

Научная статья
УДК 691
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.031

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ТЕРМОПЕНОСИЛИКАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Надежда Кимовна Манакова¹, Ольга Васильевна Суворова²

^{1, 2}*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия*

¹*n.manakova@ksc.ru, ORCID: 0000-0002-4583-9526*

²*ov.suvorova@ksc.ru, ORCID: 0000-0003-4619-0869*

Аннотация

Рассмотрена возможность создания неорганических вспененных материалов на основе кремнеземсодержащего сырья, жидкостеклового связующего и минеральных наполнителей, в том числе горнопромышленных отходов, стекло- и золаотходов. Авторами предложены составы и условия получения материалов, соответствующих нормативным требованиям, предъявляемым к материалам и изделиям строительным теплоизоляционным.

Ключевые слова:

кремнеземсодержащее сырье, минеральные наполнители, неорганические теплоизоляционные материалы, жидкое стекло, порообразователи, плотность, теплопроводность

Благодарности:

государственное задание по теме научно-исследовательской работы № FMEZ-2022-0018.

Для цитирования:

Манакова Н. К., Суворова О. В. Неорганические термопеносиликатные материалы на основе минерального и техногенного сырья Кольского полуострова // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 4. С. 181–187. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.031

Original article

INORGANIC THERMOPENOSILICATE VITREOUS MATERIALS BASED ON MINERAL TECHNOGENIC RAW MATERIALS OF THE KOLA PENINSULA

Nadezhda K. Manakova¹, Olga V. Suvorova²

^{1, 2}*I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials
of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia*

¹*n.manakova@ksc.ru, ORCID: 0000-0002-4583-9526*

²*ov.suvorova@ksc.ru, ORCID: 0000-0003-4619-0869*

Abstract

The article considers the possibility of creating new inorganic foamed materials based on liquid-glass binder, silica-containing raw materials and mineral fillers, including mining waste, glass and ash waste. The authors of the article proposed compositions and conditions for obtaining materials that meet the regulatory requirements for materials and products for building thermal insulation.

Keywords:

silica-containing raw materials mineral fillers, inorganic thermal insulation materials, liquid glass, blowing agents, density, thermal conductivity

Acknowledgments:

state task on the topic of research No. FMEZ-2022-0018.

For citation:

Manakova N. K., Suvorova O. V. Inorganic thermopenosilicate vitreous materials based on mineral technogenic raw materials of the Kola Peninsula // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 4. P. 181–187. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.031

Введение

В существующей строительной отрасли несомненный интерес вызывают высококачественные материалы, способные эффективно выполнять функции теплоизоляторов и утеплителей. Значительное количество работ посвящено исследованиям синтеза неорганических теплоизоляционных материалов,

полученных с использованием жидкостеклового связующего и минеральных наполнителей, в связи с доступностью исходных компонентов и простотой исполнения [1–7]. На основе щелочно-силикатных сырьевых смесей совместно с минеральными наполнителями возможно создание пористых теплоизоляционных материалов с ценными свойствами: низким коэффициентом теплопроводности, устойчивостью к перепадам температур, биологической и химической стойкостью, негорючестью, экологичностью и т. д.

Не имеющим себе равных теплоизоляционным материалом является пеностекло. На сегодняшний день оно является одним из наиболее эффективных строительных теплоизоляционных материалов с широким набором эксплуатационных свойств и может использоваться в любых климатических условиях на различных строительных объектах [8].

С целью разработки эффективных современных утеплителей в работе изучалась возможность получения неорганических теплоизоляционных материалов с применением минерального сырья, в том числе техногенного: высококремнеземистых, нефелинсодержащих и стекловых отходов, вермикулита, кварца, золы-уноса, золошлаковой смеси.

Материалы и методы

Для синтеза термопеносиликатных материалов использовались: 1) микрокремнезем из эвдиалитовых руд Ловозерского месторождения с удельной поверхностью 214–307 м²/г, насыпной плотностью 255–428 кг/м³; 2) микрокремнезем из нефелинового концентрата с удельной поверхностью 213,52 м²/г, насыпной плотностью 255 кг/м³; 3) жидкое стекло (ГОСТ 13078-81); 4) нефелиновый концентрат Хибинского месторождения с удельной поверхностью 0,55 м²/г, насыпной плотностью 1310 кг/м³; 5) вермикулит, фракции -0,5 мм, вспученный при 500 ± 5 °С, состава (мас. %): SiO₂ 38,62; TiO₂ 0,8; Al₂O₃ 12,15; Fe₂O₃ 6,29; FeO 0,62; CaO 1,82; MgO 27,76; 6) кварц, минеральная фракция которого выделена из жил керамических пегматитов месторождения Куруваара, крупностью -0,05 мм и насыпной плотностью 940 кг/м³; 7) хвосты обогащения апатитнефелиновых руд Хибинских месторождений с удельной поверхностью 0,80 м²/г, насыпной плотностью 1500 кг/м³; 8) стеклоотходы — бой тарного и оконного стекла крупностью -0,05 мм и насыпной плотностью 660 кг/м³. Химический состав стеклосырья (мас. %): SiO₂ 74,1; Al₂O₃ 1,6; Fe₂O₃ 0,1; CaO 10,1; MgO 1,6; Na₂O + K₂O 12,3; SO₃ 0,2; 9) золошлаковая смесь Апатитской ТЭЦ с удельной поверхностью 7,12 м²/г, насыпной плотностью 868 кг/м³; 10) зола-унос с удельной поверхностью 5 м²/кг, насыпной плотностью 940 кг/м³.

Модифицирующими добавками послужили: кремнефтористый натрий (ТУ 2621-010-69886968-2013), используемый в качестве отвердителя жидкого стекла, и дополнительно порообразователи.

На основе жидкого стекла или микрокремнезема методом пластического формования готовили зернистые и блочные образцы, которые вспенивали в электропечи ПКЛ-1,2-36 (НПП «Теплоприбор»). Пеностеклокристаллический материал получали путем засыпки сухой шихты в металлические формы и вспенивания в электрической печи «Nabertherm» (Германия).

Физико-химические и теплофизические свойства пеносиликатных материалов определялись с учетом требований ГОСТ 17177-94 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний», ГОСТ 9758-2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытания», ГОСТ 16381-77 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация и общие технические требования».

Испытания материала на прочность при сжатии проводились на гидравлическом прессе ПГМ-100МГ4-А (СКБ «Стройприбор», город Челябинск) на образцах-кубиках или цилиндрах при условии равенства высоты и диаметра. Для определения коэффициента теплопроводности использовался электронный измеритель теплопроводности ИТП-МГ 4 (город Челябинск). Образцы для испытаний изготавливались размером 10×10×2 см. В случае гранулированного материала использовалась стандартная ячейка.

Результаты и обсуждение

Пеносиликаты на основе жидкого стекла. Из смеси жидкого стекла, золы, нефелинового концентрата и модифицирующих добавок получен неорганический зернистый теплоизоляционный материал (гравий), синтез которого проводился отработанными ранее способами, включающими: гранулирование шихты, сушку и термообработку (вспенивание, отжиг) сырьевых гранул [7].

Состав шихты для получения гранулированного материала (мас. %): жидкое стекло — 54,5, зола-унос — 9, нефелиновый концентрат (фр. -0,315 мм) — 36,5; кремнефтористый натрий — 1,8; двууглекислый аммоний — 1,8 (сверх 100 %). Оптимальным условием получения гранулированного материала с точки зрения энергоэффективности и качества готовых изделий является термообработка при 800–850 °С в течение 10–15 мин. Коэффициент теплопроводности полученного материала — 0,066–0,068 Вт/м·К, плотность — 0,69–0,72 г/см³, прочность — 2,47–6,76 МПа. Внешний вид и микроструктура гравия приведены на рис. 1.

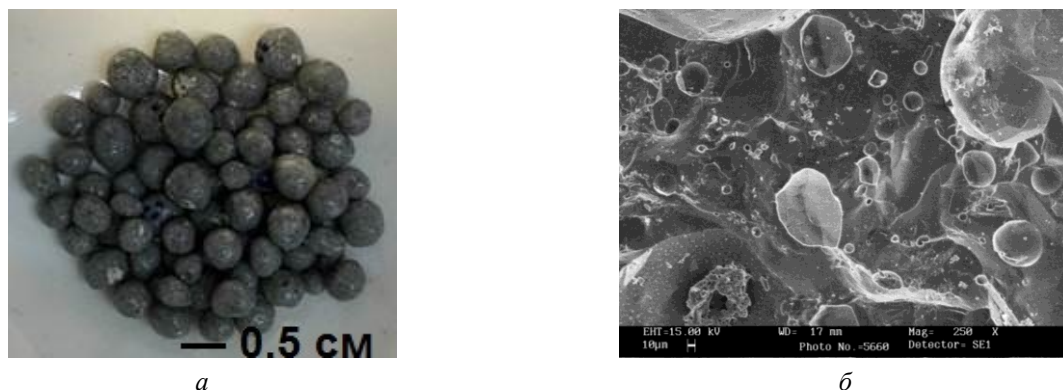


Рис. 1. Внешний вид (а) и микроструктура (б) гранулированного пеносиликата

Визуальный анализ гранулированного материала свидетельствует о его стекловидном состоянии: наблюдается характерный для стекол блеск как на поверхности гранул, так и на их сколах.

Микрографическое исследование среза гранул (рис. 1, б) обнаруживает пористость как внутренней структуры гранул, так и межпоровой перегородки, толщина которой составляет 335 мкм. Следует отметить наличие округлых пор различного диаметра от 5 до 150 мкм. Сквозных пор не наблюдается, что дает основание предположить наличие замкнутой пористости в материале, предопределяющей его пониженное водопоглощение. Гранулированный материал по физико-техническим свойствам может использоваться в качестве теплоизоляционной засыпки в промышленном и гражданском строительстве.

Эффективным способом улучшения эксплуатационных свойств с целью расширения областей применения материала является разработка способов управления микро- и макроструктурой связующего, а также оптимизация его сырьевой смеси, способов поризации, химического и гранулометрического составов как модификатора, так и наполнителя. Для этого в качестве наполнителя жидкостекольной композиции, наряду с нефелиновым концентратом, использовали вермикулит (фракции -0,5 мм), вспученный при 500 °С. Дополнительно для интенсивности процесса поризации в сырьевую смесь вводились: измельченные опилки, мел, древесный уголь и графитсодержащие отходы Кандалакшского алюминиевого завода (КАЗ).

Состав шихты (мас. %): жидкое стекло — 65; вермикулит — 20; нефелиновый концентрат — 10; кремнефтористый натрий — 2,5; порообразующая добавка — 2,5.

Из шихты указанного состава получен блочный пеносиликатный материал, схема синтеза которого представлена на рис. 2. Макроструктура полученных образцов пеносиликата на жидкостекольном связующем с порообразователями из древесного угля и графита КАЗ приведена на рис. 3.

Полученные образцы отличаются шероховатая поверхность. Внутренняя структура представлена хаотично расположенными различными по форме и размеру порами. При использовании графита и угля у образцов формируется крупнопористая структура, что свидетельствует об интенсивном процессе порообразования. Добавка мела способствует получению материала с наиболее равномерной мелкой пористостью, наличие которой, в свою очередь, является основой стабильных физико-технических характеристик. Вместе с тем все используемые добавки показали удовлетворительные результаты вспенивания. Однако использование графита и угля позволяет снизить температуру вспенивания на 50 °С. Исходя из проведенных исследований теплопроводности образцов, выявлено, что оптимальная температура вспенивания шихты с добавлением опилок или мела — 700 ± 5 °С, а в случае введения графита или угля — 650 ± 5 °С.

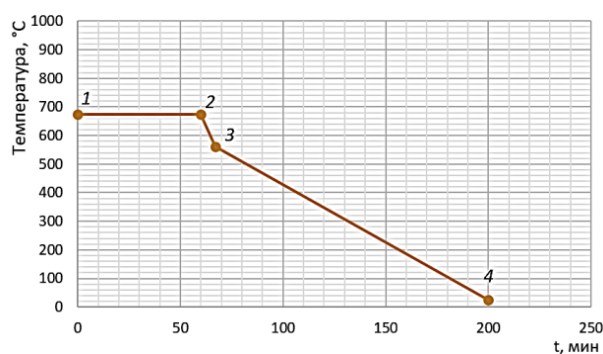


Рис. 2. Режим синтеза пеносиликатного материала ($T_{\text{вспенивания}} 675^\circ\text{C}$): 1 — загрузка; 1–2 — вспенивание; 2–3 — резкое охлаждение; 3–4 — отжиг; 4 — выгрузка

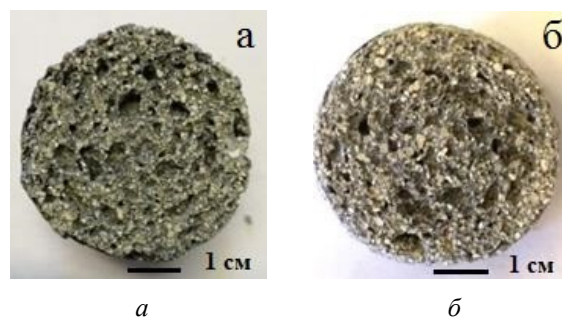


Рис. 3. Макроструктура пеносиликата с добавлением древесного угля (а), графита КАЗ (б)

Использование опилок позволяет получить материалы с наиболее низким коэффициентом теплопроводности $0,055 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Однако у них есть недостаток — рыхлая структура поверхности и низкая водостойкость. Анализ свойств полученных материалов позволил выделить наиболее эффективные порообразователи — мел, уголь и графит КАЗ.

Свойства термопеносиликатного блочного материала на жидкостекольном связующем: плотность — $0,42\text{--}0,51 \text{ г/см}^3$, теплопроводность — $0,055\text{--}0,071 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Удовлетворительные характеристики и простота технологического процесса получения теплоизоляционных материалов на жидкостекольном связующем дают основание отнести их к перспективным материалам для строительной отрасли.

Пеносиликаты на основе кремнеземсодержащих продуктов (микрокремнезема). Для расширения областей применения теплоизоляционных пеноматериалов, а также более полного использования техногенных отходов проведены исследования по возможности получения гранулированного и блочного материалов на основе кремнеземсодержащих продуктов переработки апатитонефелиновых и эвдиалитовых руд и минеральных наполнителей.

На основе микрокремнезема из нефелинового концентрата получен гранулированный пористый материал (рис. 4).

Состав шихты (мас. %): микрокремнезем — 33,5–45; гидроксид натрия концентрацией 45 % — 22–27 (в пересчете на Na_2O); апатитонефелиновые хвосты — 15–25; золошлаковая смесь — 3,0–14,5; двууглекислый аммоний — 0,5–1,5; остальное — вода. Техническая характеристика термопеносиликата: коэффициент теплопроводности — $0,075\text{--}0,100 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; прочность при сдавливании в цилиндре — 1,3–2,7 МПа; средняя плотность — $0,21\text{--}0,30 \text{ г/см}^3$; насыпная плотность — $0,15\text{--}0,24 \text{ г/см}^3$; водопоглощение — 5–12 %. Полученный зернистый материал отличается от материала на жидком стекле более низкой плотностью гранул и более высоким коэффициентом теплопроводности, значение которого соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам.

Разработанный гранулированный материал может быть рекомендован для использования в качестве теплоизоляционных засыпок (утеплителя чердачных перекрытий, стен, полов, кровли).

На основе силикатной матрицы (микрокремнезем 67–68 %, нефелиновый концентрат 15 %, гидроксид натрия 17–18 %) с добавлением мела и буры получен блочный пеносиликатный материал плотностью $0,42\text{--}0,44 \text{ г/см}^3$, прочностью 1,62–4,33 МПа, с пониженным показателем теплопроводности $0,059\text{--}0,063 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Добавка мела совместно с бурой позволяет достичь наиболее равномерной пористости, что свидетельствует об оптимальной структурной организации фаз, обеспечивающей одновременно прочностные и теплозащитные показатели ячеистого материала (рис. 5). Такая структура пористости в ячеистом теплоизоляционном материале предопределяет хорошие показатели теплофизических свойств. Вместе с тем, хаотично расположенные разорванные поры негеометрической формы свидетельствуют о предрасположенности материала усиленно впитывать жидкость, что подтверждается повышенным показателем водопоглощения.

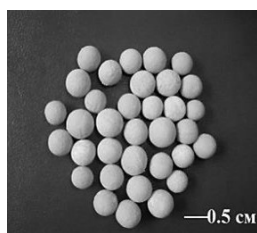


Рис. 4. Внешний вид и макроструктура гранулированного пеносиликата

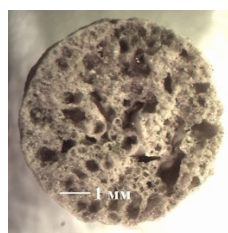
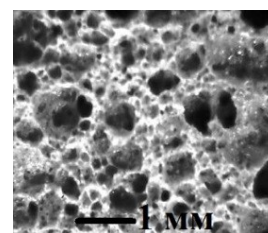


Рис. 5. Внешний вид и микроструктура образца термопеносиликата с добавкой смеси мела и буры



С целью получения материалов с улучшенными техническими характеристиками проведены исследования по разработке составов пеносиликатов с пониженным водопоглощением. Одним из способов достижения данной цели является введение модифицирующих добавок. В качестве последних использовали диопсид, хвосты обогащения вермикулитовых руд, золоотходы. Основу силикатной матрицы составляет кремнеземсодержащий продукт переработки эвдиалитовых руд.

Состав шихты (мас. %): микрокремнезем — 68; гидроксид натрия — (в пересчете на Na_2O) — 17; апатитонефелиновые отходы — 15; модифицирующие добавки — 5–30 (сверх 100 %). Технические свойства пеносиликатов представлены в таблице.

Технические свойства пеносиликатов на основе микрокремнезема из эвдиалитовых руд, модифицированных добавками

Добавки	Плотность, г/см ³	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Водопоглощение, % об.
Диопсид, ХВР	0,3–0,55	До 5–6	0,09–0,107	7–13
Золоотходы	0,36–0,45	2,8–5,2	0,068–0,089	6–9

Примечание. ХВР — хвосты обогащения вермикулитовых руд.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности введения в состав шихты пеносиликатов модифицирующих добавок. Наблюдается заметное снижение водопоглощения изделий при относительно низком значении коэффициента теплопроводности.

Пеностеклокристаллический материал на основе апатитонефелиновых хвостов и стеклоотходов. Поиск путей эффективного использования промышленных отходов лег в основу разработки состава и технологических режимов блочного вспененного материала.

На основе отходов обогащения апатитонефелиновых руд и стеклоотходов получен пеностекольный материал, внешний вид и макроструктура которого представлены на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид пеностекла

водопоглощение — 1,75–2,95 %, коэффициент теплопроводности — 0,07–0,13 Вт/м·К; морозостойкость — не менее 50 циклов. Синтезированный материал обладает высокой огнестойкостью, имеет относительно высокую прочность и долговечность. В отличие от легких (на пористых заполнителях) и ячеистых бетонов характеризуется намного меньшим значением водопоглощения. Это свойство обеспечивает стабильность коэффициента теплопроводности как в сухих, так и во влажных условиях эксплуатации.

Синтез пеностекольного материала проводился с учетом диаграммы плавкости системы кварц (SiO_2) – альбит ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) – пентаоксидосиликат натрия ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$). Состав шихты (мас. %): стеклобой — 58,5–64,5; кварц — 15,5–17,2; отходы обогащения апатитонефелиновых руд — 15,0–22,6; газообразователь (сажа, графит или мел) — 3,3–4,0 подбирался таким путем, чтобы при температурах, не превышающих 900 ± 5 °С, происходило ее полное плавление, а вязкость силикатного расплава была достаточно высокой и препятствовала росту газовых пузырей и их разрыву. Основные технические характеристики полученного материала: плотность — 200–400 кг/м³; прочность при сжатии — 1,3–1,9 МПа;

Получаемые пеностекольные материалы без труда обрабатываются режущими инструментами, сверлятся, легко монтируются в любых строительных конструкциях. Благодаря тому, что поверхность пеностекольного материала обладает ячеистой структурой, пеностекло легко и прочно клеится различными клеями и мастиками, хорошо штукатурится, сочетается с цементными растворами. Совокупность перечисленных факторов позволяет с применением вспененных неорганических материалов быстро и надежно утеплить здания как хозяйственного, так и промышленного назначения.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования дали возможность синтезировать неорганические теплоизоляционные материалы с однородной пористой структурой и улучшенными техническими характеристиками путем введения в состав смесей минеральных наполнителей: апатитонефелиновых, вермикулитовых отходов, стекло- и зооотходов. Разработанные пеноматериалы можно применять в качестве сыпучих и облицовочных теплоизоляционных материалов для тепловой изоляции внутренних стен, кровли, чердачных перекрытий, полов зданий, тепломагистралей и энергетических установок.

Разработка ресурсосберегающих технологий производства эффективных блочных теплоизоляционных термопеносиликатных материалов с использованием техногенного сырья позволит наметить пути экономии материальных и энергетических ресурсов.

Список источников

1. Терещенко И. М., Дормешкин О. Б., Кравчук А. П., Жих Б. П. Состояние и перспективы развития производства стекловидных вспененных теплоизоляционных материалов // *Стекло и керамика*. 2017. № 6. С. 29–32.
2. Vaisman I., Ketov A., Ketov I. Cellular glass obtained from non-powder preforms by foaming with steam // *Ceramics International*. 2016. T. 42, No. 14. P. 15261–15268. DOI: 10.1016/j.ceramint. 2016.06.165
3. Kazmina O. V., Vereshchagin V. I., Abiyaka A. N. Expansion of raw materials base for production of foam-glass-crystal materials // *Construction and Building Materials*. 2012. T. 1. С. 44.
4. Углова Т. К., Новоселова С. Н., Татаринцева О. С. Экологически чистые теплоизоляционные материалы на основе жидкого стекла // *Строительные материалы*. 2010. № 11. С. 44–46.
5. Манакова Н. К., Суворова О. В., Макаров Д. В. Влияние минеральных добавок на структуру и свойства теплоизоляционных материалов на основе кремнеземсодержащего сырья // *Стекло и керамика*. 2021. № 8. С. 35–40.
6. Суворова О. В., Манакова Н. К. Влияние технологических режимов на свойства и структуру пеносиликатов // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018. Т. 9, № 2. С. 894–897. doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.894-897
7. Суворова О. В., Манакова Н. К. Теплоизоляционный материал на основе кремнеземсодержащих отходов переработки рудного сырья Кольского полуострова // *ЖПХ*. 2012. Т. 85, № 11. С. 1741–1745.
8. Пат. 2246457 РФ МПК⁷ С 03 С 11/00. Шихта для получения пеностекольного облицовочного материала / В. Т. Калинин, В. Н. Макаров, О. В. Суворова, Д. В. Макаров, Н. М. Кулькова. Ин-т химии и технол. редких элем. и минер. сырья Кол. науч. центра РАН. № 2003118339. Заявл. 17.06.03. Опубл. 20.02.05. Бюл. № 5.

References

1. Tereshchenko I. M., Dormeshkin O. B., Kravchuk A. P., Zhikh B. P. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya proizvodstva steklovidnykh vspenennykh teploizolyatsionnykh materialov [Status and development prospects for the production of vitreous foamed heat-insulating materials]. *Steklo i keramika* [Glass and ceramics], 2017, vol. 6, pp. 29–32. (In Russ.).
2. Vaisman I., Ketov A., Ketov I. Cellular glass obtained from non-powder preforms by foaming with steam. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, no. 14, pp. 15261–15268. doi: 10.1016/j.ceramint. 2016.06.165
3. Kazmina O. V., Vereshchagin V. I., Abiyaka A. N. Expansion of raw materials base for production of foam-glass-crystal materials. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 1, p. 44.
4. Uglova T. K., Novoselova S. N., Tatarinceva O. S. Ekologicheski chistye teploizolyatsionnye materialy na osnove zhidkogo stekla [Environmentally friendly heat-insulating materials based on liquid glass]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 2010, no. 11, pp. 44–46. (In Russ.).
5. Manakova N. K., Suvorova O. V., Makarov D. V. Vliyaniye mineral'nykh dobavok na strukturu i svoystva teploizolyatsionnykh materialov na osnove kremnezemsoderzhashchego syr'ya [Influence of mineral additives on the structure and properties of heat-insulating materials based on silica-containing raw materials]. *Steklo i keramika* [Glass and ceramics], 2021, no. 8, pp. 35–40. (In Russ.).

6. Suvorova O. V., Manakova N. K. Vliyanie tekhnologicheskikh rezhimov na svoystva i strukturu penosilikatov [Influence of mineral additives on the structure and properties of foam silicates]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, vol. 9, no. 2, pp. 894–897. (In Russ.). doi:10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.894-897
7. Suvorova O. V., Manakova N. K. Teploizolyatsionnyj material na osnove kremnezemsoderzhashchih othodov pererabotki rudnogo syr'ya Kol'skogo poluostrova [Thermal insulation material based on silica-containing wastes from the processing of ore raw materials of the Kola Peninsula]. *Zhurnal prikladnoj himii* [Applied Chemistry Journal], 2012, vol. 85, no. 11, pp. 1741–1745. (In Russ.).
8. Pat. 2246457 RF MPK7 S 03 S 11/00. *Shihta dlya polucheniya penostekol'nogo oblicovoch'nogo materiala* [Charge for obtaining foam glass facing material] / Kalinnikov V. T., Makarov V. N., Suvorova O. V., Makarov D. V., Kul'kova N. M.. In-t himii i tekhnol. redkih elem. i miner. syr'ya Kol. nauch. centra RAN [Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”]. no. 2003118339. Appl. 17.06.03. Published 20.02.05. Bull. no. 5.

Информация об авторах

Н. К. Манакова — кандидат технических наук, научный сотрудник;

О. В. Суворова — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

N. K. Manakova — Ph.D. in Engineering sciences, Researcher;

O. V. Suvorova — Ph.D. in Engineering sciences, Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 31.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 31.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.