

Е.В. ТКАЧ<sup>1</sup>, А.М. РАХИМОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан

## ПЕНОСТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ПОРИСТЫЙ ЗАПОЛНИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ

**Аннотация.** Задачи, связанные с расширением сырьевой базы при производстве пористых заполнителей для легких бетонов с минимальными энергозатратами, с каждым годом становятся всё более актуальными. В рамках данных исследований рассмотрены вопросы, связанные с получением пористых заполнителей для легкого бетона, которые выдерживают более высокие нагрузки без снижения качества за счет наличия кристаллической структуры межпоровых перегородок. Материал обладает низким водопоглощением по сравнению с керамзитом, что указывает на способность сохранять свои теплотехнические характеристики во времени, и имеет практически неограниченный срок службы. Цель данного исследования – получение пеностеклокристаллических пористых заполнителей для легких бетонов по технологии низкотемпературного вспенивания. Объектом исследования являлись техногенные отходы производства, содержащие кремнеземистое и алюмосиликатные составляющие в качестве основного компонента (шлаки, золы ТЭС, хвосты обогащения).

Результаты исследования: полученные пористые заполнители характеризуются высокими физико-механическими свойствами: плотность 200-220 кг/м<sup>3</sup>; прочность 3,1-4,0 МПа; теплопроводность 0,07 - 0,1 Вт/(м·°С); водопоглощение 1-2%. Образцы легких заполнителей характеризуются высокой степенью однородности поровой структуры и предпочтительными для показателей прочности и теплопроводности размерами пор до 1,2 мм и межпоровой перегородки 50 мкм.

**Ключевые слова:** отходы промышленности, пеностеклянные материалы, низкотемпературная технология, пористые заполнители, легкий бетон.

E.V. TKACH<sup>1</sup>, A.M. RAKHIMOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Karaganda state technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

## HEAVY CONCRETE BASED ON POLYDISPERSE BINDER WITH COMPLEX POLYMER MODIFIER WITH INCREASED PERFORMANCE INDICATORS

**Abstract.** The tasks related to the expansion of the raw material base in the production of porous aggregates for lightweight concrete with minimal energy consumption are becoming more and more urgent every year. As part of these studies, issues related to the production of porous aggregates for lightweight concrete that can withstand higher loads without compromising quality due to the presence of a crystalline structure of inter pore partitions are considered. The material has low water absorption compared to expanded clay, which indicates the ability to maintain its thermal performance over time, and has an almost unlimited service life. The purpose of this study is to obtain foam-glass-crystalline porous aggregates for lightweight concrete using the technology of low-temperature foaming. The object of the study was technogenic production waste containing silica and aluminosilicate components as the main component (slag, TPP ash, enrichment tailings).

*Research results: the resulting porous fillers are characterized by high physical and mechanical properties: density 200-220 kg/m<sup>3</sup>; strength 3.1-4.0 MPa; thermal conductivity 0.07 - 0.1 W / (m·K); water absorption 1-2%. Samples of light aggregates are characterized by a high degree of uniformity of the pore structure and preferred for strength and thermal conductivity pore sizes up to 1.2 mm and an interpore wall of 50 μm.*

**Keywords:** industrial waste, foam glass materials, low-temperature technology, porous aggregates, lightweight concrete.

### Введение

Актуальным вопросом производства пористых заполнителей для легких бетонов является расширение их сырьевой базы за счет использования материалов техногенного происхождения. При этом пористые заполнители должны быть получены с учетом снижения энергозатрат, с одновременным решением вопросов утилизации производственных отходов.

В мире накоплен огромный объем различных техногенных отходов. Одним из путей их утилизации является использование в качестве основного компонента в виде пористого пеностеклокристаллических заполнителей для легких бетонов. Ресурсосбережение предполагает использование отходов и побочных продуктов обогащения минерального сырья, которое имеется в значительных объемах [1-4]. Проведенные исследования показали, что для получения пеностекловых материалов предпочтительны тонкодисперсные кремнеземистые материалы с высокой долей аморфной составляющей. Техногенные отходы, которые могут использоваться для синтеза стеклогранулята и производства пеностеклокристаллических пористых заполнителей должны иметь высокое содержание оксида кремния, а также содержать такие стеклообразующие компоненты, как оксиды алюминия, кальция, оксиды щелочных металлов.

### Модели и методы

Технология получения пеностеклокристаллических пористых заполнителей основана на порошковом способе и включает в себя две основные стадии. Первая стадия – получение стеклогранулята в условиях низкотемпературного синтеза. Стеклогранулят представляет собой промежуточный продукт, на основе которого готовится пенообразующая смесь для получения заполнителя. Синтез стеклогранулята осуществляется при относительно низких температурах, не превышающих 950°C (по сравнению с классическим стекловарением, которое протекает при температурах 1300 – 1400°C), на стандартном для промышленности строительных материалов оборудовании, без применения высокотратных и энергоемких стекловаренных печей. Наличие кристаллической фазы положительным образом сказывается на физико-механических свойствах готового пористого заполнителя, при этом размер частиц кристаллической фазы и ее количество должны соответствовать определенным требованиям.

Вторая стадия – приготовление пенообразующей смеси из порошка стеклогранулята с газообразователем, проведение процесса вспенивания с получением готового пористого заполнителя.

Двухстадийная технология получения пористых заполнителей позволяет поэтапно оптимизировать структуру и свойства материала в зависимости от его назначения. На первом этапе решается задача синтеза стеклогранулята с заданными характеристиками, управлять которыми можно за счет рецептурных и технологических факторов. На втором этапе осуществляется управление основными показателями макро- и микроструктуры пористого заполнителя.

Температурный интервал обработки шихты для низкотемпературного стеклогранулята должен отвечать фазовому переходу шихты из твердого состояния в вязкотекучее (с образованием расплава в количестве не менее 75 %), что определяется составом шихты, а также природой ее главного компонента. Режим термообработки подбирается индивидуально для каждого состава шихты.

В результате термообработки шихты в области температур не менее 0,8 от температуры ликвидуса в системе не достигается равновесие и сохраняется кристаллическая фаза. Массовое содержание в стеклогрануляте не должно превышать 25 %. После вспенивания содержание кристаллической фазы снижается до значений от 15 до 4 %.

Полученный гранулят измельчают, смешивают с газообразователем и проводят вспенивание. Газообразователи должны отвечать следующим требованиям: выделение газовой фазы при нагревании только после полного спекания; плавное возрастание давления продуктов разложения в температурном интервале спекания.

В качестве основных компонентов исходной шихты использованы техногенные отходы промышленности. В зависимости от вида сырья состав шихты корректируется различными добавками. Основу шихты составляют три компонента: кремнеземистый (отход), щелочной (кальцинированная сода) и карбонатный (доломит).

Основными требованиями являются: к исходному кремнеземистому материалу – его тонкодисперсность (средний размер частиц менее 100 мкм) и химический состав; к шихте – устойчивость к стеклообразованию, количество образующегося расплава и его реологические свойства [5].

Анализ научной литературы показал, что выбор состава шихты для получения пористых заполнителей по технологии низкотемпературного вспенивания должен осуществляться с учетом следующих условий [2-8]:

- массовое содержание стеклообразователей и оксидов щелочных металлов в шихте должно быть достаточным для устойчивого стеклообразования, т.е. находиться в пределах 60 – 75 и 13 – 22 % соответственно;
- количество расплава должно быть не менее 70 %, что необходимо для обеспечения пиропластического состояния массы на стадии вспенивания;
- жидкая фаза должна иметь оптимальную вязкость (103 – 106 Па·с) в температурном интервале вспенивания;
- температура образования жидкой фазы (расплава) не должна превышать 950°C, чтобы обеспечить снижение энергозатрат.

Положительные результаты экспериментов по получению пеностеклокристаллических пористых заполнителей из техногенных отходов предполагают проведение дополнительных экспериментов по влиянию различных факторов на основные физико-механические свойства получаемых пористых заполнителей.

Так как процесс получения пористых заполнителей является двухстадийным, то планирование экспериментальных исследований предусматривало исследование двух независимых и последовательных процессов:

- получение стеклогранулята;
- получение непосредственно пеностеклокристаллического пористого заполнителя.

Расшифровка фазового состава, полученного стеклогранулята, а точнее, определение содержания в нем аморфной стеклофазы, проводилась с помощью программы «Crystallographica Search-Match». Количественное определение соотношения кристаллической и стекловидной фаз в материале определялось с помощью графического редактора и анализатора дифрактограмм – программы «Repex».

Для получения пеностеклокристаллического заполнителя, полученный стеклогранулят измельчали до крупности 0,1 мм последовательно на щековой дробилке и дисковом истирателе. Затем в тонкоизмельченный материал добавлялся газообразователь, в качестве которого использовались различные восстановители (сажа, тонкоизмельченный уголь, уротропин) и смесь восстановителя с окислителем (уголь + нитрат калия, уротропин + нитрат калия). Общее количество газообразователя составляло 1% от массы измельченного стеклогранулята. Газообразователь и измельченный стеклогранулят тщательно перемешивали, проводили процесс гранулирования для получения гранул размером 3...5 мм. Гранулы помещались в фарфоровую лодочку и помещались в предварительно нагретую муфельную

печь при температуре 850°C. Через 30 с лодочку вынимали и фиксировали процесс вспенивания, затем лодочку вновь вставляли в муфельную печь на требуемый период времени.

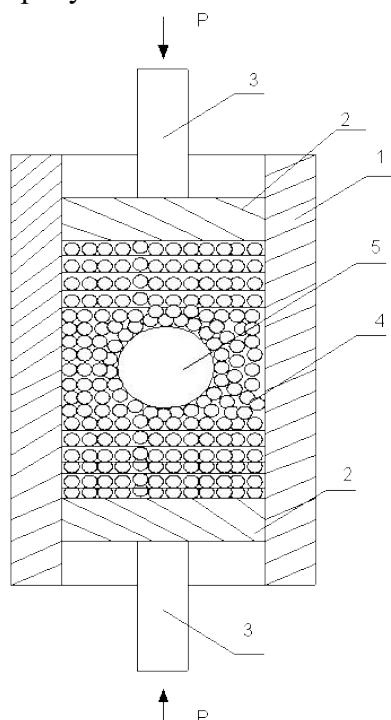
Полученные гранулы исследовались с целью определения их физико-механических характеристик.

Для оценки качества полученного гранулированного материала применяли как стандартные методы, например [9], так и методики, разработанные при исследовании полученных новых эффективных материалов [10-18].

Плотность гранулированного материала определяли, как отношение массы гранулы к объему вытесненного ей песка. Для этого каждую гранулу взвешивают на лабораторных весах с точностью до 0,01 г. Фарфоровый тигель объемом, в три-четыре раза превышающим возможный объем гранулы, заполняют песком, прокаленным при температуре 900°C – 1000 °C. Излишек песка снимают металлической линейкой. Примерно  $\frac{3}{4}$  объема песка отсыпают из тигля на лист бумаги. Испытуемую гранулу помещают в тигель на оставшийся слой песка и засыпают песком с листа бумаги. Излишек песка снимают металлической линейкой на лист бумаги и определяют его объем в мерном стеклянном цилиндре вместимостью 10 см. Встряхивание тигля и цилиндра не допускается.

За окончательный результат принимают среднее арифметическое значение результатов параллельных испытаний трех гранул. Насыпную плотность определяли измеряли согласно [9].

Определение механической прочности гранул осуществляли по разработанной на кафедре технологии силикатов и наноматериалов методике [10], согласно которой прочность гранул определяется путем сжатия их в пресс-форме (рисунок 1). Суть метода состоит в том, что замеряется давление, при котором разрушается гранула, при этом давление грануле передается равномерно со всех сторон через окружающие ее гранулы упругого материала. Эластичная засыпка (полиуретан) используется для создания объемного давления на гранулу исследуемого материала: засыпка обладает высокими упруго-эластичными и износостойкими свойствами и прочностными характеристиками, находясь в подобной среде, гранула испытуемого материала плотно контактирует с гранулами засыпки, которые значительно меньше по размеру исследуемой гранулы.



**Рисунок 1 – Прибор для измерения механической прочности:**

*1 - цилиндр, 2 – поршень, 3 - шток, 4 – гранулированный полиуретан, 5 – исследуемый образец*

В пресс-форму засыпают эластичную засыпку и размещают гранулу исследуемого образца как показано на рисунке, устанавливают форму на гидропресс, на поршни через штоки подается давление, которое через гранулированную засыпку передается грануле исследуемого материала.

Момент разрушения гранулы устанавливается по специфическому щелчку и резкому падению давления в гидросистеме гидравлического пресса. Численное значение предела прочности на сжатие гранулы вычисляют по формуле (1) [10]:

$$R = \frac{Mx F_{pis}}{3,14x d_{gr}^2}, МПа \quad (1)$$

где М – показание манометра при разрушении гранулы (МПа);  $F_{пор}$  – площадь поршня гидропресса ( $50,5 \text{ см}^2$ );  $d_{гр}$  – средний диаметр гранулы (см).

### Результаты исследования

Первоначальной стадией получения пеностеклокристаллических заполнителя является синтез стеклогранулята. Для получения стеклогранулята были использованы хвосты обогащения медно-цинковой руды, содержащие достаточно высокое количество оксида алюминия (до 17 %  $Al_2O_3$ ). Исходя из результатов анализа фазовых диаграмм, нами определены основные параметры процесса получения стеклогранулята и его последующего вспенивания. За базовые составы стекла выбраны составы, в которых оксиды, составляющие его основу, изменяются в следующих пределах, мас. %:  $SiO_2$  62-73;  $Al_2O_3$  5-15;  $Na_2O$  22-23, что требует добавления кальцинированной соды. Выбранная для эксперимента шихта имеет следующий состав, мас. %: 80 – отход; 20 % – кальцинированная сода [1].

Перед термообработкой шихта компактировалась, что обеспечило более быстрый равномерный прогрев и рост химической активности шихты по сравнению с порошкообразной. С этой целью порошкообразную шихту предварительно увлажняли 15%-ным раствором жидкого стекла до массового содержания в шихте 5 – 7 % и прессовали.

Предварительно термообработку шихты провели на образцах в виде цилиндров диаметром 20 мм и высотой 10 мм, которые нагревали в муфельной печи при температурах 900 и 1000°C. После тридцатиминутной выдержки цилиндров при максимальной температуре образцы полностью остекловались (рисунок 2).

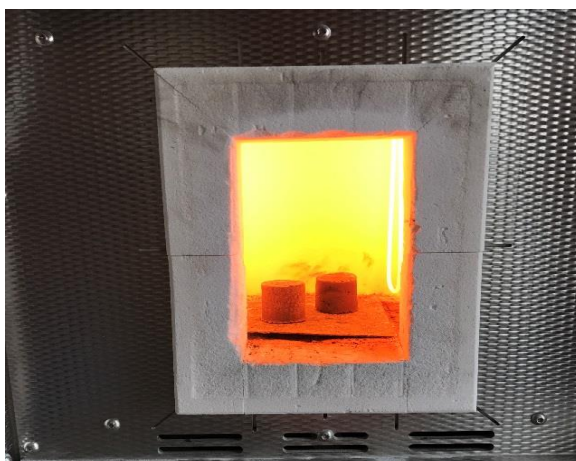


Рисунок 2- Термообработка образцов в муфельной печи

Рентгенофазовый анализ показал (рисунок 3), что кристаллическая фаза представлена остаточным кристаллическим кварцем и альбитом. По содержанию стеклофазы (70 %) полученный стеклогранулят отвечает указанным требованиям.

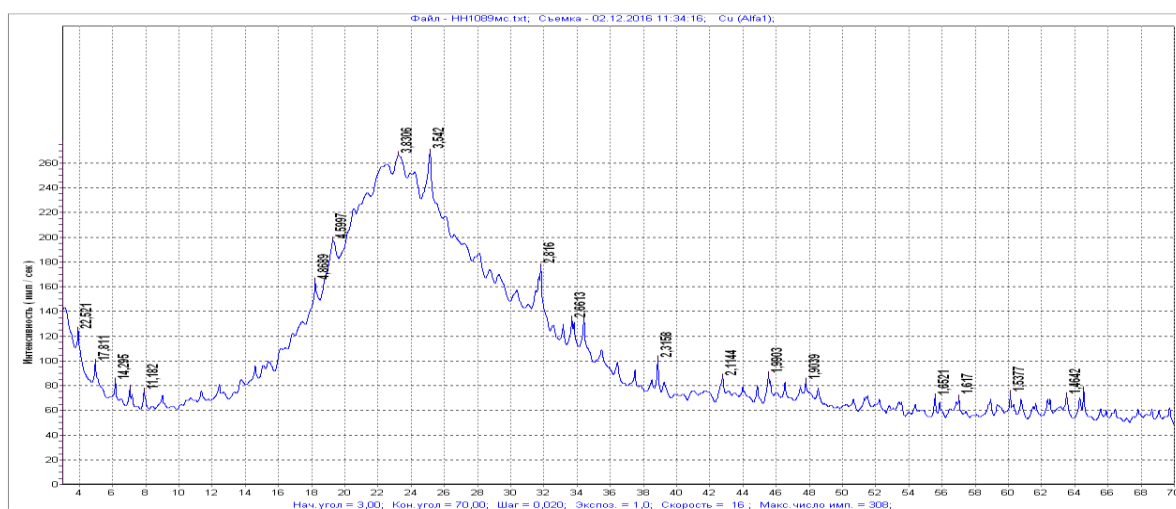


Рисунок 3 – Рентгенограмма стеклогранулята

Образцы стеклогранулята в виде цилиндров диаметром 20 мм и высотой 10 мм после термообработки представлены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Образцы стеклогранулята после термообработки

Таким образом, оптимальным вариантом для получения ПСКМ по низкотемпературной технологии является синтез стеклогранулята при температуре 900°C из двухкомпонентной шихты, содержащей 80 % отходов и 20 % кальцинированной соды.

Процесс вспенивания пенообразующих смесей, подготовленных из синтезированного стеклогранулята, измельченного до удельной поверхности 5000 см<sup>2</sup>/г с добавлением в качестве газообразователя сажи в количестве 0,5 %, оценивали по значению коэффициента вспенивания  $K_v$ . Коэффициент вспенивания показывает степень увеличения объема образца в процессе термообработки при получении пористого материала.

Для определения коэффициента вспенивания пенообразующую смесь готовят в виде образцов цилиндрической формы (с усилием прессования 1 МПа) высотой и диаметром 10 мм с последующей термообработкой в трубчатой печи при различном температурном режиме, с изменением максимальной температуры вспенивания и выдержки при ней (таблица 1).

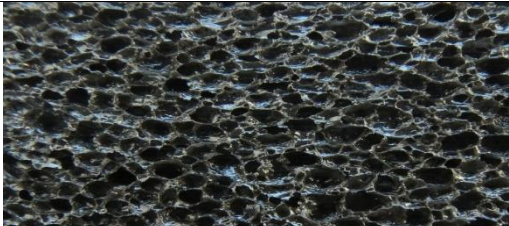
Таблица 1 - Режим и коэффициент вспенивания

| Смесь                                                                                                                            | $T_{всп}$ , °C | $\tau_b$ , мин | $K_v$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|-------|
| ПС-1                                                                                                                             | 800            | 10             | 1,1   |
| ПС-2                                                                                                                             | 800            | 15             | 2,74  |
| ПС-3                                                                                                                             | 850            | 5              | 1,54  |
| ПС-4                                                                                                                             | 850            | 10             | 3,36  |
| ПС-5                                                                                                                             | 850            | 15             | 2,64  |
| ПС-6                                                                                                                             | 900            | 5              | 5,19  |
| ПС-7                                                                                                                             | 900            | 10             | 4,43  |
| $T_{всп}$ – температура вспенивания, °C; $\tau_b$ – выдержка при максимальной температуре, мин; $K_v$ – коэффициент вспенивания. |                |                |       |



Максимальный коэффициент вспенивания имели образцы, полученные при температуре вспенивания 900°C с выдержкой 5 мин. Однако макроструктура данных образцов представлена порами крупных размеров (более 5 мм), некоторые из которых соединялись между собой, что, очевидно, отрицательным образом должно было сказываться на водопоглощении образцов. Поэтому для дальнейших исследований были выбраны образцы, полученные при 850 °C с выдержкой 10 мин. Характеристика и структуры данных образцов приведена в таблице 2.

Таблица 2 - Характеристика и структура образцов пеностеклокристаллических пористых заполнителей для легкого бетона

| Средний размер пор, мм | Средний размер межпоровой перегородки, мкм | Макроструктура образцов                                                            |
|------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1,2                    | 50                                         |  |

Таким образом, разработанный температурный режим вспенивания при 850°C с выдержкой 10 мин обеспечивает получение оптимальной макроструктуры пористого материала со следующими характеристиками: средний размер пор 1,2 мм, средняя толщина межпоровой перегородки 50 мкм.

Полученный заполнитель имеет пористое строение. Некоторые физико-химические показатели имеют следующие величины:

- плотность – 150...250 кг/м<sup>3</sup>,
- коэффициент теплопроводности – 0,1...0,125 Вт/(К·м<sup>2</sup>),
- прочность при сжатии – 1,5...2,5 МПа.

### Выводы

Результаты экспериментальных исследований, показали возможность получения пеностеклокристаллических пористых заполнителей для легкого бетона на основе двухкомпонентных и многокомпонентных смесей, составленных из одного вида техногенного сырья, их смесей в различных соотношениях, и корректирующих добавок. В работе рассмотрена двух стадийная технология получения пеностеклокристаллических пористых заполнителей для легкого бетона, основанная на порошковом способе, включающая две основные стадии: получение стеклогранулята в условиях низкотемпературного синтеза и приготовление пенообразующей смеси из стеклопорошка с газообразователем, проведение процесса вспенивания с получением готового заполнителя. Процессы формирования структуры протекают при более низких температурах (не выше 900°C) по сравнению с процессом получения пеностекла и керамзита, со значительным сокращением общего времени технологического процесса, что существенно снижает энергозатраты. Образцы легких заполнителей характеризуются высокой степенью однородности поровой структуры и предпочтительными для показателей прочности и теплопроводности размерами пор до 1,2 мм и межпоровой перегородки 50 мкм.

Подтверждено, что полученные пористые заполнители для легкого бетона в отличие от традиционных заполнителей (аглопорит, керамзит), выдерживают более высокие нагрузки без снижения качества за счет наличия кристаллической структуры межпоровых перегородок. Материал обладает низким водопоглощением по сравнению с керамзитом, что указывает на способность сохранять свои теплотехнические характеристики во времени, и имеет практически неограниченный срок службы.

Для получения пористых заполнителей для легкого бетона можно использовать традиционное промышленное теплотехническое оборудование, используемое в производстве кирпича и керамики.

Результаты по получению пористых заполнителей по низкотемпературной технологии из техногенных отходов, позволяют сделать вывод о возможности разработки технологических схем по изготовлению пористых заполнителей, обладающих высокими физико-техническими свойствами.

Установлена принципиальная возможность использования техногенных отходов промышленности, что позволяет решать экологические проблемы утилизации отходов и расширить сырьевую базу для производства пористых заполнителей для легких бетонов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ткач С.А., Теличенко В.И. Решение экологических задач в процессе утилизации техногенных отходов при производстве газобетона // *Экология урбанизированных территорий*. Москва, 2016. № 2. С. 23.
2. Теличенко В.И., Орешкин Д.В. Материаловедческие аспекты геоэкологической и экологической безопасности в строительстве // *Экология урбанизированных территорий*. 2015. № 2. С. 31-33.
3. Орешкин Д.В. Проблемы строительного материаловедения и производства строительных материалов // *Строительные материалы*. 2010. № 11. С. 6-8.
4. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов // *Вестник МГСУ*. 2013. С. 204-210.
5. Baidzhanov D.O., Nuguzhinov Zh.S., Fedorchenko V.I., Kropachev P.A., Rakhimov A.M., Divak L.A. Thermal insulation material based on local technogenic raw material // *Glass and Ceramics*. 2017. V. 66. No. 5 – 6. P. 427 – 430.
6. Казьмина О.В. Физико-химические закономерности получения пеностеклокристаллических материалов на основе кремнеземистого и алюмосиликатного сырья: дис. д-ра техн. наук. Томск, 2010. 43 с.
7. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. Assessment of the compositions and components for obtaining foam-glass-crystalline materials from aluminosilicate initial materials // *Glass and Ceram.* 2009. V. 73. P. 82 – 85.
8. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Semukhin B.S., Abiyaka A.N. Low-temperature synthesis of granular glass from mixes based on silica-alumina-containing components for obtaining foam materials // *Glass and Ceram.* 2009. V. 66. No. 9 – 10. P. 341-344.
9. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. et al. Temperature regimes for obtaining granular material for foamed crystal glass materials as a function of the batch composition // *Glass and Ceram.* 2009. V. 66. No. 5-6. P. 179-182.
10. Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2008. 116 с.
11. Tkach E. Develop an efficient method for improving hydrophysical properties of aerated concrete using industrial waste // *Procedia Engineering*. 2016. T. 153. C. 761-765.
12. Сумин А.В., Строкова В.В., Нелюбова В.В., Еременко С.А. Пеногазобетон с наноструктурированным модификатором // *Строительные материалы*. 2016. № 1-2. С. 70-75.
13. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Аристов Д.И. Оптимизация ячеистых структур // *Научное обозрение*. 2015. № 13. С. 128-131.
14. Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // *Строительные материалы*. 2014. № 3. С. 6-14.
15. Булдызов А.А., Романов И.В., Воронин В.В., Алимов Л.А. Исследование формирования структуры и свойств многокомпонентных бетонов // *Научное обозрение*. 2013. № 9. С. 177-181.
16. Урьев Н.Б. Моделирование структурно-механических характеристик дисперсных систем в условиях динамических воздействий // *Коллоидный журнал*. 2013. Т. 75. № 5. С. 596.
17. Ружинский С.И. Влияние химических характеристик цемента на эффективность виброактивации. Сайт доступа: <http://www.ibeton.ru/a158.php>.
18. Muzenski S.W., Flores-Vivian I., Sobolev K. The development of hydrophobic and superhydrophobic cementitious composites, *Proceedings of the 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures, ICDCS 2014* (2014).

### **REFERENCES**

1. Tkach S.A., Telichenko V.I. Solving environmental problems in the process of recycling man-made waste in the production of aerated concrete // *Ecology of urbanized territories*. Moscow, 2016. No. 2. P. 23.



2. Telichenko V.I., Oreshkin D.V. Material science aspects of geo-environmental and environmental safety in construction // Ecology of urbanized territories. 2015. No. 2. P. 31-33.
3. Oreshkin D.V. Problems of building materials science and production of building materials // Stroitelnye materialy. 2010. No. 11. Pp. 6-8.
4. Bazhenov Yu.M., Alimov L.A., Voronin V.V. Structure and properties of concretes with nanomodifiers based on man-made waste // Bulletin of MGSU. 2013. Pp. 204-210.
5. Baidzhanov D.O., Nuguzhinov Zh.S., Fedorchenko V.I., Kropachev P.A., Rakhimov A.M., Divak L.A. Thermal insulation material based on local technogenic raw material // Glass and Ceramics. 2017. V. 66. No. 5 – 6. Pp. 427-430.
6. Kazmina O.V. Physical and chemical regularities of obtaining foam glass-crystalline materials based on silica and aluminosilicate raw materials: dis. Dr. tech. Sciences. Tomsk, 2010. 43 p.
7. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. Assessment of the compositions and components for obtaining foam-glass-crystalline materials from aluminosilicate initial materials // Glass and Ceram. 2009. V. 73. P. 82 – 85.
8. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Semukhin B.S., Abiyaka A.N. Low-temperature synthesis of granular glass from mixes based on silica-alumina-containing components for obtaining foam materials // Glass and Ceram. 2009. V. 66. No. 9 – 10. Pp. 341 – 344.
9. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. et al. Temperature regimes for obtaining granular material for foamed crystal glass materials as a function of the batch composition // Glass and Ceram. 2009. V. 66. No. 5–6. Pp. 179–182.
10. Barantseva E.A., Mizonov V.E., Mixing Yu. Processes of bulk materials: modeling, optimization, calculation // GOUVPO "Ivanovo State Power Engineering University. IN AND. Lenin. Ivanovo, 2008. 116 p.
11. Tkach E. Develop an efficient method for improving hydrophysical properties of aerated concrete using industrial waste // Procedia Engineering. 2016. T. 153. Pp. 761-765.
12. Sumin A.V., Stokova V.V., Nelyubova V.V., Eremenko S.A. Foam gas concrete with nanostructured modifier // Building materials. 2016. No. 1-2. Pp. 70-75.
13. Rumyantsev B.M., Zhukov A.D., Aristov D.I. Optimization of cellular structures. // Scientific review. 2015. No. 13. Pp. 128-131.
14. Bazhenov Yu.M., Chernyshov E.M., Korotkikh D.N. Structural design of modern concretes: defining principles and technological platforms // Building materials. 2014. No. 3. Pp. 6-14.
15. Buldyzhov A.A., Romanov I.V., Voronin V.V., Alimov L.A. Study of the formation of the structure and properties of multicomponent concretes // Scientific Review. 2013. No. 9. Pp. 177-181.
16. Uriev N.B. Modeling of structural-mechanical characteristics of dispersed systems under dynamic influences // Colloid journal. 2013. V. 75. No. 5. Pp. 596.
17. Ruzhinsky S.I. Influence of the chemical characteristics of cement on the efficiency of vibration activation. Access website: <http://www.ibeton.ru/a158.php>.
18. Muzenski S.W., Flores-Vivian I., Sobolev K. The development of hydrophobic and superhydrophobic cementitious composites, Proceedings of the 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures, ICDCS 2014 (2014).

**Информация об авторах:**

**Ткач Евгения Владимировна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения.

E-mail: [ev\\_tkach@mail.ru](mailto:ev_tkach@mail.ru)

**Рахимов Асхат Муратович**

Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан

доктор PhD, старший преподаватель кафедры строительных материалов и технологии.

E-mail: [batosh90@mail.ru](mailto:batosh90@mail.ru)

**Information about authors:**

**Tkach Evgeniya V.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

doctor of technical sciences, professor, professor of the department building materials science.

E-mail: [ev\\_tkach@mail.ru](mailto:ev_tkach@mail.ru)

**Rakhimov Askhat M.**

Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan,

doctor of PhD, senior lecturer of the Department of Building Materials and Technology.

E-mail: [batosh90@mail.ru](mailto:batosh90@mail.ru)