

Научная статья
УДК 666.189.32:661.683.3
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.040

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЕНОМАТЕРИАЛОВ

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, <http://orcid.org/0000-0002-4583-9526>*

²*ov.suvorova@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4619-0869>*

Аннотация

Приведены результаты исследования по синтезу неорганических пеноматериалов теплоизоляционного назначения из техногенных отходов. Обоснована перспективность использования низкотемпературной технологии для получения вспененных материалов. Определены способы улучшения физико-технических свойств полученных материалов. Изучено влияние модифицирующих добавок и технологических режимов на технические свойства вспененных изделий (плотность, прочность, теплопроводность, водопоглощение).

Ключевые слова:

техногенные отходы, модифицирующие добавки, неорганические пеноматериалы

Финансирование:

государственное задание по теме НИР № FMEZ-2025-0059.

Для цитирования:

Манакова Н. К., Суворова О. В. Комплексное использование техногенного сырья при получении теплоизоляционных пеноматериалов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 235–240. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.040.

Original article

INTEGRATED USE OF MAN-MADE RAW MATERIALS IN THE PRODUCTION OF THERMAL INSULATION FOAMS

Nadezhda K. Manakova¹, Olga V. Suvorova²

^{1, 2}*Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia*

¹*n.manakova@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4583-9526>*

²*ov.suvorova@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0003-4619-0869>*

Abstract

The results of a study on the synthesis of inorganic foam materials for thermal insulation purposes from man-made waste are presented. The prospects of using low-temperature technology for the production of foamed materials are substantiated. The methods of improving the physical and technical properties of the obtained materials are determined. The influence of modifying additives and technological modes on the technical properties of foamed products (density, strength, thermal conductivity, water absorption) has been studied.

Keywords:

man-made waste, modifying additives, inorganic foams

Funding:

State task on the topic of research No FMEZ-2025-0059.

For citation:

Manakova N. K., Suvorova O. V. Integrated use of man-made raw materials in the production of thermal insulation foams // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 235–240. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.040.

Введение

Переработка и утилизация техногенных отходов, особенно в условиях экстремального северного климата, является актуальной проблемой и ставится многими российскими и зарубежными учеными в приоритет исследований. Поддержание отвалов (консервация, утилизация и захоронение отходов) требует значительных финансовых вложений, энергозатрат и является сложным в организации.

Возникает необходимость в переработке техногенных отходов с получением полезных товаров, в том числе для строительной отрасли. В настоящее время активно происходит внедрение технологий управления отходами, которые в соответствии с концепцией экономики замкнутого цикла рассматриваются как вторичные сырьевые ресурсы [1].

Вместе с тем, в связи с увеличением темпов строительства и ужесточением требований к строительным конструкциям и материалам, особенно актуальным становится поиск новых источников исходного сырья для синтеза современных высокоэффективных материалов теплоизоляционного назначения.

Ежегодно растет востребованность негорючих строительных теплоизоляционных материалов на основе техногенного силикатного сырья [2]. Успешно развивается направление создания экологичных пористых теплоизоляционных материалов, таких как пеностекло, пеносиликаты, пеностеклокерамика [3–6]. Такая теплоизоляция отличается, кроме негорючести, способностью выдерживать высокую температуру с минимальным изменением эксплуатационных характеристик, достаточно высокой для теплоизоляционных материалов прочностью при низких значениях теплопроводности. Преимуществом вспененных стекломатериалов по сравнению с некоторыми искусственными изоляционными материалами является их неорганический состав. Как и любое стекло, они устойчивы к действию грибов, микроорганизмов, насекомых и грызунов, не поддерживают открытого пламя. Также их можно отнести к экологичным, так как основными сырьевыми компонентами являются отходы или побочные продукты различных производств, стеклоотходы, что решает проблему переработки вторичного сырья.

Использование отходов в производственном цикле и переработка их в востребованный товарный продукт позволяет решить целый ряд проблем строительной отрасли и экологии. Это ведет к уменьшению количества накопленных отходов, а значит, и отчужденных земель, к снижению использования природного сырья, что, в свою очередь, способствует нормализации экологической обстановки. Кроме того, применение отходов, подвергшихся термической обработке (золы-уноса, золошлаковых отходов и др.) снижает энергозатраты на синтез конечного продукта [7 и др.].

Результаты

Пеноматериалы получали методом низкотемпературного синтеза, который включает в себя две основные стадии: *приготовление пенообразующей жидкостекольной композиции и ее вспенивание с получением готового продукта*. Двухстадийная технология позволяет поэтапно оптимизировать структуру и свойства материала в зависимости от его назначения. Основными сырьевыми компонентами служили микрокремнеземы, являющиеся побочными продуктами переработки эвдиалитовых (Мкр.э) и апатитонегелиновых руд (Мкр.н). Для получения пеносиликатного материала с улучшенными эксплуатационными характеристиками использовали введение модифицирующих добавок и оптимизацию технологических параметров. Образцы с добавками характеризуются более равномерной мелкопористой структурой и имеют сравнительно лучшие показатели технических свойств.

Вводимые добавки оказывали различное влияние на процесс синтеза и свойства конечного продукта. В качестве добавок к силикатной матрице, интенсифицирующих процесс вспенивания, применяли графитовые отходы Кандалакшского алюминиевого завода (КАЗ), доломит Сопчеозерского месторождения, мел. Добавками, увеличивающими прочностные характеристики и водостойкость изделий, являлись апатитонегелиновые отходы, диопсид Ковдорского месторождения, зола-унос АТЭЦ, сунгулит Хабозерского месторождения. Обосновано введение в шихту отверждающих добавок (гипса, кремнефтористого натрия), упорядочивающих структуру щелочно-силикатных растворов. Некоторые из указанных добавок оказывали влияние и на снижение температуры вспенивания.

В результате исследований взаимосвязей состава шихты, технологических режимов, структуры и технических свойств изделий определены оптимальные составы и условия получения эффективных блочных вспененных материалов.

В процессе получения пеноматериалов замечено, что предварительная активация суспензии при температуре 90 °С в течение 5–7 мин позволяет ускорить коагуляцию микрокремнезема и реакцию синтеза силикатов натрия. Оптимальная температура вспенивания шихты 675–700 °С в течение 25 мин.

В работе установлена перспективность использования в производстве пеносиликатов микрокремнезема, являющихся продуктами переработки апатитонепелиновых и эвдиалитовых руд. Получены теплоизоляционно-композиционные вспененные материалы с пониженным показателем теплопроводности 0,051–0,073 Вт/м·К. Однако материалы, синтезированные на основе Мкр.н, обладают низкой водостойкостью, имеют сообщающиеся поры неправильной формы и, соответственно, высокое значение водопоглощения.

В пеносиликатах на основе Мкр.э преобладают в основном замкнутые сферические поры, что косвенно указывает на формирование структуры вспененного материала с закрытой пористостью, которая характерна для водостойких материалов (рис. 1).

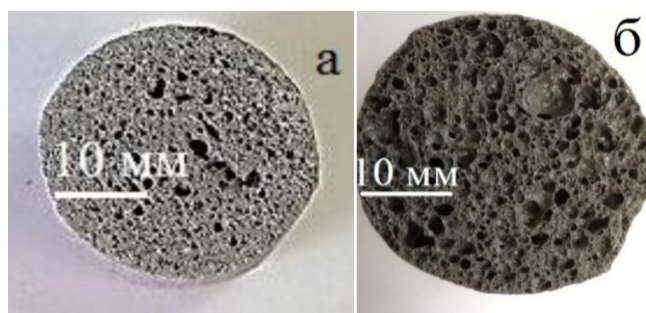


Рис. 1. Макроструктура пеноматериалов на основе микрокремнезема из апатитонепелиновых (а) и эвдиалитовых (б) руд

Представлены примеры эффективного введения модифицирующих добавок в силикатную матрицу.

Следует отметить результативное влияние на комплекс свойств получаемых материалов добавок доломита в количестве 5–10 мас. % и сунгулита — 5–17,5 мас. %.

При оптимальных условиях получены пеносиликаты с относительно равномерной мелкопористой структурой и стабильными физико-техническими свойствами: плотность 0,35–0,45 г/см³, прочность 1,9–3,0 МПа, водопоглощение 12–14 %, теплопроводность 0,058–0,061 Вт/м·К. В образцах, полученных с добавлением доломита, фиксируются округлые замкнутые поры, характерные для водостойких теплоизоляционных материалов (рис. 2). К тому же визуализируется значительное количество минеральной составляющей нитевидной и игольчатой конфигурации, которая, вероятно, оказывает армирующее действие.

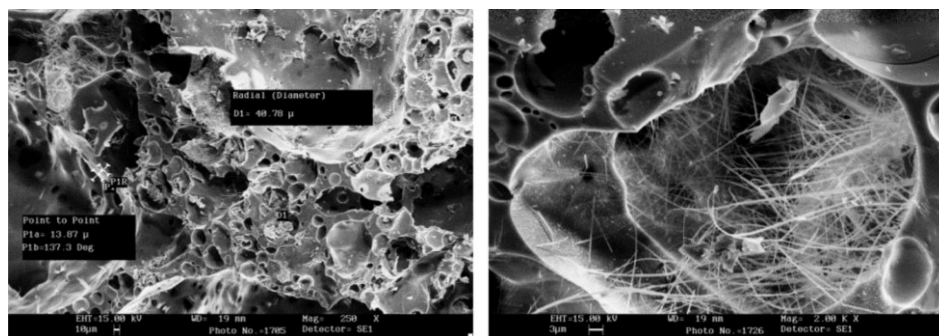


Рис. 2. Микроструктура пеносиликата с добавкой доломита

Весьма перспективной добавкой оказалась смесь мела и гипса при соотношении компонентов 3:1. Свойства синтезированных блочных пеносиликатов: плотность 0,49–0,52 г/см³, теплопроводность 0,059–0,062 Вт/м·К. Прочность образцов возрастает в 1,8–2 раза (2,7–3,10 МПа) по сравнению с образцами без добавок, а показатель водопоглощения существенно снижается до 11 %. Образцы обладают закрыто-ячеистой пористостью (рис. 3), что объясняет уменьшение значения водопоглощения.

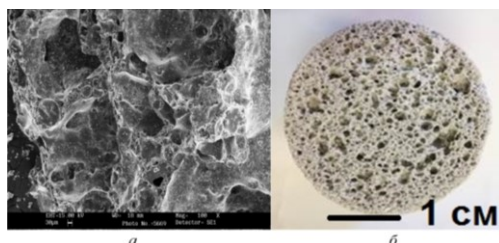


Рис. 3. Микро- (а) и макроструктура (б) пеносиликата с добавкой смеси мела и гипса

Наилучшие показатели прочности получены для составов на основе микрокремнезема из апатитонепелиновых руд с графитовыми отходами КАЗ и кремнефтористым натрием Na₂SiF₆ в качестве модифицирующих добавок, способствующих более равномерному распределению пор в объеме материала. Максимальное значение прочности при сжатии пеносиликатов, полученных при температуре вспенивания 725 °С, — 5,83 МПа (рис. 4). Этот факт существенно расширяет сферу их использования, в первую очередь, в качестве конструкционно-теплоизоляционных материалов.

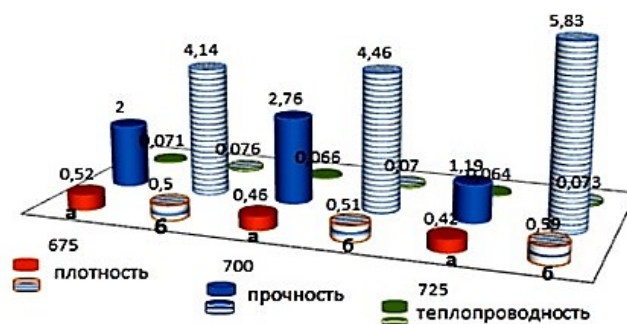


Рис. 4. Зависимость свойств пеносиликатов с добавкой графита КАЗ (а) и Na₂SiF₆ (б) от температуры вспенивания

Использование золошлаковой смеси АТЭЦ, диопсида, строительного гипса и мела в качестве модифицирующих добавок позволило получить качественные пеноматериалы с удовлетворительными характеристиками. Отличительной особенностью пеноматериала является наименьшее водопоглощение (7,3 об. %) у образцов, модификаторами в которых выступает диопсид в комбинации с мело-гипсовой смесью в соотношении 4:2:1. Использование данного модификатора уменьшает водопоглощение изделий в 1,2–2 раза за счет упорядочивания поровой структуры (рис. 5).

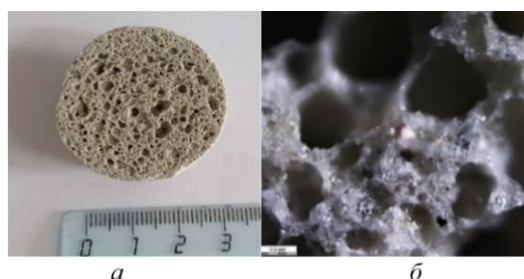


Рис. 5. Макро- (а) и микроструктура (б) пеносиликатов с добавкой смеси диопсида, мела и гипса

Выводы

Полученные результаты показывают перспективность использования техногенного сырья в производстве негорючих теплоизоляционных пеноматериалов. Установлена целесообразность введения модифицирующих добавок в шихту для синтеза вспененных блочных материалов. Рассмотрены различные виды добавок при получении качественных изделий. Определены составы и способы подготовки шихты, установлены оптимальные температурно-временные режимы получения эффективных пеноматериалов. Изучено влияние добавок на структуру и физико-технические свойства образцов. Показано, что упорядочивание структуры материала обладает преимуществом в улучшении свойств пеносиликатов. Синтезированные неорганические вспененные материалы с успехом можно применять для теплоизоляции при строительстве и реконструкции зданий и сооружений различного назначения.

Список источников

1. Петров И. В., Меркулина И. А., Харитонов Т. В., Колесник Г. В. Методологические подходы к организации и оценке системы обращения с отходами угледобывающего производства // Уголь. 2020. № 9. С. 59–64. doi:10.18796/0041-5790-2020-9-59-64.
2. Шубин И. Л., Умнякова Н. П., Бессонов И. В., Спиридонова А. В. Перспективы применения материалов и изделий из пеностекла в системах тепловой изоляции // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 6. С. 12–14.
3. Бессонов И. В., Бруяко М. Г., Горбунова Э. А., Говряков И. С. Исследование модифицирующих добавок вспененного жидкого стекла // Строительные материалы. 2023. № 6. С. 16–20. doi: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-16-20>.
4. Жуков А. Д. Технология теплоизоляционных материалов. Ч. 1. Теплоизоляционные материалы. Производство теплоизоляционных материалов: Учебное пособие. М.: Издательство МГСУ, 2011. 430 с.
5. Синицин Д. А., Шаяхметов У. Ш., Рахимова О. Н., Халиков Р. М., Недосеко И. В. Наноструктурированная пенокерамика строительного назначения: технология производства и применения // Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т. 13, № 4. С. 213–221. doi: 10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221.
6. Cengizler H., Koç M., San O. Production of ceramic glass foam of low thermal conductivity by a simple method entirely from fly ash // Ceram. Int. 2021. V. 47. P. 28460–28470. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.265>.
7. Гольцман Б. М., Яценко Е. А., Пантелеева А. Е., Бостанов Ю. А., Смолий В. А. Сравнительный анализ воздействия натрийсодержащих плавней на спекание и плавление алюмосиликатных промышленных отходов // Техника и технология силикатов. 2024. Т. 1, № 1. С. 68–76.

References

1. Petrov I. V., Merkulina I. A., Haritonova T. V., Kolesnik G. V. Metodologicheskiye podkhody k organizatsii i otsenke sistemy obrashcheniya s otkhodami ugledobyvayushchego proizvodstva [Methodological approaches to the organization and assessment of the waste management system of coal mining production]. *Ugol'* [Coal], 2020, No 9, pp. 59–64. doi: 10.18796/0041-5790-2020-9-59-64. (In Russ.).
2. Shubin I. L., Umnyakova N. P., Bessonov I. V., Spiridonova A. V. Perspektivy primeneniya materialov i izdelij iz penostekla v sistemah teplovoj izolyacii [Prospects for the use of foam glass materials and products in thermal insulation systems]. *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki* [BST: Bulletin of Construction Machinery], 2017. No 6, pp. 12–14. (In Russ.).
3. Bessonov I. V., Bruyako M. G., Gorbunova E. A., Govryakov I. S. Issledovanie modificiruyushchih dobavok vspennogo zhidkogo stekla [Investigation of modifying additives of foamed liquid glass]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 2023, No 6, pp. 16–20. doi: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-16-20>. (In Russ.).
4. Zhukov A. D. Tekhnologiya teploizolyacionnyh materialov. Ch. 1. Teploizolyacionnye materialy. Proizvodstvo teploizolyacionnyh materialov [Technology of thermal insulation materials. Part 1. Thermal insulation materials. Production of thermal insulation materials]. Moscow, Izdatel'stvo MGSU [MGSU Publishing House], 2011, 430 p. (In Russ.).
5. Sinicin D. A., Shayahmetov U. Sh., Rahimova O. N., Halikov R. M., Nedoseko I. V. Nanostrukturirovannaya penokeramika stroitel'nogo naznacheniya: tekhnologiya proizvodstva i primeneniya [Nanostructured foam ceramics for construction purposes: production technology and applications]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve* [Nanotechnology in construction], 2021, vol. 13, No 4, pp. 213–221. doi: 10.15828/2075-8545-2021-13-4-213-221. (In Russ.).

6. Cengizler H., Koç M., San O. Production of ceramic glass foam of low thermal conductivity by a simple method entirely from fly ash. *Ceram. Int.*, 2021, V. 47, pp. 28460–28470. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.265>.
7. Gol'man B. M., Yacenko E. A., Panteleeva A. E., Bostanov Yu. A., Smolij V. A. Sravnitel'nyj analiz vozdejstviya natrijsoderzhashchih plavnej na spekanie i plavlenie alyumosilikatnyh promyshlennyh othodov [Comparative analysis of the effects of sodium-containing smelters on sintering and melting of aluminosilicate industrial waste]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov* [Silicate engineering and technology], 2024, vol. 1, No 1, pp. 68–76. (In Russ.).

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

N. K. Manakova — PhD (Engineering), Senior Researcher;

O. V. Suvorova — PhD (Engineering), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 30.05.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025; принята к публикации 07.07.2025.
The article was submitted 30.05.2025; approved after reviewing 20.06.2025; accepted for publication 07.07.2025.