

А.И. РОДИН¹, А.А. ЕРМАКОВ¹, В.М. КЯШКИН¹, А.М. АСТАШОВ¹, Д.А. БУЯНКИН¹¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
г. Саранск, Россия

ПОРИСТАЯ СТЕКЛОКЕРАМИКА ИЗ ОПОКИ, КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ И КОРРЕКТИРУЮЩИХ ДОБАВОК

Аннотация. Пеностекло и вспененные стеклокерамические материалы обладают целым рядом уникальных свойств. Они химически стойкие, легкие, прочные, не горят, плохо пропускают тепло и звук и т.д. Их применяют как в частном строительстве, так и при возведении особо ответственных объектов. В статье подтверждена возможность использования опоки в качестве сырья для получения пористой стеклокерамики (ПСК) за один нагрев шихты методом порошкового вспенивания. Опоку, кальцинированную соду и корректирующие добавки (мел, глина) размалывали совместно в сухом состоянии, засыпали в жаростойкие формы и обжигали. Установлены температурные интервалы спекания и вспенивания шихты на основе опоки, влияние добавок на макроструктуру и свойства пористой стеклокерамики. Результаты получены методами термического анализа (ТА), рентгенофазового анализа (РФА) и др. Мел и глина в составе шихты оказывают существенное влияние на температуру ее спекание и вспенивание при нагревании, а также фазовый состав образцов ПСК. В результате получены образцы с мелкопористой структурой в форме блоков размером 500×500×200 мм со средней плотностью от 190 кг/м³ до 1535 кг/м³, прочностью при сжатии от 2 МПа до 116 МПа и с коэффициентом теплопроводности от 0,06 Вт/м·°С до 0,61 Вт/м·°С. Пористая стеклокерамика на основе опок, кальцинированной соды и корректирующих добавок (мел, глина) по физико-механическим и теплофизическим свойствам превосходит многие аналоги и может быть использована в качестве конструкционных, теплоизоляционных и других видов строительных материалов при строительстве, ремонте и реконструкции объектов различного назначения.

Ключевые слова: пористая стеклокерамика, кремнистые породы, опока, рентгеновофазовый анализ, макроструктура, физико-механические свойства, коэффициент теплопроводности.

A.I. RODIN¹, A.A. ERMAKOV¹, V.M. KYASHKIN¹, A.M. ASTASHOV¹,
D.A. BUYANKIN¹¹National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

POROUS GLASS CERAMICS FROM OPOKA, SODA ASH AND CORRECTIVE ADDITIVES

Abstract. Foam glass and foamed glass-ceramic materials have a number of unique properties. They are chemically resistant, light, durable, do not burn, do not transmit heat and sound well, etc. They are used both in private construction and in the construction of specially responsible facilities. The article confirms the possibility of using flask as a raw material for the production of porous glass ceramics (PSK) in one charge heating by powder foaming. Flask, soda ash and corrective additives (chalk, clay) were ground together in a dry state, poured into heat-resistant molds and fired. The temperature ranges of sintering and foaming of the charge based on the flask, the effect of additives on the macrostructure and properties of porous glass ceramics have been established. The results were obtained by thermal analysis (TA), X-ray phase analysis (XFA), etc. Chalk and clay in the composition of the charge have a significant effect on the temperature of its sintering and foaming during heating, as well as the phase composition of the UCS samples. As a result, samples with a finely porous structure in the form of blocks of 500×500×200 mm in size with an average density from 190 kg/m³ to 1535 kg/m³, compressive strength from 2 MPa to 116 MPa and with a thermal conductivity coefficient from 0.06 W/m°C to 0.61 W/m°C.

Porous glass ceramics based on flasks, soda ash and corrective additives (chalk, clay) surpass many analogues in terms of physical, mechanical and thermal properties and can be used as structural, thermal insulation and other types of building materials during construction, repair and reconstruction of facilities for various purposes.

Keywords: *porous glass ceramics, siliceous rocks, opoka, X-ray phase analysis, macrostructure, physical and mechanical properties, thermal conductivity coefficient.*

Введение

Пеностекло и вспененные стеклокерамические материалы обладают целым рядом уникальных свойств. Они легкие, прочные, не горят, плохо пропускают тепло и звук, имеют высокую химическую стойкость и мн. др. [1]. Их используют при строительстве, реконструкции и ремонте стен зданий и сооружений, в частности в качестве утеплителя конструкций пола, кровли и фасада [1, 2]. Очень часто данные материалы используют при проведении отделочных работ [2]. В промышленности они хорошо себя зарекомендовали в качестве высокотемпературных теплоизоляционных [3], звукоизоляционных [4], антикоррозионных материалов [5] и др.

Большое количество научных исследований посвящено разработке составов и технологии получения пористой стеклокерамики из отходов различных производств: стекла [4, 6], черных и цветных металлов [2, 7], оксида алюминия [8], и мн. др. В отдельную группу строительных материалов можно отнести стеклокерамику из кремнистых пород (диатомит, трепел, опока) [9–11]. Способы получения пористых стеклокерамических материалов также разнообразны: порошок метод [1], метод вспенивания суспензии [12] и др. Для формирования пористой структуры будущего стеклокерамического материала при таких способах производства в состав шихты добавляют вспенивающие компоненты: углеродсодержащие добавки [1, 13], карбонаты [14] и мн. др. Пористую стеклокерамику получают также из кремнистых пород. Диатомит или опоку размалывают, смешивают с щелочным раствором высокой концентрации, гранулируют, а затем обжигают во вращающихся печах [9, 10]. Вспенивающие компоненты при таком способе производства добавлять не требуется, так как они уже есть в составе породы или образуются в результате химической реакции с щелочным активатором. Известен способ получения пористой стеклокерамики в форме блока из цеолитсодержащих трепелов. Материалы получены за один нагрев шихты методом порошкового вспенивания [15–17]. Трепел, кальцинированную соду и корректирующие добавки размалывают совместно в сухом состоянии, засыпают в жаростойкие формы и обжигают при температуре до +850 °С. В результате получен экологичный, легкий, химически стойкий материал, который более чем в 2 раза прочнее газо- и пенобетона при равной плотности. А температура его применения достигает +900 °С.

Анализируя данные химического и минералогического состава опок, а также сравнивая их с аналогичными показателями для цеолитсодержащих трепелов можно предположить, что данное сырье при незначительной корректировке состава пригодно для получения пористых стеклокерамических материалов в форме блока по порошковой технологии за один нагрев шихты. Свойства любого материала зависят от его состава и структуры. Стеклокерамические материалы не исключение. Известно, что плотность таких материалов находится в прямой зависимости от количества СаО в их составе [18]. Увеличить прочностные свойства стеклокерамики можно при увеличении в составе шихты количества Al₂O₃ или Fe₂O₃ [19, 20]. На максимальную температуру эксплуатации стеклокерамики оказывает негативное влияние целый ряд оксидов в ее составе Na₂O, Fe₂O₃ и СаО [19] и положительное – повышенное количество Al₂O₃ [19, 20]. Следовательно, чтобы получить пористую стеклокерамику из опок в качестве основных корректирующих добавок можно использовать карбонатные породы (мел, известняк) и различные глины. Результаты подобных исследований в литературе

отсутствуют. Следовательно, цель исследования: подтвердить возможность использования опоки в качестве сырья для получения пористой стеклокерамики за один нагрев шихты методом порошкового вспенивания. Задачи:

– установить температурные интервалы спекания и вспенивания, а также фазовые превращения при нагревании шихты на основе опоки, соды кальцинированной и корректирующих добавок (мел, глина);

– установить изменение фазового состава образцов от количества и вида вводимых в шихту добавок;

– установить влияние вида и количества корректирующих добавок на структуру и свойства пористой стеклокерамики.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели экспериментальные исследования выполнены с использованием следующих компонентов: горные породы (опока, мел, глина), сода кальцинированная, хлорид калия. В таблице 1 и 2 представлен соответственно химический и минералогический состав пород.

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	BaO	ППП
Опока	89,7	0,5	3,8	1,1	0,8	0,5	0,2	0,1	-	-	3,3
Мел	5,7	52,0	1,3	0,6	0,2	0,4	0,1	0,1	-	-	39,6
Глина	57,4	0,6	20,4	6,3	1,1	2,4	0,7	2,5	0,2	0,1	8,3

Таблица 2 – Минералогический состав пород

Порода	Минералогический состав, % масс.				
	Кварц	Кальцит	Мусковит	ОКТ	Глинистые минералы
Опока	5,9	–	0,6	78,1	15,9
Мел	5,6	94,4	–	–	–
Глина	23,7	–	–	–	76,3

Использованная в работе кальцинированная сода >99 % состоит из основного вещества Na₂CO₃, а хлорид калия >97 % состоит из основного вещества KCl.

В ходе эксперимента были изготовлены и испытаны образцы 16 составов с разным содержанием горных пород. Составы приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Составы шихты

№ состава	Состав шихты, %				
	Опока	Мел	Глина	Na ₂ CO ₃	KCl
C1	80,8	–	–	19	0,2
C2	73,3	–	7,5		
C3	65,8	–	15		
C4	58,3	–	22,5		
C5	75,8	5	–		
C6	68,3	5	7,5		
C7	60,8	5	15		
C8	53,3	5	22,5		
C9	70,8	10	–		
C10	63,3	10	7,5		
C11	55,8	10	15		
C12	48,3	10	22,5		
C13	65,8	15	–		
C14	58,3	15	7,5		
C15	50,8	15	15		
C16	43,3	15	22,5		

Шихту готовили следующим способом: компоненты высушивали до влажности не более 2 %, дозировали (согласно таблице 3) и совместно размалывали. Размол осуществляли с использованием шаровой планетарной мельницы Retsch PM 400 (Германия) по режиму: частота вращения стаканов мельницы – 350 мин⁻¹, продолжительность – 30 мин.

Температурные интервалы спекания и вспенивания шихты на основе опоки, соды кальцинированной и корректирующих добавок определяли по следующей методике. На первом этапе из шихты массой 1,5 г под давлением 1 МПа прессовали образцы в форме цилиндра ($r=6\pm 0,05$ мм). Затем их вертикально помещали в муфельную печь и нагревали со скоростью 2 °С/мин до заданной температуры. При заданной температуре образцы выдерживали в течении 10 мин. После их остывания вместе с печью до температуры не более 40 °С, сканировали их поверхность и определяли среднюю плотность. Эксперимент повторяли для каждого нового образца с увеличением заданной температуры на 20 °С. В ходе эксперимента испытано не менее 3 образцов для каждого состава в каждой температурной точке.

Влияние отдельных компонентов (мел, глина) в составе шихты на фазовые превращения в ней при нагревании установлено методом термического анализа (ТА). В алундовый тигель объёмом 70 мкл засыпали шихту массой 10±0,1 мг. Тигель вместе с шихтой помещали в прибор TGA/DSC1 (Швейцария) и нагревали со скоростью 10 °С/мин от 30 до 850 °С. Прибор фиксировал изменение массы и температуры образца. Обработку полученных экспериментальных данных (кривые ДТА – дифференциально-термического анализа и ДТГ – дифференциальной термогравиметрии) выполняли с использованием программного обеспечения STARe (Mettler-Toledo, Швейцария).

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на измельченных до фракции менее 80 мкм образцах ПСК с помощью дифрактометра Empyrean PANalytical PIXcel3D (Нидерланды). Режим съемки: излучение – CuK α , угол поворота $2\theta=5-70^\circ$, скорость съемки – 0,0131°/минуту, время интеграции – 150 с. Определение фазового состава образцов выполнено методом Ханавальта на основании открытой базы данных по кристаллографии.

Кажущуюся плотность, прочность при сжатии и коэффициент теплопроводности пористой стеклокерамики определяли на образцах, выпиленных из блоков размером 500×500×200 мм по методикам, представленным в нашей предыдущей работе [15].

Результаты исследования и их анализ

Температурные интервалы спекания и вспенивания шихты при нагревании установлены по изменению средней плотности образцов в зависимости от температуры обжига (рисунок 1), а также методами термического анализа (ДТА и ДТГ).

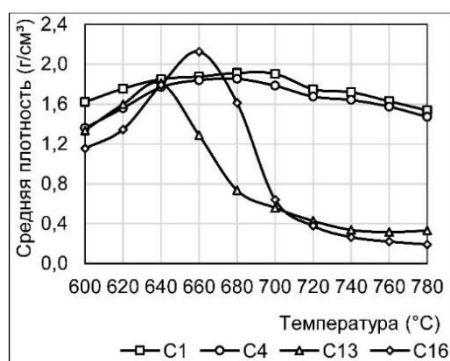


Рисунок 1 – Изменение средней плотности образцов в зависимости от температуры обжига (C1–C16 – номера составов)

Согласно данным (рисунок 1) установлено, что используемые добавки (мел, глина) в составе шихтовой смеси оказывают существенное влияние на процессы спекания и

вспенивания при ее нагревании. Шихта без корректирующих добавок (состав С1) плавно спекается при увеличении температуры обжига до $+690\text{ }^{\circ}\text{C}$. Средняя плотность образцов увеличилась до $\approx 1920\text{ кг/м}^3$. Дальнейшее увеличение температуры обжига до $+780\text{ }^{\circ}\text{C}$ привело к снижению средней плотности образцов до $\approx 1540\text{ кг/м}^3$, что свидетельствует о ее медленном вспенивании. При увеличении в составе шихты количества мела до 15 % (состав С13) процесс спекания образцов заканчивается при температуре $+640\text{ }^{\circ}\text{C}$ и начинается их вспенивание. С увеличением количества мела в шихте интенсивность вспенивания увеличивается и завершается при температуре $+700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Средняя плотность вспененных образцов с максимальным количеством мела (15 %) уменьшилась до $\approx 330\text{ кг/м}^3$. Основное влияние глины в составе шихты совместно с мелом при ее нагревании связано со смещением завершения процесса спекания и начала вспенивания образцов в сторону больших температур. При увеличении в состав шихты глины в количестве до 22,5 % шихта завершает спекаться и начинает вспениваться при температуре $+660\text{ }^{\circ}\text{C}$. Средняя плотность вспененных образцов с максимальным количеством мела (15 %) и глины (22,5 %) уменьшилась до $\approx 200\text{ кг/м}^3$.

Полученные термограммы образцов шихты приведены на рисунке 2.

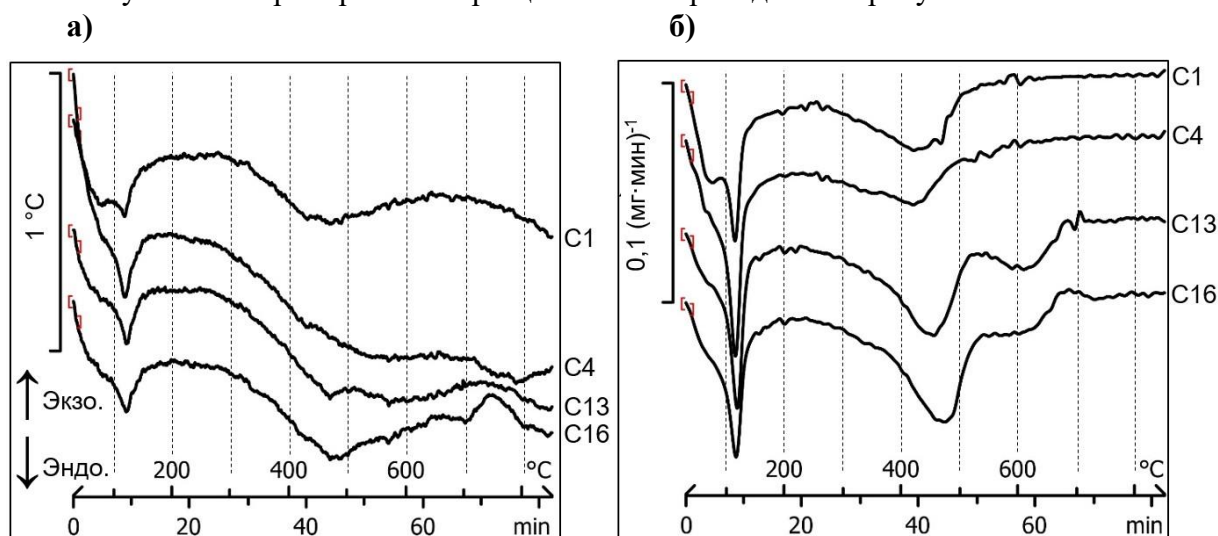


Рисунок 2 – ДТА (а) и ДТГ (б) образцов шихты (С1–С16 – номера составов)

Согласно данным рисунка 2, корректирующие добавки мел и глина оказывают существенное влияние на фазовые превращения в шихте при нагревании. Первый эндотермический эффект на ДТА кривых (рисунок 2,а) и потеря массы на ДТГ кривых (рисунок 2,б) всех испытанных образцов при температуре с максимумом $\approx +120\text{ }^{\circ}\text{C}$, связаны с разложением образовавшегося после помола шихты минерала вегшайдерита [16]. Количество данного минерала увеличивается при увеличении в составе шихты добавок. Из литературы известно, что в данной области температур у шихты для стеклокерамики из кремнеземсодержащих пород разлагаются также гидросиликаты натрия [10]. Декарбонизация кальцинированной соды и дегидратация некоторых глинистых минералов из состава шихты начинается при температуре от $\approx +240\text{ }^{\circ}\text{C}$ и завершается до $\approx +520\text{ }^{\circ}\text{C}$, о чем свидетельствует эндотермический эффект и потеря массы у образцов на кривых ДТА и ДТГ соответственно. Декарбонизация кальцита и дегидратация оставшихся глинистых минералов в образцах происходит при температуре от $\approx +520\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $\approx +670\text{ }^{\circ}\text{C}$ (незначительный эндоэффект и достаточно большая потеря массы на рисунке 3). При увеличении в составе шихты глины при постоянном количестве кальцита потеря массы у образцов в данной области температур уменьшается, что, вероятно, связано со смещением температуры разложения кальцита в область меньших температур. Увеличивая температуру обжига шихты больше $+670\text{ }^{\circ}\text{C}$, масса образцов уже не изменяется, а их температура сначала резко уменьшается (образцы

размягчаются), а затем увеличивается (образцы вспениваются). По интенсивности увеличения температуры образцов можно судить о скорости их вспенивания. Максимальная скорость вспенивания у образцов шихты с максимальным количеством добавок (мел – 15 % и глина – 22,5 %). Полученные данные согласуются с результатами, представленными на рисунке 1, и коррелируются с результатами проведенных нами ранее, в которых в качестве сырья для стеклокерамических материалов вместо опоки использовали цеолитсодержащие трепелы [15–17].

Рентгенофазовый анализ образцов ПСК. На рисунке 3 представлены результаты рентгенофазового анализа образцов пористой стеклокерамики после обжига при температуре +780 °С.

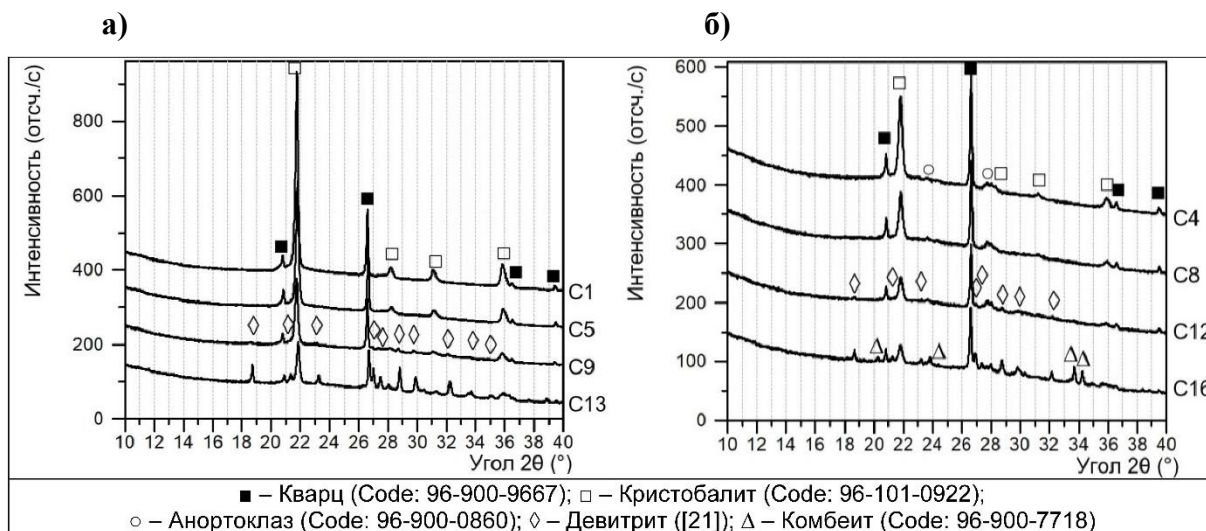


Рисунок 3 – РФА образцов ПСК из шихты с добавкой глины: (а) – 0 %; (б) – 22,5 % (C1–C16 – номера составов)

Согласно полученным данным (рисунок 3), все образцы ПСК состоят из аморфной и кристаллической фазы. Плавное повышение фона на всех рентгенограммах от 15° до 37° (2θ) свидетельствует о наличии аморфной фазы. Установлено влияние химического и минералогического состава шихты на изменение ее количественного содержания в стеклокерамике. Количество аморфной фазы незначительно увеличивается с увеличением в составе шихты добавок (мел, глина).

Кристаллическая фаза образцов без корректирующих добавок (C1) состоит из кристобалита (SiO₂) и кварца (SiO₂). При добавлении в состав шихты глины в количестве до 22,5 %, появляется новая фаза – анортоклаз ((Na_{0.85}K_{0.15})(AlSi₃O₈)) и уменьшается количество кристобалита. При введении в состав шихты мела в количестве 10 % и более, в образцах пористой стеклокерамики появляется девитрит (Na₂Ca₃Si₆O₁₆) [21], количество которого уменьшается при увеличении в составе шихты глины. При одновременном добавлении мела и глины в состав шихтовой смеси в количестве не менее 15 % каждого в стеклокерамике вместо девитрита начинает кристаллизоваться минерал комбеит (Na₂Ca₂Si₃O₉), что связано с нехваткой в составе шихты реакционного SiO₂. Аналогичные данные получены нами и ранее на сырье из цеолитсодержащих трепелов [17].

Макроструктура и свойства образцов ПСК. Для наглядного подтверждения влияния добавок (мел, глина) в составе шихты на изменение макроструктуры образцов стеклокерамических материалов выполнено сканирование их поверхности. На рисунке 4 представлены результаты сканирования.

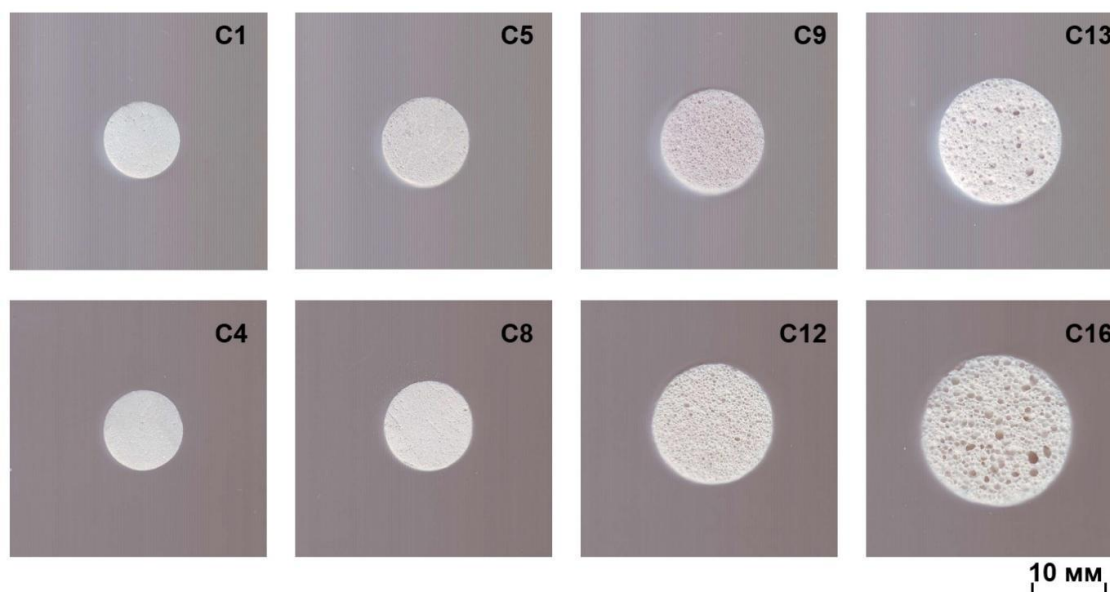


Рисунок 4 – Результаты сканирования образцов ПСК
(C1–C16 – номера составов)

Согласно данным рисунка 4, при увеличении количества мела в составе шихты до 15 % диаметр пор в стеклокерамике увеличился до 1 мм и как следствие уменьшилась средняя плотность образцов. При увеличении количества глины в составе шихты до 22,5 % (нижний ряд) диаметр пор в образцах стеклокерамики дополнительно увеличился, а их средняя плотность уменьшилась еще больше. Образцы с максимальным содержанием мела (C13, C16) имеют неравномерную макроструктуру по всей площади поверхности, что, вероятно, связано с избыточным его количеством, остатки которого в процессе декарбонизации выделяют углекислый газ, дополнительно вспенивающий шихту. Полученные данные согласуются с данными рисунка 1.

Основные физико-механические и теплофизические свойства образцов пористой стеклокерамики из опоки и кальцинированной соды с добавками (мел, глина) приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Свойства образцов ПСК

№ состава	Свойства		
	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С
C1	1535	116	0,61
C4	1470	97,8	0,58
C13	330	4,6	0,085
C16	190	2	0,06

Вид и количество корректирующих добавок (мел, глина) в составе шихты оказывают существенное влияние на среднюю плотность образцов пористой стеклокерамики. При раздельном добавлении в состав шихты глины до 22,5 % и мела в количестве до 15 % средняя плотность образцов стеклокерамики уменьшилась с 1535 кг/м³ до 1470 кг/м³ и 330 кг/м³ соответственно. При совместном введении в состав шихтовой смеси 15 % мела и 22,5 % глины средняя плотность образцов стеклокерамики уменьшилась до 190 кг/м³. Известно, что прочность при сжатии, а также коэффициент теплопроводности образцов пористой стеклокерамики находятся в линейной зависимости от их кажущейся плотности [15, 17]. В рамках представленной работы данная закономерность не устанавливалась. Прочность при сжатии образцов пористой стеклокерамики с кажущейся плотностью 1535 кг/м³ (C1) – 116 МПа, коэффициент теплопроводности – 0,61 Вт/м·°С. У образцов C16 с наименьшей кажущейся плотностью 190 кг/м³ прочность при сжатии составила 2 МПа, коэффициент

теплопроводности 0,06 Вт/м·°С. По физико-механическим и теплофизическим свойствам разработанная пористая стеклокерамика из опоки с добавками мела и глины превосходит многие аналоги [9, 11, 22–24].

Выводы

1. Подтверждена возможность использования опоки в качестве сырья для получения пористой стеклокерамики за один нагрев шихты методом порошкового вспенивания. Опоку, кальцинированную соду и корректирующие добавки (мел, глина) размалывали совместно в сухом состоянии, засыпали в жаростойкие формы и обжигали. В результате получены образцы с мелкопористой структурой в форме блоков размером 500×500×200 мм со средней плотностью от 190 кг/м³ до 1535 кг/м³, прочностью при сжатии от 2 МПа до 116 МПа и с коэффициентом теплопроводности от 0,06 Вт/м·°С до 0,61 Вт/м·°С.

2. Установлено влияние вида и количества корректирующих добавок (мел, глина) на температурные интервалы спекания и вспенивания шихты и фазовые превращения в ней при нагревании. При увеличении в составе шихты количества мела до 15 % процесс спекания образцов заканчивается при температуре +640 °С, а при температуре +700 °С завершается их интенсивное вспенивание. Основное влияние глины (до 22,5 %) в составе шихты совместно с мелом при ее нагревании связано со смещением процесса спекания и начала вспенивания образцов в сторону больших температур.

3. Образцы пористой стеклокерамики на основе опоки, кальцинированной соды и корректирующих добавок (мел, глина) состоят из аморфной и кристаллической фазы. Количество аморфной фазы незначительно увеличивается с увеличением в составе шихты добавок. Основной кристаллической фазой в образцах без добавок является кристобалит и кварц. При введении в состав шихты глины (до 22,5 %) уменьшается количество кристобалита и увеличивается количество анортотклаза. В образцах из шихты с мелом (10–15 %) основной кристаллической фазой является диветрит, а с мелом (15 %) и глиной (22,5 %) – комбеит.

4. Пористая стеклокерамика на основе опок, кальцинированной соды и корректирующих добавок (мел, глина) по физико-механическим и теплофизическим свойствам превосходит многие аналоги и может быть использована в качестве конструкционных, теплоизоляционных и других видов строительных материалов при строительстве, ремонте и реконструкции объектов различного назначения.

Финансирование

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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)
2. 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(8). Pp. 10079–10084. doi: [10.1016/j.ceramint.2016.03.113](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.113)
3. 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(10): Pp. 14645–14651. doi: [10.1016/j.ceramint.2015.07.186](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.186)
4. 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)
5. Yatsenko E.A., Ryabova A.V., Goltsman B.M. Development of fiber-glass composite coatings for protection of steel oil pipelines from internal and external corrosion // *Chernyye Metally*. 2019. No. 12. Pp. 46–51.

6. 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(3). 570. doi: [10.3390/ma14030570](https://doi.org/10.3390/ma14030570)
7. Yatsenko E.A, Goltsman B.M, Kosarev A.S, Karandashova N.S, Smolii V.A, Yatsenko L.A. Synthesis of Foamed Glass Based on Slag and a Glycerol Pore-Forming Mixture // *Glass Physics and Chemistry*. 2018. Vol. 44(2). Pp. 152–155. doi: [10.1134/S1087659618020177](https://doi.org/10.1134/S1087659618020177)
8. Liu T., Li X., Guan L., Liu P., Wu T., Li Z., Lu A. Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from lead-zinc mine tailings and red mud: Foaming mechanism, physical, mechanical and chemical properties // *Ceramics International*. 2016. 42(1). Pp. 1733–1739. doi: [10.1016/j.ceramint.2015.09.131](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.09.131)
9. Ivanov K.S. Associated Synthesis of Microgranular Foam-Glass-Ceramic from Diatomaceous Shales // *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2022. Vol. 79: Pp. 234–238. doi: [10.1007/s10717-022-00491-4](https://doi.org/10.1007/s10717-022-00491-4)
10. Kazantseva L.K, Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42(16): Pp. 19250–19256. doi: [10.1016/j.ceramint.2016.09.091](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.091)
11. Yatsenko E.A, Smolii V.A, Goltsman B.M, Ryabova A.V, Klimova L.V, Goltsman N.S. Optimal Fractional Composition of Batch for Synthesis of Foam-Glass Materials Based on Diatomite from the Chernoyarskoe Deposit // *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2019. Vol. 75. Pp. 391–393. doi: [10.1007/s10717-019-00092-8](https://doi.org/10.1007/s10717-019-00092-8)
12. Huo W., Yan S., Wu J.-M., Liu J., Chen Y., Qu Y., Tang X., Yang J. A novel fabrication method for glass foams with small pore size and controllable pore structure // *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 100(12). Pp. 5502–5511. doi: [10.1111/jace.15089](https://doi.org/10.1111/jace.15089)
13. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Application of foaming agent–oxidizing agent couples to foamed-glass formation // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. Vol. 553. 120469. doi: [10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469)
14. 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 // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. Pp. 896–909. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170)
15. Rodin A., Ermakov A., Erofeeva I., Erofeev V. Effect of Chlorides Content on the Structure and Properties of Porous Glass Ceramics Obtained from Siliceous Rock // *Materials*. 2022. Vol. 15(9). 3268. doi: [10.3390/ma15093268](https://doi.org/10.3390/ma15093268)
16. Rodin A.I., Ermakov A.A., Kyashkin V.M., Rodina N.G., Erofeev V.T. Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from siliceous rocks // *Magazine of Civil Engineering*. 2023. Vol. 121(5). 12109. doi: [10.34910/MCE.121.9](https://doi.org/10.34910/MCE.121.9)
17. 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)₂ // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Vol. 51(5). Pp. 127–141. doi: [10.18149/MPM.5152023_13](https://doi.org/10.18149/MPM.5152023_13)
18. 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)
19. Li Y., Zhao L.-H., Wang Y.-K., Cang D.-Q. Effects of Fe₂O₃ on the properties of ceramics from steel slag // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 25(4). Pp. 413–419. doi: [10.1007/s12613-018-1586-7](https://doi.org/10.1007/s12613-018-1586-7)
20. 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)
21. Kahlenberg V., Girtler D., Arroyabe E., Kaindl R., Töbrens D.M. Devitrite (Na₂Ca₃Si₆O₁₆) – structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses // *Mineralogy and Petrology*. 2010. Vol. 100. Pp. 1–9. doi: [10.1007/s00710-010-0116-8](https://doi.org/10.1007/s00710-010-0116-8)
22. 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)
23. 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](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823)
24. Erofeev V.T., Korotaev S.A., Vatin N.I. Deformation and Heat-Insulating Characteristics of Light Concrete on Porous Burned Binder Under Heating // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Vol. 51(1). Pp. 33–41. doi: [10.18149/MPM.5112023_4](https://doi.org/10.18149/MPM.5112023_4)

REFERENCES

1. 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)
2. 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(8). Pp. 10079–10084. doi: [10.1016/J.CERAMINT.2016.03.113](https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2016.03.113)
3. 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(10): Pp. 14645–14651. doi: [10.1016/j.ceramint.2015.07.186](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.186)
4. Kyaw Oo D'Amore G., Caniato M., Travan A., Turco G., Marsich L., Ferluga A., Schmid C. Innovative thermal and acoustic insulation 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)
5. Yatsenko E.A., Ryabova A.V., Goltsman B.M. Development of fiber-glass composite coatings for protection of steel oil pipelines from internal and external corrosion. *Chernye Metally*. 2019. No. 12. Pp. 46–51.
6. 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(3). 570. doi: [10.3390/ma14030570](https://doi.org/10.3390/ma14030570)
7. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Kosarev A.S., Karandashova N.S, Smolii V.A, Yatsenko L.A. Synthesis of Foamed Glass Based on Slag and a Glycerol Pore-Forming Mixture. *Glass Physics and Chemistry*. 2018. Vol. 44(2). Pp. 152–155. doi: [10.1134/S1087659618020177](https://doi.org/10.1134/S1087659618020177)
8. Liu T., Li X., Guan L., Liu P., Wu T., Li Z., Lu A. Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from lead-zinc mine tailings and red mud: Foaming mechanism, physical, mechanical and chemical properties. *Ceramics International*. 2016. 42(1). Pp. 1733–1739. doi: [10.1016/j.ceramint.2015.09.131](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.09.131)
9. Ivanov K.S. Associated Synthesis of Microgranular Foam-Glass-Ceramic from Diatomaceous Shales. *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2022. Vol. 79: Pp. 234–238. doi: [10.1007/s10717-022-00491-4](https://doi.org/10.1007/s10717-022-00491-4)
10. Kazantseva L.K, Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42(16): Pp. 19250–19256. doi: [10.1016/j.ceramint.2016.09.091](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.091)
11. Yatsenko E.A, Smolii V.A, Goltsman B.M, Ryabova A.V, Klimova L.V, Goltsman N.S. Optimal Fractional Composition of Batch for Synthesis of Foam-Glass Materials Based on Diatomite from the Chernoyarskoe Deposit. *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2019. Vol. 75. Pp. 391–393. doi: [10.1007/s10717-019-00092-8](https://doi.org/10.1007/s10717-019-00092-8)
12. Huo W., Yan S., Wu J.-M., Liu J., Chen Y., Qu Y., Tang X., Yang J. A novel fabrication method for glass foams with small pore size and controllable pore structure. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 100(12). Pp. 5502–5511. doi: [10.1111/jace.15089](https://doi.org/10.1111/jace.15089)
13. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Application of foaming agent–oxidizing agent couples to foamed-glass formation. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. Vol. 553. 120469. doi: [10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469)
14. 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. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. Pp. 896–909. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170)
15. Rodin A., Ermakov A., Erofeeva I., Erofeev V. Effect of Chlorides Content on the Structure and Properties of Porous Glass Ceramics Obtained from Siliceous Rock. *Materials*. 2022. Vol. 15(9). 3268. doi: [10.3390/ma15093268](https://doi.org/10.3390/ma15093268)
16. Rodin A.I., Ermakov A.A., Kyashkin V.M., Rodina N.G., Erofeev V.T. Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from siliceous rocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2023. Vol. 121(5). 12109. doi: [10.34910/MCE.121.9](https://doi.org/10.34910/MCE.121.9)
17. 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)₂. *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Vol. 51(5). Pp. 127–141. doi: [10.18149/MPM.5152023_13](https://doi.org/10.18149/MPM.5152023_13)
18. 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)
19. Li Y., Zhao L.-H., Wang Y.-K., Cang D.-Q. Effects of Fe₂O₃ on the properties of ceramics from steel slag. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 25(4). Pp. 413–419. doi: [10.1007/s12613-018-1586-7](https://doi.org/10.1007/s12613-018-1586-7)

20. 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)
21. Kahlenberg V., Girtler D., Arroyabe E., Kaindl R., Töbrens D.M. Devitrite (Na₂Ca₃Si₆O₁₆) – structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses. *Mineralogy and Petrology*. 2010. Vol. 100. Pp. 1–9. doi: [10.1007/s00710-010-0116-8](https://doi.org/10.1007/s00710-010-0116-8)
22. 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)
23. 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](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823)
24. Erofeev V.T., Korotaev S.A., Vatin N.I. Deformation and Heat-Insulating Characteristics of Light Concrete on Porous Burned Binder Under Heating. *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Vol. 51(1). Pp. 33–41. doi: [10.18149/MPM.5112023_4](https://doi.org/10.18149/MPM.5112023_4)

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

Кяшкин Владимир Михайлович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры строительных материалов и технологий, E-mail: kyashkin@mail.ru

Асташов Алексей Михайлович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной и компьютерной графики, E-mail: astalexm@mail.ru

Буянкин Дмитрий Андреевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, лаборант-исследователь кафедры строительных материалов и технологий, E-mail: super.buyanin@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

Kyashkin Vladimir M.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
candidate of physical and mathematical sciences, docent, senior scientist of the department of building materials and technologies,

E-mail: kyashkin@mail.ru

Astashov Alexey M.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
candidate of technical sciences, docent, head of the department of engineering and computer graphics,

E-mail: astalexm@mail.ru

Buyankin Dmitry A.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
laboratory researcher of the department of building materials and technologies,

E-mail: super.buyankin@mail.ru