

УДК 691.175

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.45

Научная специальность ВАК: 2.6.17 Материаловедение (технические науки)

EDN ZXVBUC

DOI 10.62980/2076-0655-2026-46-59

ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ КОМПОЗИТ: ФОРМИРОВАНИЕ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ

Липка П.А., Миронова К.А., Бруяко М.Г., Козлова И.В., Самченко С.В.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье рассмотрен органоминеральный теплоизоляционный композит на основе реакционно-способной смеси синтеза жесткого заливочного пенополиуретана, модифицированной силикатным компонентом – пентагидратом метасиликата натрия ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) двух фракций (0,9-1,25 мм и 0,1-0,315 мм) для снижения горючести и полимероемкости, и исследовано влияние последнего на формирование поровой структуры композита, посредством изучения процессов пено- и полимерообразования (зарождение и рост газовых «пузырьков», их равномерное распределение и стабилизация в полимерной матрице).

Материалы и методы. В качестве сырьевых компонентов для проведения исследований были выбраны следующие компоненты: изоцианатный компонент (ИК), изоцианат – жидкость, реакционноспособный олигомер, содержащий функциональные группы (-NCO), полиольный компонент (ПК), полиол - жидкость, реакционноспособный олигомер, содержащий гидроксильные функциональные группы (-OH), силикатный компонент (СК) - кристаллогидрат метасиликата натрия (метасиликат натрия 5-ти водный (пентагидрат) - $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Способ получения органоминерального теплоизоляционного композита заключается в свободном вспенивании компонентов реакционной смеси. Соотношение компонентов для всех составов реакционноспособной композиции получения жесткого заливочного пенополиуретана постоянное и составляет ИК:ПК = 1,8:1. В ее состав вводился силикатный компонент в количествах - 15, 30, 45, 60, 75, 90 % от содержания реакционноспособной композиции получения жесткого заливочного пенополиуретана.

Результаты исследования. Выявлено, что силикатный компонент ускоряет процессы пено- и полимерообразования, а изменение его дисперсности позволяет регулировать степень влияния на данные процессы, за счет изменения пространственной структуры диспергации по объему материала, и поверхностной площади контакта фаз «силикатный компонент - реакционноспособная смесь олигомеров», изоцианатные функциональные группы которой могут взаимодействовать с поверхностно адсорбированной и кристаллогидратной водой пентагидрата метасиликата натрия, выделяя при этом углекислый газ, и меняя направленность химических реакций, что напрямую влияет на морфологию ячеистой структуры, размер пор, толщину стенок пор. Модификация мелкодисперсной фракцией (0,1-0,315 мм) силикатного компонента приводит к «взрывному» характеру вспенивания, что в совокупности с ускорением процессов полимерообразования приводит к нарушенной структуре, склонной усадке. При насыщении до 90%, средний диаметр пор уменьшается с 343 мкм до 186 мкм (до 46%), а стенки ячеек становятся тоньше, с 21,3 мкм до 9,3 мкм (в среднем до 55%). Модификация крупной фракцией (0,9-1,25 мм) силикатного компонента оказывает более сбалансированное влияние на ускорение процессов пено- и полимерообразования, следствием чего является меньшее влияние на поровую структуру композита, что делает возможным насыщение композиций жесткого заливочного пенополиуретана силикатным компонентом до 90 %, необходимым для снижения его горючести.

Заключение. Силикатный компонент в реакционноспособной смеси ускоряет процессы пено- и полимерообразования, а его различная дисперсность позволяет регулировать степень влияния на данные процессы, за счет изменения пространственной структуры диспергации по объему материала, и поверхностной площади контакта фаз «силикатный компонент - реакционноспособная смесь олигомеров», изоцианатные функциональные группы которой могут взаимодействовать с химически связанной водой метасиликата натрия, выделяя при этом углекислый газ, и меняя направленность химических реакций как в периферийной зоне, так и в целом, что напрямую влияет на морфологию ячеистой структуры, размер пор, и диаметр стенок пор.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: силикатный компонент, метасиликат натрия, кристаллогидрат, дисперсность, поровая структура, вспенивание, жесткий пенополиуретан

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Липка П.А., Миронова К.А., Бруяко М.Г., Козлова И.В., Самченко С.В. Органоминеральный теплоизоляционный композит: формирование поровой структуры // Техника и технология силикатов. – 2026. – Т. 33, № 1. – С. 46-59. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-46-59> . EDN: ZXVBUC

Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

Поступила в редакцию: 26.01.2026 г

Одобрена к публикации: 24.02. 2026 г.

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

PM MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY

EDN ZXBUBC

DOI 10.62980/2076-0655-2026-46-59

ORGANIC-MINERAL THERMAL INSULATION COMPOSITE: FORMATION OF A POROUS STRUCTURE

Lipka P.A., Mironova K.A., Bruyako M.G., Kozlova I.V., Samchenko S.V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This article examines an organo-mineral thermal insulation composite based on a reactive mixture for the synthesis of rigid polyurethane foam, modified with a silicate component—sodium metasilicate pentahydrate ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) of two fractions (0.9–1.25 mm and 0.1–0.315 mm)—to reduce flammability and polymer capacity. The study investigates the effect of this additive on the formation of the composite's pore structure by analyzing the processes of foaming and polymer formation (nucleation and growth of gas bubbles, their uniform distribution, and stabilization within the polymer matrix).

Materials and methods. The following components were selected as raw materials for the studies:

Isocyanate component (IC), isocyanate – a liquid, reactive oligomer containing NCO functional groups. Polyol component (PC), polyol – a liquid, reactive oligomer containing hydroxyl functional groups (OH). Silicate component (SC) – crystalline hydrate of sodium metasilicate (sodium metasilicate pentahydrate)- $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). The method for producing the organo-mineral thermal insulation composite consists of free foaming of the components of the reaction mixture. The component ratio for all compositions of the reactive system for producing rigid polyurethane foam is constant and equals IC:PC = 1.8:1. The silicate component was introduced into the composition in amounts of 15, 30, 45, 60, 75, and 90% relative to the content of the reactive composition for producing rigid polyurethane foam.

Results. It was found that the silicate component accelerates foaming and polymer formation, and varying its dispersion allows the degree of this influence to be controlled by altering the spatial distribution of the additive throughout the material volume and the interfacial contact area between the silicate component and the reactive oligomer mixture. The isocyanate functional groups of the mixture can interact with the surface-adsorbed and crystal hydrate water of sodium metasilicate pentahydrate, releasing carbon dioxide and modifying the direction of chemical reactions. This directly affects the morphology of the cellular structure, pore size, and cell wall thickness. Modification with the fine fraction (0.1–0.315 mm) of the silicate component leads to an explosive foaming behavior, which, combined with accelerated polymer formation, results in a compromised structure prone to shrinkage. At a loading of up to 90%, the average pore diameter decreases from 343 μm to 186 μm (a 46% reduction), and the cell walls become thinner, decreasing from 21.3 μm to 9.3 μm (an average reduction of 55%). Modification with the coarse fraction (0.9–1.25 mm) of the silicate component exerts a more balanced effect on the acceleration of foaming and polymer formation. Consequently, the impact on the pore structure of the composite is less pronounced, making it possible to incorporate the silicate component into rigid polyurethane foam compositions at up to 90% loading—the amount required to effectively reduce its flammability.

Conclusions. The silicate component in the reactive mixture accelerates the processes of foaming and polymer formation, and its varying dispersion makes it possible to regulate the degree of influence on these processes by altering the spatial structure of dispersion throughout the material volume and the interfacial contact area between the silicate component and the reactive oligomer mixture. The isocyanate functional groups of the mixture can interact with the chemically bound water of sodium metasilicate, releasing carbon dioxide and changing the direction of chemical reactions both in the peripheral zone and overall, which directly affects the morphology of the cellular structure, pore size, and pore wall thickness.

KEY WORDS: silicate component, sodium metasilicate, crystalline hydrate, dispersion, pore structure, foaming, rigid polyurethane foam

FOR CITATION: Lipka P.A., Mironova K.A., Bruyako M.G., Kozlova I.V., Samchenko S.V. Organo-mineral thermal insulation composite: formation of pore structure // Engineering and Technology of Silicates. – 2026. – Vol. 33, No1 – P. 46-59. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-46-59> . EDN: ZXBUBC

The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”.
Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”

Received by the editors: January 26, 2026

Approved for publication: February 24, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей применения теплоизоляционных материалов является рациональное использование энергетических ресурсов за счет снижения тепловых потерь.

На протяжении последних десятилетий активно производится актуализация нормативно-технической документации, регламентирующей реализацию мер государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, которая носит межотраслевой и общесистемный характер [1–4].

Современная строительная отрасль характеризуется постоянным ростом требований к энергоэффективности зданий и сооружений.

Область применения строительных теплоизоляционных материалов зависит от их эксплуатационных свойств, которые во многом обеспечены природой происхождения материала [5].

Одними из наиболее эффективных и востребованных классов теплоизоляционных материалов, являются синтетические ячеистые пластмассы (пенопласты), обладающие низкой теплопроводностью и технологичностью, что способствует их активному внедрению в строительную индустрию для изоляции стен, кровель, магистральных трубопроводов.

Однако ключевым сдерживающим фактором широкого применения пенопластов в строительстве, остается их высокая горючесть, которая создает угрозу для жизни людей и приводит к значительному материальному ущербу.

В Российской Федерации с 2019 по 2022 было зафиксировано более 1 млн. 600 тыс. пожаров, где погибло более 33 тыс. людей, травмировано более 34 тыс. людей, общий прямой ущерб составил 74 млрд. руб., а ежегодный ущерб от пожаров и затрат на борьбу с ними составляет сумму примерно в размере 1 % валового национального продукта [6 – 7].

В условиях ужесточения требований пожарной безопасности, закрепленных в Федеральном законе РФ № 123-ФЗ, разработка строительных материалов, сочетающих высокие теплоизоляционные свойства с пониженной горючестью, является важной задачей.

Перспективным направлением в данной области, является создание органоминеральных композитов, за счет модификации полимерной матрицы пенопласта, неорганическими веществами, в том числе фосфорсодержащими [8–10], минеральными [11–13], а также органо-неорганическими гибридами [14–15].

Особый интерес вызывают работы, посвященные модификации пенополиуретана, пенопласта с закрыто ячеистой, мелкопористой структурой, обладающего высокоэффективной теплоизолирующей способностью, водными растворами щелочных металлов, в частности водными растворами силикатов натрия (жидкое стекло) [16–18].

Однако, хотя введение силикатов натрия в виде водного раствора способствует равномерному диспергированию последнего в реакционной смеси, это не позволяет в большом объеме его вводить, за счет реакционной способности воды с изоцианатным компонентом, что при избытке ведет к нарушению физико-химических процессов формирования поровой структуры композита, вызывает экстремальный характер вспенивания, нарушает процесс полимерообразования, и ведет к последующей усадке.

INTRODUCTION

The primary objective of using thermal insulation materials is the rational use of energy resources by reducing heat losses.

Over the past decades, regulatory and technical documentation governing the implementation of state policy measures in the field of energy saving and energy efficiency has been actively updated. This policy is cross-sectoral and systemic in nature [1–4].

The modern construction industry is characterized by constantly increasing requirements for the energy efficiency of buildings and structures.

The application area of building thermal insulation materials depends on their performance properties, which are largely determined by the nature of the material's origin [5].

Among the most effective and sought-after classes of thermal insulation materials are synthetic cellular plastics (foams), which have low thermal conductivity and are easy to process. This facilitates their widespread adoption in the construction industry for insulating walls, roofs, and main pipelines.

However, the key limiting factor for the widespread use of foams in construction remains their high flammability, which poses a threat to human life and leads to significant property damage.

In the Russian Federation, from 2019 to 2022, more than 1.6 million fires were recorded, in which over 33,000 people died and more than 34,000 were injured. The total direct damage amounted to 74 billion rubles, while the annual damage from fires and firefighting costs is approximately 1% of the gross national product [6–7].

Given the tightening of fire safety requirements established by Federal Law No. 123-FZ (in Russian), the development of building materials that combine high thermal insulation properties with reduced flammability is an important task.

A promising direction in this area is the creation of organo-mineral composites by modifying the polymer matrix of the foam with inorganic substances, including phosphorus-containing [8–10], mineral [11–13], and organo-inorganic hybrid materials [14–15].

Of particular interest are studies devoted to the modification of polyurethane foam—a foam with a closed-cell, fine-pored structure that possesses highly efficient thermal insulation capability—with aqueous solutions of alkali metals, in particular aqueous solutions of sodium silicates (liquid glass) [16–18].

However, although introducing sodium silicates in the form of an aqueous solution facilitates their uniform dispersion in the reaction mixture, this approach does not allow their introduction in large volumes due to the reactivity of water with the isocyanate component. An excess of water disrupts the physicochemical processes involved in forming the composite's pore structure, causes extreme foaming, interferes with polymer formation, and leads to subsequent shrinkage.

A solution to this problem may be the use of crystalline hydrate forms of sodium metasilicates. Owing to the lower content of bound water and the small amount of water adsorbed on the surface, it becomes possible to introduce the

Решением данной проблемы, может быть переход к кристаллогидратным видам метасиликатов натрия, где за счет меньшего содержания воды, находящейся в связанном виде и незначительного количества адсорбированной на поверхности, появляется возможность вводить минеральное вещество в систему синтеза пенополиуретана в значительных объемах, что позволит существенно снизить горючесть, и полимероёмкость композитов.

В связи с чем определена **цель исследования**, которая заключается в исследовании влияния пентагидрата метасиликата натрия ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) различной дисперсности на физико-химические процессы формирования поровой структуры заливочного жесткого пенополиуретана.

Материалы и методы исследования

В качестве сырьевых компонентов для проведения исследований были выбраны следующие компоненты:

Изоцианатный компонент (ИК), изоцианат – жидкость, реакционноспособный олигомер, содержащий функциональные группы (-NCO). В качестве ИК использовался полиизоцианат марки «Wannate PM-200» компании Wanhua (Китай), который представляет собой смесь дифенилметан-4, 4'-диизоцианата (MDI) с изомерами и гомологами. Его молекулярная масса варьируется в диапазоне от 350 до 400 а.е.м., содержанием NCO-групп - в диапазоне от 30,5 до 32 %, плотность – 1240 кг/м³. (номер CAS — 9016-87-9);

Полиольный компонент (ПК), полиол - жидкость, реакционноспособный олигомер, содержащий гидроксильные функциональные группы (-OH). Использовался полиэфир марки «Изолан А-359» (ТУ 20.16.40-920-97445105-18), плотность – 1100 кг/м³, время старта - 35-65 с., время гелеобразования 150-300 с., плотность свободного вспенивания 33-50 кг/м³.

Силикатный компонент (СК) - кристаллогидрат метасиликата натрия (метасиликат натрия 5-ти водный (пентагидрат) - $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), массовая доля SiO_2 в пределах 27-29%, массовая доля Na_2O в пределах 28-30%, массовая доля железа (Fe_2O_3) %, не более 0,01, ХЧ (номер CAS — 10213-79-3), (ТУ 2145-001-52257004-2002). Дисперсность и способ измельчения $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ представлены в таблице 1.

Способ получения органоминерального теплоизоляционного композита заключается в свободном вспенивании компонентов реакционной смеси. Соотношение компонентов для всех составов реакционноспособной

минеральной субстанции в систему синтеза пенополиуретана в значительных объемах, тем самым существенно снижая горючесть и полимероёмкость композитов.

The purpose of the study: to investigate the effect of sodium metasilicate pentahydrate ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) with varying dispersion on the physicochemical processes involved in the formation of the pore structure of rigid polyurethane foam.

Materials and methods of research

The following components were selected as raw materials for the studies:

Isocyanate component (IC), isocyanate – a liquid, reactive oligomer containing NCO functional groups. The polyisocyanate of the brand "Wannate PM-200" from Wanhua (China) was used as the IC. It is a mixture of diphenylmethane-4,4'-diisocyanate (MDI) with isomers and homologues. Its molecular weight ranges from 350 to 400 amu, the NCO group content ranges from 30.5 to 32%, and the density is 1240 kg/m³ (CAS No. 9016-87-9);

Polyol component (PC), polyol – a liquid, reactive oligomer containing hydroxyl functional groups (OH). The polyester of the brand "Izolan A-359" was used (ТУ 20.16.40-920-97445105-18) (in Russian), density – 1100 kg/m³, start time – 35–65 s, gelation time – 150–300 s, free foaming density – 33–50 kg/m³;

Silicate component (SC) – crystalline hydrate of sodium metasilicate (sodium metasilicate pentahydrate) ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), SiO_2 content within 27-29%, Na_2O content within 28-30%, iron (Fe_2O_3) content no more than 0.01%, chemically pure (CAS number 10213-79-3), (ТУ 2145-001-52257004-2002) (in Russian). The dispersion and grinding method of $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ are presented in Table 1.

The method for producing the organo-mineral thermal insulation composite consists of free foaming of the components of the reaction mixture. The component ratio for all compositions of the reactive system for producing rigid polyurethane foam is constant and equals IC:PC = 1.8:1.

ТАБЛИЦА 1. СВОЙСТВА $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Table 1. PROPERTIES $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

№ состава Composition number	Состав, масс. % Composition, mass %	Внешний вид Appearance	Фракция, мм Fraction, mm	Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	Способ измельчения Method of grinding
	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$				
1	100	Гранулы Granules	0,9-1,25	2400	Фракция заводской готовности Factory readiness fraction
2			0,1-0,315		Механически измельченная Mechanically crushed

композиции получения жесткого заливочного пенополиуретана постоянное и составляет ИК:ПК = 1,8:1. В ее состав вводился силикатный компонент в количествах - 15, 30, 45, 60, 75, 90 % от содержания реакционноспособной

The silicate component was introduced into the composition in amounts of 15, 30, 45, 60, 75, and 90% relative to the content of the reactive composition for producing rigid polyurethane foam.

композиции получения жесткого заливочного пенополиуретана.

Различные концентрации силикатного компонента совместно с реакционноспособной композицией перемешивались в течение 30 с, с частотой вращения 1500 об/мин, далее смесь подавалась в заливочную форму и твердела в течение 24 ч при температуре $22 \pm 3^\circ\text{C}$.

Технологические параметры определялись в соответствии с ГОСТ Р 59561-2021 (Изделия теплоизоляционные из пенополиуретана (ППУ) и пенополиизоцианурата (ПИР) для строительства, напыляемые на месте производства работ. Жесткие пенополиуретановые и пенополиизоциануратные системы перед применением. Технические условия).

Определения характера ячеистой структуры образцов проводилось методом оптической микроскопии.

Эксперименты и обсуждение результатов

Были проведены исследования влияния модификации заливочного жесткого пенополиуретана кристаллогидрата метасиликата натрия на процессы формирования поровой структуры композита. Они показали, что структурообразование данных композитов характеризуется конкурентными, взаимосвязанными процессами пено- и полимерообразования, зарождением и ростом газовых «пузырьков», их равномерным распределением и стабилизацией в полимерной матрице, которая поэтапно из жидкой системы, с нарастанием вязкости превращается в гель, в результате реакций поликонденсации формируется прочная, сшитая полимерная структура.

Управление данными процессами через состав системы (катализаторы, порообразователи, добавки-антипирены), позволяет регулировать направленность химических реакций, а следовательно, варьировать химическое строение конечных продуктов взаимодействия реакционноспособной смеси и морфологию получаемого материала (размер пор, их форма и замкнутость ячеек), которые, в свою очередь, определяют комплекс свойств конечного материала.

Таким образом, контроль данных процессов позволяет прогнозировать поведение системы, и проектировать композиты с заданными эксплуатационными характеристиками.

В общем случае химические реакции смеси протекают по двум основным взаимосвязанным направлениям реакций изоцианатсодержащих групп с водой (H_2O) и гидроксильными группами ($-\text{OH}$), которые запускают экзотермический процесс синтеза жесткого пенополиуретана, сопровождающегося дальнейшими ступенчатыми реакциями.

При этом взаимодействие с водой обеспечивает пенообразование за счет реакции (1-2) с выделением CO_2 , с последующим образованием полимочевины по реакции (3), которая отвечает за формирование полимерных стенок ячеек и придает им жесткость и хрупкость.

Взаимодействие с гидроксильными функциональными группами ($-\text{OH}$) полиолов обеспечивает уретанообразование по реакции (4), которое отвечает за формирование полимерных стенок ячеек и придает им эластичность и ударную вязкость.

Different concentrations of the silicate component were mixed together with the reactive composition for 30 s at a rotation speed of 1500 rpm; the mixture was then poured into a mold and cured for 24 h at a temperature of $22 \pm 3^\circ\text{C}$.

The technological parameters were determined in accordance with GOST R 59561-2021 (Thermal insulation products made of polyurethane foam (PUF) and polyisocyanurate foam (PIR) for construction, sprayed on-site. Rigid polyurethane and polyisocyanurate foam systems before use. Specifications) (in Russian).

The cellular structure of the samples was characterized using optical microscopy.

Experiments and discussion

Studies were conducted on the effect of modifying rigid polyurethane foam with sodium metasilicate crystalline hydrates on the processes of forming the pore structure of the composite. The results showed that the structure formation of these composites is characterized by competitive, interrelated processes of foaming and polymer formation, nucleation and growth of gas “bubbles,” their uniform distribution and stabilization in the polymer matrix, which gradually transforms from a liquid system with increasing viscosity into a gel, as a result of polycondensation reactions, a strong, cross-linked polymer structure is formed.

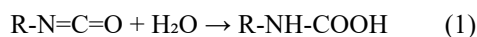
Controlling these processes through the composition of the system (catalysts, blowing agents, flame-retardant additives) allows the direction of chemical reactions to be regulated, and consequently, the chemical structure of the final products of the reaction mixture and the morphology of the resulting material (pore size, shape, and cell closure) to be varied, which in turn determine the set of properties of the final material.

Thus, monitoring these processes makes it possible to predict the behavior of the system and design composites with specified performance characteristics.

In general, the chemical reactions of the mixture proceed along two main interrelated pathways: reactions of isocyanate-containing groups with water (H_2O) and with hydroxyl groups ($-\text{OH}$), which initiate the exothermic synthesis of rigid polyurethane foam, accompanied by further stepwise reactions.

Interaction with water ensures foaming via reactions (1–2) with the release of CO_2 , followed by the formation of polyurea according to reaction (3), which is responsible for the formation of polymer cell walls and imparts rigidity and brittleness.

Interaction with the hydroxyl functional groups ($-\text{OH}$) of polyols ensures urethane formation according to reaction (4), which is responsible for the formation of polymer cell walls and imparts elasticity and impact strength.





При этом возможная реакция между кристаллогидратной и адсорбированной на поверхности водой пентагидрата метасиликата натрия с изоцианатом, а также его каталитическая активность на систему в целом, будет идти по топохимическому механизму, и зависеть от поверхностной площади контакта фаз, которая будет возрастать с увеличением дисперсности добавки.

С целью выявления закономерностей формирования поровой структуры композитов, модифицированных кристаллогидратами метасиликатов натрия различной дисперсности, определяли влияние последних на изменение направленности процессов пено- и полимерообразования, «маркерами» которых служат в том числе технологические параметры (кратность вспенивания, время старта, время гелеобразования, время окончания вспенивания, время отлипа), а следствием морфология ячеистой структуры (средний диаметр ячеек, средняя толщина стенок). Составы образцов и результаты испытаний приведены в таблице 2.

In this case, the potential reaction between the crystalline hydrate and surface-adsorbed water of sodium metasilicate pentahydrate with the isocyanate, as well as its catalytic activity on the system as a whole, will proceed via a topochemical mechanism and will depend on the phase contact surface area, which increases with the dispersion of the additive.

In order to identify the patterns of pore structure formation in composites modified with sodium metasilicate crystalline hydrates of varying dispersion, the effect of the latter on the change in the direction of foaming and polymer formation processes was determined. The “markers” of these processes include technological parameters (expansion ratio, start time, gelation time, foaming end time, tack-free time), and the consequence is the morphology of the cellular structure (average cell diameter, average cell wall thickness). The compositions of the samples and the test results are presented in Table 2.

ТАБЛИЦА 2. СВОЙСТВА ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ
Table 2. Properties of organic-mineral thermal insulation composites

Состав, № Composition, №	ПК:ИК, м.ч. РС:ИС, parts by mass	СК, % SC, %		Время старта, с Start time, s	Время гелеоб- разова- ния, с Gelation time, s	Время оконча- ния вспени- вания, с Foaming end time, s	Время до исчезно- вания отлипа, с Tack-free time, s	Средний диаметр пор, мкм Average pore diameter, µm	Средняя толщина стенки ячейки, мкм Average cell wall thick- ness, µm
		фракция, мм (0,9-1,25) fraction, mm (0.9-1.25)	фракция, мм (0,1-0,315), fraction, mm (0.1-0.315)						
0	1:1,8	-	-	74	256	304	452	343	21,3
1.1	1:1,8	15	-	63	221	344	401	345	27,7
1.2		30	-	59	212	406	480	389	23,8
1.3		45	-	54	200	390	452	372	21,1
1.4		60	-	41	197	301	371	362	17,2
1.5		75	-	40	187	281	379	391	17,7
1.6		90	-	40	162	292	292	375	403
2.1	1:1,8	-	15	70	128	182	254	372	17,2
2.2		-	30	66	91	123	143	351	13
2.3		-	45	51	79	96	106	336	9,6
2.4		-	60	48	74	99	136	271	8,8
2.5		-	75	45	70	99	146	206	9,7
2.6		-	90	39	69	69	100	146	186

Из результатов проведенных испытаний по определению времени начала вспенивания, видно, что время старта модифицированных образцов ниже, чем у контрольного образца, и плавно снижается в зависимости от концентрации силикатного компонента с 63 до 40 с (от 15 до 46 %) для фракции 0,9-1,25 мм и с 70 до 39 с (от 5 до 47 %) для фракции 0,1-0,315 мм за счет его адсорбированной воды и каталитической активности. Плавный характер снижения начала времени вспенивания обусловлен протеканием процесса дегидратации кристаллогидратной части силикатного компонента, который сопровождается высвобождением кристаллогидратной воды. При этом его интенсивность возрастает при повышении температуры смеси.

Из результатов определения времени гелеобразования, которое с точки зрения кинетики химического взаимодействия отражает скорость реакции изоцианата с полиолом

From the results of the tests to determine the foaming start time, it can be seen that the start time of the modified samples is lower than that of the control sample and gradually decreases depending on the concentration of the silicate component from 63 to 40 s (from 15 to 46%) for the 0.9–1.25 mm fraction and from 70 to 39 s (from 5 to 47%) for the 0.1–0.315 mm fraction, due to its adsorbed water and catalytic activity. The gradual nature of the decrease in foaming start time is due to the dehydration process of the crystalline hydrate part of the silicate component, which is accompanied by the release of crystalline hydrate water. Its intensity increases with increasing temperature of the mixture.

From the results of determining the gelation time, which from the viewpoint of chemical interaction kinetics reflects the rate of the reaction between isocyanate and

(реакция полимерообразования), видно, что крупная фракция демонстрирует плавное снижение от 221 с до 162 с (от 14 до 37 %), в то время как мелкодисперсная фракция значительно ускоряет процесс гелеобразования от 128 с до 69 с (от 50 до 73%).

Из результатов определения времени окончания вспенивания, характеризующим достижение равновесного состояния между газовым давлением внутри ячеек с прочностью полимерных стенок и внешним давлением, видно, что для крупной фракции при насыщении композиции до 45% силикатным компонентом (образцы 1.1.-1.3.) происходит увеличение времени от 344 с (на 13%) до 406 с (на 34%), а с последующем нарастанием его концентрации (образцы 1.4.-1.6.) – снижение до 281 с (на 8%), данный эффект может быть связан с постепенным увеличением вязкости реакционноспособной смеси компонентов.

Для мелкодисперсной фракции зависимость изменения параметра согласуется с предыдущими значениями, отмечается ускорение процесса завершения вспенивания относительно контрольного состава от 182 с (на 40%) до 96 с (на 68%).

Время отлипа, которое характеризует завершение основных реакций поликонденсации поверхностного слоя полимера, показывает, что для крупной фракции происходит сначала ускорение процесса на 11 % (образец 1.1), потом наблюдается замедление на 6% у образца 1.2. и ускорение в среднем на 17% (образцы 1.4-1.6); для мелкодисперсной фракции ускорение от 254 с (на 44%) для образца 2.1 до 106 с (на 77%) для образца 2.3. Скачкообразный характер завершения процесса связан также с изменением вязкости реакционноспособной смеси.

Время между началом вспенивания и гелеобразованием в образцах 1.1-1.6 составляет 120-150 с, что позволяет получить равномерную поровую структуру органо-минерального композита (рис. 1 а, б). Отмечается, что у образца 1.1. при среднем диаметре пор, сопоставимым с контрольным образцом, средняя толщина ячейки составила 27,7 мкм и увеличилась на 30 %. При введении силикатного компонента крупной фракции от 30 до 90% наблюдается увеличение среднего диаметра пор с 5 до 17%, а толщина стенки уменьшается до 17,2 мкм (на 19%), что не оказывает отрицательного действия на поровую структуру органо-минерального композита (рис. 1б). Таким образом, можно сделать вывод, что все составы композита, содержащего крупную фракцию, можно рассматривать в дальнейших исследованиях.

Так как у образцов 2.2-2.6 время между началом старта и гелеобразования в среднем составляет 25-30 с, то «гель» образуется «слишком быстро», и «запирает» газ в ячейках, предотвращая коалесценцию (слияние) пузырьков, что в совокупности с взрывным характером вспенивания становится причиной дальнейшего стремительного увеличения в объеме замкнутых ячеек и сама структура при этом нестабильная, образующая большое количество мелких пор (рис. 1г). В связи с чем, средний диаметр пор уменьшается в образцах 2.3 – 2.6 от 336 мкм до 186 мкм (с 2 до 46%), а стенки ячеек становятся тоньше и составляют в среднем 9,5 мкм (на 55% ниже по сравнению с контрольным образцом), что вызывает недостаточную структурную прочность, и может привести к возможной усадке композита.

polyol (polymer formation reaction), it can be seen that the coarse fraction demonstrates a gradual decrease from 221 to 162 s (from 14 to 37%), while the fine fraction significantly accelerates the gelation process, from 128 to 69 s (from 50 to 73%).

From the results of determining the foaming end time, which characterizes the achievement of equilibrium between the gas pressure inside the cells, the strength of the polymer walls, and the external pressure, it can be seen that for the coarse fraction, when the composition is saturated with the silicate component up to 45% (samples 1.1–1.3), the time increases from 344 s (by 13%) to 406 s (by 34%), and with a subsequent increase in its concentration (samples 1.4–1.6), it decreases to 281 s (by 8%). This effect may be associated with a gradual increase in the viscosity of the reactive mixture of components.

For the fine fraction, the dependence of the parameter change is consistent with the previous values; an acceleration of the foaming completion process relative to the control composition is observed, from 182 s (by 40%) to 96 s (by 68%).

The tack-free time, which characterizes the completion of the main polycondensation reactions of the polymer surface layer, shows that for the coarse fraction, the process initially accelerates by 11% (sample 1.1), then a slowdown of 6% is observed for sample 1.2, followed by an acceleration averaging 17% (samples 1.4–1.6). For the fine fraction, acceleration occurs from 254 s (by 44%) for sample 2.1 to 106 s (by 77%) for sample 2.3. The abrupt nature of the process completion is also associated with a change in the viscosity of the reactive mixture.

The time between the start of foaming and gelation in samples 1.1–1.6 is 120–150 s, which allows a uniform pore structure of the organo-mineral composite to be obtained (Fig. 1, a, b). It is noted that for sample 1.1, with an average pore diameter comparable to that of the control sample, the average cell wall thickness was 27.7 μm , an increase of 30%. When the silicate component of the coarse fraction is introduced in amounts from 30 to 90%, an increase in the average pore diameter of 5 to 17% is observed, while the wall thickness decreases to 17.2 μm (by 19%), which does not adversely affect the pore structure of the organo-mineral composite (Fig. 1, b). Thus, it can be concluded that all compositions of the composite containing the coarse fraction can be considered for further studies.

Since for samples 2.2–2.6 the time between the start and gelation averages 25–30 s, the “gel” forms “too quickly” and “locks” the gas in the cells, preventing bubble coalescence (merging). Together with the explosive nature of foaming, this causes a rapid increase in the volume of closed cells, and the structure itself becomes unstable, forming a large number of small pores (Fig. 1, d). Consequently, the average pore diameter decreases in samples 2.3–2.6 from 336 μm to 186 μm (from 2 to 46%), and the cell walls become thinner, averaging 9.5 μm (55% lower compared to the control sample), which results in insufficient structural strength and may lead to possible shrinkage of the composite.

РИСУНОК 1

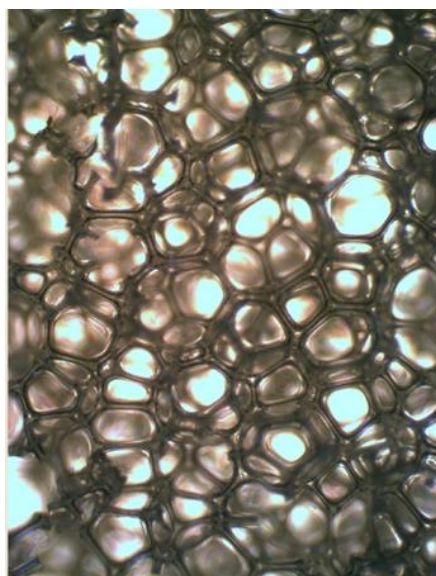
МИКРОФОТОГРАФИИ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ
ОБРАЗЦОВ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО
КОМПОЗИТА (увеличение 40х):

- а) образец 1.1 (15% СК);
- б) образец 1.5 (75% СК);
- в) образец 2.1 (15% СК);
- г) образец 2.5 (75% СК)

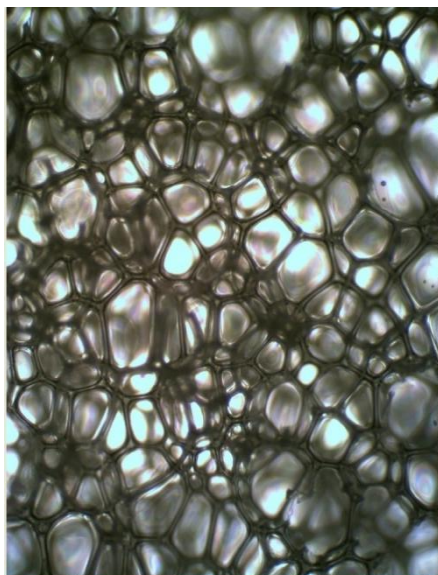
Figure 1

Micrographs of the pore structure of organo-mineral
composite samples (magnification 40x):

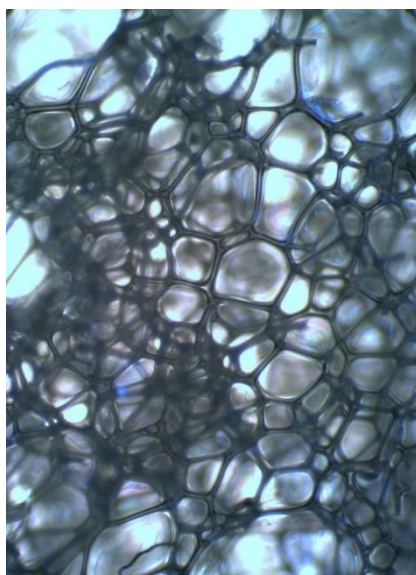
- a) sample 1.1 (15% SC);
- b) sample 1.5 (75% SC);
- c) sample 2.1 (15% SC);
- d) sample 2.5 (75% SC)



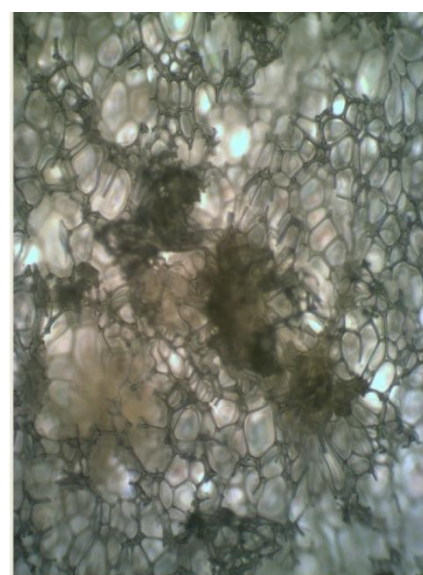
a (a)



б (b)



в(с)



г(d)

В образцах 2.1-2.2 наблюдается увеличение среднего диаметра пор по сравнению с контрольным образцом на 8% (372 мкм) и 2% (351 мкм), соответственно. Толщина стенок этих образцов составила 17,2 мкм (ниже на 19%) и 13 мкм (ниже на 39 %), соответственно. На рис. 1.в показана поровая структура образца 2.1., которая имеет также относительно равномерную поровую структуру, что позволяет рассматривать данный состав органо-минерального композита с 15 % силикатного компонента мелкой фракции для дальнейших исследований.

На рис. 2 и 3 приведены зависимости изменения кратности вспениваемой массы компонентов реакционноспособной смеси, модифицированных силикатным компонентом разной дисперсности, от времени вспенивания. Анализ результатов показал, что в образцах с содержанием силикатного компонента крупной фракции 15% (рис. 2.а), образец 1.1.) кратность вспениваемой массы реакционноспособной смеси возрастает на 54 % с 25 до 38. В остальных составах, содержащих большие количества крупной фракции кристаллогидрата метасиликата натрия, наблюдается

In samples 2.1–2.2, an increase in the average pore diameter compared to the control sample is observed: 8% (372 μm) and 2% (351 μm), respectively. The wall thickness of these samples was 17.2 μm (19% lower) and 13 μm (39% lower), respectively. Fig. 1.c, shows the pore structure of sample 2.1, which also has a relatively uniform pore structure, allowing this composition of the organo-mineral composite with 15% of the fine-fraction silicate component to be considered for further research.

Figures 2 and 3 show the dependence of the expansion ratio of the reactive mixture components, modified with silicate components of different dispersities, on foaming time. Analysis of the results showed that in samples containing 15% of the coarse-fraction silicate component (Fig. 2.a, sample 1.1), the expansion ratio of the reactive mixture increases by 54%, from 25 to 38. In other compositions containing larger amounts of the coarse-fraction sodium metasilicate crystalline hydrate, a gradual decrease in foam expansion ratio is observed. With a silicate component content of 30–60%, the expansion ratio

РИСУНОК 2

Зависимость изменения кратности вспениваемой массы образцов с крупной фракцией силикатного компонента от времени вспенивания: а) 15% СК; б) 30 % СК; в) 45% СК; г) 60% СК; д) 75% СК; е) 90% СК

Figure 2

Dependence of the expansion ratio of samples with the coarse fraction of the silicate component on foaming time: а) 15% SC; б) 30% SC; в) 45% SC; д) 60% SC; е) 75% SC; ф) 90% SC.

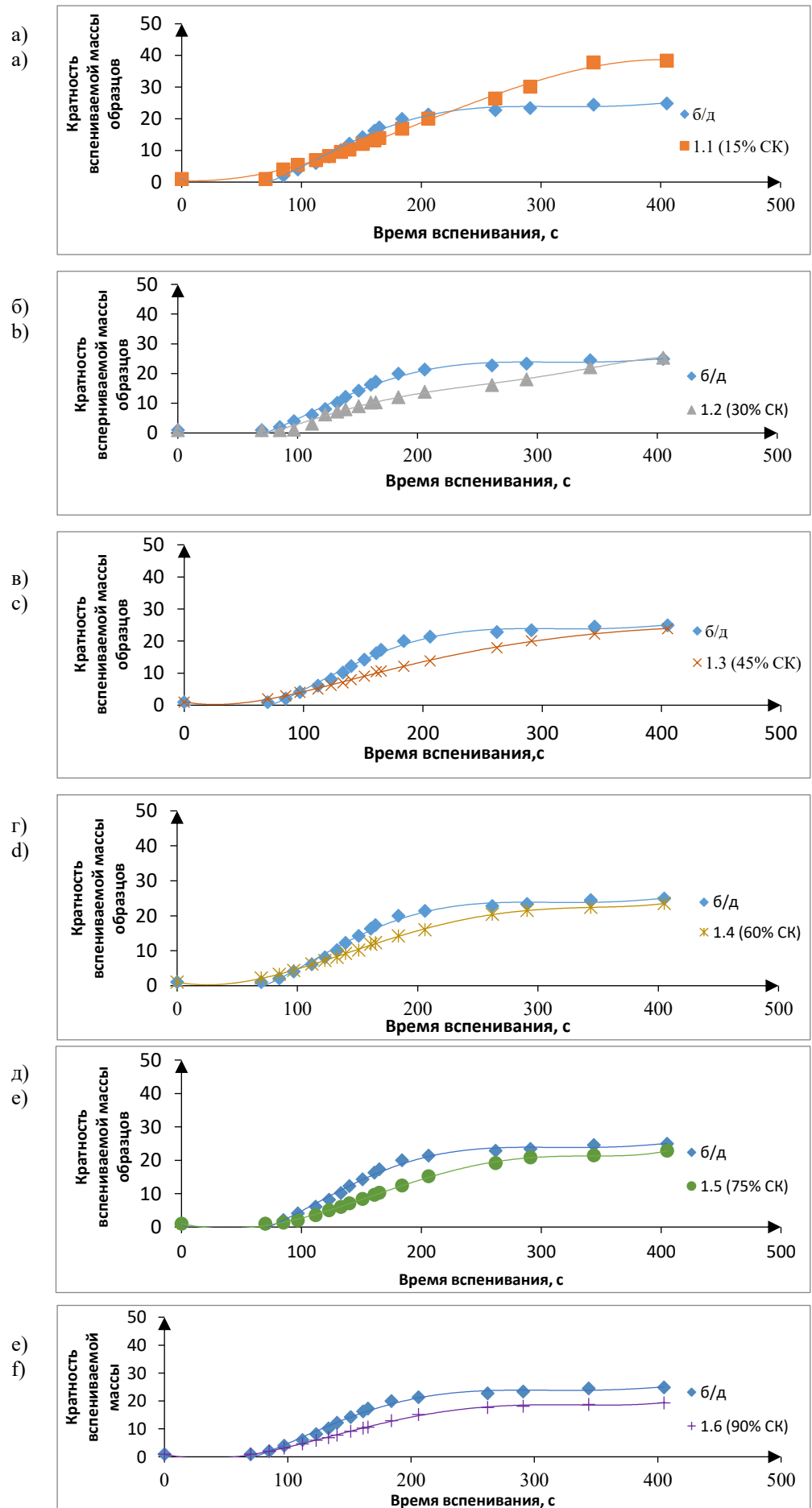
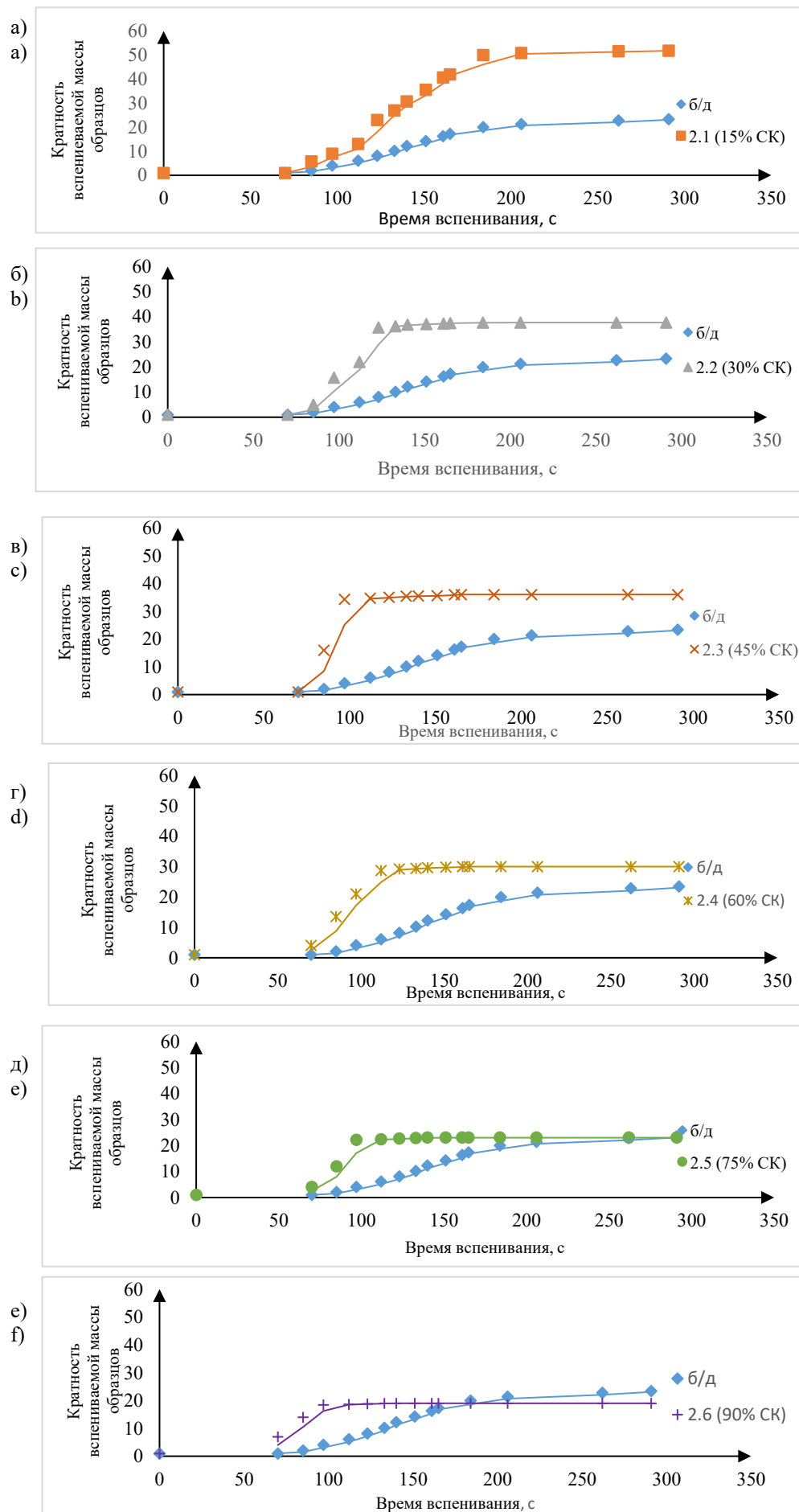


РИСУНОК 3

Зависимость изменения кратности вспениваемой массы образцов с мелкой фракцией силикатного компонента от времени вспенивания: а) 15% СК; б) 30 % СК; в) 45% СК; г) 60% СК; д) 75% СК; е) 90% СК

Figure 3

Dependence of the expansion ratio of samples with the fine fraction of the silicate component on foaming time: а) 15% SC; б) 30% SC; в) 45% SC; г) 60% SC; д) 75% SC; е) 90% SC.



постепенное снижение кратности пены. С содержанием 30-60% силикатного компонента кратность пены остается на уровне контрольного образца, с концентрацией 75-90% - снижается от 8 до 22%.

Анализ результатов образцов, содержащих силикатный компонент мелкодисперсной фракции, показал значительное увеличение кратности вспениваемой массы: в 2,2 раза для образца 2.1. (15% СК), на 50 % для образцов 2.2-2.4 (30-60% СК), с 75% СК (образец 2.5) кратность пены сопоставима с контрольным образцом, а 90% СК (образец 2.6) показали постепенное затухание пенообразования на 20%. Однако во всех образцах с метасиликатом натрия мелкой дисперсности отмечается всплеск пенообразования на начальном этапе. У образцов с большим содержанием силикатного компонента (образцы 2.5-2.6) он длится до 180 с.

На рис. 4 приведена микрофотография поровой структуры органо-минерального композита с 45 % силикатного компонента мелкодисперсной фракции (образец 2.3). Она показывает, что поры, окружающие силикатный компонент и соприкасающихся с ним, имеют эллипсоидную форму, а направление длинной оси перпендикулярно его поверхности. Хотя обычно газовые «пузырьки» благодаря силам поверхностного натяжения стремятся максимально сократить площадь поверхности раздела «газ-полимер», образуют сферическую форму, поэтапно расширяясь – сближаются, и формируют многогранники.

РИСУНОК 4

МИКРОФОТОГРАФИЯ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОГО КОМПОЗИТА, СОДЕРЖАЩЕГО 45 % СИЛИКАТНОГО КОМПОНЕНТА МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ФРАКЦИИ (образец 2.3) (увеличение 100х)

Figure 4

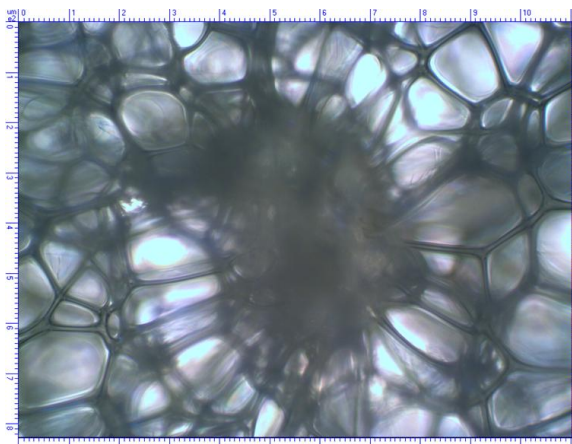
Micrograph of the pore structure of the organo-mineral composite containing 45% of the fine-fraction silicate component (sample 2.3) (magnification 100x)

remains at the level of the control sample; with a concentration of 75–90%, it decreases by 8 to 22%.

Analysis of the results for samples containing the fine-fraction silicate component showed a significant increase in the expansion ratio: 2.2 times for sample 2.1 (15% SC), 50% for samples 2.2–2.4 (30–60% SC); with 75% SC (sample 2.5), the expansion ratio is comparable to that of the control sample, while 90% SC (sample 2.6) showed a gradual damping of foaming by 20%. However, in all samples with fine-fraction sodium metasilicate, a burst of foaming is observed at the initial stage. In samples with a high content of the silicate component (samples 2.5–2.6), it lasts up to 180 s.

Figure 4 shows a micrograph of the pore structure of the organo-mineral composite with 45% fine-fraction silicate component (sample 2.3). It shows that the pores surrounding and in contact with the silicate component have an ellipsoidal shape, and the direction of the long axis is perpendicular to its surface. Although gas “bubbles” typically tend, due to surface tension forces, to minimize the surface area of the “gas–polymer” interface, forming a spherical shape, gradually expanding, converging, and forming polyhedrons, in this case, interaction of surface-adsorbed moisture or crystalline hydrate water of the silicate component is possible, creating a stretching vector of the polymer framework perpendicular to its surface.

Thus, the conducted studies confirmed the explosive nature of foaming of this reactive mixture.



В данном случае возможно взаимодействие поверхностно-адсорбированной влаги или кристаллогидратной воды силикатного компонента, что создает вектор растяжения полимерного каркаса перпендикулярно его поверхности.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили взрывной характер вспенивая данной реакционноспособной смеси.

Также можно отметить, что чем большее количество силикатного компонента как крупной, так и мелкой дисперсности вводится в реакционноспособную смесь, тем сильнее происходит последующее затухание пенообразования. Графики на рис. 2 для составов с крупной фракцией относительно контрольного образца более пологие без явных перегибов с плавно затухающим подъемом, в то же время для мелкодисперсной фракции – графики на рис. 3 относительно контрольного имеют крутой подъем, что отображает взрывной характер вспенивания. При этом насыщение силикатным компонентом более 15 % приводит к снижению

It can also be noted that the larger the amount of the silicate component, whether coarse or fine, introduced into the reactive mixture, the stronger the subsequent damping of foaming.

The graphs in Fig. 2 for the compositions with the coarse fraction relative to the control sample are flatter, without obvious inflections, with a smoothly decaying rise, while for the fine fraction, the graphs in Fig. 3 relative to the control sample show a steep rise, which reflects the explosive nature of foaming. At the same time, saturation with the silicate component above 15% leads to a decrease in the expansion ratio, which may be caused by a negative effect on the increase in viscosity of the reactive mixture as a whole. From the perspective of its influence on structure formation, this leads to an increase in the pressure exerted on the nucleating gas “bubbles,” as well as a decrease in the maximum temperature inside the system itself, and proportionally

кратности, что может быть вызвано негативным влиянием на увеличение вязкости реакционноспособной смеси в целом. Это с точки зрения влияния на структурообразование, приводит к увеличению оказываемого давления на зародышеобразующие «пузырьки» газа, а также снижение максимальной температуры внутри самой системы и пропорционально снижает давление газа внутри ячеек, тем самым, увеличивая конечную толщину полимерных стенок образованных ячеек, что влечёт к возрастанию плотности и прочности композита.

Из анализа совокупности результатов испытаний для композитов, модифицированных крупной фракцией силикатного компонента можно сделать вывод, что его влияние на ускорение процессов пенообразования, полимеробразования в совокупности с влиянием на вязкость системы и эндотермический эффект более сбалансированное в сравнении с мелкодисперсной фракцией, следствием чего является меньшее влияние на ячеистую структуру композита, что позволяет прогнозировать положительный эффект от его применения для исследования дальнейших свойств органоминерального композита.

Заключение

Силикатный компонент в реакционноспособной смеси ускоряет процессы пено- и полимеробразования, а его различная дисперсность позволяет регулировать степень влияния на данные процессы, за счет изменения пространственной структуры диспергации по объему материала, и поверхностной площади контакта фаз «силикатный компонент - реакционноспособная смесь олигомеров», изоцианатные функциональные группы которой могут взаимодействовать с химически связанной водой метасиликата натрия, выделяя при этом углекислый газ, и меняя направленность химических реакций как в периферийной зоне, так и в целом, что напрямую влияет на морфологию ячеистой структуры, размер пор, и диаметр стенок пор. При этом модификация крупной фракцией оказывает более плавное и меньшее влияние на изменение комплекса свойств, что делает возможным насыщение композиций жесткого заливочного пенополиуретана силикатным компонентом до 90 %, необходимым для снижения его горючести. Модификация мелкодисперсной фракцией силикатного компонента в исследуемом диапазоне насыщения, приводит к «взрывному» характеру вспенивания, следствием чего становится структурно-слабая полимерная матрица. Интересным направлением дальнейших работ может быть исследование влияния данных фракций на конечные свойства композита (физико-механические, теплофизические), а также исследование влияния данных фракций в диапазоне насыщения до 15%, возможность капсуляции в полимерную матрицу для нивелирования их реакционной способности.

Литература:

1. Савкин Ю.В. И снова к вопросу энергоэффективности в строительстве // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2023. - № 2 (277). - С. 26-27. EDN: EPFHNY
2. Zhigulina A.Yu., Shinguzhieva A.B., Kurmaniyazova N.Zh., Umereshova S.G., Abzalovna A., Ibraimov A.A. Energy efficiency in construction // Science and Education. -

reduces the gas pressure inside the cells, thereby increasing the final thickness of the polymer walls of the formed cells, which results in an increase in the density and strength of the composite.

From the analysis of the comprehensive test results for composites modified with the coarse fraction of the silicate component, it can be concluded that its effect on the acceleration of foaming and polymer formation processes, combined with its influence on the viscosity of the system and the endothermic effect, is more balanced compared to the fine fraction. Consequently, this results in a lesser impact on the cellular structure of the composite, which allows us to predict a positive effect from its use for further studies of the properties of the organomineral composite.

Conclusions

The silicate component in the reactive mixture accelerates the processes of foaming and polymer formation, and its varying dispersion makes it possible to regulate the degree of influence on these processes by altering the spatial structure of dispersion throughout the material volume and the interfacial contact area between the silicate component and the reactive oligomer mixture. The isocyanate functional groups of the mixture can interact with the chemically bound water of sodium metasilicate, releasing carbon dioxide and changing the direction of chemical reactions both in the peripheral zone and overall, which directly affects the morphology of the cellular structure, pore size, and pore wall thickness. Modification with the coarse fraction has a smoother and lesser effect on the change in the property complex, making it possible to saturate rigid polyurethane foam compositions with the silicate component up to 90%, which is necessary to reduce its flammability. Modification with the fine fraction of the silicate component in the studied saturation range leads to an explosive foaming behavior, resulting in a structurally weak polymer matrix. An interesting direction for further research could be to study the influence of these fractions on the final properties of the composite (physical-mechanical, thermophysical), as well as to investigate the effect of these fractions in the saturation range up to 15%, and the possibility of encapsulation in a polymer matrix to mitigate their reactivity.

References:

1. Savkin Yu.V. Once Again on the Issue of Energy Efficiency in Construction // Construction Materials, Equipment, Technologies of the 21st Century. - 2023. - No. 2 (277). - Pp. 26-27 (in Russian). EDN: EPFHNY
2. Zhigulina A.Yu., Shinguzhieva A.B., Kurmaniyazova N.Zh., Umereshova S.G., Abzalovna A., Ibraimov A.A. Energy efficiency in construction // Science and Education. -

2024. - № 1-2 (74). - С. 243-250. <https://doi.org/10.52578/2305-9397-2024-1-2-243-250>

3. Бучнев А.О., Бучнев О.А. Геоэкономические факторы развития энергетики дальнего востока в контексте национальных и мировых тенденций // Государственная служба. - 2023. - Т. 25. - № 6 (146). - С. 53-60. <https://doi.org/10.22394/2070-8378-2023-25-6-53-60> ; EDN: AXHMQJ

4. Касаева Т.В., Кертбиев З.М. Энергоэффективность российской промышленности: противоречивые тенденции и инструменты рыночных институциональных преобразований / Монография // Пятигорск, 2015. – 187 с. EDN: UVUUNB

5. Степанова Е.С., Мельников В.М. Виды и назначение теплоизоляционных материалов // Научный аспект. – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 2239-2243. EDN: DOAZRU

6. Лобко И.Г., Николаева Е.Ю., Курочкин Н.Д., Дробышева Г.Н. Издания ФГБУ ВНИИПО МЧС России (IV квартал 2023 г., новое и актуальное) // Пожарная безопасность. - 2023. - № 4 (113). - С. 166-172. EDN: KUATVB

7. Калач А.В., Капустин А.А., Шавалеев М.Р. Анализ обстановки с пожарами и их последствиями на территории Российской Федерации // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2024. – №3. – С.142-152. <https://doi.org/10.25257/FE.2024.3.142-152> EDN: VKFTNG

8. Ding S., Liu P., Zhang S., Ding Y., Wang F., Gao C., Yang M. Preparation and characterization of cyclodextrin microencapsulated ammonium polyphosphate and its application in flame retardant polypropylene // J. Appl. Polym. Sci. - 2020. - 137 (34) - p. 49001. <https://doi.org/10.1002/app.49001>

9. Cao Zhi-Jie, Dong X., Fu T., Deng Shi-Bi, Liao W., Wang Yu-Zhong Coated vs. naked red phosphorus: A comparative study on their fire retardancy and smoke suppression for rigid polyurethane foams // Polymer Degradation and Stability. 2017. – Vol. 136 – Pp. 103-111, ISSN 0141-3910.

10. Qiu Sh., Xu Ji., Wang Ch., Hu S., Song W., Chen M., Zhou Yi., Flame retardant black phosphorus: A review // Chemical Engineering Journal. 2025. – Vol. 505. – Pp. 159548, ISSN 1385-8947. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159548> ; EDN: SHZKVF

11. Liu J., Xin Z. Effect of sepiolite on properties of silicone rubber/melamine/starch/sepiolite flame retardant composites //Journal of Applied Polymer Science. – 2023. – Vol. 140. – №. 9. – P. e53538. <https://doi.org/10.1002/app.53538> ; EDN: AXTSIS

12. Yan W. et al. Flame-retardant behaviors of aluminum phosphates coated sepiolite in epoxy resin //Journal of Fire Sciences. – 2021. – Vol. 39. – №. 1. –Pp. 3-18. <https://doi.org/10.1177/0734904120934085> ; EDN: ECGFBW

13. Mustafayeva F., Kakhramanov N., Allahverdiyeva Kh., Babayeva T., Ashurova N. Fire-resistant polymer composites based on mineral fillers // RSC Advance. – 2026. – Vol. 16. – Is. 7. – Pp. 6257-6287, ISSN 2046-2069.

14. Xu P., Luo Ya., Zhang P. Interfacial architecting of organic-inorganic hybrid toward mechanically reinforced, fire-resistant and smoke-suppressed polyurethane composites // Journal of Colloid and Interface Science. – 2022. - Vol. 621. - Pp. 385-397. ISSN 0021-9797. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.04.082> ; EDN: FFDXGT

15. Huang Sheng-Chao, Deng C., Zhao Ze-Yong, Chen H., Gao Yu-Yang, Wang Yu-Zhong Phosphorus-containing organic-inorganic hybrid nanoparticles for the smoke suppression and flame retardancy of thermoplastic polyurethane // Polymer Degradation and Stability. – 2020. – Vol. 178. –

2024. - № 1-2 (74). - С. 243-250. <https://doi.org/10.52578/2305-9397-2024-1-2-243-250>

3. Buchnev A.O., Buchnev O.A. Goeconomic Factors of the Far East Energy Sector Development in the Context of National and Global Trends // State Service. - 2023. - Vol. 25. - No. 6 (146). - Pp. 53-60. (in Russian). <https://doi.org/10.22394/2070-8378-2023-25-6-53-60> ; EDN: AXHMQJ

4. Kasaeva T.V., Kertbiev Z.M. Energy Efficiency in the Russian Industry: Contradictory Trends and Instruments of Market Institutional Transformations / Monograph // Pyatigorsk, 2015. – 187 p. (in Russian). EDN: UVUUNB

5. Stepanova, E.S., Melnikov V.M. Types and purpose of thermal insulation materials // Nauchnyy aspekt. - 2020. - Vol. 17, No. 2. - P. 2239-2243 (in Russian). EDN: DOAZRU

6. Lobko I.G., Nikolaeva E.Yu., Kurochkin N.D., Drobysheva G.N. Publications of the All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia (IV quarter of 2023, new and relevant) // Fire Safety. - 2023. - No. 4 (113). - Pp. 166-172 (in Russian). EDN: KUATVB

7. Kalach A.V., Kapustin A.A., Shavaleev M.R. Analysis of the situation with fires and their consequences on the territory of the Russian Federation // Fires and Emergencies. - 2024. – No. 3. – Pp 142-152. <https://doi.org/10.25257/FE.2024.3.142-152> EDN: VKFTNG (in Russian).

8. Ding S., Liu P., Zhang S., Ding Y., Wang F., Gao C., Yang M. Preparation and characterization of cyclodextrin microencapsulated ammonium polyphosphate and its application in flame re-tardant polypropylene // J. Appl. Polym. Sci.- 2020. - 137 (34) - p. 49001. <https://doi.org/10.1002/app.49001>

9. Cao Zhi-Jie, Dong X., Fu T., Deng Shi-Bi, Liao W., Wang Yu-Zhong Coated vs. naked red phosphorus: A comparative study on their fire retardancy and smoke suppression for rigid polyurethane foams // Polymer Degradation and Stability. 2017. – Vol. 136 – Pp. 103-111, ISSN 0141-3910.

10. Qiu Sh., Xu Ji., Wang Ch., Hu S., Song W., Chen M., Zhou Yi., Flame retardant black phosphorus: A review // Chemical Engineering Journal. 2025. – Vol. 505. – Pp. 159548, ISSN 1385-8947. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159548> ; EDN: SHZKVF

11. Liu J., Xin Z. Effect of sepiolite on properties of silicone rubber/melamine/starch/sepiolite flame retardant composites //Journal of Applied Polymer Science. – 2023. – Vol. 140. – №. 9. – P. e53538. <https://doi.org/10.1002/app.53538> ; EDN: AXTSIS

12. Yan W. et al. Flame-retardant behaviors of aluminum phosphates coated sepiolite in epoxy resin //Journal of Fire Sciences. – 2021. – Vol. 39. – №. 1. –Pp. 3-18. <https://doi.org/10.1177/0734904120934085> ; EDN: ECGFBW

13. Mustafayeva F., Kakhramanov N., Allahverdiyeva Kh., Babayeva T., Ashurova N. Fire-resistant polymer composites based on mineral fillers // RSC Advance. – 2026. – Vol. 16. – Is. 7. – Pp. 6257-6287, ISSN 2046-2069.

14. Xu P., Luo Ya., Zhang P. Interfacial architecting of organic-inorganic hybrid toward mechanically reinforced, fire-resistant and smoke-suppressed polyurethane composites // Journal of Colloid and Interface Science. – 2022. - Vol. 621. - Pp. 385-397. ISSN 0021-9797. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.04.082> ; EDN: FFDXGT

15. Huang Sheng-Chao, Deng C., Zhao Ze-Yong, Chen H., Gao Yu-Yang, Wang Yu-Zhong Phosphorus-containing organic-inorganic hybrid nanoparticles for the smoke suppression and flame re-tardancy of thermoplastic polyurethane // Polymer Degradation and Stability. – 2020. – Vol. 178. –

109179. ISSN 0141-3910.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109179>
16. Веселовский Р.А., Збанацкая Н.Л. Исследование процессов формирования композита на основе полиизоцианата и жидкого стекла // Пластические массы. – 1998. – №9. – С.21-27.
17. Старовойтова И.А., Абдрахманова Л.А., Хозин В.Г., Кузнецова Л.М., Ягунд Э.М., Фахрутдинова В.Х. Оптимизация составов гибридных связующих на основе полиизоцианатов и водных растворов силикатов натрия // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2008. – № 1(9). – С. 122-130. EDN: KAPTQJ
18. Старовойтова И.А. Исследование структуры связующих на основе полиизоцианатов и водных растворов силикатов натрия // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2007. – № 2(8). – С. 89-94. EDN: KBEJEV

109179. ISSN 0141-3910.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109179>
16. Veselovsky R.A., Zbanatskaya N.L. Study of the processes of formation of a composite based on polyisocyanate and liquid glass // Plasticheskiye massy, No. 9, 1998. - P.21-27(in Russian).
17. Starovoytova I.A., Abdrakhmanova L.A., Khozin V.G., Kuznetsova L.M., Yagund E.M., Fakhrutdinova V.Kh. Optimization of the compositions of hybrid binders based on polyisocyanates and aqueous solutions of sodium silicates // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. - 2008. - No. 1 (9). - P. 122-130 (in Russian). EDN: KAPTQJ
18. Starovoytova I.A. Study of the structure of binders based on polyisocyanates and aqueous solutions of sodium silicates // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. - 2007. - No. 2 (8). - P. 89-94 (in Russian). EDN: KBEJEV

Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”. Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”

Липка Пётр Александрович – аспирант, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: petr.lipka2020@gmail.com (автор для связи)

Миронова Ксения Александровна – студент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: miroнова2025@gmail.com

Бруяко Михаил Герасимович – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: mbruyako@yandex.ru

Козлова Ирина Васильевна – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: iv.kozlova@mail.ru

Самченко Светлана Васильевна – заведующая кафедрой строительного материаловедения, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
E-mail: samchenko@list.ru

Вклад авторов: **Липка П.А.** – проведение эксперимента, обработка материала, написание статьи; **Миронова К.А.** - проведение эксперимента; **Бруяко М.Г.** – идея, научное руководство; **Козлова И.В.** – консультирование, написание статьи; **Самченко С.В.** – научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Lipka Petr Aleksandrovich – postgraduate student, National Research Moscow State University of Civil Engineering,
E-mail: petr.lipka2020@gmail.com (contact author)

Mironova Ksenia Aleksandrovna – student, National Research Moscow State University of Civil Engineering,
E-mail: miroнова2025@gmail.com

Bruyako Mikhail Gerasimovich – PhD in Engineering, Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: mbruyako@yandex.ru

Kozlova Irina Vasilievna – PhD in Engineering, Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: iv.kozlova@mail.ru

Samchenko Svetlana Vasilievna – Head of the Department of Construction Materials Science, Doctor of Engineering Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: samchenko@list.ru

Contribution of the author: **Lipka P.A.** – conducting the experiment, processing of material, writing of the article; **Mironova K. A.** - conducting the experiment; **Bruyako M.G.** – idea, scientific supervision; **Kozlova I.V.** – consulting, writing of the article; **Samchenko S.V.** - scientific supervision

The authors declare that there is no conflict of interest