

УДК 666.29

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 61.35

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN qeeimc

DOI 10.62980/2076-0655-2025-164-172

ФАСАДНАЯ СИЛИКАТНАЯ КОМПОЗИЦИЯ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ЯЧЕИСТОГО ГАЗОСИЛИКАТА

Яковлев Г.И.¹, Ангелич З.С.¹, Первушин Г.Н.¹, Бурьянов А.Ф.², Пудов И.А.¹, Князева С.А.¹, Лисин В.А.¹, Сырбова Т.А.¹

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

АННОТАЦИЯ

В статье представлено исследование фасадной силикатной композиции, созданной на основе отходов автоклавного силикатного газобетона. Описан способ переработки отходов газобетонного производства, основанный на измельчении их до тонкодисперсного состояния с целью последующего использования в строительных материалах в качестве заменителя дорогостоящих компонентов, таких как белый портландцемент. Разработанный состав отличается технологичностью, экономичностью и улучшенными эксплуатационными характеристиками, включая высокую паропроницаемость, водостойкость и теплостойкость до 500 °С. Предложенная композиция демонстрирует хорошую адгезию к минеральным подложкам, устойчивость к атмосферным воздействиям и долговечность. В работе представлены результаты физико-химического анализа, подтверждающие формирование в структуре материала прочных соединений на основе гидросиликатов кальция и гидрогранатов. Полученные результаты открывают перспективы для создания экологически устойчивых строительных материалов на базе рециклинга отходов ячеистого бетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: газобетон, строительные материалы, отход производства, декоративное покрытие

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Яковлев Г.И., Ангелич З.С., Первушин Г.Н., Бурьянов А.Ф., Пудов И.А., Князева С.А., Лисин В.А., Сырбова Т.А. Фасадная силикатная композиция на основе отходов ячеистого газосиликата // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 2. – С. 164-172. DOI 10.62980/2076-0655-2025-164-172, EDN qeeimc

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

PM MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY

EDN qeeimc

DOI 10.62980/2076-0655-2025-164-172

THE FACADE SILICATE COMPOSITION ON THE BASIS OF THE WASTE CELLULAR GAS SILICATE

Yakovlev G.I.¹, Angelich Z.S.¹, Pervushin G.N.¹, Burjanov A.F.², Pudov I.A.¹, Knyazeva S.A.¹, Lisin V.A.¹, Syrbova T.A.¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University

²Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University.

ABSTRACT

The article presents a study of facade silicate composition created on the basis of autoclaved silicate aerated concrete waste. The method of processing of aerated concrete production waste based on grinding them to a fine-dispersed state is described. The finely dispersed waste of aerated concrete production was used in building materials as a substitute for expensive components such as white Portland cement. The developed composition is characterized by processability, economy and improved performance characteristics. The developed facade silicate composition has high vapor permeability, water resistance and heat resistance up to 500 °C. This composition has good adhesion to mineral substrates, weather resistance and durability. The paper presents the results of physicochemical analysis confirming the formation of strong compounds based on calcium hydrosilicates and hydrogranates in the structure of the material. The obtained results open prospects for the creation of environmentally sustainable building materials based on recycling of waste cellular concrete.

KEY WORDS: aerated concrete, building materials, production waste, decorative coating

FOR CITATION: Yakovlev G.I., Angelich Z.S., Pervushin G.N., Burjanov A.F., Pudov I.A., Knyazeva S.A., Lisin V.A., Syrbova T.A. The facade silicate composition on the basis of the waste cellular gas silicate // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. – 32, No.2. – Pp. 164 – 172. DOI 10.62980/2076-0655-2025-164-172, EDN qeeimc

ВВЕДЕНИЕ

INTRODUCTION

В настоящее время большое внимание уделяется многофункциональным декоративно-отделочным силикатным композициям. Помимо декоративной функции такие композиции обладают защитными свойствами, являются атмосферостойкими, стойкими к разного рода загрязнениям, выдерживают механические нагрузки и являются долговечными и ремонтпригодными. Декоративно-отделочные силикатные композиции наносятся на кирпич, газопенобетон или цементно-известковые штукатурки, поэтому они должны быть паропроницаемыми. Всем вышеперечисленным требованиям в полной мере отвечают силикатные краски [1-5].

Разновидность ячеистого бетона - автоклавный силикатный газобетон в большей степени используется как конструкционно-теплоизоляционный материал благодаря своим теплотехническим характеристикам (средняя плотность около 500 кг/м³, теплопроводность - 0,12 Вт/мК). При производстве ячеистого бетона образуются твердые отходы и некондиционные изделия, объем которых составляет, в зависимости от используемой технологии, от 1,6% до 15,4% от общего количества выпускаемой продукции [6,12]. При этом предприятия, производящие изделия из ячеистого бетона, ежегодно отправляют в отвалы от 5 до 10 тыс. кубометров твердых отходов, в составе которых преобладает слой от среза горбушки – брак, формирующийся вследствие трещинообразования при запарке изделий в автоклавах, подрезной слой, обрезки и бой газосиликатных изделий.

Применение отмеченных отходов в настоящее время сводится к утепляющей стяжке при устройстве полов [7], засыпке под отмостку или фундамент [8], в составе легкого бетона в качестве заполнителя в виде щебня [7-9], при устройстве дренажных прослоек в наружных системах водоотведения. Более предпочтительным может быть рециклинг отходов производства силикатного газобетона в процессе измельчения этих отходов до фракции требуемой величины [10]. Необходимо отметить, что отходы производства газобетона содержат гидросиликаты и гидрогранаты, которые связаны с наличием в составе сырья для производства газобетона гидроксида кальция и тонкомолотого кварцевого песка в сочетании с газообразователем на основе алюминиевой пудры (рис. 1).

Currently, much attention is paid to multifunctional decorative and finishing silicate compositions. In addition to the decorative function, such compositions have protective properties, are weather-resistant, resistant to various types of pollution, withstand mechanical loads and are durable and repairable. Decorative and finishing silicate compositions are applied to brick, aerated concrete or cement-lime plasters, so they must be vapor-permeable. Silicate paints fully meet all of the above requirements [1-5].

A type of cellular concrete - autoclaved silicate aerated concrete is used to a greater extent as a structural and thermal insulation material due to its thermal characteristics (average density of about 500 kg/m³, thermal conductivity - 0.12 W/mK). During the production of cellular concrete, solid waste and substandard products are generated, the volume of which, depending on the technology used, ranges from 1.6% to 15.4% of the total amount of manufactured products [6,12]. At the same time, enterprises producing products from aerated concrete annually send to waste dumps from 5 to 10 thousand cubic meters of solid waste, which is dominated by the layer from the cut of the crust - a defect formed as a result of cracking during the steaming of products in autoclaves, the undercut layer, trimmings and breakage of aerated concrete products.

The use of the noted waste is currently limited to insulating screeds when installing floors [7], backfilling under a blind area or foundation [8], as part of lightweight concrete as a filler in the form of crushed stone [7-9], and when installing drainage layers in external drainage systems. It may be more preferable to recycle waste from the production of silicate aerated concrete in the process of crushing this waste to a fraction of the required size [10]. It should be noted that waste from the production of aerated concrete contains hydrosilicates and hydrogranates, which are associated with the presence of calcium hydroxide and finely ground quartz sand in the composition of the raw materials for the production of aerated concrete in combination with a blowing agent based on aluminum powder (Fig. 1).

РИСУНОК 1

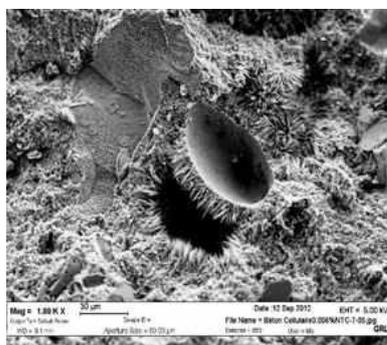
МИКРОСТРУКТУРА СИЛИКАТНОГО ГАЗОБЕТОНА:

- (а) – заполнение пор кристаллами гидросиликата кальция,
- (б) – структура кристаллов гидросиликатов кальция при 10000-кратном увеличении

Figure 1

Microstructure of silicate aerated concrete:

- (a) – filling of pores with calcium hydrosilicate crystals,
- (b) – structure of calcium hydrosilicate crystals at 10,000-fold magnification



a (a)



б(b)

Среди спектра продуктов гидратации, формирующихся при автоклавной обработке известково-песчаной

Among the range of hydration products formed during autoclave treatment of lime-sand mixture, the most effective

смеси, наиболее эффективны с точки зрения повышенной прочности ячеистого газосиликата низкоосновные гидросиликаты кальция с соотношением $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ равным 2:3 и ниже. Это гиролит, ксонолит, тоберморит $11,3 \text{ \AA}$ [11]. Отмеченные фазы в составе ячеистого газобетона, как правило, являются также структурообразующими при гидратации портландцемента. Следовательно, в контакте с растворимым стеклом, например, натриевым, они будут проявлять себя как коагуляторы твердения [13].

Кроме того, известно, что в вяжущих матрицах гидросиликаты кальция служат центрами кристаллизации [14-17,20], что обеспечивает возможность их применения не только в качестве коагулирующего компонента силикатной композиции, но и в качестве активных компонентов.

На основании этого, в работе предлагается использовать молотые отходы силикатного газобетона в качестве основы фасадной силикатной композиции [10] взамен дорогостоящего белого портландцемента.

Материалы и методы исследований

Основная задача проведенных исследований заключалась в установлении закономерностей формирования структуры фасадного покрытия на основе тонкоизмельченного отхода производства силикатного газобетона и растворимого гидросиликата натрия, а также установление взаимосвязи структуры со свойствами исследуемой композиции.

Разрабатываемая сухая смесь для приготовления фасадного покрытия имеет преимущество перед традиционными составами [10], т.к. взамен дорогостоящих белого портландцемента и жидкого калиевого стекла в ней предлагается использовать растворимый порошок гидросиликата натрия и тонкоизмельченный порошок, полученный из молотых отходов производства силикатного газобетона. От известных двухкомпонентных малотехнологичных составов в виде силикатной краски с оксидом цинка и двухкомпонентной цементно-силикатной краски [18] разработанная композиция отличается возможностью изготовления в виде сухой смеси, которую перед применением можно растворить в воде.

В настоящем исследовании в композиции использовался отход газосиликатного бетона марки 500, производимого Ижевским заводом газобетонных блоков "Народный камень" (Folkstone). Учитывая существенную стоимость белого портландцемента в сравнении традиционным портландцементом и низкую отпускную стоимость отходов силикатного газобетона, обеспечивается экономическая эффективность производства силикатной композиции.

Для приготовления силикатной композиции применен базовый состав цементно-силикатной краски [19], в которой взамен белого портландцемента использовался тонкоизмельченный порошок силикатного газобетона. Предварительно отходы силикатного газобетона измельчались на щековой дробилке с последующим помолом на дисковом истирателе ИД-200. Дисперсность полученного порошка составляла 2-100 мкм (рис. 2а).

Одним из основных компонентов композиции является сухой порошок гидратированного силиката натрия компании ООО «Лайсан», выпущенный в соответствии с ТУ 20.13.62-060-00883732-2019, отвечающий требованиям ТУ 20.13.62-001-06051139-2020.

in terms of increased strength of cellular gas silicate are low-basic calcium hydrosilicates with a $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ ratio of 2:3 and lower. This is gyrolite, xonolite, tobermorite $11,3 \text{ \AA}$ [11]. The noted phases in the composition of cellular aerated concrete, as a rule, are also structure-forming during the hydration of portland cement. Consequently, in contact with soluble glass, such as sodium glass, they will act as hardening coagulants [13].

In addition, it is known that in binder matrices calcium hydrosilicates serve as crystallization centers [14-17,20], which makes it possible to use them not only as a coagulating component of a silicate composition, but also as active components.

Based on this, the paper proposes to use ground waste silicate aerated concrete as the basis for a facade silicate composition [10] instead of expensive white portland cement.

Materials and research methods

The main objective of the conducted research was to establish the patterns of formation of the structure of the facade coating based on finely ground waste from the production of silicate aerated concrete and soluble sodium hydrosilicate, as well as to establish the relationship between the structure and the properties of the composition under study.

The dry mixture being developed for preparing facade coating has an advantage over traditional compositions [10], since instead of expensive white portland cement and liquid potassium glass, it proposes to use soluble sodium hydrosilicate powder and finely ground powder obtained from ground waste from the production of silicate aerated concrete. The developed composition differs from the known two-component low-tech compositions in the form of silicate paint with zinc oxide and two-component cement-silicate paint [18] by the possibility of production in the form of a dry mixture, which can be dissolved in water before use.

In this study, the composition used waste aerated concrete grade 500, produced by the Izhevsk aerated concrete block plant "Folkstone". Taking into account the significant cost of white portland cement in comparison with traditional portland cement and the low selling price of silicate aerated concrete waste, the economic efficiency of the production of silicate composition is ensured.

To prepare the silicate composition, a basic composition of cement-silicate paint was used [19], in which finely ground silicate aerated concrete powder was used instead of white portland cement. The silicate aerated concrete waste was first crushed in a jaw crusher and then ground in an ID-200 disc grinder. The dispersion of the resulting powder was 2-100 μm (Fig. 2a).

One of the main components of the composition is dry powder of hydrated sodium silicate from Laysan LLC, produced in accordance with TU 20.13.62-060-00883732-2019, meeting the requirements of TU 20.13.62-001-06051139-2020.

РИСУНОК 2

ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ПОРОШКА СИЛИКАТНОГО ГАЗОБЕТОНА ПОСЛЕ ПОМОЛА

Figure 2

Dispersion analysis of silicate aerate concrete powder after grinding

Силикатный модуль продукта варьируется от 2,8 до 3,4. Массовая доля компонентов, согласно паспорту качества, составляет для оксида натрия (Na_2O) - 24,13% и диоксида кремния (SiO_2) - 70,83%. Микроструктура гидросиликата натрия представлена на рисунке 3.

РИСУНОК 3

МИКРОСТРУКТУРА ГИДРОСИЛИКАТА НАТРИЯ

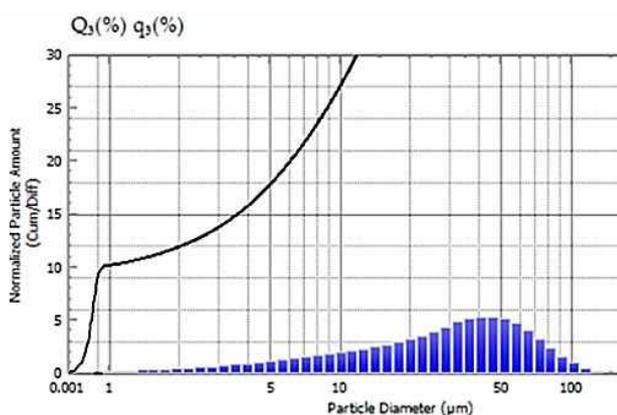
Figure 3

Microstructure of sodium hydrosilicate

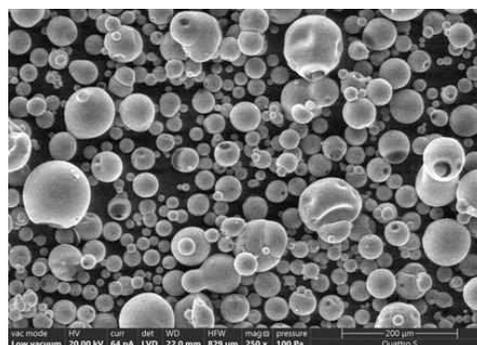
Оптимальный состав, имеющий необходимое сцепление с минеральной поверхностью, водостойкостью и отсутствием меления, включает молотый отход производства силикатного газобетона - 25 г, гидросиликат натрия - 15 г, микрокальцит - 9 г, фосфат натрия - 6 г. Для колерования использовался щелочестойкий пигмент красного цвета - 2,5 г. Смесь всех компонентов перетиралась в дисковом истирателе ИД-200 и затворялась водой с температурой 20 °С до однородной консистенции.

Комплексные физико-химические исследования составов были проведены с применением дифференциально-сканирующая калориметрия и инфракрасного спектрального анализа. Дифференциально-сканирующая калориметрия проводилась на дериватографе TGA/DSC1 Starsystem производства Mettler Toledo в диапазоне температур от 60°C до 1100°C со скоростью нагрева 30°C/мин. ИК-спектральный анализ проводили на спектрометре IRAffinity-1 производства Shimadzu в области частот 400 – 4000 cm^{-1} .

Изучение микроструктуры выполнялись методом сканирующей электронной микроскопии и энерго-дисперсионной рентгеновской спектроскопии на сканирующем электронном микроскопе Thermo Fisher Scientific Quattro S с приставкой для энерго-дисперсионной рентгеновской спектроскопии EDAX Octane Elect Plus EDS System. Исследования проводились в Центре коллективного пользования «Поверхность и новые материалы» при УдмФИЦ УрО РАН (г. Ижевск, Россия).



The silicate modulus of the product varies from 2.8 to 3.4. The mass fraction of components, according to the quality certificate, is 24.13% for sodium oxide (Na_2O) and 70.83% for silicon dioxide (SiO_2). The microstructure of sodium hydrosilicate is shown in Figure 3.



The optimal composition, which has the necessary adhesion to the mineral surface, water resistance and absence of chalking, includes ground waste from the production of silicate aerated concrete - 25 g, sodium hydrosilicate - 15 g, microcalcite - 9 g, sodium phosphate - 6 g. For tinting, an alkali-resistant red pigment was used - 2.5 g. The mixture of all components was ground in a disc grinder ID-200 and mixed with water at a temperature of 20 °C until a homogeneous consistency was achieved.

Comprehensive physicochemical studies of the compositions were carried out using differential scanning calorimetry and infrared spectral analysis. Differential scanning calorimetry was performed on a TGA/DSC1 Starsystem derivatograph manufactured by Mettler Toledo in the temperature range from 60°C to 1100°C with a heating rate of 30°C/min. IR spectral analysis was performed on a Shimadzu IRAffinity-1 spectrometer in the frequency range of 400–4000 cm^{-1} .

The microstructure was studied using scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy on a Thermo Fisher Scientific Quattro S scanning electron microscope with an EDAX Octane Elect Plus EDS System energy-dispersive X-ray spectroscopy attachment. The studies were conducted at the Center for Collective Use “Surface and New Materials” at the UdmFRC UB RAS (Izhevsk, Russia).

Результаты и обсуждение

Для исследования свойств полученной композиции были подготовлены образцы состава, которые наносились на поверхность стеклянных пластин после затворения водой и выдерживания в течение 20 минут для более полного растворения гидросиликата натрия. Толщина силикатного покрытия при нанесении не превышала 150 мкм (рис. 4 а), что обеспечивалось за счет использования аппликатора Константа КАУ 2 с регулируемым зазором. Кристаллогидраты в структуре силикатной матрицы представлены на рис. 4 б.

Жизнеспособность композиции регулировалась содержанием фосфата натрия и, при необходимости, могла достигать 90 мин. Это объясняется тем, что при затворении сухой отделочной смеси водой происходит блокирование поверхности кристаллов гидросиликатов кальция фосфатом натрия. Взаимодействие фосфата натрия идет по поверхности гидросиликатов кальция с возможным образованием труднорастворимых соединений фосфата кальция, предотвращающих мгновенную коагуляцию растворяющегося гидросиликата натрия.



Процесс коагуляции замедляется при снижении концентрации свободного фосфата натрия. После полного истощения фосфата натрия в составе композиции происходит коагуляция растворившегося гидросиликата натрия, сопровождающаяся схватыванием раствора и последующей кристаллизацией с затвердеванием системы (рис. 4 б), и значительным снижением растворимости всей композиции.

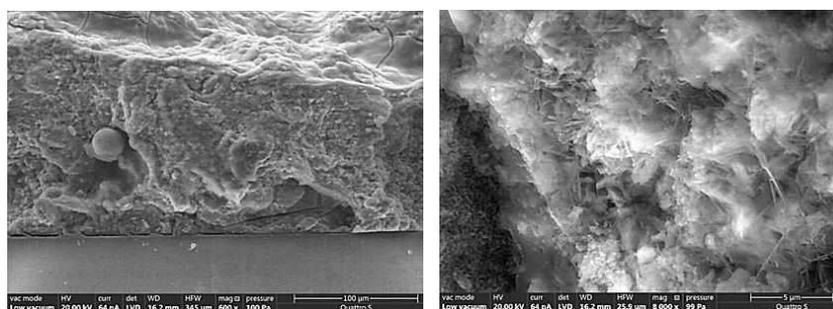
РИСУНОК 4

МИКРОСТРУКТУРА СКОЛА СИЛИКАТНОЙ КОМПОЗИЦИИ:

(а) – на поверхности стеклянной подложки,
(б) – кристаллогидратные новообразования в структуре силикатной матрицы

Figure 4

Microstructure of clipped silicate composition:
(а) – on the surface of the glass substrate,
(б) – crystal hydrate formations in the structure of the silicate matrix



а (а)

б(б)

Дополнительное упрочнение нанесенного покрытия обеспечивается параллельной карбонизацией гидросиликатов силикатов кальция и силиката натрия:



Таким образом, в процессе твердения системы упрочнение и повышение водостойкости обеспечивается продолжающейся коагуляцией и карбонизацией системы с образованием прочных и водостойких новообразований.

Энергодисперсионный анализ элементов микроструктуры силикатной краски подтвердил предложенную выше схему гидратации краски на основе молотого силикатного газобетона.

Судя по результатам энергодисперсионного анализа, в структуре материала формируются новообразования на основе гидросиликатов кальция низкой основности и

Results and discussion

To study the properties of the obtained composition, samples of the composition were prepared, which were applied to the surface of glass plates after mixing with water and holding for 20 minutes for more complete dissolution of sodium hydrosilicate. The thickness of the silicate coating during application did not exceed 150 μm (Fig. 4 a), which was ensured by using the Constant KAU 2 applicator with an adjustable gap. Crystal hydrates in the structure of the silicate matrix are shown in Fig. 4 b.

The viability of the composition was regulated by the sodium phosphate content and, if necessary, could reach 90 minutes. This is explained by the fact that when the dry finishing mixture is mixed with water, the surface of the calcium hydrosilicate crystals is blocked by sodium phosphate. The interaction of sodium phosphate occurs on the surface of calcium hydrosilicates with the possible formation of poorly soluble calcium phosphate compounds that prevent instant coagulation of the dissolving sodium hydrosilicate.

The coagulation process slows down as the concentration of free sodium phosphate decreases. After the sodium phosphate in the composition has been completely exhausted, coagulation of the dissolved sodium hydrosilicate occurs, accompanied by the setting of the solution and subsequent crystallization with hardening of the system (Fig. 4 b), and a significant decrease in the solubility of the entire composition.

Additional strengthening of the applied coating is ensured by parallel carbonization of calcium silicate hydrosilicates and sodium silicate:

Thus, during the process of hardening of the system, strengthening and increasing water resistance is ensured by the continuing coagulation and carbonization of the system with the formation of strong and water-resistant new formations.

Energy dispersive analysis of the elements of the microstructure of silicate paint confirmed the above-proposed scheme of paint hydration based on ground silicate aerated concrete.

Judging by the results of energy-dispersive analysis, new formations based on low-basicity calcium hydrosilicates and

гидроалюмосиликатов кальция, известные также как гидрогранаты (рис. 5), обеспечивающую высокую прочность и атмосферостойкость полученного покрытия.

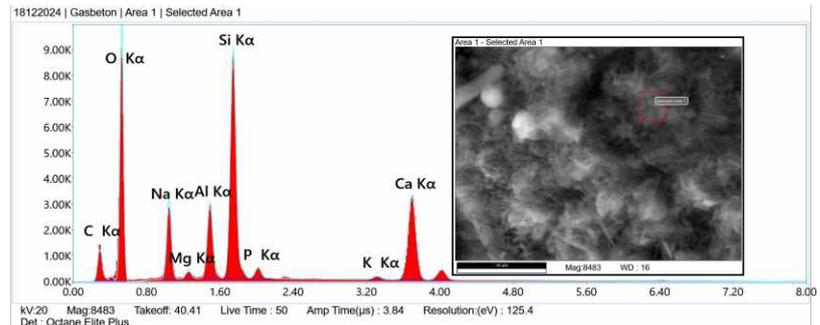
calcium hydroaluminosilicates, also known as hydrogranets (Fig. 5), are formed in the structure of the material, ensuring high strength and weather resistance of the resulting coating.

РИСУНОК 5

ЭНЕРГОДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ КРИСТАЛЛОГИДРАТНЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ В СТРУКТУРЕ СИЛИКАТНОЙ МАТРИЦЫ

Figure 5

Energy dispersive analysis of crystal hydrate new formations in the structure of silicate matrix



С целью оценки атмосферостойкости покрытия были проведены ИК-спектральный и дифференциально-термический анализ затвердевшего состава покрытия в возрасте 28 суток.

In order to assess the weather resistance of the coating, IR spectral and differential thermal analysis of the hardened coating composition at the age of 28 days were carried out.

На ИК спектре силикатного покрытия в возрасте 28 дней (рис. 6) отмечается преобладание линий поглощения в области частот от 1446,6 см⁻¹ до 1419,6 см⁻¹ и 873,7 см⁻¹, соответствующих карбонату кальция CaCO₃, который формируется при карбонизации растворимого стекла и силикатов кальция. На спектре также отмечено наличие линий поглощения в области частот 1116,78 см⁻¹ до 1045,42 см⁻¹, характерных для гидросиликатов кальция. Таким образом, в процессе формирования структуры покрытие карбонизируется, что позволяет повысить его водостойкость и прочностные характеристики, способствующие повышению атмосферостойкости покрытия и его долговечности.

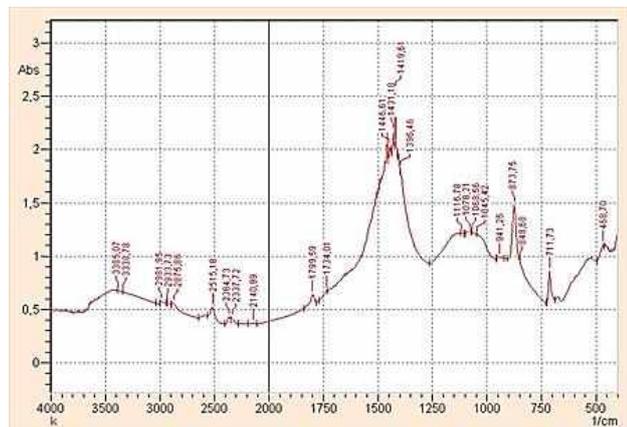
The IR spectrum of the silicate coating at the age of 28 days (Fig. 6) shows a predominance of absorption lines in the frequency range from 1446.6 cm⁻¹ to 1419.6 cm⁻¹ and 873.7 cm⁻¹, corresponding to calcium carbonate CaCO₃, which is formed during the carbonation of soluble glass and calcium silicates. The spectrum also shows the presence of absorption lines in the frequency range of 1116.78 cm⁻¹ to 1045.42 cm⁻¹, characteristic of calcium hydrosilicates. Thus, during the process of structure formation, the coating is carbonized, which allows to increase its water resistance and strength characteristics, contributing to the increase of the weather resistance of the coating and its durability.

РИСУНОК 6

СПЕКТРЫ СИЛИКАТНОГО ПОКРЫТИЯ в возрасте 28 дней

Figure 6

Silicate coating spectra at the age of 28 days



Наличие карбонатов кальция подтверждается спектрами дифференциально-термического анализа (рис. 7). На дериватограмме имеется эндотермический эффект в области температур 408-500 °С, характерный для дегидратации α – гидрата двухкальциевого силиката и декарбонизация карбоната кальция в области температур 874,5 °С [11]. Судя по термограмме, полученный состав способен работать при воздействии высоких температур до 500 °С, не теряя эксплуатационных свойств. Наличие отмеченных эндотермических эффектов дополнительно подтверждает данные, полученные при ИК-спектральном анализе. Анализ пористости силикатной композиции по результатам исследования микроструктуры (рис. 4) предполагает паро- и массообмен покрытия через

The presence of calcium carbonates is confirmed by differential thermal analysis spectra (Fig. 7). The derivatogram shows an endothermic effect in the temperature range of 408-500 °C, characteristic of the dehydration of α-hydrate of dicalcium silicate and the decarbonation of calcium carbonate in the temperature range of 874.5 °C [11]. Judging by the thermogram, the resulting composition is capable of operating under high temperatures up to 500 °C without losing its performance properties. The presence of the noted endothermic effects additionally confirms the data obtained from IR spectral analysis. The analysis of the porosity of the silicate composition based on the results of the microstructure study (Fig. 4) suggests vapor and mass exchange of the coating through the layer of the applied coating. In this case, the

слой нанесенного покрытия. При этом паропроницаемость красочного слоя определенная в соответствии с ГОСТ 33355 составила $660 \text{ г/м}^2 \cdot \text{сут.}$, класс V1, водопоглощение $0,102 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч}^{0,5})$.

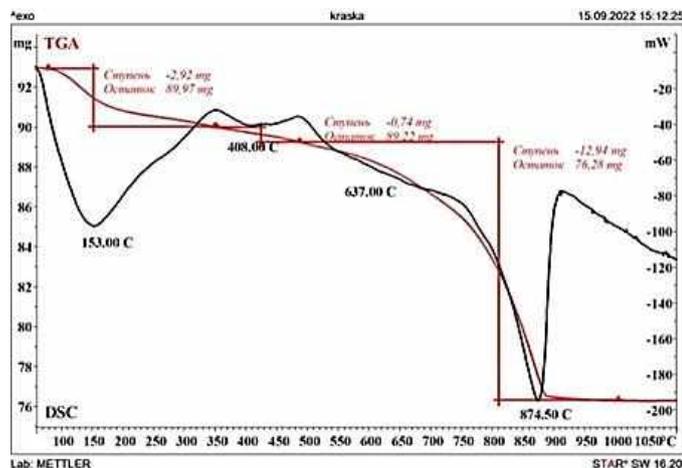
vapor permeability of the paint layer determined in accordance with GOST 33355 was $660 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$, class V1, water absorption $0.102 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$.

РИСУНОК 7

ДЕРИВАТОГРАММА СИЛИКАТНОГО ПОКРЫТИЯ в возрасте 28 дней

Figure 7

Derivatogram of silicate coating at the age of 28 days



При нанесении силикатного композита на стеклянную основу отмечено хорошее сцепление с поверхностью через 24 часа (адгезия силикатной композиции по методу решетчатых надрезов составила 1 балл), отсутствие меления и водостойкость покрытия.

When applying the silicate composite to a glass base, good adhesion to the surface was noted after 24 hours (the adhesion of the silicate composite using the lattice cut method was 1 point), the absence of chalking and the water resistance of the coating.

Цвет покрытия (рис. 8) определялся примесями в составе отходов газобетона. При колеровании композиции щелочестойким пигментом (рис. 8 в) также отмечено отсутствие шелушения поверхности красочного состава.

The colour of the coating (Fig. 8) was determined by impurities in the composition of the aerated concrete waste. When tinting the composition with an alkali-resistant pigment (Fig. 8c), the absence of peeling of the surface of the paint composition was also noted.

РИСУНОК 8

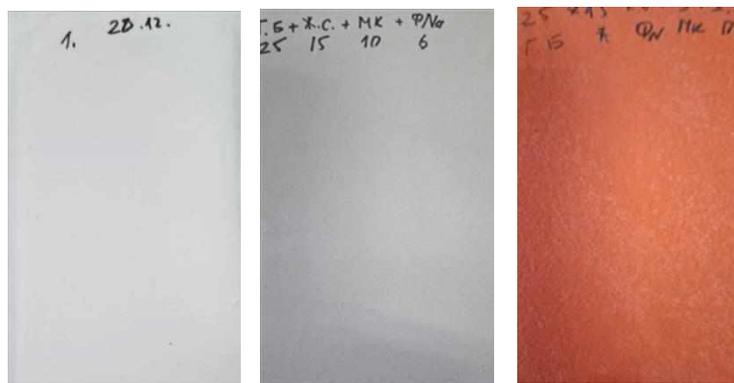
ВНЕШНИЙ ВИД ПОКРЫТИЯ ПРИ НАНЕСЕНИИ НА СТЕКЛЯННУЮ ПОДЛОЖКУ:

- (а) - цементно-силикатной покрытие (состав из [16]),
- (б) – покрытие на основе отходов силикатного газобетона,
- (в) – колерованное покрытие на основе отходов силикатного газобетона

Figure 8

Appearance of the coating when applied to a glass substrate:

- (а) - cement-silicate coating (composition from [16]),
- (б) – coating based on waste silicate aerated concrete,
- (с) – tinted coating based on waste silicate aerated concrete



а (а)

б (б)

в (в)

Заключение

Разработанный состав декоративного фасадного покрытия на основе молотого ячеистого газосиликатата и гидросиликата натрия с микрокальцитом отличается технологичностью и удобством приготовления в условиях строительной площадки, а также хорошими эксплуатационными характеристиками: жизнеспособность – до 90 мин; адгезия по методу решетчатых надрезов – 1 балл; паропроницаемость красочного слоя $V = 660 \text{ г/м}^2 \cdot \text{сут.}$, водопоглощение $0,102 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч}^{0,5})$, теплостойкость до $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Разработанное фасадное силикатное покрытие, в отличие от полимерного покрытия, имеет необходимую

Conclusions

The developed composition of decorative facade coating based on ground cellular gas silicate and sodium hydrosilicate with microcalcite is characterized by its technological effectiveness and ease of preparation in construction site conditions, as well as good operational characteristics: viability - up to 90 min; adhesion by the method of lattice cuts - 1 point; vapor permeability of the paint layer $V = 660 \text{ g/m}^2 \cdot \text{day}$, water absorption $0.102 \text{ kg / (m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$, heat resistance up to $500 \text{ }^\circ\text{C}$.

The developed facade silicate coating, unlike the polymer coating, has the necessary porosity to ensure vapor and gas permeability of brick walls. It is also necessary to note the

пористость для обеспечения паро- и газопроницаемости кирпичных стен. Необходимо отметить также повышенную долговечность базового силикатного покрытия, на основе которого разработаны исследуемые составы [19]. Лакокрасочное покрытие рекомендуется для окраски поверхности цементного бетона и раствора, стальных конструкций, керамических оснований. Возможна эксплуатация покрытия при высоких температурах (до 500 °C) для изоляции горячих поверхностей. Учитывая повышенную щелочность раствора лакокрасочного покрытия, существует ограничение по использованию его для окраски изделий из алюминиевых сплавов.

Литература:

1. Яковлев Г.И., Шайбадуллина А.В., Полянских И.С., Гордина А.Ф., Пудов И.А., Грахов В.П., Первущин Г.Н., Бурьянов А.Ф. Многофункциональные декоративно-отделочные силикатные композиции: монография / Под общ. ред. А.В. Шайбадуллиной. Ижевск: Управление информационных ресурсов ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2021. 136 с.
2. Шайбадуллина А.В., Яковлев Г.И., Первущин Г.Н., Полянских И.С., Огнев А.М., Алиев Э.В. Силикатное покрытие повышенной долговечности и способ его приготовления // Патент на изобретение RU 2669642 C2, 12.10.2018. Заявка № 2017115926 от 04.05.2017.
3. Яковлев Г.И., Шайбадуллина А.В., Полянских И.С., Гордина А.Ф., Пудов И.А., Грахов В.П., Первущин Г.Н., Бурьянов А.Ф., Ангелич З.С., Гинчицкая Ю.Н., Князева С.А. Многофункциональные декоративно-отделочные силикатные композиции / 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Издательство МИСИ-МГСУ, 2024. - 176 с.
4. Яковлев Г. И., Пудов И. А., Саидова З. С., Первущин Г. Н., Бурьянов А. Ф., Дулесова И. Г. Расширение функциональных свойств цементно-силикатной краски // Техника и технология силикатов. 2024. №. 2. С. 163-173. DOI: <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-163-173>
5. Яковлев Г. И., Полянских И. С., Пудов И. А., Саидова З. С., Бурьянов А. Ф. Фиброармированная однокомпонентная цементно- силикатная краска // Техника и технология силикатов. 2024. №. 1. С. 23-34. DOI: <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-23-34>
6. Leontev S.V. Development of structural-heat-insulating lightweight concrete composition using production of aerated concrete waste as a porous aggregate / S.V. Leontev, V.A. Kharitonov // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. 2124. 012009.
7. Bergmans J., Nielsen P., Broos K., Snellings R., Quaghebeur M. Recycling of autoclaved aerated concrete in screed and stabilized sand. The Fifth International Conference on Construction Materials (CONMAT): Whistler, BC, Canada. 2015..
8. Gyurkó Z., Jankus B., Fenyvesi O., Nemes R. Sustainable applications for utilization the construction waste of aerated concrete, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 230, 2019, P. 430-444. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.357> .
9. Белов И.А. Использование отходов автоклавного ячеистого бетона в технологии производства конструкционно-теплоизоляционных материалов и растворных смесей / И.А. Белов, Н.П. Богданова, Ж.Н. Власенко [и др.] // Строительные материалы. 2012. № 8. С. 22–26.
10. Laukaitis A.A. Investigation of the effect of the addition of ground waste cellular concrete on its properties. *Building materials*. 2004. Vol. 3, P. 33-34.
11. Горшков В.С, Савельев В.Г., Абакумов А.В. Вяжущие, керамика и стеклокристаллические материалы: Структура и свойства: Справ. пособие / М.: Стройиздат, 1994. – 584 с.
12. Гринфельд Г.И. Проблемы и перспективы автоклавного газобетона // Строительные материалы. 2020. № 1–2. С. 24–26.
13. Зайцева, А. А. Перспективные теплоизоляционные материалы на основе стеклобоя и жидкого стекла / А. А. Зайцева,

increased durability of the base silicate coating, on the basis of which the studied compositions were developed [19]. The paint and varnish coating is recommended for painting the surface of cement concrete and mortar, steel structures, and ceramic bases. The coating can be used at high temperatures (up to 500 °C) to insulate hot surfaces. Considering the increased alkalinity of the paint and varnish coating solution, there is a limitation on its use for painting products made of aluminum alloys.

References:

1. Yakovlev G.I., Shaibadullina A.V., Polyanskikh I.S., Gordina A.F., Pudov I.A., Grakhov V.P., Pervushin G.N., Buryanov A.F. Multifunctional decorative and finishing silicate compositions: monograph / Ed. ed. A.V. Shaibadullina. Izhevsk: *Information Resources Department of Izhevsk State Technical University named after. M.T. Kalashnikova*, 2021. 136 p.
2. Shaybadullina A.V., Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Polyanskikh I.S., Ognev A.M., Aliev E.V. Silicate coating with increased durability and the method of its preparation // Patent for invention RU 2669642 C2, 12.10.2018. Application No. 2017115926 dated 04.05.2017.
3. Yakovlev G.I., Shaibadullina A.V., Polyanskikh I.S., Gordina A.F., Pudov I.A., Grakhov V.P., Pervushin G.N., Buryanov A.F., Angelich Z.S., Ginchitskaya Yu.N., Knyazeva S.A. Multifunctional decorative and finishing silicate compositions / 2nd ed., revised. and additional - Moscow: Publishing house MISS-MGSU, 2024. - 176 p.
4. Yakovlev G.I., Pudov I.A., Saidova Z.S., Pervushin G.N., Buryanov A.F., Dulesova I.G. Expansion of functional properties of cement-silicate paint // *Technique and technology of silicates*. – 2024. Vol. – 31, No-2. – Pp. 163 – 173. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-163-173>
5. Yakovlev G.I. Fiber reinforced single-component cement-silicate paint / Yakovlev G.I., Polyanskikh I.S., Pudov I.A., Saidova Z.S., Buryanov A.F. // *Technique and technology of silicates*. – 2023. Vol. – 31, No1. – Pp. 23 – 34 DOI: <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-23-34>
6. Leontev S.V. Development of structural-heat-insulating lightweight concrete composition using production of aerated concrete waste as a porous aggregate / S.V. Leontev, V.A. Kharitonov // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. 2124. 012009.
7. Bergmans J., Nielsen P., Broos K., Snellings R., Quaghebeur M. Recycling of autoclaved aerated concrete in screed and stabilized sand. The Fifth International Conference on Construction Materials (CONMAT): Whistler, BC, Canada. 2015..
8. Gyurkó Z., Jankus B., Fenyvesi O., Nemes R. Sustainable applications for utilization the construction waste of aerated concrete, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 230, 2019, P. 430-444. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.357> .
9. Belov, I.A. Utilization of autoclaved aerated concrete waste in the production technology of structural and thermal insulation materials and mortar mixtures / I.A. Belov, N.P. Bogdanova, J.N. Vlasenko [et al.] // *Stroitel'nyye materialy*. 2012. № 8. С. 22-26.
10. Laukaitis A.A. Investigation of the effect of the addition of ground waste cellular concrete on its properties. *Stroitel'nyye materialy*. 2004. Vol. 3, P. 33-34.
11. Gorshkov V.S., Savelyev V.G., Abakumov A.V. Binders, ceramics and glass-crystalline materials: Structure and properties: Reference manual / M.: Stroyizdat, 1994. - 584 с.
12. Grinfeld, G.I. Problems and prospects of autoclaved aerated concrete // *Stroitel'nyye materialy*, 2020. № 1-2. С. 24-26.
13. Zaitseva, A. A. Prospective thermal insulation materials based on glass beads and liquid glass / A. A. Zaitseva, E. I.

Е. И. Зайцева, С. В. Самченко // Техника и технология силикатов. – 2021. – Т. 28, № 1. – С. 17-20. – EDN KFVCDK.

14. He X., Zheng Zh., Yang J., Su Y., Wang T., Strnadl B. Feasibility of incorporating autoclaved aerated concrete waste for cement replacement in sustainable building materials. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 250, 2020, 119455, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119455>.

15. Самченко, С. В. Формирование и генезис структуры цементного камня / С. В. Самченко. – 2-е издание. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – 288 с. – ISBN 978-5-7264-2808-6. – EDN KCBIBU.

16. Самченко, С. В. Особенности повторного использования цементных суспензий при реализации технологии рециклинга бетонных смесей / С. В. Самченко, Е. С. Егоров, М. А. Абрамов // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 12. – С. 1573-1581. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.12.1573-1581. – EDN MNTVKM.

17. Самченко, С. В. Модифицирование макро и микроструктуры композиционных материалов гидросиликатами кальция / С. В. Самченко, Е. М. Макаров // Техника и технология силикатов. – 2013. – Т. 20, № 4. – С. 20-24. – EDN RRVYLJ.

18. Ламбурн Р. Лакокрасочные материалы и покрытия. Теория и практика / Пер. с англ. Машляковский Л.Н., Фрост А.М. СПб.: Химия, 1991. 512 с.

19. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Саидова З.С., Гинчицкая Ю.Н., Кузьмина Н.В., Бурьянов А.Ф., Трофимова Д.А. Сухая смесь для приготовления фасадной силикатной краски. Строительные материалы. 2023. № 3. С. 12-19.

20. Вернигорова В.Н. Химия в строительстве: моногр. / В.Н. Вернигорова, К.Н. Махамбетова. – Пенза: ПГУАС, 2014. – Ч.3. – 131 с.

Zaitseva, S. V. Samchenko // *Technique and technology of silicates*. - 2021. - Т. 28, № 1. - С. 17-20. - EDN KFVCDK.

14. He X., Zheng Zh., Yang J., Su Y., Wang T., Strnadl B. Feasibility of incorporating autoclaved aerated concrete waste for cement replacement in sustainable building materials. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 250, 2020, 119455, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119455>.

15. Samchenko, S. V. Formation and genesis of the structure of cement stone / S. V. Samchenko. - 2nd edition. - Moscow: National Research Moscow State Construction University, 2020. - 288 c. - ISBN 978-5-7264-2808-6. - EDN KCBIBU.

16. Samchenko, S. V. Features of cement slurries reuse when realizing the recycling technology of concrete mixtures / S. V. Samchenko, E. S. Egorov, M. A. Abramov // *Vestnik MGSU*. - 2021. - Т. 16, № 12. - С. 1573-1581. - DOI 10.22227/1997-0935.2021.12.1573-1581. - EDN MNTVKM

17. Samchenko, S. V. Modification of macro and microstructure of composite materials by calcium hydrosilicates / S. V. Samchenko, E. M. Makarov // *Technique and technology of silicates*. - 2013. - Т. 20, № 4. - С. 20-24. - EDN RRVYLJ.

18. Lambourne R. Paint and coating materials and coatings. Theory and practice / Per. from Engl. Mashlyakovskiy L.N., Frost A.M. SPb.: Khimiya, 1991. 512 c.

19. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Saidova Z.S., Ginchitskaya Y.N., Kuzmina N.V., Burianov A.F., Trofimova D.A. Dry mix for preparation of facade silicate paint. *Stroitel'nyye materialy*. 2023. № 3. С. 12-19.

20. Vernigorova V.N. Chemistry in construction: monograph / V.N. Vernigorova, K.N. Makhambetova. - Penza: PSUAS, 2014. - Ch.3. - 131 p.

Яковлев Григорий Иванович – заведующий кафедрой СММиГ, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Email: gyakov@istu.ru

Ангелич Зарина Сироджиддиновна – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Email: pgs@istu.ru

Первушин Григорий Николаевич – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Email: pervushin61@yandex.ru

Бурьянов Александр Федорович – доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Email: rga-service@mail.ru

Пудов Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Email: pudovia@yandex.ru

Князева Светлана Анатольевна – аспирант, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Email: SvetikSm_Knyazeva@mail.ru

Лисин Владимир Алексеевич – аспирант, ст. преподаватель, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Email: Vladimirlisin2@gmail.ru

Сырбова Татьяна Алексеевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Email: tsyrbovf@list.ru

Вклад авторов написание статьи равнозначный.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Yakovlev Grigory Ivanovich - Head of Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Email: gyakov@istu.ru

Angelich Zarina Sirodzhiddinovna – Ass. Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Email: pgs@istu.ru

Pervushin Grigory Nikolayevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Email: pervushin61@yandex.ru

Buryanov Aleksandr Fedorovich - Doctor of Technical Sciences, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Email: rga-service@mail.ru

Pudov Igor Alexandrovich - Ass. Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Email: pudovia@yandex.ru

Knyazeva Svetlana Anatol'evna - postgraduate student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Email: SvetikSm_Knyazeva@mail.ru

Lisin Vladimir Alekseevich – postgraduate student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Email: Vladimirlisin2@gmail.ru

Syrbova Tatiana Alekseevna - master sdegreestudent, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Email: tsyrbovf@list.ru

The authors' contributions to the writing of the article are equivalent.

The authors declare that there is no conflict of interest.