

Academia. Архитектура и строительство, № 1, стр. 171–179.

Academia. Architecture and Construction, no. 1, pp. 171–179.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 691.3

DOI: 10.22337/2077-9038-2024-1-171-179

## Анализ влияния принципов гетерогенной кристаллизации на формирование структуры и свойств пеностекла. Часть 1. Введение в методологию исследования

**Федосов Сергей Викторович** (Москва). Доктор технических наук, профессор, академик РААСН. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл.почта: fedosov-academic53@mail.ru

**Баканов Максим Олегович** (Иваново). Доктор технических наук, доцент, советник РААСН. Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 153040, Иваново, просп. Строителей, 33. ИПСА ГПС МЧС России). Эл. почта: mask-13@mail.ru

**Грушко Ирина Сергеевна** (Новочеркасск). Кандидат технических наук, доцент. Южно-Российский государственный политехнический университет [Россия, 346428, Ростовская обл., Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. ЮРГПУ (НПИ) имени М.И.Платова]. Эл.почта: grushkois@gmail.com

*Аннотация.* В статье представлены результаты научных исследований по оценке влияния инициаторов кристаллизации на формирование аморфно-кристаллической структуры пеностекла. Выполнен подбор составов шихт и синтез образцов пеностекла по единой технологии. Методом рентгенофазового анализа определён качественный и количественный фазовый состав. Синтезированы девять составов пеностекла с различным содержанием кристаллических фаз. С использованием микротомографического анализа структуры образцов выполнена оценка общей и закрытой пористости. Установлена взаимосвязь присутствия в составе инициаторов кристаллизации и дополнительных компонентов с содержанием кристаллических фаз, размером пор и их количеством.

*Ключевые слова:* пеностекло, инициатор кристаллизации, кристаллическая фаза, пористость, аморфная фаза, рентгенофазовый анализ, микротомографический анализ

*Для цитирования.* Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С. Анализ влияния принципов гетерогенной кристаллизации на формирование структуры и свойств пеностекла. Часть 1. Введение в методологию исследования // Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – № 1. – С. 171–179. – DOI: 10.22337/2077-9038-2024-1-171-179.

### Analysis of the Influence of Heterogeneous Crystallization Principles on the Formation of Structure and Properties of Foamed Glass. Part 1. Introduction to Research Methodology

**Sergey V. Fedosov** (Moscow). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Academician of RAACS. National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia). E-mail: academic53@mail.ru

**Maksim O. Bakanov** (Ivanovo). Doctor of Sciences in Technology, Docent, Adviser of RAACS. Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (33 Stroiteley ave., Ivanovo, 153000, Russia). E-mail: mask-13@mail.ru

© Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С., 2024.

**Irina S. Grushko** (Novocherkassk). Candidate of Sciences in Technology, Docent. Platov South-Russian State Politechnic University (NPI) (132, Prosveshcheniya str., Russia, Rostov region, Novocherkassk, 346428. NPI). E-mail: grushkois@gmail.com

*Annotation.* The article presents the results of scientific research to evaluation the influence of crystallization initiators on the formation of the amorphous-crystalline structure of foam glass. The selection of charge compositions and the synthesis of foam glass samples using a single technology were carried out. Qualitative and quantitative phase composition was determined by X-ray phase analysis. Nine compositions of foam glass with different content of crystalline phases have been synthesized. Using microtomographic analysis of the structure of the samples, an assessment of the total and closed porosity was made. The relationship between the presence of crystallization initiators and additional components in the composition with the content of crystalline phases, pore size and their number has been established.

*Keywords:* foam glass, crystallization initiator, crystalline phase, porosity, amorphous phase, X-ray phase analysis, microtomographic analysis

*For citation.* S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, I.S. Grushko. Analysis of the Influence of Heterogeneous Crystallization Principles on the Formation of Structure and Properties of Foamed Glass. Part 1. Introduction to Research Methodology. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2024, no. 1, pp. 171–179, doi: 10.22337/2077-9038-2024-1-171-179.

Исследование процессов кристаллизации веществ является важным направлением в химии и производстве строительных материалов [1; 2]. Традиционно и исторически справедливо, что начало исследований в области производства пеностекла положено в работах научной школы профессора И.И. Китайгородского, которые были начаты ещё в довоенные годы в СССР, а затем обобщены в фундаментальной монографии [3].

Многочисленные исследования, проведённые как отечественными [4–15], так и зарубежными [16–23] учёными, непрерывно подтверждают эффективность и перспективность использования пеностекла в качестве теплоизоляционного материала в различных областях строительства. Важными факторами, которые оказывают влияние на теплопроводность пеностекла, являются его плотность, характер пористости (открытые или замкнутые поры) и влажность [24]. При синтезе пеностекла необходимо учитывать и контролировать процессы переноса тепла, влаги и пара, которые существенно влияют на качество полученного материала. Во время термообработки сырьевой шихты при определённых температурах, например, в диапазоне 100–150 °С, удаляется физически связанная вода, в то время как при более высоких температурах (от 450 до 600 °С) происходит удаление химически связанной воды. Важно отметить, что зависимость температуропроводности пеностекла от температуры наглядно представлена на рисунке 1, что подтверждает значимость тепловых характеристик и помогает определить оптимальные условия использования пеностекла при теплоизоляции различных конструкций и агрегатов.

Последующее внедрение технологий производства пеностекла в промышленную практику подтвердило его эффективность и устойчивость. Эти выводы имеют важное значение для дальнейшего развития и применения данного материала в строительной индустрии и подчёркивают его потенциал в области энергоэффективности и экологической устойчивости.

Показано, что кристаллизация стеклофазы может иметь как положительное, так и отрицательное значение, в зависимости от требуемого (или желаемого) конечного результата. В частности, при получении теплоизоляционного строительного материала частичная кристаллизация аморфной матрицы приводит к улучшению технико-эксплуатационных характеристик. В производстве листового или тарного стекла кристаллизация считается дефектом. Кристаллические включения портят внешний вид изделий, ухудшают оптическую однородность, резко снижают механическую прочность и термическую устойчивость, так как создают дополнительные внутренние напряжения в стекле [26]. Однако при получении теплоизоляционного строительного пеностекла частичная кристаллизация аморфной матрицы может привести к улучшению технико-эксплуатационных характеристик готового продукта при определённых условиях её формирования [27]. В процессе кристаллизации происходит преобразование малоупорядоченной структуры расплава (стекла) в упорядоченную кристаллическую решётку [28].

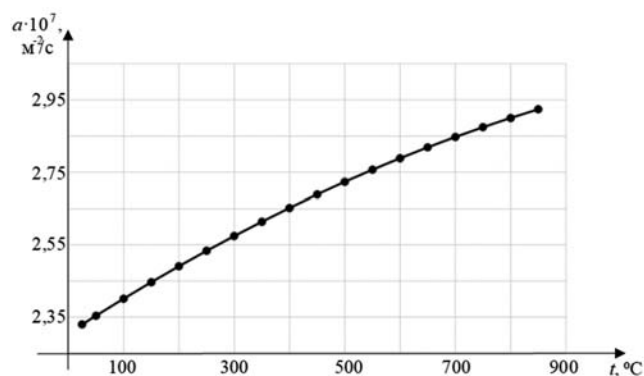


Рис. 1. Зависимость температуропроводности шихты пеностекла от температуры (источник: [25])

В данном месте авторы хотели бы обратить внимание на значение терминологии в научных исследованиях и её роль в обеспечении взаимопонимания и согласованности мнений. В области химической технологии особое значение имеет термин «катализатор», который обозначает вещество, способное ускорять химические реакции. В контексте научных исследований, посвящённых пеностеклу, этот термин принят и используется специалистами в качестве своеобразного инициатора процессов формирования кристаллической фазы. Учёт такой терминологии позволяет облегчить обмен информацией и достичь единства понимания в данной научной области.

В технологии стеклокристаллических материалов инициатором кристаллизации является вещество, которое оказывает влияние на скорость и последовательность выделения кристаллических фаз в процессе фазового превращения. Однако необходимо отметить, что инициаторы кристаллизации также способны изменять ход данного превращения [29].

Существуют разные гипотезы относительно механизма действия инициаторов. В частности, известно, что инициаторы металлического типа, такие как золото и серебро, могут образовывать зародыши будущих кристаллических зёрен главной фазы при определённых условиях. Однако механизм взаимодействия оксидных инициаторов, например, оксида титана, циркония, или фосфатов, до сих пор не установлен однозначно. Предполагается, что оксидные инициаторы способствуют разделению стекла на две фазы, что, в свою очередь, обуславливает образование центров кристаллизации и ускоряет рост кристаллических зёрен. Причиной резкого увеличения скорости образования зародышей, вызванного этим разделением, может быть развитие поверхности между стеклообразными фазами и приближение химического состава микрофаз к составу будущих кристаллов, что способствует ускоренной кристаллизации. Таким образом, хотя механизм действия оксидных инициаторов требует дальнейших исследований, имеющиеся данные однозначно указывают на влияние инициаторов на процессы кристаллизации в стеклокристаллических материалах [30].

Центры кристаллизации могут возникать как самопроизвольно, так и в результате введения в систему посторонних частиц [30]. В первом случае, при гомогенном механизме образования центров кристаллизации, система использует собственную энергию для создания новой поверхности между расплавом и твёрдой фазой путём поглощения теплоты из окружающей среды. Это происходит благодаря флуктуациям плотности. В результате флуктуаций происходит сближение атомов и образование группировок с кристаллоподобной структурой, практически идентичной расположению атомов в кристаллическом веществе. Однако из-за теплового движения частиц такие группы могут разрушаться или расти до определённых размеров, превращаясь в центры кристаллизации. С учётом этого гомогенный механизм образования центров кристаллизации основан на флуктуациях плотности, которые

приводят к образованию кристаллоподобных структур. Этот факт является ключевым в процессе образования кристаллических зёрен по гомогенному механизму [28].

Кристаллизация различных веществ, включая стекло, начинается с образования и роста центров кристаллизации. Образование этих центров и их последующий рост являются определяющими процессами в структуре переохлаждённого состояния силикатного расплава. Для получения более полной характеристики этого состояния необходимо учитывать следующие факторы. Во-первых, важную роль играет скорость образования центров кристаллизации (СОЦК), которая определяет количество новых центров, формирующихся в расплаве на единицу объёма за единицу времени. Во-вторых, значительное влияние имеет линейная скорость роста кристаллов (ЛСРК). Эта скорость представляет собой отношение увеличения размера кристалла к протекающему времени. Для полного понимания переохлаждённого состояния силикатного расплава необходимо учитывать СОЦК и ЛСРК, так как эти параметры влияют на процесс кристаллизации и, соответственно, на структуру и свойства материала.

Скорость образования центров кристаллизации является важным фактором, определяющим процесс кристаллизации. В общем случае скорость образования центров кристаллизации определяется полуэмпирической формулой [31]:

$$I = N \cdot S \cdot \omega, \quad (1)$$

где  $I$  – скорость образования центров кристаллизации, [кристалл/(см<sup>3</sup>·с)];  $N$  – равновесная концентрация стабильных зародышей, [кристалл/см<sup>3</sup>];  $S$  – критическая площадь центра кристаллизации, см<sup>2</sup>;  $\omega$  – скорость, с которой сталкиваются атомы с зародышем критической площади [1/(см<sup>2</sup>·с)].

Скорость образования центров кристаллизации при гомогенном механизме характеризуется количеством центров, образующихся в единице объёма за единицу времени при постоянной температуре. При гомогенном механизме кристаллизации вероятность появления устойчивого центра связана с определёнными физическими параметрами системы, в частности, энергией Гиббса. С помощью методов статической механики можно вывести выражение, которое связывает скорость образования центров кристаллизации в виде вероятности  $I'$  с этими параметрами. Уравнение для скорости гомогенного образования центров кристаллизации [28]:

$$I' = A \cdot \exp \frac{[-\Delta G_{\max} + Q]}{kT}, \quad (2)$$

где  $A$  – вероятность формирования стабильных центров кристаллизации;  $\Delta G_{\max}$  – максимальная свободная энергия активации процесса образования устойчивых центров, Дж;  $Q$  – свободная энергия активации процесса диффузии атомов, ионов и молекул через фазовую границу центр – расплав, Дж;

$k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $T$  – температура системы, К. В свою очередь, вероятность формирования стабильных центров кристаллизации определяется в виде произведения [32]:

$$A = kzN_0, \quad (3)$$

где  $k$  – частота присоединения атомов к центру кристаллизации;  $z$  – фактор Зельдовича, описывающий отклонение распределения зародышей по размеру от равновесного;  $N_0$  – число мест в единице объёма, где возможна кристаллизация. Фактор Зельдовича определяется как [32]:

$$z = \sqrt{\frac{\Delta G}{3\pi k T n_0^2}}, \quad (4)$$

где  $n_0$  – число атомов в кристаллическом зародыше.

Уравнение (2) представляет собой модель, описывающую вероятность образования центров кристаллизации в гомогенной системе при заданной температуре. Оно позволяет прогнозировать скорость процесса образования кристаллов в такой системе. Физический смысл уравнения сводится к следующему: скорость образования центров кристаллизации ( $I$ ) зависит от вероятности формирования стабильных центров ( $A$ ) и энергии активации ( $\Delta G_{\max}$ ), необходимой для создания устойчивых центров кристаллизации. Отдельно учитывается свободная энергия активации ( $Q$ ) и постоянная Больцмана ( $k$ ), связанные с температурой системы ( $T$ ).

Флуктуация энергии, необходимая для образования центра кристаллизации для гомогенного механизма, определяется выражением [28]:

$$\Delta G_{\text{кр}} = \frac{16 \pi \sigma^3}{3 \Delta G_V}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – поверхностная свободная энергия на границе расплав-кристалл, Дж/м<sup>2</sup>;  $\Delta G_{\text{кр}}$  – свободная энергия превращения единицы объёма при кристаллизации, Дж;  $\Delta G_V$  – разница в свободной энергии между исходным и конечным состояниями, Дж.  $\Delta G_{\text{кр}}$  представляет собой количество свободной энергии, необходимой для превращения единицы объёма из расплава в кристаллическое состояние в процессе кристаллизации. Оно характеризует термодинамический барьер, который необходимо преодолеть для образования кристаллов из расплава. Параметр ( $\sigma$ ) количественно характеризует энергию, требуемую для создания или поддержания границы между расплавом и кристаллическим состояниями. Он играет важную роль в определении стабильности и роста кристаллов.

Возникновение процесса кристаллизации по гетерогенному механизму может быть обусловлено наличием частиц другой фазы или поверхностей раздела в переохлаждённом расплаве. При формировании центров кристаллизации на плоской поверхности свободная энергия образования таких центров с критическим размером, которые принимают форму сферического сектора, определяется специфической

зависимостью, отличной от уравнения (2), и включающей дополнительный множитель [28]:

$$\Delta G_{\text{кр}} = \frac{16 \pi \sigma^3}{3 (\Delta G_V)^2} \frac{(2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{4}, \quad (6)$$

где  $\theta$  – угол смачивания. Дополнительный множитель используется для учёта угла  $\theta$  между кристаллической плоскостью и направлением роста кристалла.

Разница в энергетическом барьере образования центров кристаллизации на контактной поверхности при гетерогенном механизме значительно меньше, чем в случае гомогенного механизма. Для ускорения процесса кристаллизации и улучшения его эффективности часто используются инициаторы. Они способствуют образованию центров кристаллизации и активизируют общий процесс кристаллизации [28].

Физические свойства пеностекла зависят от его макро- и микроструктуры, которые могут регулироваться изменением температурного режима синтеза [33; 34] и модификацией состава с помощью добавок [35]. В настоящее время имеется значительное количество исследований, посвящённых формированию макроструктуры пеностекельных материалов [36; 37], однако микроструктура межпоровой перегородки пеностекла остаётся недостаточно изученной. Основой микроструктуры является стеклофаза, которая может быть модифицирована различными добавками и образовывать стеклокристаллическую форму. Известно, что кристаллическая фаза оказывает неоднозначное влияние на синтез пеностекла: при вспенивании она затормаживает рост ячеек, а при стабилизации увеличивает структурно-механическую прочность образовавшейся пены в пиропластичном состоянии. Однако, несмотря на множество исследований в этой области [38; 39], информация о прямой зависимости между физико-химическими параметрами стекла и наличием кристаллической фазы в нём отсутствует. В связи с этим вопросы кинетики процесса вспенивания пеностекельных материалов, а также создание пеностекельного материала с заданной структурой в зависимости от условий его синтеза остаются малоизученными.

Возникновение кристаллической фазы в структуре пеностекла возможно при следующих условиях:

- 1) при наличии кристаллов в исходной шихте при одностадийном способе получения или в стеклогрануляте в случае двухстадийного способа получения;
- 2) при добавлении в состав шихты химических соединений путём введения в состав композита компонентов, которые при температурной обработке (вспенивании) выделяют кристаллические фазы в аморфной матрице;
- 3) при добавлении в состав шихты физических соединений путём введения в состав аморфной матрицы кристаллического наполнителя, инициирующих процесс кристаллизации.

Максимальная скорость зарождения кристаллов, как правило, наблюдается в области температуры размягчения стекла. При выдержке стекла вблизи температуры стеклования на его поверхности начинается процесс зарождения кристаллов. В

то же время происходит слияние частиц стекла друг с другом, вызванное действием сил поверхностного натяжения и снижением вязкости стекла. Размер частиц шихты оказывает влияние на процесс кристаллизации. Чем меньше размер частиц шихты, тем более выражена склонность стекла к кристаллизации. Более крупный зерновой состав, в свою очередь, способствует повышению стабильности стекла, то есть сохранению преимущественно аморфной фазы, характеризующийся наличием ближнего порядка и отсутствием дальнего порядка.

Механизм объёмного зарождения кристаллов, когда зарождение и рост кристаллов происходит в объёме материала при объёмной кристаллизации, включает несколько этапов, которые характеризуются определёнными особенностями.

Во-первых, происходит химическая дифференциация стекла, что приводит к неоднородности его структуры. Это явление играет важную роль в процессе кристаллизации [40].

Во-вторых, происходит гомогенное образование центров кристаллизации. Это означает, что в стекле формируются равномерно распределённые области, которые становятся исходными точками для образования кристаллических структур.

В-третьих, происходит образование основной кристаллической фазы. Это означает, что в результате процесса кристаллизации образуются стабильные кристаллические структуры, которые являются основными компонентами стекла [41].

Цель описываемой работы заключается в формировании гетерогенной структуры пеностекла, которая включает в себя как аморфную, так и кристаллическую фазы, образованные различными механизмами кристаллизации.

Для достижения поставленной цели предлагается решить следующие задачи.

1. *Формирование составов шихт пеностекла.* Этот этап включает подбор оптимальных компонентов и их соотношений для создания составов шихт, которые будут использоваться в дальнейшем синтезе пеностекла.

2. *Синтез образцов пеностекла по единой технологии.* На данном этапе будет проведён синтез пеностекла на основе разработанной технологии, которая будет применяться для всех образцов. Это позволит исключить влияние различных факторов на процесс синтеза и сравнить полученные образцы на основе их структуры.

3. *Изучение полученной структуры образцов пеностекла с использованием рентгенофазового и микротомографического анализов.* Для оценки количественного и качественного фазового анализа полученных образцов пеностекла использован метод рентгенофазового анализа. Для более детального и точного изучения структуры пеностекла будет применён микротомографический анализ. Этот метод позволяет получить трёхмерное изображение структуры образцов и провести качественную и количественную оценку их характеристик.

4. *Анализ полученных результатов и их оценка.* На последнем этапе работы будут проанализированы полученные результаты и проведена их оценка. Будут выявлены основные закономерности и зависимости между составом шихт,

процессом синтеза и структурными характеристиками пеностекла. Это позволит сделать выводы о влиянии инициаторов кристаллизации на формирование гетерогенной структуры пеностекла и определить оптимальные условия для получения оптимальных эксплуатационных свойств материала.

В настоящей работе представлены основные теоретические аспекты методологии исследования для анализа влияния гетерогенной кристаллизации на формирование структуры и свойств пеностекла. Во второй части исследования планируется представить результаты экспериментальной работы, продемонстрировать методики проведения эксперимента и обработки полученных результатов. Будут рассмотрены результаты исследования качественного и количественного фазового состава образцов, микротомографического анализа образцов для определения толщины межпоровых перегородок, полученные при использовании графоаналитического метода количественные показатели кристаллических и аморфных фаз.

#### Список источников

1. Кристаллизация из расплавов / И. Бартел, Э. Буриг, К. Хайн, Л.М. Кухарж. – Москва : Металлургия, 1987. – 320 с. – Текст : непосредственный.
2. Мелихов, И.В. Физико-химическая эволюция твёрдого вещества / И.В. Мелихов. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 309 с. – Текст : непосредственный.
3. Китайгородский, И.И. Пеностекло / И.И. Китайгородский, Т.Н. Кешишян. – Москва : Промстройиздат. 1953. – 80 с. – Текст : непосредственный.
4. Демидович, Б.К. Производство и применение пеностекла / Б.К. Демидович. – Минск : Наука и техника, 1972. – 301 с. – Текст : непосредственный.
5. Маневич, В.Е. Пеностекло и проблемы энергосбережения / В.Е. Маневич, К.Ю. Субботин. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 2008. – № 4. – С. 3–6.
6. Тенденции развития технологии пеностекла / А.А. Кетов, А.В. Конев, И.С. Пузанов, Д.В. Саулин. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2007. – № 9. – С. 28–31.
7. Минько, Н.И. Основные направления развития технологии производства и применения пеностекла / Н.И. Минько, О.В. Пучка. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2007. – № 9. – С. 17–20.
8. Спиридонов, Ю.А. Проблемы получения пеностекла / Ю.А. Спиридонов, Л.А. Орлова. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 2003. – № 10. – С. 10–11.
9. Кетов, А.А. Нанотехнологии при производстве пеностеклянных материалов нового поколения / А.А. Кетов. – Текст : электронный // Нанотехнологии в строительстве : научный интернет-журнал. – 2009. – № 3. – С. 15–23. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_13016110\\_71019112.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_13016110_71019112.pdf) (дата обращения 20.11.2023).
10. Технологические приемы получения пеностекол с регулируемой поровой структурой / Д.Р. Дамдинова, П.К.

Хардаев, Б.А. Карпов, М.М. Зонхиев. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2007. – № 3. – С. 68–69.

11. *Шелковникова, Т.И.* Исследование влияния тепло-технических факторов на процесс формирования структуры пеностекла / Т.И. Шелковникова, Е.В. Баранов. – Текст : непосредственный // Огнеупоры и техническая керамика. – 2006. – № 10. – С. 21–24.

12. Температурные режимы получения гранулята для пеностеклокристаллических материалов в зависимости от состава шихты / О.В. Казьмина, В.И. Верещагин, А.Н. Абияка [и др.]. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 2009. – № 5. – С. 26–29.

13. *Казьмина, О.В.* Оценка составов и компонентов для получения пеностеклокристаллических материалов на основе алюмосиликатного сырья / О.В. Казьмина, В.И. Верещагин, А.Н. Абияка. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 2009. – № 3. – С. 6–8.

14. Исследование структуры пеностекла с различными характеристиками / А.И. Шутов, Л.И. Яшуркаева, С.В. Алексеев, Т.В. Яшуркаев. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 2007. – № 9. – С. 3–4.

15. *Федосов, С.В.* Модели и методы высокотемпературной термической обработки в технологии пеностекла / С.В. Федосов, М.О. Баканов. – Москва : Спутник+, 2021. – 302 с. – Текст : непосредственный.

16. Analysis of the Temperature Field and Deformation Characteristics of Foam Glass Thermal Insulating Decorative Integrated Board System / B. Sha, H. Xiong, H. Zheng [и др.]. – Текст : электронный // Case Studies in Thermal Engineering – 2022. – Vol. 38. – С. 102299. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X22005421?via%3Dihub> (дата обращения 20.11.2023).

17. Effect of the Process Atmosphere on Glass Foam Synthesis: A High-Temperature Environmental Scanning Electron Microscopy (HT-ESEM) Study / F. O. M'ear, R. Podor, J. Lautru [и др.]. – Текст : электронный // Ceramics International – 2021. – Vol. 47. – P. 26042–26049. – URL: <https://hal.science/hal-03331328> (дата обращения 20.11.2023).

18. Application of Foaming Agent–Oxidizing Agent Couples to Foamed-Glass Formation / J. König, R.R. Petersen, N. Iversen, Y. Yue. – Текст : электронный // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2021. – Vol. 553. – С. 120469. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/346358032\\_Application\\_of\\_foaming\\_agent-oxidizing\\_agent\\_couples\\_to\\_foamed-glass\\_formation](https://www.researchgate.net/publication/346358032_Application_of_foaming_agent-oxidizing_agent_couples_to_foamed-glass_formation) (дата обращения 20.11.2023).

19. Experimental Study on Foam Glass Prepared by Hydrothermal Hot Pressing–Calcination Technique Using Waste Glass and Fly Ash / H. Song, C. Chai, Zhao Z. [и др.]. – Текст : электронный // Ceramics International – 2021. – Vol. 47. P. 28603–28613. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/352989538\\_Experimental\\_study\\_on\\_foam\\_glass\\_prepared\\_by\\_hydrothermal\\_hot\\_pressing-calcination\\_technique\\_using\\_waste\\_glass\\_and\\_fly\\_ash](https://www.researchgate.net/publication/352989538_Experimental_study_on_foam_glass_prepared_by_hydrothermal_hot_pressing-calcination_technique_using_waste_glass_and_fly_ash) (дата обращения 20.11.2023).

20. Synthesis and Properties of Open- And Closed-Porous Foamed Glass with a Low Density / J. König, A. Lopez-Gil, P. Cimavilla-Roman [и др.]. – Текст : электронный // Construction and Building Materials – 2020. – Vol. 247. – С. 118574. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/339747991\\_Synthesis\\_and\\_properties\\_of\\_open-\\_and\\_closed-porous\\_foamed\\_glass\\_with\\_a\\_low\\_density](https://www.researchgate.net/publication/339747991_Synthesis_and_properties_of_open-_and_closed-porous_foamed_glass_with_a_low_density) (дата обращения 20.11.2023).

21. Evaluation of the Contributions to the Effective Thermal Conductivity of an Open-Porous-Type Foamed Glass / J. König, V. Nemanic, M. Zumer [и др.]. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 214. P. 337–343. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/332714804\\_Evaluation\\_of\\_the\\_contributions\\_to\\_the\\_effective\\_thermal\\_conductivity\\_of\\_an\\_open-porous-type\\_foamed\\_glass](https://www.researchgate.net/publication/332714804_Evaluation_of_the_contributions_to_the_effective_thermal_conductivity_of_an_open-porous-type_foamed_glass) (дата обращения 20.11.2023).

22. Recycling of Glass Waste into Foam Glass Boards: A Comparison of Cradle-To-Gate Life Cycles of Boards with Different Foaming Agents / R. Couto da Silva, F. Neves Puglieri, D. Maria de Genaro Chiroli [и др.]. – Текст : электронный // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 771. – С. 145276. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721003429> (дата обращения 20.11.2023).

23. Utilization of Coal Fly Ash From a Chinese Power Plant for Manufacturing Highly Insulating Foam Glass: Implications of physical, Mechanical Properties and Environmental Features / J. Li, X. Zhuang, E. Monfort [и др.]. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 175. P. 64–76. – URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.158> (дата обращения 20.11.2023).

24. *Румянцев, Б.М.* Теплопроводность высокопористых материалов / Б.М. Румянцев, А.Д. Жуков, Т.Ю. Смирнова. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2012. – № 3. – С. 108–114.

25. *Городов, Р.В.* Экспериментальное определение зависимости температуропроводности пеностекляной шихты от температуры / Городов Р.В. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 4. – С. 33–37.

26. Технология стекла / И.И. Китайгородский, Н.Н. Качалов, В.В. Варгин [и др.] ; под общ. ред. И.И. Китайгородского. – Москва : Стройиздат, 1961. – 621 с. – Текст : непосредственный.

27. *Грушко, И.С.* Формирование кристаллической фазы в матрице пеностекла и ее влияние на эксплуатационные свойства материала / И.С. Грушко, М.П. Маслаков. – Текст : непосредственный // Стекло и керамика. – 2018. – № 12. – С. 10–16.

28. *Горшков, В.С.* Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, Н.Ф. Федоров – Москва : Высшая школа, 1988. – 400 с. – Текст : непосредственный.

29. *Бережной, А.И.* Ситаллы и фотоситаллы / А.И. Бережной. – Москва : Машиностроение, 1966. – 348 с. – Текст : непосредственный.

30. *Казьмина, О.В.* Химическая технология стекла и ситаллов : Учебное пособие / О.В. Казьмина, Э.Н. Беломестнова,

А.А. Дитц. – Томск: Изд. Томского политехнического университета, 2011 – 188 с. – Текст : непосредственный.

31. *Markov, I.V.* Crystal Growth for Beginners: Fundamentals of Nucleation, Crystal Growth and Epitaxy / I.V. Markov. – London : World Scientific Publishing Co., 1995 – 422 с. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/264465979\\_Crystal\\_growth\\_for\\_beginners\\_2nd\\_edition\\_Edited\\_by\\_Ivan\\_V\\_Markov\\_World\\_Scientific\\_Press\\_pp\\_564\\_USD\\_68\\_GBP\\_46\\_ISBN\\_981-238-245-3](https://www.researchgate.net/publication/264465979_Crystal_growth_for_beginners_2nd_edition_Edited_by_Ivan_V_Markov_World_Scientific_Press_pp_564_USD_68_GBP_46_ISBN_981-238-245-3) (дата обращения 20.11.2023). – Текст : электронный.

32. Термодинамическая модель оценки энергии активации процесса кристаллизации многокомпонентной аморфной фазы / Г.Г. Горанский, Б.Б. Хина, В.И. Жорник, А.И. Поболь. – Текст : непосредственный // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2014. – №27. – С. 126–135.

33. *Баканов, М.О.* Моделирование высокотемпературных процессов в технологии пеностекла. Часть 1: Формирование динамики циклических нестационарных двумерных температурных полей / М.О. Баканов. – DOI 10.25686/2542-114X.2021.2.87. – Текст : непосредственный // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2021. – № 2. – С. 87–102.

34. *Fedosov, S.V.* Parametric Optimization of the Thermal Processing of Foam Glass on Basis of Heat Transfer Models / S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, S.N. Nikishov. – DOI 10.1088/1757-899X/709/4/044047. – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709 (4). – С. 044047. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/338373050\\_Parametric\\_optimization\\_of\\_the\\_thermal\\_processing\\_of\\_foam\\_glass\\_on\\_basis\\_of\\_heat\\_transfer\\_models](https://www.researchgate.net/publication/338373050_Parametric_optimization_of_the_thermal_processing_of_foam_glass_on_basis_of_heat_transfer_models) (дата обращения 20.11.2023).

35. Influence of Additives on the Crystallization and Thermal Conductivity of Container Glass Cullet for Foamed Glass Preparation / Smiljani S., Hriba U., Spreitzer M., J. Konig. – Текст : электронный // *Ceramics International* – 2021. – Vol. 47, № 23. – P. 32867–32873. DOI 10.1016/j.ceramint.2021.08.183. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/353950400\\_Influence\\_of\\_additives\\_on\\_the\\_crystallization\\_and\\_thermal\\_conductivity\\_of\\_container\\_glass\\_cullet\\_for\\_foamed\\_glass\\_preparation](https://www.researchgate.net/publication/353950400_Influence_of_additives_on_the_crystallization_and_thermal_conductivity_of_container_glass_cullet_for_foamed_glass_preparation) (дата обращения 20.11.2023).

36. *Апкарьян, А.С.* Формирование структуры и закрытой пористости в процессе высокотемпературного обжига гранул пористого стеклокерамического материала / А.С. Апкарьян, С.Н. Кульков. – Текст : непосредственный // Перспективные материалы. – 2017. – № 10. – С. 62–68.

37. *Береговой, В.А.* Эффективные теплоизоляционные материалы с регулируемыми декоративными свойствами на основе опочных горных пород / В.А. Береговой, Д.С. Сорокин, А.М. Береговой. – Текст : непосредственный // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 2. – С. 84–88.

38. Принципы создания высокоэффективных акустических строительных материалов / В.С. Лесовик, О.В. Пучка, С.С. Вайсера, М.В. Морозова. – Текст : непосредственный // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по

научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году : Сборник научных трудов Российской академии архитектуры и строительных наук. – Москва : АСВ, 2018. – С. 315–321.

39. *Пучка, О.В.* Использование стеклокомпозитов для строительства в условиях Арктики / О.В. Пучка, В.С. Лесовик, С.С. Вайсера. – Текст : непосредственный // Интеллектуальные строительные композиты для зелёного строительства : Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвящённой 70-летию В.С. Лесовика : В 3 частях. – Белгород : БелГТУ, 2016. – С. 29–36.

40. *Сычева, Г.А.* Зарождение кристаллов в стёклах на основе доменных шлаков. Влияние химической дифференциации на зарождение / Г.А. Сычева. – DOI 10.1134/S0132665119010098. – Текст : непосредственный // Физика и химия стекла. – 2019. – Т. 45, № 1. – С. 29–41.

41. *Бобкова, Н.М.* Физическая химия силикатов и тугоплавких соединений / Н.М. Бобкова. – Минск : Высшая школа, 1984. – 256 с. – Текст : непосредственный.

#### References

1. Bartel I., Burig E., K. Khain, Kukharzh L.M. Kristallizatsiya iz rasplavov [Crystallization from Melts]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 320 p. (In Russ.)

2. Melikhov I.V. Fiziko-khimicheskaya evolyutsiya tverdogo veshchestva [Physico-Chemical Evolution of Solid Matter]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2006, 309 p. (In Russ.)

3. Kitaigorodskii I.I., Keshishyan T.N. Penosteklo [Foam Glass]. Moscow, Promstroizdat Publ., 1953, 80 p. (In Russ.)

4. Demidovich B. K. Proizvodstvo i primeneniye penostekla [Production and Application of Foam Glass]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1972, 301 p. (In Russ.)

5. Manevich V.E., Subbotin K.Yu. Penosteklo i problemy energosberezheniya [Foam Glass and Energy Saving Problems]. In: *Steklo i keramika [Glass and Ceramics]*, 2008, no. 4, pp. 3–6. (In Russ., abstr. in Engl.)

6. Ketov A.A., Konev A.B. i dr. Tendentsii razvitiya tekhnologii penostekla [Trends in the Development of Foam Glass Technology]. In: *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, 2007, no. 9, pp. 28–31. (In Russ.)

7. Min'ko N.I., Puchka O.V. Osnovnye napravleniya razvitiya tekhnologii proizvodstva i primeneniya penostekla [Main Directions of Development of Technology for the Production and Application of Foam Glass]. In: *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, 2007, no. 9, pp. 17–20. (In Russ.)

8. Spiridonov Yu.A., Orlova L.A. Problemy polucheniya penostekla. In: *Steklo i keramika [Glass and Ceramics]*, 2003, no. 10, pp. 10–11. (In Russ.)

9. Ketov A.A. Nanotekhnologii pri proizvodstve penosteklyannykh materialov novogo pokoleniya [Nanotechnologies at the Novel Stage Manufacture of Foamed Glass Materials]. In: *Nanotekhnologii v stroitel'stve : nauchnyi internet-zhurnal [Nanotechnologies in Construction: a Scientific*

- Internet-Journal*], 2009, no. 3, pp. 15–23. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_13016110\\_71019112.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_13016110_71019112.pdf) (Accessed 11/20/2023). (In Russ., abstr. in Engl.)
10. Damdinova D.R., Khardaev P.K., Karpov B.A., Zonkhiev M.M. Tekhnologicheskie priemy polucheniya penostekol s reguliruemoi porovoi strukturoi [Technological Methods for Producing Foam Glass With an Adjustable Pore Structure]. In: *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, 2007№3. 2007. S. 68–69. (In Russ.)
11. Shelkovnikova T.I., Baranov E.V. Issledovanie vliyaniya teplotekhnicheskikh faktorov na protsess formirovaniya struktury penostekla [Study of the Influence of Thermotechnical Factors on the Process of Formation of the Structure of Foam Glass]. In: *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika [Refractories and Technical Ceramics]*, 2006, no. 10, pp. 21–24. (In Russ.)
12. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N., Mukhortova A.B., Popletneva Yu.V. Temperaturnye rezhimy polucheniya granulyata dlya penosteklokristallicheskih materialov v zavisimosti ot sostava shikhty [Temperature Conditions for Producing Granulate for Glass-Crystalline Foam Materials Depending on the Composition of the Charge]. In: *Steklo i keramika [Glass and Ceramics]*, 2009, no. 5, pp. 26–29. (In Russ., abstr. in Engl.)
13. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. Otsenka sostavov i komponentov dlya polucheniya penosteklokristallicheskih materialov na osnove alyumosilikatnogo syr'ya [Evaluation of Compositions and Components for the Production of Glass-Crystalline foam Materials Based on Aluminosilicate Raw Materials]. In: *Steklo i keramika [Glass and Ceramics]*, 2009, no. 3, pp. 6–8. (In Russ., abstr. in Engl.)
14. Shutov A.I., Yashurkaeva L.I., Alekseev C.B., Yashurkaev T.V. Issledovanie struktury penostekla s razlichnymi kharakteristikami [Study of the Structure of Foam Glass with Different Characteristics]. In: *Steklo i keramika [Glass and Ceramics]*, 2007, no. 9, pp. 3–4. (In Russ., abstr. in Engl.)
15. Fedosov S.V., Bakanov M.O. Modeli i metody vysokotemperaturnoi termicheskoi obrabotki v tekhnologii penostekla [Models and Methods of High-Temperature Thermal Treatment in Foam Glass Technology]. Moscow, Sputnik+ Publ., 2021, 302 p. (In Russ.)
16. Sha B., Xiong H., Zheng H., Yuan K., Wen M., Zhang Y. Analysis of the Temperature Field and Deformation Characteristics of Foam Glass Thermal Insulating Decorative Integrated Board System. In: *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, Vol. 38, P. 102299. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X22005421?via%3Dihub> (Accessed 11/20/2023). (In Engl.)
17. F. Mear O., Podor R., Lautru J., Genty S., Lebullenger R. Effect of the process atmosphere on glass foam synthesis: A high-temperature environmental scanning electron microscopy (HT-ESEM) study. In: *Ceramics International*, 2021, Vol. 47, P. 26042–26049. (Accessed 11/20/2023). (In Engl.)
18. König J., Petersen R. R., Iversen N., Yue Y. Application of foaming agent–oxidizing agent couples to foamed-glass formation. In: *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, Vol. 553, p. 120469. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/346358032\\_Application\\_of\\_foaming\\_agent-oxidizing\\_agent\\_couples\\_to\\_foamed-glass\\_formation](https://www.researchgate.net/publication/346358032_Application_of_foaming_agent-oxidizing_agent_couples_to_foamed-glass_formation) (Accessed 11/20/2023). (In Engl.)
19. Song H., Chai C., Zhao Z., Wei L., Wu H., Cheng F. Experimental Study on Foam Glass Prepared by Hydrothermal Hot Pressing–Calcination Technique Using Waste Glass and Fly Ash. In: *Ceramics International*, 2021, Vol. 47, pp. 28603–28613. URL: [https://www.researchgate.net/publication/352989538\\_Experimental\\_study\\_on\\_foam\\_glass\\_prepared\\_by\\_hydrothermal\\_hot\\_pressing-calcination\\_technique\\_using\\_waste\\_glass\\_and\\_fly\\_ash](https://www.researchgate.net/publication/352989538_Experimental_study_on_foam_glass_prepared_by_hydrothermal_hot_pressing-calcination_technique_using_waste_glass_and_fly_ash) (Accessed 11/20/2023). (In Engl.)
20. König J., Lopez-Gil A., Cimavilla-Roman P., Rodriguez-Perez M.A., Petersen R. R., Østergaard M.B., Iversen N., Yue Y., Spreitzer M. Synthesis and Properties of Open- and Closed-Porous Foamed Glass with Low Density. In: *Construction and Building Materials*, 2020, Vol. 247, p. 118574. URL: [https://www.researchgate.net/publication/339747991\\_Synthesis\\_and\\_properties\\_of\\_open-\\_and\\_closed-porous\\_foamed\\_glass\\_with\\_a\\_low\\_density](https://www.researchgate.net/publication/339747991_Synthesis_and_properties_of_open-_and_closed-porous_foamed_glass_with_a_low_density) (Accessed 11/20/2023). (In Engl.)
21. König J., Nemanic V., Zumer M., Petersen R. R., Østergaard M. B., Yue Y., Suvorov D. Evaluation of the Contributions to the Effective Thermal Conductivity of an Open-Porous-Type Foamed Glass. In: *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 214, pp. 337–343. (In Russ.)
22. Couto da Silva R., Neves Puglieri F., Maria de Genaro Chioli D., Antonio Bartmeyer G., Toniolo Kubaski E., Mazurek Tebcherani S. Recycling of Glass Waste Into Foam Glass Boards: A Comparison of Cradle-to-Gate Life Cycles of Boards with Different Foaming Agents. In: *Science of the Total Environment*, 2021, Vol. 771, p.145276. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721003429> (Accessed 11/20/2023). (In Engl.)
23. Li J., Zhuang X., Monfort E., Querol X., Llaudis A.S., Font O., Moreno N., Javier García Ten F., Izquierdo M. Utilization of Coal Fly Ash from a Chinese Power Plant for Manufacturing Highly Insulating Foam Glass: Implications of Physical, Mechanical Properties and Environmental Features. In: *Construction and Building Materials*, 2018, Vol. 175, pp. 64–76. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.158> (Accessed 11/20/2023). (In Engl.)
24. Romyantsev B.M., Zhukov A.D., Smirnova T.Yu. Teploprovodnost' vysokoporistykh materialov [Thermal Conductivity of Highly Porous Materials]. In: *Vestnik MGSU*, 2012, no. 3, pp. 108–114. (In Russ., abstr. in Engl.)
25. Gorodov R.V. Eksperimental'noe opredelenie zavisimosti temperaturoprovodnosti penostekol'noi shikhty ot temperature [Experimental Determination of the Dependence of the Thermal Diffusivity of Foam Glass Mixture on Temperature]. In: *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [News of Tomsk Polytechnic University]*, 2009, Vol. 314, no. 4, pp. 33–37. (In Russ.)



26. Kitaigorodskii I.I., Kachalov N.N., Vargin V.V. [et al.]. *Tekhnologiya stekla* [Glass technology]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1961, 621 s. (In Russ.)
27. Grushko I. S., Maslakov M. P. Formirovanie kristallicheskoj fazy v matritse penostekla i ee vliyanie na ekspluatatsionnye svoistva materiala [Formation of the Crystalline Phase in the Foam Glass Matrix and Its Influence on the Operational Properties of the Material]. In: *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2018, no. 12, pp. 10–16. (In Russ., abstr. in Engl.)
28. Gorshkov V.S., Savel'ev V.G., Fedorov N.F. Fizicheskaya khimiya silikatov i drugikh tugoplavkikh soedinenii [Physical Chemistry of Silicates and Other Refractory Compounds]. Moscow, Vysshaya shkola, 1988, 400 p. (In Russ.)
29. Berezhnoi A.I. Sitaly i fotositaly [Sitalls and Photositalls]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966, 348 p. (In Russ.)
30. Kaz'mina O.V., Belomestnova E.N., Ditts A.A. Khimicheskaya tekhnologiya stekla i sitallov [Chemical Technology of Glass and Glass Ceramics], Textbook. Tomsk, TPU Publ., 2011, 188 p.
31. Markov I.V. Crystal Growth for Beginners: Fundamentals of Nucleation, Crystal Growth and Epitaxy. London, World Scientific Publishing Co., 1995, 422 p.
32. Goranskii G.G., Khina B.B., Zhornik V.I., Pobol' A.I. Termodinamicheskaya model' otsenki energii aktivatsii protsessov kristallizatsii mnogokomponentnoi amorfnoi fazy [Amorphous Phase, Crystallization, Thermodynamics of Nucleation, Gibbs Energy, Enthalpy]. In: *Vestnik vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of Vitebsk State Technological University], 2014, no. 27, pp. 126–135. (In Russ., abstr. in Engl.)
33. Bakanov M.O. Modelirovanie vysokotemperaturnykh protsessov v tekhnologii penostekla. Chast' 1: Formirovanie dinamiki tsiklicheskikh nestatsionarnykh dvumernykh temperaturnykh polei [Modeling of High-Temperature Processes in Foam Glass Technology. Part 2: Formation of Porous Structure at the Stage of Foaming]. In: *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies], 2021, no. 2, pp. 87–102, DOI 10.25686/2542-114X.2021.2.87. (In Engl.)
34. Fedosov S.V., Bakanov M.O., Nikishov S.N. Parametric Optimization of the Thermal Processing of Foam Glass on Basis of Heat Transfer Models. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 709 (4), no. 3, p. 044047, DOI 10.1088/1757-899X/709/4/044047. URL: [https://www.researchgate.net/publication/338373050\\_Parametric\\_optimization\\_of\\_the\\_thermal\\_processing\\_of\\_foam\\_glass\\_on\\_basis\\_of\\_heat\\_transfer\\_models](https://www.researchgate.net/publication/338373050_Parametric_optimization_of_the_thermal_processing_of_foam_glass_on_basis_of_heat_transfer_models) (Accessed 11/20/2023). (In Engl.)
35. Smiljani S., Hriba U., Spreitzer M., Konig. Influence of Additives on the Crystallization and Thermal Conductivity of Container Glass Cullet for Foamed Glass Preparation. In: *Ceramics International*, 2021, Vol. 47, no. 23, pp. 32867–32873, DOI 10.1016/j.ceramint.2021.08.183. URL: [https://www.researchgate.net/publication/353950400\\_Influence\\_of\\_additives\\_on\\_the\\_crystallization\\_and\\_thermal\\_conductivity\\_of\\_container\\_glass\\_cullet\\_for\\_foamed\\_glass\\_preparation](https://www.researchgate.net/publication/353950400_Influence_of_additives_on_the_crystallization_and_thermal_conductivity_of_container_glass_cullet_for_foamed_glass_preparation) (Accessed 11/20/2023). (In Engl.)
36. Apkar'yan A.S., Kul'kov S.N. Formirovanie struktury i zakrytoi poristosti v protsesse vysokotemperaturnogo obzhiga granul poristogo steklokeramicheskogo materiala [Formation of Structure and Closed Porosity under High-Temperature Firing of Porous Glass-Ceramic Granules Material]. In: *Perspektivnye materialy* [Perspektivnye Materialy], 2017, no. 10, pp. 62–68. (In Russ., abstr. in Engl.)
37. Beregovoi V.A., Sorokin D.S., Beregovoi A.M. Effektivnye teploizolyatsionnye materialy s reguliruemymi dekorativnymi svoistvami na osnove opochnykh gornykh porod [Effective Thermal Insulation Materials with Adjustable Decorative Properties Based on Flask Rocks]. In: *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional Architecture and Engineering], 2014, no. 2, pp. 84–88. (In Russ., abstr. in Engl.)
38. Lesovik V.S., Puchka O.V., Vaisera S.S., Morozova M.V. Printsipy sozdaniya vysokoeffektivnykh akusticheskikh stroitel'nykh materialov [Principles of Creating High-Performance Acoustic Building Materials]. In: *Fundamental'nye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noi otrasli Rossiiskoi Federatsii v 2017 godu* [Fundamental Search and Applied Research of the RAASN on Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning and the construction industry of the Russian Federation in 2017], Collection of scientific works of RAACS, In 2 volumes, Vol. 2. Moscow, ASV, 2018, pp. 315–321. (In Russ., abstr. in Engl.)
39. Puchka O.V., Lesovik V.S., Vaisera S.S. Ispol'zovanie steklokompozitov dlya stroitel'stva v usloviyakh Arktiki [The Use of Glass Composites for Construction in the Arctic]. In: *Intellektual'nye stroitel'nye kompozity dlya zelenogo stroitel'stva* [Intelligent Building Composites for Green Construction], Collection of reports of the International scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of V.S. Lesovika, in 3 parts. Belgorod, 2016, pp. 29–36. (In Russ.)
40. Sycheva G.A. Zarozhdenie kristallov v steklakh na osnove domennykh shlakov. Vliyanie khimicheskoi differentsiatsii na zarozhdenie [Nucleation of Crystals in Glass Based on Blast-Furnace Slag]. In: *Fizika i khimiya stekla* [Glass Physics and Chemistry], 2019, Vol. 45, no. 1, pp. 29–41, DOI 10.1134/S0132665119010098. (In Russ.)
41. Bobkova N.M. Fizicheskaya khimiya silikatov i tugoplavkikh soedinenii [Physical Chemistry of Silicates and Refractory Compounds]. Minsk, Vysshaya shkola, 1984, 256 p. (In Russ.)

Продолжение следует