

О. В. Суворова, Н. К. Манакова

Использование отходов и побочных продуктов переработки апатито-нефелиновых и эвдиалитовых руд для получения теплоизоляционных пеностеклокристаллических материалов

Огромные объемы накопленных отвальных пород и хвостов обогащения в Мурманской области создают серьезные экономические и экологические проблемы. Поддержание отвалов вскрышных пород и хвостохранилищ требует значительных капитальных и материальных затрат. Вовлечение в переработку горнопромышленных отходов является перспективным современным направлением развития промышленности строительных материалов, в том числе теплоизоляционных пеностеклообразующих. Изучена возможность утилизации кремнеземсодержащих отходов и побочных продуктов переработки руд Кольского полуострова. Разработаны составы и способы получения эффективных блочных и гранулированных пеностеклокристаллических материалов. Проведены исследования влияния модифицирующих добавок на технические свойства пеносиликатных материалов. Установлены условия получения качественных блочных пеноматериалов. При оптимальных условиях получены пеносиликаты с достаточно низкой плотностью ($0.3\text{--}0.5\text{ г/см}^3$), высокой прочностью (до 5 МПа), теплопроводностью $0.09\text{--}0.107\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Предложены способы улучшения эксплуатационных характеристик пеносиликатов путем совершенствования их структуры. Установлено, что применение дополнительного кратковременного обжига зернистых образцов позволяет получить теплоизоляционный материал с прочностью гранул 5–6 МПа при плотности $0.25\text{--}0.35\text{ г/см}^3$ и прочностью при сдавливании в цилиндре 2.2–3 МПа, превышающей в 2–3 раза данное значение для материала с одноступенчатой термообработкой. Водопоглощение полученного материала составляет 5–6 %, что в два раза меньше, чем у материала, изготовленного без дополнительной термообработки. Коэффициент теплопроводности равен $0.091\text{--}0.096\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Полученные материалы могут быть рекомендованы для использования в качестве теплоизоляционного облицовочного и засыпного утеплителя чердачных перекрытий, полов и кровель при строительстве и реконструкции промышленных и гражданских зданий.

Ключевые слова: отходы переработки, апатито-нефелиновые и эвдиалитовые руды, микрокремнезем, теплоизоляционные материалы, пеностеклокристаллические материалы.

Введение

Использование эффективных теплоизоляционных материалов является одним из приоритетных направлений развития современного промышленного и гражданского строительства. В наибольшей степени всему комплексу предъявляемых требований по своим теплофизическим, противопожарным и эксплуатационным показателям соответствует пеностекло. Метод получения пеностекла был предложен И. И. Китайгородским (СССР) и Б. Лонгом (Франция) [1; 2]. На базе Гомельского стекольного завода им. М. В. Ломоносова (ныне ОАО "Гомельстекло", Республика Беларусь) технология пеностекла была усовершенствована и подробно описана в работах Б. К. Демидовича [3].

Пеностекло производят главным образом порошковым методом [1; 2]. Суть метода заключается в спекании смеси порошков стекла и специальных добавок, способствующих образованию газовой фазы при нагреве. При термообработке смеси происходит появление пеномассы. Когда температура нагреваемой смеси превышает температуру размягчения, начинается спекание частиц стекла, при этом частицы порообразователя оказываются блокированными размягченным стеклом. При достижении определенной температуры они начинают выделять газы, вспенивающие стекломассу. Форма пор и свойства полученного пеностекла во многом зависят от концентрации и вида использованного газообразователя [1].

Основными преимуществами пеностекла по сравнению с другими теплоизоляционными материалами являются водостойкость, относительно высокая механическая прочность, негорючесть и биологическая стойкость [1–3].

В настоящее время этому материалу уделяется повышенное внимание как в нашей стране, так и за рубежом [1; 2; 4–18 и др.]. Важным направлением развития производства теплоизоляционных материалов, в том числе и пеностеклообразующих, является использование различных промышленных отходов. Значительное число публикаций посвящено использованию вторичного сырья, прежде всего отходов стекла: листового, стеклянной тары, электронно-лучевых трубок, стеклобоя, полученного при демонтаже компьютеров и телевизоров, а также отходов горно-металлургического и топливно-энергетического комплексов.

Методы исследований

Для определения оптимального состава пеностекла, жидкостеклообразующей композиции и условий синтеза пеносиликатов получали экспериментальные зависимости плотности и прочности образцов гранул и блоков от содержания модифицирующих добавок, температуры и времени вспенивания материала. Измерение удельной

поверхности сырьевых материалов производили методом воздухопроницаемости на приборе Т-3 и по методу БЭТ. Рентгенофазовый анализ вели на дифрактометре ДРОН-2 (CuK_α излучение). Фрактографические исследования пеноматериала проводили с привлечением оптической микроскопии и сканирующей электронной микроскопии с использованием SEM LEO 420.

Физико-химические, теплофизические свойства зернистого и блочного материалов из кремнеземсодержащего сырья определяли согласно ГОСТ 17177–94 "Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний", ГОСТ 9758–2012 "Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний". Оценку нормируемых показателей ячеистого материала проводили по ГОСТ 9757–90 "Гравий, щебень и песок искусственные пористые. Технические условия", ГОСТ 16381–77 "Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Классификация и общие технические требования". Для определения коэффициента теплопроводности использовали электронный измеритель теплопроводности ИТП-МГ 4.

Результаты и обсуждение

В процессе разработки пеностеклокристаллического теплоизоляционного материала использовали хвосты обогащения апатито-нефелиновых руд и стеклоотходов. Материал пригоден для изготовления блочных изделий, применяемых при строительстве и реконструкции зданий (рис. 1).

Для обоснования выбора областей составов, оптимальных для получения материала, проанализировали плавкость и вязкость в системе кварц SiO_2 – альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – пентаоксидсиликат натрия $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ [19; 20].

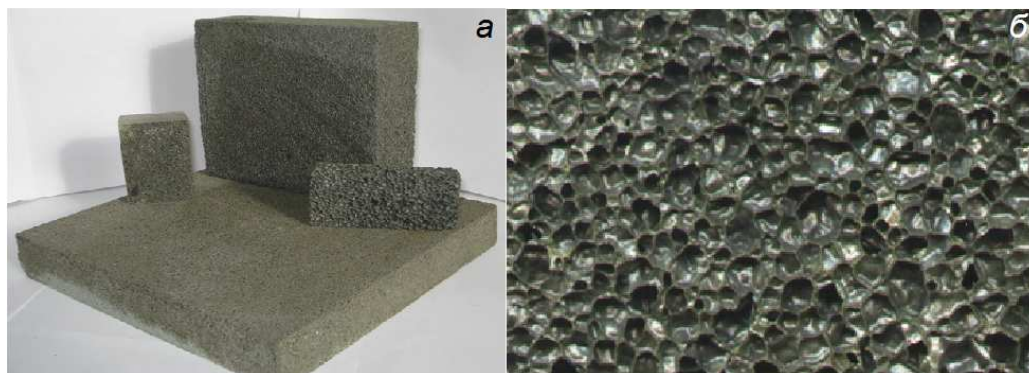


Рис. 1. Внешний вид пеноблоков (а) и структура материала (б)
Fig. 1. The appearance of foam blocks (a) and the structure of the material (b)

На основе анализа плавкости и вязкости в данной системе предложен следующий состав шихты, мас. %: стеклобой 58.5–64.5, отходы обогащения апатито-нефелиновых руд 15.0–22.6, кварц 15.5–17.2, газообразователь (графит) 3.3–4.0. Температура ликвидуса в данной области соотношений компонентов не превышает 900 °С, а вязкость силикатного расплава находится в диапазоне значений, обеспечивающих формирование системы замкнутых пор (рис. 1, б).

Основные технические характеристики полученного материала представлены в табл. 1. Отметим, что материал характеризуется более высокой прочностью при сжатии, чем пеностекло фирмы Foamglass (Бельгия). Его теплопроводность несколько выше, чем у пеностекло данного производителя и сопоставима с показателями пенокерамики фирмы Yi Fang (Китай). Низкое водопоглощение обеспечивает стабильность коэффициента теплопроводности, а также высокую морозостойкость.

Поверхность изделий может быть как гладкой, так и имитирующей природный камень. Материал характеризуется приемлемыми декоративными характеристиками, поверхность без дополнительной обработки имеет зеленовато-серую окраску (рис. 1, а). В зависимости от назначения на поверхность изделий может быть нанесена цветная глазурь.

Таблица 1. Технические характеристики материала
Table 1. Technical characteristics of the material

Прочность при сжатии, МПа	1.3–1.9
Плотность, г/см ³	0.2–0.4
Теплопроводность, Вт/м·К	0.07–0.13
Водопоглощение, %	1.75–2.95
Морозостойкость, циклы	Не менее 50

Следует отметить, что все компоненты шихты являются отходами промышленности. В частности, вместо кварца могут быть использованы специальным образом подготовленные хвосты обогащения железистых

кварцитов. В качестве газообразователя применили отработанные аноды Кандалакшского алюминиевого завода; обосновали возможность добавления в шихту стеклообразных продуктов, получаемых при сжигании твердых бытовых отходов.

В связи с образованием большого объема кремнеземистых продуктов при кислотной переработке апатито-нефелиновых и эвдиалитовых руд Кольского полуострова вопрос их использования является одним из ключевых. Применение аморфного кремнезема, в частности, в производстве пеносиликатов за счет образования вяжущих композиций со щелочами [2; 6; 7 и др.], может существенно повысить стоимость товарной продукции. Источником порообразующих газов в области пиропластического состояния являются гидратированные полисиликаты натрия, которые образуются при увлажнении высокоактивного аморфного кремнезема раствором гидроксида натрия [21]. Образующееся жидкое стекло химического состава $R_2O \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O$ способно формировать хорошо развитую пористую систему при низкой температуре.

Для изготовления пеносиликатов использовали пробы кремнеземистого продукта (микрокремнезема) в количестве до 80 %, некоторые характеристики которого приведены в табл. 2. Исследования методом рентгенофазового анализа показали, что пробы представляют собой рентгеноаморфное вещество. Термообработку проводили в интервале температур от 600 до 700 °С.

Таблица 2. Некоторые свойства кремнеземистого продукта
Table 2. Some properties of the silica product

Показатель	Микрокремнезем		
	Эвдиалитовые руды	Апатито-нефелиновые руды (ПАО "Акрон")	Апатито-нефелиновые руды (АО "Апатит")
Содержание SiO ₂ , мас.%	70	77	85
Цвет	Серый	Серо-белый	Серо-белый
Степень агрегирования	Мелкодисперсный	Гранулированный	Мелкодисперсный
Удельная поверхность, м ² /г	279	122	233
Насыпная плотность, кг/м ³	523	255	287

Исследованиями взаимосвязей состава, технологических режимов и свойств установлены оптимальные условия получения пеносиликатов. Полученные пеносиликаты обладают мелкопористой структурой с неравномерно распределенными порами и прочностью, не превышающей 2 МПа. Применение их в качестве блочных теплоизоляционных материалов возможно при улучшении технических характеристик, в том числе и посредством совершенствования структуры. Для вспененных теплоизоляционных материалов оптимальной считается структура, состоящая из равномерно распределенных разных по размерам пор, разделенных равными по толщине перегородками [22]. Подобная структура обеспечивает получение высококачественных материалов.

Одним из способов регулирования свойств жидкостекольной композиции с получением качественного пеносиликатного материала является его модифицирование путем введения добавок. Согласно литературным данным введение водостойких и прочных добавок, например апатито-нефелиновых отходов и диоксида, улучшает технические свойства готового продукта за счет возможного проникновения и распределения добавок в пустотах кристаллической структуры и микроструктуры [23].

Другим способом регулирования свойств пеносиликатов является применение исходных материалов различной дисперсности. При этом крупные частицы образуют жесткий каркас, а мелкодисперсные и расплав заполняют поры. Создания подобной структуры можно достичь приготовлением шихты из двух и более порошков с разной крупностью [22].

В ходе исследований установлено, что введение в состав до 15 % апатито-нефелиновых отходов крупностью –1 мм приводит к повышению механической прочности образцов до 4.2 МПа при незначительном росте плотности до 0.42 г/см³.

С целью улучшения структуры пеносиликатов и увеличения прочностных характеристик в ряде экспериментов в шихту вводили измельченный пеносиликат крупностью –1 мм (10–30 % сверх 100 %). При получении образцов использовали сушку на воздухе в течение 24 ч и гидротермальную обработку при 90 °С в течение 2 ч, которая, как известно, способствует ускорению образования гидратированных щелочных силикатов. При этом происходит увеличение концентрации источника газовой фазы и повышение порообразования при низких температурах до появления расплава.

Термообработку проводили при 650 °С с изотермической выдержкой в течение 0.5 ч. Для стабилизации пены осуществляли резкое снижение температуры на 100–150 °С с последующим медленным охлаждением до температуры окружающей среды. Получено повышение прочности до 5 МПа при одновременном увеличении плотности до 0.45 г/см³.

Установлено, что введение в шихту диоксида приводит к увеличению прочности пеносиликатов в два раза. Максимальная прочность при сжатии материала составила 4.2 МПа. Это значение достигнуто

при добавлении 30 % (сверх 100 %) диоксида фракции -0.05 мм. При этом происходит увеличение плотности материала до 0.55 г/см³.

Кроме того, введение измельченного диоксида способствует снижению водопоглощения и увеличению водостойкости в 2–3 раза, что избавляет от необходимости дополнительной обработки материала гидрофобизаторами.

Блочные материалы, полученные при добавлении измельченного пеносиликата, представлены на рис. 2. Управление составом шихты и оптимальный температурный режим синтеза пеносиликатов позволяют получать материалы с широким диапазоном свойств. Плотность пеносиликатов варьирует в диапазоне 0.3 – 0.55 г/см³, прочность при сжатии – 2.1 – 5 МПа.

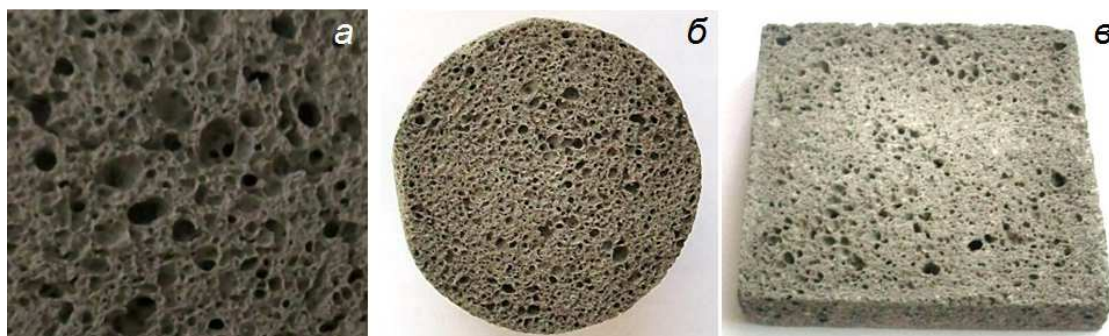


Рис. 2. Пеносиликаты для изготовления теплоизоляционных материалов: температура вспучивания 650 °С, время выдержки 30 мин (а, в); температура вспучивания 750 °С (б)

Fig. 2. Foamed silicates for manufacturing thermal insulation materials: swelling temperature – 650 °С, holding time – 30 minutes (a, в); swelling temperature – 750 °С (б)

В настоящее время повысился интерес к гранулированному пеностеклу и аналогичным материалам, применяемым как в виде засыпки, так и в качестве особо легкого заполнителя бетонов и других строительных композитов. На основе аморфного кремнезема, полученного на опытной установке АО "Апатит" и производимого в ПАО "Акрон", получен зернистый пористый материал.

Проведенные исследования позволили обосновать следующую технологию синтеза теплоизоляционного материала: растворение аморфного кремнезема в щелочи с получением жидкостекольной композиции, ее грануляция и последующая термообработка при 350 – 450 °С в течение 20–30 мин. Полученные гранулированные пеносиликаты удовлетворяют нормативным требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам. С целью улучшения технических характеристик материала изучено влияние параметров синтеза на его свойства. В частности, был проведен дополнительный обжиг гранул в течение 0.5–5 мин при высоких температурах (800 , 850 , 900 °С). В результате дополнительной термической обработки поверхность гранул оплавляется, что способствует упрочнению и снижению водопоглощения образцов (рис. 3, а). Фрактографические исследования среза гранулы подтверждают наличие кристаллической составляющей, свидетельствующей о возрастающей прочности материала (рис. 3, б). Основные свойства синтезированного зернистого материала представлены в табл. 3.

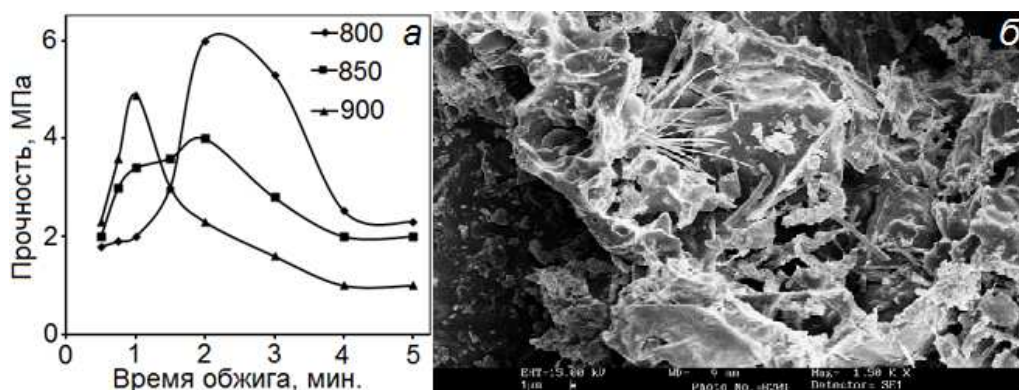


Рис. 3. Зависимость прочности при сжатии гранулы пеносиликата от времени и температуры дополнительного обжига, °С, (а) и микроморфология среза гранулы, полученной по двухступенчатой технологии с кратковременным обжигом при 800 °С (б)

Fig. 3. The dependence of strength at compressing granules of foamed silicate on time and temperature of additional firing, °С, (a) and the granules' cutoff micromorphology obtained by two-stage technology with a short calcination at 800 °С (б)

Таблица 3. Технические характеристики гранулированных пеносиликатов
Table 3. Technical characteristics of granulated foamed silicate

Показатель	Гранулированный пеносиликат		
	1	2	3
Насыпная плотность, г/см ³	0.17–0.20	0.10–0.25	0.25–0.32
Средняя плотность, г/см ³	0.24–0.35	0.24–0.36	0.28–0.34
Объем межзерновых пустот, %	44	31	27
Коэффициент теплопроводности в засыпке, Вт/(м·К)	0.075–0.080	0.089–0.091	0.091–0.093
Водопоглощение, %	12	5–6	7–12
Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа	0.8–1.3	2.2–2.7	1.2

Примечание. Пеносиликаты на основе аморфного кремнезема кислотной переработки нефелина: 1 – АО "Апатит" (обработка при 450 °С); 2 – АО "Апатит" (двухступенчатая обработка); 3 – ПАО "Акрон" (двухступенчатая обработка).

Термообработка гранул из аморфного кремнезема АО "Апатит" при температуре 450 °С и их последующий кратковременный обжиг при 800–900 °С обеспечивает прочность при сжатии синтезируемого материала 5–6 МПа. Прочность при сдавливании в цилиндре повышается в 2–3 раза по сравнению с материалом, полученным по одноступенчатой технологии. Водопоглощение при этом снижается в два раза. Несколько худшие характеристики зафиксированы у гранул на основе микрокремнезема ПАО "Акрон".

Заключение

Таким образом, на основе отходов и побочных продуктов переработки апатито-нефелиновых и эвдиалитовых руд получены эффективные теплоизоляционные блочные и гранулированные пеноматериалы, которые могут найти применение при строительстве и реконструкции промышленных и гражданских зданий.

Библиографический список

1. Спиридонов Ю. А., Орлова Л. А. Проблемы получения пеностекла // Стекло и керамика. 2003. № 10. С. 10–11.
2. Минько Н. И., Пучка О. В., Степанова М. Н., Вайсера С. С. Теплоизоляционные стекломатериалы. Пеностекло. Белгород : БГТУ, 2016. 262 с.
3. Демидович Б. К. Пеностекло. Минск : Наука и техника, 1975. 248 с.
4. Верещагин В. И., Соколова С. Н. Гранулированный пеностеклокристаллический теплоизоляционный материал из цеолитсодержащих пород // Строительные материалы. 2007. № 3. С. 66–67.
5. Кетов А. А., Пузанов И. С., Саулин Д. В. Тенденции развития технологии пеностекла // Строительные материалы. 2007. № 9. С. 28–31.
6. Казанцева Л. К. Особенности изготовления пеностекла из цеолитщелочной шихты // Стекло и керамика. 2013. № 8. С. 3–7.
7. Никитин А. И., Стороженко Г. И., Казанцева Л. К., Верещагин В. И. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе трепелов Потанинского месторождения // Строительные материалы. 2014. № 8. С. 34–36.
8. Казьмина О. В., Верещагин В. И. Методологические принципы синтеза пеностеклокристаллических материалов по низкотемпературной технологии // Строительные материалы. 2014. № 8. С. 41–45.
9. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents // Ceramics International. 2009. V. 35, N 1. P. 229–235.
10. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. Production and characterization of glass ceramic foams from recycled raw materials // Advances in Applied Ceramics. 2009. V. 108, N 1. P. 9–13.
11. Hashemina S., Nemati A., Yekta B. E., Alizadeh P. Preparation and characterization of diopside-based glass-ceramic foams // Ceramics International. 2012. V. 38, N 3. P. 2005–2010.
12. Chen X., Lu A., Qu G. Preparation and characterization of foam ceramics from red mud and fly ash using sodium silicate as foaming agent // Ceramics International. 2013. V. 39, N 2. P. 1923–1929.
13. Tang B., Lin J., Qian S., Wang J., Zhang S. Preparation of glass-ceramic foams from the municipal solid waste slag produced by plasma gasification process // Materials Letters. 2014. V. 128, N 10. P. 68–70.
14. Wang H., Feng K., Zhou Y., Sun Q., Shi H. Effects of Na₂B₄O₇·5H₂O on the properties of foam glass from waste glass and titania-bearing blast furnace slag // Materials Letters. 2014. V. 132. P. 176–178.
15. Bai J., Yang X., Xu S., Jing W., Yang J. Preparation of foam glass from waste glass and fly ash // Materials Letters. 2014. V. 136. P. 52–54.
16. Ding L., Ning W., Wang Q., Shi D., Luo L. Preparation and characterization of glass-ceramic foams from blast furnace slag and waste glass // Materials Letters. 2015. V. 141. P. 327–329.

17. Ji R., Zhang Z., He Y., Liu L., Wang X. Synthesis, characterization and modeling of new building insulation material using ceramic polishing waste residue // *Construction and Building Materials*. 2015. V. 85. P. 119–126.
18. Zhu M., Ji R., Li Z., Wanga H., Liu L., Zhang Z. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 112. P. 398–405.
19. Макаров В. Н., Кулькова Н. М., Суворова О. В., Макаров Д. В. Зависимость вязкости расплава и стекол от температуры и состава в системе кварц – пентаоксодисиликат натрия – альбит – эгирин // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2005. Т. 48, № 5. С. 59–62.
20. Мелконян Р. Г., Макаров Д. В., Суворова О. В. Экологические проблемы использования техногенного сырья в производстве стекла и керамики. Апатиты : КНЦ РАН, 2016. 224 с.
21. Казанцева Л. К., Сереткин Ю. В., Железнов Д. В., Ращенко С. В. Формирование источника порообразующего газа при увлажнении природных алюмосиликатов раствором NaOH // *Стекло и керамика*. 2012. № 10. С. 37–42.
22. Углова Т. К., Новоселова С. Н., Татаринцева О. С. Экологически чистые теплоизоляционные материалы на основе жидкого стекла // *Строительные материалы*. 2010. № 10. С. 44–46.
23. Верещагин В. И., Меньшикова В. К., Бурученко А. Е., Могилевская Н. В. Керамические материалы на основе диопсида // *Стекло и керамика*. 2010. № 11. С. 13–16.

References

1. Spiridonov Yu. A., Orlova L. A. Problemy polucheniya penostekla [Problems of foam glass production] // *Steklo i keramika*. 2003. N 10. P. 10–11.
2. Minko N. I., Puchka O. V., Stepanova M. N., Vaysera S. S. Teploizolyatsionnye steklomaterialy. Penosteklo [Heat-insulating glass materials. Foam glass]. Belgorod : BGTU, 2016. 262 p.
3. Demidovich B. K. Penosteklo [Foam glass]. Minsk : Nauka i tehnika, 1975. 248 p.
4. Vereshchagin V. I., Sokolova S. N. Granulirovannyi penosteklokristallicheskiy teploizolyatsionnyi material iz tseolitsoderzhaschih porod [Pelletized foam-glass crystalline heat-insulating material from zeolite-containing rock] // *Stroitelnye materialy*. 2007. N 3. P. 66–67.
5. Ketov A. A., Puzanov I. S., Saulin D. V. Tendentsii razvitiya tehnologii penostekla [Trends in development of foam-glass technology] // *Stroitelnye materialy*. 2007. N 9. P. 28–31.
6. Kazantseva L. K. Osobennosti izgotovleniya penostekla iz tseolitschelochnoy shihty [Features of foam-glass manufacture from zeolite charge] // *Steklo i keramika*. 2013. N 8. P. 3–7.
7. Nikitin A. I., Storozhenko G. I., Kazantseva L. K., Vereschagin V. I. Teploizolyatsionnye materialy i izdeliya na osnove trepelov Potaninskogo mestorozhdeniya [Heat-insulating materials and items from fossil meal of the Potaninskoye deposit] // *Stroitelnye materialy*. 2014. N 8. P. 34–36.
8. Kazmina O. V., Vereschagin V. I. Metodologicheskie printsipy sinteza penosteklokristallicheskih materialov po nizektemperaturnoy tehnologii [Methodological principles of foam-glass crystalline materials synthesis by the low-temperature technology] // *Stroitelnye materialy*. 2014. N 8. P. 41–45.
9. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents // *Ceramics International*. 2009. V. 35, N 1. P. 229–235.
10. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. Production and characterization of glass ceramic foams from recycled raw materials // *Advances in Applied Ceramics*. 2009. V. 108, N 1. P. 9–13.
11. Hasheminia S., Nemati A., Yekta B. E., Alizadeh P. Preparation and characterization of diopside-based glass-ceramic foams // *Ceramics International*. 2012. V. 38, N 3. P. 2005–2010.
12. Chen X., Lu A., Qu G. Preparation and characterization of foam ceramics from red mud and fly ash using sodium silicate as foaming agent // *Ceramics International*. 2013. V. 39, N 2. P. 1923–1929.
13. Tang B., Lin J., Qian S., Wang J., Zhang S. Preparation of glass-ceramic foams from the municipal solid waste slag produced by plasma gasification process // *Materials Letters*. 2014. V. 128, N 10. P. 68–70.
14. Wang H., Feng K., Zhou Y., Sun Q., Shi H. Effects of Na₂B₄O₇·5H₂O on the properties of foam glass from waste glass and titania-bearing blast furnace slag // *Materials Letters*. 2014. V. 132. P. 176–178.
15. Bai J., Yang X., Xu S., Jing W., Yang J. Preparation of foam glass from waste glass and fly ash // *Materials Letters*. 2014. V. 136. P. 52–54.
16. Ding L., Ning W., Wang Q., Shi D., Luo L. Preparation and characterization of glass-ceramic foams from blast furnace slag and waste glass // *Materials Letters*. 2015. V. 141. P. 327–329.
17. Ji R., Zhang Z., He Y., Liu L., Wang X. Synthesis, characterization and modeling of new building insulation material using ceramic polishing waste residue // *Construction and Building Materials*. 2015. V. 85. P. 119–126.
18. Zhu M., Ji R., Li Z., Wanga H., Liu L., Zhang Z. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 112. P. 398–405.

19. Makarov V. N., Kulkova N. M., Suvorova O. V., Makarov D. V. Zavisimost vyazkosti rasplava i stekol ot temperatury i sostava v sisteme kvarts – pentaoksidisilikat natriya – albit – egirin [Melt and glass viscosity temperature and composition in the quartz – sodium pentoxodisilicate – albite – egirine system] // Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tehnologiya. 2005. V. 48, N 5. P. 59–62.

20. Melkonyan R. G., Makarov D. V., Suvorova O. V. Ekologicheskie problemy ispolzovaniya tehnogenogo syrya v proizvodstve stekla i keramiki [Environmental issues related to recovery of anthropogenic waste in glass and ceramics manufacture]. Apatity : KNTs RAN, 2016. 224 p.

21. Kazantseva L. K., Seretkin Yu. V., Zheleznov D. V., Raschenko S. V. Formirovanie istochnika poroobrazuyushego gaza pri uvlazhnenii prirodnyh alyumosilikatov rastvorom NaOH [Creating a foam-generating gas source by moistening natural alumosilicates with a NaOH solution] // Steklo i keramika. 2012. N 10. P. 37–42.

22. Uglova T. K., Novoselova S. N., Tatarintseva O. S. Ekologicheski chistye teploizolyatsionnye materialy na osnove zhidkogo stekla [Environmentally friendly heat-insulating materials based on liquid glass] // Stroitelnye materialy. 2010. N 10. P. 44–46.

23. Vereschagin V. I., Menshikova V. K., Buruchenko A. E., Mogilevskaya N. V. Keramicheskie materialy na osnove diopsida [Diopside-based ceramic materials] // Steklo i keramika. 2010. N 11. P. 13–16.

Сведения об авторах

Суворова Ольга Васильевна – мкр Академгородок, 26а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: suvorova@chemy.kolasc.net.ru

Suvorova O. V. – 26а, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Minerals KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher; e-mail: suvorova@chemy.kolasc.net.ru

Манакова Надежда Кимовна – мкр Академгородок, 26а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, канд. техн. наук, науч. сотрудник; e-mail: manakova@chemy.kolasc.net.ru

Manakova N. K. – 26а, Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Minerals KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Researcher; e-mail: manakova@chemy.kolasc.net.ru

O. V. Suvorova, N. K. Manakova

Recovery of waste and side products of apatite-nepheline and eudialyte ores processing in manufacture of heat-insulating foam glassy-crystalline materials

Overburden and dressing tailings accumulated in the Murmansk region in impressive volumes represent serious challenges of both economic and ecological character. Maintenance of overburden dumps and dressing tailings involves considerable capital and material expenses. Therefore reprocessing of mining waste and manufacture of building materials, including heat-insulating foam-glass materials, is a promising trend. The work discusses the feasibility of recovering silica-containing waste and ore processing byproducts on the Kola Peninsula. Compositions and techniques for producing blocks and pellets from foam-glass crystalline materials have been developed. The effect of modifying agents on the foam-silicate materials' mechanical properties has been investigated. The production conditions for high-quality foam-silicate blocks have been identified. The foam silicates obtained under optimal conditions have featured a relatively low viscosity (0.3–0.5 g/cm³), high strength (up to 5 MPa) and heat conductivity (0.09–0.107 Wt/m·K). Methods of improving the operating characteristics of foam silicates based on structure perfecting have been proposed. It has been found that as a result of short-time baking of grainy samples the product has a grain strength of 5–6 MPa, density of 0.25–0.35 g/cm³ and a resistance to crushing in cylinder of 2.2–3 MPa, which is 2–3 times higher than that of a material subjected to one-stage thermal treatment. The water absorption of the material is 5–6 %, which is by a half lower compared to a one-stage treated material. The thermal conduction coefficient is 0.091–0.096 Wt/m·K. The obtained materials are recommended for use as heat-insulating surfacing and filling material for garrets, floors and roofs in construction and renovation of industrial and civic buildings.

Key words: processing waste, apatite-nepheline and eudyalite ores, microsilica, heat-insulating materials, foam glassy-crystalline materials.