микрофильтрующих покрытий применяются узкофракционные порошки с размером частиц 0,25–25 мкм. Одним из перспективных методов получения частиц с размером менее 10 мкм является термически инициируемое взаимодействие компонентов в системе нитрат металла – карбамид. Метод характеризуется малыми удельными затратами энергии при получении тонкодисперсного материала, простотой и высокой скоростью в сравнении с методами золь-гель, соосаждения и пиролиза.

К материалам, применяемым для осуществления процессов микрофильтрации, предъявляются высокие требования по химической устойчивости, механической прочности и высокой степени однородности структуры. Перспективными материалами для получения фильтрующих изделий являются корундовая и кварцевая керамика, которые обладают комплексом высоких физико-химических и эксплуатационных свойств.

Актуальной задачей при получении пористых проницаемых керамических материалов является поиск и разработка новых связующих, обеспечивающих необходимые технологические свойства полуфабриката, высокие физико-химические свойства и эксплуатационные характеристики фильтрующих изделий. Использование традиционных связующих (на основе глин, жидкого стекла, фосфатов и др.) приводит к снижению общей пористости материалов, что негативно сказывается на проницаемости фильтрующих изделий. Перспективными для использования в качестве связующих для получения керамических фильтрующих изделий являются кремнийорганические соединения (КОС), обладающие набором уникальных свойств. Некоторые кремнийорганические соединения (полиорганосилоксаны) характеризуются связующим и пластифицирующим действием, благодаря чему могут обеспечивать формовочные свойства тощим керамическим массам и прочность отформованному материалу. В процессе обжига КОС способны термически разлагаться с образованием тонкодисперсных частиц аморфного SiO_2 , обладающего высокой реакционной способностью, и CO_2 , который удаляется из материала, формируя поры.

Во второй главе приведена характеристика используемых в работе сырьевых материалов, описана методика получения двухслойных пористых проницаемых керамических материалов, включающая синтез структурированных тонкодисперсных корундовых керамических порошков, создание

макропористых подложек на основе кварцевой и корундовой керамики, нанесение и закрепление микрофильтрующего покрытия; представлена методика проведения экспериментальных исследований, а также математической обработки полученных результатов.

Определение показателей физико-химических свойств полученных материалов (механической прочности при сжатии, открытой пористости, коэффициента проницаемости, термостойкости, кислотостойкости) осуществлялось в соответствии со стандартизированными методиками.

Исследование фазового состава синтезированных материалов выполнялось методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker (Германия). Изучение структуры осуществлялось с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV фирмы JEOL (Япония), оборудованного системой химического анализа EDX JED-2201, оптического микроскопа со встроенной фотокамерой Leica DFC 280 (Германия) и ИК-Фурье спектрометра NEXUS E.S.P. (США). Термический анализ исследуемых материалов выполнялся с помощью дифференциального сканирующего калориметра DSC 404 F3 Pegasus NETZSCH (Германия). Для гранулометрического анализа частиц применялся лазерный дисперсионный анализатор Analizette 22 MicroTec Fritsch (Германия), удельная поверхность и пористость исследуемых порошков, предназначенных для получения микрофильтрующих покрытий, определялась методом адсорбционной порометрии с использованием анализатора NOVA 2200 Quantachrome (США).

В третьей главе приведены результаты исследований тонкодисперсных порошков корундовых частиц, обладающих необходимыми размерами и структурными характеристиками для создания микрофильтрующих керамических покрытий, и особенности их получения при термически инициируемом взаимодействии компонентов в системе нитрат металла – карбамид.

Преимуществами метода являются высокая однородность получаемого материала, возможность равномерного распределения малого количества вводимых добавок по объему смеси, сниженные температуры получения керамического материала за счет энергии экзотермического процесса, малые затраты времени на проведение синтеза, простота аппаратного оформления.

Реакционная смесь состояла из гомогенно распределенных нитратов металлов, взятых в стехиометрическом соотношении, и карбамида. Реакционную смесь упаривали, а затем подвергали термообработке, в процессе которой происходило инициирование самоподдерживающегося экзотермического процесса взаимодействия компонентов, сопровождающегося образованием самовоспламеняющейся смеси газов и выделением большого количества тепла, что обеспечивало повышение температуры в реакционной зоне до 1300–1600 °С и формирование пористых чешуйчатых агрегатов.

Для снижения температуры обжига корундовых керамических материалов в состав сырьевой композиции вводились добавки MnO_2 , Fe_2O_3 , ZnO и CuO , интенсифицирующие процесс спекания, в количестве, мол. %: 0,5; 1,0; 2,0; 3,0. В процессе приготовления реакционной смеси применялись соли $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Fe(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ и $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, дистиллированная вода, карбамид $((NH_2)_2CO)$.

С целью определения термодинамически возможных процессов и прогнозирования продуктов взаимодействия в исследуемых системах произведены термодинамические расчеты и анализ химических взаимодействий при температурах 1000–1400 °С в атмосфере воздуха при давлении 101 325 Па.

Частицы порошков, полученные на основе Al_2O_3 с добавками ZnO , CuO , Fe_2O_3 и MnO_4 имеют идентичную структуру, представленную пористыми агрегатами чешуйчатой формы (рисунок 1).

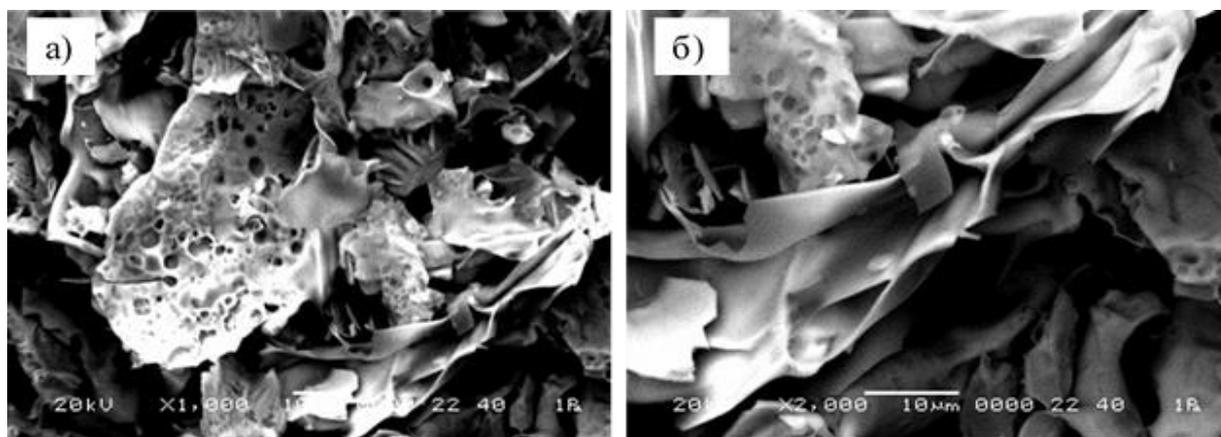


Рисунок 1. – Изображение структуры агрегатов, полученных в системе Al_2O_3 – MnO_2 , при увеличении $\times 1000$ (а), $\times 2000$ (б)

Средний диаметр агрегатов составляет 10–40 мкм при толщине 0,1 мкм, пористость – 40–50 %, средний эквивалентный диаметр поровых каналов в агрегатах 1–3 мкм. Высокая плотность теплового потока в процессе термообработки смеси в системе нитрат металла – карбамид при температуре 500 °С обуславливает интенсивное образование газов, формирование пены и тонких пленок по всему объему смеси. Многослойная пленочная структура смеси сохраняется до достижения температуры самовоспламенения смеси газов, при которой происходит процесс горения, сопровождающийся разогревом смеси и разрушением пленок при интенсивном газовыделении с образованием пористых чешуйчатых агрегатов.

Электронно-микроскопический анализ показал, что порошки фракции 5–20 мкм представляют собой агрегированные полидисперсные системы, частицы имеют угловатую пластинчатую форму с наличием криволинейных плоскостей и острых углов, средний эквивалентный диаметр преобладающих агрегатов составляет 2–8 мкм. Использование частиц рассматриваемой

морфологии позволяет создавать корпускулярные пористые тела, характеризующиеся лабиринтообразным сообщением в смежных порах, с плоскощелевидной и клиновидной формой пор, что обеспечивает основные свойства микрофильтрующих материалов. Морфология частиц порошков фракции 1–10 мкм представлена на рисунке 2.

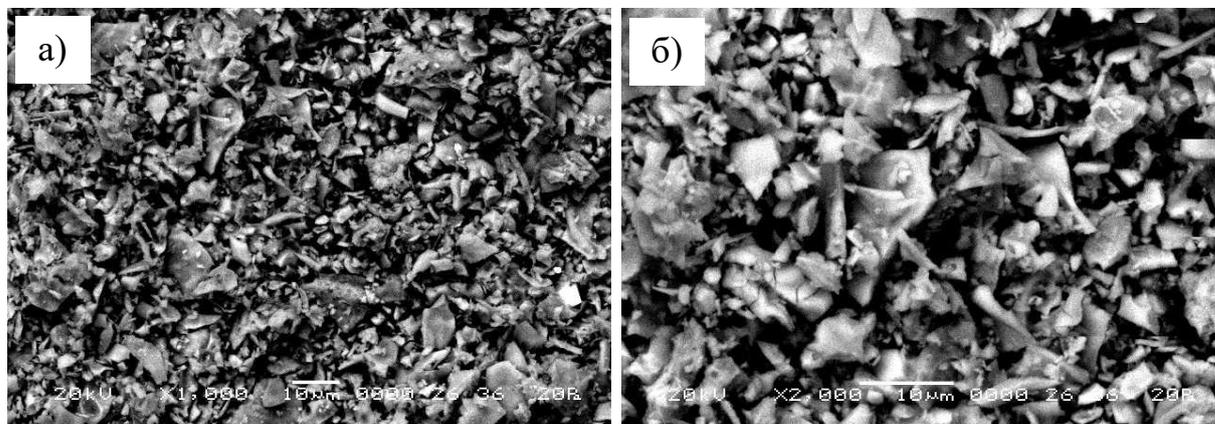


Рисунок 2. – Морфология частиц порошков фракции 1–10 мкм при увеличении $\times 1000$ (а), $\times 2000$ (б)

Для характеристики пористости порошков фракции 1–10 мкм, выполнен анализ изотерм сорбции и десорбции азота, результаты которого представлены на рисунке 3.

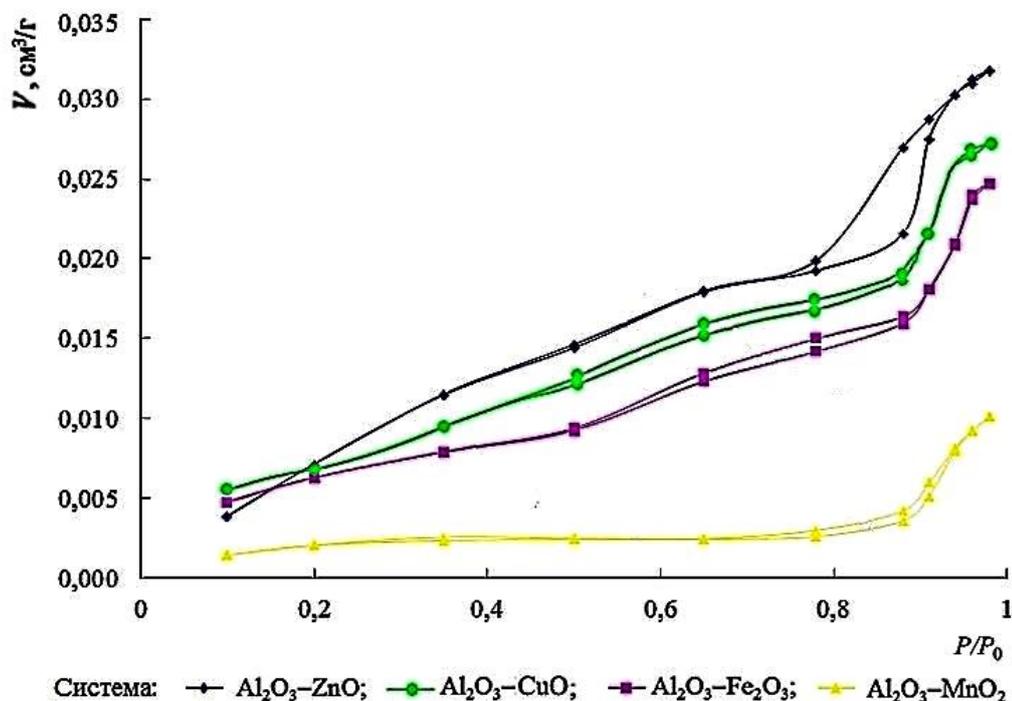


Рисунок 3. – Изотермы сорбции и десорбции азота исследуемых материалов

Анализ изотерм сорбции и десорбции азота позволил установить, что частицы, полученные в системах $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}$

Fe_2O_3 , имеют открытые поры в широком непрерывном диапазоне от мезо- до макроразмеров. Удельная поверхность порошков, полученных в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZnO}$ составляет $42 \text{ м}^2/\text{г}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CuO}$ – $33 \text{ м}^2/\text{г}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$ – $27 \text{ м}^2/\text{г}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MnO}_2$ – $12 \text{ м}^2/\text{г}$. Различия удельной поверхности исследуемых материалов предположительно обусловлены разной степенью спекания и открытой пористостью материалов, имеющих различную природу. Показано, что по влиянию оксидов на интенсификацию процесса спекания корундовой керамики они располагаются в ряду $\text{MnO}_2 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{CuO} > \text{ZnO}$.

Рентгенофазовый анализ полученных порошков позволил установить наличие преобладающей фазы корунда $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, а также присутствие ZnAl_2O_4 , FeAl_2O_4 , MnAl_2O_4 , $\text{Cu}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ и CuO в соответствующих системах, что согласуется с результатами дифференциальной сканирующей калориметрии, ИК-спектроскопии и термодинамических расчетов.

Проведенные исследования подтвердили возможность применения метода, основанного на термически инициируемом взаимодействии компонентов в системе нитрат металла – карбамид, для получения тонкодисперсных корундовых керамических частиц пластинчатой морфологии.

Четвертая глава посвящена получению и исследованию двухслойных микрофильтрующих керамических материалов, состоящих из макропористой проницаемой керамической подложки, обеспечивающей их физико-механические свойства, и микрофильтрующего керамического слоя, определяющего размер отделяемых частиц в процессе фильтрации.

В качестве материала подложки выбрана корундовая и кварцевая керамика. Для получения корундовых пористых проницаемых подложек использовался электрокорунд белый марки 25А (ГОСТ 28818–90), для кварцевых подложек – кварцевое стекло марки КУ-1 (ГОСТ 15130–86), размер фракции наполнителя составлял 100–250 мкм. В качестве связующего был выбран полифенилсилоксан, который вводился в виде лака кремнийорганического марки КО-815 (ГОСТ 11066–74).

Термический анализ полифенилсилоксана методом дифференциальной сканирующей калориметрии позволил установить, что в интервале температур 120–200 °С наблюдается экзотермический эффект, который объясняется незавершенными процессами поликонденсации полифенилсилоксанов. При температурах 200–300 °С происходит перегруппировка внутри молекул полифенилсилоксанов с выделением летучих циклических соединений, 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 °С завершаются процессы разложения и выгорания органической части полифенилсилоксана с формированием высокодисперсного аморфного SiO_2 .

Выявлено интенсифицирующее влияние добавки полифенилсилоксана на процесс спекания пористых проницаемых корундовых и кварцевых керамических материалов, заключающееся в формировании в области контакта частиц наполнителя тонкодисперсного аморфного оксида кремния, обладающего повышенной реакционной способностью, что позволяет получать корундовые керамические фильтрующие материалы при 1300 °С и кварцевые – при 1200 °С с высокими физико-химическими свойствами.

Подложки, полученные на основе оптимальных составов сырьевых композиций, характеризуются следующими показателями: средний эквивалентный диаметр поровых каналов – 10–40 мкм, открытая пористость – 21,78–32,12 %, механическая прочность при сжатии 17,72–21,76 МПа, коэффициент проницаемости – $(1,761–1,780) \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$.

Нанесение и закрепление микрофильтрующего покрытия на поверхность пористых проницаемых корундовых и кварцевых подложек осуществлялось методами пленочного литья с последующей термообработкой, что позволило получить однородные покрытия толщиной 30–50 мкм. Наблюдалось проникновение частиц мембранного слоя в поры подложки на глубину 5–10 мкм и формирование промежуточного слоя в области контакта мембранного покрытия и подложки.

Поровая структура микрофильтрующего керамического покрытия представлена развитой сетью открытых каналообразующих макропор щелевидной формы, средний эквивалентный диаметр которых составляет 1–4 мкм. Наблюдаются контактные области между зёрнами, которые обеспечивают сцепление частиц между собой, образуя каркас пористого проницаемого керамического материала. Структура разработанных двухслойных микрофильтрующих корундовых керамических материалов представлена на рисунке 4.

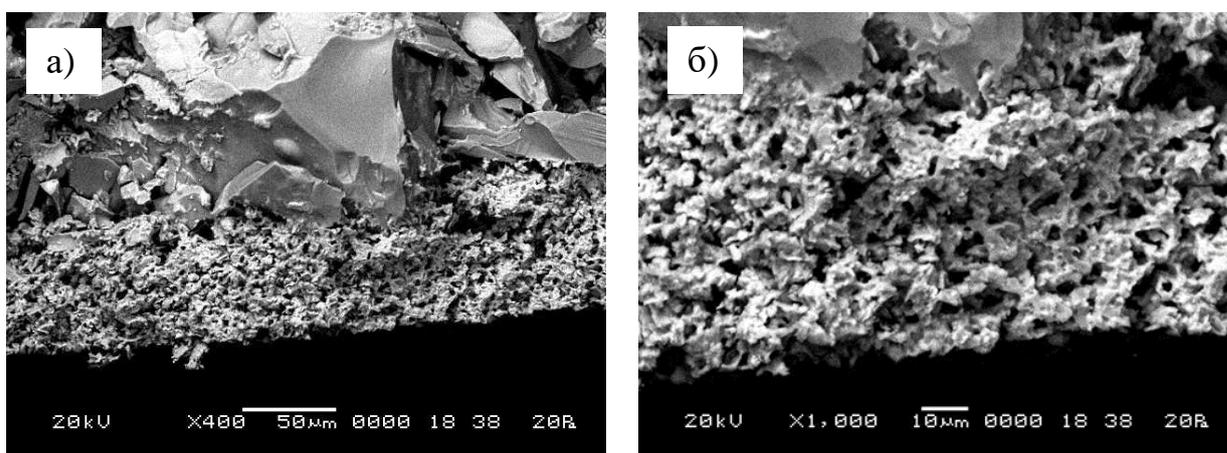


Рисунок 4. – Структура двухслойной микрофильтрующей корундовой керамики при увеличении $\times 400$ (а), $\times 2000$ (б)

Разработанные двухслойные микрофильтрующие материалы, полученные с использованием корундовой керамической подложки, обладают следующими характеристиками: температура обжига – 1250 °С, механическая прочность при сжатии – 19,46–21,76 МПа, кислотостойкость – 98,19–98,51 %, коэффициент проницаемости – $(1,312–1,614) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, средний эквивалентный диаметр пор мембранного слоя – 1–4 мкм.

Двухслойные микрофильтрующие материалы, полученные с использованием кварцевых керамических подложек, имеют следующие физико-химические характеристики: температура обжига – 1200 °С, механическая прочность при сжатии – 17,72–19,46 МПа, коэффициент проницаемости – $(1,266–1,519) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, средний эквивалентный диаметр пор мембранного слоя – 1–4 мкм.

В пятой главе приведены разработанные технологические параметры получения многослойной пористой проницаемой керамики для микрофльтрации дисперсных систем, результаты практического использования разработанных материалов, проведена оценка экономического эффекта производства изделий, который составит 13 116,20 руб. на 1 т продукции.

Разработанная двухстадийная технология производства позволяет получать на первой стадии пористые проницаемые корундовые и кварцевые подложки, которые могут быть использованы в качестве макрофильтрующих изделий, на второй – двухслойные керамические материалы для микрофльтрации дисперсных систем.

В условиях станции обезжелезивания КУП ЖКХ г. Узды успешно выполнены опытно-промышленные испытания по обезжелезиванию подземных вод с использованием разработанных керамических материалов с микрофильтрующим слоем, полученным в системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$.

Проведена оценка миграции соединений алюминия, кремния, марганца, железа, цинка и меди из разработанных микрофильтрующих керамических материалов в воду в процессе их эксплуатации.

На базе лаборатории клеточных технологий ГНУ «Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси» получены положительные результаты испытания разработанных микрофильтрующих керамических материалов в установках для фракционирования субпопуляций клеток человека.

В условиях производственно-испытательной лаборатории (аттестат аккредитации № ВУ/112 02.2.0.4339) РУП «Институт мясо-молочной промышленности» экспериментально подтверждена возможность применения пористых керамических подложек в качестве фильтрующего элемента для очистки молока и молочных продуктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Комплексные экспериментально-теоретические исследования свойств и особенностей структуро- и фазообразования, апробация результатов по созданию слоистых пористых проницаемых материалов на основе корундовой и кварцевой керамики с микрофильтрующим слоем из структурированных тонкодисперсных керамических порошков, полученных в результате термически инициируемого взаимодействия компонентов в системе нитрат металла – карбамид, позволили сделать следующие выводы:

1. Установлены особенности энергоэффективного процесса получения ультрадисперсных частиц для микрофильтрующего слоя на основе композиций $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZnO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CuO}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MnO}_2$, содержащих 97,0–99,5 мол. % Al_2O_3 , заключающиеся в термически инициируемом взаимодействии компонентов в системе нитрат металла – карбамид, сопровождающемся образованием самовоспламеняющейся смеси газов (NH_3 , HNCO , оксиды азота), что обеспечивает повышение температуры в реакционной зоне до 1300–1600 °С и последующее формирование пористых чешуйчатых агрегатов размером 2–8 мкм [4, 5, 16, 24].

2. Установлено, что керамические порошки, полученные при термически инициируемом взаимодействии компонентов в системе нитрат металла – карбамид, являются агрегированными полидисперсными системами частиц, которые характеризуются угловатой пластинчатой формой с наличием криволинейных плоскостей и острых углов, что позволяет создавать на их основе корпускулярные пористые проницаемые тела с плоскощелевидной и клиновидной формой пор, обладающих лабиринтообразным сообщением в смежных поровых каналах, для использования в качестве микрофильтрующих материалов [4, 5, 22].

3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность применения полифенилсилоксана в качестве связующего при получении макропористых корундовых и кварцевых подложек, что обусловлено его высокими пластифицирующими свойствами, обеспечивающими прочную связь каркасообразующих частиц и формирование пространственной пористой структуры материала, а также интенсификацией процесса спекания за счет формирования в области контакта каркасообразующих частиц тонкодисперсного аморфного оксида кремния, обладающего повышенной реакционной способностью, что позволило достичь механической прочности при сжатии 17–22 МПа [4, 23, 24].

4. Экспериментально подтверждено, что использование метода пленочного литья суспензии из структурированных тонкодисперсных керамических порошков позволяет сформировать однородные микрофильтрующие покрытия толщиной 30–50 мкм на поверхности пористых проницаемых керамических подложек, при этом глубина проникновения частиц мембранного слоя в поры подложек составляет 5–10 мкм, а поровая структура покрытия сформирована в виде развитой сети открытых каналобразующих макропор щелевидной формы, средний эквивалентный диаметр которых равен 1–4 мкм [3, 5, 9, 10, 13, 15, 16, 18, 20, 21].

5. Разработаны составы и технологические параметры получения двухслойных пористых проницаемых керамических материалов на основе макропористых корундовых и кварцевых подложек в сочетании с микрофильтрующим мембранным слоем, обеспечивающие высокие физико-химические и эксплуатационные характеристики изделиям [1, 2, 6–8, 11, 12, 14, 19, 25–27]. Полученные результаты подтверждены испытаниями изготовленных опытных образцов на предприятиях и в организациях Республики Беларусь [3–5, 17].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанная двухстадийная технология производства изделий позволяет получать на первой стадии пористые проницаемые корундовые и кварцевые подложки, которые могут быть использованы в качестве макрофильтрующих изделий, на второй – двухслойные керамические материалы для микрофильтрации дисперсных систем [4, 5, 14].

2. Разработаны составы сырьевых композиций и технологические параметры получения двухслойных микрофильтрующих керамических материалов, на рецептуры и способ изготовления которых получен 1 патент и поданы 2 заявки на предполагаемые изобретения Республики Беларусь [4, 5, 25–27].

3. Результаты опытно-промышленных испытаний по обезжелезиванию подземных вод с использованием разработанных фильтрующих керамических материалов с активным слоем, проведенные в условиях станции обезжелезивания КУП ЖКХ г. Узды, свидетельствуют о возможности применения разработанных материалов для обезжелезивания подземных вод. Показано, что эффективность очистки подземных вод с использованием разработанных материалов составляет от 41,4 до 80,0 % [5].

Проведена оценка миграции соединений алюминия, кремния, марганца, железа, цинка и меди из разработанных микрофильтрующих керамических материалов в воду в процессе их эксплуатации, которая позволила установить соответствие продуктов фильтрации требованиям Санитарных правил и норм 2.1.4. «Питьевая вода и водоснабжение населенных мест. Питьевая вода.

Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарные правила и нормы СанПиН 10–124 РБ 99», утвержденных постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 19 октября 1999 г. № 46, с изменениями, утвержденными постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 26 марта 2002 г. № 16 (протокол № 52.21.06136-06140 от 30.09.2019).

4. Исследования возможности использования разработанных двухслойных пористых проницаемых материалов для фракционирования субпопуляций клеток человека в условиях лаборатории клеточных технологий ГНУ «Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси» позволили установить, что разработанные материалы не оказывают цитотоксического действия на клетки и позволяют дифференцировать их по размерам [4, 17, 23].

5. Исследования возможности применения пористых керамических подложек в качестве фильтрующего элемента для очистки молока и молочных продуктов, проведенные на базе производственно-испытательной лаборатории РУП «Институт мясо-молочной промышленности», показали, что применение разработанных фильтрующих материалов позволяет отделять 18,2 % молочного жира и 87,4 % количества мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов [3].

Список публикаций соискателя ученой степени

Статьи

1. Павлюкевич, Ю. Г. Микроструктурированная высокоглиноземистая керамика для фильтрации дисперсных систем / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович // Труды БГТУ. – 2015. – № 3. – С. 15–19.
2. Porous permeable high-alumina ceramic materials for macro- and microfiltration / Y. G. Pauliukevich, O. Kizinievič, M. M. Hundzilovich, G. Girskas // Engineering Structures and Technologies. – 2015. – Vol. 7, № 3. – P. 146–150.
3. Особенности формирования микроструктуры проницаемой многослойной высокоглиноземистой керамики с микрофильтрующим слоем, полученным на основе систем Al_2O_3-CuO и $Al_2O_3-TiO_2-MnO_2$ / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович, Ю. А. Климош, О. Кизиниевич, О. В. Дымар // Огнеупоры и техн. керамика. – 2016. – № 4–5. – С. 21–26.
4. Павлюкевич, Ю. Г. Микрофильтрующая кварцевая керамика для фракционирования компонентов крови / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович, Л. Н. Николаевич // Труды БГТУ. Сер. 2, Хим. технологии, биотехнология, геоэкология. – 2017. – № 2. – С. 152–158.
5. Павлюкевич, Ю. Г. Многослойные микрофильтрующие керамические материалы с каталитическим покрытием, полученным с применением метода иницируемой экзотермической реакции / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович // Огнеупоры и техн. керамика. – 2017. – № 4–5. – С. 7–12.

Материалы конференций

6. Павлюкевич, Ю. Г. Исследование процессов формирования микроструктуры проницаемой высокоглиноземистой керамики для микро- и ультрафильтрации дисперсных гидросистем / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович / Тенденции интеграции образования, науки и бизнеса : материалы Белорусско-Литовской биржи деловых контактов, Минск, 27–28 нояб. 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2014. – С. 74–76.
7. Павлюкевич, Ю. Г. Керамические мембранные фильтры / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович / Перспективные направления использования новых материалов : материалы специализированной выставки и республиканского семинара, Минск, 2014 г. / Белорус. инст. сист. анал. и информ. обеспечения науч.-техн. сферы. – Минск, 2014. – С. 68–69.
8. Гундилович, Н. Н. Высокоглиноземистая проницаемая керамика для микро- и ультрафильтрации дисперсных систем / Н. Н. Гундилович, Ю. Г. Павлюкевич / Новые горизонты – 2014 : материалы Белорусско-Китайского

молодежного инновационного форума, Минск, 3–4 дек. 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2015. – С. 17–19.

9. Павлюкевич, Ю. Г. Влияние стеклобоя на формирование структуры проницаемой керамики / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович, М. В. Деревяго, Д. В. Деревяго // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. (68-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ), Минск, 2015 г. : в 4 т. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталева (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – Т. 4. – С. 454.

10. Гундилович, Н. Н. Пути снижения энергозатрат при получении высокоглиноземистой фильтрующей керамики / Н. Н. Гундилович, Ю. Г. Павлюкевич // Технологія – 2015 : матеріали XVIII Міжнар. наук.-техн. конф., Сєверодонецьк, 17–18 квіт. 2015 р. / Технол. ін-т Східноукр. нац. ун-ту ; редкол.: М. А. Глікін, О. В. Суворін. – Сєверодонецьк, 2015. – С. 99–102.

11. Павлюкевич, Ю. Г. Исследование физико-механических свойств пористой проницаемой высокоглиноземистой керамики / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович, О. Кизиниевич // Новейшие достижения в области инновационного развития в химической промышленности и производстве строительных материалов : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18–20 нояб. 2015 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; редкол.: И. М. Жарский (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 39–42.

12. Павлюкевич, Ю. Г. Исследование механической прочности пористой проницаемой высокоглиноземистой керамики / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович // Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения : материалы Всерос. науч.-техн. конф. (с междунар. участием), Стерлитамак, 17–18 дек. 2015 г. : в 2 т. / Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т ; редкол.: Р. Р. Насыров (отв. ред.) [и др.]. – Уфа, 2015. – Т. 2. – С. 290–291.

13. Multilayer high-alumina ceramic materials for disperse systems microfiltration with active layer received in Al_2O_3-CuO , $Al_2O_3-TiO_2-MnO_2$ systems / Y. G. Pauliukevich, O. Kizinievič, M. M. Hundzilovich, Y. A. Klimash // Modern building materials, structures and techniques : materials of 12th Intern. conf., Vilnius, 26–27 May 2016 / Vilnius Gediminas Techn. Univ. ; ed.: A. Juozapaitis [et al.]. – Vilnius, 2016. – P. 839–845.

14. Павлюкевич, Ю. Г. Керамические материалы для мембранных процессов сепарации и концентрирования жидких и газообразных продуктов / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович, Ю. А. Климош, О. Кизиниевич // Сотрудничество – катализатор инновационного роста : сб. материалов 2-го Белорус.-Прибалт. форума, 6–7 окт. 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016. – С. 42–43.

15. Гундилович, Н. Н. Кварцевая керамика для мембранных процессов сепарации и концентрирования жидких и газообразных продуктов / Н. Н. Гундилович, А. А. Кашкан // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 27–28 окт. 2016 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2016. – С. 60.

16. Гундилович, Н. Н. Получение тонкодисперсных керамических порошков методом инициируемой экзотермической реакции / Н. Н. Гундилович // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 27–28 окт. 2016 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2016. – С. 71.

17. Саунина, К. Н. Разделение опухолевых клеток глиомы крысы С6 на субпопуляции с помощью кварцевых фильтров и оценка их пролиферации / К. Н. Саунина, Н. Н. Гундилович, Л. Н. Николаевич, Ю. Г. Павлюкевич // Рос. биотерапевт. журн. – 2017. – Т. 16, спецвып. : XIV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием имени А. Ю. Барышникова «Отечественные противоопухолевые препараты», Москва, 16–17 марта 2017 г. – С. 70–71.

18. Шиманская, А. Н. Синтез металлокерамических каталитических наноматериалов / А. Н. Шиманская, Н. Н. Гундилович // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 26–27 окт. 2017 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 116.

Тезисы докладов

19. Гундилович, Н. Н. Особенности спекания высокоглиноземистых проницаемых материалов / Н. Н. Гундилович, М. В. Деревяго // Новые функциональные материалы современные технологии и методы исследования : тез. докл. III респ. науч.-техн. конф. молодых ученых, Минск, 4–6 нояб. 2014 г. / Ин-т механики металлополимер. систем им. В. А. Белого Нац. акад. наук Беларуси. – Гомель, 2014. – С. 23–24.

20. Павлюкевич, Ю. Г. Микроструктурированная керамика для фильтрации дисперсных систем / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович, М. В. Деревяго // Химическая технология и техника : тез. докл. 79-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 2–6 февр. 2015 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; гл. ред. И. М. Жарский. – Минск, 2015. – С. 80.

21. Павлюкевич, Ю. Г. Особенности формирования структуры высокоглиноземистых асимметричных мембранных фильтров для разделения дисперсных систем / Ю. Г. Павлюкевич, Ю. А. Климош, Н. Н. Гундилович // Химическая

технология и техника : тез. докл. 80-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–12 февр. 2016 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; гл. ред. И. М. Жарский. – Минск, 2016. – С. 85.

22. Гундилович, Н. Н. Многослойная пористая проницаемая высокоглиноземистая керамика для микрофльтрации дисперсных гидросистем / Н. Н. Гундилович, Ю. Г. Павлюкевич // «Химия – 2016» : междунар. выставка хим. промышленности и науки. Конкурс проектов молодых ученых. X конкурс проектов молодых ученых, 20 сент. 2016 г. : тез. докл. / Рос. хим.-технол. ун-т. – М., 2016. – С. 9–11.

23. Павлюкевич, Ю. Г. Микро- и ультрафильтрующие материалы из оксидной керамики для мембранных процессов сепарации и концентрирования жидких и газообразных продуктов / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович // Химическая технология и техника : тез. докл. 81-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 1–12 февр. 2017 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; гл. ред. И. М. Жарский. – Минск, 2017. – 2017. – С. 27.

24. Pauliukevich, Y. G. Micro- and ultrafiltration ceramic oxide materials for membrane separation and concentration processes of liquid and gaseous products / Y. G. Pauliukevich, M. M. Hundzilovich, Y. A. Klimash // 92. DKG Jahrestagung in Verbindung mit dem Symposium Hochleistungskeramik, Berlin, 19–22 März 2017 / Dt Keramische Ges. – Berlin, 2017. – P. 101.

Патенты Республики Беларусь

25. Керамическая масса для изготовления фильтров : пат. ВУ 21421 / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович. – Оpubл. 30.10.2017.

26. Мембранный керамический фильтр : заявка ВУ а 20160190 / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович. – Оpubл. 25.05.2016.

27. Способ изготовления керамического фильтра : заявка ВУ а 20180445 / Ю. Г. Павлюкевич, Н. Н. Гундилович, Б. П. Жих. – Оpubл. 31.10.2018.



РЭЗІЮМЭ

Гундзіловіч Мікалай Мікалаевіч

Двухслаёвыя порыстыя керамічныя матэрыялы для мікрафільтрацыі дысперсных сістэм

Ключавыя словы: мікрафільтрацыя, карундавая кераміка, поліфенілсілаксан, порыстасць, кварцавая кераміка, пранікальнасць, шматслаёвая мембрана.

Мэта работы: распрацоўка саставаў і тэхналагічных параметраў атрымання мікрафільтруючых карундавых і кварцавых керамічных матэрыялаў, а таксама ўстанаўленне заканамернасцяў працэсу фарміравання порыстай пранікальнай структуры ва ўзаемасувязі з фізіка-хімічнымі ўласцівасцямі, фазавым складам і эксплуатацыйнымі характарыстыкамі фільтраў.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: скарыстоўваліся стандартызаваныя метадыкі керамічнай вытворчасці, рэнтгенафазавы аналіз (D8 ADVANCE, Bruker), сканіруючая электронная мікраскапія (JSM-5610 LV, JEOL), аптычная мікраскапія (DFC 280, Leica), інфрачырвоная спектраскапія (ESP, NEXUS), дыферэнцыяльная сканіруючая каларыметрыя (DSC 404 F3 Pegasus, NETZSCH), лазерны дысперсійны аналіз (Analizette 22 MicroTec, Fritsch), адсарбцыйная параметрыя (NOVA 2200, Quantachrome).

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны саставы і тэхналагічныя параметры атрымання мікрафільтруючых карундавых і кварцавых керамічных матэрыялаў з функцыянальнымі мембраннымі пакрыццямі, атрыманымі ў сістэмах $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO}$ і $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}_2$; устаноўлены заканамернасці працэсу фарміравання слаёвай порыстай пранікальнай структуры ва ўзаемасувязі з фізіка-хімічнымі ўласцівасцямі, фазавым саставам і эксплуатацыйнымі характарыстыкамі фільтруючых матэрыялаў.

Навукова абгрунтавана і эксперыментальна пацверджана мэтазгоднасць выкарыстання поліфенілсілаксану ў якасці сувязнога для атрымання порыстай пранікальнай карундавай і кварцавай керамікі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: ва ўмовах станцыі абезжалевання КУП ЖКГ г. Узды выкананы доследна-прамысловыя выпрабаванні распрацаваных фільтруючых керамічных матэрыялаў, выкананы выпрабаванні на базе вытворча-выпрабавальнай лабараторыі РУП «Інстытут мяса-малочнай прамысловасці» і ва ўмовах лабараторыі клеткавых тэхналогій ДНУ «Інстытут фізіялогіі Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі».

Галіна выкарыстання: керамічная прамысловасць.

РЕЗЮМЕ

Гундилович Николай Николаевич

Двухслойные пористые керамические материалы для микрофльтрации дисперсных систем

Ключевые слова: микрофльтрация, корундовая керамика, полифенилсилоксан, пористость, кварцевая керамика, проницаемость, многослойная мембрана.

Цель работы: разработка составов и технологических параметров получения микрофльтрующих корундовых и кварцевых керамических материалов, а также установление закономерностей процесса формирования пористой проницаемой структуры во взаимосвязи с физико-химическими свойствами, фазовым составом и эксплуатационными характеристиками фильтров.

Методы исследования и использованная аппаратура: применялись стандартизированные методики керамического производства, рентгенофазовый анализ (D8 ADVANCE, Bruker), сканирующая электронная микроскопия (JSM-5610 LV, JEOL), оптическая микроскопия (DFC 280, Leica), инфракрасная спектроскопия (E.S.P., NEXUS), дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC 404 F3 Pegasus, NETZSCH), лазерный дисперсионный анализатор (Analizette 22 MicroTec, Fritsch), адсорбционная порометрия (NOVA 2200, Quantachrome).

Полученные результаты и их новизна. Разработаны составы и технологические параметры получения микрофльтрующих корундовых и кварцевых керамических материалов с функциональными мембранными покрытиями, полученными в системах $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZnO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CuO}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MnO}_2$; установлены закономерности процесса формирования слоистой пористой проницаемой структуры во взаимосвязи с физико-химическими свойствами, фазовым составом и эксплуатационными характеристиками фльтрующих материалов.

Научно обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность использования полифенилсилоксанов в качестве связующего для получения фльтрующей корундовой и кварцевой керамики.

Рекомендации по использованию: в условиях станции обезжелезивания КУП ЖКХ г. Узды были проведены опытно-промышленные испытания разработанных фльтрующих керамических материалов, выполнены испытания на базе производственно-испытательной лаборатории РУП «Институт мясо-молочной промышленности» и в условиях лаборатории клеточных технологий ГНУ «Институт физиологии Национальной академии наук Беларуси».

Область применения: керамическая промышленность.

SUMMARY

Hundzilovich Mikalai Mikalayevich

Dual-layer porous ceramic materials for microfiltration of dispersed systems

Keywords: microfiltration, corundum ceramics, polyphenylsiloxane, solution combustion synthesis, quartz ceramics, permeability, multilayer membrane.

The objective of the work: development of compositions and technological parameters for the production of filtering corundum and quartz ceramic materials, as well as the establishment of regularities in the process of forming a porous permeable structure in conjunction with the physico-chemical properties, phase composition and performance characteristics of filtering materials.

Research methods and used equipment: standard techniques of ceramic production, X-ray phase analysis (D8 ADVANCE, Bruker), scanning electron microscopy (JSM-5610 LV, JEOL), optical microscopy (DFC 280, Leica), infrared spectroscopy (ESP, NEXUS), differential Real Scanning Calorimetry (DSC 404 F3 Pegasus, NETZSCH); Laser dispersion analyzer (Analizette 22 MicroTec, Fritsch); Adsorption porometry (NOVA 2200, Quantachrome).

The obtained results and their novelty. The compositions and technological parameters of obtaining filtering corundum and quartz ceramic materials with functional membrane coatings obtained in the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZnO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--CuO}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MnO}_2$ systems were developed; the regularities of the process of formation of a layered porous permeable structure have been established in conjunction with the physicochemical properties, phase composition and performance characteristics of filter materials.

Scientifically substantiated and experimentally confirmed the desirability of the use of polyphenylsiloxanes as a binder to obtain porous permeable corundum and quartz ceramics.

Recommendations for use: experimental-industrial tests of the developed filtering ceramic materials were carried out on the basis of the iron removal station of the Municipal unitary enterprise in Uzda city, tests on the basis of the production testing laboratory of the RUE “Institute of Meat and Dairy Industry” and in the laboratory of cellular technologies of the SSI “Institute of Physiology of the National Academy of Sciences of Belarus” were carried out.

Field of application: ceramic industry.

Научное издание

Гундилович Николай Николаевич

**ДВУХСЛОЙНЫЕ ПОРИСТЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ МИКРОФИЛЬТРАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.17.11 – технология силикатных
и тугоплавких неметаллических материалов

Ответственный за выпуск Н. Н. Гундилович

Подписано в печать 11.03.2020. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. 1,6 л. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 60 экз. Заказ 69.

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.