

УДК 631.365

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-135-144

А.С. АНЬШАКОВ¹, К.С. ГАУСС², О.Г. ВОЛОКИТИН², В.В. ШЕХОВЦОВ²,¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,²Томский государственный архитектурно-строительный университет

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И ОБРАБОТКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ*

В настоящей работе представлены результаты исследований по получению силикатных расплавов на основе зол ТЭС с использованием энергии термической плазмы и производству стеклокристаллических материалов. Разработан и апробирован плазмо-химический реактор. Расчетным путем установлено, что при изменении тепловой мощности плазматрона от 50 до 100 кВт и поддержании оптимальной температуры расплава в плазмохимическом реакторе $T_{\text{расп}} = 1850^\circ\text{C}$ расход исходного сырья $G_{\text{сыр}}$ на установку может варьироваться от 0,019 кг/с (1,11 кг/мин) до 0,047 кг/с (2,81 кг/мин). На основе проведенных экспериментальных работ установлена зависимость кристаллизационных свойств расплава от состава шихты. В работе отмечено, что для получения стеклокристаллического материала с повышенной степенью кристалличности необходимо полученный силикатный расплав подвергать двухстадийной термической выдержке с температурами 1-й ступени 700°C в течение 1 ч, 2-й ступени 950°C в течение 2 ч. При этом степень кристалличности возрастает до 60–65 %. Проведены физико-механические исследования (прочность на сжатие и изгиб, тепловой коэффициент линейного расширения) полученных изделий. Произведена оценка полученных результатов с имеющимися аналогами на отечественном и зарубежном рынках.

Ключевые слова: плазменная технология; силикатный расплав; золы ТЭС; стеклокристаллические материалы; физико-химические и механические исследования.

Для цитирования: Аньшаков А.С., Гаусс К.С., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. Современные технологии создания и обработки строительных материалов с использованием энергии термической плазмы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 135–144.

A.A. ANSHAKOV¹, K.S. GAUSS², O.G. VOLOKITIN², V.V. SHEKHOVTSOV²,¹Kutateladze Institute of Thermal Physics SB RAS,²Tomsk State University of Architecture and Building

MODERN PRODUCTION AND TREATMENT TECHNOLOGIES USING THERMAL PLASMA ENERGY

The paper presents research results on silicate melt and glass-ceramic material production based on ashes generated by thermal power plants using the energy of thermal plasma. A plasma-chemical reactor is designed and tested. Calculations show that when the thermal power of plasma torch varies from 50 to 100 kW and the optimum melt temperature of 1850°C is maintained in the plasma-chemical reactor, the feed rate varies. The dependence be-

* Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ (номер проекта 11.8207.2017/8.9). Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-48-703004 p_мол_a.

tween the crystallization properties of the melt and the mixture composition is established. To obtain the material with increased crystallinity, the resulting silicate melt is subjected to plasma treatment at 700 °C for 1 hour and 950 °C for 2 hours. The degree of crystallinity increases up to 60–65 %. Compressive and flexure strength and coefficient of linear expansion of obtained products are determined. The obtained results are compared with those available in the domestic and foreign markets.

Keywords: plasma technology; bottom ash; silicate melt; glass-ceramic materials; physicochemical and mechanical research.

For citation: Anshakov A.A., Gauss K.S., Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V. *Sovremennye tekhnologii sozdaniya i obrabotki stroitel'nykh materialov s ispol'zovaniem energii termicheskoi plazmy* [Modern production and treatment technologies using thermal plasma energy]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 135–144. (rus)

Современное развитие техники и технологии характеризуется бурным ростом исследований в области высоких температур, в частности практического применения источников высокотемпературного нагрева, например генераторов низкотемпературной плазмы [1, 2]. Энергии плазмы достаточно для реализации эффективного технологического процесса, в котором применяются тугоплавкие неметаллические сырьевые материалы, с целью нагрева и плавления. Высокая концентрация энергии позволяет наблюдать эффекты, не присущие традиционным процессам плавления в плавильных агрегатах, за счет высокого градиента температуры.

Научными коллективами накоплен значительный опыт в области использования зол ТЭС при производстве строительных материалов различного назначения [3–6]. Золы в большинстве случаев представлены набором тугоплавких оксидов и силикатов с доминирующей составляющей диоксида кремния (SiO_2). Высокое содержание диоксида кремния позволяет использовать золы в качестве исходной составляющей (стеклообразователь) в производстве стеклокристаллических материалов [7–11].

В основу технологического процесса получения стеклокристаллических материалов положено плавление силикатосодержащей шихты с последующей термической выдержкой продукта плавления. На сегодняшний день технологические процессы при нагреве и плавлении природного и техногенного сырья с высоким содержанием диоксида кремния (отходы горючих сланцев, кварц-полевошпатовые отходы, кварцевый песок, базальт), полученного с использованием энергии термической плазмы, достаточно широко изучены [12, 13].

С целью определения оптимальных технологических режимов получения стеклокристаллического материала с использованием энергии термической плазмы проведена серия экспериментальных работ, направленных на получение образцов с рациональными физико-механическими характеристиками.

В качестве исходных сырьевых материалов использовались золы ТЭС (г. Томск), отсеvy кварцевого песка (Туганское месторождение, Томская область) и известняк (Кузбасский регион). На рис. 1 представлена гистограмма распределения концентрации оксидов в используемых материалах.

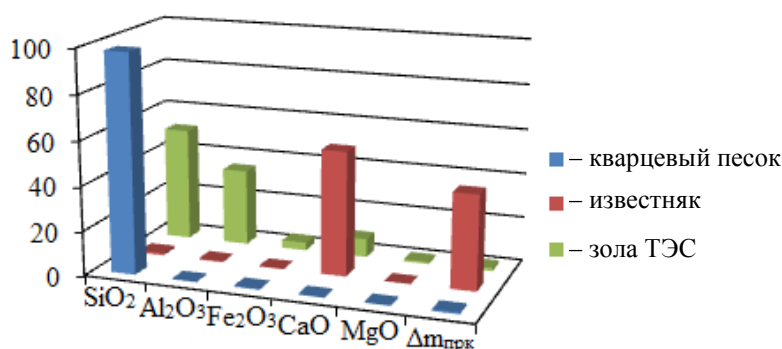


Рис. 1. Гистограмма распределения концентрации оксидов используемых материалов

Как видно из рис. 1, по химическому составу золы ТЭС близки к высокоглиноземистому сырью (так как содержание Al_2O_3 превышает 30 %). Массовая доля стеклообразующих оксидов (SiO_2 , Al_2O_3 и CaO) достигает 90 % и выше. Известняк и отсеvy кварцевого песка используются в качестве корректирующих добавок, которые позволяют повысить химическую стойкость стеклокристаллического материала и регулировать количество стеклообразователя в приготавливаемой шихте.

При подборе рациональных составов шихты для получения стеклокристаллического материала на основе зол ТЭС исходили из принципа получения анортитоподобной фазы. Сформированные составы располагаются в области кристаллизации анортита на диаграмме состояния $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. В табл. 1 представлены экспериментальные составы шихты для получения стеклокристаллических материалов.

Таблица 1

Экспериментальные составы шихты на основе зол ТЭС

Сырье	№ состава						
	1	2	3	4	5	6	7
	Процентное содержание количества сырьевых материалов						
Зола ТЭС	100	60	60	70	75	78	90
Известняк	—	20	17	20	25	22	10
Кварцевый песок	—	20	23	10	—	—	—

Экспериментальные работы проводились на электроплазменной установке [14], состоящей из основных узлов: плазмохимического реактора объемом 25 л, модернизированного плазменного генератора марки ВПР-410, источника питания АПР-402 и шнекового дозатора. Массовый расход порошкообразного сырья на установку для получения гомогенизированного расплава в объеме плазмохимического реактора определяли из уравнения теплового баланса.

Тепловой поток, выделяемый электродуговым плазмотроном, идет на нагрев и плавление частиц порошкообразного сырья от начальной температуры $T_{\text{сыр}}$ до температуры плавления $T_{\text{плав}}$, плавление частиц и нагрев гомогени-

зированной расплава – до $T_{\text{расп}}$. Часть тепла отводится охлаждающей водой от стенок плавильной печи.

Уравнение теплового баланса установки имеет вид

$$Q = Q_{\text{наг}} + Q_{\text{плав}} + Q_{\text{расп}} + Q_{\text{пот}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{наг}}$ – тепловой поток, затраченный на нагрев частиц исходного сырья до температуры плавления; $Q_{\text{плав}}$ – тепловой поток, затраченный на плавление частиц исходного сырья; $Q_{\text{расп}}$ – тепловой поток, затраченный на нагрев расплава до температуры 1850 °С; $Q_{\text{пот}}$ – тепловой поток, отводимый охлаждающей водой от плавильной печи.

Тепловой поток, затраченный на нагрев частиц исходного сырья до температуры плавления, равен

$$Q_{\text{прог}} = c_{\text{сыр}} G_{\text{сыр}} (T_{\text{плав}} - T_{\text{сыр}}), \quad (2)$$

где $c_{\text{сыр}}$ – теплоемкость исходного сырья; $G_{\text{сыр}}$ – расход сырья.

Тепловой поток, затраченный на плавление частиц исходного сырья, определяется выражением

$$Q_{\text{плав}} = G_{\text{сыр}} \cdot r_{\text{плав}}, \quad (3)$$

где $r_{\text{плав}}$ – радиус частицы.

Тепловой поток, затраченный на нагрев расплава до температуры 1850 °С, равен

$$Q_{\text{расп}} = c_{\text{расп}} G_{\text{сыр}} (T_{\text{расп}} - T_{\text{плав}}), \quad (4)$$

где $c_{\text{расп}}$ – теплоемкость расплава.

Тепловой поток, отводимый охлаждающей водой от плавильной печи:

$$Q_{\text{пот}} = G_{\text{вод}} \cdot c_{\text{вод}} (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}), \quad (5)$$

где $G_{\text{вод}}$ – расход воды; $c_{\text{вод}}$ – теплоемкость воды; $T_{\text{вх}}$, $T_{\text{вых}}$ – температура воды на входе и выходе электродугового плазмотрона.

Подставив выражения (2) – (5) в уравнение (1), получим массовый расход порошкообразного сырья на плазмохимический реактор:

$$G_{\text{сыр}} = \frac{Q - Q_{\text{пот}}}{c_{\text{сыр}} (T_{\text{плав}} - T_{\text{сыр}}) + r_{\text{плав}} + c_{\text{расп}} (T_{\text{расп}} - T_{\text{плав}})}. \quad (6)$$

Скорость подачи исходного сырья на плазмохимический реактор через шнековый дозатор определяется выражением

$$w_{\text{сыр}} = \frac{4G_{\text{сыр}}}{\pi d^2 \rho_{\text{сыр}}}, \quad (7)$$

где d – диаметр частицы; $\rho_{\text{сыр}}$ – плотность сырья.

Результаты расчета показали, что расход исходного сырья $G_{\text{сыр}}$ на установку при тепловой мощности электродугового плазмотрона 60 кВт составляет от 0,023 кг/с (1,37 кг/мин) до 0,026 кг/с (1,55 кг/мин) в диапазоне требуемой температуры расплава 1700–2000 °С. Скорость подачи исходного сырья шнековым дозатором при этом составляет 0,101–0,089 м/с. При изменении тепло-

вой мощности плазмотрона от 50 до 100 кВт и поддержании оптимальной температуры расплава в плазмохимическом реакторе $T_{\text{расп}} = 1850\text{ }^{\circ}\text{C}$ расход исходного сырья на установку может варьироваться от 0,019 кг/с (1,11 кг/мин) до 0,047 кг/с (2,81 кг/мин).

На рис. 2 представлены процесс получения расплава (а) и общая модель (б) плазмохимического реактора.

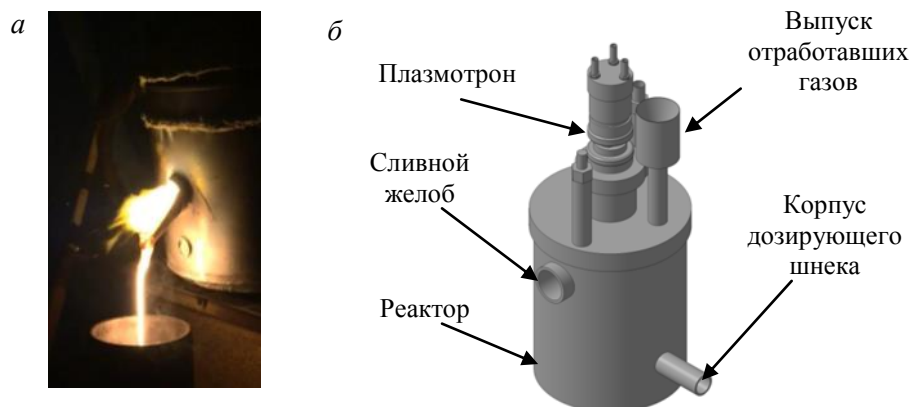


Рис. 2. Процесс получения расплава (а) и обобщенная модель (б) плазмохимического реактора

В процессе работы электроплазменной установки осуществляется интенсивный нагрев и плавление приготовленной шихты с заполнением расплавом всего объема плазмохимического реактора. Время выработки расплава в экспериментальной работе составляло от 7 до 10 мин. Электрофизические характеристики плазмотрона лежали в пределах: ток 350–370 А, напряжение 170–180 В, мощность 59,5–66,6 кВт, тепловое КПД плазмотрона 80–90 %.

Исследование морфологии и структурного состояния продуктов плавления осуществляли с использованием растровой электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп Quanta 2000 3D) и рентгенофазового анализа (Oxford Inca Energy 350).

Оценку физико-механических характеристик полученных стеклокристаллических материалов (прочность на сжатие, изгиб, тепловой коэффициент линейного расширения) осуществляли согласно действующим нормативным документам.

В процессе структурообразования стеклокристаллических материалов важным фактором является процесс, направленный на кристаллизацию расплава. Для определения оптимальных параметров термообработки отбирали пробы расплава массой 250 г методом свободного литья в графитовый цилиндрический тигель. Для предотвращения термоудара форма предварительно подогревалась до температуры 700 °С. Изотермическая выдержка образцов производилась в муфельной печи. Анализ сетки значений функции при фиксированном значении температуры показал, что наиболее близким к оптимальному режиму, при котором осуществляется кристаллизация (60–65 %) продукта плавления, является 950 °С с выдержкой в 2 ч при скорости подъема

температуры 15 °С/мин. Значение плотности продукта плавления, прошедшего термическую выдержку при указанной температуре, находится в диапазоне 2977–2989 кг/м³ с разницей между максимальным и минимальным значением, равной 12 кг/м³. Таким образом, опытно-аналитическим путем установлен режим термообработки расплава, полученного в плазмохимическом реакторе, при котором обеспечивается получение стеклокристаллического материала с наибольшей степенью кристалличности (60–65 %). Установленный режим термической выдержки включает две ступени: 1-я ступень – 700 °С в течение 1 ч и 2-я ступень – 950 °С в течение 2 ч.

Оценка кристаллизационных свойств расплава, полученного на основе золы (состав № 1), показала, что влияние термической выдержки несущественно влияет на кристаллизационные свойства продукта плавления. Рентгенограммы термообработанных образцов оказались идентичны до и после термообработки и отражают присутствие незначительного количества кристаллического муллита и анортита, растворенных в рентгеноаморфной фазе.

На рис. 3 представлены результаты качественного рентгенофазового анализа полученного стеклокристаллического материала на основе рассматриваемых составов (см. табл. 1). У образцов на основе составов № 2, 3, 4 после термической выдержки по установленному режиму наблюдается плотная кристаллическая структура, представленная анортитом, волластонитом и геленитом.

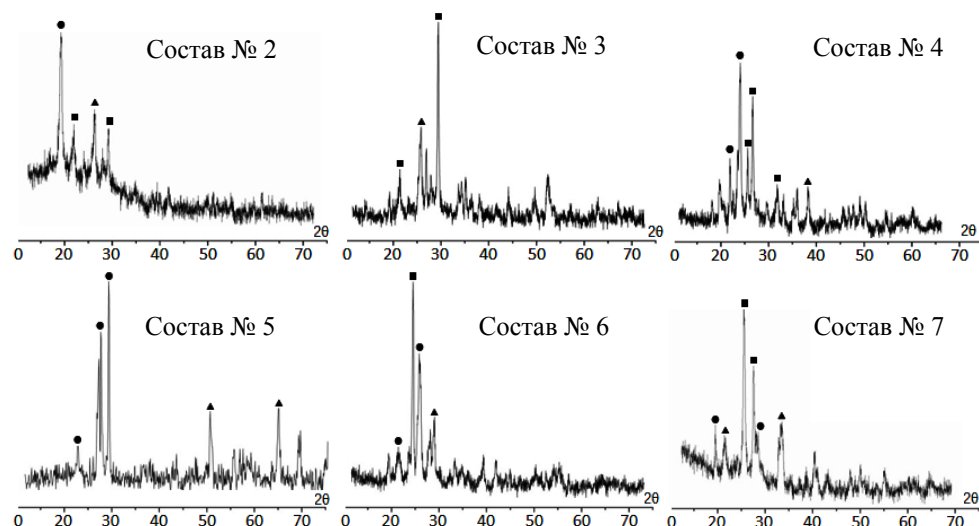


Рис. 3. Рентгенограммы стеклокристаллического материала:

■ – анортит; ▲ – волластонит; ● – кварц

У продуктов плавления составов № 5, 6, 7, прошедших двухступенчатую термообработку, возникала поверхностная кристаллизация образцов (рис. 3). Низкая кристаллизационная способность продуктов плавления на основе составов № 5, 6, 7 объясняется недостаточным количеством диоксида кремния (SiO₂) в составе расплава и невозможностью прохождения реакции силикатообразования.

Важнейшими свойствами стеклокристаллического материала являются плотность, прочность на сжатие и изгиб, тепловой коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Согласно диаграмме состояний $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$, область расположения составов сырьевых смесей находится в поле кристаллизации анортита. Анортит характеризуется низким ТКЛР, высокими армирующими свойствами, что положительно влияет на повышение прочности и стойкости к изгибу. Установлено, что наиболее термостойким является образец состава № 4, он способен выдержать охлаждение, без разрушения, от температуры 200 °С до нуля. Таким образом, значение низкого ТКЛР может достигаться регулированием степени кристалличности материала. При комнатной температуре стеклокристаллические материалы, подобно стеклу или керамике, не имеют области текучести или пластичности и ведут себя идеально упруго вплоть до разрушающей нагрузки. Повышенное значение ($\sim 3000 \text{ кг/м}^3$) плотности стеклокристаллического материала обуславливается плотной кристаллической структурой, представленной в основном анортитом.

На рис. 4, а представлено изменение прочности (изгиб, сжатие) полученных стеклокристаллических материалов на основе исследуемых составов. На рис. 4, б представлена структура наиболее прочного образца.

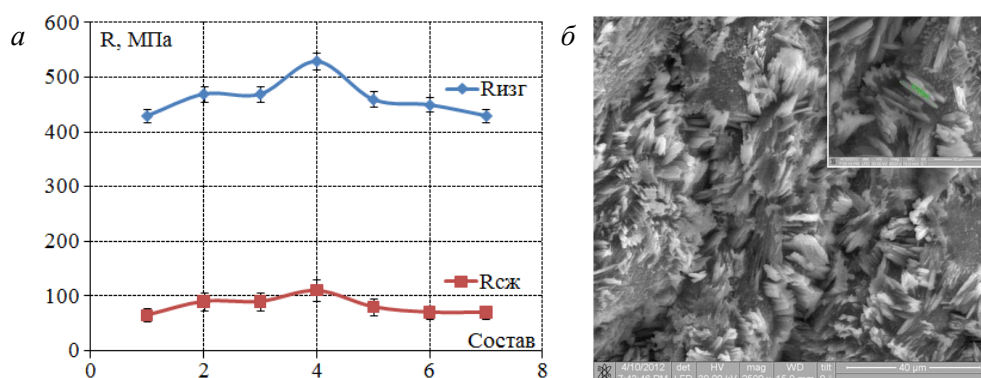


Рис. 4. Прочностные характеристики изготовленных образцов:

а – изменение прочности стеклокристаллических образцов в зависимости от состава сырьевой шихты; б – структура образца № 4

Из данных рис. 4, а следует, что соотношение компонентов сырьевой смеси в составе № 4 (зола ТЭС – 70 %, известняк – 20 %, кварцевый песок – 10 %) позволяет получить максимальное значение прочности материала. Это обусловлено наличием однородной тонкозернистой кристаллической структуры. При воздействии нагрузки на образец в нем закономерно возникают микротрещины. При равномерном распределении кристаллов с достаточно большим объемом кристаллической фазы размер микротрещин может быть ограничен пространством между кристаллами (рис. 4, б). Это способствует значительному увеличению прочности материала.

На основе проведения структурных исследований установлено, что рациональным составом для получения стеклокристаллических материалов

с использованием зол ТЭС является содержание: зола (70 мас. %), известняк (20 мас. %), кварцевый песок (10 мас. %). При данном соотношении компонентов в сырьевой смеси и соблюдении режимов термообработки возможно получение стеклокристаллического материала с максимальными физико-механическими показателями: $R_{сж} = 530$ МПа; $R_{изг} = 110$ МПа; $\rho = 2986,2$ кг/м³. В табл. 2 приведены основные свойства стеклокристаллического материала, полученного с использованием энергии термической плазмы, в сравнении с производимыми серийно стеклокристаллическими материалами.

Таблица 2

Свойства стеклокристаллических материалов

Показатели	Зольное стекло «Марблит»	Петроситаллы	Шлако-ситаллы	СКМ по плазменной технологии
ρ , г/см ³	2,67–2,69	2,880–2,90	2,73–2,76	2,90–2,99
$R_{изг}$, МПа	60–70	50–100	40–60	90–110
$R_{сж}$, МПа	300–400	350–450	300–400	450–530

Установлено, что строительный стеклокристаллический материал, полученный в условиях термической плазмы, обладает повышенными эксплуатационными качествами, соответствует группе износостойкости 5.

Таким образом, полученные стеклокристаллические материалы обладают повышенной прочностью, что обеспечивает этому классу материалов возможность широкого применения в строительстве в качестве облицовочного материала, элементов облицовки наружных и внутренних стен зданий и сооружений. Установлено, что для получения стеклокристаллического материала с повышенной степенью кристалличности необходимо полученный силикатный расплав подвергать двухстадийной термической выдержке с температурами 1-й ступени 700 °С в течение 1 ч, 2-й ступени 950 °С в течение 2 ч. При этом степень кристалличности возрастает до 60–65 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИ СПИСОК

1. Anshakov A.S., Urbakh E.K., Urbakh A.E., Cherednichenko V.S., Kuzmin M.G. Investigation of thermal plasma generator of technological function // Thermophysics and Aeromechanics. 2015. V. 22. № 6. P. 775–778.
2. Буянтубе С.Л., Урханова Л.А., Хмелев А.Б., Лхасаранов С.А., Кондратенко А.С. Переработка золошлаковых отходов электродуговой плазмой для получения композиционных строительных материалов // Вестник ВСГУТУ. 2016. Т. 61. № 4. С. 19–26.
3. Alekseeva I.P., Dymshits O.S., Zhilin A.A., Mikhailov M.D., Khubetsov A.A. Effect of yttrium oxide on the crystallization of glasses of the MgO-Al₂O₃-SiO₂ system, nucleated by a mix of titanium and zirconium dioxides, and the transparency of glass-crystalline materials in the superhigh-frequency spectral region // Journal of optical technology. 2015. V. 82. № 4. P. 262–267.
4. Stefanovsky S.V., Myasoedov B.F., Remizov M.B., Kozlov P.V., Belanova E.A., Shiryayev A.A., Zubavichus Y.V. Cesium speciation in aluminophosphate-based glass-crystalline materials for immobilization of high level waste from uranium-graphite channel reactor spent nuclear fuel reprocessing / Doklady chemistry. 2014. V. 457. P. 148–153.

5. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Semukhin B.S. Structure and Strength of Foam-Glass-Crystalline Materials Produced from a Glass Granulate // *Glass physics and chemistry*. 2011. V. 37. № 4. P. 371–377.
6. Chen M.J., Zhang F.S., Zhu J.X. Effective utilization of waste cathode ray tube glass-Crystalline silicotitanate synthesis // *Journal of hazardous materials*. 2010. V. 182. № 1–3. P. 45–49.
7. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. Assessment of the compositions and components for obtaining foam-glass-crystalline materials from aluminosilicate initial materials // *Glass and ceramics*. 2009. V. 66. № 3–4. P. 82–85.
8. Береговой В.А., Сорокин Д.С. Стеклокристаллические материалы на основе кремнистых пород // *Региональная архитектура и строительство*. 2015. № 1. С. 54–57.
9. Ахунов Д.Б., Жураев Х.А. Стеклокристаллические материалы на основе базальтов Кутчинского месторождения // *Современные научные исследования и разработки*. 2017. № 3 (11). С. 14–17.
10. Il'ina V.P. Glass crystal materials made from mineral and technogenic feedstock from Karelia // *Glass and ceramics*. 2007. V. 64. № 9–10. P. 318–321.
11. Karayannis V., Moutsatsou A., Domopoulou A. Fired ceramics 100 % from lignite fly ash and waste glass cullet mixtures // *Journal of building engineering*. 2017. V. 14. P. 1–6.
12. Волокитин О.Г., Вережачин В.И., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Шеховцов В.В. Анализ процессов традиционного и плазменного плавления золы ТЭЦ // *Техника и технология силикатов*. 2016. Т. 23. № 3. С. 2–5.
13. Abzaev Yu.A., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V. Investigation of the melting of quartz sand by low-temperature plasma // *Glass and ceramics*. 2015. V. 72. № 5–6. P. 225–227.
14. Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В., Хайсундинов А.И. Электродуговые и электроплазменные устройства для переработки силикатсодержащих отходов // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2014. Т. 57. № 3-3. С. 109–113.

REFERENCES

1. Anshakov A.S., Urbakh E.K., Urbakh A.E., Cherednichenko V.S., Kuzmin M.G. Investigation of thermal plasma generator of technological function. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2015. V. 22. No. 6. Pp. 775–778.
2. Buyantuev S.L., Urkhanova L.A., Khmelev A.B., Lhasaranov S.A., Kondratenko A.S. Pere-rabotka zoloshlakovykh otkhodov elektrodugovoy plazmoy dlya polucheniya kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov [Plasma processing of ash and slag wastes for the production of composite building materials]. *Vestnik VSGUTU*. 2016. V. 61. No. 4. Pp. 19–26. (rus)
3. Alekseeva I.P., Dymshits O.S., Zhilin A.A., Mikhailov M.D., Khubetsov A.A. Effect of yttrium oxide on the crystallization of glasses of the MgO-Al₂O₃-SiO₂ system, nucleated by a mix of titanium and zirconium dioxides, and the transparency of glass-crystalline materials in the superhigh-frequency spectral region. *Journal of Optical Technology*. 2015. V. 82. No. 4. Pp. 262–267.
4. Stefanovsky S.V., Myasoedov B.F., Remizov M.B., Kozlov P.V., Belanova E.A., Shiryayev A.A., Zubavichus Y.V. Cesium speciation in aluminophosphate-based glass-crystalline materials for immobilization of high level waste from uranium-graphite channel reactor spent nuclear fuel reprocessing. *Doklady chemistry*. 2014. V. 457. Pp. 148–153.
5. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Semukhin B.S. Structure and strength of foam-glass-crystalline materials produced from a glass granulate. *Glass Physics and Chemistry*. 2011. V. 37. No. 4. Pp. 371–377.
6. Chen M.J., Zhang F.S., Zhu J.X. Effective utilization of waste cathode ray tube glass-crystalline silicotitanate synthesis. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. V. 182. No. 1–3. Pp. 45–49.
7. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Abiyaka A.N. Assessment of the compositions and components for obtaining foam-glass-crystalline materials from aluminosilicate initial materials. *Glass and Ceramics*. 2009. V. 66. No. 3–4. Pp. 82–85.
8. Beregovoy V.A., Sorokin D.S. Steklokristallicheskiye materialy na osnove kremnistykh porod [Glass-ceramic materials based on siliceous rocks]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2015. No. 1. Pp. 54–57. (rus)

9. Akhunov D.B., Zhuraev Kh.A. Steklokristallicheskiye materialy na osnove bazal'tov Kutchinskogo mestorozhdeniya [Glass ceramic materials based on basalt from Kuchinskoe deposit]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki*. 2017. No. 3 (11). Pp. 14–17. (rus)
10. Il'ina V.P. Glass crystal materials made from mineral and technogenic feedstock from Karelia. *Glass and Ceramics*. 2007. V. 64. No. 9–10. Pp. 318–321.
11. Karayannis V., Moutsatsou A., Domopoulou A. Fired ceramics 100 % from lignite fly ash and waste glass cullet mixtures. *Journal of Building Engineering*. 2017. V. 14. Pp. 1–6.
12. Volokitin O.G., Vereshchagin V.I., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Shekhovtsov V.V. Analiz protsessov traditsionnogo i plazmennogo plavleniya zoly TETS [Analysis of traditional and plasma melting of ash from thermal power plants]. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2016. V. 23. No. 3. Pp. 2–5. (rus)
13. Abzaev Yu.A., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V. Investigation of the melting of quartz sand by low-temperature plasma. *Glass and Ceramics*. 2015. V. 72. No. 5–6. Pp. 225–227.
14. Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V., Haysundinov A.I. Elektrodogovyye i elektroplazmennyye ustroystva dlya pererabotki silikatsoderzhashchikh ot-khodov [Electric arc and electropasma devices for processing silicate waste]. *Izvestiya vys-shikh uchebnykh zavedenii. Fizika*. 2014. V. 57. No. 3-3. Pp. 109–113. (rus)

Сведения об авторах

Аньшаков Анатолий Степанович, докт. техн. наук, профессор, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1, anshakov@itp.nsc.ru

Гаусс Ксения Сергеевна, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, gauss.ksyu@mail.ru

Волокитин Олег Геннадьевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, volokitin_oleg@mail.ru

Шеховцов Валентин Валерьевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shehovcov2010@yandex.ru

Authors Details

Anatoly A. Anshakov, DSc, Professor, The Kutateladze Institute of Thermal Physics SB RAS, 1, Academician Lavrent'ev Str., 630090, Novosibirsk, Russia, anshakov@itp.nsc.ru

Kseniya S. Gauss, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, gauss.ksyu@mail.ru

Oleg G. Volokitin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, volokitin_oleg@mail.ru

Valentin V. Shekhovtsov, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, shehovcov2010@yandex.ru