



Research Article Received: February 24, 2023

Accepted: March 25, 2023

ISSN 2658-5553 Published: April 1, 2023

Porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of magnesite

Rodin, Alexander Ivanovich^{1*} D Ermakov, Anatoly Anatolyevich¹ D Kravchuk, Alexey Sergeevich¹ D

¹National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation; <u>al_rodin@mail.ru</u> (R.A.I.); <u>anatoly.ermakov97@mail.ru</u> (E.A.A.); <u>a.kravchuk.s@yandex.ru</u> (K.A.S.) Correspondence:* email <u>al_rodin@mail.ru</u>; contact phone <u>+79510514528</u>

Keywords:

Porous glass ceramics; Siliceous rocks; Magnesite; Apparent density; Strength; Thermal conductivity

Abstract:

The influence of MgCO₃ in the composition of a charge of siliceous rocks, soda ash and potassium chloride on the phase composition, macrostructure and properties of porous glass-ceramic materials has been established. Samples of glass-ceramic materials were obtained by joint mechanochemical activation of components in a planetary ball mill followed by firing at a temperature of 820 °C. The effect of the amount of the additive on the phase composition of porous glass ceramics samples was established using the method of X-ray phase analysis (XRD). The developed materials have the form of blocks with a uniform fine-pored structure. With an increase in the amount of MgCO₃ composition of the charge in glass ceramics, the amount of minerals diopside and combeite increases. The apparent density of the samples is in the range of $184-234 \text{ kg/m}^3$, flexural and compressive strength is up to 1.57 MPa and 4.24 MPa, respectively, the thermal conductivity coefficient is $0.059-0.067 \text{ W/m}^{\circ}$ C. The developed materials are superior in many respects to foam glass and porous glass ceramics from industrial waste and can be recommended as thermal insulation in the construction of industrial and civil facilities.

1 Введение / Introduction

Пористые стеклокерамические материалы широко применяются в строительной отрасли. Они не горят, имеют относительно высокую прочность при низкой плотности, плохо проводят тепло, не разрушаются при эксплуатации в химически агрессивных средах и при высокой температуре, а также имеют много других уникальных свойств [1]. Благодаря своим свойствам такие материалы используют для возведения стен в зданиях [2], ими утепляют фасады, перекрытия, подвальные помещения [3], [4], используют в качестве звукоизоляционных используется материалов [5]. Пористая стеклокерамика в качестве теплоизоляции промышленных печей [6], а также объектов, которые эксплуатируются в химических агрессивных средах [7] и мн. др.

Строительные стеклокерамические материалы получают как из природных горных пород, так и из отходов промышленного производства. В качестве отходов промышленного производства используют в основном металлургические шлаки [8], [9] и золы [1], [3], часто используют отходы стекольного производства [5], [10]. В качестве природных горных пород при производстве строительных пористых стеклокерамических материалов используют кремнистые, карбонатные, глинистые и другие породы [11]–[13].

Получить пористую структуру стеклокерамических материалов можно несколькими способами [1], [14], [15]. Наибольшее распространение получил способ порошкового вспенивания,



когда шихту размалывают совместно с газообразующими добавками. Затем ее засыпают в формы или на конвейерную ленту и обжигают в печи. При определенной температуре шихта начинает плавиться, а газообразующая добавка выделять газ, который и вспенивает шихту. В качестве газообразующих добавок используют кальцинированную соду [16], различные карбонаты [1], оксид марганца совместно с углеродом [5], [17] и мн. др.

Снижение себестоимости производства пеностекла, а также разработка составов и технологии получения пористых стеклокерамических материалов из горных пород за один нагрев сырья важная задача современного материаловедения. Одно из решений данной задачи – это получение пористой стеклокерамики методом щелочной активации компонентов [11]–[13]. При данном способе цеолитсодержащие породы смешивают с водным раствором *NaOH* высокой концентрации, гранулируют и обжигают. В результате получили пористый стеклокерамический материал в форме гранул за один нагрев шихты без использования дополнительных вспенивающих компонентов. В литературе подробно описан механизм, по которому происходит вспенивание материала. При нагревании в шихте дегидратируют минералы цеолитовой группы и закупоривают в микропорах поверхностные гидроксильные группы [13], [18]. При дальнейшем увеличении температуры нагрева шихта размягчается, а гидроксильные группы конденсируются с выделением водяного пара, который формирует пористую структуру материала. Однако, при производстве пористой стеклокерамики по данной технологии быстро изнашивается оборудование в результате воздействия щелочей, а также выделяются вредные вещества в атмосферу [19]. Из-за чего данная технология не нашла широкого применения.

Известен способ получения пористой стеклокерамики за один нагрев шихты из кремнистых (цеолитсодержащих) пород методом порошкового вспенивания [20], [21]. Предварительно высушенную кремнистую породу с содержанием цеолита не более 25 % размалывали совместно с кальцинированной содой или термонатритом в планетарной шаровой мельнице. Полученную шихту засыпали в формы или на конвейерную ленту и обжигали. В результате получили стеклокерамические материалы с равномерной мелкопористой структурой, которые по многим свойствам превосходят пеностекло. Известно, что горные породы, в том числе и кремнистые (цеолитсодержащие) породы, имеют разный химический и минералогический состав [13], [22]. Полученные из разного сырья образцы пористой стеклокерамики имеют разную структуру, фазовый состав и свойства [21]. При увеличении в составе стеклокерамики Fe_2O_3 и CaO снижается предельная температура ее эксплуатации [8], [23], а при увеличении количества Al_2O_3 наоборот увеличивается [24]. Примеси (например, NaCl), которые попадают в стеклокерамику вместе с плавнями, также могут влиять на структуру и свойства материала [20]. Влияние $MgCO_3$ в составе шихты для пористой стеклокерамики из кремнистых пород на ее структуру и свойства в литературе изучено недостаточно.

Цель исследования: из кремнистых пород и магнезита получить пористые стеклокерамические материалы; изучить влияние добавки на структуру и свойства пористых стеклокерамических материалов.

Задачи:

 определить влияние количества добавки в составе шихты на фазовый состав и макроструктуру обожженной пористой стеклокерамики;

– определить влияние фазового состава и макроструктуры образцов пористой стеклокерамики на их физико-механические (кажущаяся плотность, прочность при изгибе и сжатии) и теплофизические (коэффициент теплопроводности) свойства.

2 Материалы и методы / Materials and Methods

Шихту для получения образцов пористой стеклокерамики изготавливали из следующих кремнистых пород:

– Цеолитсодержащий трепел. Химический состав породы: $SiO_2 - 62.3$ %, CaO - 11.3 %, $Al_2O_3 - 6.7$ %, $Fe_2O_3 - 2.0$ %, $K_2O - 1.4$ %, MgO - 0.9 %, $TiO_2 - 0.3$ %, $Na_2O - 0.2$ %, $SO_3 - 0.1$ %, $P_2O_5 - 0.1$ %, ППП – 14,7 %. Минералогический состав породы: кристобалит (SiO_2) – 19.2 %, гейландит ((Ca, Sr, K_2, Na_2)[$Al_2Si_6O_{16}$]· $5H_2O$) – 19.6 %, мусковит ($KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$)



– 9.9 %, кальцит (*CaCO*₃) – 21.3 %, кварц (*SiO*₂) – 8.5 %, тридимит (*SiO*₂) – 1.5 %, аморфная фаза – 20.0 %;

– Диатомит. Химический состав породы: $SiO_2 - 81.5$ %, CaO - 1.5 %, $Al_2O_3 - 5.3$ %, $Fe_2O_3 - 2.1$ %, $K_2O - 1.0$ %, MgO - 0.9 %, $TiO_2 - 0.3$ %, $Na_2O - 0.2$ %, $SO_3 - 1.8$ %, ППП - 5.4 %. Минералогический состав породы: мусковит ($KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$) – 8.1 %, кварц (SiO_2) – 10.9 %, аморфная фаза – 80.0 %.

В качестве добавок использовали:

– Магнезит (*MgCO*₃) для улучшения структуры и свойств образцов пористой стеклокерамики;

– Хлористый калий (*KCl*) для снижения температуры декарбонизации кальцита и получения равномерной пористой структуры;

– Кальцинированную соду (*Na*₂*CO*₃) для снижения температуры размягчения и вспенивания шихты.

Массовая доля основного вещества всех используемых добавок не менее 97 %.

Образцы пористых стеклокерамических материалов были изготовлены по следующей технологии:

– Кремнистые породы вместе с добавками измельчали в планетарной шаровой мельнице Retsch PM 400 в течение 30 минут (скорость вращения барабанов мельницы 350 об./мин). Составы шихты представлены в таблице 1.

№ состава	Состав шихты, %				
	Трепел	Диатомит	MgCO ₃	Na ₂ CO ₃	KCl
C1	71.5	10	-	18.2	0.3
C2	69.2	10	2.3		
C3	66.9	10	4.6		
C4	66.5	15	-		
C5	64.2	15	2.3		
C6	61.9	15	4.6		

Таблица 1. Составы шихты Table 1. Charge mixture's compositions

– Полученную шихту засыпали в металлические формы и обжигали в муфельной печи (формы предварительно обмазывали каолиновой глиной). Программа обжига шихты: нагрев до температуры 640 °C со скоростью 6 °C/мин, выдержка при 640 °C в течение 1 часа, нагрев до 820 °C со скоростью 6 °C/мин, выдержка при 820 °C в течение 30 минут. Выдержка при температуре 640 °C необходима для удаления избыточных газов, образующихся вследствие разложения отдельных минералов из состава шихты (кальцит, мусковит и т.д.). После охлаждения формы с полученным материалом вместе с печью до 40 °C, ее разбирали, а образцы подготавливали для дальнейших испытаний.

Рентгенофазовый анализ обожженных образцов стеклокерамики проводили с использованием дифрактометра Empyrean PANalytical (Производитель: «PANalytical B.V.», Нидерланды). Образцы измельчали до фракции <90 мкм. Дифракционные картины регистрировались в излучении CuK_α в диапазоне углов 2 Θ от 5° до 45°. Шаг сканирования – 0.0131°/мин, временя интеграции – 150 сек. Качественный фазовый состав образцов определяли по методу Ханавальта с использованием открытой базы данных по кристаллографии.

Влияние добавки в составе шихты на макроструктуру пористой стеклокерамики установлено методом сканирования поверхности образцов с разрешением 600х600 dpi.

Кажущуюся плотность вспененных стеклокерамических материалов определяли в соответсвии с методикой, представленой в работе [21].

Коэффициент теплопроводности образцов определяли зондовым методом с использованием мобильного измерителя теплопроводности (Модель: МИТ-1, производитель: ООО НПП «Интерприбор», г. Челябинск, Россия). Исследования проводились в соответсвии с инструкцией к прибору на сухих образцах кубической формы 90×90×90 мм при температуре 22±2 °C. В центре грани куба просверливали отверстие в которое погружали зонд (диаметр зонда



6 мм) и снимали показания с прибора. За конечный результат принимали среднее значение результатов испытания двух образцов каждого состава.

Определение предела прочности при изгибе производили на сухих образцах-балочках размерами 120×30×30 мм. Образец укладывали горизонтально на 2 цилиндрические опоры с расстоянием между ними 100±1 мм. Сверху по всей ширине образца помещали цилиндрический стержень на равном расстоянии от опор, через который, со скоростью 5 мм/мин, передавали нагрузку на образец. Диаметр опор и стержня – 6±0.1 мм. За максимальное разрушающее усилие принимали нагрузку, при которой образец разрушился. Предел прочности при изгибе определяли по стандартной формуле. За окончательный результат принимали среднее значение результатов испытания трех образцов каждого состава.

Предел прочности при сжатии вспененных стеклокерамических материалов определяли на сухих кубических образцах с размером грани 50±5 мм. Значение, при котором образец разрушался с растрескиванием или сминался в поверхностных слоях на 10 % от исходного значения высоты, принимали за максимальное разрушающее усилие. Предел прочности при сжатии рассчитывали по стандартной формуле, как отношение максимального разрушающего усилия к площади поперечного сечения образца. За окончательный результат принимали среднее значение результатов испытания пяти образцов для каждого состава.

3 Результаты и обсуждение / Results and Discussion

Влияние количества добавки магнезита в составе шихты на фазовый состав обожженной пористой стеклокерамики представлено на рис. 1.





Rodin, A.; Ermakov, A.; Kravchuk, A. Porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of magnesite; 2023; *AlfaBuild*; **26** Article No 2605. doi: 10.57728/ALF.26.5



Согласно рис. 1, все образцы пористой стеклокерамики состоят из аморфной и кристаллической фазы. О наличии аморфной фазы можно утверждать по немонотонному изменению фона в интервале углов от 17° до 37° (2 Θ). Изменение количесвта аморфной фазы от введения в состав шихты магнезита до 4,6 % не установлено. Кристаллическая фаза образцов, полученных без $MgCO_3$ в составе (C1, C4), в основном состоит из кварца [SiO₂, Code: 96-900-9667], девитрита [*Na*₂*Ca*₃*Si*₆*O*₁₆, [25]], волластонита [*CaSiO*₃, Code: 96-900-5779] и анортоклаза [(*Na*_{0.85}*K*_{0.15})(*AlSi*₃*O*₈), Code: 96-900-0860]. При добавлении в состав шихты *MgCO*₃ в количестве до 4.6 %, волластонит в составе стеклокерамики замещается диопсидом [*Mg*_{0.56}*Ca*_{0.44}*SiO*₃, Code: 96-900-4210], а девитрит – комбеитом [Na₂Ca₂Si₃O₉ Code: 96-900-7718], причем, если у составов с 10 % диатомита (C2, C3) комбеит образуется уже при добавлении 2.3 % MgCO₃ (C2), то у составов с 15 % диатомита (С5, С6) комбеит образуется только при добавлении 4.6 % добавки (С6). Судя по всему, с диатомитом в шихту вводится необходимое для кристаллизации девитрита количество химически активного SiO₂ недостаток которого приводит к кристаллизации в стеклокерамике комбеита. Кроме того, на рентгенограммах образцов С2, С3, С5, С6 обнаружен минерал периклаз [MgO, Code: 96-900-6464], что свидельствует о неполной реакции образования диопсида из магнезита и кремнисой породы. Полученные данные коррелируют с результатами других авторов [26].

На рис. 2 представлены сканы поверхности образцов пористой стеклокерамики на основе шихты из кремнистых пород с добавлением магнезита.



10 mm

Рис. 2 – Скан поверхности образцов пористой стеклокерамики Fig. 2 – Scan of the surface of porous glass-ceramic samples

Согласно данным рис. 2, все образцы пористой стеклокерамики имеют однородную мелкопористую структуру по всей площади поверхности. Диаметр пор образцов из шихты без магнезита в составе уменьшается приблизительно с 1.0 до 0.5 мм при увеличении в составе шихты диатомита от 10 до 15 % (образцы С1, С4). При добавлении в состав шихты $MgCO_3$ в количестве до 4.6 % размер пор увеличивается до ≈2 мм у образцов с 10 % диатомита в составе (C2, C3) и до ≈1.5 мм у образцов с 15 % диатомита в составе (C5, C6). Анализируя данные РФА (рис. 1), можно сделать вывод, что увеличение размера пор, вероятнее всего, связано с появлением в составе стеклокерамики минерала комбеита.



Установлено изменение цвета поверхности образцов при увеличении в составе шихты $MgCO_3$. Цвет становится бежевым, а не светло-серым, как у образцов без добавки в составе. Эффект, вероятно, может быть связан с увеличением в составе образцов минерала диопсида (рис.1), который, как известно, имеет различные цветовые оттенки [27].

На рис. 3 представлены графики зависимости кажущейся плотности и коэффициента теплопроводности образцов пористых стеклокерамических материалов от количества диатомита и добавки *MgCO*₃ в составе шихты.



Рис. 3 – Кажущаяся плотность (а) и коэффициент теплопроводности (б) образцов Fig. 3 – Apparent density (a) and thermal conductivity (b) of samples

Согласно полученным данным (рис. 3, а), увеличение количества диатомита с 10 % до 15 % в составе шихты приводит к линейному увеличению кажущейся плотности образцов пористой стеклокерамики. Плотность увеличилась с ≈197 кг/м³ (С1) до ≈234 кг/м³ (С4). С добавлением в состав шихты *MgCO*₃ в количестве до 4.6 % кажущаяся плотность образцов уменьшилась практически линейно до ≈184 кг/м³ у образцов с 10 % диатомита и до ≈209 кг/м³ у образцов с 15 % диатомита. Полученные данные согласуются с результатами анализа макроструктуры и РФА образцов. Как уже было сказано ранее, скорее всего, именно кристаллизация в стеклокерамике минерала комбеита приводит к увеличению размера пор и, следовательно, снижению кажущейся плотности.

Согласно экспериментальным данным, представленным на рис. 3, б, коэффициент теплопроводности образцов пористой стеклокерамики прямо пропорционально зависит от их кажущейся плотности. Образец С3 имеет наименьший коэффициент теплопроводности (0.059 Вт/м·°С) при кажущейся плотности ≈184 кг/м³. Наибольший коэффициент теплопроводности (0.067 Вт/м·°С) у образца С4 (кажущаяся плотность ≈234 кг/м³). Влияние фазового состава образцов пористых стеклокерамических материалов на их коэффициент теплопроводности не выявлено. Полученные результаты коррелируют с данными полученными ранее [20], [21].

Влияние количества добавки *MgCO*₃ в составе шихты на прочность при изгибе и сжатии образцов пористых стеклокерамических материалов представлено на рис. 4.





Рис. 4 – Прочность при изгибе (а) и сжатии (б) образцов Fig. 4 – Bending (a) and compressive (b) strength of samples

Согласно проведенным исследованиям, прочность при изгибе (рис. 4, а) и сжатии (рис. 4, б) образцов пористых стеклокерамических материалов линейно связана с их кажущейся плотностью. При увеличении в составе шихты $MgCO_3$ до 4.6 % уменьшилась кажущаяся плотность образцов и, как следствие, их прочностные характеристики. Наибольшее значение прочности при изгибе (≈1.57 МПа) и сжатии (≈4.24 МПа) у образца С4 при кажущейся плотности ≈234 кг/м³, наименьшее (при изгибе ≈0.63 МПа и при сжатии ≈1.41 МПа) у образца С3 при кажущейся плотности ≈184 кг/м³. Установить зависимости прочностных показателей образцов от их фазового состава не удалось. Добавка $MgCO_3$ позволила снизить кажущуюся плотность образцов стеклокерамики, которые при равной плотности превосходят по прочностным показателям пеностекло и стеклокерамику из отходов промышленного производства [1, 3, 7].

4 Выводы / Conclusions

Получены образцы пористой стеклокерамики из шихты, состоящей из кремнистых пород, Na_2CO_3 , $MgCO_3$ и KCl. Образцы получали совместным размолом всех компонентов в планетарной шаровой мельнице с последующим обжигом в муфельной печи при температуре 820 °C. Установлено влияние количества добавки $MgCO_3$ в составе шихты на структуру и свойства образцов пористой стеклокерамики.

1. Методом РФА установлено влияние добавки $MgCO_3$ в количестве до 4.6 % в составе шихты на фазовый состав образцов пористой стеклокерамики. Выявлено, что кристаллическая фаза образцов без добавки $MgCO_3$ состоит из кварца, девитрита, волластонита и анортоклаза. При добавлении в состав шихты $MgCO_3$ в образцах образуются диопсид и комбеит, замещающие волластонит и девитрит соответственно.

2. Добавка *MgCO*₃ существенно повлияла на макроструктуру образцов пористой стеклокерамики. Разработанные материалы имеют однородную мелкопористую структуру. Диаметр пор увеличивается с увеличением в составе шихты количества добавки.

3. Образцы разработанной пористой стеклокерамики имеют кажущуюся плотность 184– 234 кг/м³, прочность при изгибе и сжатии до 1.57 МПа и 4.24 МПа соответственно, коэффициент теплопроводности 0.059–0.067 Вт/м[•]С.

4. Разработанная пористая стеклокерамика по своим свойствам превосходит пеностекло и пористую стеклокерамику из отходов промышленности. Рекомендуется использовать ее в качестве теплоизоляционного материала при строительстве и ремонте объектов промышленного и гражданского назначения.



5 Финансирование / Fundings

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-10422).

References

- 1. Fernandes, H.R., Tulyaganov, D.U., Ferreira, J.M.F. (2009) Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International.* **35**. 229–235. <u>http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.10.019</u>.
- König, J., Lopez-Gil, A., Cimavilla-Roman, P., Rodriguez-Perez, M.A., Petersen, R.R., Østergaard, M.B., Iversen, N., Yue, Y., Spreitzer, M. (2020) Synthesis and properties of openand closed-porous foamed glass with a low density. *Construction and Building Materials.* 247. <u>http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118574</u>.
- Zhu, M., Ji, R., Li, Z., Wang, H., Liu, L., Zhang, Z. (2016) Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. *Construction and Building Materials.* **112.** 398–405. <u>http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183</u>.
- 4. Vatin, N.I., Nemova, D.V., Kazimirova, A.S., Gureev, K.N. (2014) Increase of energy efficiency of the building of kindergarten. *Advanced Materials Research*. **953-954**. 1537–1544. http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.953-954.1537.
- Kyaw Oo D'Amore, G., Caniato, M., Travan, A., Turco, G., Marsich, L., Ferluga, A., Schmid, C. (2017) Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*. **165**. 1306–1315. <u>http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.214</u>.
- Guo, H., Ye, F., Li, W., Song, X., Xie, G. (2015) Preparation and characterization of foamed microporous mullite ceramics based on kyanite. *Ceramics International*. **41**. 14645–14651. <u>http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.186</u>.
- Yatsenko, E.A., Ryabova, A.V., Goltsman, B.M. (2019) Development of fiber-glass composite coatings for protection of steel oil pipelines from internal and external corrosion. *Chernye Metally.* 12. 46–51. <u>https://rudmet.ru/journal/1879/article/31935/</u>.
- Jia, R., Deng, L., Yun, F., Li, H., Zhang, X., Jia, X. (2019) Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. *Materials Chemistry and Physics.* 233. 155–162. <u>http://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065</u>.
- Cao, J., Lu, J., Jiang, L., Wang, Z. (2016) Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass-ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass. *Ceramics International*. 42. 10079–10084. <u>http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.113</u>.
- Hisham, N.A.N., Zaid, M.H.M., Aziz, S.H.A., Muhammad, F.D. (2021) 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*. 14. <u>http://doi.org/10.3390/ma14030570</u>.
- Beregovoi, V.A., Sorokin, D.S., Beregovoi A.M. (2021) Glass-crystalline materials of a cellular structure, formed by vibration foaming technology. *Defect and Diffusion Forum*. **410**. 823–828. <u>http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823</u>.
- Ivanov, K.S. (2022) Associated Synthesis of Microgranular Foam-Glass-Ceramic from Diatomaceous Shales. *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. **79**. 234– 238. <u>http://doi.org/10.1007/s10717-022-00491-4</u>.
- Kazantseva, L.K., Rashchenko, S.V. (2016) Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks. *Ceramics International*. 42. 19250–19256. <u>http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.091</u>.
- 14. Yatsenko, E.A., Goltsman, B.M., Klimova, L.V., Yatsenko, L.A. (2020) Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. **142**. 119–127. <u>http://doi.org/10.1007/s10973-020-10015-3</u>.
- 15. Erofeev, V.T., Korotaev, S.A., Vatin, N.I. (2023) Deformation and Heat-Insulating Characteristics of Light Concrete on Porous Burned Binder Under Heating. *Materials Physics and Mechanics*. **51**. 33–41. <u>http://doi.org/10.18149/MPM.5112023 4</u>.
- 16. Xi, C., Zheng, F., Xu, J., Yang, W., Peng, Y., Li, Y., Li, P., Zhen, Q., Bashir, S., Liu, J.L. Preparation of glass-ceramic foams using extracted titanium tailing and glass waste as raw



materials. (2018) *Construction and Building Materials*. **190**. 896–909. <u>http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170</u>.

- 17. König, J., Petersen, R.R., Iversen, N., Yue, Y. (2021) Application of foaming agent-oxidizing agent couples to foamed-glass formation. *Journal of Non-Crystalline Solids*. **553**. <u>http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469</u>.</u>
- Kazantseva, L.K., Lygina, T.Z., Rashchenko, S.V., Tsyplakov, D.S. (2015) Preparation of Sound-Insulating Lightweight Ceramics from Aluminosilicate Rocks with High *CaCO*₃ Content. *Journal of the American Ceramic Society*. **98**. 2047–2051. http://doi.org/10.1111/jace.13581.
- 19. Mueller, A., Sokolova, S.N., Vereshagin, V.I. (2008) Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials. *Construction and Building Materials*. **22.** 703–712. http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.009.
- Rodin, A., Ermakov, A., Erofeeva, I., Erofeev, V. (2022) Effect of Chlorides Content on the Structure and Properties of Porous Glass Ceramics Obtained from Siliceous Rock. *Materials*. 15. <u>https://doi.org/10.3390/ma15093268</u>.
- Rodin, A.I., Ermakov, A.A., Kyashkin, V.M., Rodina, N.G., Erofeev, V.T. (2022) Porous glass ceramics from siliceous rocks with high operating temperature. *Magazine of Civil Engineering*. 116. <u>http://doi.org/10.34910/MCE.116.15</u>.
- Kruszewski, Ł., Palchik, V., Vapnik, Y., Nowak, K., Banasik, K., Galuskina, I. (2021) Mineralogical, geochemical, and rock mechanic characteristics of zeolite-bearing rocks of the hatrurim basin, Israel. *Minerals*. **11**. <u>http://doi.org/10.3390/min11101062</u>.
- Li, Y., Zhao, L.-H., Wang, Y.-K., Cang, D.-Q. (2018) Effects of *Fe*₂O₃ on the properties of ceramics from steel slag. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 25. 413–419. <u>http://doi.org/10.1007/s12613-018-1586-7</u>.
- 24. Costa, F.P.D., Morais, C.R.D.S., Pinto, H.C., Rodrigues, A.M. (2020) Microstructure and physico-mechanical properties of *Al*₂*O*₃-doped sustainable glass-ceramic foams. *Materials Chemistry and Physics*. **256**. http://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123612.
- 25. Kahlenberg, V., Girtler, D., Arroyabe, E., Kaindl, R., Többens D.M. (2010) Devitrite ($Na_2Ca_3Si_6O_{16}$) structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses. *Mineralogy and Petrology*. **100**. 1–9. <u>http://doi.org/10.1007/s00710-010-0116-8</u>.
- 26. Liu, Z.B., Zong, Y.B., Ma, H.Y., Dai, W.B., Li, S.H. (2014) Effect of (*CaO* / *MgO*) / *SiO*₂ ratio on crystallisation and properties of slag glass-ceramics. *Advances in Applied Ceramics*. **113**. 411–418. <u>http://doi.org/10.1179/1743676114Y.0000000187</u>.
- Abdel-Hameed, S.A.M., El-kheshen, A.A. (2013) Thermal and chemical properties of diopsidewollastonite glass-ceramics in the SiO₂ - CaO - MgO system from raw materials. Ceramics International. 29. 265–269. <u>http://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00114-1</u>.