

## Звукопоглощающие свойства пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород

Анатолий Анатольевич Ермаков<sup>1</sup>, Артур Ильгизарович Сафин<sup>2</sup>,  
Александр Иванович Родин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарёва); г. Саранск, Россия;

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет); г. Самара, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Звукопоглощающие системы широко применяются при строительстве, реконструкции, ремонте промышленных и гражданских объектов, а также в машиностроении. Наиболее доступными и массово применяемыми являются системы с использованием пористых материалов. Установлено влияние вида, размера, характера пор, а также фазового состава образцов пористой стеклокерамики, полученных из цеолитсодержащих пород, на ее звукопоглощающие свойства.

**Материалы и методы.** Результаты экспериментальных исследований получены импедансным методом, а также методами рентгенофазового анализа, световой микроскопии, рентгеновской микротомографии и др.

**Результаты.** Исследованы пористые стеклокерамические материалы маркой по средней плотности D250 и D300, классом по прочности на сжатие В3,5, с коэффициентом теплопроводности от 0,066 до 0,079 Вт/м·°С и рекомендованной максимальной температурой применения до +850 °С. Общая пористость испытанных образцов стеклокерамических материалов составила от 87,7 до 90,1 %, количество открытых пор от 5 до 18,3 %. На значения звукопоглощающих свойств образцов пористой стеклокерамики основное влияние оказывает открытая пористость материала. С увеличением данного показателя с 4,5 до 18,3 % коэффициент звукопоглощения материала увеличился в зависимости от диапазона звуковых частот в 1,5–2 раза.

**Выводы.** Пористая стеклокерамика, полученная из цеолитсодержащих пород, имеет хорошие физико-механические свойства и высокую температуру применения (не менее +850 °С), а при обеспечении высокого показателя открытой пористости может быть рекомендована для применения в качестве звукопоглощающих материалов в объектах строительного назначения и машиностроении.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пористая стеклокерамика, звукопоглощающие свойства, коэффициент звукопоглощения, импедансная труба, рентгенофазовый анализ, рентгеновская микротомография, цеолитсодержащие породы

*Благодарности.* Работа выполнена в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-10422).

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ермаков А.А., Сафин А.И., Родин А.И. Звукопоглощающие свойства пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1521–1529. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1521-1529

Автор, ответственный за переписку: Александр Иванович Родин, al\_rodin@mail.ru.

## Sound-absorbing properties of porous glass ceramics from zeolite-containing rocks

Anatoly A. Ermakov<sup>1</sup>, Artur I. Safin<sup>2</sup>, Alexander I. Rodin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Ogarev Mordovia State University (MRSU); Saransk, Russian Federation;

<sup>2</sup> Samara National Research University (Samara University); Samara, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Sound-absorbing systems are widely used in construction, reconstruction, repair of industrial and civil facilities, as well as in mechanical engineering. The most affordable and widely used systems are those using porous materials. The influence of the type, size, nature of pores, as well as phase composition of porous glass-ceramic samples obtained from zeolite-containing rocks on its sound-absorbing properties was established.

**Materials and methods.** The results of experimental studies were obtained by the impedance method, as well as by methods of X-ray phase analysis, light microscopy, X-ray microtomography, etc.

**Results.** Porous glass-ceramic materials with average density grades D250 and D300, compressive strength class B3.5, thermal conductivity coefficient from 0.066 to 0.079 W/m·°C and recommended maximum application temperature up to +850 °C were investigated. The total porosity of the tested specimens of glass-ceramic materials was from 87.7 to 90.1 %, and the number of open pores from to 18.3 %. The sound-absorbing properties of porous glass-ceramic specimens are

directly dependent on the open porosity of the material. With an increase of this indicator from 4.5 to 18.3 %, the sound absorption coefficient of the material increased 1.5–2 times, depending on the range of sound frequencies.

**Conclusions.** Porous glass ceramics obtained from zeolite-containing rocks have good physical and mechanical properties and a high application temperature (at least +850 °C), and with a high open porosity index, it can be recommended for application as sound-absorbing materials in construction and mechanical engineering facilities.

**KEYWORDS:** porous glass ceramics, sound-absorbing properties, sound absorption coefficient, impedance pipe, X-ray phase analysis, X-ray microtomography, zeolite-containing rocks

*Acknowledgements.* The work was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 21-79-10422).

**FOR CITATION:** Ermakov A.A., Safin A.I., Rodin A.I. Sound-absorbing properties of porous glass ceramics from zeolite-containing rocks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1521-1529. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1521-1529 (rus.).

*Corresponding author:* Alexander I. Rodin, al\_rodin@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Звукопоглощающие системы широко применяются в зданиях и сооружениях гражданского и промышленного назначения, а также машиностроении [1–3]. Основной задачей таких материалов является приглушение звука, а также устранение звукового резонанса в закрытых помещениях. По механизму действия все звукопоглощающие системы делят на мембранные, резонансные и пористые. Наиболее доступные и массово применяемые — системы с использованием пористых материалов [4]. По виду пористые звукопоглощающие материалы подразделяют на волокнистые, зернистые и ячеистые [4]. В качестве волокнистых материалов часто используется минеральная вата различного состава [5, 6]. Среди зернистых звукопоглощающих материалов наибольшее распространение получили вспученный перлит, вспученный вермикулит, гранулированное пеностекло и другие [7, 8]. В качестве ячеистых звукопоглощающих материалов часто используют различные газо- и пенобетоны [9], пенопласты [10], пористую керамику [11], пеностекло [12, 13], пористую стеклокерамику и другое [14–16].

Эффективность звукопоглощающих материалов напрямую зависит от вида, размера и характера пор (закрытые или открытые поры, распределение пор по размерам, их форма), физико-механических свойств (плотность, прочность, коэффициент теплопроводности) и многих других факторов [3, 12]. Установлено, что с увеличением количества сквозных пор в материале до определенного предела его звукопоглощающие свойства улучшаются. Увеличив количество сквозных пор сверх данного предела, коэффициент звукопоглощения уменьшается. Это связано с уменьшением вязкого трения воздуха в материале [3]. С увеличением размера пор в материале коэффициент звукопоглощения (КЗП) также уменьшается за счет снижения диссипации акустической энергии по вязкостному механизму. Согласно данным многих литературных источников, наиболее эффективными звукопоглощающими свойствами обладают материалы с полидисперсной пористостью [3, 17].

Во многих предыдущих работах авторами были представлены технологические особенности получения пористых стеклокерамических материалов (ПСК) на основе цеолитсодержащих пород за один нагрев шихты [18, 19]. Материал получен полностью из отечественного сырья. Технология достаточно простая: совместный сухой помол кремнистой породы (опока, трепел, диатомит), кальцинированной соды и корректирующих добавок с последующим обжигом при температуре до +850 °C. В результате получен экологичный, легкий, химически стойкий материал в форме блока, который более чем в 2 раза прочнее газо- и пенобетона при равной плотности. А температура его применения достигает +900 °C.

Известно, что свойства любого материала напрямую зависят от его состава и структуры. Разработанные авторами пористые стеклокерамические материалы отличаются как фазовым составом, так и пористостью. В зависимости от состава используемого сырья, а также от режимов обжига разработана аноксидная, диоксидная, волластонитовая и волластонито-комбеитовая пористые стеклокерамики с закрытой и открытой до 70 % пористостью. Материалы и изделия из пористой стеклокерамики рекомендованы к использованию в качестве несущих и самонесущих конструкций стен в зданиях, а также в качестве теплоизоляции, в том числе котельного оборудования, труб и т.п. Результаты исследований звукопоглощающих свойств данных материалов в литературе отсутствуют.

Цель исследования — установить влияние структуры образцов пористой стеклокерамики, полученных на основе цеолитсодержащих пород, на ее звукопоглощающие свойства.

Задачи:

- определить пористость (открытую, закрытую, общую) образцов стеклокерамики;
- методом световой микроскопии и рентгеновской микротомографии (микро-КТ) установить особенности микроструктуры образцов;
- методом рентгенофазового анализа (РФА) определить фазовый состав пористой стеклокерамики;

• установить коэффициент звукопоглощения образцов пористой стеклокерамики импедансным методом.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения звукопоглощающих свойств пористой стеклокерамики были подготовлены 4 вида образцов из блоков, полученных из шихты различного химического и минералогического состава. Методика их получения подробно представлена в предыдущих работах [18, 19]. На рис. 1 показано фото образцов.

Основные физико-механические и теплофизические характеристики образцов ПСК приведены в таблице.

Согласно данным таблицы, исследованные в работе материалы можно использовать в качестве теплоизоляции, а также несущих и самонесущих конструкций стен при малоэтажном строительстве. Высокая максимальная температура использования (до +850 °С) расширяет область применения материалов в качестве высокотемпературной теплоизоляции. Для подтверждения возможности использования пористой стеклокерамики в качестве звукопоглощающих материалов они были испытаны по указанному далее методикам.

1. Открытую, закрытую и общую пористость стеклокерамики определяли по следующей мето-

дике. На первом этапе из блоков выпиливали кубические образцы с размером грани  $50 \pm 5$  мм. Затем устанавливали истинную плотность ( $\rho_0$ , г/см<sup>3</sup>), объем ( $V$ , см<sup>3</sup>) и массу ( $m_0$ , г) сухих образцов. Рассчитывали их среднюю плотность ( $\rho$ , г/см<sup>3</sup>). Образцы помещали в емкость с водой плотностью ( $\rho_w$ , г/см<sup>3</sup>) и выдерживали с погружением ниже поверхности воды на 50 мм. Через каждые 12 ч образцы переворачивали. Максимальное время выдерживания определяли по стабилизации массы образцов. После водонасыщения устанавливали массу образцов на воздухе ( $m_1$ , г). В ходе эксперимента испытывали по три образца каждого состава и определяли среднее значение показателя.

Общую пористость ( $P_t$ , %) вычисляли по формуле:

$$P_t = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \cdot 100. \quad (1)$$

Открытую пористость ( $P_o$ , %) рассчитывали по формуле:

$$P_o = \frac{m_1 - m_0}{V \cdot \rho_w} \cdot 100. \quad (2)$$

Закрытую пористость ( $P_c$ , %) вычисляли по формуле:

$$P_c = P_t - P_o. \quad (3)$$



Рис. 1. Фото образцов ПСК (а) и образцов, подготовленных для испытания в импедансной трубе (б)  
Fig. 1. Photos of PGC specimens (a) and specimens prepared for testing in an impedance pipe (b)

### Характеристики образцов ПСК

Characteristics of PGC specimens

Номер состава Composition Number	Характеристики по ГОСТ 31359–2007 Specifications according to GOST 31359–2007			Характеристики по ГОСТ 5040–2015 Specifications according to GOST 5040–2015
	Марка по средней плотности Brand by average density	Класс по прочности на сжатие Compressive strength class	Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/м·°С Coefficient of thermal conductivity in the dry state, W/m·°C	Рекомендованная максимальная температура применения, °С Maximum operating temperature, °C
C1	D300	B3,5	0,079	+850
C2	D250	B3,5	0,069	+800
C3	D250	B3,5	0,069	+850
C4	D250	B3,5	0,066	+800

2. Световую микроскопию образцов проводили на модульном микроскопе Zeiss Axio Scope.A1 (США).

3. Рентгеновскую микротомографию выполняли на образцах размером  $10 \pm 1$  мм с помощью прибора SkyScan 1172 (Бельгия). Режим съемки: излучение – 67 кВ, 110 мкА, угол поворота опорной стойки —  $360^\circ$ , шаг поворота —  $0,6^\circ$ , разрешение регистрации изображения — 6,9 мкм. Изображения обрабатывали с помощью программного обеспечения CTvox (SkyScan, Бельгия).

4. Рентгенофазовый анализ выполняли на измельченных до фракции менее 80 мкм образцах ПСК с помощью дифрактометра Empyrean PANalytical PIXcel<sup>3D</sup> (Нидерланды). Режим съемки: излучение —  $\text{CuK}_\alpha$ , угол поворота  $2\theta = 5-70^\circ$ , скорость съемки —  $0,0131^\circ/\text{мин}$ , время интеграции — 150 с. Определение фазового состава образцов выполнено методом Ханавальта на основании открытой базы данных по кристаллографии.

5. Коэффициент звукопоглощения пористой стеклокерамики определили импедансным методом при установившихся акустических процессах. Исследование выполнено с помощью прибора фирмы Spectronics, модель ACUPRO Version 4 (США) на образцах длиной 46,3 и 91,3 мм. Длина трубы — 900 мм, внутренний диаметр — 35 мм. На первом этапе устанавливали величину сопротивления продуваемости. Затем рассчитывали постоянную распространения волнового процесса в пористом материале и его характеристическое сопротивление.

Подробная методика исследований представлена в публикации [20].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для установления влияния структуры пористой стеклокерамики на ее звукопоглощающие свойства на первом этапе определена пористость испытываемых образцов. На рис. 2 представлены результаты испытания.

Согласно данным рис. 2, общая пористость испытанных образцов стеклокерамических материалов составила от 87,7 до 90,1 %. В образцах С1 и С2 количество открытых пор не превышает 5 %. Наибольшее количество открытых пор (18,3 %) у стеклокерамических образцов состава С4.

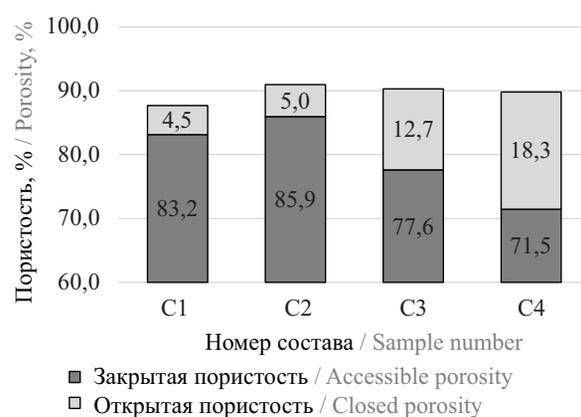


Рис. 2. Пористость образцов

Fig. 2. Porosity of specimens

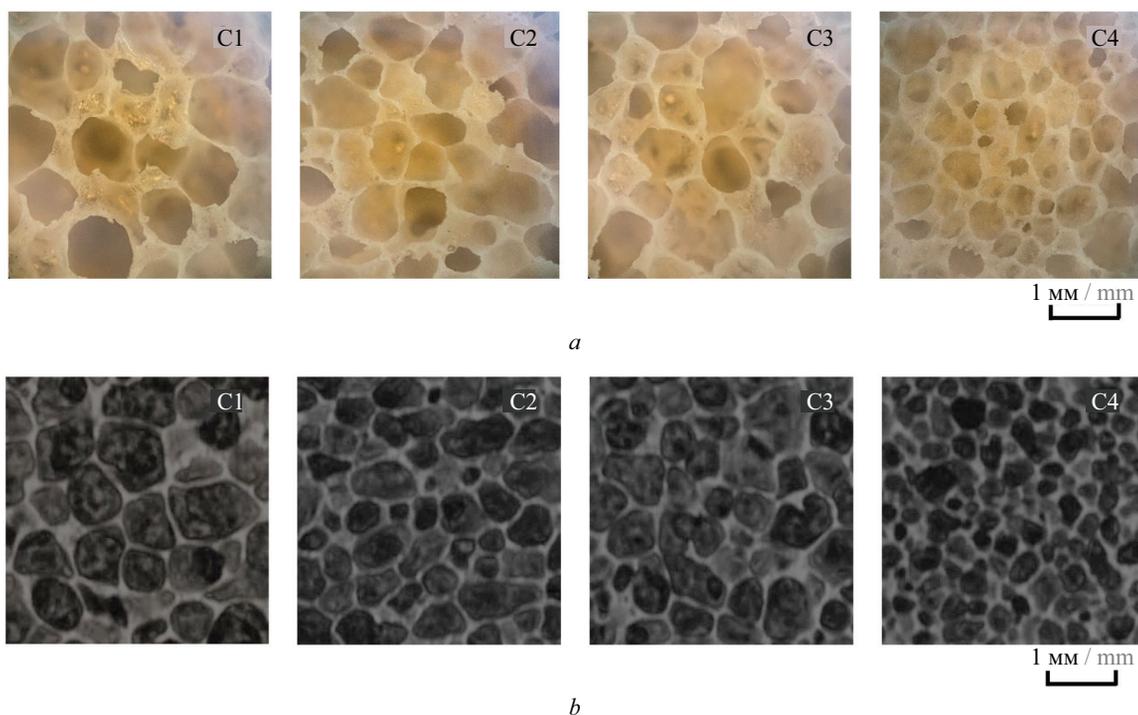


Рис. 3. Световая микроскопия (а) и микро-КТ (b) образцов ПСК

Fig. 3. Light microscopy (a) and micro-CT (b) of PGC samples

Макро- и микроструктура образцов пористой стеклокерамики, полученная методом световой микроскопии и рентгеновской микротомографии, приведена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, большинство пор на поверхности и внутри образца С1 диаметром от 0,5 до 1 мм. Поры в форме шара и сот — замкнутые. Некоторые из них соединены друг с другом. Стенки пор достаточно толстые с характерным стеклянным блеском. Поверхность стенок ровная. Диаметр пор образца С2 варьируется от 0,1 до 1 мм. Форма больших пор вытянутая, мелких в виде шара и сот. Стенки пор тонкие. Некоторые соседние поры также слиты в одну. Поры в образце С3 также имеют разный диаметр и форму. Диаметр пор <1 мм. Все поры в форме шара и сот. Между порами появились сквозные каналы в отдельных местах размером в несколько десятых миллиметра. Большинство пор в образце С4 в виде сот диаметром <0,5 мм. Между ними, как и у образца С3, видны каналы, соединяющие до 10 пор и более. На снимке С4 (рис. 3, б) в стенках пор много светлых точек, что свидетельствует о большом количестве микропор в образце. Полученные в результате анализа данные согласуются с полученными ранее [18, 19].

Результаты РФА образцов пористых стеклокерамических материалов приведены на рис. 4. Рент-

генограммы представлены в диапазоне углов сканирования  $2\theta = 10\text{--}40^\circ$ .

Согласно полученным данным (рис. 4), все испытываемые образцы пористой стеклокерамики состоят из аморфной и кристаллической фазы. Наличие аморфной фазы характеризуется немонотонным изменением фона на всех рентгенограммах в интервале углов от  $15$  до  $35^\circ$  ( $2\theta$ ).

Кристаллическая фаза образцов стеклокерамики С1 состоит из кварца и анортклаза. Наличие кварца в стеклокерамических образцах обусловлено его присутствием в цеолитсодержащей породе, из которой они получены. Анортклаз кристаллизуется, как правило, из безкарбонатных пород с повышенным содержанием глинистых минералов [19]. Основной кристаллической фазой в образце С2 является диопсид, что свидетельствует о наличии в составе шихты, из которой он изготовлен, магнийсодержащих минералов [18]. Кристаллическая фаза в образцах С3 и С4 представлена в основном минералами дивитритом [21] и волластонитом.

Результаты звукопоглощающих свойств образцов пористой стеклокерамики толщиной 46,3 и 91,3 мм, полученные импедансным методом, практически идентичны. На рис. 5 представлены только результаты испытания образцов толщиной 91,3 мм.

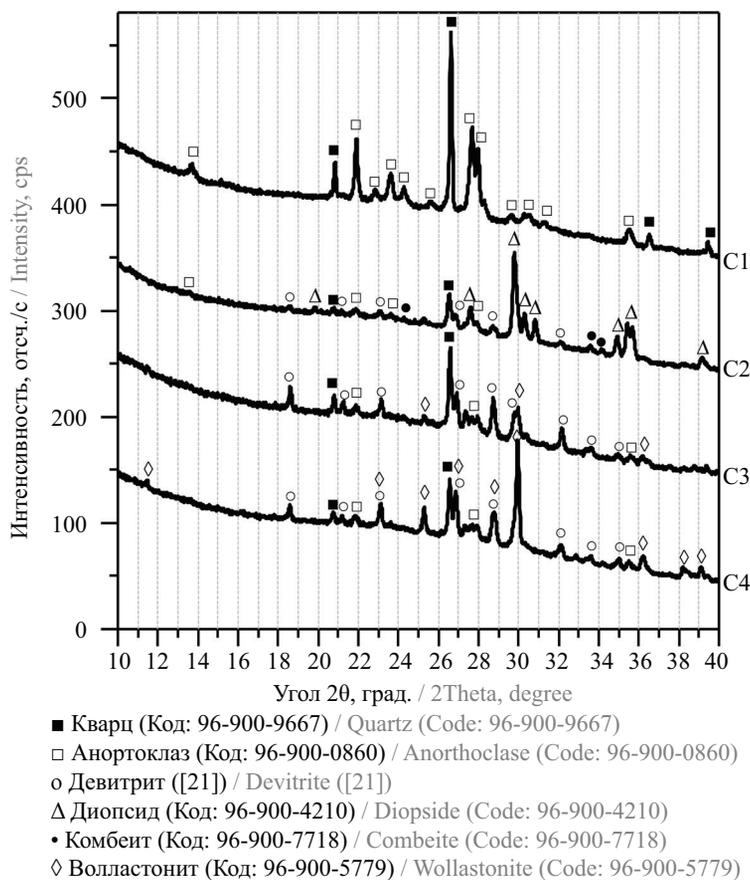


Рис. 4. РФА образцов ПСК

Fig. 4. XRD of PGC specimens

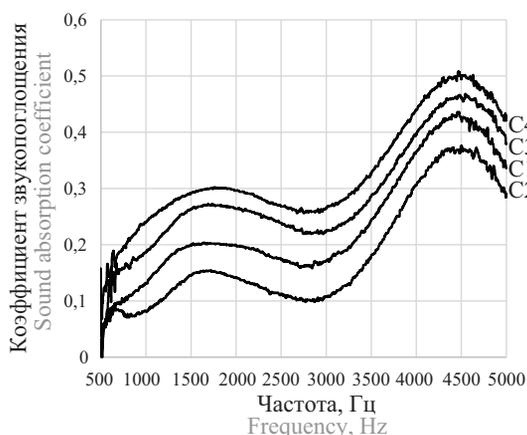


Рис. 5. Звукопоглощающие свойства образцов ПСК

Fig. 5. Sound-absorbing properties of PGC specimens

Согласно полученным данным (рис. 5), на значения звукопоглощающих свойств образцов пористой стеклокерамики основное влияние оказывает открытая пористость материала. С увеличением этого показателя с 4,5 до 18,3 % коэффициент звукопоглощения материала увеличивается в 1,5–2 раза в зависимости от длины звуковых волн. В настоящей работе исследовались образцы ПСК, наиболее отвечающие требованиям строительной отрасли, для которой очень важно, чтобы количество открытых пор в материале было минимальным. Как отмечалось выше, открытая пористость стеклокерамических материалов, полученных на основе цеолитсодержащих пород различного химического состава, может достигать 70 % [18, 19]. Звукопоглощающие свойства таких материалов должны быть гораздо выше. Кроме открытой пористости, размер и форма пор в образцах ПСК также оказывают влияние на КЗП. При практически равном количестве открытых пор в образцах С1 и С2 КЗП выше у материала с более ровной формой пор и их равномерным распределением по объему. Установить влияние фазового состава пористых стеклокерами-

ческих материалов на их звукопоглощающие свойства не удалось.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено влияние вида и характера пор, а также фазового состава образцов пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород на их звукопоглощающие свойства. Исследованы материалы с марками по средней плотности D250 и D300, классом по прочности на сжатие В3,5, с коэффициентом теплопроводности от 0,066 до 0,079 Вт/м·°С и рекомендованной максимальной температурой применения до +850 °С.

Пористая стеклокерамика, полученная на основе цеолитсодержащих пород, имеет ячеистую (мелкопористую) структуру. Размер пор не превышает 1 мм. Исследуемые образцы имеют разный минералогический состав и состоят из аморфной и кристаллической фазы. Основной кристаллической фазой образцов с минимальным количеством открытых пор (4,5 и 5 %) является анортотоклаз или диопсид. С увеличением в составе образцов количества минерала волластонита количество открытых пор увеличивается.

На значения звукопоглощающих свойств образцов пористой стеклокерамики основное влияние оказывает открытая пористость материала. Размер и форма пор образцов ПСК также влияют на КЗП. Наибольший КЗП (0,5) при частоте 4500 Гц у исследуемых образцов ПСК с количеством открытых пор 18,3 %. Установить влияние фазового состава пористых стеклокерамических материалов на их звукопоглощающие свойства не удалось.

Пористую стеклокерамику рекомендуется использовать не только в строительной отрасли в качестве теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов, но и при обеспечении высокого показателя открытой пористости материала в качестве звукопоглощающих материалов, в том числе в машиностроении.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Герасимов А.И. Звукоизоляционные и звукопоглощающие материалы и их применение в строительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 5. С. 209–215. EDN MTPDKF.
2. Радоуцкий В.Ю., Шульженко В.Н., Степанова М.Н. Современные звукопоглощающие материалы и конструкции // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 76–79. EDN VWZDJJ.
3. Шашкеев К.А., Шульдеишов Е.М., Попков О.В., Краев И.Д., Юрков Г.Ю. Пористые звукопоглощающие материалы: обзор // Труды ВИАМ. 2016. № 6 (42).

- С. 6. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-6-6. EDN WBFNJT.
4. Arenas J.P., Crocker M.J. Recent trends in porous sound-absorbing materials // Sound & Vibration. 2010. Vol. 44. Issue 7. Pp. 12–17.
5. Yang T., Hu L., Xiong X., Petru M., Noman M.T., Mishra R., Militký J. Sound absorption properties of natural fibers: a review // Sustainability. 2020. Vol. 12. Issue 20. P. 8477. DOI: 10.3390/su12208477
6. Yang M., Sheng P. Sound absorption structures: from porous media to acoustic metamaterials // Annual Review of Materials Research. 2017. Vol. 47.

Issue 1. Pp. 83–114. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070616-124032

7. *Khosrozadeh A., Rasuli R., Hamzeloopak H., Abedini Y.* Wettability and sound absorption of graphene oxide doped polymer hydrogel // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-021-95641-z

8. *Li T.T., Chuang Y.C., Huang C.H., Lou C.W., Lin J.H.* Applying vermiculite and perlite fillers to sound-absorbing/thermal-insulating resilient PU foam composites // *Fibers and Polymers*. 2015. Vol. 16. Issue 3. Pp. 691–698. DOI: 10.1007/s12221-015-0691-8

9. *Fediuk R., Amran M., Vatin N., Vasilev Y., Levsovik V., Ozbakkaloglu T.* Acoustic properties of innovative concretes : a review // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 2. P. 398. DOI: 10.3390/ma14020398

10. *Li Z., Yang Ch., Yan K., Xia M., Yan Z., Wang D. et al.* Rational design of a polypropylene composite foam with open-cell structure via graphite conductive network for sound absorption // *Soft Matter*. 2024. Vol. 20. Issue 5. Pp. 1089–1099. DOI: 10.1039/d3sm01432k

11. *Zhang X., Chen X., Min W., Liang G., Zhang W., Yao Sh. et al.* Preparation of multifunctional ceramic foams for sound absorption, waterproofing, and antibacterial applications // *RSC Advances*. 2024. Vol. 14. Issue 2. Pp. 1009–1017. DOI: 10.1039/D3RA06675D

12. *Бессонов И.В., Булгаков Б.И., Александрова О.В., Горбунова Э.А.* Исследование эксплуатационных качеств вспененных материалов на основе жидкого стекла холодного отверждения // *Нанотехнологии в строительстве : научный интернет-журнал*. 2023. Т. 15. № 5. С. 424–437. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-5-424-437. EDN WMFMFZ.

13. *Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С.* Применение техногенного сырья в процессе синтеза пеностекла с гетерогенной микроструктурой // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 2. С. 258–269. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.258-269. EDN HISRSO.

14. *Beregovoi V.A., Sorokin D.S., Beregovoi A.M.* Glass-crystalline materials of a cellular structure, formed by vibration foaming technology // *Defect and*

*Diffusion Forum*. 2021. Vol. 410. Pp. 823–828. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823

15. *Hisham N.A.N., Zaid M.H.M., Aziz S.H.A., Muhammad F.D.* Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various temperatures // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 3. P. 570. DOI: 10.3390/ma14030570

16. *Ivanov K.S.* Associated synthesis of microgranular foam-glass-ceramic from diatomaceous shales // *Glass and Ceramics*. 2022. Vol. 79. Issue 5–6. Pp. 234–238. DOI: 10.1007/s10717-022-00491-4

17. *Liu Sh., Chen W., Zhang Y.* Design optimization of porous fibrous material for maximizing absorption of sounds under set frequency bands // *Applied Acoustics*. 2014. Vol. 76. Pp. 319–328. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.08.014

18. *Rodin A.I., Ermakov A.A., Erofeeva I.V., Erofeev V.T.* Structure and properties of porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of Mg(OH)<sub>2</sub> // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Vol. 51. Issue 5. Pp. 127–141. DOI: 10.18149/MPM.5152023\_13. EDN CAAATB.

19. *Rodin A., Ermakov A., Kyashkin V., Rodina N., Erofeev V.* Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from siliceous rocks // *Magazine of Civil Engineering*. 2023. No. 5 (121). Pp. 125–135. DOI: 10.34910/MCE.121.9. EDN ERASHS.

20. *Кузнецов А.В., Иголкин А.А., Сафин А.И., Пантюшин А.О.* Математическая модель акустических характеристик пенополиуретана, применяемого для звукопоглощения в ракетно-космической технике // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2021. Т. 20. № 2. С. 53–62. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-53-62. EDN FQVVB.

21. *Kahlenberg V., Girtler D., Arroyabe E., Kaindl R., Töbrens D.M.* Devitrite (Na<sub>2</sub>Ca<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>16</sub>) — structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses // *Mineralogy and Petrology*. 2010. Vol. 100. Issue 1–2. Pp. 1–9. DOI: 10.1007/s00710-010-0116-8

Поступила в редакцию 5 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 9 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 27 мая 2024 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Анатолий Анатольевич Ермаков** — аспирант кафедры строительных материалов и технологий; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарева)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; SPIN-код: 8448-7639, Scopus: 57255879600, ResearcherID: AАН-5492-2021, ORCID: 0000-0002-2560-0948; anatoly.ermakov97@mail.ru;

**Артур Ильгизарович Сафин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок; **Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет)**; 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34; SPIN-код: 3448-5450, Scopus: 55651858200, ResearcherID: R-1785-2017, ORCID: 0000-0003-0936-4364; safin.ai@ssau.ru;

**Александр Иванович Родин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им.**

Н.П. Огарёва (МГУ им. Н.П. Огарева); 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; SPIN-код: 9920-1797, Scopus: 57191249816, ResearcherID: M-9822-2017, ORCID: 0000-0002-8080-9808; al\_rodin@mail.ru.

Вклад авторов:

Ермаков А.А. — концепция исследования, подготовка и исследование образцов на пористость, определение особенностей макроструктуры, написание исходного текста.

Сафин А.И. — определение коэффициента звукопоглощения образцов, научное редактирование текста.

Родин А.И. — научное руководство, развитие методологии, определение фазового состава образцов, обработка материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Gerasimov A.I. Sound-insulating and sound-absorbing materials and their application in construction. *Academia. Architecture and Construction*. 2009; 5:209-215. EDN MTPDKF. (rus.).
2. Radoutsky V.Yu., Stepanova M.N., Shulzhenko V.N. Modern sound-absorbing materials and structures. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2016; 6:76-79. EDN VWZDJJ. (rus.).
3. Shashkeev K.A., Shuldeshov E.M., Popkov O.V., Kraev I.D., Yurkov G.Yu. Porous sound-absorbing materials : review. *Proceedings of VIAM*. 2016; 6(42):6. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-6-6. EDN WBFNJT. (rus.).
4. Arenas J.P., Crocker M.J. Recent trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & Vibration*. 2010; 44(7):12-17.
5. Yang T., Hu L., Xiong X., Petru M., Noman M.T., Mishra R., Militky J. Sound absorption properties of natural fibers : a review. *Sustainability*. 2020; 12(20):8477. DOI: 10.3390/su12208477
6. Yang M., Sheng P. Sound absorption structures: from porous media to acoustic metamaterials. *Annual Review of Materials Research*. 2017; 47(1):83-114. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070616-124032
7. Khosrozadeh A., Rasuli R., Hamzeloopak H., Abedini Y. Wettability and sound absorption of graphene oxide doped polymer hydrogel. *Scientific Reports*. 2021; 11(1). DOI: 10.1038/s41598-021-95641-z
8. Li T.T., Chuang Y.C., Huang C.H., Lou C.W., Lin J.H. Applying vermiculite and perlite fillers to sound-absorbing/thermal-insulating resilient PU foam composites. *Fibers and Polymers*. 2015; 16(3):691-698. DOI: 10.1007/s12221-015-0691-8
9. Fediuk R., Amran M., Vatin N., Vasilev Y., Levsovik V., Ozbakkaloglu T. Acoustic properties of innovative concretes : a review. *Materials*. 2021; 14(2):398. DOI: 10.3390/ma14020398
10. Li Z., Yang Ch., Yan K., Xia M., Yan Z., Wang D. et al. Rational design of a polypropylene composite foam with open-cell structure via graphite conductive network for sound absorption. *Soft Matter*. 2024; 20(5):1089-1099. DOI: 10.1039/d3sm01432k
11. Zhang X., Chen X., Min W., Liang G., Zhang W., Yao Sh. et al. Preparation of multifunctional ceramic foams for sound absorption, waterproofing, and antibacterial applications. *RSC Advances*. 2024; 14(2):1009-1017. DOI: 10.1039/D3RA06675D
12. Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Gorbunova E.A. Performance evaluation of foamed materials based on cold-cured liquid glass. *Nanotechnologies in Construction : a Scientific Internet-Journal*. 2023; 15(5):424-437. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-5-424-437. EDN WMFMFZ. (rus.).
13. Fedosov S.V., Bakanov M.O., Grushko I.S. Using anthropogenic raw materials in the process of synthesizing foam glass with heterogeneous microstructure. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(2):258-269. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.258-269. EDN HISRSO. (rus.).
14. Beregovoi V.A., Sorokin D.S., Beregovoi A.M. Glass-crystalline materials of a cellular structure, formed by vibration foaming technology. *Defect and Diffusion Forum*. 2021; 410:823-828. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823
15. Hisham N.A.N., Zaid M.H.M., Aziz S.H.A., Muhammad F.D. Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various temperatures. *Materials*. 2021; 14(3):570. DOI: 10.3390/ma14030570
16. Ivanov K.S. Associated synthesis of microgranular foam-glass-ceramic from diatomaceous shales. *Glass and Ceramics*. 2022; 79(5-6):234-238. DOI: 10.1007/s10717-022-00491-4
17. Liu Sh., Chen W., Zhang Y. Design optimization of porous fibrous materials for maximizing absorption of sound under set frequency bands. *Applied Acoustics*. 2014; 76:319-328. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.08.014
18. Rodin A.I., Ermakov A.A., Erofeeva I.V., Erofeev V.T. Structure and properties of porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of Mg(OH)<sub>2</sub>. *Materials Physics and Mechanics*. 2023; 51(5):127-141. DOI: 10.18149/MPM.5152023\_13. EDN CAAATB.
19. Rodin A., Ermakov A., Kyashkin V., Rodina N., Erofeev V. Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from

siliceous rocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2023; 5(121):125-135. DOI: 10.34910/MCE.121.9. EDN ERASHS.

20. Kuznetsov A.V., Igolkin A.A., Safin A.I., Pantyushin A.O. Mathematical model of acoustic characteristics of polyurethane foam used for sound absorption in aerospace engineering. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021; 20(2):53-62.

DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-53-62. EDN FQVVBD. (rus.).

21. Kahlenberg V., Girtler D., Arroyabe E., Kaindl R., Töbrens D.M. Devitrite ( $\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$ ) — structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses. *Mineralogy and Petrology*. 2010; 100(1-2):1-9. DOI: 10.1007/s00710-010-0116-8

Received April 5, 2024.

Adopted in revised form on April 9, 2024.

Approved for publication on May 27, 2024.

**BI O N O T E S:** **Anatoly A. Ermakov** — postgraduate student of the Department of Building Materials and Technologies; **National Research Ogarev Mordovia State University (MRSU)**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; SPIN-code: 8448-7639, Scopus: 57255879600, ResearcherID: AAH-5492-2021, ORCID: 0000-0002-2560-0948; anatoly.ermakov97@mail.ru;

**Artur I. Safin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automatic Systems of Power Plants; **Samara National Research University (Samara University)**; 34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation; SPIN-code: 3448-5450, Scopus: 55651858200, ResearcherID: R-1785-2017, ORCID: 0000-0003-0936-4364; safin.ai@ssau.ru;

**Aleksander I. Rodin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials and Technologies; **National Research Ogarev Mordovia State University (MRSU)**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; SPIN-code: 9920-1797, Scopus: 57191249816, ResearcherID: M-9822-2017, ORCID: 0000-0002-8080-9808; al\_rodin@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Anatoly A. Ermakov — the concept of research, preparation and examination of samples for porosity, determination of macrostructure features, writing the source text.*

*Artur I. Safin — determination of the sound absorption coefficient of samples, scientific text editing.*

*Aleksander I. Rodin — scientific guidance, development of methodology, determination of the phase composition of samples, material processing.*

*The authors declare no conflict of interest.*