

УДК 666.9.033

Тип статьи: обзорная статья

ГРНТИ 61.35.33

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

EDN YYQLGI

DOI 10.62980/2076-0655-2025-29-40

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОПОЛИМЕРОВ В 3D-ПЕЧАТИ: КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Ибрагимов Р.А.¹, Кебир А.З.², Уйсал М.³, Орхан Д.³, Федюк Р.С.^{4,5}, Ушков В.А.⁶, Зигангирова Л.И.¹

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Российская Федерация

² Elkon A.S., Черкезкёй, Турция; ³ Технический университет Йылдыз, Стамбул, Турция

⁴ Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, Российская Федерация

⁵ Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения "ЦНИИП Минстроя России" Дальневосточный научно-исследовательский, проектный и технологический институт строительства, Владивосток, Россия

⁶ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

АННОТАЦИЯ

3D-печать, появившаяся в 1980-х годах, в настоящее время получила широкое распространение во всех сферах жизни. Многие исследователи совершают революцию в строительстве зданий с помощью технологии 3D-печати. Основными эксплуатационными параметрами 3D-печати являются короткое время схватывания, быстрое отверждение, хорошая обрабатываемость, текучесть, высокая прочность на сжатие и изгиб. Согласно современным исследованиям, геополимеры по своим свойствам подходят для этого больше, чем любой другой материал. Геополимеры могут быть альтернативой портландцементу по своим физико-механическим свойствам и позволяют легко достигнуть желаемых параметров без добавления каких-либо дорогостоящих компонентов и получить ещё лучшие свойства с точки зрения огнестойкости, химической стойкости, водонепроницаемости и термостойкости. С другой стороны, геополимеры можно рассматривать как инструмент восстановления окружающей среды благодаря меньшим выбросам CO₂, меньшим энергозатратам на их изготовление, возможности использования побочных промышленных продуктов при их производстве. Цель данного обзора – изучить потенциал использования геополимеров для 3D-печати. Для этого, во-первых, в статье рассматриваются перспективы использования технологии 3D-печати, а затем основное внимание уделяется печатным геополимерным растворам. В результате обзора показано, что технология 3D-печати, в первую очередь для жилищного строительства, будет расширяться, и для этого очень перспективными могут оказаться геополимеры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: 3D-печать, корпус, геополимер, строительный раствор, летучая зола, метакралин, доменный шлак, красный шлам, галлуазит

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ибрагимов Р.А., Кебир А.З., Уйсал М., Орхан Д., Федюк Р.С., Ушков В.А., Зигангирова Л.И. Перспективы использования геополимеров в 3D-печати: критический обзор // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 1. – С. 29 – 40. DOI 10.62980/2076-0655-2025-29-40, EDN YYQLGI

Type of article - review article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN YYQLGI

DOI 10.62980/2076-0655-2025-29-40

PROSPECTS FOR THE USE OF GEOPOLYMERS FOR 3D PRINTING: A CRITICAL REVIEW

Ibragimov R.A.¹, Kebir A.Z.², Uysal M.³, Orhan C.³, Fediuk R.S.^{4,5}, Ushkov V.A.⁶, Zigangirova L.I.¹

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

² Elkon Inc. (A.S.), Cherkezkoey, Turkey; ³ Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey

⁴ Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, 308012 Belgorod, Russia

⁵ Branch of the Federal State Budgetary Institution "CNIIP of the Ministry of Construction of Russia" Far Eastern Scientific Research, Design and Technological Institute for Construction, Vladivostok, Russia

⁶ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ABSTRACT

3D printing, which appeared in the 1980s, is now widespread in all spheres of life. Many researchers are revolutionizing the construction of buildings using 3D printing technology. The main operational parameters of 3D printing are short setting time, fast curing, good machinability, thixotropy, high compressive and bending strength. According to modern research, geopolymers are more suitable for this purpose by their properties than any other material. Geopolymers can be an alternative to Portland cement in terms of their physical and mechanical properties and make it easy to achieve the desired parameters without adding any expensive components and obtain even better properties in terms of fire resistance, chemical resistance, water resistance and heat resistance. On the other hand, geopolymers can be considered as an environmental restoration tool due to lower CO₂ emissions, lower energy costs for their manufacture, and the possibility of using by-products in their production. The purpose of this review is to explore the potential of using geopolymers for 3D printing. To do this, firstly, the article discusses the prospects for using 3D printing technology, and then focuses on printed geopolymer solutions. As a result of the review, it is shown that 3D printing technology, primarily for housing construction, will expand, and geopolymers may be very promising for this.

KEY WORDS: 3D printing, housing, geopolymer, mortar, fly ash, methacolin, blast furnace slag, red sludge, galloisite.

FOR CITATION: Ibragimov R.A., Kebir A.Z., Uysal M., Orhan C., Fediuk R.S., Ushkov V.A., Zigangirova L.I. Prospects for the Use of Geopolymers for 3D Printing: A Critical Review // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol. – 32, No1. – Pp.29 – 40. DOI 10.62980/2076-0655-2025-29-40, EDN YYQLGI

ВВЕДЕНИЕ

Строительные 3D-принтеры появились на рынке сравнительно недавно и сейчас развиваются очень быстрыми темпами, разрушая консервативную строительную индустрию, позволяя сократить количество отходов, ускорить строительство, исключить человеческий фактор, как показывают тематические исследования, рассмотренные в этой статье. Согласно отчету Grand View Research [1], прогнозируется, что в период с 2022 по 2030 год совокупный годовой темп роста рынка 3D-печати составит 20,8 %. Ожидается, что количество используемых 3D-принтеров во всем мире увеличится с 2,2 млн единиц до 21,5 млн единиц. Если преимущества 3D-печати заключаются в экономии времени, меньшем расходе материалов и площади для строительных работ, геометрической свободе, то геополимеры обладают такими преимуществами, как короткое время схватывания и быстрое отверждение, дешевое сырье, прочность и долговечность, меньшие выбросы CO₂ при их производстве и меньшие энергозатраты, хорошая обрабатываемость и тиксотропность смесей [2, 3]. Геополимеры, полученные путем добавления алюмосиликатных материалов в щелочно-силикатный раствор, являются материалами, которые могут соответствовать требованиям 3D-печати.

При производстве геополимеров могут быть использованы различные прекурсоры, например, метакеолин [4, 5], шлак [6], хвостохранилища [7], шламы [8], красная глина [9], порошок из глиняных отходов производства кирпича [10, 11], имитаторы лунного реголита [12], растительные отходы [13], летучая зола [14, 15], техногенные волокнистые материалы [16]. Цель данного обзора – продемонстрировать потенциал использования геополимеров для 3D-печати.

ПРОЕКТЫ, РЕАЛИЗОВАННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

Ниже приведены некоторые проекты, реализованные с использованием 3D-принтеров. На рис. 1 показана первая модульная железобетонная балка длиной около 3 м, созданная с помощью 3D-печати в Неаполитанском университете Федерико II в Италии [17]. Исследователи разработали систему печати (рис. 1а) для изготовления бетонных элементов, которые могут быть собраны в армированные балки или колонны (рис. 1б).

РИСУНОК 1

УСТАНОВКА ДЛЯ ПЕЧАТИ (а), ПЕЧАТНЫЕ ДЕТАЛИ (сверху) И ПЕЧАТНЫЕ ДЕТАЛИ, СОБРАННЫЕ ИЗ СТАЛЬНЫХ ПРУТКОВ В БАЛКУ (снизу) (б) [17]

Figure 1

Printing plant (a), printed parts (top) and printed parts assembled from steel bars into a beam (bottom) (b) [17]



(a)

(b)

На рисунке 2 показаны напечатанные “кирпичи” на основе чистой глины в рамках проекта Института передовой архитектуры Каталонии в Испании [18].

Figure 2 shows printed “bricks” based on pure clay as part of the project of the Institute of Advanced Architecture of Catalonia in Spain [18].

INTRODUCTION

Construction 3D printers have appeared on the market relatively recently and are now developing very rapidly, destroying the conservative construction industry, allowing to reduce waste, accelerate construction, eliminate the human factor, as shown by the case studies reviewed in this article. According to the Grand View Research report [1], it is projected that in the period from 2022 to 2030, the cumulative annual growth rate of the 3D printing market will be 20.8%. The number of 3D printers in use worldwide is expected to increase from 2.2 million units to 21.5 million units. If the advantages of 3D printing are time savings, lower consumption of materials and space for construction work, geometric freedom, then geopolymers have advantages such as short setting time and fast curing, cheap raw materials, strength and durability, lower CO₂ emissions during their production and lower energy consumption, good machinability and thixotropy of mixtures [2 3]. Geopolymers obtained by adding aluminosilicate materials to an alkaline silicate solution are materials that can meet the requirements of 3D printing.

Various precursors can be used in the production of geopolymers, for example, metakaolin [4, 5], slag [6], tailings [7], sludge [8], red clay [9], powder from clay waste from brick production [10, 11], simulators of lunar regolith [12], plant waste [13], fly ash [14, 15], technogenic fibrous materials [16]. The purpose of this review is to demonstrate the potential of using geopolymers for 3D printing.

PROJECTS REALIZED USING TECHNOLOGY OF 3D PRINTING

Below are some projects implemented using 3D printers. Figure 1 shows the first modular reinforced concrete beam with a length of about 3 m, created using 3D printing at the University of Naples Federico II in Italy [17]. Researchers have developed a printing system (Fig. 1a) for the manufacture of concrete elements that can be assembled into reinforced beams or columns (Fig. 1b).

На рисунке 3 показан пример решения, как американские инженеры искали практический способ выжать больше энергии из ветряных турбин: чем выше турбина, тем больше ветра будет генерироваться. Увеличение размера лопастей – сложное техническое решение. В этом случае решением может стать 3D-печать [19, 20].

В таблице 1 представлена информация о некоторых зданиях, напечатанных на 3D-принтере в мире.

В таблице 2 представлена информация о конструкциях, реализованных с помощью 3D-печати.

Figure 3 shows an example of how American engineers were looking for a practical way to squeeze more energy out of wind turbines: the higher the turbine, the more wind will be generated. Increasing the size of the blades is a difficult technical solution. In this case, 3D printing can be the solution [19, 20].

Table 1 provide information about some of the buildings printed on a 3D printer in the world.

Table 2 provides information on the designs implemented using 3D printing.

РИСУНОК 2

НАСТРОЙКА ПЕЧАТИ (а) И НАПЕЧАТАННЫЕ “КИРПИЧКИ” (б) [18]

Figure 2

Printing settings (a) and printed “bricks” (b) [18]

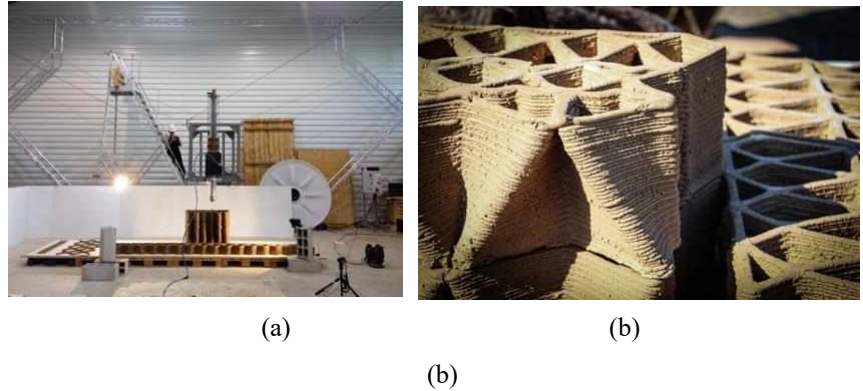
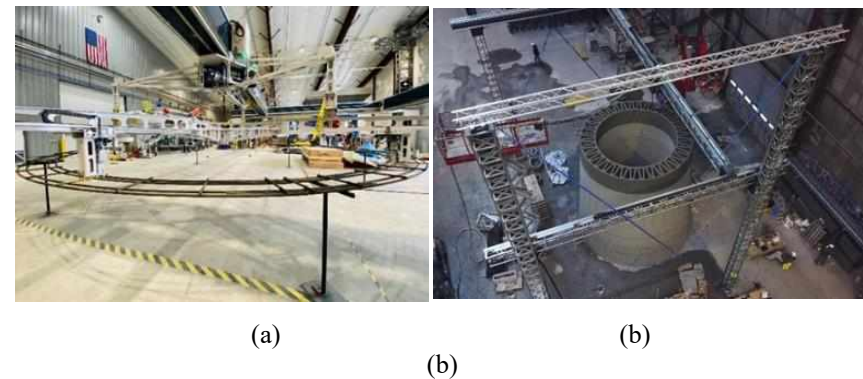


РИСУНОК 3

НАСТРОЙКА ДЛЯ ПЕЧАТИ НИЖНИХ ЧАСТЕЙ БАШЕН ВЕТРЯНЫХ ТУРБИН [20] (а) И РАСПЕЧАТКИ СЕКЦИИ БАШНИ ВЕТРЯНЫХ ТУРБИН [19] (б)

Figure 3

Setup for printing the lower parts of the wind turbine towers [20] (a) and printing the section of the wind turbine tower [19] (b)



Технология печати обладает такими преимуществами, как возможность построения различных геометрических фигур и экономия на материалах, рабочей силе и времени, соответственно, снижение стоимости жилья.

На рис. 5 изображены трехэтажный особняк и пятиэтажный жилой дом, построенные в промышленном парке Сучжоу в китайской провинции Цзянсу. Компания, реализовавшая данные проекты, считает, что эта технология позволит возводить здания на 70 % быстрее, при этом требуется всего 60 % затрат на материалы от их общего количества и на 80 % меньше затрат на рабочую силу [21].

На рис. 6 показано двухэтажное административное здание в Дубае. Это инициатива, направленная на строительство 25 % зданий Дубая с использованием технологии 3D-печати к 2030 году [27].

На рис. 7 представлен дом с четырьмя спальнями, расположенный во Франции (Нант), который был напечатан с использованием метода, разработанным в Нантском университете. Стоимость строительства дома оказалась на 20 % ниже, чем идентичное строительство традиционными методами [44].

Printing technology has advantages such as the ability to build various geometric shapes and savings on materials, labor and time, respectively, reducing the cost of housing.

Figure 5 shows a three-storey mansion and a five-storey apartment building built in the Suzhou Industrial Park in the Chinese province of Jiangsu. The company that implemented these projects believes that this technology will allow buildings to be erected 70% faster, while requiring only 60% of the total cost of materials and 80% less labor costs [21].

Figure 6 shows a two-storey office building in Dubai. This is an initiative aimed at building 25% of Dubai's buildings using 3D printing technology by 2030 [27].

Figure 7 shows a four-bedroom house located in France (Nantes), which was printed using a method developed at the University of Nantes. The cost of building a house turned out to be 20% lower than identical construction using traditional methods [44].

ТАБЛИЦА 1 ИНФОРМАЦИЯ О НЕКОТОРЫХ ЗДАНИЯХ, НАПЕЧАТАННЫХ НА 3D-ПРИНТЕРЕ
В МИРЕ В 2015-2022 ГОДАХ

Table 1 Information on some 3D Printed Buildings in the World in 2015-2022

2022	1	2				
2021			1	1		1
2020		1	1			
2019			1			
2018		1	2			
2017	1					
2016					1	
2015				2		
	Россия Russia	США USA	Европа Europe	Китай China	ОАЭ UAE	Африка Africa

Россия:	Дом с площадью 38 кв.м (2017), каждый из 34 коттеджей площадью 80 кв.м (2022).
RF, Russia:	A house with an area of 38 sq.m (2017), each of the 34 cottages with an area of 80 sq.m (2022).
США, Америка:	Дом площадью 32,52 кв.м (2018), башня с ветряной турбиной (2020), Дом с 2 спальнями и 2 ванными комнатами (2022) и дом площадью 185,81 кв.м (август 2022).
USA, America:	A house with an area of 32.52 sq.m (2018), a tower with a wind turbine (2020), a house with 2 bedrooms and 2 bathrooms (2022) and a house with an area of 185.81 sq.m (August 2022).
Европа:	Дом площадью 30 кв.м (2018, Италия), дом площадью 95 кв.м (2018, Франция), купол площадью 60 кв.м (2019-2021, Италия), Жилой дом площадью 380 кв.м (ноябрь 2020 – апрель 2021, Германия), дом площадью 94 кв.м (апрель 2021, Нидерланды).
Europe:	House with an area of 30 sq.m (2018, Italy), house with an area of 95 sq.m (2018, France), dome with an area of 60 sq.m (2019-2021, Italy), Apartment building with an area of 380 sq.m (November 2020 – April 2021, Germany), house with an area of 94 sq.m (April 2021, Netherlands).
Китай:	Жилой дом на 10 квартир (2015), особняк площадью 1100 кв. м. (2015), фермерский дом площадью 105,91 кв.м. (октябрь 2021).
China:	A residential building with 10 apartments (2015), a mansion with an area of 1100 sq. m. (2015), a farmhouse with an area of 105.91 sq.m. (October 2021).
ОАЭ, Эмираты:	Муниципальный офис площадью 640 кв.м (2016-2019).
UAE, Emirates:	Municipal office with an area of 640 sq.m (2016-2019).
Африка:	Школьное здание площадью 55,74 кв.м (июнь 2021 года).
Africa:	The school building has an area of 55.74 square meters (June 2021).

ТАБЛИЦА 2 КОНСТРУКЦИИ, РЕАЛИЗОВАННЫЕ С ПОМОЩЬЮ 3D-ПЕЧАТИ

Table 1. Constructions Implemented by 3D Printing

Источ-ник Source	Название проекта, место реализации Project name, realized place	Площадь, геометрия Area, geometry	Конструкция Construction	Материал Material	Время создания Creating time	Затраты Costing
1	2	3	4	5	6	7
In 2015						
[21], [22]	Apartment build- ing, China	10 apart- ments	Walls 	Переработанный камень и строительные отходы Recycled stone and construction waste.	1 day (printing), 6 days (creating).	£3,100 each apartment
	Mansion, China	1100 sqm			No data	£10,0000 (undeco- rated)
In 2016						
[25]-[29]	Municipality office, Dubai/UAE	640 sqm	Walls 	Бетон, гипс и т.д. Concrete, gypsum etc.	17 days	\$140,000
In 2017						

[25], [30]	House (pilot project), Stupino	38 sqm	Walls 	Геополимеры Geopolymer	24 h	\$10,000
In 2018						
[25], [33], [34]	“Chicon” house, Austin/Texas/USA	32.52 sqm	Walls 	Лавакрит Lavacrete	47 h	\$10,000
[25], [40]	“Gaia” house, Ravenna/Italy	30 sqm	Walls 	Иловая глина, молотый песок, измельченная рисовая солома и шелуха. Silt clay, ground sand, chopped rice straw and husks.	10 days	\$1,000
[25], [43], [44]	“Yhnova” house, Nantes/France	95 m	Walls 	Полиуретан, бетон Polyurethane, concrete	54 h	£176,000
In 2019						
[41], [42]	“Tecla” house, Ravenna/Italy	60 sqm	Dome/Walls 	Сырая земля Raw earth	200 h	No data
In 2020						
[19], [20]	Wind turbine tower	≤ 140 m in height	Walls 	Бетон Concrete	No data	The U.S. Department of Energy is funding the research with \$5 million.
[45], [46]	Apartment building, Wallenhausen village/Germany	380 sqm	Walls 	Нет данных No data	No data	No data
In 2021						
[47], [48]	“Milestone” house, Eindhoven/The Netherlands	94 sqm	Walls 	Бетон Concrete	No data	No data
[23], [24]	“Juanzi” farmhouse, Wujiazhuang village/China	105,91 sqm	Base, walls, & roof 	Нет данных No data	2 weeks	No data

Продолжение таблицы 2 Continuation of table 2						
1	2	3	4	5	6	7
[49]	School, Malawi/Africa	55,74 sqm	Walls 	Нет данных No data	18 h	No data
In 2022						
[31], [32]	“Kvadrum” cottage village, Zelenodolsky District/Republic of Tatarstan/RF	34 cottages (80 sqm each one)	Walls 	Портландцементный раствор и пенобетон. Portland cement mortar and foam concrete.	1-2 days (printing), 3 weeks (creating)	6,5 million rubles (pre-finishing + plot)
[25], [35]-[38]	“Zero Net Energy” prefabricated home, Southern California/USA	2-bed + 2-bath	Wall panels 	60% переработанного материала 60% recycled material	24 h (printing), 4-5 months (creating)	\$595,000
[39]	House, Island/New York/USA	185,81 sqm	Slab, footings, foundation, interior and exterior walls 	Нет данных No data	15 days	No data

РИСУНОК 5

ФАСАДЫ НАПЕЧАТАННОГО ОСОБНЯКА (а) И КВАРТИРЫ (б) В КИТАЕ [22]

Figure 5

Facades of a printed mansion (a) and apartment (b) in China [22]



(a)



(b)

РИСУНОК 6

НАПЕЧАТАННЫЙ ОФИС МУНИЦИПАЛИТЕТА ДУБАЯ [29]

Figure 6

Printed office of Dubai Municipality [29]



РИСУНОК 7

НАПЕЧАТАННЫЙ ДОМ «YHNOVA» В НАНТЕ/ФРАНЦИЯ [44]

Figure 7

Printed “Yhnova” house in Nantes/France [44]



Из данных таблицы 2 видно, что 3D-печать будет становиться все более привлекательной, поскольку она решает такие проблемы, как строительство домов в стеснённых условиях. Дом – это жилище, которое становится слишком дорогим для большинства людей из-за трудоемких и дорогих традиционных методов, и в тоже время это планета Земля, которая становится слишком загрязненной и ресурсы которой истощаются в прогрессирующем масштабе. Технология 3D-печати позволяет строить относительно дешево и быстро. С другой стороны, такая технология позволяет экономить обычный бетон, в котором портландцемент является источником выделения CO₂ и сокращать отходы.

Более того, заметно, что напечатанное жилье в настоящее время является актуальной темой. Например, цель ICON – решить проблему бездомности с помощью небольших домов, которые можно напечатать за 48 часов и которые стоят всего 10 000 долларов [50]. Хошневис [51] заявил, что изначально целью ICON является использование 3D-технологий для поддержки строительства недорогих и аварийных жилищных проектов в различных регионах мира, включая развивающиеся страны. Далее такая технология будет расширена для размещения более крупных жилых и средних коммерческих зданий.

Помимо вышесказанного, видно, что 3D-печать в большинстве случаев используется для строительства стен. Это позволяет выполнять ручную и автоматизированную работу одновременно, экономя время и деньги. Например, стены школы площадью 55,74 квадратных метра были напечатаны на принтере всего за 18 часов. По словам автора [49], такая школа поможет привлечь больше учеников и создать условия для страны, испытывающей нехватку в 36000 классных комнатах. Чтобы восполнить этот дефицит традиционными методами и скоростью, потребовалось бы около 70 лет. С другой стороны, дом «Яхнова» (рис. 7), который был частью проекта социального жилья и направлен на строительство доступного, адаптивного и энергоэффективного жилья в кратчайшие сроки, и с минимальными затратами. На печать 95-метрового дома ушло 54 часа, не считая четырех месяцев, которые подрядчики потратили на установку окон, дверей и устройство кровли. Такое строительство дома обошлось на 20 % дешевле, чем идентичное строительство традиционными методами. Другим примером является дом «Гайя» площадью 30 кв. м, построенный за 240 ч. Этот прототип может стать основой для строительства домов в более бедных странах или в более бедных районах, где насущной проблемой является стоимость жилья.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что 3D-печать – это уже не просто теоретическая идея, а реальный и достижимый ответ на современные и будущие потребности людей. Уже существуют проекты по созданию пригородных кварталов с использованием тех же принципов строительства. Также очевидно, что в будущем строительная печать будет использоваться не только для строительства жилых домов.

ПОСЛЕДНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОПОЛИМЕРОВ КАК МАТЕРИАЛА ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

В настоящее время есть исследователи, которые сосредоточены на разработке новых печатных материалов. В этой части обзора геополимеры рассматриваются как экструдированный материал.

From the data in table 2, it can be seen that 3D printing will become increasingly attractive, as it solves problems such as building houses in cramped conditions. A house is a dwelling that becomes too expensive for most people due to time-consuming and expensive traditional methods, and at the same time it is a planet Earth that is becoming too polluted and whose resources are being depleted on a progressive scale. 3D printing technology allows you to build relatively cheaply and quickly. On the other hand, this technology allows you to save conventional concrete, in which Portland cement is a source of CO₂ emission and reduce waste.

Moreover, it is noticeable that printed housing is currently an urgent topic. For example, ICON's goal is to solve the problem of homelessness with small houses that can be printed in 48 hours and cost only \$10,000 [50]. Khoshnevis [51] stated that ICON's initial goal was to use 3D technologies to support the construction of low-cost and emergency housing projects in various regions of the world, including developing countries. Further, this technology will be expanded to accommodate larger residential and medium-sized commercial buildings.

In addition to the above, it can be seen that 3D printing is used in most cases for the construction of walls. This allows you to perform manual and automated work at the same time, saving time and money. For example, the walls of the school with an area of 55.74 square meters were printed on a printer in just 18 hours. According to the author [49], such a school will help attract more students and create conditions for a country experiencing a shortage of 36,000 classrooms. It would take about 70 years to fill this deficit with traditional methods and speed. On the other hand, the house of "Yakhnov" (fig. 7), which was part of the social housing project and aimed at building affordable, adaptive and energy efficient housing in the shortest possible time, and with minimal costs. It took 54 hours to print the 95-meter house, not counting the four months that the contractors spent installing windows, doors and roofing. Such house construction cost 20% less than identical construction using traditional methods. Another example is the house "Gaia" with an area of 30 square meters, built in 240 hours. This prototype can become the basis for building houses in poorer countries or in poorer areas where the cost of housing is an urgent problem.

From all of the above, we can conclude that 3D printing is no longer just a theoretical idea, but a real and achievable answer to modern and future human needs. There are already projects to create suburban neighborhoods using the same construction principles. It is also obvious that in the future, construction printing will be used not only for the construction of residential buildings.

RECENT STUDIES ON GEOPOLYMERS AS A MATERIAL FOR 3D PRINTING

Currently, there are researchers who are focused on developing new printed materials. In this part of the review, geopolymers are considered as an extruded material.

В качестве жидкого отвердителя геополимеров используются растворы NaOH или KOH и Na_2SiO_3 или K_2SiO_3 [52, 54, 55, 57, 60, 63].

В таблице 3 сравниваются результаты плотности и прочности некоторых из рассмотренных ниже печатных геополимерных растворов с растворами, отлитыми в форму.

В таблице 4 представлены исследования за последнее десятилетие, в которых геополимеры представлены как альтернативный печатный материал.

Solutions of NaOH or KOH and Na_2SiO_3 or K_2SiO_3 are used as liquid hardener of geopolymers [52, 54, 55, 57, 60, 63].

Table 3 compares the density and strength results of some of the printed geopolymer solutions discussed below with molded solutions.

Table 4 presents studies over the past decade in which geopolymers are presented as an alternative printing material.

ТАБЛИЦА 3 СВОЙСТВА ГЕОПОЛИМЕРНЫХ РАСТВОРОВ

Table 3 Properties of geopolymers solutions

Исследователь Researchers	Тип раствора Mortar type	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Прочность, в возрасте, МПа Strength, MPa			
			На сжатие Compressive		На изгиб Flexural	
			7 дней 7 days	≥ 28 дней ≥ 28 days	7 дней 7 days	≤ 28 дней ≥ 28 days
Ранджбар и др. (2020) [62] Ranjbar et al. (2020) [62]	литье в форму mold-cast	нет данных no data	7-15	28-38	2-3	5,5-11,5
	напечатанный printed	нет данных no data	4-6	27-35	1-2	9,5-11,5
Верарди и др. (2022) [60] Verardi et al. (2022) [60]	литье в форму mold-cast	1,1	нет данных no data	16	нет данных no data	нет данных no data
	напечатанный printed	0,85	нет данных no data	10	нет данных no data	нет данных no data
Дудников и др. (2016) [53] Dudnikov et al. (2016) [53]	напечатанный printed	2,0-2,3	22,7-55,2	34,2-95,6	5,9-10,3	8,7-12,6

ТАБЛИЦА 4 ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОПОЛИМЕРОВ КАК МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПЕЧАТИ

Table 4 Research of geopolymers as a printing material

Исследователи Researchers	Состав Composition	Напечатанная продукция Printed products	Заметки Notes
Andresen (2014) [52]	Геополимерная смесь на основе золы-уноса + шлака с добавлением конопляной стружки. Fly ash + slag based geopolymer mixture with addition of hemp shives.	-	-
Dudnikov et al. (2016) [53]	1- Геополимерная смесь на основе золы-уноса и молотого гранулированного доменного шлака (ГГБФШ) с добавлением кремнеземного дыма. 2- Геополимерная смесь на основе летучей золы и ГГБФС. 3- Геополимерная смесь на основе метакеолина с добавлением ГГБФС. 1- Fly ash and ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) based geopolymer mixture with addition of silica fume. 2- Fly ash and GGBFS based geopolymer mixture. 3- Metakaolin based geopolymer mixture with addition of GGBFS.	 Настенный элемент Wall element	-
Panda (2016) [54]	Геополимерная смесь на основе Na золы-уноса с ДГШ. Na-based fly ash geopolymer mixture with GGBFS.	 Объекты небольшого масштаба Small scale objects	Увеличение количества ДГШ в геополимерной смеси снижает обрабатываемость и время схватывания, но уменьшает усадку бетона и расход раствора. Increasing the amount of GGBFS in the geopolymer mixture

			reduces workability and setting time, but reduces concrete slump and mortar flow.
Franchin et al. (2016) [55]	1- Геополимер на основе Na метакаолина (750°C). 2- Геополимер на основе K летучей золы унос 1- Na-based metakaolin (750°C) geopolymer. 2- K-based fly ash geopolymer.	 Объекты небольшого масштаба Small scale objects	-
Ma et al. (2021) [56]	Геополимер на основе метакаолина (800 °C) Metakaolin (800 °C) based geopolymer	 Объекты небольшого масштаба Small scale objects	-
Pilehvar et al. (2018) [57]	Геополимерный бетон на основе золы-уноса (класс F) и ДГШ с добавлением микрокапсулированных фазоизменяющих материалов (MPCM). Fly ash (class F) and GGBFS based geopolymer concrete adding microencapsulated phase change materials (MPCM).	-	Начало схватывания увеличилось, а конец схватывания уменьшился с увеличением концентрации МРСМ, а усадка и прочность на сжатие уменьшались с добавлением МРСМ. Initial setting time increased and final setting time decreased with increasing MPCM concentration, and slump and compressive strength decreased with MPCM addition.
Archez et al. (2021) [58]	Геополимер на основе метакаолина с добавлением волластонита и стеклянных волокон. Metakaolin based geopolymer with addition of wollastonite and glass fibers.	 Образец ячейки для радиоактивных отходов (Ф=35 см, Н=45 см) Specimen of radioactive waste cell (Ф=35 cm, H=45 cm)	-
Rintala et al. (2021) [59]	Геополимерный бетон на основе метакаолина, содержащий полипропиленовую фибру. Metakaolin based geopolymer concrete containing polypropylene fiber.	-	-
Verardi et al. (2022) [60]	Ферросиалатное геополимерное связующее (Na/Al=1). Ferro-sialate geopolymer binder (Na/Al=1).	 Образцы размером 40 мм x 40 мм x 160 мм 40 mm x 40 mm x 160 mm specimens	-
Ranjbar et al. (2023) [61]	Геополимерный раствор на основе золы унос с добавлением галлуазита и метагаллуазита (800 °C). Fly ash based geopolymer mortar with addition of halloysite and meta-halloysite (800 °C).	 Призматические образцы Prismatic specimens	-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрено использование безбетонного материала, что свидетельствует о начале поиска новых материалов для технологии 3D-печати. Согласно представленным результатам, можно утверждать, что использование геополимеров в технологии 3D-печати имеет большие перспективы. Свойства геополимеров в большей степени зависят от основных характеристик прекурсора и условий отверждения. При разработке рецептур геополимеров, каждый исследователь предлагает свою рецептуру и технологию, исходя из местных сырьевых материалов и условий окружающей среды. На основании результатов по определению прочности на сжатие и изгиб сделано предположение, что геополимерная смесь может стать альтернативой бетонной смеси, используемой в строительной 3D-печати.

CONCLUSIONS

This article discusses the use of concrete-free material, which indicates the beginning of the search for new materials for 3D printing technology. According to the presented results, it can be argued that the use of geopolymers in 3D printing technology has great prospects. The properties of geopolymers depend to a greater extent on the main characteristics of the precursor and the curing conditions. When developing formulations of geopolymers, each researcher offers his own formulation and technology based on local raw materials and environmental conditions. Based on the results of the determination of compressive and bending strength, it is assumed that the polymer mixture can become an alternative to the concrete mixture used in construction 3D printing.

Литература:

References:

1. Grand View Research. 3D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report by Component (Hardware, Software, Services), by Printer Type, by Technology, by Software, by Application, by Vertical, by Region, and Segment Forecasts, 2022-2030., (2022). <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis>.
2. J. Davidovits, Geopolymer chemistry & applications, 2015.
3. A.C.C. Trindade, F. de Andrade Silva, W.M. Kriven, Mechanical behavior of K-geopolymers reinforced with silane-coated basalt fibers, J. Am. Ceram. Soc. 104 (2021) 437–447. <https://doi.org/10.1111/jace.17446>.
4. T. Jiang, Z. Liu, X. Tian, J. Wu, L. Wang, Review on the impact of metakaolin-based geopolymer's reaction chemistry, nanostructure and factors on its properties, Constr. Build. Mater. 412 (2024) 134760. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134760>.
5. R. Fediuk, A. Yushin, Composite binders for concrete with reduced permeability, in: IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 2016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/116/1/012021>.
6. M. Ziada, H. Tanyildizi, M. Uysal, The influence of carbon nanotube on underwater geopolymer paste based on metakaolin and slag, Constr. Build. Mater. 414 (2024) 135047. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135047>.
7. S. Singh, A. Kumar, T.G. Sitharam, Experimental study on strength, durability, hydraulic and toxicity characteristics of soil treated with mine tailings based geopolymers for sustainable road subgrade application, Constr. Build. Mater. 414 (2024) 134894. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134894>.
8. J. Shi, Y. Shen, W. Zhang, Y. Fu, X. Kong, Effects of three different nanomaterials on the properties and microstructure of sludge based geopolymers, Constr. Build. Mater. 414 (2024) 134965. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134965>.
9. S. Prasanphan, S. Onutai, N. Nawaukkaratharnant, Influence of partial replacement of calcined red clay by gypsum-bonded casting investment waste on geopolymerization reaction of red clay-based geopolymer, Heliyon. 10 (2024) e24448. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24448>.
10. S. Sharmin, P.K. Sarker, W.K. Biswas, R.M. Abousnina, U. Javed, Characterization of waste clay brick powder and its effect on the mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar, Constr. Build. Mater. 412 (2024) 134848. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134848>.
30. B. Loker, World's First 3D-Printed House Springs Up in Russia in 24hrs, (2017). <https://www.dwell.com/article/worlds-first-3d-printed-house-springs-up-in-russia-in-24hrs-d71031f4>.
31. 3D Today. V Tatarstane Stroyat Poselok s 3D-Pechatnymi Domami, (2022). <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/v-tatarstane-stroyat-poselok-s-3d-pechatnymi-domami>.
32. Kvadrum3d. Kottedzhnyi Poselok KVADRUM Unikalnye Doma, Sozdannye 3d-Printerom, (2022).
33. ICON. The Chicon House, (2018). <https://www.iconbuild.com/projects/chicon-house>.
34. M. Saxton, 3D-Printed House in Austin, Texas, (2020). <https://www.buildwithrise.com/stories/3d-printed-house-austin-texas>.
35. Businesswire. Mighty Buildings Completes World's First 3D-Printed Zero Net Energy Home, Announces B2B Strategy Expansion to Accelerate Growth, (2022). <https://www.businesswire.com/news/home/20221011005971/en/Mighty-Buildings-Completes-World's-First-3D-Printed-Zero-Net-Energy-Home-Announces-B2B-Strategy-Expansion-to-Accelerate-Growth>.
36. UvEb Technology. Mighty Buildings' 3D-Printed Sustainable Homes, (2022). <https://uvebtech.com/articles/2022/mighty-buildings-3d-printed-sustainable-homes>.
37. M. Aysha, Mighty Buildings, 3D Printing Houses on the Spot, (2020). <https://www.3dnatives.com/en/mighty-buildings-inter-view-051020205>.
38. K. Mazade, Mighty Buildings Completes 3D-Printed Net-Zero Home in Southern California, (2022). <https://www.dezeen.com/2022/11/04/mighty-buildings-worlds-first-3d-printed-zero-net-home-california>.
39. SQ4D. Largest 3D Printed House as of August 2022, (2022). <https://www.sq4d.com/islandia-print>.
40. RiceHouse. GAIA – 3D Realization, (2018). <https://www.ricehouse.it/en/storie/gaia>.
41. WASP. TECLA, (2021). www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla.
42. K. Hui, Tecla is the First 3D Printed House Made of Raw Earth in Ravenna, (2021). <https://www.yellowtrace.com.au/tecla-first-3d-printed-raw-earth-house-sustainable-architecture-techology>.
43. C. Clarke, French BatiPrint3D Project to Construct House with "Inside-Out" 3D Printing., (2017). <https://3dprintingindustry.com/news/french-batiprint3d-project-construct-house-inside-3d-printing-110099>.

11. N. Makul, R. Fediuk, M. Amran, A.M. Zeyad, S. Klyuev, I. Chulkova, T. Ozbakkaloglu, N. Vatin, M. Karelina, A. Azevedo, Design Strategy for Recycled Aggregate Concrete: A Review of Status and Future Perspectives, *Crystals*. 11 (2021) 695. <https://doi.org/10.3390/cryst11060695>.
12. S. Debbarma, X. Shi, A. Torres, M. Nodehi, Fiber-reinforced lunar geopolymers synthesized using lunar regolith simulants, *Acta Astronaut.* 214 (2024) 593–608. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.11.013>.
13. R.S. Fediuk, A.K. Smoliakov, R.A. Timokhin, V.O. Batarshin, Y.G. Yevdokimova, Using thermal power plants waste for building materials, in: *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/9/092010>.
14. A. Naghizadeh, L.N. Tchadjie, S.O. Ekol, M. Welman-Purchase, Circular production of recycled binder from fly ash-based geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 415 (2024) 135098. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135098>.
15. R. Prakash, N. Divyah, S. Srividhya, S. Avudaiappan, M. Amran, S. Naidu Raman, P. Guindos, N.I. Vatin, R. Fediuk, Effect of Steel Fiber on the Strength and Flexural Characteristics of Coconut Shell Concrete Partially Blended with Fly Ash, *Materials* (Basel). 15 (2022) 4272. <https://doi.org/10.3390/ma15124272>.
16. A.V. Klyuev, N.F. Kashapov, S.V. Klyuev, R.V. Lesovik, M.S. Ageeva, E.V. Fomina, Development of alkali-activated binders based on technogenic fibrous materials, *Constr. Mater. Prod.* 6 (2023) 60–73. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73>.
17. F. Moretti, Concrete Beam Created with 3D Printing, (2015). <https://www.3dwaspp.com/en/concrete-beam-created-with-3d-printing>.
18. B. Jackson, Institute for Advanced Architecture of Catalonia Takes a Natural Approach to on Site 3D Printing for Construction, (2017). <https://3dprintingindustry.com/news/institute-advanced-architecture-catalonia-takes-natural-approach-site-3d-printing-construction-109897>.
19. D. Kruger, Take Me Higher: 3D-Printed Concrete Could Give Wind Turbines a Powerful Lift, (2020). <https://www.ge.com/news/reports/take-me-higher-3d-printed-concrete-could-give-wind-turbines-powerful-lift>.
20. T. Kellner, Fit to Print: GE is Looking at 3D-Printing Wind Turbine Towers from Concrete for More Efficient Wind Farms, (2023). <https://www.ge.com/news/reports/fit-to-print-ge-is-looking-at-3d-printing-wind-turbine-towers-from-concrete-for-more>.
21. M. Fulcher, Chinese Firm 3D Prints Villa and Apartment Block, (2015). <https://www.architectsjournal.co.uk/archive/chinese-firm-3d-prints-villa-and-apartment-block>.
22. M. Starr, 3D-Printed Apartment Building and Mansion (Pictures), (2015). <https://www.cnet.com/pictures/3d-printed-apartment-building-and-mansion-pictures>.
23. M. Kremenetsky, 3D Printed Farmhouse Unveiled in China Ahead of 2022 Winter Olympics, (2021). <https://3dprint.com/287286/3d-printed-farmhouse-unveiled-in-china-ahead-of-2022-winter-olympics/amp>.
24. AICT, Wujiazhuang Village, (2021). <https://www.aictbuild.com/wujiazhuangvillage>.
25. 3D Sourced, The 12 Most Exciting 3D Printed House Builds 2022, (2021). <https://www.3dsourced.com/guides/3d-printed-house-2>.
26. S. Nikolopoulos, Construction Completed on Largest 3D-Printed Building in The World, (2020). <https://www.thomasnet.com/insights/construction-completed-on-largest-3d-printed-building-in-the-world>.
44. T. Vialva, A French Family is the First to Move into a 3D Printed House., (2018). <https://3dprintingindustry.com/news/a-french-family-is-the-first-to-move-into-a-3d-printed-house-135881>.
45. G. Woodford, COBOD Welcomes Explosive Growth and Second Year of Profitability, (2021). <https://www.aggbusiness.com/ab7/news/cobod-welcomes-explosive-growth-and-second-year-profitability>.
46. PERI Builds the First 3D-Printed Apartment Building in Germany, (2020). <https://www.peri.com/en/company/press-releases/peri-builds-the-first-3d-printed-apartment-building-in-germany.html>.
47. S. Kety, Remember “Project Milestone”? One of the First 3D Printed Houses is Over and First Residents Received Key., (2021). <https://3dadept.com/remember-project-milestone-one-of-the-first-3d-printed-houses-is-over-and-first-residents-received-key>.
48. S. Fourtané, 3D-Concrete-Printing Smart Housing for Smart Cities in The Netherlands., (2018).
49. D. Malone, The World’s First 3D Printed School Completes in Malawi, Africa, (2021). <https://www.bdcnetwork.com/worlds-first-3d-printed-school-completes-malawi-africa>.
50. E. Pollock, Formerly Homeless Man Becomes First Us Resident of 3D Printed Tiny Home, (2021). <https://3dprint.com/280234/formerly-homeless-man-becomes-first-us-resident-of-3d-printed-tiny-home>.
51. B. Khoshnevis, An Appeal to Readers of Founder, President, and CEO of Contour Crafting Corporation, (2017). <https://www.contourcrafting.com>.
52. D. Andresen, Hempcreate: The Art of Hemp Based Geopolymer Extrusion., (2014). <https://geopolymer.org/fichiers/gpcamp-2014>.
53. A. Dudnikov, A. Reggiani, M. Dudnikova, The Application of Geopolymer Concrete in the First Mobile 3D-Printer for Buildings Construction, (2016). <https://geopolymer.org/fichiers/gpcamp-2016>.
54. B. Panda, Development of 3D-Printed Geopolymer Cement for Sustainable Construction, (2016). <https://geopolymer.org/fichiers/gpcamp-2016>.
55. G. Franchin, H. Elsayed, P. Scanferla, A. De Marzi, F. Gobbin, L. Zeffiro, A. Conte, A. Italiano, P. Colombo, Direct and Indirect 3D Printing with Geopolymers, (2016). <https://geopolymer.org/fichiers/gpcamp-2016>.
56. S. Ma, S. Fu, S. Zhao, P. He, G. Ma, M. Wang, D. Jia, Y. Zhou, Direct ink writing of geopolymer with high spatial resolution and tunable mechanical properties, *Addit. Manuf.* 46 (2021) 102202. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102202>.
57. S. Pilehvar, V.D. Cao, A.M. Szczotok, M. Carmona, L. Valentini, M. Lanzón, R. Pamies, A.L. Kjoniksen, Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials, *Constr. Build. Mater.* (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.016>.
58. J. Archez, S. Maitenaz, L. Demont, M. Charrier, R. Mesnil, N. Texier-Mandoki, X. Bourbon, S. Rossignol, J.F. Caron, Strategy to shape, on a half-meter scale, a geopolymer composite structure by additive manufacturing, *Open Ceram.* 5 (2021) 100071. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100071>.
59. A. Rintala, J. Havukainen, M. Abdulkareem, Estimating the Cost-Competitiveness of Recycling-Based Geopolymer Concretes, *Recycling*. 6 (2021) 46. <https://doi.org/10.3390/recycling6030046>.
60. N. Verardi, R. Frezzato, M. Benvenuti, Ferrosialate Geopolymer Binder and 3D Printing, (2022). <https://geopolymer.org/fichiers/gpcamp-2022>.

27. A. Anre, World's Largest 3D Printed Building – Dubai's Municipality Building., (2021). <https://www.prodyogi.com/2021/07/worlds-largest-3d-printed-building.html>.
28. N. Zharebtsov, The Largest in The World 3D-Printed Building was Made in Dubai, (2020). <https://www.manufacturingtomorrow.com/article/2020/01/the-largest-in-the-world-3d-printed-building-was-made-in-dubai/14634>.
29. Apis Cor, (2019). <https://apis-cor.com/2019/12/19/dubai-unveils-the-worlds-largest-3d-printed-building-by-apis-cor>.
61. Ibragimov, R.A., Korolev, E.V., Kayumov, R.A., Deberdeev, T.R., Leksin, V.V., Sprince, A. Efficiency of activation of mineral binders in vortex-layer devices. Magazine of Civil Engineering. 2018. 82(6). Pp. 191–198. DOI: 10.18720/MCE.82.17
62. N. Ranjbar, M. Zhang, Fiber-reinforced geopolymer composites: A review, Cem. Concr. Compos. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498>
63. S.V. Samchenko, O.V. Aleksandrova, A.A. Zaitseva Aerated Concrete Based on Cullet and Liquid Glass // Materials Science Forum. ISSN: 1662-9752. Volume 974. - 2020. pp. 362-366. - <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.362> .

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of sciences (postdoctoral students) in order to defend their doctoral dissertation, perform research work, as well as perform labor functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan".

Ибрагимов Руслан Абдирашитович – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологии строительного производства, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Российская Федерация.
E-mail: rusmag007@yandex.ru

Кебир Айгуль Зара – доктор философии (PhD), сотрудник отдела исследований и разработок, Elkon A.S., Черкезкёй, Турция.
E-mail: zarakebir16@gmail.com

Уйсал Муджетеба – доктор философии (PhD), профессор факультета гражданского строительства, кафедра гражданского строительства, Технический университет Йылдыз, Стамбул, Турция.
E-mail: mucteba@yildiz.edu.tr

Орхан Джанполат – доктор философии (PhD), профессор факультета гражданского строительства, кафедра гражданского строительства, Технический университет Йылдыз, Стамбул, Турция.
E-mail: canpolat@yildiz.edu.tr

Федюк Роман Сергеевич – д.т.н., доцент, главный научный сотрудник Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация, Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт строительства, г. Владивосток, Российская Федерация,
E-mail: roman44@yandex.ru

Ушков Валентин Анатольевич – д.т.н., доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация.
E-mail: va.uschkov@yandex.ru

Зигангирова Лейсан Идрисовна – ассистент кафедры Технологии строительного производства, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Российская Федерация.
E-mail: zigangirova.98@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ibragimov Ruslan Abdirashitovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction Production Technology, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation.
E-mail: rusmag007@yandex.ru

Kebir Aygul Zara – doctor of philosophical sciences (PhD), Research and Development Officer, Elkon Inc. (A.S.), Cherkezoy, Turkey.
E-mail: zarakebir16@gmail.com

Uysal Mucteba – doctor of philosophical sciences (PhD), Professor, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey.
E-mail: mucteba@yildiz.edu.tr

Orhan Canpolat – doctor of philosophical sciences (PhD), Professor, Faculty of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey.
E-mail: canpolat@yildiz.edu.tr

Fedyuk Roman Sergeyevich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Scientific Associate, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russian Federation, Branch of FGBU "Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction of Russia" Far Eastern Research, Design and Technological Institute of Construction, Vladivostok, Russian Federation.
E-mail: roman44@yandex.ru

Ushkov Valentin Anatolievich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation.
E-mail: va.uschkov@yandex.ru

Zigangirova Leysan Idrisovna - Assistant, Department of Construction Production Technology, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation.
E-mail: zigangirova.98@mail.ru

The authors declare that there is no conflict of interest.