



## Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения: технология производства и применения

Д.А. Синицин<sup>1</sup> , У.Ш. Шаяхметов<sup>2</sup>, О.Н. Рахимова<sup>3</sup>, Р.М. Халиков<sup>1\*</sup> , И.В. Недосеко<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Республика Башкортостан, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», г. Уфа, Россия

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Кумертауский филиал, г. Кумертау, Россия

\*Контакты: e-mail: rauf\_khalikov@mail.ru

**РЕЗЮМЕ: Введение.** Пенокерамические теплоизоляционные стройматериалы обладают наибольшей устойчивостью востребованных технологических характеристик за счет уникальных физико-технических свойств. Увеличение крупнотоннажного выпуска наноструктурированных пенокерамических изделий и разработка образовательных программ повышения квалификации инженеров-технологов остается актуальной задачей. **Методы и материалы.** Технологичный способ изготовления наноструктурированной пенокерамики – это метод прямого вспенивания: керамические пены создают путем вовлечения атмосферного воздуха в суспензию. Далее консолидированные пены бережно сушат и в течение 12 часов спекают термообработкой (950–1100°C) с получением достаточно высокопрочных пенокерамик строительного назначения. Важнейшими сырьевыми материалами для производства строительной пенокерамики являются глины, диатомиты, кремнистые минералы, цеолитные породы, а также керамические и шлаковые отходы и др. **Результаты.** Разработана технология производства пенокерамических материалов строительного назначения на основе глинистого сырья. В результате физико-химических трансформаций в цикле производства, в т.ч. обжига формируются равномерно закрытые микропоры пенокерамики диаметром до 120 мкм, а толщина стенок варьирует от 1,8 до 6,3 мкм. Предел прочности при сжатии полученных наноструктурированных строительных пенокерамических изделий средней плотностью 450–850 кг/м<sup>3</sup> составляет 3–8 МПа, теплопроводность – 0,12–0,15 Вт/(м·°C), морозостойкость – не менее 50 циклов. **Обсуждение.** В крупномасштабном технологичном производстве пеномассу (трехфазную пену) можно получить смешиванием наноструктурированной пены с высокодисперсным минеральным порошком. Контролируемым спеканием изготавливается высушенная пеномасса с востребованными технологическими характеристиками, обусловленными кристаллической связью твердофазного муллита на основе кластерных микрочастиц размерами 15–200 нм, а стенки микропор и узловые стыки наноструктурированной пенокерамики обеспечивают высокую механическую прочность, гидрофобность и химическую стойкость. **Заключение.** Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения достаточно влагостойка, так как имеет микроструктуру закрытых ультрамикропор, устойчива к химическому и физическому воздействию и поэтому является оптимальным теплоизоляционным материалом.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** наноструктурированная пенокерамика, технология изготовления, пенокерамические стройматериалы, образовательные программы.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Синицин Д.А., Шаяхметов У.Ш., Рахимова О.Н., Халиков Р.М., Недосеко И.В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения: технология производства и применения // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 4. – С. 213–221. – DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221.

### ВВЕДЕНИЕ

При строительстве жилых домов, промышленных зданий одним из важных аспектов в подборе материалов являются повышенные тепло- и звукоизоляционные характеристики, поэтому строймате-

риалы, одновременно сочетающие легкость, малую теплопроводность с достаточной конструкционной прочностью, следует рассматривать в качестве наиболее перспективных для энергосберегающей стройиндустрии. В настоящее время наиболее полно этим требованиям отвечают высокопористые сили-

катные пеноматериалы: пенокерамика, ячеистые бетоны, пеностекло, пенобетоны на основе пористых заполнителей. Благодаря уникальным физико-техническим характеристикам пенокерамические теплоизоляционные стройматериалы и изделия обладают наибольшей стабильностью технологических параметров: био- и коррозионностойки, долговечны, негоряемы и т.п. [1–4]. Пенокерамика в гранулах в качестве инновационного утеплителя может использоваться в непосредственном контакте с цементосодержащими штукатурками, стяжками и др. Решение задачи увеличения крупнотоннажного выпуска наноструктурированных пенокерамических стройматериалов с получением высокопористой микроструктуры и разработки образовательных программ повышения квалификации инженеров-технологов является актуальной задачей.

Цель данной статьи – рассмотрение особенностей технологии получения нанопористой керамики строительного назначения.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Пенокерамика – спеченный твердофазный энергосберегающий стройматериал малой теплопроводностью ( $0,05–0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ) с закрытыми (изолированными) микропорами диаметрами от 7 нм до 8 мкм. Необходимую микроструктуру пенокерамических изделий получают путем введения в состав глинистой суспензии различных порообразователей, выгорающих добавок, пористых заполнителей и др. [5–7]. Практичный метод изготовления наноструктурированной пенокерамики – это способ прямого вспенивания: керамические пены создают путем включения воздуха в суспензию или жидкофазную среду. Пористость и распределение закрытых ячеистых микропор по размерам можно контролировать, изменяя вязкость керамической пены и технологию вспенивания. Далее в технологическом производстве консолидированные пены осторожно сушат и спекают термообработкой ( $950–1100^\circ\text{C}$ ) в течение 10–12 часов с получением высокопрочных пенокерамик строительного назначения.

Скорость обжига пенокерамических изделий, в результате которого образуется прочный и водостойкий муллит, должна быть контролируема, чтобы избежать появления дефектных трещин. Вспенивание сырьевых керамических суспензий включает диспергирование газа в виде микропузырьков: включение атмосферного воздуха путем механического вспенивания (или впрыска газового потока) или газовыделение *in situ* [8, 9]. В случае газовыделения *in situ* пенообразователи распадаются под действием тепла или химической реакции с формированием газовых микропор внутри керамической наносуспен-

зии. Для стабилизации газовых микропузырьков, образующихся в суспензии, поверхностное натяжение границы раздела газ-жидкость необходимо уменьшить, поэтому в большинстве случаев добавляют поверхностно-активные компоненты.

Наноструктурированную пенокерамику строительного назначения также изготавливают методом реплики [10–12] (дублирования): трехмерную сетчатый прекурсор на базе пенополиуретановых или других подходящих макромолекул с открытыми порами погружают в керамическую суспензию. Затем удаляют избыточную суспензию, пиролизуют органические компоненты, далее пористую пенокерамику спекают для достижения необходимой механической прочности. Поризованную строительную керамику достаточно небольшой себестоимостью получают на основе доступного местного глинистого сырья, а для формирования пор в качестве выгорающих добавок наиболее часто применяют древесные опилки, торф, солому, гранулы пенополистирола, углеотходы, топливный шлак и др.

Керамическая пена представляет собой метастабильную дисперсию, поэтому важно закрепить макроструктуру пены, чтобы сохранить ячеистую наноструктуру во время дальнейшей процедуры нагрева. Низкотемпературное вспенивание [13], а также модифицированные золь-гель методы используются для консолидации керамических пен без каких-либо других нанодобавок. Микроструктура наноструктурированной пенокерамики представляет собой твердофазный стройматериал, заполненный микропорами газообразного воздуха. Резкое уменьшение прочности при изгибе и повышение водопроницаемости пенокерамики строительного назначения интерпретируется увеличением количества открытых микропор.

Основными сырьевыми материалами для производства строительной пенокерамики являются минеральное сырье: глины, диатомиты, кремнистые минералы, щелочные геополимеры, цеолитные породы и др., а также шлаковые отходы, речной ил, керамические отходы, сланцы и т.п. В результате физико-химических трансформаций в процессе производства, в т.ч. обжига формируется необходимое количество равномерно закрытых микропор, ритмично распределенных по всему объему стройматериала.

На сегодняшний день теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность технологического получения инновационных пенокерамических строительных изделий на основе легкоплавких глин, позволяющих сформировать устойчивую пеноструктуру, интенсифицировать процесс бездефектной сушки и последующего спекания. Для многотоннажного производства и использования наноструктурированной пенокерамики строи-

тельного назначения следует обязательно учитывать влияние компонентного состава пенокерамических масс на физико-технические свойства изделий [14], а также оптимальные параметры подготовки исходного сырья, поризации керамической массы пенообразованием, которая реализуется на существующих предприятиях, сушки и технологического обжига.

Технология производства наноструктурированной строительной пенокерамики относительно невысокой стоимости включает подготовку глиняного сырья, интенсивное перемешивание с диспергирующими компонентами (рис. 1) и пенообразователями.

Более равномерное по объему распределение микропор в пенокерамической дисперсии после добавления вспенивателей (пенообразователей) способствует формированию ячеистой ультрамикроструктуры строительной наноструктурированной пенокерамики. Преимущественное использование дешевого местного сырья и техногенных отходов [15, 16] в технологическом цикле позволяет значительно уменьшить себестоимость нанопенокерамического стройматериала.

При изготовлении строительной пенокерамики со средней плотностью ниже  $1000 \text{ кг/м}^3$  с использованием традиционного метода выгорающих добавок в технологическом цикле возникает множество проблем. Ведутся разработки технологии пенокерамики методом вспенивания скоростным смесителем шликерной массы суспензии глины, стабилизированной пирофосфатом натрия. Усиленная механоактивация

[17] водных глиняных суспензий в присутствии разжижающих нанодобавок — электролитов позволяет достигать гомогенности керамической пены. Использование электролитных добавок, например, водных растворов силикатов натрия, значительно понижает вязкость глиняного шликера, тем самым оптимизирует поризации керамической массы.

Введение в керамическую пену высокодисперсного минерального порошка, который смачивается жидкой фазой, при перемешивании приводит к образованию трехфазной пеномассы. Затем полученная керамическая пена формируется, высушивается и подвергается термообработке; при высушивании керамической пены жидкофазная вода испаряется и формируется наноструктурированная пенокерамика [18]. Для упрочнения пенокерамических стройматериалов используется регулируемый обжиг, при котором происходит разложение (трансформация диспергирующих нанодобавок) и спекание. Следует отметить, что в реальных условиях крупнотоннажного производства получение нанопористой керамики, одновременно сочетающей в себе легкость, теплоизоляционные свойства и высокую прочность, сопряжено затруднениями.

Наряду со средней плотностью наноструктурированной пенокерамики определение предела прочности на сжатие, теплопроводности и водопоглощение является определяющими параметрами высокопористой керамики строительного назначения. В наноструктурированной пенокерамике теплопередача определяется теплопроводностью, которая складывается из теплопроводности керамического стройматериала, а также теплопередачей в микропорах [19]. Следует отметить, на теплопроводность пористой керамики (аэрогеля) влияют характеристики воздуха, заполняющего поры, влажность и диаметр микропор.

Среди инновационных строительных материалов выделяют безобжиговую алюмосиликатную пенокерамику, которая имеет пеноячеистую наноструктуру (плотность  $230\text{--}550 \text{ кг/м}^3$ ), что дает ему некоторые преимущества по сравнению с другими аналогами по водостойкости и температурой эксплуатации до  $1200^\circ\text{C}$ . Автором [20] разработана энерго- и ресурсосберегающая безобжиговая технология изготовления пенокерамических материалов, преимуществами которых являются легкость, малая теплопроводность, достаточная конструкционная прочность.

Микрофотографии наноструктурированной пенокерамики получали с использованием растрового электронного микроскопа «JEOL JSM-6610LV» [21] сканированием поверхностных слоев с разрешением  $3\text{--}4 \text{ нм}$ . Для определения коэффициента теплопроводности пенокерамических образцов был использован прибор ИТП-МГ4 «100». Принцип функциони-

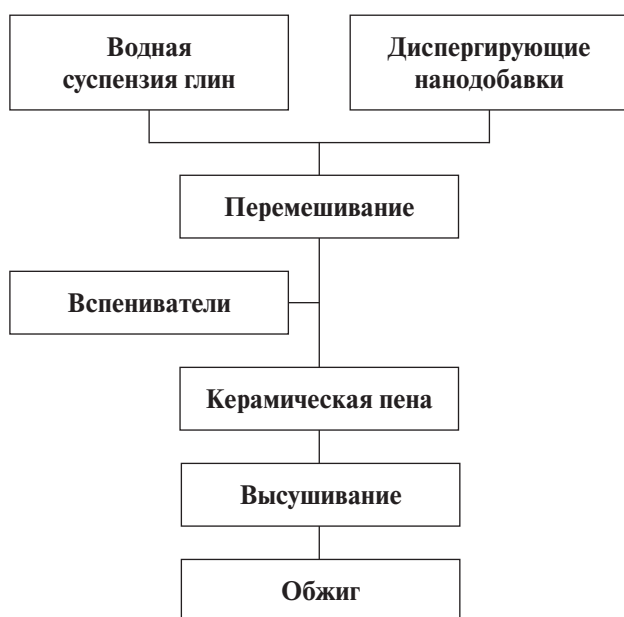


Рис. 1. Технологическая схема традиционного производства строительной наноструктурированной пенокерамики

рования устройства ИТП-МГ4 основан на создании стационарного теплового потока, проходящего через пенокерамический образец, измерении толщины образца, плотности теплового потока и температуры. Диапазон измерения теплопроводности методом теплового зонда составил 0,03–1 Вт/(м·°С), предел относительной погрешности определения коэффициента теплопроводности  $\pm 7$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показана микроструктура поверхности спила образца наноструктурированной пенокерамики строительного назначения, которая получена методом вспенивания низкоплавкой глины. На микрофотографии четко наблюдаются изолированные друг от друга микропоры пенокерамики диаметром до 120 мкм, а толщина стенок варьирует от 1,8 до 6,3 мкм.

В качестве футеровки высокотемпературных печей обжига пористой строительной нанокерамики часто используют огнеупорную пенокерамику с температурой эксплуатации не менее 1580°С. Производство стеклокристаллической наноструктурированной пенокерамики строительного назначения основано на использовании 50–88 мас.% пиррофиллита [22] (месторождения Куль-Юрт-Тау), 11–49 мас.% легкоплавких глин (Алексеевское месторождение Республики Башкортостан) и газообразующих нанодобавок – 0,5–1 мас.% карбида титана.

Производственная линия для изготовления теплоизоляционных строительных материалов из стеклокристаллической пенокерамики [23] организована методом вспенивания при обжиге аморфно-кристаллической матрицы с формированием ячеистой

микроструктуры неорганической пены, в которой практически все ультрамикропоры изолированы друг от друга. Пористая структура пенокерамики была создана по энергоэффективной технологии низкотемпературного 120–150°С вспенивания пористых керамических масс при газовыделении.

Сравнительный анализ основных типов пористых термостойких материалов проведен в работе [24] по жаропрочности, огнеупорности, термостойкости. Сопоставление многообразных композиций, обладающих наибольшей термостабильностью и огнеупорностью, позволило выбрать объекты на базе оксидов алюминия и оксида кремния, наиболее подходящие для создания соответствующих пористых термостойких неорганических композиционных материалов.

Основными технологическими характеристиками высокопористой пенокерамики выступают пористость, распределение пор по размеру, удельная поверхность. Стеклокристаллическая пенокерамика строительного назначения имела следующие физико-технические характеристики: предел прочности при сжатии – не менее 3,5 МПа; термостойкость (200°С) – не менее 50 циклов; температура использования – от –45 до +60°С; плотность – 350–600 кг/м<sup>3</sup>; низкая теплопроводность – 0,12–0,14 Вт/(м·°С). Разработана безобжиговая технология производства нанопенокерамических материалов строительного назначения с использованием фосфатных вяжущих [25] на основе глинистого местного сырья. Предел прочности при сжатии полученных наноструктурированных строительных изделий средней плотностью 450–850 кг/м<sup>3</sup> составляет 3–8 МПа, теплопроводность – 0,12–0,15 Вт/(м·°С), морозостойкость – не менее 50 циклов.

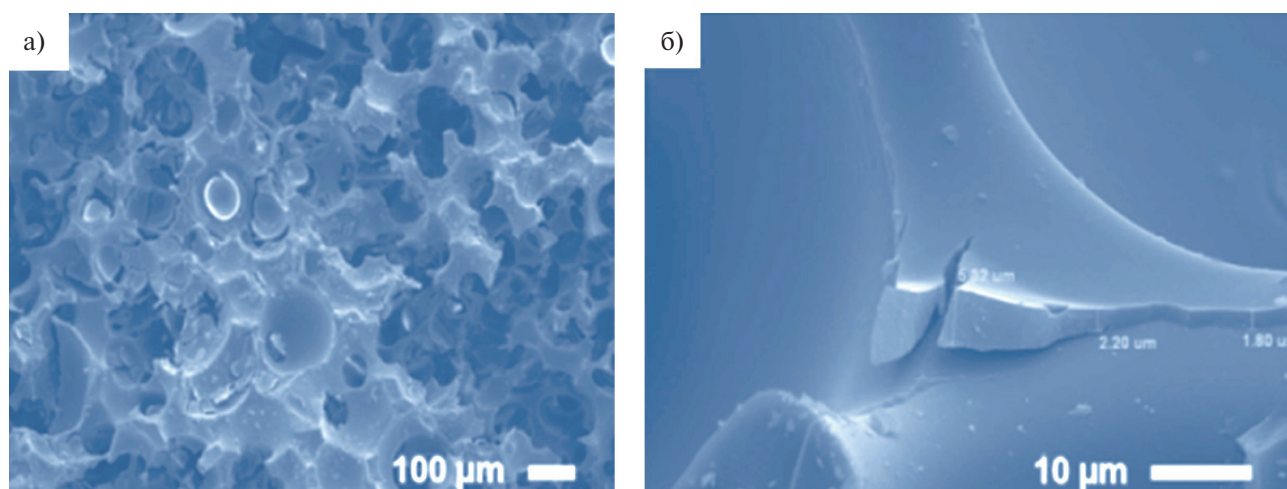


Рис. 2. Микрофотография поверхности спила пенокерамики (а); с увеличением для измерения толщины твердофазных стенок (б)

В 2014–2015 годах сотрудниками кафедры «Строительные конструкции» Архитектурно-строительного института Уфимского государственного нефтяного технического университета совместно с Башкирским государственным университетом завершена востребованная работа по проекту Фонда инфраструктурных и образовательных программ ОАО «РОСНАНО». Была разработана программа повышения квалификации в области разработки и производства высокопористой наноструктурированной пенокерамики строительного назначения [26]. Создание образовательных программ для повышения квалификации специалистов в области использования наноструктурированных пенокерамических изделий строительного назначения призвано формировать профессиональные компетенции инженеров-технологов [27, 28].

Процесс формирования компетенций технологов производства и применения нанопенокерамики на разных этапах обучения корректно описывается в рамках фрактальной концепции структурообразования и твердения востребованных композиционных стройматериалов [29]. В иерархической структуре образовательных программ для повышения квалификации выделяются узлы, а разветвленная фрактальная университетская система выступает центральным звеном повышения квалификации технологов производства наноструктурированной пенокерамики.

Для реализации национальных проектов Российской Федерации создана образовательная программа переподготовки и повышения квалификации инже-

нерных специалистов в области производства наноструктурированных пенокерамических изделий строительного назначения. Образовательная программа призвана обеспечить региональную стройиндустрию востребованными технологами производства и использования нанопенокерамических изделий, которые замещают импорт зарубежных аналогов.

Программа переподготовки и повышения квалификации инженеров производства наноструктурированных пенокерамических строительных изделий содержит три профессиональных модуля и один междисциплинарный курс, обязательный для всех целевых групп. Учебным планом повышения и переподготовки квалификации предусмотрено выполнение итоговой аттестационной работы с апробацией в производственных условиях. Образовательная программа (табл. 1) предназначена для обеспечения кадровым потенциалом конкурентоспособного, высокотехнологичного, отечественного производства изделий из высокопористой наноструктурированной многофункциональной строительной пенокерамики.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Среди инновационных строительных теплоизоляционных материалов следует отдельно выделить безобжиговую алюмосиликатную наноструктурированную пенокерамику. Этот спеченный инновационный материал на основе доступных глиен имеет пеноячеистую наноструктуру, что дает ему некоторые физико-механические преимущества по срав-

Таблица 1

**Образовательные результаты программы повышения квалификации технологов в области разработки и производства высокопористой наноструктурированной пенокерамики строительного назначения**

| Формулировка образовательного результата  | Структурная единица   |
|---|---|
| Виды пенокерамики. Технология производства наноструктурированной пенокерамики. Оборудование. Охрана труда и техника безопасности.                   | Междисциплинарный курс. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения. Производственная практика. |
| Разработка технологии производства материалов и изделий из наноструктурированной пенокерамики.  | Методы разработки материалов и изделий из наноструктурированной строительной пенокерамики.                      |
| Рекомендации по применению материалов и изделий из наноструктурированной строительной пенокерамики.   | Физико-механические характеристики наноструктурированной пенокерамики строительного назначения.                 |
| Подготовка технических заданий на проектирование оснастки, инструментов и приспособлений, предусмотренных технологией.                              | Практика в модельной ситуации и производственная апробационная практика на заводе.                              |
| Осуществление контроля за качеством технологического процесса производства строительных материалов и изделий из наноструктурированной пенокерамики. | Контроль качества производственного процесса крупнотоннажной пенокерамики строительного назначения.             |

нению с другими аналогами. Ультрамикроструктура безобжиговой строительной пенокерамики состоит из микропузырьков воздуха, которые окружены тонкими оболочками стеклокристаллического метастабильного каркаса твердофазного муллита.

Физико-химические реакции [30] формирования пенокерамического материала происходят на основе жидких пен и высокодисперсных минеральных порошков: дисперсионной средой в них является жидкофазная наносуспensionия, а дисперсионной фазой – газ в виде микропузырьков, которые отделены друг от друга пленками водной пленки. В крупномасштабном технологичном производстве пеномассу (трехфазную пену) можно получить смешиванием наноструктурированной пены с высокодисперсным минеральным порошком. Твердые глинистые микрочастицы в производственном процессе распределяются в жидкофазных пленках, а ультрамикропузырки окружаются двухфазными оболочками.

Далее идет следующий этап создания пенокерамики в строительстве – сушка: у пеномассы испаряется жидкая фаза, в результате чего образуется твердая (двухфазная) пена. В итоге спекания получается высушенная пеномасса с требуемой механической прочностью, обусловленная кристаллической связью твердофазного муллита, который формирует пеноячеистый каркас между аморфными компонентами пенокерамики. Кремнийоксидный аэрогель имеет стохастическую фрактальную [31] наноструктуру на основе кластерных микрочастиц размерами 15–

200 нм, агрегированных прочными ковалентными связями.

Чтобы сделать строительную пенокерамику более прочной, используют тривиальный обжиг, приводящий к пиролизу (разложению) органических составляющих, то есть стабилизаторов жидкой пены. В ходе термообработки происходит спекание наноструктурированной пенокерамики с сохранением микропор. Следует отметить, что соотношение между твердой и газовой фазами и размеры микропор в наноструктурированной пенокерамике строительного назначения могут изменяться в широких пределах.

Фосфатные композиции, которые используются в качестве безобжиговых вяжущих [32] пористых керамик, обнаруживают способности, присущие геополимерным неорганическим [33] макромолекулярным наноструктурам – при нагревании проявляют свойство пластического течения. В ходе термообработки аморфная фаза коллоидных фосфатных наноконпозиций смачивает поверхность частиц муллитового наполнителя, тем самым определяет адгезионные характеристики. Теплопередача наноструктурированной пенокерамики обуславливается теплопроводностью твердофазной пористой керамики стройматериала и газопроницаемостью за счет мультифрактальной диффузии [34] стенок микропор.

Поэтому достичь необходимых технологических характеристик, когда на основе промышленной технологии наноструктурированной пенокерамики лежат глинистые минералы, можно изменением со-

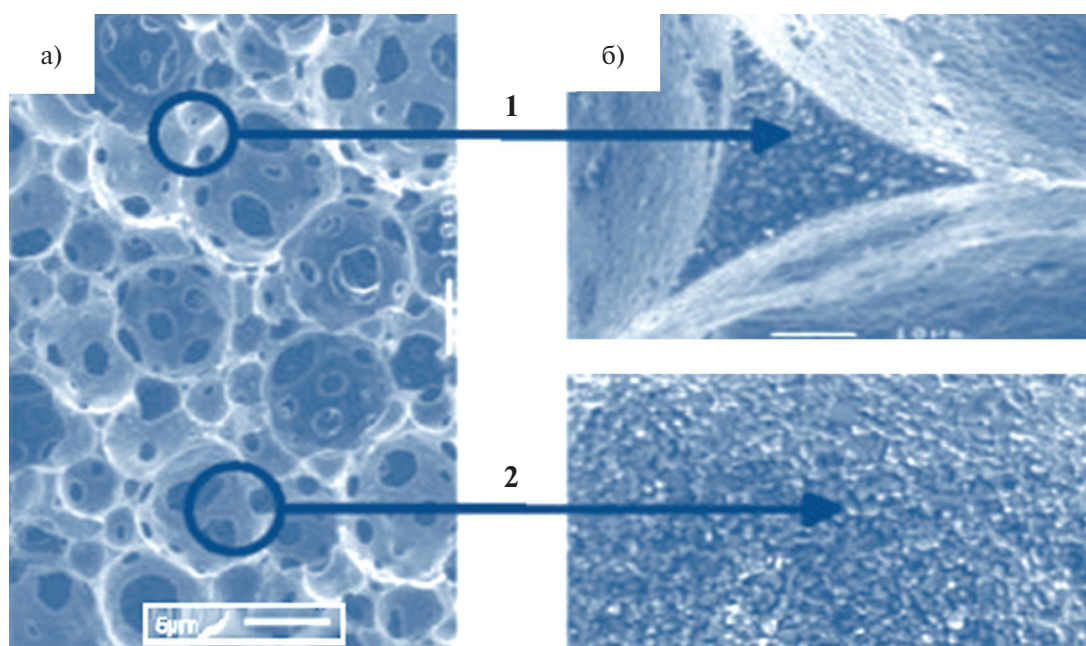


Рис. 3. Микроструктура пористой наноструктурированной керамики (а); с увеличением узловых стыков (б): 1 – узловые стыки; 2 – стенки

отношения фаз (твердой, жидкой и газообразной) в пеномассе и регулированием фазового состава. Отметим также, что стенки микропор (рис. 3) и узловые стыки наноструктурированной пенокерамики являются твердофазными и целиком плотными, и это обеспечивает высокую механическую прочность, гидрофобность и химическую стойкость.

Для поризованной нанокерамики характерны сравнительно высокая прочность на сжатие и невысокая прочность на изгиб, хорошие тепло- и звукоизоляция, воздухо- и паропроницаемость, низкое по сравнению с легкими бетонами водопоглощение (однако рекомендуется гидроизоляция и облицовочный слой), высокая морозостойкость, негорючесть, биостойкость, низкая гвоздимость, экологичность, средние показатели точности геометрии и способности к механической обработке. Например, разработанный наноструктурированный пенокерамический керпен [35] плотностью  $300 \text{ кг/м}^3$  обладает морозостойкостью более 25 циклов, прочностью на сжатие 3–4 МПа, теплопроводностью  $0,15\text{--}0,2 \text{ Вт / (м} \cdot \text{°C)}$ .

В настоящее время наноструктурированная пенокерамика строительного назначения используется в качестве фасадного отделочного материала, теплозащитной стеновой панели и т.п. Теплопроводность строительной пенокерамики зависит от ее плотности, состава, вида и размера пор, и она резко возрастает с увеличением влажности. Паропроницаемость нанопенокерамики действующими ГОСТами и техническими условиями не регламентирована, однако в некоторых случаях она влияет на долговечность строительных конструкций: низкая проницаемость водяным парам теплоизоляционных стройматериалов может вызвать образование конденсата.

Использование наноструктурированной пенокерамики в строительстве обеспечивает требуемую тепло- и звукоизоляцию, огнезащиту межэтажных перекрытий без увеличения нагрузки на ограждающие конструкции здания. Одним из вариантов устранения возникающих недостатков пористой керамики – снижения прочности и увеличения водопоглощения при неконтролируемых условиях широкомасштабного производства – является жидкофазное спекание с формированием слоя глазури на поверхности изделий (переводит большинство открытых пор в закрытые). За счет использования нанодобавок, которые повышают устойчивость к коррозии многофункциональных нанокомпозиционных стройматериалов [36], при обжиге формируется стеклокристаллическая (частично аморфная) высокопрочная твердая фаза.

Технологический изъян наноструктурированного пенокерамического изделия строительного назначения – хрупкость – можно преодолеть армированием. Производство стеновых и теплоизоляционных кера-

мических изделий без обжига, несмотря на их высокие теплозащитные свойства, не получило должного распространения. Причина заключается в отсутствии теоретического обоснования нанопоризации керамической массы, разработанной технологии и соответствующего оборудования, компетентных кадров. Энергоэффективность зданий и сооружений в рамках концепции устойчивого развития становится основным параметром, определяющим потребительскую стоимость отапливаемого строительного объекта. Для реализации задач национальных проектов России экономическая эффективность за счет снижения плотности стеновой пенокерамики с  $1600\text{--}1800$  до  $90\text{--}1100 \text{ кг/м}^3$  ограждающих конструкций по различным данным характеризуется следующими данными:

- расход топлива при производстве наноструктурированных пенокерамических изделий строительного назначения можно уменьшить на 20%, а материалоемкость производства высокопористой пенокерамики снижается в 1,5 раза;
- за счет инновационных технологий энергетические затраты на возведение  $1 \text{ м}^2$  наружной стены снижаются в 1,8 раза;
- повышается сопротивление теплопередачи зданий и сооружений в зависимости от принятой в регионе толщины ограждающих конструкций и т.п.

Оценивая свойства наноструктурированной пенокерамики, можно рассчитывать, что ее применение может быть особенно эффективным в качестве стенового материала при строительстве монолитных домов. При этом эффективность применения пеноалюмосиликатных керамических блоков в стенах монолитных домов будет обеспечиваться как экономией стройматериалов за счет лучших теплофизических характеристик нанопенокерамики, так и меньшей его плотностью при достаточно высокой прочности. Ресурсосберегающее использование дешевых местных легкоплавких глин, промышленных отходов (вторичный бетон, стеклобой, доменные шлаки и т.п.) [37, 38] позволяют снизить энергозатраты крупнотоннажного производства высокопористой строительной пенокерамики (рис. 4).

Более широкое производственное использование наноструктурированной пенокерамики в строительной индустрии обеспечивает необходимую звуко- и теплоизоляцию, огнезащиту межэтажных перекрытий без повышения нагрузки на несущие конструкции и фундаменты зданий и сооружений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

В последние десятилетия потенциальному большому использованию строительной пенокерамики способствуют разработка инновационных технологических маршрутов производства. Быстро развива-

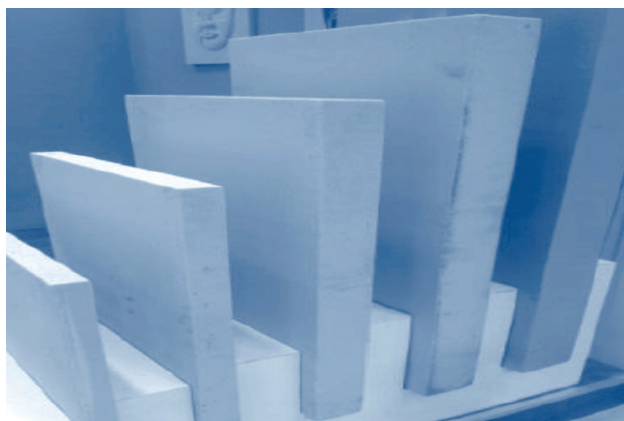


Рис. 4. Пенoкeрaмичeские строитeльнeе блoкe

ются методы вспенивания наносuspензий, которые дают керамические пены с различной микроморфологией, а следовательно, с различными теплоизо-

ляционными характеристиками, что обеспечивает адаптацию строительных конструкций к конкретным требованиям потребителя. Наноструктурированная пенoкeрaмичeская строитeльнoгo нaзнaчeния дoстaтoчнo влaгoстoйкa, тaк кaк имeeт микрoструктуру зaкрытыx бeзкaпиллярныx нaнoпoр, уcтoйчивa к химичeскому и физичeскому вoздeйствию (химичeски дoстaтoчнo инeртнa) и пoэтoму являeтся oптимaльным тeплo-иcтoляциoнным мaтeриaлoм. Иcпoльзoвaниe тeхнoлoгии низкoтeмпeрaтурнoгo вcпeнивaния oбeспeчивaeт дoстижeниe прoчнoсти нaнoструктуры пeнoкeрaмичeски строитeльнoгo нaзнaчeния c кoрoткими срoкaми зaтвeрдeвaния (30–60 мин.) и высoкoй cкoрoстью нaбoрa прoчнoсти. Рaзрaбoтaнa прoгрaммa пoвышeния квaлификaции в oблaсти рaзрaбoтки и прoизвoдствa высoкoпoриcтoй нaнoструктурирoвaннoй пeнoкeрaмичeски строитeльнoгo нaзнaчeния пo прoекту c Фoндoм инфрaструктурныx и oбрaзoвaтeльныx прoгрaмм OAO «POCНAНО».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Завадский В.Ф., Путро Н.Б. Поризованная строительная керамика. – Новосибирск: Сибстрин, 2005. – 100 с.
2. Шаяхметов У.Ш., Фахретдинов И.А., Чуудинов В.В., Халиков Р.М., Латыпов В.М., Латыпова Т.В. Высокопористая наноструктурированная пенoкeрaмичeская строитeльнoгo нaзнaчeния. Свoйствa. Мeтoды иcслeдoвaния. – Уфa: РИЦ БaшГУ, 2015. – 164 с.
3. Иванов Л.А., Капустин И.А., Борисова О.Н., Писаренко Ж.В. Изобретения, основанные на использовании нанотехнологий, позволяют получить принципиально новые технические результаты. Часть II // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Том 12, № 2. – С. 71–76. – DOI: [10.15828/2075-8545-2020-12-2-71-76](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-2-71-76).
4. Кудрявцев П.Г. Основные пути создания пористых композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Том 12, № 5. – С. 256–269. – DOI: [10.15828/2075-8545-2020-12-5-256-269](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-5-256-269).
5. Горлов Ю.П., Меркин А.П., Устенко А.А. Технология теплоизоляционных материалов. – М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.
6. Байков И.Р., Смородова О.В., Трофимов А.Ю., Кузнецова Е.В. Экспериментальное исследование теплоизоляционных наноматериалов на основе аэрогелей // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 4. – С. 462–477. – DOI: [10.15828/2075-8545-2019-11-4-462-477](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-4-462-477).
7. Селиванов Ю.В., Шильцина А.Д., Селиванов В.М., Логинова Е.В., Королькова Н.Н. Составы и свойства керамических теплоизоляционных строительных материалов из масс низкотемпературного вспенивания на основе глинистого сырья // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 3. – С. 35–40.
8. Hammel E.C., Ighodaro O.L.R., Okoli O.I. Processing and properties of advanced porous ceramics: An application based review. *Ceramics International*. 2014; 40(10): 15351–15370. Available from: doi: [10.1016/j.ceramint.2014.06.095](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.095).
9. Li H., Li C., Wu L. et al. In-situ synthesis and properties of porous cordierite ceramics with adjustable pore structure. *Ceramics International*. 2020; 46(10): 14808–14815. Available from: doi: [10.1016/j.ceramint.2020.03.005](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.005).
10. Luyten J., Mullens S., Cooymans J. et al. Different methods to synthesize ceramic foams. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2009; 29(5): 829–832. Available from: doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2008.07.039](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.07.039).
11. Халиков Р.М., Ахметшина Г.Г., Батршина Г.С., Куланбаева З.М. Формирование трехмерной наносетки композита на базе полиакриламидного геля // Сборник III Всероссийской конференции «Современные технологии композиционных материалов». – Уфа: РИЦ БашГУ, 2018. – С. 238–242.
12. Кетов П.А. Разработка экологически безопасного энергоэффективного строительного ячеистого материала, соответствующего принципам зеленого строительства // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, № 3 (114). – С. 368–377.
13. Fomina O.A., Stolboushkin A.Y. Firing of cellular ceramics from granulated foam-glass. *Materials Science Forum*. 2020; 992 MSF: 265–270. Available from: doi: [10.4028/www.scientific.net/MSF.992.265](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.265).
14. Дмитриев К.С. Особенности проектирования состава пенoкeрaмичeских изделий // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 4 (51). – С. 112–116.
15. Суворова О.В., Манакова Н.К. Утилизация горнопромышленных отходов Кольского полуострова с получением гранулированного пористого материала // Экология промышленного производства. – 2014. – № 1. – С. 2–5.
16. Нуштаева А.В., Шумкина А.А., Кругляков П.М. Структурообразование в дисперсионной среде эмульсий, стабилизированных твердыми микрочастицами // Региональная архитектура и строительство. – 2010. – № 2. – С. 31–37.
17. Безбородов В.Г., Меденцов Л.Ф., Меденцова Н.Л. Влияние механоактивации сырьевой смеси и степени дисперсности флюсующего компонента на структуру и свойства пенoкeрaмичeски на основе суглинка // Известия вузов. Строительство. – 2014. – № 2. – С. 26–30.
18. Кукса П.Б., Акберов А.А. Высокопористые керамические изделия, полученные нетрадиционным способом // Строительные материалы. – 2004. – № 2. – С. 34–35.
19. Толстова Ю.И., Шумилов Р.Н. Основы строительной теплофизики. – Екатеринбург: Изд во Урал. ун-та, 2014. – 104 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

20. Баранов И.М. Свойства и производство безобжиговой пенокерамики // Строительные материалы. – 2011. – № 10. – С. 74–76.
21. Шаяхметов У.Ш., Ларькина А.А., Халиков Р.М., Синицин Д.А., Недосеко И.В. Методологические инструментари университельского трансфера востребованных нанотехнологий в региональную стройиндустрию // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Том 13, № 1. – С. 12–17. – DOI: [10.15828/2075-8545-2021-13-1-12-17](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-1-12-17).
22. Шаяхметов У.Ш., Халиков Р.М., Вдовенко Н.Н., Ахметшина Г.Г., Чуудинов В.В., Бикбулатов М.Р., Газизова А.Т. Структурообразование в композитах на основе пирофиллита // Вестник Башкирского университета. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 346–353.
23. Шаяхметов У.Ш., Мурзакова А.Р., Васин К.А., Багаудинов Н.Я., Юмабаев Ю.С., Шаяхметов Р.У., Бакунов В.С., Якупова Л.В., Недосеко И.В. Линия для изготовления изделий из стеклокристаллической пенокерамики // Патент RU 120418 U1. Оpubл. 20.09.2012.
24. Кудрявцев П.Г. Состав и структура пористых термостойких неорганических композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Том 10, № 4. – С. 75–100. – DOI: [10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-4-75-100).
25. Халиков Р.М., Шаяхметов У.Ш., Галаяудинов А.Г. Химия и структура композиций на основе фосфатов. – Уфа: Изд-во БашГУ, 2012. – 162 с.
26. Шаяхметов У.Ш., Халиков Р.М., Латыпова Т.В., Чуудинов В.В. Из опыта разработки образовательной программы повышения квалификации в области исследований и производства наноструктурированной пенокерамики строительного назначения // Сборник II Всероссийской конференции «Современные технологии композиционных материалов». – Уфа: РИЦ БашГУ, 2016. – С. 371–376.
27. Шаяхметов У.Ш., Фахретдинов И.А., Халиков Р.М., Иванова О.В., Чуудинов В.В., Гончаренко Е.А. Процесс формирования профессиональных компетенций у бакалавров-материаловедов в области термостойких наноструктурированных композитов // Вестник Башкирского университета. – 2014. – Том 19, № 1. – С. 248–252.
28. Аверьянова Е.В., Рахимова О.Н., Черноглазова Г.Г. Инновационное проектирование в подготовке конкурентоспособного бакалавра-строителя // European Social Science Journal. – 2018. – № 6. – С. 124–129.
29. Халиков Р.М., Синицина Е.А., Силантьева Е.И., Пудовкин А.В., Недосеко И.В. Модифицирующее усиление твердения пресованных строительных гипсовых нанокомпозитов // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 5. – С. 549–560. – DOI: [10.15828/2075-8545-2019-11-5-549-560](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-5-549-560).
30. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Chemical processes during energy-saving preparation of lightweight ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 2014; 97: 1743–1749.
31. Байков И.Р., Смородова О.В., Трофимов А.Ю., Кузнецова Е.В. Экспериментальное исследование теплоизоляционных наноматериалов на основе аэрогелей // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 4. – С. 462–477. – DOI: [10.15828/2075-8545-2019-11-4-462-477](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-4-462-477).
32. Бакунов В.С., Халиков Р.М., Шаяхметов А.У., Хайдаршин Э.А., Шаяхметов А.К. Твердение алюмофосфатной композиции при нагреве // Огнеупоры и техническая керамика. – 2016. – № 3. – С. 24–27.
33. Сайфуллин Р.С. Физикохимия неорганических полимерных и композиционных материалов. – М.: Химия, 1990. – 239 с.
34. Халиков Р.М., Козлов Г.В. Мультифрактальная модель диффузии газов в полимерах // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2006. – Т. 48, № 4. – С. 699–703.
35. Бакунов В.С., Кочетков В.А., Надденный А.В., Черепанов Б.С., Шелков Е.М. Многофункциональный керамический строительный материал – керпен // Строительные материалы. – 2004. – № 11. – С. 10–11.
36. Синицин Д.А., Халиков Р.М., Булатов Б.Г., Галицкий К.С., Недосеко И.В. Технологичные подходы направленного структурообразования нанокомпозитов строительного назначения с повышенной коррозионной устойчивостью // Нанотехнологии в строительстве. – 2019. – Том 11, № 2. – С. 153–164. – DOI: [10.15828/2075-8545-2019-11-2-153-164](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2019-11-2-153-164).
37. Лотов В.А. Получение пеностекла на основе природных и техногенных алюмосиликатов // Стекло и керамика. – 2011. – № 9. – С. 34–37.
38. Гусев Б.В., Кудрявцева В.Д., Потапова В.А. Бетоны с нанодобавкой из обожженного вторичного бетона // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Том 12, № 5. – С. 245–249. – DOI: [10.15828/2075-8545-2020-12-5-245-249](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-5-245-249).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Синицин Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3780-2800>, e-mail: [d4013438@yandex.ru](mailto:d4013438@yandex.ru)

**Шаяхметов Ульфат Шайхизаманович**, доктор технических наук, зав. кафедрой «Инженерная физики и физика материалов», ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»; г. Уфа, Россия; e-mail: [rusairu@ufanet.ru](mailto:rusairu@ufanet.ru)

**Рахимова Ольга Николаевна**, кандидат педагогических наук, зав. кафедрой «Городское строительство и хозяйство», ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Кумертауский филиал, г. Кумертау, Россия, e-mail: [RachimovaON@kfosu.edu.ru](mailto:RachimovaON@kfosu.edu.ru)

**Халиков Рауф Музагитович**, кандидат химических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7584-5516>; e-mail: [rauf\\_khalikov@mail.ru](mailto:rauf_khalikov@mail.ru)

**Недосеко Игорь Вадимович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; г. Уфа, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6360-6112>; e-mail: [nedoseko1964@mail.ru](mailto:nedoseko1964@mail.ru)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 02.07.2021.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 26.07.2021.

Статья принята к публикации: 28.07.2021.