

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374

¹Ерофеев В.Т., ^{1,*}Родин А.И., ¹Кравчук А.С., ¹Ермаков А.А.¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68

*E-mail: AL_Rodin@mail.ru

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОДЫ

Аннотация. Получение пеностеклокерамических строительных материалов минуя процесс высокотемпературной варки стекломассы, а также использование в качестве сырья местные горные породы, позволяющие значительно снизить стоимость конечного продукта – актуальная задача современного строительного материаловедения. Целью данной работы было изучение физико-механических и теплофизических свойств пеностеклокерамических строительных материалов, полученных за один нагрев шихты, состоящей из кремнеземсодержащей породы (трепел) и кальцинированной соды. Разработанные теплоизоляционные строительные материалы имеют среднюю плотность от 200 до 600 кг/м³, прочность при сжатии от 1,2 до 9,8 МПа, теплопроводность от 0,053 до 0,065 Вт/м·°С. Исследованиями установлено рациональное соотношение компонентов в составах пеностеклокерамики на основе кремнеземсодержащей породы. При производстве вспененных материалов, скорость нагрева шихты должна варьироваться от 3 до 4,5 °С/мин, а максимальная температура нагрева от 800 до 850 °С. Разработанный материал расширит номенклатуру теплоизоляционных строительных материалов и может быть использован при строительстве объектов промышленного и гражданского назначения, в том числе АЭС, в газо- и нефтепромышленности.

Ключевые слова: пеностеклокерамика, теплоизоляционный материал, кремнеземсодержащая порода, прочность, плотность, теплопроводность.

Введение. В последние годы пеностекло материалы на основе пеностекла все в большем объеме используются в строительной отрасли. Данные материалы легкие, обладают низкой теплопроводностью, достаточной эксплуатационной прочностью, не дают усадки и не изменяют геометрические размеры с течением времени под действием эксплуатационных нагрузок, выдерживают высокие температуры, являются коррозионностойкими. Все это позволяет рекомендовать данный материал в качестве утеплителя при строительстве АЭС, в газо- и нефтепромышленности, промышленном и гражданском строительстве [1–3]. Самая крупная транснациональная корпорация «Pittsburgh Corning», имеющая ряд заводов в США и Европе, является самым крупным поставщиком высококачественной теплоизоляционной продукции на основе пеностекла в Россию. С конца 90-х годов прошлого века вопрос создания производства пеностекла в России встал особенно остро, причиной этому являются суровые климатические условия, ужесточение теплотехнических требований к ограждающим конструкциям, рост цен на данный вид теплоизоляционных материалов и др. [3–6]. Именно в этот период в России возобновляется производство пеностекла на заводах: «СТЭС-Владимир» (г. Владимир), «Пеноситал» (г. Пермь),

«PENOSTEK» и «SAITAX» (Московская область) и др.

Технология производства пеностекла достаточно сложная и включает несколько этапов. Сначала этапе производят варку стекла, затем, остывшее стекло размалывают с газообразующими добавками и повторно нагревают с последующим отжигом полученного материала. Современные научные исследования в области получения строительных материалов из пеностекла имеют следующие направления: поиск способов производства пеностекла без материалоёмких форм [7–8]; низкотемпературный синтез стекломассы без применения стеклоплавильных агрегатов; вспенивание шихты, минуя процесс высокотемпературной варки стекломассы [8–14]; расширение сырьевой базы за счёт применения различных видов стёкол, стеклобоя и местных горных пород, позволяющее значительно увеличить доступность сырья и, одновременно, снизить стоимость конечного продукта [7–20] и др.

Предлагаемое нами направление научного исследования подразумевает отказ от первой стадии (варка стекла), а варку и вспенивание шихты осуществлять за один нагрев, что позволит значительно сократить технологические затраты. Кроме того, данная технология позволяет ис-

пользовать в производстве дешевое сырье (диатомит, трепел, опока и т.п.), имеющееся в большом количестве в различных регионах России.

Целью данной работы являлось изучение физико-механических и теплофизических свойств пеностеклокерамических строительных материалов, полученной за один нагрев шихты, состоящей из кремнеземсодержащей породы (трепел) и кальцинированной соды.

Методология. В качестве сырья для получения пеностеклокерамики использовались:

- кремнеземсодержащая порода (трепел) месторождения близ с. Енгальчево, Дубенского района, Республики Мордовия, следующего химического состава: SiO_2 – 71,00 %, CaO – 9,01 %, Al_2O_3 – 8,90 %, Fe_2O_3 – 2,86 %, K_2O – 2,06 %, MgO – 1,61 %, TiO_2 – 0,444 %, Na_2O – 0,252 %, P_2O_5 – 0,171 %, SrO – 0,064 %, BaO – 0,029 %, SO_3 – 0,027 %, ZrO_2 – 0,017 %, V_2O_5 – 0,012 %, MnO – 0,012 %, Cr_2O_3 – 0,009 %, Rb_2O – 0,010 %, CuO – 0,008 %, ZnO – 0,005 %, ППП – 3,50 % и минералогического состава: кристобалит (SiO_2) – 42,1 %, гейландит ($(\text{Ca}, \text{Sr}, \text{K}_2, \text{Na}_2)[\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{16}] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) – 17,7 %, мусковит ($\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$) – 14,4 %, кальцит (CaCO_3) – 13,9 %, кварц (SiO_2) – 11,2 %, тридимит (SiO_2) – 0,7 %.

- сода кальцинированная техническая первого сорта, отвечающая требованиям ГОСТ 5100-85. Химическая формула Na_2CO_3 .

Шихту для изготовления пеностеклокерамики получали совместным помолом, высушенной до постоянной массы при $t = 105$ °С, вышеуказанной породы и кальцинированной соды до достижения удельной поверхности не менее 1 000 м²/кг. При выполнении исследований рассматривалась шихта с соотношением трепел/ Na_2CO_3 в пределах от 85/15 до 80/20. Полученная шихта засыпалась в металлическую форму, предварительно обработанную каолиновой обмазкой, и уплотнялась. Форма с шихтой устанавливалась в муфельную печь и нагревалась со скоростью от 1,5 до 4,5 °С/мин до различных температур в пределах от 750 до 950 °С с выдержкой при максимальной температуре в течение 30 мин. После остывания формы с полученным материалом вместе с печью до комнатной температуры, она разбиралась, а материал извлекался для дальнейших испытаний.

Физико-механические свойства разрабатываемого материала определялись в соответствии с ГОСТ 33949-2016.

Коэффициент теплопроводности определялся зондовым методом в соответствии с ГОСТ 30256-94.

Основная часть. На рис. 1 приведены результаты исследования по определению зависи-

мости изменения средней плотности и прочности при сжатии пеностеклокерамических материалов от состава, скорости нагрева и максимальной температуры нагрева шихты.

При определении зависимостей изменения средней плотности и прочности при сжатии пеностеклокерамики от состава шихты (соотношение трепел / Na_2CO_3 от 85/15 до 80/20), ее нагревали до температуры 850 °С со скоростью 4,5 °С/мин. Согласно полученным данным (рис. 1, а), средняя плотность пеностеклокерамики незначительно уменьшается с 600 до 570 кг/м³ при увеличении содержания в шихте кальцинированной соды с 15 до 17,5 %. Дальнейшее увеличение в шихте соды до 20 % приводит к прямопропорциональному уменьшению плотности материала до 220 кг/м³. Прочность при сжатии полученного материала от вышеуказанных факторов имеет аналогичную зависимость. При увеличении содержания в шихте Na_2CO_3 с 15 до 17,5 % прочность при сжатии уменьшается незначительно с 9,8 до 8,2 МПа. С увеличением количественного содержания соды до 20 %, прочность при сжатии уменьшается до 1,2 МПа.

Проведенными исследованиями установлено, что при изготовлении пеностеклокерамики на основе шихты из кремнеземсодержащей породы (трепел) и кальцинированной соды рациональное содержание последней находится в пределах от 15 до 20 %. Дальнейшее увеличение Na_2CO_3 приведет к значительному увеличению жидкой фазы, неоднородности структуры, а также стоимости конечного продукта.

Исследования на следующем этапе были посвящены установлению зависимостей изменения средней плотности и прочности при сжатии полученного материала от скорости нагрева шихты (рис. 1, б). С этой целью шихта, содержащая в составе 20 % кальцинированной соды, нагревалась в муфельной печи до температуры 850 °С со скоростью от 1,5 до 4,5 °С/мин с выдержкой при максимальной температуре в течение 30 минут. Согласно полученным данным, средняя плотность материала увеличивается практически прямопропорционально с 220 до 285 кг/м³ при уменьшении скорости нагрева с 4,5 до 1,5 °С/мин. Прочность при сжатии разрабатываемого материала в сухом состоянии увеличивается прямопропорционально с 1,3 до 1,5 МПа при уменьшении скорости нагрева с 4,5 до 3 °С/мин. Дальнейшее уменьшение скорости нагрева до 1,5 °С/мин приводит к увеличению прочности при сжатии вспененного материала до 1,9 МПа.

Согласно проведенным исследованиям установлено, что при производстве пеностеклокерамики на основе шихты из кремнеземсодержащей

породы (трепел) и кальцинированной соды скорость ее нагрева должна варьироваться от 3 до 4,5

°С/мин. Увеличение скорости нагрева шихты более 4,5 °С/мин приводит к увеличению неоднородности структуры конечного продукта.

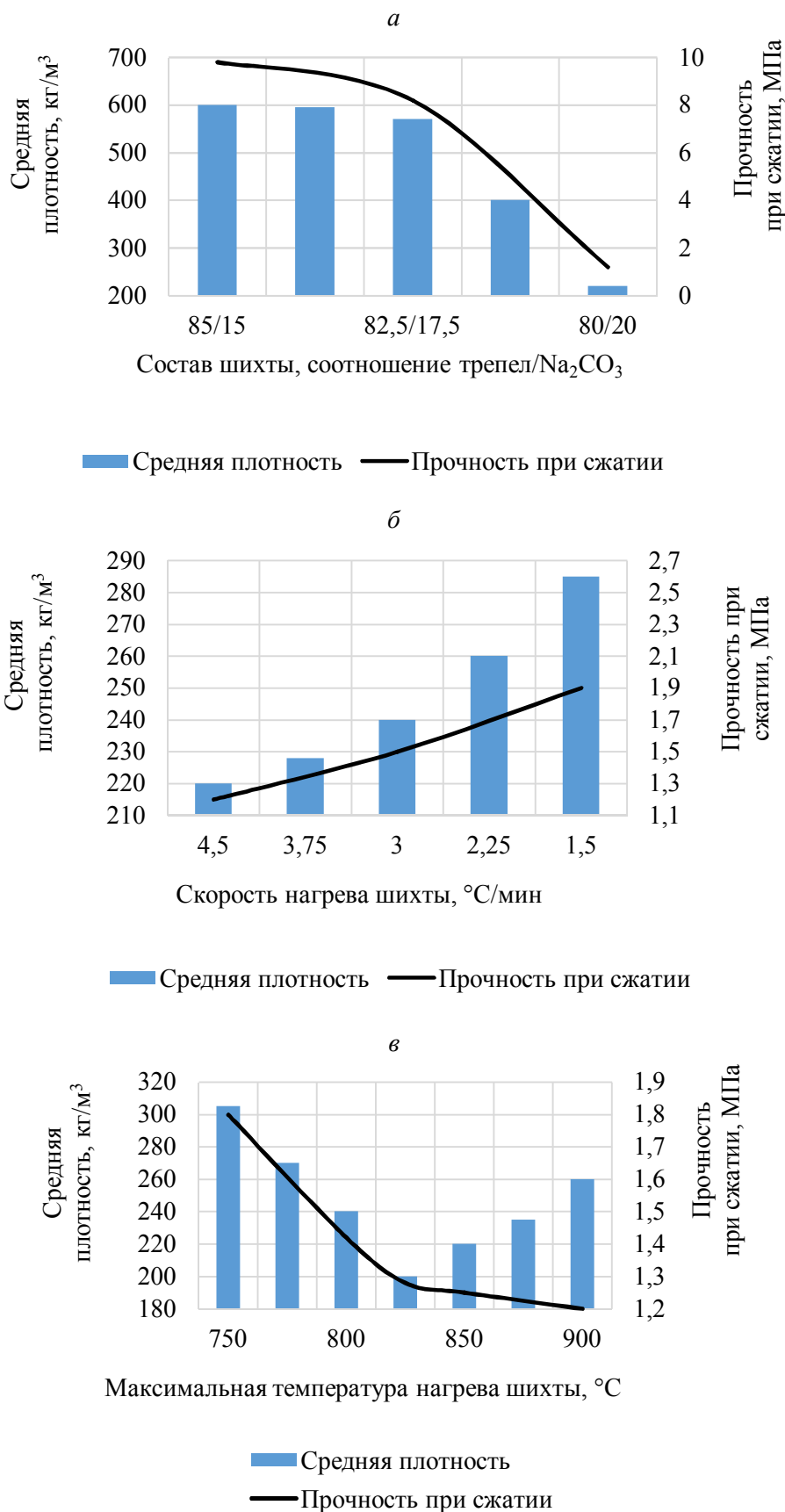
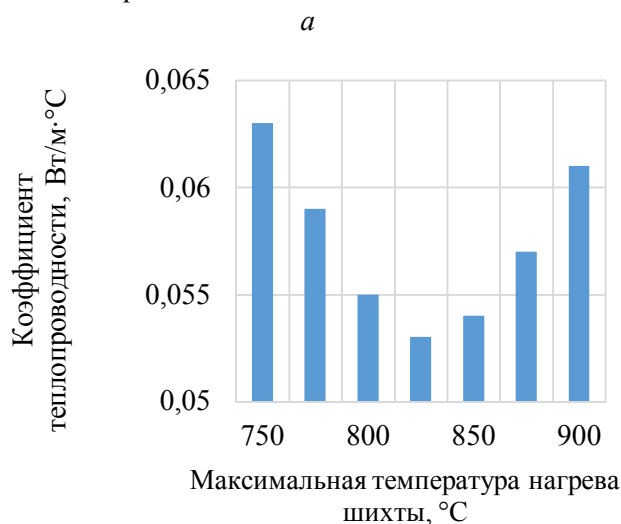


Рис. 1. Влияние состава (а), скорости нагрева (б) и максимальной температуры нагрева (в) шихты на среднюю плотность и прочность при сжатии пеностеклокерамики

Важными являются исследования, направленные на установление зависимостей изменения средней плотности и прочности при сжатии разрабатываемых материалов от максимальной температуры нагрева шихты. С этой целью шихта с соотношением трепел / Na_2CO_3 равном 80/20 нагревалась в муфельной печи со скоростью $4\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ до температуры от 750 до $900\text{ }^\circ\text{C}$ с выдержкой при максимальной температуре 30 минут. Согласно полученным данным (рис. 1, в), средняя плотность полученного материала уменьшается прямопропорционально с 305 до $200\text{ кг}/\text{м}^3$ при увеличении максимальной температуры нагрева шихты с 750 до $820\text{ }^\circ\text{C}$. Дальнейшее увеличение температуры нагрева до $900\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к увеличению средней плотности до $260\text{ кг}/\text{м}^3$. Данный эффект объясняется увеличением жидкой фазы в шихте и, как следствие, меньшей устойчивостью пены, что приводит к ее оседанию. Также необходимо отметить увеличение пор в материале при повышении максимальной температуры нагрева шихты до $900\text{ }^\circ\text{C}$. Прочность при сжатии полученного материала в сухом состоянии уменьшается с $1,8$ до $1,2\text{ МПа}$ при увеличении максимальной температуры нагрева шихты с 750 до $900\text{ }^\circ\text{C}$.

Проведенными исследованиями установлено, что при производстве пеностеклокерамики на основе шихты из кремнеземсодержащей породы (трепел) и кальцинированной соды максимальная температура ее нагрева должна варьироваться в пределах от 800 до $850\text{ }^\circ\text{C}$.



На рис. 2 представлены результаты исследований по изучению зависимостей изменения теплопроводности пеностеклокерамических материалов от максимальной температуры и скорости нагрева шихты. С этой целью шихта с соотношением трепел / Na_2CO_3 равном 80/20 нагревалась в муфельной печи со скоростью от $1,5$ до $4,5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ до максимальной температуры от 750 до $900\text{ }^\circ\text{C}$ с выдержкой при данной температуре в течение 30 минут и последующим остыванием в форме вместе с печью до комнатной температуры.

Согласно полученным данным (рис. 2, а), теплопроводность разрабатываемого материала уменьшается прямопропорционально с $0,063$ до $0,053\text{ Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$ при увеличении максимальной температуры нагрева шихты (скорость нагрева равна $4\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$) с $750\text{ }^\circ\text{C}$ до $820\text{ }^\circ\text{C}$. При дальнейшем увеличении максимальной температуры до $900\text{ }^\circ\text{C}$ теплопроводность увеличивается до $0,061\text{ Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$.

Согласно данным рисунка 2, б, теплопроводность вспененного материала уменьшается прямопропорционально с $0,068\text{ Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$ до $0,053\text{ Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$ при увеличении скорости нагрева шихты (максимальная температура нагрева равна $820\text{ }^\circ\text{C}$) с $1,5$ до $3\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Дальнейшее увеличение скорости нагрева шихты до $4,5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ не оказывает существенного влияния на изменение теплопроводности полученного материала.

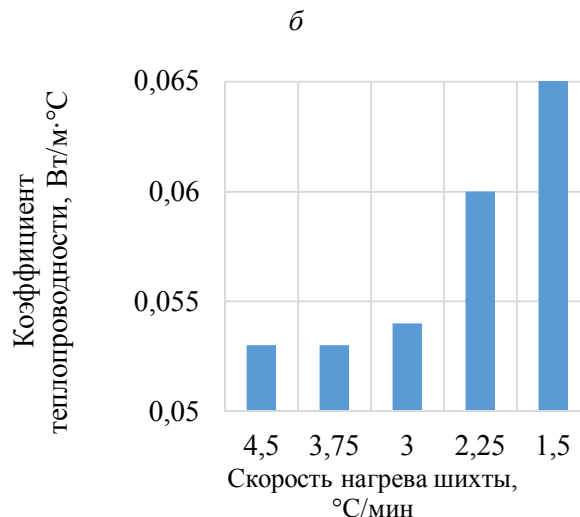


Рис. 2. Зависимости изменения теплопроводности полученного материала от максимальной температуры (а) и скорости нагрева (б) шихты

Установлено, что для получения наименьшей теплопроводности разрабатываемого материала скорость нагрева шихты должна варьироваться от 3 до $4,5\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$, а максимальная температура нагрева от 800 до $850\text{ }^\circ\text{C}$.

Выводы.

1. Разработаны теплоизоляционные строительные материалы на основе трепела и кальцинированной соды, получаемые за один нагрев

шихты, плотностью от 200 до 600 кг/м³, прочностью при сжатии от 1,2 до 9,8 МПа, коэффициентом теплопроводности от 0,053 до 0,065 Вт/м °С.

2. Установлено, что при производстве пеностеклокерамики на основе шихты из кремнеземсодержащей породы (представленный трепел) и кальцинированной соды рациональное содержание последней должно находиться в пределах от 15 до 20 %, скорость нагрева шихты должна варьироваться от 3 до 4,5 °С/мин, а максимальная температура нагрева от 800 до 850 °С.

Источник финансирования. Грант Российского научного фонда (проект № 18-73-00213).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Manevich V.E., Subbotin K.Yu. Foam glass and problems of energy conservation // *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2008. Vol. 65. №. 3-4. Pp. 105–108. DOI: 10.1007/s10717-008-9026-1.
2. Шелковникова Т.И., Баранов Е.В., Пряженцева Е.А. Стратегический анализ и оценка рыночных перспектив материалов и изделий из пеностекла // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 6. С. 15–20. DOI: 10.12737/article_5b115a5f648ca5.27747964.
3. Минько Н.И., Калатоzi В.В. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 1. С. 82–88. DOI: 10.12737/article_5a5dbf09319de9.71561256.
4. Erofeev V., Korotaev S., Bulgakov A., Tretiakov I., Rodin A. Getting Fired Material with Vitreous Binder Using Frame Technology // *Procedia Engineering*. 2016. 164. Pp. 166–171. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.606.
5. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks // *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Vol. 64. №. 4. Pp. 10–25. DOI: 10.5862/MCE.64.2.
6. Ерофеев В.Т., Бредихин В.В., Богатов А.Д., Богатова С.Н. Ячеистые и поризованные бетоны на основе боя стекла // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2013. № 1 (46). С. 104–111.
7. Иванов К.С., Радаев С.С., Селезнева О.И. Диатомиты в технологии гранулированного пеностекла // *Стекло и керамика*. 2014. № 5. С. 15–19.
8. Vaisman I., Ketov A., Ketov I. Cellular glass obtained from non-powder preforms by foaming with steam // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. №. 14. Pp. 15261–15268. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.06.165.
9. Казанцева Л.К., Верещагин В.И., Овчаренко Г.И. Вспененные стеклокерамические теплоизоляционные материалы из природного сырья // *Строительные материалы*. 2001. № 4. С. 33–35.
10. Manevich V.E., Subbotin R.K., Nikiforov E.A., Senik N.A., Meshkov A.V. Diatomite - Siliceous material for the glass industry // *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2012. Vol. 69. №. 5-6. Pp. 168–172. DOI: 10.1007/s10717-012-9438-9.
11. Qu Y.-N., Xu J., Su Z.-G., Ma N., Zhang X.-Y., Xi X.-Q., Yang J.-L. Lightweight and high-strength glass foams prepared by a novel green spheres hollowing technique // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. №. 2. Pp. 2370–2377. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.10.034
12. Кетов А.А. Получение строительных материалов из гидратированных полисиликатов // *Строительные материалы*. 2012. № 11. С. 22–24.
13. Орлов А.Д. Оптимизированная одностадийная технология гранулированного пеностекла на основе низкотемпературного синтеза стеклофазы // *Строительные материалы*. 2015. № 1. С. 24–26.
14. Сеник Н.А., Мешков А.В., Виницкий А.Л., Вакалова Т.В., Верещагин В.И. Получение высокоэффективного теплоизоляционного материала на основе диатомита путем низкотемпературного вспенивания // *Техника и технология силикатов*. 2012. Т. 19. № 4. С. 6–12.
15. Kazantseva L.K. Particulars of foam glass manufacture from zeolite-alkali batch // *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2013. Vol. 70. №. 7-8. Pp. 277–281. DOI: 10.1007/s10717-013-9560-3.
16. Иваненко В.Н. Строительные материалы и изделия из кремнистых пород. Киев: Будивельник, 1978. 120 с.
17. Никитин А.И., Стороженко Г.И., Казанцева Л.К., Верещагин В.И. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе трепелов Потанинского месторождения // *Строительные материалы*. 2014. № 8. С. 34–37.
18. 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. №. 1. Pp. 229–235. DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.10.019.
19. Rincón A., Giacomello G., Pasetto M., Bernardo E. Novel ‘inorganic gel casting’ process for the manufacturing of glass foams // *Journal of the European Ceramic Society*. 2017. Vol. 37. No.5. Pp. 2227–2234. DOI: 10.1016/j.jeurceram-soc.2017.01.012.

20. Zhang Q., He F., Shu H., Qiao Y., Mei S., Jin M., Xie J. Preparation of high strength glass ceramic foams from waste cathode ray tube and germanium tailings // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 111. Pp. 105–110. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.036.

Информация об авторах

Ерофеев Владимир Трофимович, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий. E-mail: AL_Rodin@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет. Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68.

Родин Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий. E-mail: AL_Rodin@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет. Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68.

Кравчук Алексей Сергеевич, аспирант кафедры строительных материалов и технологий. E-mail: a.kravchuk.s@yandex.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет. Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68.

Ермаков Анатолий Анатольевич, магистрант кафедры строительных материалов и технологий. E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет. Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68.

Поступила в марте 2019 г.

© Ерофеев В.Т., Родин А.И., Кравчук А.С., Ермаков А.А., 2019

¹Erofeev V.T., ^{1,*}Rodin A.I., ¹Kravchuk A.S., ¹Ermakov A.A.

¹National Research Mordovia State University
Russia, 430005, Saransk, st. Bolshevistskaya, 68

*E-mail: AL_Rodin@mail.ru

PHYSICO-MECHANICAL AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF FOAM- GLASS CERAMICS BASED ON SILICA ROCK

Abstract. Obtaining the foam-glass ceramic building materials bypassing the process of high-temperature glass melting and the use of local rocks as raw materials, which can significantly reduce the cost of the final product, is an urgent task of modern building materials science. The aim of this work is to study the physical, mechanical and thermal properties of foam-glass ceramic building materials obtained by one heating of the mixture consisting of silica-containing rock (tripoli) and soda ash. The developed heat-insulating building materials have an average density of 200 to 600 kg/m³, compressive strength of 1,2 to 9,8 MPa, thermal conductivity of 0,053 to 0,065 W/m·°C. Studies establishes a rational ratio of components in the composition of foam glass ceramics based on silica rock. In the production of foam materials, the heating rate of the charge should vary from 3 to 4,5 °C / min, and the maximum heating temperature from 800 to 850 °C. The developed material will expand the range of thermal insulation building materials and can be used in the construction of industrial and civil facilities, nuclear power plants, in the gas and oil industry.

Keywords: foam glass ceramics, thermal insulation material, silica rock, strength, density, thermal conductivity.

REFERENCES

1. Manevich V.E., Subbotin K.Yu. Foam glass and problems of energy conservation. Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika). 2008. Vol. 65. No. 3–4. Pp. 105–108. DOI: 10.1007/s10717-008-9026-1.

2. Shelkovnikova T.I., Baranov E.V., Pryanzencheva E.A. Strategic analysis and assessment of market prospects of foam glass materials and products [Strategicheskij analiz i ocenka rynochnyh perspektiv materialov i izdelij iz penostekla]. Bulletin of

BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 6. Pp. 15–20. DOI: 10.12737/article_5b115a5f648ca5.27747964 (rus)

3. Min'ko N.I., Kalatozi V.V. The use of cullet in the technology of materials for construction purposes [Ispol'zovanie stekloboya v tekhnologii materialov stroitel'nogo naznacheniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 1. Pp. 82–88. DOI: 10.12737/article_5a5dbf09319de9.71561256 (rus)

4. Erofeev V., Korotaev S., Bulgakov A., Tretiakov I., Rodin A. Getting Fired Material with Vitreous Binder Using Frame Technology. *Procedia Engineering*. 2016. 164. Pp. 166–171. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.606.
5. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Vol. 64. No. 4. Pp. 10–25. DOI: 10.5862/MCE.64.2.
6. Erofeev V.T., Bredihin V.V., Bogatov A.D., Bogatova S.N. Cellular and porous concrete on the basis of glass fight [*Yacheistye i porizovannye betony na osnove boya stekla*]. *Proceedings of Southwest state University*. 2013. No. 1 (46). Pp. 104–111. (rus)
7. Ivanov K.S., Radaev S.S., Selezneva O.I. The diatomite in the technology of granulated foam glass [*Diatomity v tekhnologii granulirovannogo penostekla*]. *Glass and Ceramics*. 2014. No. 5. Pp. 15-19. (rus)
8. Vaisman I., Ketov A., Ketov I. Cellular glass obtained from non-powder preforms by foaming with steam. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 14. Pp. 15261–15268. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.06.165.
9. Kazantseva L.K., Vereshchagin V.I., Ovcharenko G.I. Foamed glass-ceramic thermal insulating materials from natural raw materials [*Vspenennye steklokeramicheskie teploizolyacionnye materialy iz prirodnogo syr'ya*]. *Building material*. 2001. Issue 4. Pp. 33–35. (rus)
10. Manevich V.E., Subbotin R.K., Nikiforov E.A., Senik N.A., Meshkov A.V. Diatomite - Siliceous material for the glass industry. *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*, 2012. Vol. 69. No. 5-6. Pp. 168-172. DOI: 10.1007/s10717-012-9438-9.
11. Qu Y.-N., Xu J., Su Z.-G., Ma N., Zhang X.-Y., Xi X.-Q., Yang J.-L. Lightweight and high-strength glass foams prepared by a novel green spheres hollowing technique. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 2. Pp. 2370–2377. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.10.034
12. Ketov A.A. Obtaining construction materials from hydrated polysilicates [*Poluchenie stroitel'nyh materialov iz gidratirovannyh polisilikatov*]. *Building material*. 2012. No. 11. Pp. 22–24. (rus)
13. Orlov A.D. Optimized single-stage technology of granulated foam glass based on low-temperature synthesis of glass phase [*Optimizirovannaya odnostadijnaya tekhnologiya granulirovannogo penostekla na osnove nizkotemperaturnogo sinteza steklofazy*]. *Building material*. 2015. No. 1. Pp. 24–26. (rus)
14. Senik N.A., Meshkov A.V., Vinickij A.L., Vakalova T.V., Vereshchagin V.I. Production of high-performance thermal insulation material based on diatomite by low-temperature foaming [*Poluchenie vysokoehffektivnogo teploizolyacionnogo materiala na osnove diatomita putem nizkotemperaturnogo vspenivaniya*]. *Technique and technology of silicates*. 2012. Vol. 19. No. 4. Pp. 6–12. (rus)
15. Kazantseva L.K. Particulars of foam glass manufacture from zeolite-alkali batch. *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2013. Vol. 70. No. 7-8. Pp. 277–281. DOI: 10.1007/s10717-013-9560-3.
16. Ivanenko V.N. Building materials and products from siliceous rocks [*Stroitel'nye materialy i izdeliya iz kremnistykh porod*]. Kiev: Budivel'nik. 1978. 120 p. (rus)
17. Nikitin A.I., Storozhenko G.I., Kazanceva L.K., Vereshchagin V.I. Insulation materials and products based on diatomaceous earth Potanin field [*Teploizolyacionnye materialy i izdeliya na osnove trepelov Potaninskogo mestorozhdeniya*]. *Building material*. 2014. No. 8. Pp. 34–37. (rus)
18. 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.
19. Rincón A., Giacomello G., Pasetto M., Bernardo E. Novel 'inorganic gel casting' process for the manufacturing of glass foams. *Journal of the European Ceramic Society*. 2017. Vol. 37. No. 5. Pp. 2227–2234. DOI: 10.1016/j.jeurceram-soc.2017.01.012.
20. Zhang Q., He F., Shu H., Qiao Y., Mei S., Jin M., Xie J. Preparation of high strength glass ceramic foams from waste cathode ray tube and germanium. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 111. Pp. 105–110. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.036.

Information about the authors

Erofeev, Vladimir T. Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, DSc, Professor. E-mail: AL_Rodin@mail.ru. National Research Mordovia State University. Russia, 430005, Saransk, st. Bolshevistskaya, 68.

Rodin, Aleksandr I. PhD, Assistant professor. E-mail: AL_Rodin@mail.ru. National Research Mordovia State University. Russia, 430005, Saransk, st. Bolshevistskaya, 68.

Kravchuk, Aleksej S. Postgraduate student. E-mail: a.kravchuk.s@yandex.ru. National Research Mordovia State University. Russia, 430005, Saransk, st. Bolshevistskaya, 68.

Ermakov, Anatolij A. Master student. E-mail: anatology.ermakov97@mail.ru. National Research Mordovia State University. Russia, 430005, Saransk, st. Bolshevistskaya, 68.

Received in March 2019

Для цитирования:

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

For citation:

Erofeev V.T., Rodin A.I., Kravchuk A.S., Ermakov A.A. Physico-mechanical and thermophysical properties of foam- glass ceramics based on silica rock. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 5. Pp. 8–15. DOI: 10.34031/article_5cd6df461d0fd5.98177374