

А.И. РОДИН¹, А.А. ЕРМАКОВ¹, П.И. АБРАШИН¹, В.Т. ЕРОФЕЕВ¹¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск, Россия

ВЛИЯНИЕ АЛЮМОСИЛИКАТОВ НА СВОЙСТВА ПОРИСТОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ ИЗ КРЕМНИСТЫХ ПОРОД

Аннотация. В статье представлены результаты исследования структуры, физико-механических и теплофизических свойств стеклокерамических материалов. Шихту для изготовления образцов получали из кремнистых пород, каолина, бентонита, Na_2CO_3 и KCl . В планетарной шаровой мельнице проводили совместную механохимическую активацию компонентов. Полученную шихту обжигали в муфельной печи при температуре 850 °С. Экспериментальные результаты получены с применением метода рентгенофазового анализа (РФА). Определены физико-механические и теплофизические свойства образцов. Разработанные материалы (в форме блоков) имеют кажущуюся плотность от 308 до 409 кг/м³, прочность при изгибе до 3,2 МПа и сжатии до 13 МПа, коэффициент теплопроводности от 0,081 до 0,107 Вт/м·°С, предельную температуру эксплуатации до 890 °С включительно. Материалы по многим показателям превосходят пеностекло и стеклокерамику из отходов промышленного производства. Разработанные материалы рекомендуется использовать в качестве теплоизоляции при строительстве объектов промышленного и гражданского назначения.

Ключевые слова: пористая стеклокерамика, кремнистые породы, алюмосиликаты, физико-механические свойства, теплопроводность, предельная температура эксплуатации.

A.I. RODIN¹, A.A. ERMAKOV¹, P.I. ABRASHIN¹, V.T. EROFEEV¹¹National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

INFLUENCE OF ALUMINOSILICATES ON THE PROPERTIES OF POROUS GLASS CERAMICS FROM SILICEOUS ROCKS

Abstract. The article presents the results of the study of the structure, physical-mechanical and thermophysical properties of glass-ceramic materials. The charge mixture for the production of samples was obtained from siliceous rocks, kaolin, bentonite, Na_2CO_3 and KCl . Joint mechanochemical activation of the components was carried out in a planetary ball mill. The charge mixture obtained was fired in a muffle furnace at a temperature of 850 °C. The experimental results were obtained using the method of X-ray phase (XRF) analysis. The physical-mechanical and thermophysical properties of the samples are determined. The developed materials (in the form of blocks) have an apparent density of 308 to 409 kg/m³, flexural strength up to 3.2 MPa and compressive strength up to 13 MPa, thermal conductivity from 0.081 to 0.107 W/m·°C, limiting operating temperature up to 890 °C inclusive. The materials obtained are superior in many respects to foam glass and glass ceramics from industrial waste. They can be used as thermal insulation in the construction of industrial and civil facilities.

Keywords: porous glass ceramics, siliceous rocks, aluminosilicates, physical-mechanical properties, thermal conductivity, limiting operating temperature.

Введение

Пористые стеклокерамические материалы при небольшой плотности имеют относительно высокую прочность, низкую теплопроводность и звукопроводность, высокую коррозионную стойкость, не горят и др. [1, 2]. Они востребованы при строительстве и ремонте зданий и сооружений различного назначения. В гражданском строительстве этот материал можно использовать для устройства ограждающих конструкций стен [3], для утепления

© Родин А.И., Ермаков А.А., Абрашин П.И., Ерофеев В.Т., 2022

фасадов, кровли, пола [4], в отделке конструкций [5] и т.п. В промышленности их применяют в качестве огнеупорной футеровки печей [2], для тепло- и звукоизоляции [6], для защиты конструкций от коррозии [7] и др.

Пористые стеклокерамические материалы получают из шлаков различных производств [8–10], отходов стекла [11], золы-уноса [1, 4, 12, 13] и других компонентов. Много научных работ посвящено получению пористых стеклокерамических материалов из кремнистых пород [14–17], запасы которых в мире огромны [14, 18]. В этом случае диатомит, цеолитсодержащий трепел, опоку активируют водными растворами NaOH высокой концентрации, гранулируют, а затем обжигают.

Нами предложен способ получения пористой стеклокерамики из цеолитсодержащих пород, позволяющий получать образцы в форме блоков [19–21]. Полученные материалы имеют относительно высокую прочность, низкую теплопроводность. Однако, их предельная температура эксплуатации не превышает 850°C [21]. Для теплоизоляции многих промышленных установок этого недостаточно [2].

В научной литературе имеется много работ по изучению влияния химического и фазового состава стеклокерамики на предельную температуру ее эксплуатации. Известно, что стойкость керамических материалов к длительному воздействию высоких температур повышается с увеличением в их составе количества Al_2O_3 [22, 23, 24]. Приведенные результаты получены при испытании образцов стеклокерамических материалов, изготовленных из отходов производства или искусственно созданного стекла. Технология получения пористой стеклокерамики из кремнистых пород отличается, как и имеются отличия в химическом и фазовом составе материалов [16, 24].

Известно, что Al_2O_3 входит в состав алюмосиликатов, из которых состоят глины [25]. Результаты научных исследований по определению влияния глинистых пород на предельную температуру эксплуатации пористой стеклокерамики из кремнистых пород в литературе отсутствуют.

Цель исследования: из кремнистых пород за одну стадию нагрева шихты, модифицированной каолином и бентонитом, получить пористые стеклокерамические материалы; изучить их физико-механические и теплофизические свойства.

Задачи:

- методом рентгенофазового анализа (РФА) определить влияние количества добавок в составе шихты на фазовый состав обожженной пористой стеклокерамики;
- установить влияние добавок в составе шихты на макроструктуру пористой стеклокерамики;
- определить физико-механические (плотность, прочность при изгибе и сжатии) и теплофизические (теплопроводность, предельная температура эксплуатации) свойства образцов пористых стеклокерамических материалов.

Материалы и методы исследования

Для получения образцов пористых стеклокерамических материалов были использованы следующие компоненты:

- Кремнистые породы: цеолитсодержащий трепел, диатомит.
- Алюмосиликатные породы: каолин (группа каолинита), бентонит (группа монтмориллонита).

Влажность сырьевых компонентов составляла $\leq 2\%$. Химический и минералогический состав пород приведен в таблице 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 – Химический состав пород

Порода		Химический состав, % масс.								
		SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	SO ₃
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Трепел		67,86	7,74	7,61	1,99	1,56	1,07	0,34	0,17	0,06
Диатомит		81,47	1,51	5,34	2,05	0,97	0,89	0,25	0,20	1,77
Каолин		44,3	0,6	39,26	0,55	0,53	0,32	0,51	0,09	0,08
Бентонит		54,94	1,74	20,57	5,63	1,0	3,49	0,59	1,53	0,13
Химический состав, % масс.										
P ₂ O ₅	Cl	ZrO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	SrO	ZnO	La ₂ O ₃	BaO	V ₂ O ₅	ППП
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0,15	0	0,01	0,01	0,01	0,06	0	0	0,02	0,01	11,32
0,03	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0,02	0,01	5,45
0,04	0,02	0,01	0	0,01	0	0	0	0	0,01	13,67
0,18	0,01	0,03	0,19	0	0,04	0,01	0,01	0	0	9,91

Таблица 2 – Минералогический состав пород

Порода	Минералогический состав, %								
	Кварц	Кальцит	Гейландит	Мусковит	Кристаллит	Аморфная фаза	Каолинит	Монтмориллонит	Сидерит
Трепел	15,5	10,5	20,4	13,1	20,5	20,0	0	0	0
Диатомит	10,9	0	0	8,1	0	80,0	0	0	0
Каолин	0	0	0	4,5	0	0	95,5	0	0
Бентонит	18,8	0	0	0	0	0	2,4	73,8	5,1

– Сода кальцинированная. Химическая формула: Na₂CO₃. Массовая доля основного вещества ≥ 99%. Добавку вводили для снижения температуры плавления и вспенивания шихты.

– Хлористый калий. Химическая формула: KCl. Массовая доля основного вещества ≥ 99%. Добавку KCl вводили для получения равномерной структуры пор в стеклокерамике.

Шихту для получения образцов пористых стеклокерамических материалов получали совместным размолотом кремнистых и глинистых пород, соды кальцинированной и хлористого калия. Сырье размалывали в планетарной шаровой мельнице Retsch PM 400 в течение 35 мин (перегрузки внутри барабана мельницы – 20G). Полученную шихту обжигали в муфельной печи в металлических формах. Формы предварительно обмазывали глиной. Режим обжига шихты: нагрев до температуры 670 °С со скоростью – 6 °С/мин, выдержка при температуре 670 °С в течение 1 часа, нагрев до температуры 850 °С со скоростью – 4 °С/мин, выдержка при температуре 850 °С в течение 30 минут. После остывания форм с полученным материалом вместе с печью до 40 °С, они разбирались, а образцы извлекались и распиливались для дальнейших испытаний.

Составы шихты, испытанные в работе, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Составы шихты

№ состава	Состав шихты, %				
	Трепел	Диатомит	Каолин	Бентонит	Na ₂ CO ₃
C1	73,4	8,1	-	-	18,3
C2	70,7		2,7	-	
C3	68		5,4	-	
C4	65,3		8,1	-	
C5	65,3		-	8,1	
C6	57,2			16,2	
C7	49,1			24,3	
					KCl
					0,2

Фазовый состав образцов пористых стеклокерамических материалов определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) с помощью дифрактометра Empyrean PANalytical (Нидерланды). Образцы измельчали до фракции менее 90 мкм. Регистрацию дифрактограмм осуществляли в CuK_α излучении в интервале углов $2\theta=4-80^\circ$. Полупроводниковый детектор PIXcel3D работал в режиме линейного сканирования. Шаг сканирования – 0,0131 °/минуту, время интеграции – 150 сек. Качественный фазовый состав образцов определяли методом Ханавальта с использованием базы данных ICDD PDF-2.

Кажущуюся плотность пористых стеклокерамических материалов определяли на сухих образцах кубической формы с размером грани 90 ± 5 мм в соответствии с ГОСТ EN 1602–2011. Плотность образца определяли как отношение его массы к объему. За окончательный результат принимали среднеарифметическое значение результатов испытания пяти образцов каждого состава.

Коэффициент теплопроводности образцов определяли зондовым методом с помощью прибора МИТ-1 (диаметр зонда 6 мм). Исследования проводились на сухих образцах кубической формы с размером грани 90 ± 5 мм при температуре 22 ± 2 °С. В центре грани сверлилось отверстие диаметром 6 мм и глубиной от 50 до 60 мм, в которое погружался зонд. Фиксировали показания прибора. За окончательный результат принимали среднеарифметическое значение результатов испытания двух образцов каждого состава.

Прочность при изгибе пористых стеклокерамических материалов определяли на образцах квадратного сечения с размером ребра 30 ± 2 мм и длиной 120 ± 3 мм. Образец укладывали на 2 цилиндрические опоры диаметром 6 ± 1 мм с расстоянием между осями опор 100 ± 1 мм. Нагрузку на образец прикладывали через цилиндрический стержень диаметром 6 ± 1 мм, приложенный по всей ширине образца на равном расстоянии от опор и перемещающийся со скоростью 5 мм/мин. За максимальное разрушающее усилие принимали нагрузку в момент разрушения образца. Прочность при изгибе рассчитывали по стандартной формуле. За окончательный результат принимали среднеарифметическое значение результатов испытания трех образцов каждого состава.

Прочность при сжатии пористой стеклокерамики определяли в соответствии с ГОСТ EN 826–2011 на сухих образцах кубической формы с размером грани 50 ± 5 мм. За максимальное разрушающее усилие принимали значение, при котором образец разрушился или высота образца уменьшилась на 10% от первоначального значения. Прочность материалов при сжатии рассчитывали как отношение максимального разрушающего усилия к площади поперечного сечения образца. За окончательный результат принимали среднеарифметическое значение результатов испытания пяти образцов каждого состава.

Предельную температуру эксплуатации пористых стеклокерамических материалов определяли в соответствии с ГОСТ 5402.2–2000 по остаточному изменению размеров образцов в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами $30\times 30\times 90$ мм при нагреве. Сухие образцы помещали вертикально в муфельную печь в один ряд по высоте и нагревали со скоростью 10 °С/мин до температуры на 50 °С ниже температуры испытания и 2 °С/мин для последних 50 °С. Образцы выдерживали в течение 2 часов при температуре испытания.

Определяли остаточные изменения размеров образцов в процентах от первоначальных значений. Предельную температуру эксплуатации определяли по максимальной температуре, при которой размеры образцов уменьшались $< 1\%$ от первоначальных значений. За окончательный результат принимали среднеарифметическое значение результатов испытания трех образцов каждого состава.

Результаты исследования и их анализ

Рентгенофазовый анализ. Рентгенограммы образцов пористых стеклокерамических материалов приведены на рисунке 1. Для наглядности рентгенограммы представлены в интервале углов $2\Theta=10-45^\circ$.

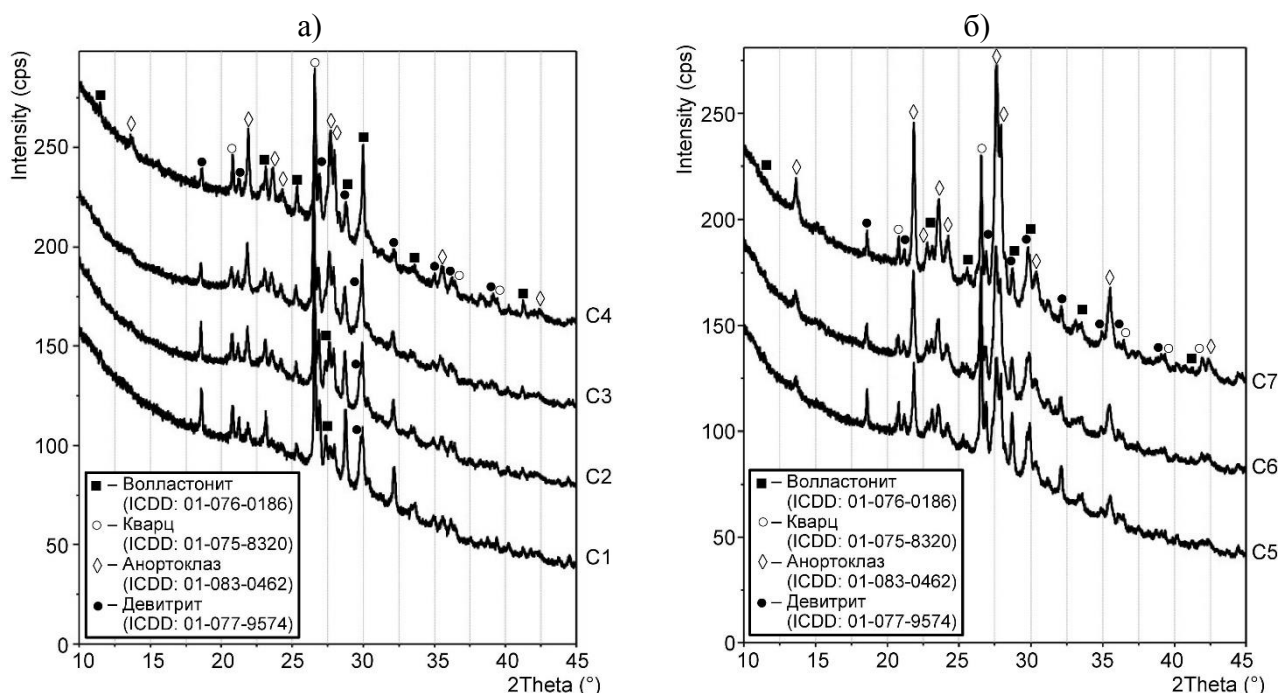


Рисунок 1 – Рентгенограммы образцов стеклокерамических материалов из шихты
а) без добавки и с каолином, б) с бентонитом
(C1–C7 – номера составов)

По результатам проведенного РФА образцов стеклокерамических материалов установлено следующее. На всех рентгенограммах (рисунок 1) в интервале углов от 17 до 37° (2θ) находится аморфное гало. Установлено незначительное увеличение аморфного гало при введении в состав шихты каолина (образцы C2, C3, C4). Изменение аморфного гало в образцах из шихты с бентонитом (C5, C6, C7) не установлено. На рентгенограммах всех образцов идентифицированы линии кварца [SiO_2 , ICDD: 01-075-8320], волластонита [CaSiO_3 , ICDD: 01-076-0186], девитрита [$\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$, ICDD: 00-023-0671] и анортоклаза [$(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.14})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, ICDD: 01-075-1634].

При модификации шихты каолином (рисунок 1,а) в количестве до $8,1\%$, содержание девитрита в стеклокерамике уменьшилось, а анортоклаза и волластонита увеличилось. При введении в состав шихты бентонита (рисунок 1,б) в количестве до $24,3\%$ от массы шихты, на рентгенограммах наблюдается незначительное уменьшение интенсивности линий волластонита и существенное увеличение интенсивности линий анортоклаза. Новые кристаллические фазы в модифицированных образцах не определены. Полученные нами результаты фазового состава стеклокерамических материалов из кремнистых пород согласуются с литературными данными [24].

Макроструктура пористой стеклокерамики. Структура поверхности образцов пористой стеклокерамики на макроуровне представлена на рисунке 2.

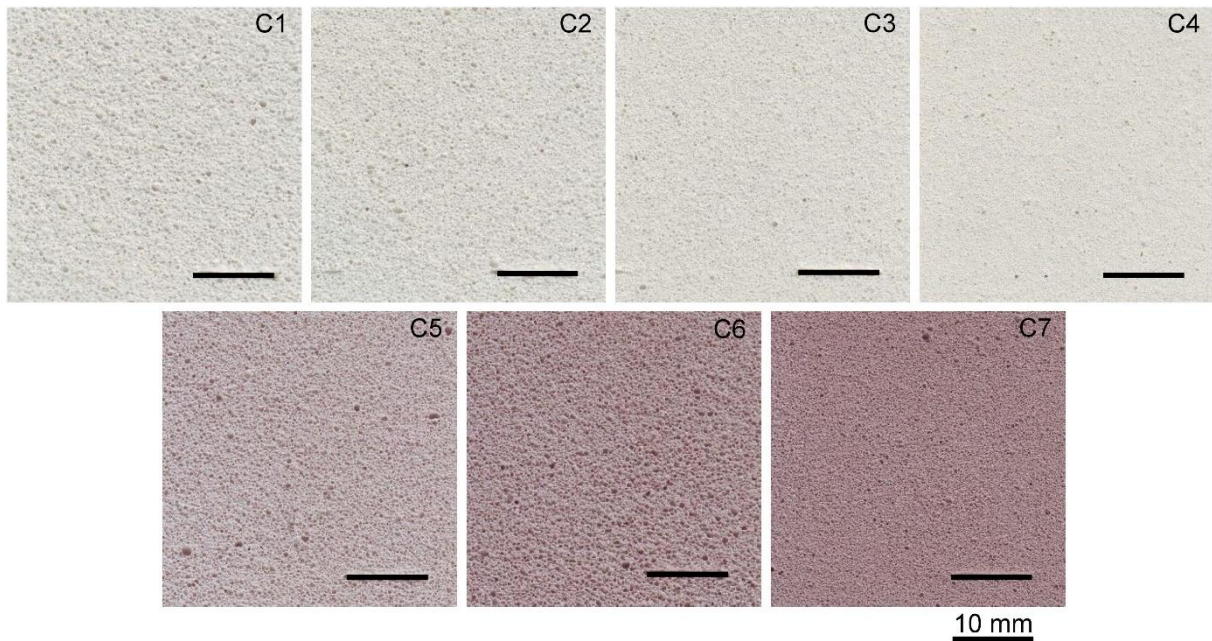


Рисунок 2 – Макроструктура поверхности образцов пористой стеклокерамики (C1–C7 – номера составов)

Все образцы пористых стеклокерамических материалов имеют ячеистую (мелкопористую) структуру (рисунок 2). Пористость по всей площади поверхности образцов равномерная. Размер пор в образцах контрольного состава (C1) не превышает 1,5 мм. При увеличении в составе шихты добавки каолина до 8,1% (C2–C4) и бентонита до 24,3% (C5–C7), диаметр пор уменьшается (для образцов C4 и C7 максимальный размер пор не превышает 0,5 мм). Также, при добавлении в состав шихты бентонита, поверхность обожженных образцов имеет серовато-коричневый цвет, который становится темнее при увеличении в составе шихты бентонита до 24,3%.

Кажущаяся плотность и теплопроводность образцов. На рисунке 3 представлены результаты влияния вида и количества каолина и бентонита в составе шихты на кажущуюся плотность и теплопроводность образцов пористой стеклокерамики.

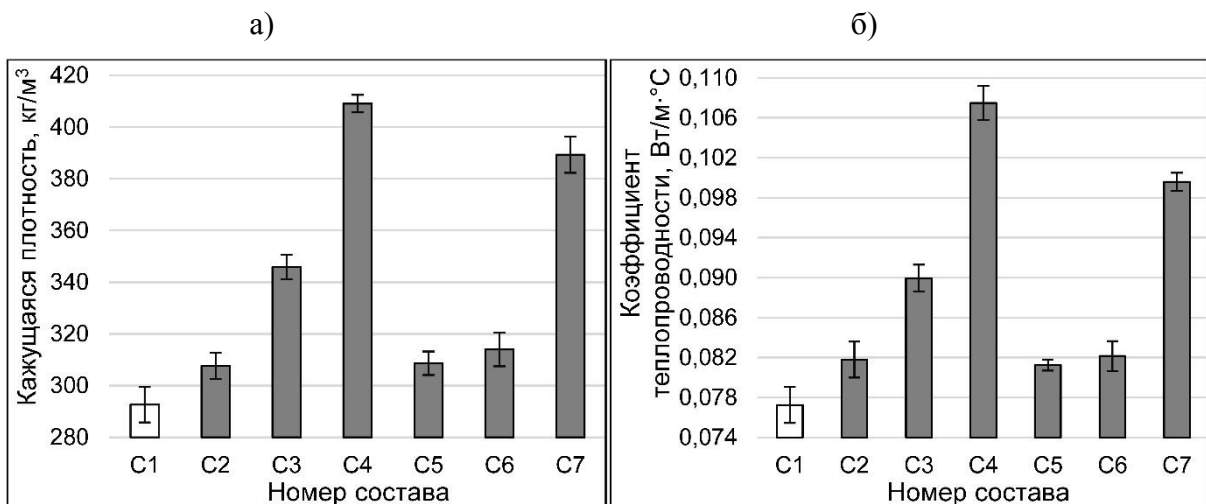


Рисунок 3 – Кажущаяся плотность (а) и теплопроводность (б) образцов (C1–C7 – номера составов)

Согласно данным рисунка 3,а, влияние каолина и бентонита в составе шихты на кажущуюся плотность образцов пористых стеклокерамических материалов следующее.

Данный показатель повышается практически по линейной зависимости при увеличении в составе шихты каолина. Плотность образцов увеличилась с $\approx 293 \text{ кг/м}^3$ (C1) до $\approx 410 \text{ кг/м}^3$ при введении в состав шихты каолина в количестве 8,1% (C4). При увеличении бентонита в составе шихты до 16,2%, кажущаяся плотность образцов C5 и C6 повысилась незначительно (до $\approx 310 \text{ кг/м}^3$). Дальнейшее увеличение количества бентонита до 24,3% (C7) приводит к резкому росту кажущейся плотности до $\approx 390 \text{ кг/м}^3$.

Из экспериментальных данных, приведенных на рисунке 3,б, следует, что теплопроводность связана прямо пропорциональной зависимостью с кажущейся плотностью. Наименьший коэффициент теплопроводности ($0,077 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$) у сухих образцов пористой стеклокерамики состава C1, при кажущейся плотности 293 кг/м^3 . Наибольший коэффициент теплопроводности ($0,107 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$) у образцов состава C4 (кажущаяся плотность равна 409 кг/м^3). Влияние фазового состава образцов пористых стеклокерамических материалов на их теплопроводность не выявлено. Полученные результаты коррелируются с данными других авторов [3].

Прочность образцов. На рисунке 4 представлены прочностные характеристики образцов пористых стеклокерамических материалов.

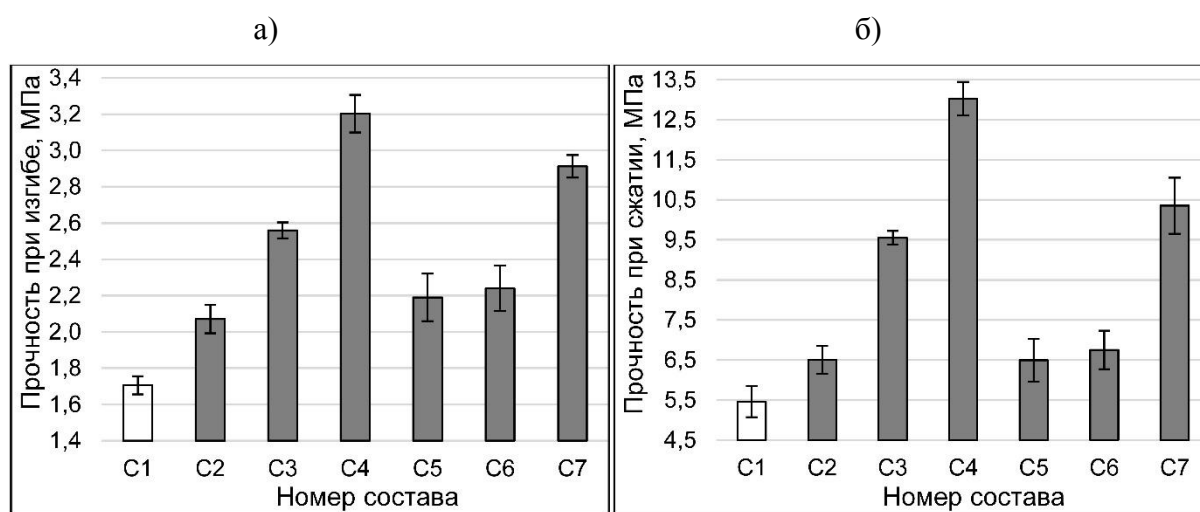


Рисунок 4 – Прочность при изгибе (а) и сжатии (б) образцов (C1–C7 – номера составов)

Согласно данным рисунка 4,а и 4,б, полученные пористые стеклокерамические материалы имеют прочность при изгибе от 1,7 до 3,2 МПа и прочность при сжатии в пределах от 5,5 до 13 МПа. Также можно сделать вывод, что прочностные показатели образцов пористых стеклокерамических материалов увеличиваются с увеличением их кажущейся плотности по линейной зависимости. Наибольшие значения прочности при изгибе и при сжатии у образца C4 – 3,2 и 13 МПа соответственно, при кажущейся плотности материала, равной 409 кг/м^3 . Образцы контрольного состава (C1) имеют наименьшую прочность при изгибе (1,7 МПа) и сжатии (5,5 МПа), при значении кажущейся плотности $\approx 293 \text{ кг/м}^3$. Установить зависимости прочностных показателей образцов от их фазового состава не удалось. Полученные пористые стеклокерамические материалы, при равной кажущейся плотности, превосходят по прочностным показателям пеностекло и стеклокерамику из отходов промышленного производства [1, 4, 8–13].

Предельная температура эксплуатации. Зависимости влияния вида и количественного содержания каолина и бентонита в составе шихты на предельную температуру эксплуатации стеклокерамических материалов из кремнистых пород представлено на рисунке 5. Предельную температуру определяли по изменению размеров образцов после выдерживания в течение 2 часов при заданной температуре.

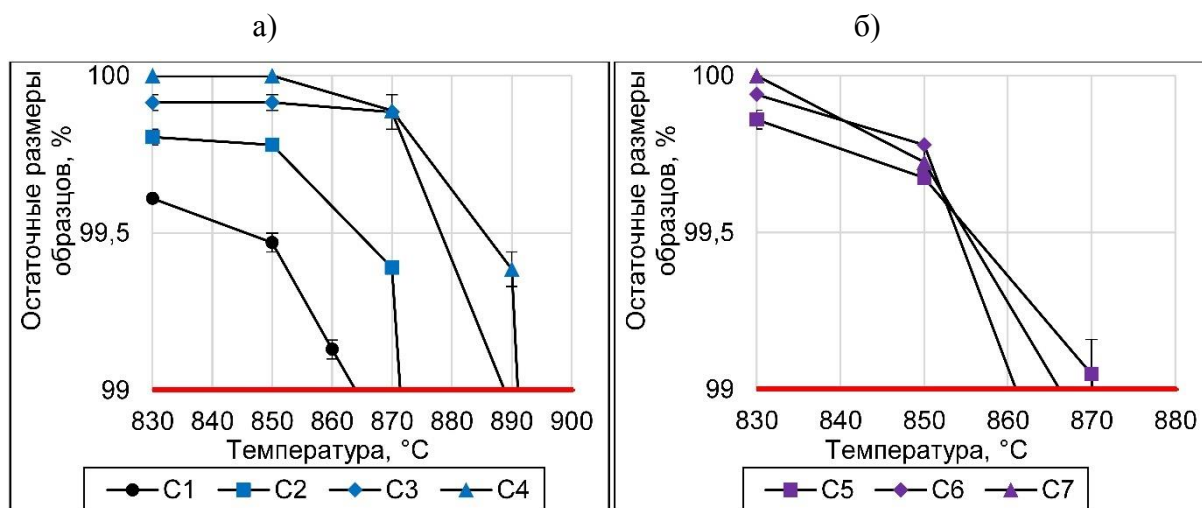


Рисунок 5 – Остаточный размер образцов после выдерживания в течение 2 часов при заданной температуре: образцы из шихты а) без добавки и с каолином, б) с бентонитом (C1–C7 – номера составов)

В ходе эксперимента установлено, что состав C4 возможно эксплуатировать при температуре 890 °C. Остаточные размеры образцов после выдерживания в течение 2 часов при данной температуре больше 99% от исходных значений (рисунок 5,а). Данный состав получен путем модифицирования шихты каолином (8,1% от массы шихты). Согласно данным рисунка 1,а, в образце C4 наибольшее количество волластонита, а наименьшее – девитрита. Вероятно, это и является одной из основных причин увеличения предельной температуры эксплуатации. Дальнейшее увеличение каолина в составе шихты, с целью повышения предельной температуры эксплуатации пористой стеклокерамики, нецелесообразно, так как приводит к увеличению кажущейся плотности и теплопроводности образцов. При добавлении в состав шихты 2,7% и 5,4% каолина, предельная температура эксплуатации составляет 870 и 880 °C соответственно, что выше, чем у контрольного образца.

Также, в результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что бентонит в составе шихты в количестве до 24,3% (от массы шихты) практически не повлиял на предельную температуру эксплуатации образцов (рисунок 5,б). Разработанные пористые стеклокерамические материалы можно эксплуатировать при температуре до 860 °C включительно. Остаточные размеры образцов после выдерживания в течение 2 часов при данной температуре больше 99% от исходных значений.

По показателю предельной температуры эксплуатации разработанные пористые стеклокерамические материалы значительно превосходят пеностекло, а также пористую стеклокерамику из кремнистых пород, полученную методом щелочной активации шихты [14–16]. Разработанные материалы рекомендуются для использования в качестве теплоизоляции некоторых видов промышленного оборудования.

Выводы

Из шихты на основе кремнистых пород, Na_2CO_3 , каолина, бентонита и KCl получена пористая стеклокерамика. В планетарной шаровой мельнице проводили совместную механохимическую активацию компонентов. Полученную шихту обжигали при температуре 850 °C. Установлено влияние количества каолина, бентонита в составе шихты на структуру и свойства образцов пористой стеклокерамики.

1. Методом РФА установлено влияние количества каолина и бентонита в шихте на фазовый состав обожженных образцов пористой стеклокерамики. Выявлено, что образцы состоят из волластонита, кварца, анортклаза, девитрита и аморфной фазы.

2. Установлено влияние добавок в составе шихты на макроструктуру пористой стеклокерамики. Все образцы имеют ячеистую (мелкопористую) структуру. Диаметр пор контрольного состава не превышает 1,5 мм и уменьшается с увеличением в составе шихты количества добавок.

3. Разработанная пористая стеклокерамика имеет кажущуюся плотность 308–409 кг/м³, прочность при изгибе и сжатии до 3,2 МПа и 13 МПа соответственно, коэффициент теплопроводности от 0,081 до 0,107 Вт/м·°С. Достигнуто повышение предельной температуры эксплуатации образцов до 890 °С за счет введения в состав шихты каолина в количестве 8,1% от массы шихты. Увеличить предельную температуру эксплуатации, модифицированием шихты бентонитом, не удалось.

4. Разработанные пористые стеклокерамические материалы по многим показателям превосходят пеностекло и пористую стеклокерамику из отходов промышленного производства. Их рекомендуется использовать для тепло- и звукоизоляции при строительстве и ремонте объектов промышленного и гражданского назначения.

Финансирование

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fernandes H.R., Tulyaganov D.U., Ferreira J.M.F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*. 2009. Vol. 35. No. 1. Pp. 229–235. doi:[10.1016/j.ceramint.2007.10.019](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.10.019)
2. Guo H., Ye F., Li W., Song X., Xie G. Preparation and characterization of foamed microporous mullite ceramics based on kyanite. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. No. 10. Pp. 14645–14651. doi:[10.1016/j.ceramint.2015.07.186](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.186)
3. König J., Lopez-Gil A., Cimavilla-Roman P., Rodriguez-Perez M.A., Petersen R.R., Østergaard M.B., Iversen N., Yue Y., Spreitzer M. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 247. 118574. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2020.118574](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118574)
4. Zhu M., Ji R., Li Z., Wang H., Liu L., Zhang Z. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 112. Pp. 398–405. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183)
5. Cao J., Lu J., Jiang L., Wang Z. Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass-ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 8. Pp. 10079–10084. doi:[10.1016/j.ceramint.2016.03.113](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.113)
6. Kyaw Oo D'Amore G., Caniato M., Travan A., Turco G., Marsich L., Ferluga A., Schmid C. Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 165. Pp. 1306–1315. doi:[10.1016/j.jclepro.2017.07.214](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.214)
7. Яценко Е.А., Рябова А.В., Гольцман Б.М. Разработка стеклокомпозиционных покрытий для защиты стальных нефтепроводов от внутренней и внешней коррозии // *Черные металлы*. 2019. №12. С. 46–51.
8. Яценко Е.А., Гольцман Б.М., Косарев А.С., Карандашова Н.С., Смолий В.А., Яценко Л.А. Синтез пеношлакостекла на основе глицериновой порообразующей смеси // *Сборник тезисов международной конференции: «Стекло: наука и практика»*. Санкт-Петербург: ЛЕМА, 2017. С. 214–215.
9. Ji R., Zheng Y., Zou Z., Chen Z., Wei S., Jin X., Zhang M. Utilization of mineral wool waste and waste glass for synthesis of foam glass at low temperature. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 215. Pp. 623–632. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226)
10. Jia R., Deng L., Yun F., Li H., Zhang X., Jia X. Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. *Materials Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 233. Pp. 155–162. doi:[10.1016/j.matchemphys.2019.05.065](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065)
11. 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. No. 3. 570. doi:[10.3390/ma14030570](https://doi.org/10.3390/ma14030570)

12. Zeng L., Sun H., Peng T., Zheng W. Preparation of porous glass-ceramics from coal fly ash and asbestos tailings by high-temperature pore-forming. *Waste Management*. 2020. Vol. 106. Pp. 184–192. doi:[10.1016/j.wasman.2020.03.008](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.008)
13. Romero A.R., Toniolo N., Boccaccini A.R., Bernardo E. Glass-ceramic foams from 'weak alkali activation' and gel-casting of waste glass/fly ash mixtures. *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 4. 588. doi:[10.3390/ma12040588](https://doi.org/10.3390/ma12040588)
14. Иванов К.С. Методы активации шихты при получении пеностеклокерамики // Новые огнеупоры. 2018. №4. С. 107–110. doi:[10.17073/1683-4518-2018-4-107-110](https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-4-107-110)
15. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 16. Pp. 19250–19256. doi:[10.1016/j.ceramint.2016.09.091](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.091)
16. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Klimova L.V., Yatsenko L.A. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 142. No. 1. Pp. 119–127. doi:[10.1007/s10973-020-10015-3](https://doi.org/10.1007/s10973-020-10015-3)
17. Zhimalov A.A., Bondareva L.N., Igitkhanyan Y.G., Ivashchenko Y.G. Use of Amorphous Siliceous Rocks – Opokas to Obtain Foam Glass with Low Foaming Temperature. *Glass and Ceramics*. 2017. Vol. 174. Pp. 13–15. doi:[10.1007/s10717-017-9916-1](https://doi.org/10.1007/s10717-017-9916-1)
18. Kruszewski Ł., Palchik V., Vapnik Y., Nowak K., Banasik K., Galuskina I. Mineralogical, geochemical, and rock mechanic characteristics of zeolite-bearing rocks of the hatrurim basin, Israel. *Minerals*. 2021. Vol. 11. No. 10. 1062. doi:[10.3390/min11101062](https://doi.org/10.3390/min11101062)
19. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Кравчук А.С., Ермаков А.А. Физико-механические и теплофизические свойства пеностеклокерамики на основе кремнеземсодержащей породы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №5. С. 8–15. doi:[10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374](https://doi.org/10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374)
20. Родин А.И., Ермаков А.А. Физико-механические свойства пеностеклокерамики на основе кремнистых пород с высоким содержанием CaCO₃ // Огарев-online. 2021. №6. Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/fiziko-mexanicheskie-svoystva-penosteklokeramiki-na-osnove-kremnistyx-porod-s-vysokim-soderzhaniem-caco3>
21. Родин А.И., Ермаков А.А. Теплофизические свойства пеностеклокерамики на основе кремнистых пород // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2020. №2(11). С. 49–55.
22. Costa F.P.D., Morais C.R.D.S., Pinto H.C., Rodrigues A.M. Microstructure and physico-mechanical properties of Al₂O₃-doped sustainable glass-ceramic foams. *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 256. 123612. doi:[10.1016/j.matchemphys.2020.123612](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123612)
23. Keyvani N., Marghussian V.K., Rezaie H.R., Kord M. Effect of Al₂O₃ content on crystallization behavior, microstructure, and mechanical properties of SiO₂–Al₂O₃–CaO–MgO glass-ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2011. Vol. 8. No. 1. Pp. 203–213. doi:[10.1111/j.1744-7402.2009.02428.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2009.02428.x)
24. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Кравчук А.С., Ермаков А.А. Исследование фазовых превращений в шихте (трепел: Na₂CO₃) для пеностеклокерамики // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 3(40). С.16–23.
25. Милло Ж. Геология глин (выветривание, седиментология, геохимия). Ленинград: Недра, 1968. 369 с.

REFERENCES

1. Fernandes H.R., Tulyaganov D.U., Ferreira J.M.F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*. 2009. Vol. 35. No. 1. Pp. 229–235. doi:[10.1016/j.ceramint.2007.10.019](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.10.019)
2. Guo H., Ye F., Li W., Song X., Xie G. Preparation and characterization of foamed microporous mullite ceramics based on kyanite. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41. No. 10. Pp. 14645–14651. doi:[10.1016/j.ceramint.2015.07.186](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.186)
3. König J., Lopez-Gil A., Cimavilla-Roman P., Rodriguez-Perez M.A., Petersen R.R., Østergaard M.B., Iversen N., Yue Y., Spreitzer M. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 247. 118574. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2020.118574](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118574)
4. Zhu M., Ji R., Li Z., Wang H., Liu L., Zhang Z. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 112. Pp. 398–405. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.183)
5. Cao J., Lu J., Jiang L., Wang Z. Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass-ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 8. Pp. 10079–10084. doi:[10.1016/j.ceramint.2016.03.113](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.113)

6. Kyaw Oo D'Amore G., Caniato M., Travan A., Turco G., Marsich L., Ferluga A., Schmid C. Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 165. Pp. 1306–1315. doi:[10.1016/j.jclepro.2017.07.214](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.214)
7. Yatsenko E.A., Ryabova A.V., Goltsman B.M. Razrabotka steklokompozicionnyh pokrytij dlya zashchity stal'nyh nefteprovodov ot vnutrennej i vneshnej korrozii [Development of fiber-glass composite coatings for protection of steel oil pipelines from internal and external corrosion]. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2019. No. 12. Pp. 46–51.
8. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Kosarev A.S., Karandashova N.S., Smolii V.A., Yatsenko L.A. Sintez penoshlakostekla na osnove glicerinovoj poroobrazuyushchej smesi [The synthesis of foamed slag glass based on the glycerol pore-forming mixture]. *Sbornik tezisev mezhdunarodnoj konferencii: «Steklo: nauka i praktika»* [Collection of abstracts of the international conference: "Glass: science and practice"]. Saint Petersburg: LEMA, 2017. Pp. 214–215.
9. Ji R., Zheng Y., Zou Z., Chen Z., Wei S., Jin X., Zhang M. Utilization of mineral wool waste and waste glass for synthesis of foam glass at low temperature. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 215. Pp. 623–632. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226)
10. Jia R., Deng L., Yun F., Li H., Zhang X., Jia X. Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. *Materials Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 233. Pp. 155–162. doi:[10.1016/j.matchemphys.2019.05.065](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065)
11. 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. No. 3. 570. doi:[10.3390/ma14030570](https://doi.org/10.3390/ma14030570)
12. Zeng L., Sun H., Peng T., Zheng W. Preparation of porous glass-ceramics from coal fly ash and asbestos tailings by high-temperature pore-forming. *Waste Management*. 2020. Vol. 106. Pp. 184–192. doi:[10.1016/j.wasman.2020.03.008](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.008)
13. Romero A.R., Toniolo N., Boccaccini A.R., Bernardo E. Glass-ceramic foams from 'weak alkali activation' and gel-casting of waste glass/fly ash mixtures. *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 4. 588. doi:[10.3390/ma12040588](https://doi.org/10.3390/ma12040588)
14. Ivanov K.S. Metody aktivacii shihty pri poluchenii penosteklokeramiki [Methods of the burden materials activation when the foam glass-ceramics manufacturing]. *Novye ognepupory* [New refractories]. 2018. No. 4. Pp. 107–110. doi:[10.17073/1683-4518-2018-4-107-110](https://doi.org/10.17073/1683-4518-2018-4-107-110)
15. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 16. Pp. 19250–19256. doi:[10.1016/j.ceramint.2016.09.091](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.091)
16. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Klimova L.V., Yatsenko L.A. Peculiarities of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 142. No. 1. Pp. 119–127. doi:[10.1007/s10973-020-10015-3](https://doi.org/10.1007/s10973-020-10015-3)
17. Zhimalov A.A., Bondareva L.N., Igitkhanyan Y.G., Ivashchenko Y.G. Use of Amorphous Siliceous Rocks – Opokas to Obtain Foam Glass with Low Foaming Temperature. *Glass and Ceramics*. 2017. Vol. 174. Pp. 13–15. doi:[10.1007/s10717-017-9916-1](https://doi.org/10.1007/s10717-017-9916-1)
18. Kruszewski Ł., Palchik V., Vapnik Y., Nowak K., Banasik K., Galuskina I. Mineralogical, geochemical, and rock mechanic characteristics of zeolite-bearing rocks of the hatrurim basin, Israel. *Minerals*. 2021. Vol. 11. No. 10. 1062. doi:[10.3390/min11101062](https://doi.org/10.3390/min11101062)
19. Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Ermakov A.A. Fiziko-mekhanicheskie i teplofizicheskie svojstva penosteklokeramiki na osnove kremnezemsoderzhashchej porody [Physico-mechanical and thermophysical properties of foam-glass ceramics based on silica rock]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. 2019. No. 5. Pp. 8–15. doi:[10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374](https://doi.org/10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374)
20. Rodin A.I., Ermakov A.A. Fiziko-mekhanicheskie svojstva penosteklokeramiki na osnove kremnistyh porod s vysokim soderzhaniey CaCO₃ [Physico-mechanical properties of silica-based foam glass ceramics with high content of CaCO₃]. *Ogarev-online*. 2021. No. 6. Access mode: <http://journal.mrsu.ru/arts/fiziko-mexanicheskie-svojstva-penosteklokeramiki-na-osnove-kremnistyx-porod-s-vysokim-soderzhaniey-caco3>
21. Rodin A.I., Ermakov A.A. Teplofizicheskie svojstva penosteklokeramiki na osnove kremnistyh porod [Thermophysical properties of silica-based foam glass ceramic]. *Vestnik PGUAS: stroitel'stvo, nauka i obrazovanie* [PGUAS Bulletin: construction, science and education]. 2020. No. 2(11). Pp. 49–55.
22. Costa F.P.D., Morais C.R.D.S., Pinto H.C., Rodrigues A.M. Microstructure and physico-mechanical properties of Al₂O₃-doped sustainable glass-ceramic foams. *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 256. 123612. doi:[10.1016/j.matchemphys.2020.123612](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123612)
23. Keyvani N., Marghussian V.K., Rezaie H.R., Kord M. Effect of Al₂O₃ content on crystallization behavior, microstructure, and mechanical properties of SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO glass-ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2011. Vol. 8. No. 1. Pp. 203–213. doi:[10.1111/j.1744-7402.2009.02428.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2009.02428.x)

24. Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Ermakov A.A. Issledovanie fazovyh prevrashche-nij v shihte (trepel : Na₂CO₃) dlya penosteklokeramiki [Study of phase transformations in charge (tripoli: Na₂CO₃) for glass ceramic foams]. Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo [Regional Architecture and Engineering]. 2019. No. 3(40). Pp. 16–23.

25. Millo J. Geologiya glin (vyvetrivanie, sedimentologiya, geohimiya) [Geology of clays (weathering, sedimentology, geochemistry)]. Leningrad: Nedra, 1968. 369 p.

Информация об авторах:

Родин Александр Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий.

E-mail: AL_Rodin@mail.ru

Ермаков Анатолий Анатольевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,

аспирант кафедры строительных материалов и технологий.

E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

Абрашин Павел Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,

лаборант кафедры строительных материалов и технологий.

E-mail: abrashin00@mail.ru

Ерофеев Владимир Трофимович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий.

E-mail: yerofeevvt@mail.ru

Information about authors:

Rodin Aleksander I.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,

candidate of technical sciences, docent, associate professor of the department of building materials and technologies.

E-mail: AL_Rodin@mail.ru

Ermakov Anatoly A.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,

postgraduate student of the department of building materials and technologies.

E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

Abrashin Pavel I.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,

laboratory assistant of the department of building materials and technologies.

E-mail: abrashin00@mail.ru

Erofeev Vladimir T.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,

doctor of technical sciences, professor, head of the department of building materials and technologies.

E-mail: yerofeevvt@mail.ru