

Н. М. Бобкова¹, В. В. Савчин², Ю. Г. Павлюкевич¹, Е. Е. Трусова¹

¹Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

²Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ СТЕКОЛ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛЫХ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР

Аннотация. На основе анализа литературы определена наиболее перспективная область составов стекол для получения полых стеклянных микросфер. Изучены основные физико-технические характеристики стекол и установлены зависимости свойств стекол от состава. Установлено влияние реологических свойств стекол вблизи температур ликвидуса на процессы выделения ранее растворенных в стекле газов. Показано, что потери массы стекол при повторном нагреве существенно превышают количество растворенного в расплаве сульфата натрия и могут быть обусловлены неполным разложением при варке карбонатов (в частности, карбоната натрия), а также улетучиванием B_2O_3 .

Ключевые слова: полые стеклянные микросферы, щелочно-боросиликатная система, реологические свойства стекол, газовыделение

Для цитирования. Оптимизация составов стекол для получения полых стеклянных микросфер / Н. М. Бобкова [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 238–244. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-2-238-244>

N. M. Bobkova¹, V. V. Sauchyn², Yu. G. Pauliukevich¹, E. E. Trusova¹

¹ Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

² A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus

OPTIMIZATION OF THE GLASS COMPOSITIONS FOR HOLLOW GLASS MICROSPHERES FABRICATION

Abstract. The most promising region of glass compositions for obtaining hollow glass microspheres was determined using literature analysis. The main physical and technical characteristics of glasses have been studied and the dependence of the glasses properties on composition has been established. The influence of rheological properties of glasses near liquidus temperature on the processes of separation of gases previously dissolved in glass was established. It was shown that the loss of the glass mass upon reheating is much higher than the amount of sodium sulfate dissolved in the melt and may be due to incomplete decomposition during melting of carbonates (in particular, sodium carbonate) included in the charge composition, as well as volatilization of B_2O_3 .

Keywords: hollow glass microspheres, alkali borosilicate system, rheological properties of glasses, gas evolution.

For citation. Bobkova N. M., Sauchyn V. V., Pauliukevich Yu. G., Trusova E. E. Optimization of the glass compositions for hollow glass microspheres fabrication. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 238–244 (In Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-2-238-244>

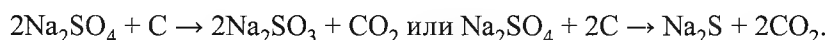
Полые стеклянные микросферы (ПСМ) являются одними из перспективных материалов, которые находят широкое применение в различных отраслях техники и в первую очередь в качестве ультралегковесного наполнителя в производстве различных материалов. Наиболее важные области применения следующие: получение композиционных материалов на основе полимеров, позволяющие существенно снизить объемную массу, термическое расширение и теплопроводность композита; производство лаков и красок, благодаря чему снижается расход пигментов, улучшаются укрывистость и физико-механические свойства покрытий; изготовление «сотовых» материалов, искусственной древесины и изделий «под мрамор»; получение электроизоляционных и композиционных материалов с заданными радиофизическими свойствами и теплофизическими характеристиками; использование в полимерных и эпоксидных заливочных компаундах и пластизолях, где такие свойства полых микросфер, как относительно низкое маслопоглощение, легкость диспергирования и инертность, уникальны [1–6].

Основой любого способа изготовления полых стеклянных микросфер является сохранение условий для растворения определенного количества газообразующих компонентов в процессе приготовления исходного стекла в качестве полупродукта и выделение их в результате термической диссоциации при его повторном нагреве [7] и формировании полых микросфер.

Значительные исследования в области возможности растворения некоторых газов в расплаве стекла и в первую очередь ангидрида SO_3 выполнены Н. А. Панковой и другими авторами [8–11]. Согласно [8, 9], исследование процессов химического взаимодействия расплавленной стекломассы с газовой атмосферой стекловаренных печей и дегазации или ее пересыщения газами тесно связано с разработкой методов управления режимом дегазации стекломассы, а также изучением основных причин образования в стекломассе вторичных пузырей.

В качестве газообразующих компонентов в силикатных стеклах выступают карбонаты, нитраты и сульфаты щелочных металлов. Однако первые два вида газообразующих обладают относительно низкими температурами разложения, высокой скоростью разложения и неспособностью растворяться в силикатном расплаве без разложения. С точки зрения возможной растворимости в стекломассе без разложения наибольший интерес представляют сульфаты, в частности сульфат натрия, имеющий температуру плавления без разложения, равную $884\text{ }^\circ\text{C}$, и обладающий способностью смешиваться в определенных количествах с расплавом силикатного стекла при его синтезе. Температура разложения чистого сульфата натрия составляет $1200\text{--}1220\text{ }^\circ\text{C}$. В высоковязкой среде силикатного расплава температура разложения сульфата натрия может повышаться до $1440\text{ }^\circ\text{C}$ и выше. Такая особенность поведения сульфата натрия в силикатных расплавах дает возможность получать расплавы силикатных стекол при температурах ниже $1400\text{ }^\circ\text{C}$ с сохранением в расплаве неразложившегося расплавленного сульфата натрия. Поведение сульфата натрия в силикатных расплавах подробно рассмотрено ранее [12]. Отсюда следует вывод, что составы силикатных стекол для получения ПСМ должны быть достаточно легкоплавкими с температурами синтеза не выше $1350\text{--}1380\text{ }^\circ\text{C}$. Такую легкоплавкость в силикатных стеклах обеспечивает высокое содержание оксидов щелочных и щелочноземельных металлов, а также наличие в составе B_2O_3 . Поэтому в качестве основы для получения ПСМ выступают в первую очередь стекла щелочно-боросиликатных систем. Диапазон составов стекол, рекомендуемых в литературе для получения ПСМ, обычно чрезвычайно широк [13, 14].

Согласно [13], предлагается область стеклообразующих составов, мас. %: SiO_2 – 58–75; Na_2O – 3–12,5; K_2O – 0–3; Li_2O – 0–3; CaO – 5–15; MgO 0–3; B_2O_3 – 11–25; ZnO – 0–3; Al_2O_3 – 0–3; P_2O_5 – 0–3; Sb_2O_5 – 0–3; As_2O_3 0–1; SO_3 – 0,05–1, а согласно [14] мас. % : SiO_2 – 60–90; R_2O – 2–20; B_2O_3 – 1–30; S – 0,005–0,5; RO – 0–25; RO_2 – 0–10; R_2O_3 – 0–20; R_2O_5 – 0–10; F – 0–5, другие ингредиенты 0–2. Достаточно широкий диапазон составов стекол для ПСМ рекомендуется и в работе [15]: SiO_2 65–80; B_2O_3 5–10; RO 5–10; R_2O 8–14 и TiO_2 0–5. Содержание SO_3 – 0,44 % приведено на примере конкретного состава стекла, мас. %: SiO_2 – 69,0; B_2O_3 – 8,5; CaO – 6,5; Na_2O – 13,5; ZnO – 2,0; F – 0,5. Температура синтеза – $1380\text{ }^\circ\text{C}$. Однако следует учитывать один из существенных факторов – резкую активизацию процессов разложения сульфата натрия в присутствии восстановителя по реакциям:



Поэтому сохранить его в расплаве силикоборатных стекол без разложения в присутствии восстановителя практически невозможно.

В окислительной среде разложение сульфата натрия существенно замедляется, обеспечивая расплавление и достаточную его устойчивость в расплаве стекол без разложения. Поэтому кроме соответствующей легкоплавкости и необходимых реологических свойств требуется соблюдать дополнительное условие при синтезе стекол для ПСМ – обеспечение окислительной среды при варке исходных стекол как полупродукта. Но практически во всех случаях в качестве основных стекол для ПСМ выступает система $\text{Na}_2\text{O}\text{--}\text{CaO}\text{--}\text{SiO}_2\text{--}\text{B}_2\text{O}_3$.

Для оптимизации составов стекла для ПСМ в натриево-кальциево-боросиликатной системе нами выполнены систематические исследования свойств стекол в системе $\text{Na}_2\text{O}\text{--}\text{CaO}\text{--}\text{SiO}_2$ как основы, но с дополнительным введением во все стекла оксидов B_2O_3 , K_2O и ZnO в сумме 15 мас. % (рис. 1).

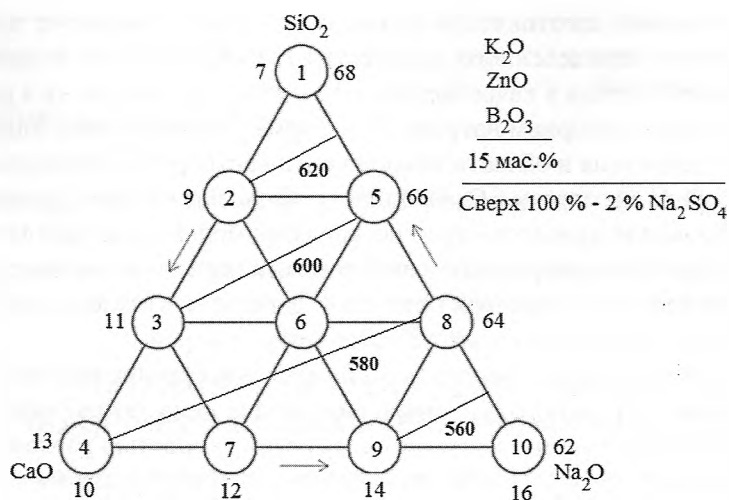


Рис. 1. Область исследуемых составов стекол и зависимость температуры начала размягчения от состава стекол

Fig. 1. The region of the investigated compositions of glasses and the dependence of the softening start temperature on the composition of the glasses

Кроме того, сверх 100 % во все стекла вводили 2 % Na_2SO_4 . Введением K_2O через нитрат калия в состав сырьевых смесей обеспечивалось создание окислительных условий в процессе синтеза стекол. Температура варки исходных стекол составляла 1320–1350 °С с выдержкой при конечной температуре 1 ч. При указанных условиях варки все стекла полностью проварились и характеризовались хорошими формовочными свойствами. Изучены физико-технические свойства синтезированных стекол. Результаты определения температуры начала размягчения, термического расширения и плотности стекол приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-технические свойства стекол

Table 1. Physicotechnical properties of glasses

Номер стекла	Свойства стекол			
	температура начала размягчения, °С	ТКЛР, $\alpha \cdot 10^7 \text{ K}^{-1}$		плотность, кг/м^3
		расчетный	экспериментальный	
1	620	83,5	75,84	2557
2	620	86,8	81,58	2587
3	610	89,4	83,88	2617
4	580	91,3	87,02	2647
5	600	85,0	79,28	2565
6	590	94,9	89,15	2596
7	570	96,6	91,32	2625
8	575	93,6	85,97	2573
9	560	101,9	97,22	2605
10	560	107,9	100,53	2582

На рис. 1 приведены область исследуемых составов стекол и графическая зависимость температуры начала размягчения стекол от состава. Как видим из приведенных данных, наибольшее влияние на изменение температуры начала размягчения оказывает содержание SiO_2 в составах стекол, что согласуется с общеизвестными литературными данными.

Обращает на себя внимание различие в расчетных и экспериментальных значениях ТКЛР стекол. Это может быть обусловлено тем, что при сравнительно низкой температуре варки происходит не полное разложение не только сульфата натрия, но и карбоната натрия, имеющего повышенную температуру разложения (более 1100 °С) по сравнению с другими газосодержащими компонентами шихты – CaCO_3 и KNO_3 .

На рис. 2 приведена кривая ДСК (использован дериватограф DSC 404 F3 Pegasus NETZSCH (Германия); скорость подъема температуры 10 °С/мин) для стекла № 8 как полупродукта. Можно

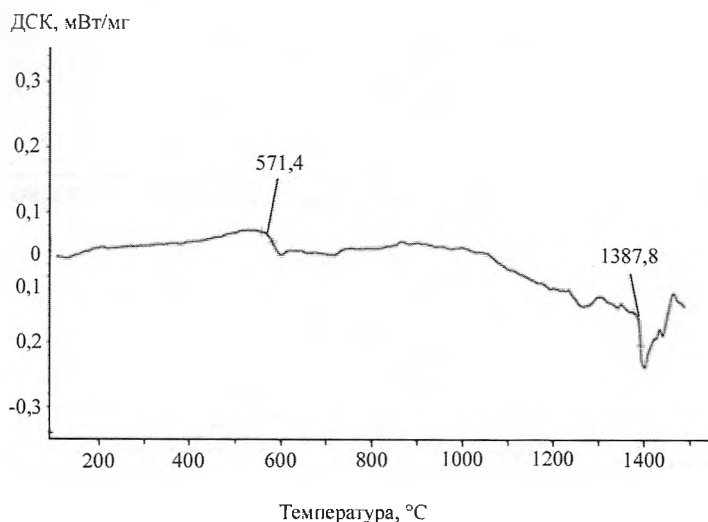


Рис. 2. Кривая ДСК стекла состава № 8
Fig. 2. DSC curve of the glass composition № 8

выделить наличие трех эндозффектов при – 575, 1280 и 1400 °С. Первый эндозффект обусловлен процессами размягчения стекла и его температура хорошо согласуется с экспериментальными данными (табл. 1).

Два других высокотемпературных эффекта могут быть обусловлены процессами разложения растворенных в стекле газосодержащих компонентов. Эндозффект при 1400 °С, безусловно, связан с разложением сульфата натрия, как было отмечено выше, а эндозффект при 1280 °С, по нашему мнению, может свидетельствовать о разложении неразложившихся полностью карбонатов, в частности карбоната натрия (Na_2CO_3). Возможное частичное сохранение неразложившихся карбонатов в расплаве стекла было подтверждено ранее результатами химического анализа и ИК-спектрами сульфатсодержащих стекол [16].

Для предварительной оценки вспенивающей способности стекол в результате термической диссоциации растворенных газообразователей произведен повторный нагрев исходного стеклогранулята при 1450–1500 °С. Визуальная оценка результатов термообработки экспериментальных стекол приведена на рис. 3. Как видим, четко проявилась активизация процессов газовойделения

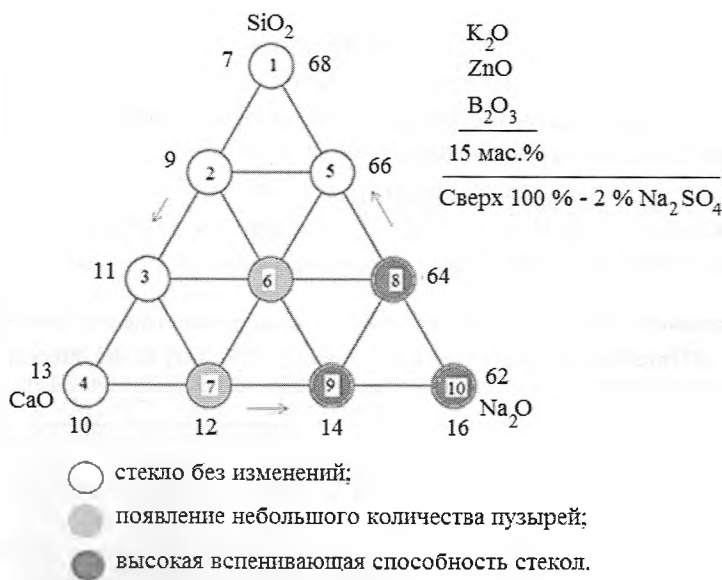


Рис. 3. Результаты вторичной термообработки синтезированных стекол при 1450–1500 °С
Fig. 3. Results of the secondary heat treatment of the synthesized glasses at 1450–1500 °C

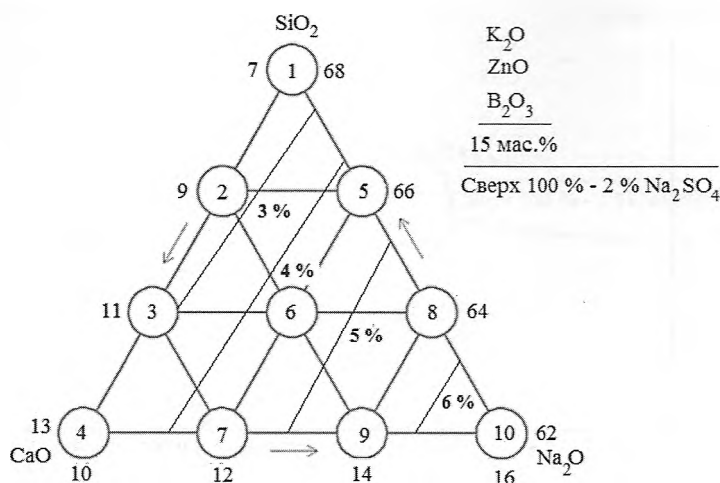


Рис. 4. Зависимость потерь массы стекол за счет газовой выделения при повторном нагреве стекол
 Fig. 4. Dependence of mass losses of glasses due to gas evolution during reheating of glasses

при повторном нагреве стекол с повышенным содержанием Na_2O и низким содержанием SiO_2 , которые должны обладать пониженной вязкостью.

Для экспериментального определения количества потерь масс при повторной термообработке стеклогранулята стекла насыпали в корундовые тигли массой m_1 , затем проводили взвешивание тиглей со стеклом с точностью 0,001 г (m_2) и повторную термообработку их при температуре 1450–1500 °С в газовой печи с выдержкой при максимальной температуре в течение часа. Охлажденные тигли повторно взвешивали (m_3). Потери при газовой выделении рассчитывали по формуле:

$$\% \text{ потерь} = m_3 / (m_2 - m_1) 100.$$

Графическая зависимость потерь массы за счет газовой выделения при повторном нагреве исходных стекол показана на рис. 4. Проявилась четкая зависимость процента потерь массы при повторном нагреве от содержания оксидов натрия и кремния в стекле, активно влияющих на вязкость расплава. Характерно, что эта зависимость потерь массы практически согласуется с закономерностью изменения в системе значений температуры начала размягчения. Это подтверждает тесную взаимосвязь вязкостных характеристик или реологических свойств стекол и расплавов с активностью процессов газовой выделения при повторном нагреве, тем более, что содержание сульфата натрия во всех составах оставалось постоянным.

Для оценки закономерностей изменения реологических свойств стекол в изучаемой системе были выполнены расчеты вязкостных характеристик стекол, а именно температур, соответствующих вязкостям в высокотемпературной области (10^1 – 10^6 Па·с). В табл. 2 для экспериментальных стекол приведены результаты расчета температур для значений вязкости в интервале 10^1 – 10^6 Па·с с использованием методики [17]. Наблюдается существенное понижение соответствующих температур по мере увеличения в стекле содержания Na_2O и снижения SiO_2 .

Таблица 2. Результаты расчета температур для значений вязкости в интервале 10^1 – 10^6 Па·с (°С)
 Table 2. Results of temperature calculations for the values of viscosity in the interval 10^1 – 10^6 Pa·s (°C)

lgη	Номер состава									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1312,3	1281,6	1252,1	1223,9	1258,0	1227,8	1198,8	1205,8	1176,1	1155,36
1,5	1196,9	1169,8	1144,0	1119,4	1149,2	1123,0	1098,0	1103,6	1078,3	1060,2
2	1104,7	1081,1	1058,6	1037,3	1062,3	1039,8	1018,4	1022,1	1000,7	984,2
3	966,5	949,0	932,4	916,7	932,3	915,9	900,4	900,3	885,1	870,6
4	867,9	855,4	843,6	832,4	839,7	828,2	817,3	813,47	803,1	798,8
5	794,0	785,6	777,7	770,1	770,4	762,8	755,6	748,9	742,0	729,4
6	736,5	731,6	726,8	722,2	716,5	712,2	707,9	698,6	694,7	682,6

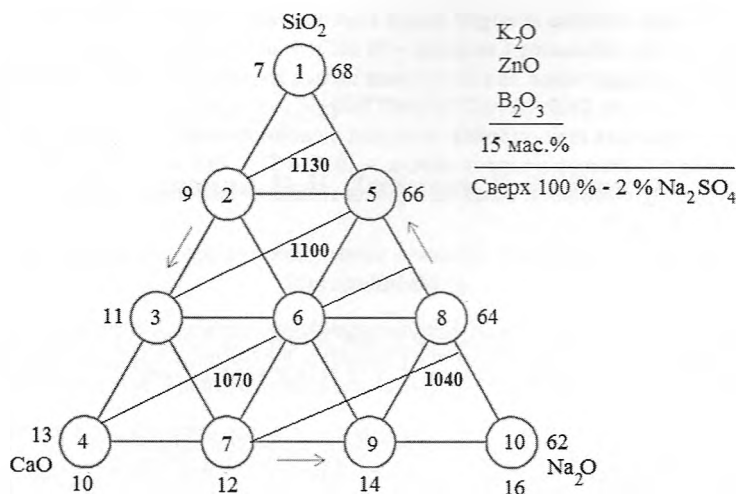


Рис. 5. Зависимость расчетных температур ликвидуса (10^2 МПа) от состава стекол ($^{\circ}$ С).

Fig. 5. Dependence of the estimated liquidus temperatures (10^2 MPa) on the composition of glasses ($^{\circ}$ C).

На рис. 5 приведена зависимость температур ликвидуса (10^2 МПа) от состава стекол. Сопоставление рис. 3, 4 и 5 приводит к выводу, что наиболее оптимальными составами стекол в изученной области следует признать составы 8 и 9, обладающие максимальным газовыделением при повторном нагреве и минимальными значениями температур ликвидуса – не выше 1050° С.

Однако влияние только вязкостных характеристик не объясняет сравнительно высоких значений потерь массы (до 6 %) при повторном нагреве. Очевидно, кроме растворенного SO_3 (теоретически возможно 1,10 %) из стекол дополнительно удаляются CO_2 из неполностью разложившегося Na_2CO_3 [15], а также происходит активное улетучивание B_2O_3 , что подтверждается данными, приведенными в работе [3].

Список использованных источников

1. Асланова, М. С. Полые неорганические микросферы / М. С. Асланова, В. Я. Стеценко, А. Ф. Шустров // Хим. пром-сть за рубежом. Обзор. информ. – М.: НИИТЭХИМ, 1991. – Вып. – С. 33–51.
2. Наполнители для полимерных композиционных материалов: справ. пособие / под ред. Г. С. Каца, Д. В. Милевски. – М.: Химия, 1981. – 736 с
3. Берлин, А. А. Упрочненные газонаполненные пластмассы / А. А. Берлин, Ф. А. Шутов. – М.: Химия, 1980. – 222 с.
4. Smilley, L. H. Hollow microspheres more than just fillers / L. H. Smilley // Mater. Eng. – 1986. – Vol. 103, № 2. – P. 27–30.
5. Костюковская, Е. Н. Производство и применение в лакокрасочных материалах техногенных наполнителей / Е. Н. Костюковская, Л. В. Сухарева, Г. И. Подъячева // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1990. – № 2. – С. 11–12.
6. Чухланов, В. Ю. Применение полых стеклянных микросфер в кремнийорганических синтаптных пенопластах / В. Ю. Чухланов, Э. П. Сысоев // Стекло и керамика. – 2000. – № 2. – С. 11–12. DOI: 10.1007/BF02681483
7. Будов, В. В. Физико-химические процессы в технологии полых микросфер / В. В. Будов // Стекло и керамика. – 1990. – № 3. – С. 9–10. DOI: 10.1007/BF01196172
8. Панкова, Н. А. Влияние состава газовой среды стекловаренных печей на растворимость газов в листовом стекле / Н. А. Панкова, Л. Я. Левин // Физика и химия стекла. – 1976. – Т. 2, № 2. – С. 162–165.
9. Панкова, Н. А. Исследование механизмов процесса осветления стекломассы в промышленных условиях: автореф. ... дис. д-ра техн. наук. – М., 1976. – 34 с.
10. Безбородов, М. А. Изучение растворимости серного ангидрида в стекле / М. А. Безбородов // Докл. Акад. наук БССР. – 1957. – № 3. – С. 63–75.
11. Papadopoulos, K. The solubility SO_3 in sods lime melts / K. Papadopoulos // Phys. Chem. Glasses. – 1973. – Vol. 14, № 3. – P. 60–65.
12. Бобкова, Н. М. Особенности поведения сульфата натрия в силикатных расплавах / Н. М. Бобкова, Е. Е. Трусова // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2016. – № 2. – С. 122–126.
13. Glass frit useful for the preparation of glass bubbles, and glass bubbles prepared by using it: patent US 5064784A, CI CO3C 3/076; CO3C 3/093 / Osamu Saito, Norihiko Yagi, Yoshinori Ito; Tokai Kogyo Co., Ltd. – № 510560; date of filed: 18.04.1990; date of patent: 12.11.1991.

14. Glass bubbles of increased collapse strength: patent US4391646A, CI C04B 31/02; CO3C 13/00 / Peter A. Howell, St. Paul; Minnesota Mining and Manufacturing Company. – № 325164; date of filed: 5.02.1982; date of patent: 5.07.1983.
15. Будов, В. В. Выбор составов стекол для получения полых микросфер / В. В. Будов, В. Я. Стеценко // Стекло и керамика. – 1988. – № 8. – С. 15–16. DOI: 10.1007/BF00677809
16. Колесова В. А. О сульфатных группировках в сетках щелочносульфатносиликатных стекол / В. А. Колесова, И. С. Игнатъев, Н. Е. Калинина // Физика и химия стекла. – 1976. – Т. 2, № 5. – С. 400–404.
17. Flueget, A. Glass viscosity calculation based on a global statistical modeling approach / A. Flueget // Glass Technology. – 2007. – Vol. 48, № 1. – P. 13–30.

References

- Aslanova M. S., Stetsenko V. Ya., Shustrov A. V. Hollow inorganic microspheres. *Chemical industry abroad. Overview*. Moscow, Scientific Research Institute of Technical and Economic Research in the Chemical Complex, 1991, no. 9, pp. 33–51 (in Russian).
- Katz G. S., Milevski D. V. (ed.) *Fillers for polymer composites. Handbook*. Moscow, Chemistry Publ., 1981. 736 p. (in Russian).
- Berlin A. A., Shutov F. A. (1980) *Reinforced gas-filled plastics*. Moscow, Chemistry Publ., 1980. 222 p. (in Russian).
- Smilley L. H. Hollow microspheres more than just fillers. *Mater. Eng.*, 1986, vol.103, no. 2, pp. 27–30.
- Kostyukovsky E. N., Sukharev L. V., Podyacheva G. I. *Production and use of man-made materials in the paint fillers*. Moscow, Chemistry Publ., 1990, no. 2, pp. 11–12 (in Russian).
- Chukhlanov V. Yu., Sysoev É. P. Use of hollow glass microspheres in organosilicon syntact foam plastics. *Glass and Ceramics*, 2000, vol. 57, no. 1-2, pp. 47–48. DOI: 10.1007/BF02681483
- Budov V. V. Physicochemical processes in producing hollow glass microspheres. *Glass and Ceramics*, 1990, vol. 47, no. 3, pp. 77–79. DOI: 10.1007/BF01196172
- Pankova N. A., Levin L. Y. *Influence of the gaseous medium composition of glass furnaces on the solubility of gases in the sheet glass. Fizika i Khimiya Stekla = Glass Physics and Chemistry*, 1976, vol. 2, no. 2, pp. 162–165 (in Russian).
- Pankova N. A. *A study of the mechanism of the glass lightening process in an industrial environment*. Moscow, 1976. 34 p. (in Russian).
- Bezborodov M. A. A study of the solubility of sulfur trioxide in glass. *Doklady akademii nauk BSSR [Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR]*, 1957, no. 3, pp. 63–75 (in Russian).
- Papadopoulos K. The solubility SO_3 in sods lime melts. *Physics and Chemistry of Glasses*, 1973, vol. 14, no. 3, pp. 60–65.
- Bobkova N. M., Trusova E. E. Features of the sodium sulfate behavior in silicate melts. *Vestsi Natsyonal'noj akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2016, no. 2, pp. 122–126 (in Russian).
- Osamu Saito, Norihiko Yagi, Yoshinori Ito. *Glass frit useful for the preparation of glass bubbles, and glass bubbles prepared by using it*. Patent US 5064784A, 1991.
- Peter A. Howell, St. Paul. *Glass bubbles of increased collapse strength*. Patent US4391646A, 1983.
- Budov V. V., Stetsenko V. Ya. Choice of glass composition for producing hollow microspheres. *Glass and Ceramics*, 1988, vol. 45, no. 8, pp. 289–291. DOI: 10.1007/BF00677809
- Kolesova V.A., Ignatiev I.S., Kalinina N.E. *On the sulfate groups in the grids of alkali sulfate silika glasses. Fizika i Khimiya Stekla = Glass Physics and Chemistry*, 1976, vol. 2, no. 5, pp. 400–404 (in Russian).
- Flueget A. Glass viscosity calculation based on a global statistical modeling approach. *Glass Technology*, 2007, vol. 48, no. 1, pp. 13–30.

Информация об авторах

Бобкова Нинель Мироновна – д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bobkova@belstu.by

Савчин Василий Васильевич – канд. техн. наук, зав. отделом электродуговой плазмы, Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, Национальная академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sauchyn@itmo.by

Павлюкевич Юрий Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой технологии стекла и керамики, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pauliukevich@belstu.by

Трусова Екатерина Евгеньевна – канд. техн. наук, доцент, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: trusova@belstu.by

Information about the authors

Ninel M. Bobkova – D. Sc. (Engineering), Professor, Chief researcher, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bobkova@belstu.by

Vasily V. Sauchyn – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka, 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sauchyn@itmo.by

Yury G. Pauliukevich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pauliukevich@belstu.by

Ekaterina E. Trusova – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: trusova@belstu.by