

Применение техногенного сырья в процессе синтеза пеностекла с гетерогенной микроструктурой

Сергей Викторович Федосов¹, Максим Олегович Баканов²,
Ирина Сергеевна Грушко³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России); г. Иваново, Россия;

³ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ)); г. Новочеркасск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Теплоизоляционные материалы, включая пеностекло, применяются для снижения теплопотерь в зданиях. Пеностекло обладает низкой теплопроводностью, высокой прочностью и экологической безопасностью. Исследования ученых, в том числе И.И. Китайгородского и Б.К. Демидовича, направлены на контроль процесса синтеза пеностекла и регулирование процесса кристаллизации. Снижение стоимости пеностекла возможно путем использования отходов промышленного производства. На примере золошлаковых отходов электрической станции в Ростовской области исследована возможность их повторного применения при получении пеностекла.

Материалы и методы. Изучение состава шихты пеностекла включает подготовку сырья, формовку и обжиг. Исследования структуры проводились с помощью автоматического дифрактометра, микротомографа и растрового электронного микроскопа. Проведены испытания свойств образцов пеностекла, таких как теплопроводность, прочность, плотность и воздействие нагрузки.

Результаты. Состав сырьевых материалов для пеностекла: стеклобой, золошлаковая смесь и $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Синтез пеностекла осуществлялся с использованием антрацита, диоксида циркония, оксида хрома и оксида магния. Исследования показали образование кристаллических фаз в аморфном каркасе пеностекла. Подтверждено наличие кварца, пироксена, кристобалита, эсколаита и волластонита в составе пеностекла.

Выводы. Разработаны составы шихты и технологический режим синтеза, получены 9 модификаций пеностекла с равномерной пористой структурой и различным содержанием кристаллических фаз. Кристаллические включения расположены равномерно. В роли центров кристаллизации выступают присутствующие в сырьевых компонентах кристаллические фазы (в составе золошлаковой смеси) и дополнительные инициаторы кристаллизации (оксид хрома, диоксид циркония и оксид магния). Показано соответствие свойств пеностекла требованиям стандарта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплоизоляционные материалы, пеностекло, теплопроводность, прочность, экологическая безопасность, синтез пеностекла, кристаллизация, золошлаковые отходы, сырьевые материалы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С. Применение техногенного сырья в процессе синтеза пеностекла с гетерогенной микроструктурой // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 258–269. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.258-269

Автор, ответственный за переписку: Ирина Сергеевна Грушко, grushkois@gmail.com.

Using anthropogenic raw materials in the process of synthesizing foam glass with heterogeneous microstructure

Sergey V. Fedosov¹, Maksim O. Bakanov², Irina S. Grushko³

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (IFRA of SFS of EMERCOM of Russia);
Ivanovo, Russian Federation;

³ M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (SRSPU (NPI)); Novocherkassk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Thermal insulation materials, including foam glass, are used to reduce heat losses in buildings. Foam glass has low thermal conductivity, high strength and environmental safety. Researches of scientists, including I.I. Kitaygorodsky and B.K. Demidovich, are aimed at controlling the process of foam glass synthesis and regulating the crystallization process. The cost reduction of foam glass is possible through the utilization of industrial waste.

Materials and methods. The potential for reusing and obtaining foam glass is being studied using ash and slag waste from a power station in the Rostov region. The study of foam glass batch mixture includes preparation of raw materials, molding and firing. The research of the structure was conducted using an automatic diffractometer, micro-tomograph, and scanning electron microscope. Tests were carried out to assess the properties of foam glass specimens, such as thermal conductivity, strength, density, and load impact. The composition of raw materials for foam glass include broken glass, ash and slag mixture and $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Foam glass synthesis was performed using anthracite, zirconium dioxide, chromium oxide, and magnesium oxide.

Results. The research revealed the formation of crystalline phases in the amorphous foam glass framework. The presence of quartz, pyroxene, cristobalite, eskolaite, and wollastonite in foam glass composition was confirmed.

Conclusions. Batch compositions and synthesis parameters were developed, leading to the production of nine modifications of foam glass with uniform porous structure and varying content of crystalline phases. Crystalline inclusions are evenly distributed. The role of crystallization centres is played by the crystalline phases present in the raw materials (in the composition of ash-and-slag mixture) and additional crystallization initiators (chromium oxide, zirconium dioxide and magnesium oxide). The conformity of foam glass properties to standard requirements was demonstrated.

KEYWORDS: thermal insulation materials, foam glass, thermal conductivity, strength, environmental safety, foam glass synthesis, crystallization, ash and slag waste, raw materials

FOR CITATION: Fedosov S.V., Bakanov M.O., Grushko I.S. Using anthropogenic raw materials in the process of synthesizing foam glass with heterogeneous microstructure. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):258-269. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.258-269 (rus.).

Corresponding author: Irina S. Grushko, grushkois@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Пеностекло относится к категории изоляционно-монтажных и изоляционно-строительных материалов, производимых путем спекания смеси стекольного порошка с газообразователями. Оно представляет собой грубодисперсную систему, где газообразная дисперсная фаза, образующаяся в результате вспенивания, распределена в стекломассе, являющейся более мелкодисперсной дисперсионной средой. Основы производства пеностекла были заложены в работах научной школы профессора И.И. Китайгородского и обобщены в монографии [1]. Исследования Б.К. Демидовича также стали весомым вкладом в организацию производства пеностекла [2]. В последующие годы многие отечественные [3–14] и зарубежные [15–26] ученые провели исследования, которые раскрыли особенности

физико-химических процессов получения пеностекла. Кристаллизация — один из важных процессов, определяющих свойства пеностекла. Ее результат зависит от требуемых или желаемых конечных характеристик. Например, частичная кристаллизация аморфной матрицы улучшает технические и эксплуатационные свойства теплоизоляционного строительного материала. Направленная кристаллизация стекла позволяет получить частично кристаллизованное стекло с заданными свойствами и структурой, применимое в различных отраслях промышленности. Понимание эффективных методов контроля процесса кристаллизации оптимизирует лабораторные испытания новых материалов.

Одной из проблем практического применения пеностекла является его высокая цена. Для решения этого вопроса большинство исследователей ставит

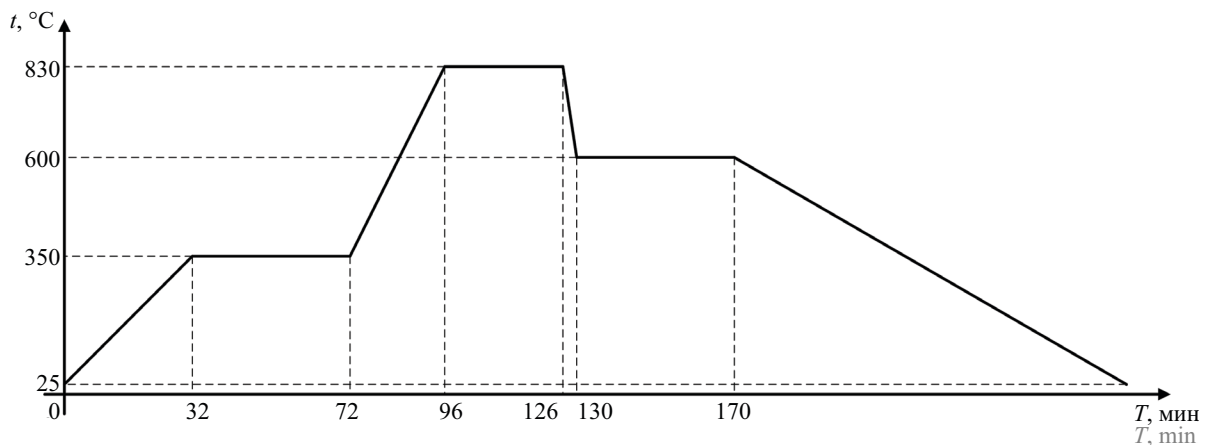


Рис. 1. Температурный режим синтеза образцов пеностекла

Fig. 1. Temperature regime of synthesis of foam glass images

Табл. 1. Химический состав золошлаковой смеси

Table 1. Chemical composition of the ash-and-slag mixture

Оксид Oxide	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Содержание, мас. % Amount, wt. %	57,13	0,88	21,46	10,55	0,12	1,73	2,90	1,11	3,28
Оксид Oxide	P ₂ O ₅	BaO	SO ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	NiO	LOI	SUM	–
Содержание, мас. % Amount, wt. %	0,13	0,14	0,07	0,03	0,02	0,01	0,43	99,99	–

Табл. 2. Химический состав стеклобоя

Table 2. Chemical composition of the broken glass

Оксид Oxide	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	FeO
Отклонения ± Deviations ±	1,45	0,44	1,44	1,88	0,13	1,01	0,13
Содержание, мас. % Amount, wt. %	14,14	3,60	2,02	69,88	0,52	7,99	0,37

Табл. 3. Химический состав компонентов шихты

Table 3. Chemical composition of the batch mixture

Наименование компонента Component name	Содержание, мас. % Amount, wt. %						
	C	SO ₃	Na ₂ O	B ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП** LoI**
Антрацит Anthracite	94	1,5	–	–	–	–	4,5
Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	–	–	16,3	36,5	–	–	47,2
Мел* Chalk*	–	–	–	–	54,6	0,6	44,8

Примечание: * мел природный технический дисперсионный МТД-2; содержание CaCO₃ + MgCO₃ в пересчете на CaCO₃, %, не менее 96,05 (по данным технического паспорта); ** ППП — потери при прокаливании.

Note: * natural technical dispersion chalk MTD-2; amount of CaCO₃ + MgCO₃ in terms of CaCO₃, %, no less 96.05 (according to the technical passport); ** LoI — loss on ignition.

целью снижение себестоимости путем использования отходов промышленного производства различной природы в качестве сырьевой базы [27–31]. Повторное использование золошлаковых отходов (ЗШО) позволит минимизировать их количество, подлежащее захоронению, обеспечивая при этом ресурсоэнергосбережение и экологическую безопасность, повторное вовлечение в хозяйственный оборот утилизируемых компонентов отходов в качестве сырья, превращение отходов в ценные вторичные сырьевые для изготовления конкурентоспособной продукции. Для повторного применения подобных отходов требуется изучение исходных характеристик отходов, физико-химических процессов их взаимодействия с технологическими добавками, а также определение необходимых воздействий, на-

правленных на получение конечного продукта с заданным комплексом свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В процессе разработки состава исходной шихты для синтеза пеностекла проводилась предварительная подготовка золошлаковой смеси (ЗШС) и боя тарного стекла. Эта подготовка включала несколько этапов: грубое измельчение с помощью щековой дробилки ШД 6, дальнейшее измельчение с использованием фарфорового барабана объемом 5 л с мелющими телами и отсеивание с применением автоматической установки с ситом размером 0,08 мм (в соответствии с ГОСТ 6613–86 «Сетки провололочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия (с Изме-

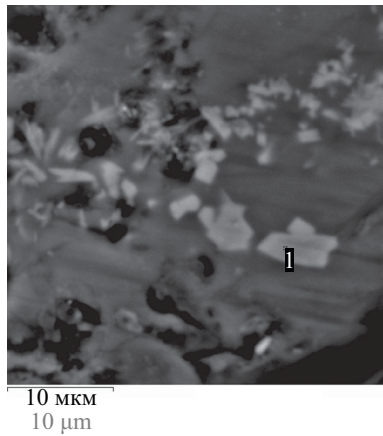


Рис. 2. Фаза пироксенового состава, электронное изображение

Fig. 2. Phase of pyroxene composition, electronic image

нием № 1)»). Подготовленные образцы получены следующим образом: все сырьевые компоненты были взвешены на электронных весах, затем смешаны до получения однородной массы и увлажнены в количестве 5 % от общей массы. Далее шихта упакована в герметичные пакеты и выдержана в течение 2 ч для более равномерного увлажнения. Формовка шихты производилась с использованием гидравлического

пресса в форме цилиндра ЛО 257, приложенная нагрузка составила 70 кгс. Обжиг осуществлялся на металлической подставке без форм в атмосфере печи.

Температурный режим синтеза (рис. 1): холодные образцы загружены в печь при температуре 25 °С, далее со скоростью 20 °С/мин выполнен нагрев до 350 °С. Выдержка при 350 °С составила 40 мин. Затем со скоростью 20 °С/мин осуществлен нагрев до 830 °С, выдержка при 830 °С — 30 мин. Термоударом температура снижена до 600 °С, выдержка при 600 °С — 40 мин. Со скоростью 2 °С/мин выполнен отжиг до температуры 25 °С.

При температурном обжиге использована муфельная печь «ЭКПС-50В» (РФ, 2012 г.) со следующими метрологическими характеристиками: диапазон температур 200–1300 °С; относительная погрешность измерений ±4 °С; дискретность 1 °С.

Исследования кристаллических фаз в полученных образцах пеностекла проведены с применением автоматического порошкового дифрактометра Bruker D2 Phaser. Для микротомографического анализа образцов пеностекла сканирование осуществлялось при помощи микротомографа Skyscan-1172 с параметрами, аналогичными исследованию [32], прикладного ПО CTAn (Bruker), DataViewer и CTVox (Bruker). Исследование микроструктуры и элементного состава образцов выполнено на растровом элек-

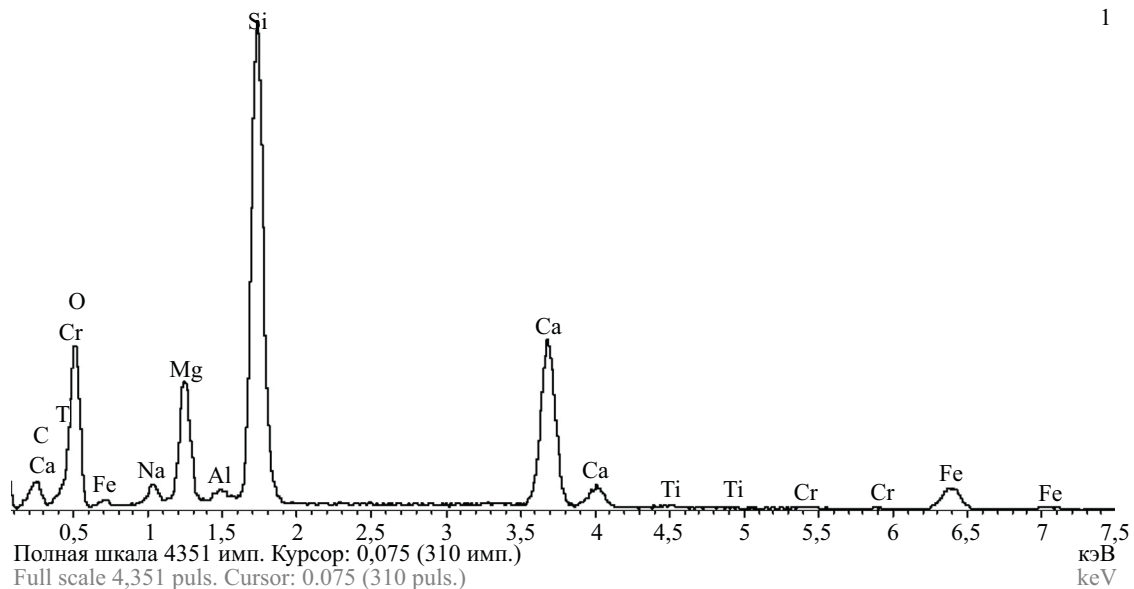


Рис. 3. Фаза пироксенового состава, спектр EDX

Fig. 3. Phase of pyroxene composition, EDX spectrum

Табл. 4. Фаза пироксенового состава (рис. 2, 3). Количественный состав

Table 4. Phase of pyroxene composition (Fig. 2, 3). Quantitative composition

Участок Section	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	Прочие элементы легче Na Other elements lighter than Na	Сумма Sum
1	2,19	13,30	0,86	53,47	20,63	0,52	0,49	7,57	0,96	100,00

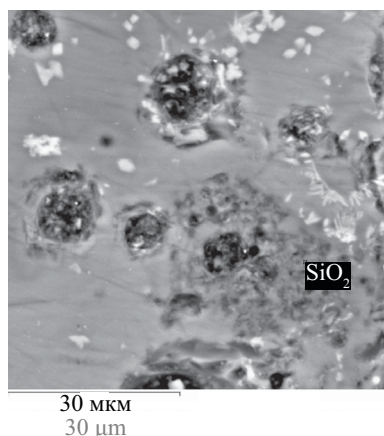


Рис. 4. Фаза кремнеземового состава, электронное изображение

Fig. 4. Phase of silica composition, electronic image

тронном микроскопе VEGA II LMU (фирмы Tescan) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT (детектор Silicon Drift (ADD)). Легкие элементы не определяются данным методом (это касается в том числе В, N и других элементов легче Na).

Испытания эксплуатационных свойств образцов пеностекла проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме», ГОСТ EN 1602–2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения кажущейся плотности», ГОСТ 33949–2016 «Изделия из пеностекла теплоизоляционные для зданий и сооружений (Приложение А)», ГОСТ 17177–94 «Материалы и изделия строитель-

ные теплоизоляционные. Методы испытаний», ГОСТ EN 1607–2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения прочности при растяжении перпендикулярно к лицевым поверхностям», ГОСТ EN 12430–2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения прочности при действии сосредоточенной нагрузки».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сырьевые материалы шихты включают стеклобой, ЗШС и $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Золошлаковая смесь используется для замены стеклобоя и сокращения стоимости продукта, а также снижения воздействия на окружающую среду. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ добавляется для уменьшения температуры плавления из-за высокого содержания Al_2O_3 в ЗШС. В процессе синтеза пеностекла используется антрацит в качестве газообразователя. Для инициации процесса кристаллизации применяются диоксид циркония ZrO_2 и оксид хрома Cr_2O_3 , а в качестве модификатора используется оксид магния MgO . Химические составы компонентов представлены в табл. 1–3.

Для синтеза пеностекла выполнено проектирование составов шихт с разными компонентами. Нулевой состав использован как базовый, без инициаторов кристаллизации. В составах 1 и 2 добавлен оксид хрома в разных количествах для изучения его влияния. Для оценки влияния мела на материал в составы 3–8 он включен в количестве 1 и 2 г. В составах 3 и 4 добавлен диоксид циркония, в составах 5 и 6 — оксид магния, а в составах 7 и 8 — оксид хрома. Количество инициаторов кристаллизации оставалось постоянным (0,15 г), чтобы варьировать только содержание мела.

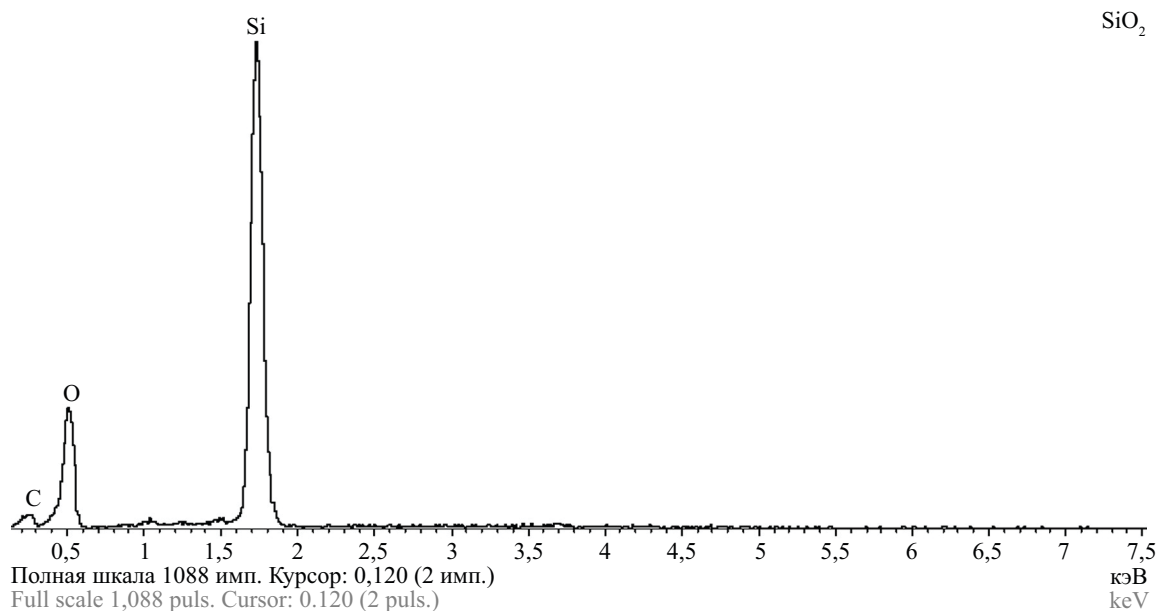


Рис. 5. Фаза кремнеземового состава, спектр EDX

Fig. 5. Phase of silica composition, EDX spectrum

Табл. 5. Количественный фазовый анализ образцов, мас. %, по данным полнопрофильного анализа методом Ритвельда
Table 5. Quantitative phase analysis of specimens, wt. %, according to full-profile analysis by the Rietveld method

Наименование фазы Phase	Состав Composition								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Кварц SiO ₂ Quartz	10,8	7,7	7,6	8,9	6,1	9,7	5,3	6,2	6,0
Пироксен (диопсид) Ca(Mg, Fe)(Si ₂ O ₆) Pyroxene (diopside)	72,4	69,9	67,9	66,6	49,1	67,5	53,8	66,3	44,8
Кристаллит SiO ₂ Cristobalite	15,5	9,2	12,4	5,1	2,2	4,0	1,9	3,8	3,2
Нефелин Na ₃ K(AlSiO ₄) ₄ Nepheline	1,3	5,3	2,0	1,3	6,7	5,0	6,1	5,1	5,8
Эсколаит Cr ₂ O ₃ Eskolaite	–	7,9	10,1	–	–	–	–	4,3	2,3
Волластонит Ca(SiO ₃) Wollastonite	–	–	–	18,0	36,0	13,8	32,9	13,9	37,7
R _p , %*	2,4	2,6	2,6	2,5	2,7	2,6	2,6	2,6	2,6

Примечание: $R_p = \frac{\sum |y_i^{экс} - y_i^{расч}|}{\sum y_i^{экс}} \cdot 100\%$ — фактор сходимости расчетного и экспериментального рентгеновских профилей; y_i — интенсивность в каждой экспериментальной точке рентгенограммы.

Note: $R_p = \frac{\sum |y_i^{ex} - y_i^{calc}|}{\sum y_i^{ex}} \cdot 100\%$ — convergence factor of calculated and experimental X-ray profiles; y_i — intensity at each experimental point of the X-ray diffraction pattern.

Микроструктура полученных образцов пено-стекла изучена методом растровой электронной микроскопии на примере нулевого состава. Стеклофаза имеет относительно однородное строение с преобладанием высоконатриевого стекла при подчиненной роли «блоков» более низконатриевого, богатого алюминием. Присутствуют участки, обогащенные железом или легкими элементами. По границам

«блоков» стекла и на внутренних поверхностях пор наблюдаются кристаллы, по составу близкие к пироксенам (рис. 2, 3, табл. 4), кремнезему (рис. 4, 5). Микроструктура дополнительно изучена методом рентгенофазового анализа с целью определения качественного и количественного фазового состава (табл. 5, рис. 6). Результаты подтвердили данные, по-

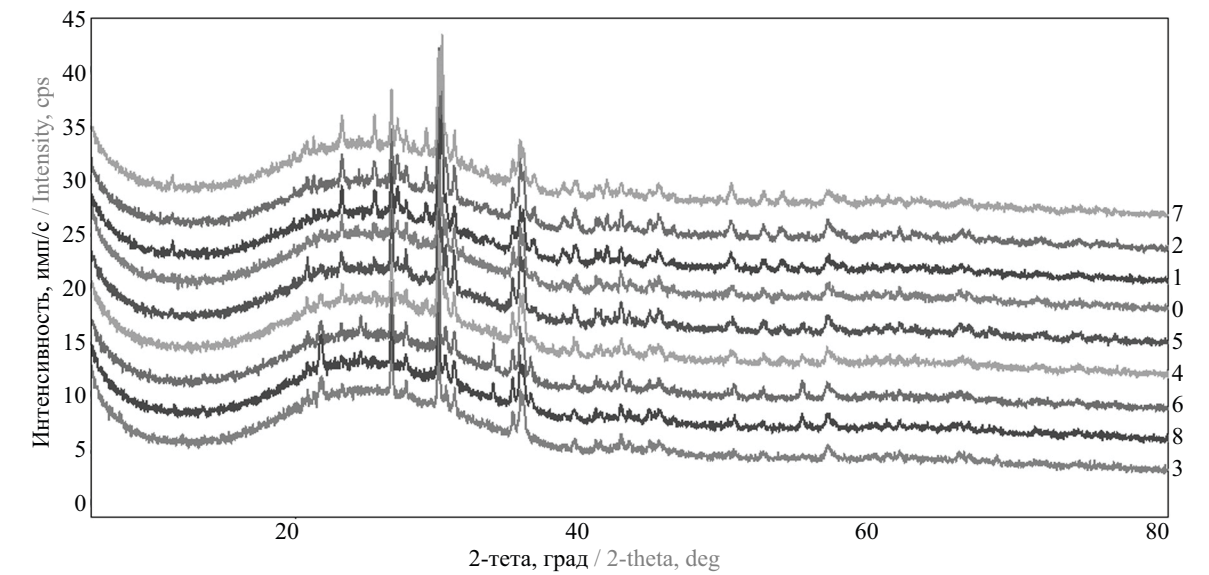


Рис. 6. Сравнение дифрактограмм образцов. Номер образца (табл. 5) указан справа
Fig. 6. Comparison of diffraction patterns of specimens. The specimen number (Table 5) is on the right side

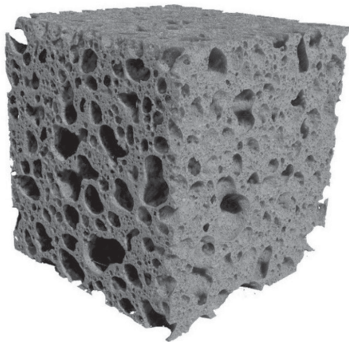


Рис. 7. Визуализация строения образца, красным выделены области с максимальной плотностью

Fig. 7. Visualization of the structure of the specimen, areas with maximum density are highlighted in red

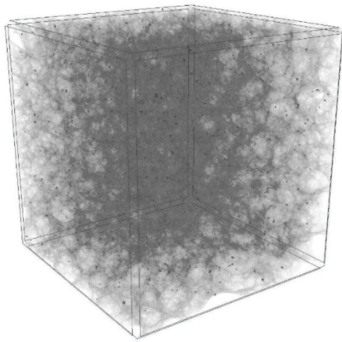


Рис. 8. Визуализация распределения частиц с высокой плотностью в объеме образца

Fig. 8. Visualization of the distribution of particles with high density in the specimen volume

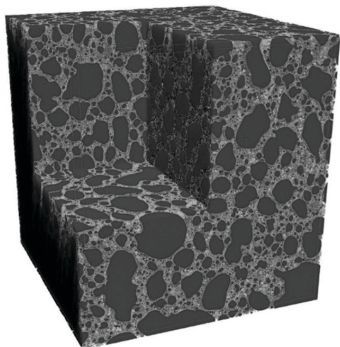


Рис. 9. Визуализация распределения пор в объеме образца, цветом кодируется размер пор от черного (наименьшие) к темно-серому (наибольшие) (цветовая шкала снизу справа)

Fig. 9. Visualization of the distribution of pores in the specimen volume, colour codes the pore size from black (smallest) to dark gray (largest) (colour scale bottom right)

лученные методом растровой электронной микроскопии: обнаружено присутствие пироксена и кварца.

С целью получения данных о пространственной структуре пеностекла выполнено микрофотографическое сканирование. Результаты продемонстрированы на нулевом образце (рис. 7–9).

В соответствии с требованиями ГОСТ 33949–2016 «Изделия из стекла теплоизоляционные для зданий и сооружений. Технические условия» определены теплопроводность, плотность, прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям, прочность при действии сосредоточенной нагрузки образцов пеностекла (табл. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного исследования получены результаты микроструктурных модификаций пено-

Табл. 6. Эксплуатационные свойства (параметры) образцов

Table 6. Performance properties (parameters) of specimens

Номер образца Specimen number	Теплопроводность, Вт/м·К Thermal conductivity, W/m·K	Плотность ρ, кг/м³ Density ρ, kg/m³	Прочность при сжатии, МПа Compressive strength, MPa	Прочность на растяжение при изгибе, МПа Tensile strength in bending, MPa	Прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям, МПа Tensile strength perpendicular to the front surface, MPa	Коэффициент упругости, МН/м Elasticity coefficient, MN/m
0	0,1580	875,383	12,51	0,90	12,92	23,60
1	0,1694	900,134	7,52	0,85	14,58	27,31
2	0,1508	845,296	10,27	0,79	19,44	25,72
3	0,1231	723,749	17,76	0,45	12,53	9,71
4	0,1362	785,962	25,12	0,51	13,93	11,82
5	0,1121	658,502	16,43	0,34	9,78	6,64
6	0,1207	804,476	29,70	0,58	12,21	11,02
7	0,1242	721,642	22,88	0,51	14,53	15,56
8	0,1305	809,468	19,88	0,58	16,16	7,21

стекла, включая анализ фазового состава (как качественного, так и количественного), а также анализ пространственной макро- и микроструктуры. Выявлен механизм объемной кристаллизации стекла, вызванный химической дифференциацией стекла. В качестве центров кристаллизации установлены кристаллические фазы сырьевых компонентов (в составе золошлака) и дополнительные инициаторы кристаллизации (оксид хрома, диоксид циркония и оксид магния). С целью получения равномерной пористой структуры в состав пеностекла дополнительно введен кальций с помощью технического мела.

Согласно результатам, представленным в табл. 5, в девяти исследуемых составах обнаружены следующие кристаллические фазы, преобладающие количественно: кварц SiO_2 , пироксен (диопсид) $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{Si}_2\text{O}_6)$, кристобалит SiO_2 , нефелин $\text{Na}_3\text{K}(\text{AlSi}_4\text{O}_{14})$, эсколаит Cr_2O_3 , волластонит $\text{Ca}(\text{SiO}_3)$. Модификации SiO_2 в виде кварца и кристобалита содержат все исследованные образцы пеностекла. Пироксен (диопсид) является количественно преобладающей фазой во всех образцах, его содержание варьируется в пределах 44,8–72,4 %. Эсколаит присутствует во всех образцах, содержащих в качестве инициатора кристаллизации Cr_2O_3 . Волластонит обнаружен только в составах пятой и шестой серии образцов, содержащих технический мел. В образцах второй и третьей серии кальций содержит только основные компоненты (золошлаковая смесь 2,9 %, стеклобой 7,99 %), предположительно, волластонит присутствует в этих материалах в следовых количествах.

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы.

Исследование посвящено разработке составов шихты для синтеза пеностекла. В процессе исследования были использованы ключевые компоненты — стеклобой, золошлаковая смесь, бура, антрацит, мел технический, а также инициаторы кристаллизации — оксид хрома, оксид магния и диоксид циркония. Получено девять различных модификаций пеностекла с равномерной пористой структурой и различными долями кристаллических фаз. Образцы пеностекла сохраняют свою геометрическую форму после обжига и имеют гладкую поверхность с практически отсутствующими открытыми порами. Визуальный анализ макроструктуры показал, что материал обладает пористой и равномерной структурой с удовлетворительным количеством пор, что обеспечивает его оптимальные свойства.

В результате исследования разработан оптимальный температурно-временной режим синтеза пеностекла. Этот режим обеспечивает получение равномерной пористой структуры и различной доли кристаллических фаз в аморфном материале. Процесс синтеза включает следующие этапы: холодные образцы загружались в печь при температуре 25 °С, затем осуществлялся нагрев со скоростью 20 °С/мин до 350 °С с выдержкой в течение 40 мин. Затем температура повышалась до 830 °С со скоростью 20 °С/мин с последующей выдержкой в течение 40 мин. Далее происходило термоударное понижение температуры до 600 °С с последующей выдержкой в течение 40 мин. Наконец происходил отжиг со скоростью 2 °С/мин до температуры 25 °С, завершая процесс синтеза.

Микротомографические исследования показали, что все образцы пеностекла, рассмотренные в данном исследовании, обладают равномерно распределенной пористостью по всему объему. Кроме того, в аморфной матрице материала присутствуют кристаллические включения, которые расположены равномерно. Обнаружено, что поры имеют размеры в нанометровом диапазоне, а межпоровые перегородки имеют толщину, составляющую несколько десятков нанометров. Таким образом, проведенные микротомографические исследования подтверждают, что разработанный пеностекломатериал обладает необходимыми характеристиками равномерной пористой структуры и кристаллическими включениями в аморфной матрице.

Исследования проведены для девяти серий образцов пеностеклового материала с целью оценки их эксплуатационных свойств. Получены значения следующих параметров в указанных диапазонах: эффективная теплопроводность составляет от 0,1121 до 0,1694 Вт/м·К, плотность — от 658,502 до 900,134 кг/м³, прочность при сжатии — от 7,52 до 29,70 МПа, прочность на растяжение при изгибе — от 0,34 до 0,90 МПа, прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям — от 9,78 до 19,44 МПа, прочность при действии сосредоточенной нагрузки (коэффициент упругости) — от 6637,97 до 27 314,43 кН/м, водопоглощение — от 0,746 до 28,127 %, адсорбционная влажность — от 0,011 до 0,059 %. Результаты исследования позволяют оценить эксплуатационные свойства пеностеклового материала для различных серий образцов и выбрать оптимальные параметры в соответствии с конкретными требованиями и условиями применения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Китайгородский И.И., Кешишян Т.Н.* Пеностекло. М. : Промстройиздат, 1953. 80 с.
2. *Демидович Б.К.* Производство и применение пеностекла. Минск : Наука и техника, 1972. 301 с.
3. *Manevich V.E., Subbotin K.Yu.* Foam glass and problems of energy conservation // Glass and Ceramics.

2008. Vol. 65. Issue 3–4. Pp. 105–108. DOI: 10.1007/s10717-008-9026-1

4. *Кетов А.А., Конев А.В., Пузанов И.С., Саулин Д.В.* Тенденции развития технологии пеностекла // Строительные материалы. 2007. № 9. С. 28–31. EDN IBEQAZ.

5. Минько Н.И., Пучка О.В. Основные направления развития технологии производства и применения пеностекла // Строительные материалы. 2007. № 5. С. 97–100. EDN HZZITZ.

6. Spiridonov Y.A., Orlova L.A. Problems of foam glass production // Glass and Ceramics. 2003. Vol. 60. Issue 9/10. Pp. 313–314. DOI: 10.1023/B:GLAC.000008234.79970.2c

7. Кетов А.А. Нанотехнологии при производстве пеностеклянных материалов нового поколения // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2009. Т. 1. № 3. С. 15–23. EDN KYVQAD.

8. Дамдинова Д.Р., Хардаев П.К., Карпов Б.А., Зонхиев М.М. Технологические подходы к получению пеностекла с регулируемой поровой структурой // Строительные материалы. 2007. № 3. С. 68–70. EDN HZITJV.

9. Шелковникова Т.И., Баранов Е.В. Исследования влияния теплотехнических факторов на процесс формирования структуры пеностекла // Огнеупоры и техническая керамика. 2006. № 10. С. 21–24. EDN NUXDCN.

10. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N., Mukhortova A.V., Popleteva Yu.V. Temperature regimes for obtaining granular material for foamed crystal glass materials as a function of the batch composition // Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. Issue 5–6. Pp. 179–182. DOI: 10.1007/s10717-009-9160-4

11. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. Assessment of the compositions and components for obtaining foam-glass-crystalline materials from aluminosilicate initial materials // Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. Issue 3–4. Pp. 82–85. DOI: 10.1007/s10717-009-9133-7

12. Shutov A.I., Yashurkaeva L.I., Alekseev S.V., Yashurkaev T.V. Study of the structure of foam glass with different characteristics // Glass and Ceramics. 2007. Vol. 64. Issue 9–10. Pp. 297–299. DOI: 10.1007/s10717-007-0074-8

13. Федосов С.В., Баканов М.О. Совершенствование технологии получения пеностекла на основе методов сетевого моделирования // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 11. С. 1551–1563. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1551-1563. EDN LSLSDF.

14. Федосов С.В., Баканов М.О. Пеностекло: особенности производства, моделирование процессов теплопереноса и газообразования // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 108–113. EDN TLLYXB.

15. 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 // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 38. P. 102299. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102299

16. Méar F.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 // Ceramics International. 2021. Vol. 47. Issue 18. Pp. 26042–26049. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.06.010

17. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Application of foaming agent–oxidizing agent couples to foamed-glass formation // Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. Vol. 553. P. 120469. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469

18. 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 // Ceramics International. 2021. Vol. 47. Issue 20. Pp. 28603–28613. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.07.019

19. König J., Lopez-Gil A., Cimavilla-Roman P., Rodriguez-Perez M.A., Petersen R.R., Østergaard M.B. et al. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 247. P. 118574. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118574

20. König J., Nemanič V., Žumer M., Petersen R.R., Østergaard M.B., Yue Y. et al. Evaluation of the contributions to the effective thermal conductivity of an open-porous-type foamed glass // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 214. Pp. 337–343. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.109

21. Couto da Silva R., Neves Puglieri F., Maria de Genaro Chiroli 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 // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 771. P. 145276. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145276

22. Li J., Zhuang X., Monfort E., Querol X., Llaudis A.S., Font O. et al. Utilization of coal fly ash from a Chinese power plant for manufacturing highly insulating foam glass: Implications of physical, mechanical properties and environmental features // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 175. Pp. 64–76. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.158

23. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Suppressing the effect of cullet composition on the formation and properties of foamed glass // Ceramics International. 2018. Vol. 44. Issue 10. Pp. 11143–11150. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.03.130

24. Østergaard M.B., Cai B., Petersen R.R., König J., Lee P.D., Yue Y. Impact of pore structure on the thermal conductivity of glass foams // Materials Letters. 2019. Vol. 250. Pp. 72–74. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.04.106

25. Østergaard M.B., Petersen R.R., König J., Bockowski M., Yue Y. Impact of gas composition on thermal conductivity of glass foams prepared via high-pressure sintering // Journal of Non-Crystalline Solids: X. 2019. Vol. 1. P. 100014. DOI: 10.1016/j.nocx.2019.100014

26. Østergaard M.B., Zhang M., Shen X., Petersen R.R., König J., Lee P.D. et al. High-speed synchro-

tron X-ray imaging of glass foaming and thermal conductivity simulation // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 189. Pp. 85–92. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.02.060

27. Ewais E.M.M., Attia M.A.A., El-Amir A.A.M., Elshenway A.M.H., Fend T. Optimal conditions and significant factors for fabrication of soda lime glass foam from industrial waste using nano AlN // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 747. Pp. 408–415. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.039

28. Fang X., Li Q., Yang T., Li Z., Zhu Y. Preparation and characterization of glass foams for artificial floating island from waste glass and Li_2CO_3 // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 134. Pp. 358–363. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.048

29. Petersen R.R., König J., Iversen N., Østergaard M.B., Yue Y. The foaming mechanism of glass foams prepared from the mixture of Mn_3O_4 , carbon

and CRT panel glass // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Issue 2. Pp. 2839–2847. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.09.138

30. Souza M.T., Maia B.G.O., Teixeira L.B., de Oliveira K.G., Teixeira A.H.B., Novaes de Oliveira A.P. Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes // *Process Safety and Environmental Protection*. 2017. Vol. 111. Pp. 60–64. DOI: 10.1016/j.psep.2017.06.011

31. Taurino R., Lancellotti I., Barbieri L., Leonelli C. Glass-ceramic foams from borosilicate glass waste // *International Journal of Applied Glass Science*. 2014. Vol. 5. Issue 2. Pp. 136–145. DOI: 10.1111/ijag.12069

32. Грушко И.С. Влияние технологических добавок на структуру пеностекла // *Строительные материалы*. 2022. № 4. С. 44–49. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-801-4-44-48. EDN MDHJFU.

Поступила в редакцию 17 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 23 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Викторович Федосов** — доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительного производства, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1840-8194, РИНЦ ID: 105900, Scopus: 7005670404, ResearcherID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosov-academic53@mail.ru;

Максим Олегович Баканов — доктор технических наук, доцент, начальник учебно-научного комплекса «Пожаротушение», советник РААСН; **Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России)**; 153040, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33, РИНЦ ID: 802943, Scopus: 57204434215, ResearcherID: O-1809-2017, ORCID: 0000-0001-8460-9056; mask-13@mail.ru;

Ирина Сергеевна Грушко — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного, гражданского строительства, геотехники и фундаментостроения; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 562201, Scopus: 35519681000, ResearcherID: A-3310-2014, ORCID: 0000-0002-7552-1885; grushkois@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kitajgorodskij I.I., Keshishyan T.N. *Foam glass*. Moscow, Promstroyizdat, 1953; 80. (rus.).

2. Demidovich B.K. *Production and application of foam glass*. Minsk, Science and Technology, 1972; 301. (rus.).

3. Manevich V.E., Subbotin K.Yu. Foam glass and problems of energy conservation. *Glass and Ceramics*. 2008; 65(3-4):105-108. DOI: 10.1007/s10717-008-9026-1

4. Ketov A.A., Konev A.B., Puzanov I.S., Saulin D.V. Trends in the development of foam glass technology. *Construction Materials*. 2007; 9:17-20. EDN IBEQAZ. (rus.).

5. Min'ko N.I., Puchka O.V. Main directions of development of technology for the production and use of foam glass. *Construction Materials*. 2007; 5:97-100. EDN HZZITZ. (rus.).

6. Spiridonov Y.A., Orlova L.A. Problems of foam glass production. *Glass and Ceramics*. 2003; 60(9/10): 313-314. DOI: 10.1023/B:GLAC.0000008234.79970.2c

7. Ketov A.A. Nanotechnologies in the production of new generation foam glass materials. *Nanotechnologies in Construction: Scientific Internet journal*. 2009; 1(3):15-23. EDN KYVQAD. (rus.).

8. Damdinova D.R., Hardaev P.K., Karpov B.A., Zonhiev M.M. Technological methods for producing foam glass with an adjustable pore structure. *Construction Materials*. 2007; 3:68-70. EDN HZITJV. (rus.).
9. Shelkovnikova T.I., Baranov E.V. Study of the influence of thermal factors on the process of formation of the structure of foam glass. *Refractories and Technical Ceramics*. 2006; 10:21-24. EDN NUXDCN. (rus.).
10. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N., Mukhortova A.V., Popletneva Yu.V. Temperature regimes for obtaining granular material for foamed crystal glass materials as a function of the batch composition. *Glass and Ceramics*. 2009; 66(5-6):179-182. DOI: 10.1007/s10717-009-9160-4
11. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. Assessment of the compositions and components for obtaining foam-glass-crystalline materials from aluminosilicate initial materials. *Glass and Ceramics*. 2009; 66(3-4):82-85. DOI: 10.1007/s10717-009-9133-7
12. Shutov A.I., Yashurkaeva L.I., Alekseev S.V., Yashurkaev T.V. Study of the structure of foam glass with different characteristics. *Glass and Ceramics*. 2007; 64(9-10):297-299. DOI: 10.1007/s10717-007-0074-8
13. Fedosov S.V., Bakanov M.O. Using network modelling methods to improve the foam glass production technology. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1551-1563. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1551-1563. EDN LSLSDF. (rus.).
14. Fedosov S.V., Bakanov M.O. Foam glass: characteristics of production, modeling of heat transfer and gas. *Academia. Architecture and Construction*. 2015; 1:108-113. EDN TLLYXB. (rus.).
15. 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. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022; 38:102299. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102299
16. Méar F.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. *Ceramics International*. 2021; 47(18):26042-26049. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.06.010
17. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Application of foaming agent–oxidizing agent couples to foamed-glass formation. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021; 553:120469. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469
18. 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. *Ceramics International*. 2021; 47(20):28603-28613. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.07.019
19. König J., Lopez-Gil A., Cimavilla-Roman P., Rodriguez-Perez M.A., Petersen R.R., Østergaard M.B. et al. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density. *Construction and Building Materials*. 2020; 247:118574. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118574
20. König J., Nemanič V., Žumer M., Petersen R.R., Østergaard M.B., Yue Y. et al. Evaluation of the contributions to the effective thermal conductivity of an open-porous-type foamed glass. *Construction and Building Materials*. 2019; 214:337-343. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.109
21. Couto da Silva R., Neves Puglieri F., Maria de Genaro Chiroli 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. *Science of the Total Environment*. 2021; 771:145276. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145276
22. Li J., Zhuang X., Monfort E., Querol X., Llaudis A.S., Font O. et al. Utilization of coal fly ash from a Chinese power plant for manufacturing highly insulating foam glass: Implications of physical, mechanical properties and environmental features. *Construction and Building Materials*. 2018; 175:64-76. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.158
23. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Suppressing the effect of cullet composition on the formation and properties of foamed glass. *Ceramics International*. 2018; 44(10):11143-11150. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.03.130
24. Østergaard M.B., Cai B., Petersen R.R., König J., Lee P.D., Yue Y. Impact of pore structure on the thermal conductivity of glass foams. *Materials Letters*. 2019; 250:72-74. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.04.106
25. Østergaard M.B., Petersen R.R., König J., Bockowski M., Yue Y. Impact of gas composition on thermal conductivity of glass foams prepared via high-pressure sintering. *Journal of Non-Crystalline Solids: X*. 2019; 1:100014. DOI: 10.1016/j.nocx.2019.100014
26. Østergaard M.B., Zhang M., Shen X., Petersen R.R., König J., Lee P.D. et al. High-speed synchrotron X-ray imaging of glass foaming and thermal conductivity simulation. *Acta Materialia*. 2020; 189:85-92. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.02.060
27. Ewais E.M.M., Attia M.A.A., El-Amir A.A.M., Elshenway A.M.H., Fend T. Optimal conditions and significant factors for fabrication of soda lime glass foam from industrial waste using nano AlN. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018; 747:408-415. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.039
28. Fang X., Li Q., Yang T., Li Z., Zhu Y. Preparation and characterization of glass foams for artificial floating island from waste glass and Li_2CO_3 . *Construction and Building Materials*. 2017; 134:358-363. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.048

29. Petersen R.R., König J., Iversen N., Østergaard M.B., Yue Y. The foaming mechanism of glass foams prepared from the mixture of Mn_3O_4 , carbon and CRT panel glass. *Ceramics International*. 2021; 47(2):2839-2847. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.09.138
30. Souza M.T., Maia B.G.O., Teixeira L.B., de Oliveira K.G., Teixeira A.H.B., Novaes de Oliveira A.P. Glass foams produced from glass bottles and egg-shell wastes. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017; 111:60-64. DOI: 10.1016/j.psep.2017.06.011
31. Taurino R., Lancellotti I., Barbieri L., Leonelli C. Glass-ceramic foams from borosilicate glass waste. *International Journal of Applied Glass Science*. 2014; 5(2):136-145. DOI: 10.1111/ijag.12069
32. Grushko I.S. The effect of technological additives on the structure of foam glass. *Construction Materials*. 2022; 4:44-49. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-801-4-44-48. EDN MDHJFU. (rus.).

Received September 17, 2023.

Adopted in revised form on October 23, 2023.

Approved for publication on December 1, 2023.

B I O N O T E S: **Sergey V. Fedosov** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production, Academician RAASN; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 105900, Scopus: 7005670404, ResearcherID: B-2409-2017, ORCID: 0000-0001-6117-7529; fedosov-academic53@mail.ru;

Maksim O. Bakanov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the educational and scientific complex “Fire Extinguishing”, Advisor to RAASN; **Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (IFRA of SFS of EMERCOM of Russia)**; 33 Stroiteley ave., Ivanovo, 153040, Russian Federation; ID RSCI: 802943, Scopus: 57204434215, ResearcherID: O-1809-2017, ORCID: 0000-0001-8460-9056; mask-13@mail.ru;

Irina S. Grushko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial, Civil Engineering, Geotechnical and Foundation Engineering; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (SRSPU (NPI))**; 132 Prosvescheniya st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 562201, Scopus: 35519681000, ResearcherID: A-3310-2014, ORCID: 0000-0002-7552-1885; grushkois@gmail.com.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare no conflict of interest.*