

Фторидно-боратные смеси как интенсификатор вспенивания шлаковых отходов тепловых электростанций

Борис Михайлович Гольцман, Елена Альфредовна Яценко,
Анна Александровна Тимофеева, Полина Александровна Скубовская,
Виктория Александровна Смолий

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследована возможность интенсификации процесса вспенивания шлаковых отходов тепловых электростанций (ТЭС) путем введения смеси плавней (флюсов), состоящей из тетрабората натрия ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) и фторида натрия (NaF). Актуальность исследования обусловлена необходимостью эффективной утилизации промышленных отходов и получения на их основе строительных материалов с улучшенными характеристиками. Научная новизна работы заключается в изучении совместного влияния данных плавней на процессы вспенивания и формирование пористой структуры материала. Цель исследования — оптимизация состава флюсующей смеси для снижения температуры плавления и повышения качества пористых силикатных материалов.

Материалы и методы. Использованы методы рентгенофазового анализа, инфракрасной спектроскопии, микроскопического анализа и экспериментального определения плотности образцов.

Результаты. Проведено изучение изменений температурных режимов спекания и вспенивания при совместном введении смесей $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и NaF, а также их влияния на структурные и фазовые характеристики материалов. Показано, что тетраборат натрия способствует равномерному распределению пор и формированию аморфной стеклофазы. Фторид вызывает интенсивное оплавление структуры при повышенных температурах, а также рекристаллизацию расплава с формированием кристаллов альбита. Выявлено оптимальное соотношение плавней, обеспечивающее минимальную плотность, стабильную пористую структуру и формирование стеклокристаллического каркаса, способствующего повышению прочности.

Выводы. Полученные результаты демонстрируют перспективность метода утилизации шлаковых отходов ТЭС для получения пористых строительных материалов по технологии «самовспенивания». Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию флюсующих смесей и изучение способов активации золошлаковых отходов для улучшения технологических характеристик получаемых изделий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пористый утеплитель, шлак ТЭС, самовспенивание, плавень, бура, фторид натрия, рециклинг отходов

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, соглашение № 23-79-01004. Также авторы благодарят анонимных рецензентов за объективную оценку работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гольцман Б.М., Яценко Е.А., Тимофеева А.А., Скубовская П.А., Смолий В.А. Фторидно-боратные смеси как интенсификатор вспенивания шлаковых отходов тепловых электростанций // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1199–1210. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1199-1210

Автор, ответственный за переписку: Борис Михайлович Гольцман, b.goltsman@npi-tu.ru.

Fluoride-borate mixtures as a foaming intensifier for TPP slag wastes

Boris M. Goltsman, Elena A. Yatsenko, Anna A. Timofeeva, Polina A. Skubovskaya,
Victoria A. Smoliy

*M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI);
Rostov region, Novocherkassk, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The possibility of intensifying the foaming process of thermal power plant (TPP) slag waste by introducing a mixture of fluxes consisting of sodium tetraborate ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) and sodium fluoride (NaF) was studied. The relevance of the study is due to the need for efficient recycling of industrial waste and the production of building materials with improved characteristics based on them. The scientific novelty of the work lies in the study of the combined effect of these fluxes on the foaming processes and the formation of the porous structure of the material. The purpose of the study is to optimize the composition of the fluxing mixture to reduce the melting point and improve the quality of porous silicate materials.

Materials and methods. The methods of X-ray phase analysis (XRD), infrared spectroscopy (FTIR), microscopic analysis and experimental determination of the density of specimens were used.

Results. A study of changes in the temperature modes of sintering and foaming with the combined introduction of $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ and NaF mixtures was performed, as well as their effect on the structural and phase characteristics of the materials. It was shown that sodium tetraborate promotes uniform distribution of pores and formation of amorphous glass phase. Fluoride causes intensive melting of the structure at elevated temperatures, as well as recrystallization of the melt with formation of albite crystals. The optimal ratio of fluxes was revealed, providing minimum density, stable porous structure and formation of glass-crystalline framework, which contributes to increased strength.

Conclusions. The obtained results demonstrate the prospects of the method of recycling slag waste of thermal power plants for obtaining porous building materials using the "self-foaming" technology. Further research can be aimed at optimizing fluxing mixtures and studying the methods of activating ash and slag waste to improve the technological characteristics of the resulting products.

KEYWORDS: porous thermal insulator, TPP slag, self-foaming, flux, borax, sodium fluoride, waste recycling

Acknowledgements. The work was performed with the financial support of the Russian Science Foundation, Agreement No. 23-79-01004. The authors also thank the anonymous reviewers for an objective assessment of the work.

FOR CITATION: Goltsman B.M., Yatsenko E.A., Timofeeva A.A., Skubovskaya P.A., Smolii V.A. Fluoride-borate mixtures as a foaming intensifier for TPP slag wastes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(8):1199-1210. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1199-1210 (rus.).

Corresponding author: Boris M. Goltsman, b.goltsman@npi-tu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и исследование новых источников сырья для производства строительных материалов являются одной из важнейших задач строительного материаловедения. Наиболее перспективная область для решения этой задачи — техногенные отходы различных производств. Их применение позволяет одновременно решить комплекс проблем: 1) получение полезной продукции без затрат невозполняемых природных ресурсов; 2) снижение экологической нагрузки на окружающую среду за счет уменьшения объема отходов производства; 3) вовлечение в производственный цикл и переработка крупнотоннажных промышленных отходов.

Поскольку различные строительные материалы предъявляют различные требования к составу и свойствам сырья, то в качестве него могут использоваться разные виды отходов. Часто в таком качестве выступают отходы стройиндустрии: бой кирпича, стеклоотходы, отходы цемента и т.д. [1–6]. Помимо этого, как сырье применяется широчайший ряд техногенных отходов: металлургические шлаки, отходы добычи и обогащения руд и горных пород, отходы энергетики, химической промышленности и др. [7–11].

Из всего спектра строительных материалов особо выделяется класс пористых (вспененных) силикатных материалов (наиболее известным из которых служит пеностекло), получаемый за счет термической поризации вязкого силикатного или алюмосиликатного расплава. Эти материалы обладают отличными теплоизоляционными свойствами, а также уникальным комплексом характеристик: полная негорючесть, химическая и биологическая стойкость, долговечность и др. При этом их получение возможно на основе широкого спектра сырья. Чаще всего для получения пористых силикатов используют отходы стекла, в том числе листового, тарного, ЭЛТ и др. [12, 13]. Кроме этого, в качестве основного сырья

применяют различные виды промышленных алюмосиликатных отходов [14–16].

Из всех применяемых в качестве сырья вторичных техногенных материалов особо выделяются отходы от сжигания угля на тепловых электростанциях (ТЭС) [17]. Они образуются при плавлении негорючей минеральной части углей и преимущественно состоят из оксидов кремния, алюминия и железа. Можно выделить два вида отходов: зола-уноса (летучая зола) и котельный шлак. Зола активно используется как добавка в различные виды цемента, однако шлак не нашел сравнимого применения. Его используют лишь в небольших объемах в качестве заполнителя в дорожном строительстве или получении тяжелых бетонов. В то же время шлаки представляют собой стекловидный материал, прошедший термическую обработку, что делает его перспективным сырьем для синтеза обжиговых строительных материалов.

Еще одна важная особенность шлака — наличие в нем так называемого «недожога», т.е. остаточного углерода. Этот углерод может выступать в виде выгорающего компонента при производстве поризованных изделий. Такой метод позволяет получать вспененные силикатные материалы по технологии «самовспенивания», т.е. не за счет введения дополнительных, часто достаточно дорогих порообразующих добавок, а за счет газообразующих примесей в самом сырье. Для этой цели подходят материалы, содержащие соединения, которые сгорают или разлагаются с выделением газообразных продуктов. В основном это карбонаты и углеродсодержащие вещества [16, 18–20].

Отходы сжигания угля содержат от 3 до 10 мас. % углеродного «недожога», что делает их отличным сырьем для получения пористых материалов по технологии «самовспенивания». Ключевой проблемой в данном процессе является высокая температура плавления шлака, превышающая 1400 °С, что связано с высоким содержанием тугоплавкого оксида алюминия. Эту проблему можно решить

путем добавления к шлаку флюсующих добавок или плавней, т.е. веществ, снижающих температуру плавления основного сырья и интенсифицирующих спекание и вспенивание образцов. Ранее [21] было показано, что введение 4–5 мас. % тетрабората натрия (буры) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ обеспечивает вспенивание шлакового отхода с получением пористых материалов с плотностью ниже 450 кг/м^3 . Однако известно также, что перспективным плавнем выступает фторид натрия NaF , обеспечивающий интенсивное плавление алюмосиликатного сырья [22–25].

Цель настоящего исследования — возможно-сти интенсификации вспенивания шлаковых отходов ТЭС путем совместного введения добавок буры и фторида натрия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основным сырьевым материалом был шлаковый отход Новочеркасской ГРЭС, химический состав которого представлен в табл. 1 (приведены компоненты, содержание которых больше 0,2 мас. %). В качестве добавок плавней использовались тетраборат натрия безводный (бура) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и фторид натрия NaF , составы которых также приведены в табл. 1.

Синтез образцов включал следующие этапы: подготовка сырья, получение сырьевой смеси и формование образцов, термическая обработка, механическая обработка. Перед формованием все сырьевые материалы подвергали помолу до размера частиц менее 125 мкм. Затем производили смешивание компонентов смеси, согласно табл. 2, добавляли 5 мас. %

воды (сверх 100) для обеспечения формовочных свойств и перемешивали в течение 30 мин. Название состава указывает на содержание буры, т.е., например, состав В2 содержит 2 мас. % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

Полученную смесь равномерно загружали в кубическую форму с длиной грани 20 мм и производили уплотнение смеси пуансоном, используя постоянное давление 3 МПа. Отформованные образцы перемещали на огнеупорную подставку, которую помещали в муфельную печь для обжига. Процесс обжига проводили согласно следующему температурно-временному режиму. Образцы загружали в холодную печь и нагревали со скоростью $15 \text{ }^\circ\text{C/мин}$ до заданной температуры обжига ($1000\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$) с выдержкой при данной температуре 40 мин. Далее следовало самопроизвольное охлаждение вместе с печью в течение 5–7 ч.

Плотность образцов d , кг/м^3 , определяли по формуле:

$$d = m/(abc), \tag{1}$$

где m — масса образца, кг; a — длина образца, м; b — ширина образца, м; c — высота образца, м.

Микроструктуру образцов изучали с помощью оптического стереомикроскопа SZM-110 (КС-Нано, РФ). Инфракрасную спектроскопию образцов осуществляли с использованием ИК-Фурье спектрометра WQF-530 (Rayleigh, КНР). Качественный рентгенофазовый анализ синтезированных образцов исследовали на дифрактометре ARLX'TRA (Thermo Fisher Scientific, США), являющемся частью ЦКП «Нанотехнологии» Южно-Российского государ-

Табл. 1. Химический состав сырьевых материалов

Table 1. Chemical composition of raw materials

Материал / Material	Содержание компонентов, мас. % Content of components, wt. %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	B ₂ O ₃	NaF	ППП LOI
Шлаковый отход Slag waste	56,1	22,0	10,6	2,1	3,0	1,1	3,6	0,9	–	–	0,4
Тетраборат натрия Sodium tetraborate	–	–	–	–	–	30,8	–	–	69,2	–	–
Фторид натрия Sodium fluoride	–	–	–	–	–	–	–	–	–	100	–

Табл. 2. Разработанные смеси

Table 2. Developed mixtures

Материал / Material	Содержание компонента, мас. %, в составе, номер Content of the component, wt. %, in the composition, number					
	B0	B1	B2	B3	B4	B5
Шлаковый отход Slag waste	100					
Тетраборат натрия (сверх 100) Sodium tetraborate (over 100)	0	1	2	3	4	5
Фторид натрия (сверх 100) Sodium fluoride (over 100)	5	4	3	2	1	0

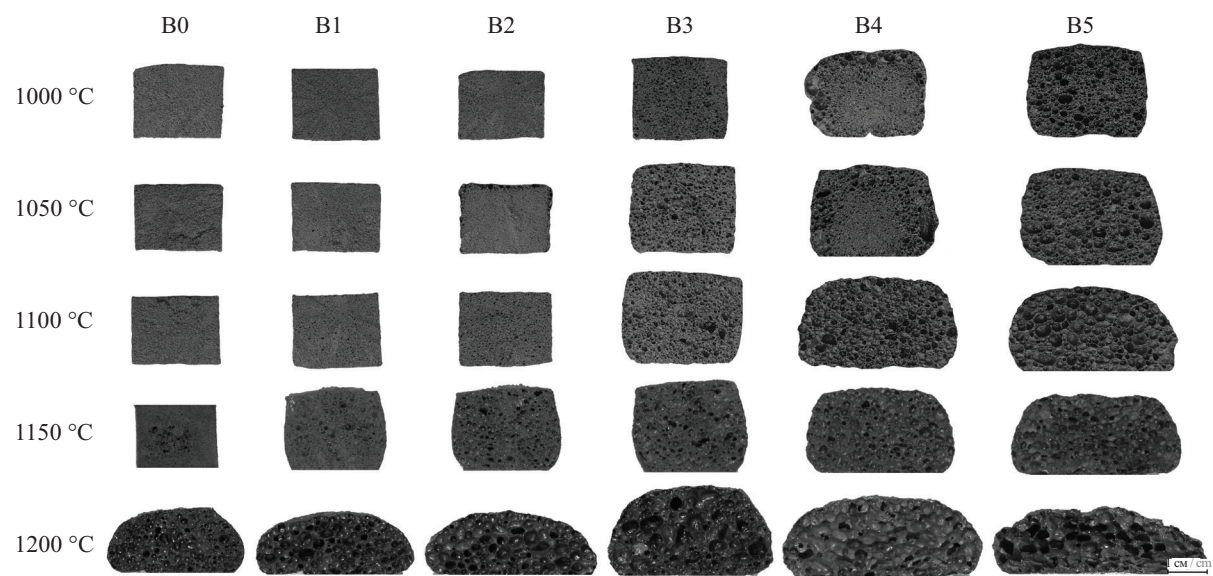


Рис. 1. Внутренняя структура образцов
Fig. 1. Internal structure of specimens

ственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. Интерпретацию полученных результатов выполнили с помощью программного обеспечения базы данных ICDD PDF 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен обжиг разработанных составов в диапазоне температур 1000–1200 °C с шагом 50 °C. Результаты исследования внутренней структуры представлены на рис. 1, изменение плотности образцов — на рис. 2.

Из рис. 1, 2 видны следующие закономерности изменения интенсивности спекания, плавления и вспенивания составов. Повышение температуры обжига ведет к двум последовательным изменениям. Сначала происходит стягивание частиц образца, обусловленное его спеканием, и соответствующее повышение плотности. Дальнейший нагрев ведет к снижению вязкости материала до вязкопластичного состояния, обеспечивающего начало вспенивания за счет давления газов от разложения углеродного компонента.

Такая общая закономерность особенно ярко выражена для смесей плавней с преобладанием фторида. К примеру, для состава B0 (5 мас. % NaF, 0 мас. % Na₂B₄O₇) нагрев вызывает следующие изменения. Повышение температуры обжига ведет к постепенному повышению плотности до 1373 кг/м³ при 1150 °C, что указывает на максимальную степень спекания. Обжиг при 1200 °C приводит к резкому снижению плотности за счет понижения вязкости материала и его вспенивания. Данная тенденция на повышение плотности значительно слабее выражена у составов с преобладанием Na₂B₄O₇. Буря показывает себя как стабильный эффективный плавень, который приводит к вспениванию уже при 1000 °C, а с повышении

ем температуры обеспечивает постепенное снижение вязкости и повышение интенсивности вспенивания.

Интересно, что флюсующий эффект фторида резко проявляется при 1150 °C и при нагревании до 1200 °C образец полностью теряет форму и расплавляется, оседая под собственным весом. Исходя из этого, можно предположить, что наиболее эффективным будет использование смесей с преобладанием Na₂B₄O₇, но содержащих небольшие количества NaF. Это обеспечит формирование равномерной пористой структуры образцов, причем воздействие буры на последних этапах вспенивания будет интенсифицировано высокоактивным фторидом натрия. Такое предположение подтверждается полученными результатами, где наименьшей плотностью 378 кг/м³ обладал обра-

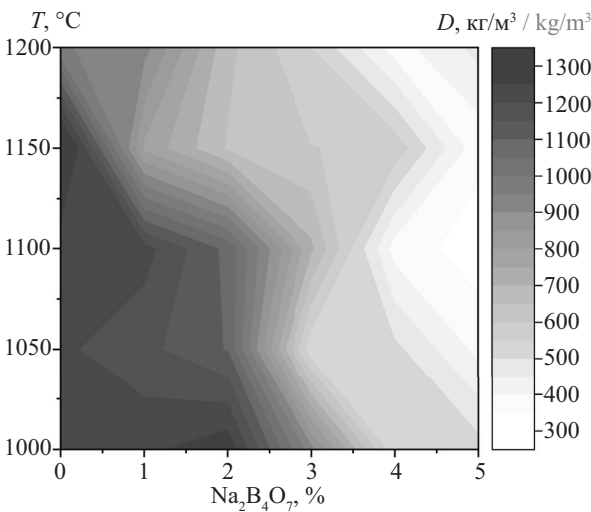


Рис. 2. Изменение плотности образцов
Fig. 2. Changes of the specimens' density

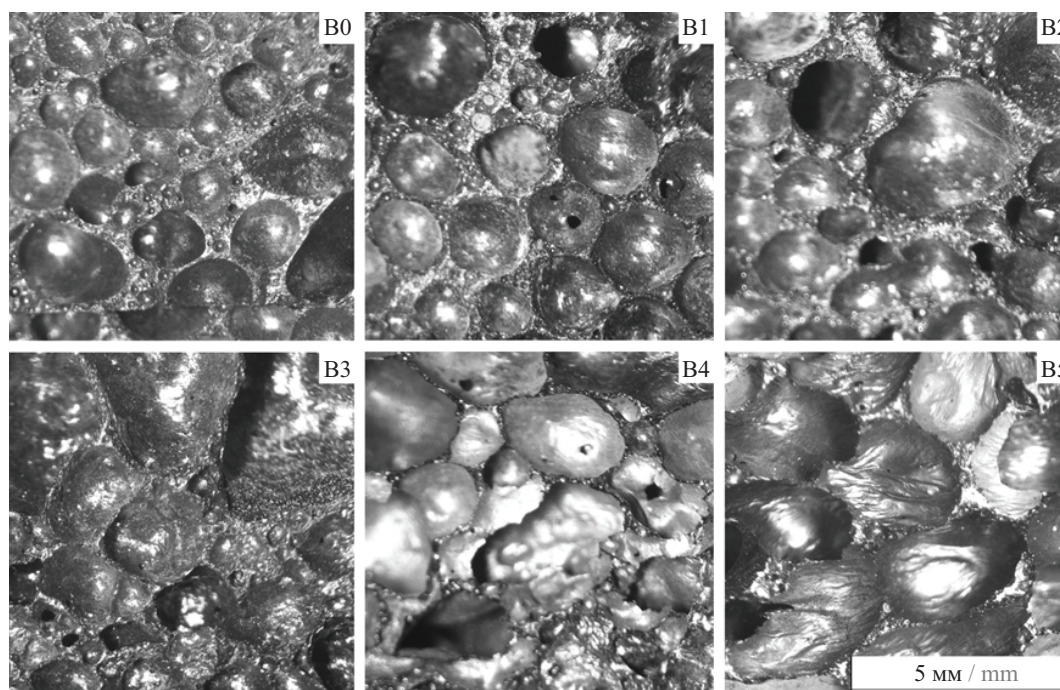


Рис. 3. Результаты микроскопического анализа образцов

Fig. 3. Results of microscopic analysis of the specimens

зец состава В4 (4 мас. % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 1 мас. % NaF), обожженный при 1200 °С.

Для исследования микроструктуры образцов выполнен микроскопический анализ, результаты которого представлены на рис. 3.

Микроскопический анализ образцов, обожженных при 1200 °С, позволяет уточнить ряд особенностей изменения пористой структуры. Образец с добавкой в качестве плавня 5 мас. % NaF (состав В0) обладает мелкопористой структурой с преобладанием пор размерами 0,15–0,4 и 1,1–2,1 мм. Повышение содержания буры ведет к увеличению размера пор и снижению их равномерности. Так, средний размер пор в ряду В1–В2–В3 увеличивается до 1,6, 1,8 и 2,3 мм соответственно. Поверхность образцов при этом остается гладкой, что указывает на ее сильное оплавление и остекловывание.

В составе В4, содержащем 1 мас. % NaF и 4 мас. % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, структура поверхности существенно меняется. На поверхности межпоровых стенок появляется тонкая коричневая пленка, представленная, вероятно, железистой фазой. Ее формирование обусловлено пониженной вязкостью материала, обеспечивающей миграцию ионов железа к поверхности образца. При этом внутренняя часть межпоровых стенок все так же остается темно-серой. В составе В5 (5 мас. % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) тенденция к расслоению поверхности сохраняется, и к ней добавляется «смятие» поверхности пор. Это указывает на значительное снижение вязкости, вследствие чего под давлением газов в образце происходит деформация пор и начинается оседание пены под собственным весом.

Для исследования изменений фазового состава проведен рентгенофазовый анализ составов, содержащих NaF , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и их смесь (составы В0, В3, В5), его результаты показаны на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что NaF и $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ оказывают принципиально разное воздействие на фазовый состав материалов. Известно, что исследуемый шлак преимущественно представлен рентгеноаморфной стеклофазой, а основной кристаллической фазой является магнетит Fe_3O_4 [21]. Введение в качестве плавня 5 мас. % NaF (состав В0) способствует частичной кристаллизации материала с формированием кристаллов альбита $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$. Это согласуется с известными данными о повышении закристаллизованности стекла при введении фторидов [26–28]. Также формируется небольшое количество кристаллов муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Повышение содержания буры в смеси плавней до 3 мас. % (состав В3) ведет к значительному снижению интенсивности кристаллических пиков. Фаза альбита полностью исчезает, что объясняется ее плавлением и переходом в стеклофазу. Основными фазами в данном составе являются Fe_3O_4 и $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, интенсивность которого возрастает. Также наблюдается небольшое количество кристаллов SiO_2 . В составе, содержащем только 5 мас. % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (состав В5), наличие кристаллов продолжает снижаться, качественный состав фаз при этом остается тем же. Присутствие в качестве основной фазы оксида железа подтверждает предположение о формировании на поверхности пор железосодержащего слоя, ведущего к изменению его цвета при пониженной вязкости.

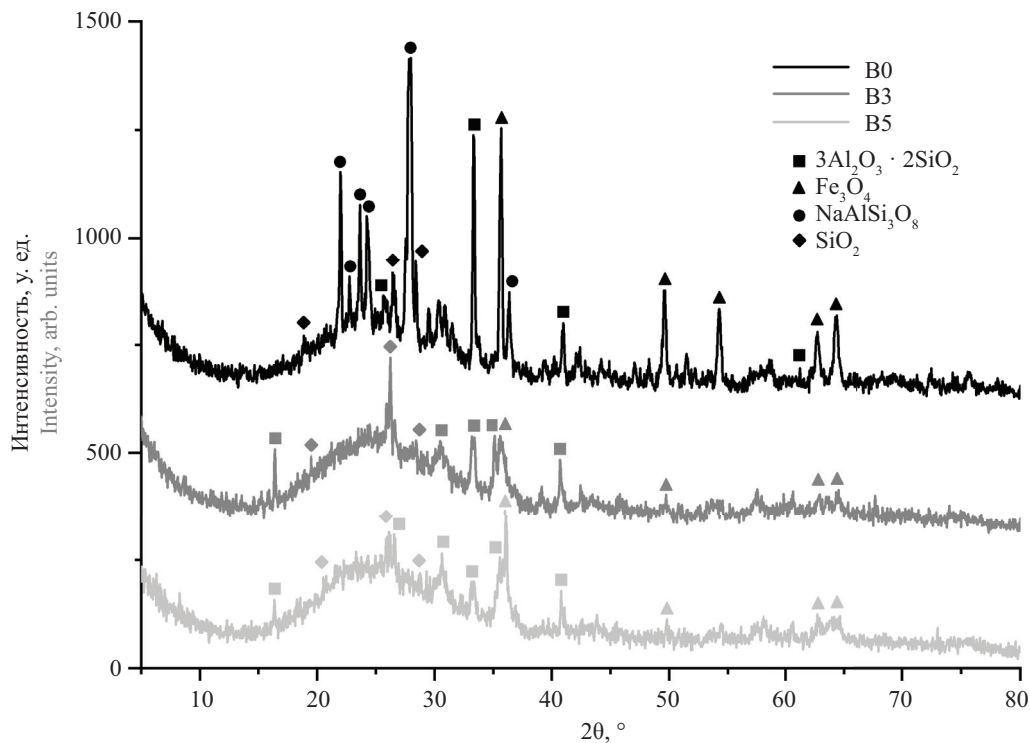


Рис. 4. Результаты рентгенофазового анализа образцов
Fig. 4. Results of XRD analysis of the specimens

Кроме того, структура, представленная стеклофазой с распределенными в ней микрокристаллами (особенно муллита и SiO_2), существенно повышает прочность материала, что является несомненным преимуществом. Это предположение полностью соответствует известным научным и производственным сведениям. К примеру, для повышения прочности керамзита применяется как изотермическая выдержка в период кристаллизации расплава, так и введение катализаторов кристаллизации (FeS_2 , TiO_2 и др.). При лабораторном синтезе стеклокристаллических пен на основе различных отходов промышленности также наблюдается увеличение прочности при повышении содержания кристаллической фазы [29, 30].

Для исследования структурных превращений в процессе обжига была проведена инфракрасная спектроскопия (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что все исследованные образцы имеют основной широкий профиль в области $850\text{--}1300\text{ см}^{-1}$ с пиком 990 см^{-1} , что соответствует внутренним колебаниям кремний-кислородного каркаса. У всех образцов наблюдаются пики $710, 720, 845\text{ см}^{-1}$ и дублет при $780\text{--}800\text{ см}^{-1}$, соответствующие симметричным деформационным колебаниям Si-O-Si, а также 983 см^{-1} , соответствующие асимметричным деформационным колебаниям Si-O-Si. Профиль состава B0 содержит более выраженные пики при 845 см^{-1} и дублет $780\text{--}800\text{ см}^{-1}$, а также дополнительно имеет пики при $1028, 1043\text{ и }1084\text{ см}^{-1}$, характерные

для асимметричного деформационного колебания Si-O-Si [31].

Сглаживание основного профиля при увеличении содержания буры указывает на формирование аморфной стеклофазы. Известно, что добавление оксида-модификатора сетки смещает пик в сторону меньших волновых чисел и уширяет его, что объясняется образованием тетраэдров $[\text{SiO}_4]$ с большим количеством нестиковых атомов кислорода [32]. Это вызывает образование широкого пика при $950\text{--}986\text{ см}^{-1}$, соответствующего асимметричному растяжению Si-O-M. Данные результаты полностью согласуются

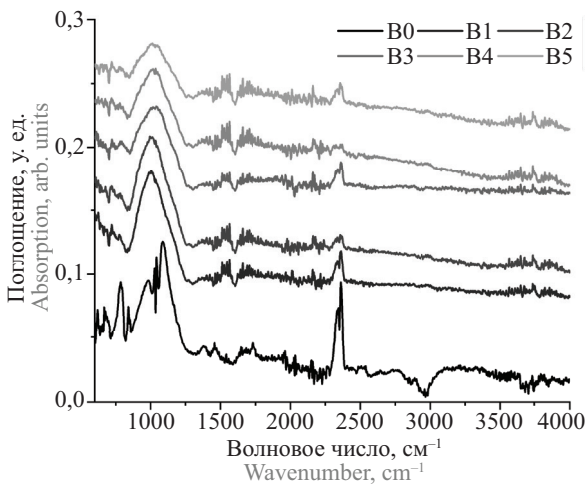


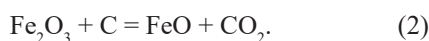
Рис. 5. Результаты инфракрасной спектроскопии образцов
Fig. 5. Results of FTIR analysis of the specimens

ся с результатами РФА, где со смещением соотношения плавней в сторону буры снижается интенсивность кристаллических пиков, т.е. происходит их переход в стеклообразное состояние.

Также все образцы имеют две «шумные» зоны в диапазоне $1400\text{--}2300\text{ см}^{-1}$ и $3600\text{--}4000\text{ см}^{-1}$, соответствующие валентным ($-\text{OH}$) и деформационным ($\text{H}-\text{O}-\text{H}$) колебаниям связанных молекул воды [32]. Дублетный пик при $2343\text{--}2360\text{ см}^{-1}$ соответствует колебаниям CO_2 . Наибольший размер этого пика для состава В0 можно объяснить тем, что во время спекания и частичного плавления частиц образующиеся вспенивающие газы капсулируются в микропорах образца. Увеличение содержания буры повышает степень плавления материала, облегчая улетучивание CO_2 и снижая интенсивность соответствующего пика.

Полученные результаты дают возможность провести следующую параллель. Предлагаемая методика синтеза пористых материалов на основе золошлаковых отходов (ЗШО) по технологии «самовспенивания» близка к технологии производства керамзита. Для его производства используют легкоплавкие глинистые породы, обладающие склонностью к вспучиванию при быстром обжиге. Требования к химическому составу таких глин обычно следующие, %: SiO_2 — 50–65, Al_2O_3 — 10–25, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ — 3,5–10, $\text{CaO} + \text{MgO}$ — до 7, R_2O — 3,5–5. Также нормируется содержание тонкодисперсных органических примесей и свободного кремнезема. Из полученных авторами ранее результатов [21] видно, что склонность различных видов золошлаков к вспениванию зависит от фазового состава (содержания аморфной фазы). Однако, сопоставляя требования для вспенивания ЗШО, видно, что актуальны и ограничения по химическому составу сырья, поскольку наихудшее вспенивание демонстрировали составы на основе золы-уноса, а наилучшие — шлака, вследствие чего он и был выбран оптимальным сырьем.

Механизм газовой выделения так же, как и для керамзита, основан на взаимодействии Fe_2O_3 с углеродом и продуктами неполного сгорания с образованием газообразной фазы и FeO . Визуальным свидетельством этому служит изменение цвета образцов при вспенивании. Невспененные образцы обладают кирпично-коричневым цветом, что характеризует наличие железа в виде Fe_2O_3 . Формирование пор сопровождается изменением цвета на темно-серый, что характеризует железо в форме FeO . Следовательно, газовой выделения можно схематично описать уравнением:



Это также объясняет появление коричневых пленок в образцах с преобладанием буры при высоких температурах. Пониженная вязкость расплава обеспечивает миграцию газов — продукты окисления углерода покидают образец, что ведет к оседанию пены, а окружающий воздух проникает в поровое простран-

ство, что вызывает повторное окисление железа на поверхности и изменение ее цвета. Этим также объясняется и наличие железа в виде фазы Fe_3O_4 , а не Fe_2O_3 , поскольку часть железа выступила в качестве восстановителя в реакции газообразования.

Процесс вспенивания протекает за счет совмещения процесса размягчения силикатной массы с процессами газовой выделения внутри материала. При этом происходит образование закрытых пор за счет формирования газообразных продуктов взаимодействия углерода и оксида железа, а также их роста из-за повышения давления газов. Единственным существенным различием является фазовый состав исходного сырья и синтезируемого материала. Для керамзита — это поликристаллическая структура, для шлака — рентгеноаморфная стеклообразная структура. Такое различие обеспечивает более легкое размягчение шлака и повышенную интенсивность взаимодействия его с углеродным компонентом.

Синтезированные материалы, по мнению авторов, служат перспективным аналогом керамзита и керамзитоподобных изделий. Процессы и температурный режим вспенивания, а также свойства образцов не уступают керамзитовым материалам. В то же время основное сырье для их производства (более 95 мас. %) — крупнотоннажные промышленные отходы. Их использование одновременно позволит снизить экологическую нагрузку за счет их рециклинга и сохранить природные глинистые ресурсы. Перспективным развитием данной темы может быть поиск способов интенсификации вспенивания других видов золошлаковых материалов, особенно золошлаковой смеси, поскольку повышенное содержание кристаллической золы существенно ухудшает вспенивающую активность. Возможно предположить, что это может быть достигнуто механохимической активацией или модернизацией состава флюсующей смеси, что требует тщательного изучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования изучена возможность интенсификации вспенивания шлаковых отходов ТЭС путем введения смеси плавней, состоящей из тетрабората натрия ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) и фторида натрия (NaF). Установлено, что их совместное применение позволяет регулировать температурный режим спекания и вспенивания, обеспечивая формирование пористой структуры материала. Результаты экспериментов показали, что повышение температуры обжига приводит к последовательным стадиям спекания, размягчения и вспенивания материала. При этом введение буры $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ способствует плавному снижению вязкости и равномерному вспениванию, тогда как NaF демонстрирует резкий флюсующий эффект на поздних стадиях термообработки. Оптимальным составом оказался вариант с преобладанием буры (4 мас. % $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 1 мас. %

NaF), обеспечивающий наименьшую плотность материала (378 кг/м^3) при обжиге при 1200°C . Микроструктурный анализ подтвердил, что увеличение доли $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ способствует формированию более равномерной пористой структуры с гладкими межпоровыми стенками, тогда как избыток NaF приводит к излишнему снижению вязкости и разрушению структуры. Рентгенофазовый анализ показал, что введение фторида натрия содействует кристаллизации альбита, тогда как тетраборат натрия увеличивает долю стеклофазы. Инфракрасная спектроскопия выявила соответствующие изменения в структуре алюмосиликатного каркаса.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой перспективности предлагаемого метода утилизации золошлаковых отходов ТЭС для получения пористых строительных материалов по технологии «самовспенивания». Это не только позволяет снизить экологическую нагрузку, но и открывает новые возможности для производства теплоизоляционных и легких конструкционных материалов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию состава флюсующей смеси и изучение способов дополнительной активации других видов золошлаковых материалов для улучшения технологических характеристик синтезируемых материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nicolás M.F., Chávez M.M., Vlasova M., Pi Puig T. Low-temperature sintering of ceramic bricks from clay, waste glass and sand // *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 2024. Vol. 63. Issue 5. Pp. 377–388. DOI: 10.1016/j.bsecv.2024.06.003
2. Chen G., Gao J., Liu C., Li S., Zhao Y., Wu H. et al. Effect of waste clay brick powder and slag on mechanical properties and durability of concrete // *Powder Technology*. 2025. Vol. 453. P. 120623. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.120623
3. Dadouch M., Belal T., Ghembaza M.S. Valorization of glass waste as partial substitution of sand in concrete — Investigation of the physical and mechanical properties for a sustainable construction // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 411. P. 134436. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134436
4. Ma Z., Zhang Z., Liu X., Zhang Y., Wang C. Re-using waste glass fines to substitute cement and sand for recycled ultra-high performance strain-hardening cementitious composites (UHP-SHCC) // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 455. P. 139186. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139186
5. Рыщенко М.И., Федоренко Е.Ю., Лисачук Г.В., Шабанова Г.Н. Техногенные материалы и промышленные отходы как источник сырья для производства строительных материалов // *Экология и промышленность*. 2013. № 4 (37). С. 10–16. EDN IEUQQH.
6. Жуков Д.Ю., Аверина Ю.М., Ветрова М.А. Технологический рециклинг отходов переработки обедненных марганцевых руд // *Успехи в химии и химической технологии*. 2018. Т. 32. № 1 (197). С. 64–67. EDN YVRACV.
7. Корнеева Е.В. Техногенные шламовые отходы промышленности в производстве строительных материалов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024. № 10 (790). С. 99–111. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-790-10-99-111. EDN RBKRWN.
8. Ashimova A.A., Bek A.A., Nurlybaev R.Ye., Nurpeisova M.B. Processing of ash and slag waste from thermal power plants with production of building materials // *Молодой ученый*. 2024. № S48–1 (547–1). С. 18–21. EDN TLMCIG.
9. Hossiney N., Das P., Mohan M.K., George J. In-plant production of bricks containing waste foundry sand — a study with Belgaum foundry industry // *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 9. P. e00170. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00170
10. Hafez A.I., Khedr M.M.A., Osman R.M., Sabry R., Mohammed M.S. A comparative investigation of the unit cost for the preparation of modified sand and clay bricks from rice husk waste // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 32. P. 101765. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101765
11. Wang P., Li J., Hu Y., Cheng H. Solidification and stabilization of Pb–Zn mine tailing with municipal solid waste incineration fly ash and ground granulated blast-furnace slag for unfired brick fabrication // *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 321. P. 121135. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121135
12. 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
13. Smiljanić S., Hribar U., Spreitzer M., König J. Influence of additives on the crystallization and thermal conductivity of container glass cullet for foamed glass preparation // *Ceramics International*. 2021. Vol. 47. Issue 23. Pp. 32867–32873. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.08.183
14. Zhou H., Feng K., Liu Y., Cai L. Preparation and characterization of foamed glass-ceramics based on waste glass and slow-cooled high-titanium blast furnace slag using borax as a flux agent // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2022. Vol. 590. P. 121703. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2022.121703

15. Niu Y.H., Fan X.-Y., Ren D., Wang W., Li Y., Yang Z. *et al.* Effect of Na_2CO_3 content on thermal properties of foam-glass ceramics prepared from smelting slag // *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 256. P. 123610. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123610
16. Karamanov A., Hamzawy E.M.A., Karamanova E., Jordanov N.B., Darwish H. Sintered glass-ceramics and foams by metallurgical slag with addition of CaF_2 // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. Issue 5. Pp. 6507–6516. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.132
17. Рябов Ю.В., Делицын Л.М., Ежова Н.Н., Сударева С.В. Методы обогащения золошлаковых отходов угольных ТЭС и пути их вовлечения в хозяйственный оборот : обзор // *Теплоэнергетика*. 2019. № 3. С. 3–24. DOI: 10.1134/S0040363619030056. EDN YVCLLV.
18. Hu S., Li D., Li Y., Guo Q., Tian D., Zhang L. *et al.* Preparation of Foamed Ceramics from Graphite Tailings Using a Self-Foaming Method // *Minerals*. 2023. Vol. 13. Issue 521. DOI: 10.3390/min13040521
19. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bochkov V.S., Ermakov A.A. The formation mechanism of the porous structure of glass ceramics from siliceous rock // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. No. 8 (100). DOI: 10.18720/MCE.100.6. EDN GPPAGD.
20. Qi Y., Yue Q., Han S., Yue M., Gao B., Yu H. *et al.* Preparation and mechanism of ultra-lightweight ceramics produced from sewage sludge // *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 176. Issue 1–3. Pp. 76–84. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.11.001
21. Гольцман Б.М., Смолий В.А., Яценко В.С., Вильбицкая Е.А. Синтез пористых материалов на основе золошлаковых отходов ТЭС по технологии «самовспенивания» // *Стекло и керамика*. 2025. Т. 98. № 1 (1165). С. 50–57. DOI: 10.14489/glc.2025.01.pp.050-057. EDN EKTPTZ.
22. Сенина М.О., Лемешев Д.О., Протасов А.С., Жуков Д.Ю. Исследование влияния добавки фторида лития на свойства плотной керамики из алюмомагнезиевой шпинели, полученной спеканием без давления // *Цветные металлы*. 2022. № 9. С. 18–22. DOI: 10.17580/tsm.2022.09.02. EDN FGPDQW.
23. Wang Z., Huang S., Yu Y., Wen G., Tang P., Hou Z. Comprehensive understanding of the microstructure and volatilization mechanism of fluorine in silicate melt // *Chemical Engineering Science*. 2021. Vol. 243. P. 116773. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116773
24. Mohan S.K., Sarkar R. A comparative study on the effect of different additives on the formation and densification of magnesium aluminate spinel // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. Issue 12. Pp. 13932–13943. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.05.206
25. Гольцман Б.М., Яценко Е.А., Яценко Л.А., Ирха В.А. Синтез пористых силикатных материалов при использовании фторида натрия в качестве флюсующей добавки // *Цветные металлы*. 2021. № 6. С. 44–49. DOI: 10.17580/tsm.2021.06.06. EDN CUCCFS.
26. Manjunatha C., Nagabhushana B.M., Sunita D.V., Nagabhushana H., Sharma S.C., Venkatesh G.B. *et al.* Effect of NaF flux on microstructure and thermoluminescence properties of Sm^{3+} doped CdSiO_3 nanoporphor // *Journal of Luminescence*. 2013. Vol. 134. Pp. 432–440. DOI: 10.1016/j.jlumin.2012.08.006
27. Ge Z., Xiong B., Zhang X., Yuan X. Effect of photo-thermo-induced nucleation on crystallization properties of $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--ZnO--Na}_2\text{O}$ photo-thermo-refractive glass // *Optical Materials*. 2022. Vol. 132. Issue 4. P. 112878. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112878
28. Kolobkova E., Alkhlef A., Dinh B., Yasukevich A., Dernovich O., Kuleshov N. *et al.* Spectral properties of Nd^{3+} ions in the new fluoride glasses with small additives of the phosphates // *Journal of Luminescence*. 2019. Vol. 206. Pp. 523–529. DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.10.082
29. Казьмина О.В., Верещагин В.И. Методологические принципы синтеза пеностеклокристаллических материалов по низкотемпературной технологии // *Строительные материалы*. 2014. № 8. С. 41–45. EDN SJVXNP.
30. Казьмина О.В., Верещагин В.И. Физико-химическое моделирование состава пеностеклокристаллических материалов // *Физика и химия стекла*. 2015. Т. 41. № 1. С. 166–172. EDN TKAZFZ.
31. Mohassab Y., Sohn H.Y. Analysis of slag chemistry by FTIR-RAS and Raman spectroscopy: Effect of water vapor content in $\text{H}_2\text{O/CO/CO}_2$ mixtures relevant to a novel green ironmaking technology // *Steel Research International*. 2015. Vol. 86. Issue 7. Pp. 740–752. DOI: 10.1002/srin.201400186
32. Finocchiaro C., Barone G., Mazzoleni P., Leonelli C., Gharzouni A., Rossignol S. FT-IR study of early stages of alkali activated materials based on pyroclastic deposits (mt. Etna, Sicily, Italy) using two different alkaline solutions // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. P. 120095. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120095

Поступила в редакцию 3 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 9 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 29 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Борис Михайлович Гольцман** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей химии и технологии силикатов; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 711009, Scopus: 57144398600, ResearcherID: A-2765-2014, ORCID: 0000-0003-0013-5557; b.goltsman@npi-tu.ru;

Елена Альфредовна Яценко — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой общей химии и технологии силикатов; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 490400, Scopus: 7003335636, ResearcherID: A-3367-2014, ORCID: 0000-0003-2242-1765; e_yatsenko@mail.ru;

Анна Александровна Тимофеева — аспирант кафедры общей химии и технологии силикатов; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; Scopus: 58955788000; anna.dirina@mail.ru;

Полина Александровна Скубовская — студент магистратуры; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; polina.gladkova.02@mail.ru;

Виктория Александровна Смолий — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей химии и технологии силикатов; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 588275, Scopus: 52063721000, ResearcherID: A-3442-2014, ORCID: 0000-0003-0013-5557; vikk-toria@yandex.ru.

Вклад авторов:

Гольцман Б.М. — идея и концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

Яценко Е.А. — методология исследования, научное руководство и консультирование, итоговые выводы.

Тимофеева А.А. — проведение физико-химических исследований (ИК, РФА), написание исходного текста.

Скубовская П.А. — выполнение лабораторных исследований (синтез образцов, исследование свойств).

Смолий В.А. — исследование грубой и тонкой структуры образцов, обработка материалов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Nicolás M.F., Chávez M.M., Vlasova M., Pi Puig T. Low-temperature sintering of ceramic bricks from clay, waste glass and sand. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 2024; 63(5):377-388. DOI: 10.1016/j.bsecv.2024.06.003
2. Chen G., Gao J., Liu C., Li S., Zhao Y., Wu H. et al. Effect of waste clay brick powder and slag on mechanical properties and durability of concrete. *Powder Technology*. 2025; 453:120623. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.120623
3. Dadouch M., Belal T., Ghembaza M.S. Valorization of glass waste as partial substitution of sand in concrete — Investigation of the physical and mechanical properties for a sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2024; 411:134436. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134436
4. Ma Z., Zhang Z., Liu X., Zhang Y., Wang C. Re-using waste glass fines to substitute cement and sand for recycled ultra-high performance strain-hardening cementitious composites (UHP-SHCC). *Construction and Building Materials*. 2024; 455:139186. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139186
5. Ryschenko M.I., Fedorenko E.Yu., Lisachuk G.V., Shabanova G.N. Technogenic materials and industrial waste as a source of raw stock for producing building materials. *Ecology and Industry*. 2013; 4(37):10-16. EDN IEUQQH. (rus.).
6. Zhukov D.Yu., Averina Yu.M., Vetrova M.A. Technological recycling of waste manufacturing different manganese ore. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2018; 32(1):(197):64-67. EDN YVRACV. (rus.).
7. Korneeva E.V. Man-made sludge waste industrial in the production of construction materials. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; 10(790):99-111. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-790-10-99-111. EDN RBKRWN. (rus.).
8. Ashimova A.A., Bek A.A., Nurlybaev R.Ye., Nurpeisova M.B. Processing of ash and slag waste from thermal power plants with production of building materials. *Young Scientist*. 2024; S48-1(547-1):18-21. EDN TLMCIG.
9. Hossiney N., Das P., Mohan M.K., George J. In-plant production of bricks containing waste foundry sand — a study with Belgaum foundry industry. *Case Studies in Construction Materials*. 2018; 9:e00170. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.e00170
10. Hafez A.I., Khedr M.M.A., Osman R.M., Sabry R., Mohammed M.S. A comparative investigation of the unit cost for the preparation of modified sand and clay bricks from rice husk waste. *Journal of Building Engineering*. 2020; 32:101765. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101765
11. Wang P., Li J., Hu Y., Cheng H. Solidification and stabilization of Pb-Zn mine tailing with municipal solid waste incineration fly ash and ground granulated blast-furnace slag for unfired brick fabrication. *Envi-*

ronmental Pollution. 2023; 321:121135. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121135

12. 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

13. Smiljanić S., Hribar U., Spreitzer M., König J. Influence of additives on the crystallization and thermal conductivity of container glass cullet for foamed glass preparation. *Ceramics International*. 2021; 47(23):32867-32873. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.08.183

14. Zhou H., Feng K., Liu Y., Cai L. Preparation and characterization of foamed glass-ceramics based on waste glass and slow-cooled high-titanium blast furnace slag using borax as a flux agent. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2022; 590:121703. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2022.121703

15. Niu Y.H., Fan X.-Y., Ren D., Wang W., Li Y., Yang Z. et al. Effect of Na_2CO_3 content on thermal properties of foam-glass ceramics prepared from smelting slag. *Materials Chemistry and Physics*. 2020; 256:123610. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123610

16. Karamanov A., Hamzawy E.M.A., Karamanova E., Jordanov N.B., Darwish H. Sintered glass-ceramics and foams by metallurgical slag with addition of CaF_2 . *Ceramics International*. 2020; 46(5):6507-6516. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.11.132

17. Ryabov Y.V., Delitsyn L.M., Ezhova N.N., Sudareva S.V. Methods for beneficiation of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants and ways for their commercial use : a review. *Thermal Engineering*. 2019; 3:3-24. DOI: 10.1134/S0040363619030056. EDN YVCLLV. (rus.).

18. Hu S., Li D., Li Y., Guo Q., Tian D., Zhang L. et al. Preparation of Foamed Ceramics from Graphite Tailings Using a Self-Foaming Method. *Minerals*. 2023; 13(521). DOI: 10.3390/min13040521

19. Erofeev V.T., Rodin A.I., Bochkina V.S., Ermakov A.A. The formation mechanism of the porous structure of glass ceramics from siliceous rock. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 8(100). DOI: 10.18720/MCE.100.6. EDN GPPAGD.

20. Qi Y., Yue Q., Han S., Yue M., Gao B., Yu H. et al. Preparation and mechanism of ultra-lightweight ceramics produced from sewage sludge. *Journal of Hazardous Materials*. 2010; 176(1-3):76-84. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.11.001

21. Gol'tsman B. M., Smoliy V.A., Yatsenko V.S., Vilbitskaya E.A. Synthesis of porous materials based on tpp ash-slag waste using "self-foaming" technology. *Glass and Ceramics*. 2025; 98(1):(1165):50-57. DOI: 10.14489/glc.2025.01.pp.050-057. EDN EKTPTZ. (rus.).

22. Senina M.O., Lemeshev D.O., Protasov A.S., Zhukov D.Yu. Understanding the effect of lithium fluo-

ride additive on the properties of pressureless sintered magnesium aluminate spinel ceramics. *Tsvetnye Metally*. 2022; 9:18-22. DOI: 10.17580/tsm.2022.09.02. EDN FGPDQW. (rus.).

23. Wang Z., Huang S., Yu Y., Wen G., Tang P., Hou Z. Comprehensive understanding of the microstructure and volatilization mechanism of fluorine in silicate melt. *Chemical Engineering Science*. 2021; 243:116773. DOI: 10.1016/j.ces.2021.116773

24. Mohan S.K., Sarkar R. A comparative study on the effect of different additives on the formation and densification of magnesium aluminate spinel. *Ceramics International*. 2016; 42(12):13932-13943. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.05.206

25. Goltsman B.M., Yatsenko E.A., Yatsenko L.A., Irkha V.A. Synthesis of porous silicate materials using sodium fluoride as fluxing agent. *Tsvetnye Metally*. 2021; 6:44-49. DOI: 10.17580/tsm.2021.06.06. EDN CUCCFS. (rus.).

26. Manjunatha C., Nagabhushana B.M., Sunita D.V., Nagabhushana H., Sharma S.C., Venkatesh G.B. et al. Effect of NaF flux on microstructure and thermoluminescence properties of Sm^{3+} doped $CdSiO_3$ nanophosphor. *Journal of Luminescence*. 2013; 134:432-440. DOI: 10.1016/j.jlumin.2012.08.006

27. Ge Z., Xiong B., Zhang X., Yuan X. Effect of photo-thermo-induced nucleation on crystallization properties of $SiO_2-Al_2O_3-ZnO-Na_2O$ photo-thermorefractive glass. *Optical Materials*. 2022; 132(4):112878. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112878

28. Kolobkova E., Alkhlef A., Dinh B., Yasukevich A., Dernovich O., Kuleshov N. et al. Spectral properties of Nd^{3+} ions in the new fluoride glasses with small additives of the phosphates. *Journal of Luminescence*. 2019; 206:523-529. DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.10.082

29. Kaz'mina O. V., Vereshchagin V.I. Methodological principles of synthesis of foam glass-crystalline materials using low-temperature technology. *Construction Materials*. 2014; 8:41-45. EDN SJVXNP. (rus.).

30. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I. Physicochemical modeling of composition of foam glass-crystal materials. *Glass Physics and Chemistry*. 2015; 41(1):166-172. EDN TKAZFZ. (rus.).

31. Mohassab Y., Sohn H.Y. Analysis of slag chemistry by FTIR-RAS and Raman spectroscopy: Effect of water vapor content in $H_2O/CO/CO_2$ mixtures relevant to a novel green ironmaking technology. *Steel Research International*. 2015; 86(7):740-752. DOI: 10.1002/srin.201400186

32. Finocchiaro C., Barone G., Mazzoleni P., Leonelli C., Gharzouni A., Rossignol S. FT-IR study of early stages of alkali activated materials based on pyroclastic deposits (mt. Etna, Sicily, Italy) using two different alkaline solutions. *Construction and Building Materials*. 2020; 262:120095. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120095

Received March 3, 2025.

Adopted in revised form on March 9, 2025.

Approved for publication on May 29, 2025.

B I O N O T E S: **Boris M. Goltsman** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Chemistry and Technology of Silicates; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 711009, Scopus: 57144398600, ResearcherID: A-2765-2014, ORCID: 0000-0003-0013-5557; b.goltsman@npi-tu.ru;

Elena A. Yatsenko — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of General Chemistry and Technology of Silicates; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 490400, Scopus: 7003335636, ResearcherID: A-3367-2014, ORCID: 0000-0003-2242-1765; e_yatsenko@mail.ru;

Anna A. Timofeeva — postgraduate student of the Department of General Chemistry and Technology of Silicates; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation; Scopus: 58955788000; anna.dirina@mail.ru;

Polina A. Skubovskaya — master's student; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation; polina.gladkova.02@mail.ru;

Victoria A. Smoliy — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Chemistry and Technology of Silicates; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, Rostov region, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 588275, Scopus: 52063721000, ResearcherID: A-3442-2014, ORCID: 0000-0003-0013-5557; vikk-toria@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Boris M. Goltsman — idea and concept of the study, text revision, final conclusions.

Elena A. Yatsenko — research methodology, scientific supervision and consulting, final conclusions.

Anna A. Timofeeva — performing physicochemical studies (IR, XRD), writing the original text.

Polina A. Skubovskaya — performing laboratory studies (sample synthesis, property study).

Victoria A. Smoliy — study of samples structure (microscopy), material processing.

Authors declare no potential conflict of interest.