

УДК 666.189.3

АНАЛИЗ ВСПЕНИВАЮЩЕЙ АКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПОРООБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ СИНТЕЗЕ ПЕНОСТЕКЛА

Гольцман Борис Михайлович,
boriuspost@gmail.com

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Актуальность исследования обусловлена решающим влиянием различных порообразующих веществ на формирование качественных и количественных характеристик пористой структуры пеностекла.

Цель: исследование вспенивающей активности различных типов порообразователей при синтезе пеностекла и изучение физико-химических процессов, происходящих при термической обработке шихт с использованием данных видов порообразователей.

Объекты: образцы пеностекла, где основным сырьем выбран бой бесцветного тарного стекла марки БТ-1, а актуальными порообразующими веществами – кальцит (мел), углерод (антрацит), глицерин.

Методы: синтез по порошковой технологии, обжиг в температурном интервале 800–900 °С с выдержкой 20 минут.

Результаты. Выделены основные типы порообразующих веществ – углеродные (углерод в различных формах, органические соединения) и карбонатные (карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов). Проведен синтез образцов пеностекла на основе выбранных порообразователей. Показано, что и антрацит, и мел в грубозернистой форме позволяют получить пористую структуру с плотностью ниже 300 кг/м³. Повышение температуры и количества порообразователя ведет для обоих составов к снижению плотности за счет уменьшения вязкости стекломассы и увеличения давления газов в порах. Структура образцов обоих составов обладает неравномерностью, что указывает на влияние размера частиц порообразователя на пористость. Объяснены различия в цвете образцов на основе различных порообразователей, связанные с различиями в физико-химических процессах взаимодействия порообразователя со стекломассой. При термической обработке образцов с использованием глицерина пористая структура отсутствует полностью, а плотность образцов превышает 1400 кг/м³, что соответствует плотно спеченному материалу и объясняется слишком быстрым его выгоранием до того, как шихта превратилась в плотный слек, способный удерживать порообразующие газы.

Ключевые слова:

Пеностекло, вспенивание, порообразователь, углерод, кальцит, глицерин.

Введение

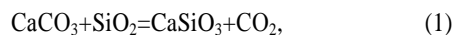
Вспенивание пеностекла – это сложный комплекс физико-химических процессов разложения порообразователя и взаимодействия порообразователя и продуктов его разложения со стекломассой.

Вспенивание пеностекла включает процессы, единые для всех гетерогенных пиропластичных материалов. Они основаны на процессах капсулирования вспенивающих соединений, формировании микропор и дальнейшем их росте. Это связано с химией реакций газообразования, изменением вязкости и поверхностного натяжения жидкой фазы, фазовыми переходами, а также ростом давления заключенных в ячейках газов.

Выделение газов при получении пеностекла обусловлено окислением, испарением и диссоциацией порообразователя. Кроме того, во время нагревания шихты протекают химические реакции между порообразователем и стекломассой. Выделение газа внутри вязкой стекломассы и формирование пористой структуры зависят от реакционной способности порообразователя. При этом и вид порообразователя, и конкретное вещество оказывают ключевое воздействие на тип пористости (закрытая, открытая) и ее количественные характеристики (размер пор) [1–3].

Все порообразователи для синтеза пеностекла, за исключением вспенивания геополимерных пористых материалов [4–7], традиционно делятся на две группы. В группе *нейтрализационных порообразователей*

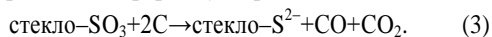
вспенивающие газы формируются в результате реакции нейтрализации. Такие стеклообразующие оксиды, как SiO₂, B₂O₃ и P₂O₅, в реакции нейтрализации являются кислым реагентом, а порообразователь (чаще всего карбонат щелочного или щелочноземельного металла) – основным реагентом [8–11]. Процесс выделения газов при использовании кальцита можно выразить реакцией (1). В то же время начинается процесс разложения, интенсивность которого зависит как от температуры, так и от давления газов в порах известняка, по реакции (2). Кроме карбонатов кальция в качестве порообразователя могут выступать карбонаты других элементов: магния (магнезит, доломит), натрия (сода), калия (поташ) и т. д.



Оксиды металлов, формирующиеся при разложении карбонатов, встраиваются в стеклянную массу и выступают как оксиды-модификаторы, тем самым изменяя вязкость расплава стекла. Выделяющийся газ CO₂ задерживается в массе вязкого стекла, и его давление постепенно увеличивается, заставляя стекломассу расширяться. При последующем охлаждении расплавленная стекломасса затвердевает, и образуется пористая структура.

При использовании веществ из группы *окислительно-восстановительных порообразователей* вспенивание происходит за счет восстановления некоторого

компонента стекла компонентом порообразователя, вследствие чего происходит выделение газов [3, 11–16]. Окислительно-восстановительную реакцию, ведущую к газообразованию, можно представить схемой (3). В качестве углеродных порообразователей может применяться широкий диапазон веществ, отличающихся по фазовому составу (жидкости, твердые тела) и происхождению (органические соединения, карбид кремния, различные формы углерода).

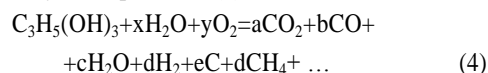


Из реакции следует, что выделение газов при применении углеродистых порообразователей осуществляется при взаимодействии не со всей стекломассой, а лишь с ее отдельными компонентами. В данной реакции окислителем является оксид серы (VI), содержащийся в некотором количестве во всех технических силикатных стеклах. Оксид серы присутствует даже в стеклах, синтезированных из бессульфатных шихт, вследствие сульфатных примесей в природных солях натрия, а также из-за контакта с топочными газами, содержащими соединения серы. В процессе реакции сульфатная сера стекла S^{6+} восстанавливается до сульфид-ионов S^{2-} , что подтверждается наличием сероводорода внутри пор пеностекла.

Ключевым требованием к твердым формам порообразователей обоих видов является их ультратонкий (более $7000 \text{ см}^2/\text{г}$) помол. Энергоемкость данной стадии сопоставима с энергоемкостью термической обработки и существенно удорожает производство. Вследствие этого весьма перспективной стратегией для формирования пористой структуры с однородным распределением пор по размерам является использование органического порообразователя, равномерно диспергированного в форме раствора. Фактически порообразователь образуется за счет его пиролизического разложения и дальнейшего окисления остатков пиролиза. Пленка порообразователя на частицах стекла при пиролизе превращается в нанослой углерода и таким образом приводит к однородному распределению пор [17]. Вследствие этого на двух крупнейших российских предприятиях по производству пеностекла – «ICM Glass Kaluga» и Компания «СТЭС-Владимир» – в качестве порообразователя применяется глицерин [18–21].

При использовании глицеринового порообразователя процесс вспенивания дополнительно осложняется процессами термического разложения глицерина, которое протекает по двум основным механизмам: пиролиз и риформинг (паровая конверсия). Пиролиз в данном случае – это термическое разложение органических соединений при недостатке кислорода. Условия недостатка кислорода наблюдаются внутри спрессованного полуфабриката. При пиролизе глицерина возможно получение широкого ряда продуктов: сажа, этанол, ацетон, вода, CO , CO_2 , H_2 и т. д. [22]. Однако при температуре выше $800 \text{ }^\circ\text{C}$ разложение глицерина практически завершается и в пиролизате присутствуют в основном CO , H_2 , CO_2 , CH_4 и C_2H_4 [23]. Риформинг – это процесс превращения глицерина в монооксид углерода, водород и углеводороды, происхо-

дящий в присутствии воды или водяных паров в атмосфере воздуха по реакции (4) [24]:



Применение как карбонатных (мел, известняк), так и углеродных неорганических (антрацит, сажа) и органических (глицерин, сахароза) порообразователей довольно распространено. Однако обоснованию их вида, количества и гранулометрического состава практически не уделяется внимания. Вследствие этого целью данной работы было исследование вспенивающей активности различных типов порообразователей при вспенивании модельных составов пеностекла на основе чистого бесцветного (белого) стекла. При этом в качестве порообразователей были использованы вещества в грубозернистой форме, а также чистый глицерин.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны следующие материалы: кальцит CaCO_3 , углерод в форме антрацита, глицерин. В качестве основного сырьевого материала для получения пеностекла использовался бой белого тарного стекла марки БТ-1, мас. %: SiO_2 – 71,9; Al_2O_3 – 2,4; Na_2O – 14,3; K_2O – 0,1; Fe_2O_3 – 0,1; CaO – 9,0; MgO – 2,0; TiO_2 – 0,2.

Процесс получения пеностекла по порошковой технологии включает следующие стадии: приготовление шихты, вспенивание, отжиг, механическая обработка. Предварительно производился отдельный помол сырьевых компонентов в шаровой мельнице объемом 5 л до достижения размера частиц менее 250 мкм (проход через сито № 025). Шихта изготавливалась путем тщательного перемешивания всех компонентов в точно указанных пропорциях до однородной массы. Приготовленная шихта загружалась в ручной пресс для формовки образцов в виде кубов с длиной грани 20 мм. Перед загрузкой в печь на поверхность металлической формы, в которой производилось вспенивание, наносился каолиновый порошок для предотвращения прилипания стекла к металлу. Затем приготовленные образцы подвергались термической обработке, согласно температурно-временному режиму, показанному на рис. 1 [20]. На графике режим соответствует вспениванию при температуре $850 \text{ }^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что показанные на графике параметры можно регулировать в зависимости от используемого типа боя стекла, порообразующего вещества, габаритных размеров формы для вспенивания и т. д. В печи форма с образцами помещалась в середину печи, в зону постоянных температур. Затем печь плотно закрывалась и осуществлялась термическая обработка согласно рис. 1. После стадии нагрева (по достижении заданной температуры вспенивания) форму выдерживали при этой температуре в течение 20 минут. Далее печь выключали, открывали и проводили резкое охлаждение в течение 3 минут для закрепления структуры материала. Поскольку при этом поверхностные слои материала могут переохладиться, далее проводилась стадия медленного охлаждения

(стабилизации) при температуре 600 °С. Образцы отжигались в течение не менее 4–5 часов при самопроизвольном охлаждении печи.

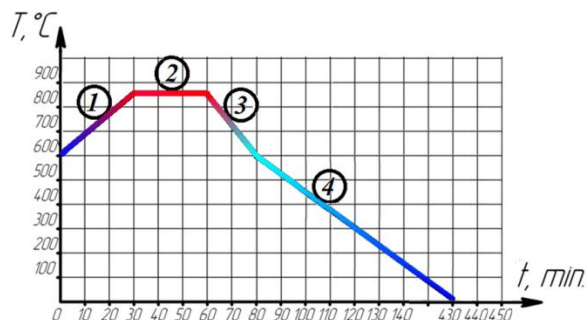


Рис. 1. График термической обработки образцов пеностекла: 1 – нагрев; 2 – выдержка (вспенивание); 3 – стабилизация структуры (резкое охлаждение); 4 – отжиг (медленное охлаждение)

Fig. 1. Graph of foam glass samples heat treatment: 1 – heating; 2 – exposure (foaming); 3 – structure stabilization (sharp cooling); 4 – annealing (slow cooling)

После удаления остывших образцов пеностекла из форм для придания им правильной формы проводилась их механическая обработка, после чего осуществлялся их визуальный осмотр, во время которого делались выводы о размере пор, их распределении и однородности структуры. Затем определялась масса и объем образцов и рассчитывалась их плотность d (кг/м³) по формуле (5).

$$d = \frac{m}{abc} \cdot 1000, \quad (5)$$

где m – масса образца, г; a – длина образца, см, b – ширина образца, см, c – высота образца, см.

Результаты и обсуждение

Для определения интенсивности вспенивания образцов пеностекла с применением различных порообразователей был разработан ряд составов, представленный в таблице. Было произведено вспенивание образцов разработанных составов при температурах вспенивания 800, 850, 900 °С. Внутренняя структура представлена на рис. 2–4, а плотность образцов – в таблице.

Таблица. Плотность синтезированных образцов

Table. Density of the synthesized samples

| Вид и количество порообразователя, мас. % Type and amount of foaming agent, wt. % | Плотность, кг/м ³ , при температуре вспенивания, °С Density, kg/m ³ , at foaming temperature, °С | | |
|--|---|------|------|
| | 800 | 850 | 900 |
| Мел/Chalk, 1 | 1095 | 686 | 665 |
| Мел/Chalk, 3 | 548 | 466 | 351 |
| Мел/Chalk, 5 | 293 | 281 | 340 |
| Антрацит/Anthracite, 1 | 1941 | 1784 | 1549 |
| Антрацит/Anthracite, 3 | 1612 | 999 | 899 |
| Антрацит/Anthracite, 5 | 490 | 275 | 223 |
| Глицерин/Glycerol, 1 | 1705 | 1930 | 1908 |
| Глицерин/Glycerol, 3 | 1561 | 1671 | 1663 |
| Глицерин/Glycerol, 5 | 1445 | 1527 | 1499 |

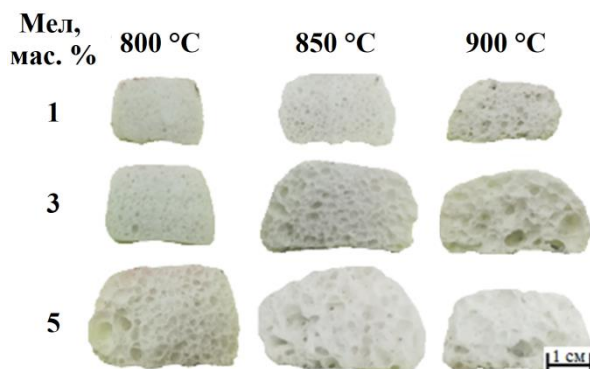


Рис. 2. Внутренняя структура образцов на основе кальцита (мела)

Fig. 2. Internal structure of the samples based on calcite (chalk)

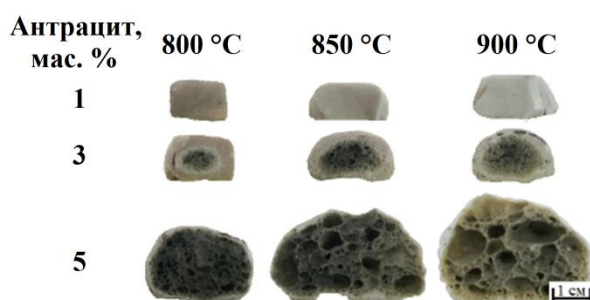


Рис. 3. Внутренняя структура образцов на основе углерода (антрацита)

Fig. 3. Internal structure of the samples based on carbon (anthracite)

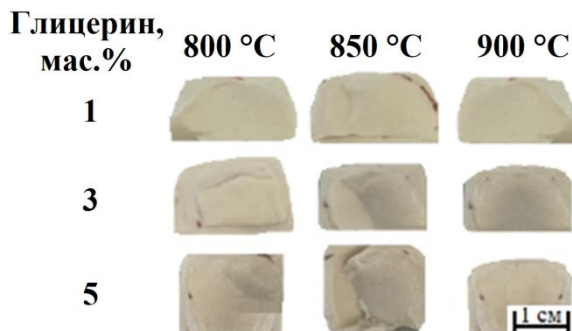


Рис. 4. Внутренняя структура образцов на основе глицерина

Fig. 4. Internal structure of the samples based on glycerol

Из полученных результатов видно, что и углерод (антрацит), и кальцит (мел) в грубозернистой форме позволяют получить пористую структуру с плотностью ниже 300 кг/м³. Повышение температуры ведет для обоих составов к снижению плотности за счет уменьшения вязкости стекломассы и увеличения давления газов в порах. Структура образцов обоих составов обладает неравномерностью, что обусловлено влиянием размера частиц порообразователя на пористость: чем он меньше, тем меньше поры и равномернее получаемая структура. Это подтверждает необходимость ультратонкого помола порообразователя, что является фактором, усложняющим производство пеностекла.

Различия в цвете образцов на основе различных порообразователей объясняются физико-химическими процессами, происходящими при их разложении, т. е. в качестве исходного сырья было выбрано бесцветное (белое) стекло. Так, при разложении мела образуются CaO и CO_2 , не оказывающие влияния на окраску стекла, вследствие чего цвет вспененных образцов соответствует цвету исходного стекла как во внешних, так и во внутренних частях материала. При увеличении количества мела вспенивание закономерно интенсифицируется, а плотность уменьшается с 685 до 281 кг/м^3 (для температуры 850°C). Пористая структура при использовании мела в грубозернистой форме принадлежит к открытому типу, т. е. поры соединяются друг с другом, образуя сообщающиеся каналы, причем размер и распределение пор отличается крайней нестабильностью.

Процесс формирования открытой пористости может быть объяснен тем фактом, что мел, являясь плавнем второго рода, снижает вязкость стекломассы и облегчает прорыв межпоровых перегородок, за счет чего и формируется открытая пористость. Здесь также важно отметить, что у состава «мел, 5 мас. %» наблюдается процесс повышения плотности образцов с повышением температуры сверх 850°C . Это также связано с флюсующим воздействием CaCO_3 на стекло. За счет этого стекломасса быстрее проходит интервал формовочной вязкости (10^6 – 10^4 Па·с), после которого начинается оседание пены под собственным весом, а также коалесценция (слияние) пор. Совокупность этих процессов ведет к удалению газов из внутренней части материала и последующему повышению плотности.

Образцы на основе углерода характеризуются белым цветом снаружи и темным внутри материала. Также можно заметить градиент изменения окраски по толщине материала. Это следует объяснить тем, что при термической обработке углерод во внешних слоях образца более плотно контактирует с кислородом воздуха, что способствует его полному выгоранию, которое может быть схематично описано реакцией (6).



Во внутренних слоях вследствие дефицита кислорода углерод выгорает не полностью, а образующаяся нанодисперсная сажа оседает на стенках пор и окрашивает материал. Такая сажа, помимо придания окраски, играет роль поверхностно-активного вещества, повышающего стабильность стекольной пены. Вследствие этого образцы с использованием углерода обладают пористостью закрытого типа, т. е. поры не соединены между собой. С повышением содержания

антрацита и интенсивность вспенивания, и размер окрашенной области возрастают. Плотность образцов уменьшается с 1785 до 275 кг/м^3 (для температуры 850°C) и 223 кг/м^3 (для температуры 900°C). Однако за счет грубодисперсного состояния порообразователя поры крайне неоднородны по размеру, что будет негативно сказываться на стабильности свойств получаемых материалов.

Интересным является тот факт, что при термической обработке образцов с использованием жидкофазного углеродного порообразователя (глицерина) пористая структура отсутствует полностью, а плотность образцов превышает 1400 кг/м^3 , что соответствует плотно спеченному материалу. Это можно объяснить тем фактом, что глицерин как органическое соединение высоко горюч (температура самовоспламенения 393°C), вследствие чего он успевает практически полностью выгореть до того момента, когда шихта превратилась в плотный спек, способный удерживать порообразующие газы. С повышением количества глицерина цвет образца становится более серым, что указывает на следы продуктов пиролиза. Подобные результаты тем более любопытны, поскольку на крупных предприятиях глицерин активно используется в качестве порообразователя. Следовательно, в чистом виде глицерин использовать невозможно, вследствие чего необходимо подробнее исследовать способы капсуляции либо самого глицерина, либо продуктов его термического разложения до температур, соответствующих вязкости вспенивания.

Заключение

Таким образом, при использовании в качестве порообразователя карбонатных (кальцит) и углеродных неорганических (антрацит) веществ в грубозернистой (размер частиц менее 250 мкм) форме можно получить пеностекло с плотностью менее 300 кг/м^3 . Лимитирующим фактором, влияющим на качественные и количественные параметры пористой структуры, является размер частиц порообразователя. При использовании в качестве порообразователя органических углеродных порообразователей (глицерина) формирования пористой структуры не происходит из-за преждевременного выгорания, что ведет к необходимости введения добавок, устраняющих этот процесс.

Работа выполнена в ЮРГПУ (НПИ) при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения № 19-79-00015 «Исследование общих закономерностей синтеза пористых материалов на основе техногенного и природного силикатного сырья» (руководитель – Б.М. Гольцман).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидович Б.К. Пеностекло. – Минск: Наука и техника, 1975. – 248 с.
2. Демидович Б.К. Производство и применение пеностекла. – Минск: Наука и техника, 1972. – 301 с.
3. Шилл Ф. Пеностекло. – М.: Стройиздат, 1965. – 327 с.
4. Смирнов П.В., Иванов К.С., Константинов А.О. Литология пород туртасской свиты и возможности их использования в качестве сырья для производства пеностеклокерамики на примере успенской площади (Тюменская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 112–120.
5. Разработка способа утилизации отходов горнообогатительных комбинатов созданием активных фильтрующих обезжелезивающих материалов / Н.В. Вадулина, Н.Х. Абдрахманов, А.В. Федосов, И.И. Бадурдинова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 37–43.

6. Water and waterglass mixtures for foam glass production / D. Hesky, C.G. Aneziris, U. Groß, A. Horn // *Ceramics International*. – 2015. – V. 41. – P. 12604–12613.
7. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: Study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix / R. Silva, E. Kubaski, E. Tenório-Neto, M. Lima-Tenório, S. Tebcherani // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2019. – V. 511. – P. 177–182.
8. Fernandes H.R., Tulyaganov D.U., Ferreira J.M. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents // *Ceramics International*. – 2009. – V. 35. – P. 229–235.
9. Petersen R.R., König J., Yue Y. The viscosity window of the silicate glass foam production // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2017. – V. 456. – P. 49–54.
10. König J., Petersen R.R., Yue Y. Influence of the glass–calcium carbonate mixture’s characteristics on the foaming process and the properties of the foam glass // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2014. – V. 34. – P. 1591–1598.
11. Гольцман Б.М. Влияние порообразователя на свойства пеношлакостекла // *Научное обозрение*. – 2015. – № 21. – С. 102–105.
12. Оценка конкурентоспособности стеновых строительных материалов со стекловидными защитно-декоративными покрытиями, полученными методом плазменного оплавления / В.С. Бессмертный, Н.И. Минько, Н.И. Бондаренко, А.В. Симачев, Н.М. Здоренко, И.В. Роздольская, Д.О. Бондаренко // *Стекло и керамика*. – 2015. – № 2. – С. 3–8.
13. Kazmina O.V., Tokareva A.Y., Vereshchagin V.I. Using quartzofeldspathic waste to obtain foamed glass material // *Resource-Efficient Technologies*. – 2016. – V. 2. – P. 23–29.
14. Вайсман Я.И., Кетов А.А., Кетов П.А. Научные и технологические аспекты производства пеностекла // *Физика и химия стекла*. – 2015. – Т. 41. – № 2. – С. 214–221.
15. Lee C. Production of alumino-borosilicate foamed glass body from waste LCD glass // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2013. – V. 19. – P. 1916–1925.
16. König J., Petersen R.R., Yue Y. Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass // *Ceramics International*. – 2015. – V. 41. – P. 9793–9800.
17. Разработка составов и технологических параметров синтеза ячеистых теплоизоляционных строительных стекломатериалов с заданной плотностью / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, А.С. Косарев, Б.М. Гольцман // *Стекло и керамика*. – 2016. – № 6. – С. 22–25.
18. Способ получения пеностекла: пат. Рос. Федерация, № 2701951, заявл. 09.07.2019; опубл. 03.10.2019, Бюл. № 28. – 11 с.
19. Влияние гранулометрического состава шихты на технологические и физико-химические свойства гранулированного пористого силикатного заполнителя / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев // *Стекло и керамика*. – 2017. – № 8. – С. 12–14.
20. Синтез пеностекла с использованием шлаков и глицериновой порообразующей смеси / Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев, Н.С. Карандашова, В.А. Смолий, Л.А. Яценко // *Физика и химия стекла*. – 2018. – Т. 44. – № 2. – С. 199–205.
21. Фракционный утеплитель из вспененного стекла для железнодорожного строительства: пат. Рос. Федерация, № 2681157, заявл. 28.08.2017; опубл. 01.03.2019, Бюл. № 7. – 7 с.
22. The photocatalytic conversion of (biodiesel derived) glycerol to hydrogen – a short review and preliminary experimental results. P. 1: a review / M. Stelmachowski, M. Marchwicka, E. Grabowska, M. Diak, A. Zaleska // *Journal of Advanced Oxidation Technologies*. – 2014. – V. 17 (2). – P. 167–178.
23. Valliyappan T., Bakshi N.N., Dalai A.K. Pyrolysis of glycerol for the production of hydrogen or syn gas // *Bioresource Technology*. – 2008. – V. 99 (10). – P. 4476–4483.
24. Experimental investigation of hydrogen production from glycerin reforming / A.M. Douette, S.Q. Turn, W. Wang, V.I. Keffer // *Energy & Fuels*. – 2007. – V. 21 (6). – P. 3499–3504.

Поступила 25.11.2020 г.

Информация об авторах

Гольцман Б.М., кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии и технологии силикатов Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

UDC 666.189.3

ANALYSIS OF FOAMING ACTIVITY OF DIFFERENT TYPES OF FOAMING AGENTS IN FOAM GLASS SYNTHESIS

Boris M. Goltzman,
boriuspost@gmail.com

Platov South Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

The relevance of the research is explained by the decisive influence of various foaming agents on formation of qualitative and quantitative characteristics of the porous structure of foam glass.

The main aim of the research is to study the foaming activity of various types of foaming agents in the synthesis of foam glass and to identify the physical-chemical processes that occur during the heat treatment of the mixture using these types of foaming agents.

Objects: foam glass samples, where the main raw material was the cullet of colorless container glass of the BT-1 brand, and the relevant foaming agents were: calcite (chalk), carbon (anthracite), glycerol.

Methods: the synthesis using powder technology; firing in the temperature range of 800–900 °C with an exposure time of 20 minutes.

Results. The most relevant foaming agents: carbon (carbon in various forms, organic compounds) and carbonate (carbonates of alkali and alkaline earth metal) were identified. The synthesis of foam glass samples based on the selected foaming agents was carried out. Both anthracite and chalk in coarse-grained form make it possible to obtain a porous structure with a density below 300 kg/m³. An increase in temperature and the amount of foaming agent leads to decrease in density for both compositions by reducing the viscosity of the glass melt and increasing the pressure of the gases in the pores. The structure of the samples of both compositions is uneven, which indicates the influence of the foaming agent particle size on the porosity. The differences in the color of the samples based on various foaming agents were explained. They are associated with differences in the physicochemical processes of interaction of the foaming agent with the molten glass. In the heat treatment of samples using glycerol, the porous structure is completely absent, and the density of the samples exceeds 1400 kg/m³, which corresponds to densely sintered material, which is explained by its fast burnout before the batch turns into a dense sinter capable of holding foaming gases.

Key words:

Foam glass, foaming, foaming agent, carbon, calcite, glycerol.

The work was performed in SRSPU (NPI) with the financial support of the Russian Science Foundation, agreement no. 19-79-00015 «Investigation of general laws of the synthesis of porous materials based on technogenic and natural silicate raw materials» (head – B.M. Goltzman).

REFERENCES

- Demidovich B.K. *Penosteklo* [Foam glass]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 248 p.
- Demidovich B.K. *Proizvodstvo i primeneniye penostekla* [Production and use of foam glass]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1972. 301 p.
- Schill F. *Penosteklo* [Foam glass]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1965. 327 p.
- Smirnov P.V., Ivanov K.S., Konstantinov A.O. Lithology of tuff suite rocks and opportunities of their use as a raw material for foam glass ceramics on the example of uspenskaya area (Tyumen region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 7, pp. 112–120. In Rus.
- Vadulina, N.V., Abdrakhmanov, N.Kh., Fedosov, A.V., Badrtdinova, I.I. Development of a method for utilization of waste from mining and processing plants by creating active filtering deironing materials. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 37–43. In Rus.
- Hesky D., Aneziris C.G., Groß U., Horn A. Water and waterglass mixtures for foam glass production. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, pp. 12604–12613.
- Silva R., Kubaski E., Tenório-Neto E., Lima-Tenório M., Tebcherani S. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: Study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, vol. 511, pp. 177–182.
- Fernandes H.R., Tulyaganov D.U., Ferreira J.M. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*, 2009, vol. 35, pp. 229–235.
- Petersen R.R., König J., Yuanzheng Y. The viscosity window of the silicate glass foam production. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2017, vol. 456, pp. 49–54.
- König J., Petersen R.R., Yue Y. Influence of the glass–calcium carbonate mixture’s characteristics on the foaming process and the properties of the foam glass. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, pp. 1591–1598.
- Goltzman B.M. Vliyaniye poroobrazovatelya na svoystva penoshlakostekla [Foaming agent influence on the properties of foam slag glass]. *Nauchnoye obozreniye*, 2015, no. 21, pp. 102–105.
- Bessmertnyi V.S., Min’ko N.I., Bondarenko N.I., Simachev A.V., Zdorenko N.M., Rozdol’skaya I.V., Bondarenko D.O. Evaluation of the Competitiveness of Wall Building Materials with Glassy Protective-Decorative Coatings Obtained by Plasma Fusing. *Glass and Ceramics*, 2015, vol. 72, pp. 41–46.
- Kazmina O.V., Tokareva A.Y., Vereshchagin V.I. Using quartzofeldspathic waste to obtain foamed glass material. *Resource-Efficient Technologies*, 2016, vol. 2, pp. 23–29.
- Vaisman Ya.I., Ketov A.A., Ketov P.A. The scientific and technological aspects of foam glass production. *Glass Physics and Chemistry*, 2015, vol. 41, pp. 157–162.
- Lee C. Production of alumino-borosilicate foamed glass body from waste LCD glass. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2013, vol. 19, pp. 1916–1925.
- König J., Petersen R.R., Yue Y. Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, pp. 9793–9800.
- Smolii V.A., Yatsenko E.A., Kosarev A.S., Goltzman B.M. Development of compositions and technological parameters for the synthesis of cellular glass heat-insulation construction materials with prescribed density. *Glass and Ceramics*, 2016, vol. 73 (5–6), pp. 219–221.
- Lazarev E.V. *Sposob polucheniya penostekla* [A method of producing foam glass]. Patent RF, no. 2701951, 2019.
- Smolii V.A., Yatsenko E.A., Goltzman B.M., Kosarev A.S. Influence of granulometric composition of batch on technological and

- physical-chemical properties of granular porous silicate aggregate. *Glass and Ceramics*, 2017, vol. 74 (7–8), pp. 270–272.
20. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Kosarev A.S., Karandashova N.S., Smoliy 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, no. 2, pp. 152–155.
 21. Fefelov A.B., Nikulin M.L. *Fraktsionny uteplitel iz vspennogo stekla dlya zheleznodorozhnogo stroitelstva* [Fractional insulation made of foamed glass for railway construction]. Patent RF, no. 2681157, 2019.
 22. Stelmachowski M., Marchwicka M., Grabowska E., Diak M., Zaleska A. The photocatalytic conversion of (biodiesel derived) glycerol to hydrogen – a short review and preliminary experimental results. Pt 1: a review. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 2014, vol. 17 (2), pp. 167–178.
 23. Valliyappan T., Bakshi N.N., Dalai A.K. Pyrolysis of glycerol for the production of hydrogen or syn gas. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99 (10), pp. 4476–4483.
 24. Douette A.M., Turn S.Q., Wang W., Keffer V.I. Experimental investigation of hydrogen production from glycerin reforming. *Energy & Fuels*, 2007, vol. 21 (6), pp. 3499–3504.

Received: 25 November 2020.

Information about the authors

Boris M. Goltsman, Cand. Sc., associate professor, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI).