

УДК 691.3; 69.01

Тип статьи: обзорная статья

ГРНТИ 67.09.33

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия

EDN fdnpwh

DOI 10.62980/2076-0655-2024-384-394

ТЕНДЕНЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ДИЗАЙНЕ АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ

Земскова О.В.¹, Филимонов А.А.¹, Борисенков Н.С.¹, Шаповалова И.А.¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

АННОТАЦИЯ

Аддитивные технологии расширяют границы творческих возможностей и позволяют создавать неповторимые объекты и элементы в сфере дизайна архитектурной среды. В статье рассмотрены современные технологии 3D – печати с целью их применение в сфере дизайна архитектурной среды. Выделены задачи дизайнера архитектурной среды. Подробно освещен процесс проектирования дизайнерских объектов с помощью методов 3D – печати: макетирование. Отмечена значимость стадии прототипирования как стадии, на которую аддитивные технологии влияют сильнее всего. Особо акцентируется внимание на применяемых материалах для создания объектов дизайна архитектурной среды при использовании различных методов 3D - печати. Анализируются проблемы 3D-печати цементными смесями и бетонами, связанные с их физико-химическими свойствами. Определены тенденции применения аддитивных технологий в сфере дизайна архитектурной среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дизайн, архитектурная среда, 3D печать, аддитивная технология, макет, бетон, гипс, порошок, адгезия, поверхностно-активные вещества (ПАВ)

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Земскова О.В., Филимонов А.А., Борисенков Н.С., Шаповалова И.А. Тенденции применения аддитивных технологий в дизайне архитектурной среды // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 4. – С. 384-394, DOI 10.62980/2076-0655-2024-384-394, EDN fdnpwh

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN fdnpwh

DOI 10.62980/2076-0655-2024-384-394

TRENDS IN THE ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY IN THE FIELD OF ARCHITECTURAL ENVIRONMENT DESIGN

Zemskova O.V.¹, Filimonov A.A.¹, Borisenkov N.S.¹, Shapovalova I.A.¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering

ABSTRACT

Additive technologies expand the boundaries of creative possibilities and allow to create unique objects and elements in the field of architectural environment design. The article discusses modern 3D printing technologies in the field of architectural environment design. The tasks of the architectural environment designer are highlighted. The process of objects layout design using 3D printing methods is covered in detail. The importance of the prototype creation stage is noted as the stage that additive technologies influence the most. Special attention is paid to the materials used to create architectural environment design objects using various 3D printing methods. The problems of 3D printing with cement mixtures and concretes related to their physical and chemical properties are analyzed. The trends in the application of additive technologies in the field of architectural environment design are determined.

KEY WORDS: design, architectural environment, 3D printing, additive technology, layout, concrete, gypsum, powder, adhesion, surfactants

FOR CITATION: Zemskova O.V., Filimonov A.A., Borisenkov N.S., Shapovalova I.A. Trends in the additive manufacturing technology in the field of architectural environment design // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No4. – Pp. 384 – 394, DOI 10.62980/2076-0655-2024-384-394, EDN fdnpwh

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уделяется внимание не только конструктиву, но и эстетичности и многофункциональности в проектировании объектов гражданского строительства. В связи с чем успешно развивается такое направление в архитектуре и строительстве, как дизайн архитектурной среды. Этот вид проектной деятельности сфокусирован на оптимизации функциональных процессов жизнедеятельности человека и повышении ее эстетического уровня, сочетает в себе элементы дизайна, архитектуры и строительства.

Можно выделить следующие первостепенные задачи дизайнера архитектурной среды [1-3]:

- Проектирование зданий и сооружений: создание экстерьеров и интерьеров помещений, построек.
- Предварительное моделирование будущего объекта с помощью современных систем и устройств в двух- и трёхмерной визуализации.
- Оформление проекта или концепции по возведению, оптимизации, реконструкции или реставрации зданий и сооружений.
- Учет действующих строительных и правовых аспектов в сочетании с творчеством: подбор цветовой гаммы, способа оформления, расположение отдельных составляющих предметов, выбор материалов и пр.
- Выбор правильного и комфортного освещения, акцентирующегося на достоинстве места.

Современный дизайн архитектурной среды – это сфера динамического использования аддитивных технологий. Развитие цифровизации послужило источником для их создания. Аддитивные технологии или аддитивное производство (англ. additive manufacturing – AM) — это процесс формирования цельных трехмерных объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели с помощью 3D-печати. AM позволяет: интенсифицировать процесс создания объектов архитектуры; выполнять элементы дизайна по заданным параметрам; организовать серийное производство; уменьшить стоимость производства и объём отходов; использовать меньше материалов и т.д. [4-5].

Методы 3D-печати в дизайне архитектурной среды

3D-печать на принтере может выполняться разными способами и с применением разнообразных материалов, но любой из способов базируется на принципе послойного создания («выращивания») твердого объекта [6-7]. Она предлагает два существенных новых решения: управление объектами в цифровом формате и создание новых форм посредством добавления материала.

В дизайне архитектурной среды для 3D-печати объекта могут использоваться следующие методы [8]:

- **Экструзионный.** Он предполагает создание слоёв за счёт продавливания расходного материала (экструзии) в виде: тонких струй, микрокапель или бетонной смесью - 3D-печать бетоном, строительная печать. Технология тонких струй состоит в следующем: пластиковая нить расплавляется и при помощи экструдера наносится, послойно, формируя изделие. Технология микрокапель, заключается в формировании объектов путем расплавления и экструзии пластиковой нити через сопло 3D-принтера. Материалом для рассмотренных технологий служат термопластики, такие как полилактид (PLA-пластики),

INTRODUCTION

Currently, special attention is paid not only to the design, but also to aesthetics and versatility in the design of civil engineering objects. Consequently, the design of the architectural environment is successfully developing. This type of project activity is focused on optimizing the functional processes of human life and improving its aesthetic level, combines elements of design, architecture and construction.

The following primary tasks of an architectural environment designer can be distinguished [1-3]:

- Design of buildings and constructions: creation of exteriors and interiors.
- Preliminary modeling (prototyping) of the future object using modern systems and devices in two- and three-dimensional visualization.
- Design of a project or concept for the construction, optimization, reconstruction or restoration of buildings and structures.
- Consideration of existing construction and legal aspects together with creativity: selection of colors, design method, location of individual constituent items, choice of materials, etc.
- Choosing the lighting options, emphasizing the dignity of the location.

The modern design of the architectural environment is a sphere of dynamic application of additive technologies, where the development of digital technologies is regarded as a source for their creation. Additive manufacturing (AM) is the process of forming integral three-dimensional objects of almost any geometric shape based on a digital model using 3D printing. AM allows to intensify the process of creating architectural objects; perform design elements according to specified parameters; organize mass production; reduce the cost of production and the amount of waste; use less materials, etc. [4-5].

3D printing methods in the design of an architectural environment

3D printing on a printer device can be performed in different ways and using a variety of materials, but any of the methods is based on the principle of layered creation ("growing") of a solid object [6-7]. It offers two significant new solutions: the management of objects in digital format and the creation of new forms through the addition of material.

The following methods can be used in the design of an architectural environment for 3D printing of an object [8]:

- **Extrusion.** It involves the creation of layers by pushing the material out in the form of thin streams, micro drops or concrete mixture - 3D printing with concrete, construction printing. In the process of Fused Deposition Modelling, or Fused Filament Fabrication, a plastic filament is melted and applied by means of an extrusion device in layers, forming a layered product. The technology of micro drops consists in the formation of objects by melting and extrusion of plastic filament through the nozzle of a 3D printer. The materials for these technologies are thermoplastics such as polylactide (PLA plastics),

акрилонитрилбутадиенстирол (ABS-пластики), поликарбонат, полиэтилен высокого давления, смеси поликарбоната и ABS-пластика, полифениленсульфон и др. [9]. Технология печати 3D-бетоном заключается в нанесении слоя бетонной смеси по предварительно заданному плану с помощью 3D-принтера. Через специальную насадку равномерно наносятся бетонные слои, создавая структуру объекта. Печать осуществляется из обычных строительных материалов: пескобетона, геополимерного бетона, сложных строительных органоминеральных смесей [10-11]. Для улучшения технологических свойств бетонной смеси для 3D-печати вводятся суперпластификаторы и минеральные добавки – доменные шлаки, золы уноса, микрокремнезем и т.д., в том числе и в тонкодисперсном виде [12-14].

- **Порошковый метод** базируется на плавке или сплавлении материалов для создания слоев. К нему относится выборочное лазерное спекание пластикового порошка (SLS-технология). Послойное спекание гранулированных полимеров проходит под воздействием лазера, который сканирует материал по заданному направлению, расплавляя его. В результате соединения расплавленных частиц формируется спекшийся слой. Материалом для данного метода служат термопластики, металлические и керамические порошки. Технология позволяет создавать объекты и изделия сложной геометрической формы, обладающие высокой механической прочностью, а также воспроизводить элементы с высокой точностью [15-16].

- **Струйный метод** 3D-печати осуществляется нанесением на тонкие слои порошка связующего клеящего материала в соответствии с контурами последовательных слоев цифровой модели. Процесс повторяется до получения готовой модели [17-18]. Технология струйной трехмерной печати использует следующие разновидности порошковых материалов:

- Керамический порошок. Мелкодисперсная сыпучая смесь, позволяющая печатать изделия различных оттенков, фактур, обладающие различными механическими свойствами. Готовый продукт требует обжига и глазурирования.
- Графен – монокристаллическая углеродная модификация графита с уникальными физико-химическими свойствами.
- Металлические порошки – порошки из металлов, смеси металлов, смеси неметаллов с металлами.
- Цементные полимеры – порошкообразные материалы, идентичные бетону, улучшающие физические свойства полимеров.
- Гипсовый порошок – печать на 3D принтере превращает этот материал в удобный материал с различными декоративными и физическими свойствами, например, в аналог песчаника с оптимизированными механическими свойствами.
- Композитный порошок на основе гипса - гипс с добавкой полимера. Добавка полимера положительно влияет на физико-механические и деформативные свойства гипсовых изделий.
- Штукатурка – порошковая смесь для трёхмерного принтера, придающая облицовочным поверхностям новые качества.

Технология струйной трехмерной печати обеспечивает широкий диапазон применения, включая создание цветных моделей, навесных конструкций, использование эластомеров. Конструкция моделей может быть усилена за счет последующей пропитки воском или полимерами.

acrylonitrile butadiene styrene (ABS plastics), polycarbonate, high-pressure polyethylene, mixtures of polycarbonate and ABS plastic, polyphenylene sulfone, etc. [9]. 3D concrete printing technology consists in applying a layer of concrete mixture according to a predetermined plan using a 3D printer. Concrete layers are evenly applied through a special nozzle, creating the structure of the object. Printing is carried out from conventional building materials: sand concrete, geopolymer concrete, complex building organomineral mixtures [10-11]. To improve the technological properties of the concrete paste for 3D printing, superplasticizers and mineral additives are introduced - blast furnace slags, fly ash, silica, etc. [12-14].

- **The powder method** is based on melting or fusing materials to create layers. This includes Selective Laser Sintering of plastic powder (SLS technology). The layered sintering of granular polymers takes place under the influence of a laser, which scans the material in the required direction, melting it. As a result of the fusion of the molten particles, a sintered layer is formed. The materials for this method are thermoplastics, metal and ceramic powders. The technology allows to create objects and products of complex geometric shapes with high mechanical strength, to reproduce elements with high accuracy [15-16].

- **Binder jetting** is carried out by applying a binder adhesive material to thin layers of powder in accordance with the contours of successive layers of a digital model. The process is repeated until the finished model is obtained [17-18]. The technology of 3D printing printing uses the following types of powder materials:

- Ceramic powder. A fine-dispersed bulk mixture that allows to print products of different shades and textures with various mechanical properties. The finished product requires calcination and glaze coating.
- Graphene is a monoatomic carbon modification of graphite with unique physical and chemical properties.
- Metal powders – powders of metals, mixtures of metals, mixtures of non-metals with metals.
- Cement polymers are powdered materials identical to concrete that improve the physical properties of polymers.
- Gypsum powder – 3D printing transforms this material into a convenient material with various decorative and physical properties, for example, an analogue of sandstone with optimized mechanical properties.
- Gypsum-based composite powder - gypsum with polymer additive. The polymer additive has a positive effect on the physical, mechanical and deformative properties of gypsum products.
- Plaster is a powder mixture for a 3D printing which gives new qualities to the facing surfaces.

The technology of Binder Jetting provides a wide range of applications, including the creation of color models, hinged structures, and the use of elastomers. The design of the models can be reinforced by subsequent impregnation with wax or polymers.

Photopolymerization. The main idea of this method is the layer-by-layer curing of a liquid polymer in a container under the UV irradiation by a laser beam. The technology of liquid polymer photopolymerization of a is called stereolithography – SLA. SLA technology uses photopolymer resins. A photopolymer or light-activated resin is a polymer that changes its properties when exposed to light. The chemical composition is usually a trade

Фотополимеризация. Сущность метода в послойном отверждении жидкого полимера в емкости под действием ультрафиолетовой засветки лазерным лучом. Технология фотополимеризации жидкого полимера получила название стереолитография – SLA. Технология SLA использует фотополимерные смолы. Фотополимер или активируемая светом смола — это полимер, который меняет свои свойства под воздействием света. Химический состав обычно является коммерческой тайной, но в общем смесь состоит из мономеров, олигомеров и фотоинициаторов. Олигомеры представляют собой эпоксидные смолы, уретаны, простые или сложные полиэферы, каждый из которых придает определенные свойства полученному материалу. Обычно каждый из этих олигомеров функционализирован акрилатом. Примерами фотоинициаторов могут быть бензофенон, ксантоны и хиноны, при этом общими донорными соединениями являются алифатические амины [19].

Технология SLA позволяет изготавливать не только объекты со сложными геометрическими формами, но и имитировать прозрачные материалы. Однако изделия из фотополимеров деструктурируются под воздействием УФ-лучей.

Проектирование дизайнерских объектов с помощью 3D-печати

В настоящее время аддитивные технологии находят применение в дизайне архитектурной среды в реальности. Методы 3D-печати имеют сильные стороны по сравнению с традиционными методами. Именно поэтому они интегрированы в дизайн архитектурной среды и определяют тенденции применения аддитивных технологий.

Благодаря своим исключительным возможностям 3D-технологии используются в процессе проектирования, разработки прототипов зданий и даже в некоторых случаях в реализации готовых проектов. Одной из областей проектирования является макетирование [20].

Создание цветных макетов и композиций архитектурных и дизайнерских объектов осуществляется 3D-печатью быстро и качественно. Для этого требуется 8-10 часов, а используя традиционные методы макетирования не меньше месяца. При этом воплощаются самые необычные архитектурные решения с помощью робота-3D-принтера (рисунок 1).

secret, but in general the mixture consists of monomers, oligomers and photoinitiators. Oligomers are epoxy resins, urethanes, polyesters or polyesters, each of which gives certain properties to the resulting material. Usually, each of these oligomers is functionalized with acrylate. Examples of photoinitiators can be benzophenone, xanthenes and quinones, while aliphatic amines are common donor compounds [19].

SLA technology makes it possible to produce not only objects with complex geometric shapes, but also to simulate transparent materials. However, products made of photopolymers are degraded by UV rays.

Designing objects using 3D printing

Currently, additive manufacturing is applied in the design of the architectural environment. 3D printing methods have its advantages compared to traditional methods. That is why they are integrated into the design of the architectural environment and determine the trends in the application of additive technologies.

Due to its exceptional capabilities, 3D printing is applied in the design process, the development of buildings prototypes, in the finished projects or layout design [20]. The creation of color layouts and compositions of architectural and design objects is carried out by 3D printing quickly and efficiently. It takes only 8-10 hours for realization, and using traditional layout methods the process may last for at least a month. At the same time, the most unusual architectural solutions are implemented using a 3D printing robot (Figure 1).

РИСУНОК 1

МАКЕТИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ РОБОТА*

*Рисунок взят из открытого источника информации

Figure 1

Layout implementation by 3D printing robot

*The picture is taken from open source



Аддитивные технологии позволяют создавать дизайнеру различные макеты (рисунок 2): градостроительный, например макет микрорайона или целого города (рисунок 2а); ландшафтный, например, миниатюрная копия ландшафта, местности (рисунок 2б); интерьерный, например, макет внутреннего устройства квартиры, дома или офиса (рисунок 2в). Аддитивные технологии воссоздают реалистичные модели ландшафтов, отражающие их особенности и преимущества.

Additive technologies allow the designer to create various layouts (Figure 2): urban planning, for example, a layout of a district or an entire city (Figure 2a); landscape, for example, a miniature copy of the landscape (Figure 2b); layout of the apartment interior, house or office (Figure 2b). Additive manufacturing technologies recreate realistic models of landscapes reflecting their features and advantages.

РИСУНОК 2

МАКЕТЫ, СОЗДАННЫЕ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ*

- а) архитектурный проект городской зоны;
- б) ландшафтный макет в 3D-печати;
- в) макет интерьера квартиры в 3D-печати

*Рисунок взят из открытого источника информации



Figure 2

Layouts created using additive manufacturing technologies*

- a) architectural project of an urban area;
- b) landscape layout;
- c) layout of the apartment interior

*The pictures are taken from an open source

Макеты визуализируют проект, что помогает извлечь информацию о свойствах проектируемого объекта: структуре объекта, размерах, пропорциях и масштабах, структуре поверхности, пространственном размещении, цветовой гамме.

Стандартным этапом в процессе 3D-печати является создание трёхмерной модели. Программное обеспечение 3D-моделирования для проектирования прототипов деталей, зданий, реальных конструкций и изделий, масштабных моделей проекта разнообразно и доступно. После построения цифрового файла дизайнеры обычно приступают к 3D-печати прототипа.

Прототипирование - процесс формирования первичной версии архитектурного элемента, изделия, макета или модели здания. Это стадия, на которую аддитивные технологии влияют сильнее всего. 3D-модели из картона создавались долго, а 2D-версии были не реалистичны. Сегодня аддитивные технологии позволяют получить детализированные трехмерные прототипы за короткое время и с небольшими усилиями. Многогранность 3D-принтеров дает возможность проявить большую свободу дизайнера, например, печатать прототипы с новой сложной геометрической формой (рисунок 3).

Прототипирование (первообраз) наглядных моделей зданий 3D-печатью воплощает идеи дизайнера в реальность, помогает проверить их на практике до начального этапа строительства, уменьшает риск ошибок и оптимизирует процесс проектирования. Физическая модель иллюстративно может представить замысел заказчику, что не делает изображение на мониторе.

3D-печать при изготовлении макетов и прототипов осуществляется по всем методам аддитивных технологий, в которых соблюдается послойное создание (выращивание) сохраняющего форму объекта.

Layouts visualize the project, which helps to extract information about the properties of the future final object: the structure of the object, dimensions, proportions and scales, surface structure, location and color scheme.

The standard step in the 3D printing process is the creation of a three-dimensional model. 3D modeling software for creating detailed prototypes of buildings, real structures and products, scale models of the project is diverse and available. After creating a digital file, the designers usually start prototype 3D printing process.

Prototyping is the process of forming the primary version of an architectural element, product, layout or model of a building. This is the stage that additive manufacturing technologies affect the most. Earlier the process of cardboard 3D model creation was very time-consuming and 2D versions were not realistic. Today, additive technologies make it possible to obtain detailed three-dimensional prototypes in a short time with little effort. The versatility of 3D printing makes it possible to display greater design freedom, for example, to print prototypes with a new complex geometric shape (Figure 3).

Prototyping (prototype) of visual models of buildings with 3D printing conveys the designer's ideas into reality, helps to test them in practice before the initial stage of construction, reduces the risk of errors and optimizes the design process. The physical model can illustratively present the idea to the customer, which does not make the image on the monitor.

3D printing in the manufacture of layouts and prototypes is carried out using all methods of additive technologies where layered creation ("growing") of the object.

РИСУНОК 3

АРХИТЕКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ЗДАНИЯ*

*Рисунок взят из открытого источника информации

Figure 3

Architectural model of the building

*The pictures are taken from an open source



Быстрыми и относительно дешевыми являются SLS технология и струйная 3D-печать порошками разного состава. Есть нечто особенное в технологии струйной 3D-печати, использующей композитный гипсовый порошок и клеящее связующее: в клей можно внести красящие вещества и получить модель и объемной, и полноцветной, то есть в результате мы имеем цветную струйную печать – CJP [21, 22]. Эта возможность бесценна при планировании ландшафтного дизайна, также формирования карт местности и макета зданий.

Актуальным является вопрос применения напечатанных макетов зданий для отработки обеспечения режимов окружающей среды, имитирующих естественные [23], искусственные и совмещенные источники освещения [24]. Несмотря на потенциальную актуальность исследований в данной сфере [25] в настоящее время в силу неразвитости рынка систем человеко-ориентированного освещения, проведение натурных экспериментов на существующих объектах капитального строительства становится затруднительным, таким образом, применение масштабных макетов может стать важным шагом, направленным на продвижение указанной концепции систем освещения [21].

Аддитивные технологии в дизайне архитектурной среды используются и при создании реальных эксклюзивных декоративных объектов и деталей для интерьеров и экстерьеров. Процесс создания включает: разработку трехмерной модели по рисунку или эскизу; 3D- печать изделия и финишную обработку. Материалы, из которых выполняется изделие, имеют первостепенное значение для выбора 3D – технологии. Кроме того, именно свойства материалов – физические, химические, физико-химические, механические, реологические и т.д. определяют вид и функции декоративных элементов. Актуальными материалами у дизайнеров-новаторов, создающих свои изделия с помощью 3D-печати, является бетон и цементные сухие смеси, которые постоянно модифицируются [26-28].

Коллоидно-химические аспекты 3D-печати цементных смесей и бетона

Существует ряд проблем 3D-печати цементными смесями и бетонами, связанных с их физико-химическими свойствами, а именно с реологическими свойствами и адгезией.

Реологическими свойствами материалов для аддитивных технологий можно управлять введением суперпластификаторов, поверхностно-активных веществ (ПАВ). Они позволяют контролировать технологические свойства состава бетонной смеси для 3D-принтера. Под действием ПАВ происходит переход бетонной смеси в

SLS technology and 3D Binder Jetting with powders of different compositions are fast and relatively cheap. There is something special about 3D Binder Jetting technology using composite gypsum powder and an adhesive binder: coloring agents can be added to the binder and a model can be obtained colored - as a result we have Color Jet Printing – CJP [21, 22]. This is valuable when planning landscape design, as well as the creation of three-dimensional maps of the area and the layout of buildings.

An urgent issue is the use of printed building layouts to test the environmental modes that simulate natural [23], artificial and combined lighting sources [24]. Despite the potential relevance of research in this area [25] currently, due to the poor development of the human centric lighting systems market, conducting field experiments on existing capital construction facilities becomes difficult. Therefore, the use of scale layouts can be an important step aimed at promoting this concept of lighting systems [21].

Additive technologies in the design of the architectural environment are also used in the creation of real unique decorative objects and details for interiors and exteriors. The creation process includes the development of a three-dimensional model based on a drawing or sketch; 3D printing of the layout and finishing. The nature of layout materials is significant for the choice of 3D technology. In addition, the properties of materials – physical, chemical, mechanical, rheological, etc. determine the type and functions of decorative elements. The most relevant materials for innovative designers who create their products using 3D printing are concrete and cement dry mixes, which are constantly being modified [26-28].

Surface chemistry aspects of 3D printing technology for cement mixtures and concrete

There are a number of problems with 3D printing technology applied for cement mixtures and concretes related to their physical and chemical properties, such as rheology and adhesion.

The rheological properties of materials for additive technologies can be controlled by the introduction of superplasticizers and surface active substances (surfactants). They allow to control the technological properties of the concrete mixture composition for 3D printing.

свободнодисперсное состояние, необходимое для прокачки рабочей массы из питающего резервуара к печатующему соплу принтера и дальнейшей экструзии. Добавление ПАВ позволяет сочетать одновременно с подвижностью бетонной массы и сохранение ее формы при последовательном нанесении слоев. Увеличение количества воды приводит к росту подвижности бетонной смеси, дисперсной системы «жидкое в твердом» с коагуляционной структурой. Однако при этом теряется свойство этих структур – тиксотропия (восстановление структуры после снятия нагрузки), обеспечивающая рост прочности. Наличие суперпластификатора в составе, позволяет увеличивать подвижность без изменения жёсткости и снижения прочностных характеристик бетона [29-31].

Специфика 3D-печати цементными смесями и бетонами состоит в том, что отсутствуют арматурные выпуски и не проводится виброуплотнение уложенных слоев бетона. Ввиду этого поддержка адгезии (сцепления) формируемых методом экструзии слоев бетонной смеси представляет собой значимую проблему. Качественное сцепление исключает отслоение или смещение конструкции во время процесса 3D - печати, увеличивает ее надёжность и прочность. Для улучшения адгезии при 3D-печати цементными и бетонными смесями можно применять следующие методы:

- Использование полимерных добавок – адгезионных редиспергируемых полимерных порошков (РПП). Модифицирование сырьевых смесей позволяет повысить величину адгезии напечатанных слоёв за счёт образования полимерной плёнки на границе контакта слоёв [32 - 35].

В качестве адгезионных РПП можно рекомендовать к использованию редиспергируемый полимерный порошок Repol F-14B (10%) на основе поливинилацетата с удельной поверхностью $S_{уд} = 834 \text{ м}^2/\text{кг}$, а также полимерные порошки поливинилацетата и (или) его сополимеров по ТУ 20.52.10 - 021 - 51375167 - 2017 Порошки полимерные редиспергируемые "Repol" [36-37].

- Использование известкового наполнителя и метаксаолина. Эти компоненты могут повысить величину адгезии слоёв в цементных смесях для 3D-печати. Известняковая мука как полифракционный наполнитель позволяет эффективно регулировать структурно-механические свойства цементных систем. Её аморфная структура обеспечивает более высокую пластичность, агрегативную устойчивость и структурную прочность свежеприготовленной смеси при действии нагрузки. Метаксаолин также регулирует структурно-механические свойства цементной системы за счёт сходного кристаллохимического строения. В силу развитой и активной поверхности метаксаолин проявляет способность к формированию полимолекулярных слоёв адсорбированной воды на поверхности, что способствует повышению агрегативной устойчивости и структурной прочности цементной системы [32,38,39].

- Использование фиброволокна. Оно армирует бетон изнутри, не позволяет появляться трещинам и значительно увеличивает прочность. Для 3D-печати чаще всего используют базальтовую фибру. Для увеличения прочности и жёсткости бетона можно применять полиолефиновые волокна. Их можно смешивать с бетоном в больших количествах, вплоть до 20% (по объёму), не вызывая образования комков, сегрегации бетона. Бетонная смесь с такими волокнами, имеет низкую плотность, а также химически инертна [32,37-38, 40-41].

Surfactants turn the concrete mixture into a free-dispersed state, which is necessary for pumping the working mass from the feed tank to the printing nozzle of the printing device and further extrusion. The addition of surfactants provides the concrete mixture with workability and makes it keep the shape during the process of layers application. An increase in the water amount leads to an increase in the mobility of the concrete mixture, a dispersed liquid-in-solid system with a coagulation structure. However, thixotropy (restoration of the structure after removing the load) is lost which ensures the strength increase. The presence of a superplasticizer in the composition makes it possible to increase mobility without reducing the strength characteristics of concrete [29-31].

The main features of 3D printing with cement and concrete mixtures and concretes is that there are no reinforcing outlets and vibration compaction of the concrete layers is not carried out. Therefore, adhesion of concrete layers formed by extrusion is a significant problem. High-quality adhesion eliminates displacement of the structure during the 3D printing process, increases its reliability and strength.

To improve adhesion in 3D printing with cement and concrete mixtures, the following methods can be used:

- The use of polymer additives – adhesive redispersible polymer powders (RPP). Modification of raw materials mixtures makes it possible to increase the adhesion of printed layers due to the formation of a polymer film at the interface of the layers [32-35].

As adhesive RPP, it is recommended the use redispersible polymer powder Repol F-14B (10%) based on polyvinyl acetate with a specific surface area $S_d = 834 \text{ м}^2/\text{кг}$, as well as polymer powders of polyvinyl acetate and (or) its copolymers according to Russian Technical Specifications 20.52.10 - 021 - 51375167 - 2017 Redispersible polymer powders, "Repol" [36-37].

- The use of lime filler and metakaolin. These components can increase the adhesion of cement layers. Limestone powder as a polyfractional filler makes it possible to regulate the structural and mechanical properties of cement systems. Its amorphous structure provides higher plasticity, stability to aggregation and structural strength of fresh mixture under load. Metakaolin also regulates the structural and mechanical properties of the cement system due to a similar crystal structure. Due to the high active surface, metakaolin exhibits the ability to form poly-molecular layers of adsorbed water on the surface, which contributes to an increase in the aggregate stability and structural strength of the cement system [32,38,39].

- The use of fiber. It reinforces concrete structure, prevents cracks and significantly increases strength. Basalt fiber is most often used for 3D printing. Polyolefin fibers can be used to increase the strength and rigidity of concrete. They can be mixed with concrete in large quantities, up to 20% (by volume), without causing the formation of lumps or concrete segregation. The fiber modified concrete mixture has a low density and chemically inert [32,37-38, 40-41].

Тенденции применения аддитивных технологий в сфере дизайна архитектурной среды

Остановимся на некоторых примерах применения аддитивных технологий в дизайне архитектурной среды. Экструзивным методом из бетона изготавливают малые архитектурные формы, фасадный декор с неповторимыми текстурами и деталями, притягивающими внимание к зданию. 3D-печатью реализуют конструкции из бетона со сложной геометрией, выполняющие определенную функциональную роль при формировании городской среды: скамейки, уличные светильники, уличная мебель, лавочки, вазоны, пешеходные мосты и т.д. (рисунок 4). Осуществляют 3D печать и светопропускающим или полупрозрачным бетоном. 3D печать позволяет создавать сложные формы изделий и обеспечивать светопропускание там, где это необходимо в рамках дизайн проекта.

Trends in the application of additive technologies in the field of architectural environment design

Small architectural forms, facade decor with unique textures and details that attract attention to the building are made of concrete using the extrusion method. 3D printing implements concrete structures with complex geometry that perform a certain functional role in the urban environment: benches, street lamps, outdoor furniture, benches, flowerpots, pedestrian bridges, etc. (Figure 4). 3D printing is also carried out with light-transmitting or translucent concrete. 3D printing allows to create complex shapes and provide light transmission within the framework of a design project.

РИСУНОК 4

ПРИМЕРЫ ПЕЧАТИ ИЗДЕЛИЙ НА 3D-ПРИНТЕРЕ*

а) 3D- печать бетоном на 3D принтере S-6044 LONG;

б) Комплект уличной мебели из бетона, напечатанной на принтере S-6044 LONG;

в) Мост, напечатанный на 3D принтере, Испания

г) Светильник, напечатанный на 3D принтере из полупрозрачного бетона

*Рисунок взят из открытого источника информации

Figure 4

3D printing objects*

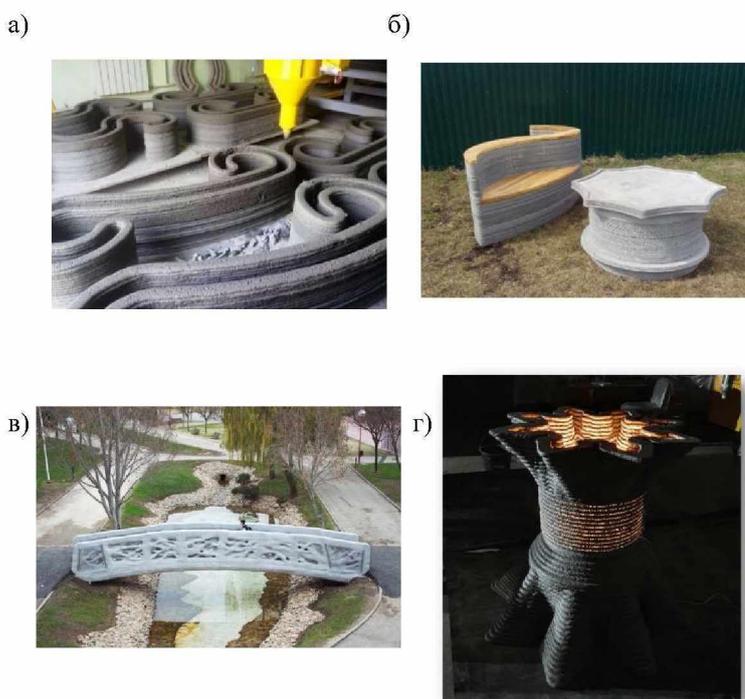
a) 3D printing process with concrete on the S-6044 LONG 3D printer;

b) Concrete outdoor furniture printed on the S6044 LONG printer;

c) 3D printed bridge, Spain

d) 3D printed lamp made of translucent concrete

*The pictures are taken from an open source



Заключение

Аддитивные технологии стремительно охватывают сферу дизайна архитектурной среды. Методы 3D -печати предоставляют широкие возможности для претворения в жизнь самых фантастических объектов дизайна благодаря разнообразию материалов, в том числе и строительных. Аддитивные технологии определили основные тенденции развития дизайна архитектурной среды: макетирование, прототипирование и создание реальных уникальных декоративных объектов и деталей для интерьеров и экстерьеров.

Одними из главных преимуществ аддитивных технологий в дизайне архитектурной среды являются:

- высокое качество напечатанных объектов. Объекты 3D-печати абсолютно идентичны оригиналам, не нуждаются в случае необходимости в покраске. Цвет изделия в мельчайших оттенках воспроизводится на оборудовании в течение печати;

Conclusion

Additive technologies are rapidly embracing the field of architectural environment design. 3D printing methods provide opportunities to bring the most fantastic design objects into real life due to a variety of materials, including construction materials. Additive manufacturing technologies determine the main trends in the development of architectural environment design: layout, prototyping and creation of real unique decorative objects and details for interiors and exteriors.

One of the main advantages of additive technologies in the design of the architectural environment are:

- High quality printed objects. 3D printing objects are absolutely identical to the originals and do not need painting if necessary. The color of the product in the smallest shades is reproduced on the equipment during printing;
- The possibility of using both traditional building materials and new composite materials that ensure the creation of

• возможность использования как традиционных строительных материалов, так и новых композитных материалов, обеспечивающих создание сложной геометрической формы изделия, а также светопреломления.

Для создания макетов, прототипов и реальных объектов дизайнеры используют чаще всего гипс, полимеры и бетон. Именно свойства материала определяют технологию 3D-печати, свойства и функции напечатанного объекта.

Установлено, что при использовании цементных смесей и бетона в аддитивных технологиях необходимо учитывать их реологические и физико-химические свойства.

Литература:

1. Шувалова Е.М., Малышева С.Г. Роль дизайн-технологий в архитектурной среде и социальном прогрессе // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т.7. – № 2 (27). – С. 85-88.
2. Yusupova A.A., Yusupov A.N., Mamitova A.D., Nsanbayev B.S., Shagayeva A.E. The optimal parameters of elements of landscape architecture // Вестник науки Южного Казахстана. – 2019. – № 4 (8). – С. 66-71.
3. Кулененок В.В. Дизайн-концепция формирования архитектурной среды города Витебска // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 16. – С. 23-30.
4. Пермяков М.Б., Краснова Т.В., Дорофеев А.В. Аддитивные технологии в строительстве и дизайне архитектурной среды: настоящее и будущее // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2018. – Т. 9. – № 2. – С. 2-5.
5. Мальцева Е.В., Дмитриев А.В. Концепция развития аддитивных технологий в индивидуальном жилом строительстве // Жилищное строительство. – 2023. – № 11. – С. 12-18.
6. Кушнир Н.В., Кушнир А.В., Герашенко А.М., Тьртышный А.В. История и технологии трехмерной печати // Научные труды КубГТУ. – Краснодар, 2015. – №6. – С. 1-9.
7. Славчева Г.С. Строительная 3D-печать сегодня: потенциал, проблемы и перспективы практической реализации // Строительные материалы. – 2021. – № 5. – С. 28–36.
8. Гаренский Д.А., Полякова М.А. Сравнительный анализ методов 3D-печати // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2022. Т. 13. № 1. С. 16-19.
9. Паневчик В.В., Самойлов М.В., Некраха С.В. Безопасность расходных полимерных материалов, применяемых в 3D-технологии // Вестник Белорусского государственного экономического университета. – 2019. – № 3 (134). – С. 87-93.
10. Лам Т.В., Чык Н.Ч., Булгаков Б.И., Александрова О.В. Получение высокопрочного мелкозернистого бетона с помощью технологии 3D-печати // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 9. С. 52-59.
11. Славчева Г.С., Бритвина Е.А., Ибряева А.И. Строительная 3D-печать: оперативный метод контроля реологических характеристик смесей // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2019. – № 4 (41). – С. 134-143.
12. Козлова И.В., Земскова О.В., Леканов Н.А. Варианты введения тонкодисперсной добавки на основе перлита в цементные композиции // Строительные материалы – 2022 – № 11 – С. 42–49.
13. Козлова И.В., Синотова М.В. Варианты применения цеолитов в производстве строительных материалов // Техника и технология силикатов. – 2023. – Т. 30, № 2. – С. 116-128.
14. Kozlova, I., Samchenko, S., Zemskova O. Physico-Chemical Substantiation of Obtaining an Effective Cement Composite with Ultrafine GGBS Admixture, Buildings 2023, 13(4), 925. <https://doi.org/10.3390/buildings13040925>.
15. Кириллова Н.К., Алексеева А.Н., Егорова А.Д. Применение аддитивных технологий в строительстве и при изготовлении керамических изделий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 2. – С. 134-141.

complex geometric shapes as well as transitions of light and shades.

To create layouts, prototypes and real objects, designers most often use gypsum, polymers and concrete. The properties of the material determine the 3D printing technology, properties and functions of the printed final object.

It is established that application of cement and concrete mixtures in additive technologies requires to take into account their rheological, physical and chemical properties.

References:

1. Shuvalova E.M., Malysheva S.G. Rol' dizajn-tehnologij v arhitekturnoj srede i social'nom progresse // *Gradostroitel'stvo i arhitektura*. – 2017. – Т.7. – № 2 (27). – С. 85-88.
2. Yusupova A.A., Yusupov A.N., Mamitova A.D., Nsanbayev B.S., Shagayeva A.E. The optimal parameters of elements of landscape architecture // *Vestnik nauki Juzhnogo Kazahstana*. – 2019. – № 4 (8). – С. 66-71. (in Russian)
3. Kulenenok V.V. Dizajn-koncepcija formirovanija arhitekturnoj srede goroda Vitebska // *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Serija F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. – 2012. – № 16. – P. 23-30. (in Russian)
4. Permjakov M.B., Krasnova T.V., Dorofeev A.V. Additivnye tehnologii v stroitel'stve i dizajne arhitekturnoj srede: nastojashhee i budushhee // *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrazovanija*. – 2018. – Т. 9. – № 2. – P. 2-5. (in Russian)
5. Mal'ceva E.V., Dmitriev A.V. Koncepcija razvitija additivnyh tehnologij v individual'nom zhilom stroitel'stve // *Zhilishhnoe stroitel'stvo*. – 2023. – № 11. – P. 12-18. (in Russian)
6. Kushnir N.V., Kushnir A.V., Gerashhenko A.M., Tyrtysnyj A.V. Istorija i tehnologii trehmernoj pechati // *Nauchnye trudy KubGTU*. – Krasnodar, 2015. – №6. – P. 1-9. (in Russian)
7. Slavcheva G.S. Stroitel'naja 3D-pechat' segodnja: potencial, problemy i perspektivy prakticheskoj realizacii // *Stroitel'nye materialy*. – 2021. – № 5. – P. 28–36. (in Russian)
8. Garen'skij D.A., Poljakova M.A. Sravnitel'nyj analiz metodov 3D-pechati // *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrazovanija*. 2022. Т. 13. № 1. P. 16-19. (in Russian)
9. Panevchik V.V., Samojlov M.V., Nekraha S.V. Bezopasnost' rashodnyh polimernyh materialov, primenjaemyh v 3D-tehnologii // *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo jekonomicheskogo universiteta*. – 2019. – № 3 (134). – P. 87-93. (in Russian)
10. Lam T.V., Chyk N.Ch., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Poluchenie vysokoprochnogo melkozernistogo betona s pomoshh'ju tehnologii 3D-pechati // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2023. № 9. P. 52-59. (in Russian)
11. Slavcheva G.S., Britvina E.A., Ibrjaeva A.I. Stroitel'naja 3D-pechat': operativnyj metod kontrolja reologicheskikh harakteristik smesej // *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. – 2019. – № 4 (41). – P. 134-143. (in Russian)
12. Kozlova I.V., Zemskova O.V., Lekanov N.A. Varianty vvedenija tonkodispersnoj dobavki na osnove perlita v cementnye kompozicii // *Stroitel'nye materialy*. – 2022. – № 11. – P. 42–49. (in Russian)
13. Kozlova I.V., Sinotova M.V. Varianty primenenija ceolitov v proizvodstve stroitel'nyh materialov // *Tehnika i tehnologija silikatov*. – 2023. – Т. 30, № 2. – P. 116-128. (in Russian)
14. Kozlova, I., Samchenko, S., Zemskova O. Physico-Chemical Substantiation of Obtaining an Effective Cement Composite with Ultrafine GGBS Admixture, Buildings 2023, 13(4), 925. <https://doi.org/10.3390/buildings13040925>.
15. Kirillova N.K., Alekseeva A.N., Egorova A.D. Primenenie additivnyh tehnologij v stroitel'stve i pri izgotovlenii keramicheskikh izdelij // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo*

16. Крахматова В.Ю., Захаров А.И., Андреев Д.В., Кривошепов А.Ф. Методы аддитивных технологий для производства керамических изделий // *Стекло и керамика*. 2018. № 12. С. 26-33.
17. Ильющенко А., Талако Т., Лецко А. Аддитивное производство металлических и керамических порошковых материалов // *Наука и инновации*. – 2024. – № 6 (256). – С. 28-37.
18. Бахтина Т.А., Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Николаенко Е.Ю. Разработка материала на основе известково-карбонатно-кальциевых композиций для аддитивных технологий // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. - 2019. - № 4. - С. 8-16.
19. Crivello Ja., Reichmanis E. Photopolymer Materials and Processes for Advanced Technologies // *Chemistry of Materials*. – 2023. – Vol. 26(1) – Pp. 533–548. DOI: 10.1021/cm402262g.
20. Сарсеналиева М. Е. Современные 3D-технологии в архитектуре и строительстве // *Молодой ученый*. – 2022. – № 17 (412). – С. 45-48.
21. Мокеева О.Д., Титова Т.С. 3D-печать архитектурных макетов и перспективы оснащения их инженерными системами в процессе печати // *Молодой ученый*. – 2016. – № 7(111). – С. 128-131.
22. Ревич Ю.В. 3D в натуре // *Компьютерра*. – 2009. – № 8. – С. 37–41.
23. Беккер Ю.Л., Завьялов В.А., Ульянов Р.С., Шиколенко И.А. Актуальность и перспективы концепции квази-естественного освещения // *Естественные и технические науки*. – 2015. – № 5. – С. 143–145.
24. Беккер Ю.Л., Завьялов В.А., Ульянов Р.С., Шиколенко И.А. Выявление ключевых аспектов системы совмещенного освещения с позиции соответствия концепции квази-естественного освещения // *Естественные и технические науки*. – 2015. – № 5. – С. 149–151.
25. Завьялов В.А., Беккер Ю.Л., Ульянов Р.С., Шиколенко И.А. Достижение параметров квази-естественного освещения за счет применения автоматических систем освещения на базе СИД // *Системы. Методы. Технологии*. – 2014. – №4. – С.88-93.
26. Козлова И.В., Дударева М.О. Перспективная добавка на основе системы $TiO_2-Bi_2O_3$ для цементных композитов // *Строительные материалы*. – 2023. – №11. – С.100-103. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-100-103>.
27. Самченко С.В., Егоров Е.С. Управление свойствами цементной пасты при ее модифицировании предварительно гидратированной цементной суспензией // *Техника и технология силикатов*. – 2021. – Т. 28. – № 2. – С. 54-58.
28. Козлова И.В., Нечаев К.В. Влияние тонкомолотого шлака на свойства цемента с минеральными добавками // *Техника и технология силикатов*. – 2018. – Т.25. – №4. - С. 109-114.
29. Ганиев А.Г. Исследование влияния суперпластификатора на свойства бетона // *Актуальные научные исследования в современном мире*. – 2019. – №. 12–1. – С. 41–43.
30. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O. Exploring the Surface Chemistry for the Stabilization of Bismuth Titanate Fine Particle Suspensions in Cement Systems // *Nanotechnologies in construction*. – 2023. – 15 (5). – Pp. 397–407. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-5-397-407.
31. Samchenko, S., Kozlova, I., Zemskova, O., Potaev, D., Tsakhilova, D. Efficiency of stabilization of slag suspensions by polycarboxylate // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 91. - №02039. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102039.
32. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Зиганшина Л.В. Совершенствование аддитивного строительного производства повышением адгезии слоев при длительных перерывах в процессе 3D-печати // *Известия КГАСУ*. – 2024. – № 1(67). – С. 127-134.
33. Tao Y., Yuan Y., Vantghem G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings // *ACI Materials Journal*. – 2021. – Vol. 118. – Iss. 6.
34. Tao Y., Lesage K., De Schutter G., Van Tittelboom K. Adhesion studies in view of automated repair using 3D concrete printing // *MATEC Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 378. – P. 03003.
- tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. - 2020. - № 2. - P. 134-141. (in Russian)
16. Krahmatova V.Ju., Zaharov A.I., Andreev D.V., Krivoshhepov A.F. Metody additivnyh tehnologij dlja proizvodstva keramicheskikh izdelij // *Steklo i keramika*. 2018. № 12. P. 26-33. (in Russian)
17. Il'jushhenko A., Talako T., Lecko A. Additivnoe proizvodstvo metallicheskih i keramicheskikh poroshkovykh materialov // *Nauka i innovacii*. – 2024. – № 6 (256). – P. 28-37. (in Russian)
18. Bahtina T.A., Ljubomirskij N.V., Bahtin A.S., Nikolaenko E.Ju. Razrabotka materiala na osnove izvestkovo-karbonatno-kal'cievykh kompozicij dlja additivnyh tehnologij // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. - 2019. - № 4. - P. 8-16. (in Russian)
19. Crivello Ja., Reichmanis E. Photopolymer Materials and Processes for Advanced Technologies // *Chemistry of Materials*. – 2023. – Vol. 26(1) – Rr. 533–548. DOI: 10.1021/cm402262g.
20. Sarsengalieva M. E. Sovremennye 3D-tehnologii v arhitekture i stroitel'stve // *Molodoy uchenyj*. – 2022. – № 17 (412). – P. 45-48. (in Russian)
21. Mokeeva O.D., Titova T.S. 3D-pechat' arhitekturnykh maketov i perspektivy osnashhenija ih inzhenernymi sistemami v processe pechati // *Molodoy uchenyj*. – 2016. – № 7 (111). – P. 128-131. (in Russian)
22. Revich Ju.V. 3D v nature // *Komp'juterra*. – 2009. – № 8. – P. 37–41. (in Russian)
23. Bekker Ju.L., Zav'jalov V.A., Ul'janov R.S., Shikolenko I.A. Aktual'nost' i perspektivy koncepcii kvazi-estestvennogo osveshhenija // *Estestvennye i tehnicheckie nauki*. – 2015. – № 5. – P. 143–145. (in Russian)
24. Bekker Ju.L., Zav'jalov V.A., Ul'janov R.S., Shikolenko I.A. Vyjavlenie kljuchevykh aspektov sistemy sovmeshhennogo osveshhenija s pozicii sootvetstvija koncepcii kvazi-estestvennogo osveshhenija // *Estestvennye i tehnicheckie nauki*. – 2015. – № 5. – P. 149–151. (in Russian)
25. Zav'jalov V.A., Bekker Ju.L., Ul'janov R.S., Shikolenko I.A. Dostizhenie parametrov kvazi-estestvennogo osveshhenija za schet primeneniya avtomaticheskikh sistem osveshhenija na baze CID // *Sistemy. Metody. Tehnologii*. – 2014. – №4. – P.88-93. (in Russian)
26. Kozlova I.V., Dudareva M.O. Perspektivnaja dobavka na osnove sistemy $TiO_2-Bi_2O_3$ dlja cementnykh kompozitov // *Stroitel'nye materialy*. – 2023. – №11. – P.100-103. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-100-103>. (in Russian)
27. Samchenko S.V., Egorov E.S. Upravlenie svojstvami cementnoj pasty pri ee modifitsirovanii predvaritel'no gidratirovannoj cementnoj suspenzijej // *Tehnika i tehnologija silikatov*. – 2021. – Т. 28. – № 2. – P. 54-58. (in Russian)
28. Kozlova I.V., Nechaev K.V. Vlijanie tonkomolotogo shlaka na svojstva cementa s mineral'nymi dobavkami // *Tehnika i tehnologija silikatov*. – 2018. – Т.25. – №4. - P. 109-114. (in Russian)
29. Ganiev A.G. Issledovanie vlijanija superplastifikatora na svojstva betona // *Aktual'nye nauchnye issledovanija v sovremenom mire*. – 2019. – №. 12–1. – P. 41–43. (in Russian)
30. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O. Exploring the Surface Chemistry for the Stabilization of Bismuth Titanate Fine Particle Suspensions in Cement Systems // *Nanotechnologies in construction*. – 2023. – 15 (5). – Pp. 397–407. DOI: 10.15828/2075-8545-2023-15-5-397-407.
31. Samchenko, S., Kozlova, I., Zemskova, O., Potaev, D., Tsakhilova, D. Efficiency of stabilization of slag suspensions by polycarboxylate // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 91. - №02039. DOI: 10.1051/e3sconf/20199102039.
32. Muhametrahimov R.H., Galautdinov A.R., Ziganshina L.V. Sovrshenstvovanie additivnogo stroitel'nogo proizvodstva povysheniem adgezii sloev pri dlitel'nyh pereryvah v processe 3D-pechati // *Izvestija KGASU*. – 2024. - № 1(67). – P. 127-134. (in Russian)

35. Tao Ya, Ren Q., Vantighem G., Lesage K., Van Tittelboom K., Yuan Yo., De Corte W., De Schutter G. Extending 3D concrete printing to hard rock tunnel linings: Adhesion of fresh cementitious materials for different surface inclinations // Automation in Construction. – 2023. – Vol. 149. – P. 104787.
36. Полуэктова В.А., Кожанова Е.П. Усовершенствование технологии производства сухих строительных смесей для 3D-печати // Технологии аддитивного производства. – 2019. – Т.1. №1. – С. 14-23.
37. Полуэктова В.А., Шаповалов Н. А Полимерцементная сухая строительная смесь для 3D-печати // Патент на изобретение RU 2739910 C1, 29.12.2020. Заявка № 2020125199 от 29.07.2020.
38. Славчева Г.С., Артамонова О.В., Бритвина Е.А., Бабенко Д.С., Ибряева А.И. Двухфазная смесь на основе цемента для композитов в технологии строительной 3D-печати // Патент на изобретение RU 2729283 C1, 05.08.2020. Заявка № 2019133428 от 21.10.2019.
39. Славчева Г.С., Разов И.О., Солонина В.А., Панченко Ю.Ф. Обоснование критериальных требований к наполнителям в составах смесей для строительной 3D-печати // Нанотехнологии в строительстве. – 2023. – Т. 15. – № 4. – С. 310–318. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-310-318>. – EDN: IFTQOV.
40. Шорстова Е.С., Ключев С.В., Ключев А.В. Фибробетон для 3D-печати // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 3. – С. 22–27. DOI: 10.34031/article_5ca1f6300a4956.62644399.
41. Та-Юан Н. Influence of polyolefin fibers on the engineering properties of cement-based composites containing silica fume // Materials & Design. – 2012. – Vol. 37. – Pp. 569 - 576.
33. Tao Y., Yuan Y., Vantighem G., Van Tittelboom K. Adhesion Properties of Printable Polymer-Modified Concrete for Rock Tunnel Linings // ACI Materials Journal. – 2021. – Vol. 118. – Iss. 6.
34. Tao Y., Lesage K., De Schutter G., Van Tittelboom K. Adhesion studies in view of automated repair using 3D concrete printing // MATEC Web of Conferences. – 2023. – Vol. 378. – P. 03003.
35. Tao Ya, Ren Q., Vantighem G., Lesage K., Van Tittelboom K., Yuan Yo., De Corte W., De Schutter G. Extending 3D concrete printing to hard rock tunnel linings: Adhesion of fresh cementitious materials for different surface inclinations // Automation in Construction. – 2023. – Vol. 149. – P. 104787.
36. Polujektova V.A., Kozhanova E.P. Usovershenstvovanie tehnologii proizvodstva suhih stroitel'nyh smesej dlja 3D-pechati // Tehnologii additivnogo proizvodstva. – 2019. – Т.1. №1. – P. 14-23. (in Russian)
37. Polujektova V.A., Shapovalov N. A Polimercementnaja suhaja stroitel'naja smes' dlja 3D-pechati // Patent na izobretenie RU 2739910 C1, 29.12.2020. Zajavka № 2020125199 ot 29.07.2020. (in Russian)
38. Slavcheva G.S., Artamonova O.V., Britvina E.A., Babenko D.S., Ibrjaeva A.I. Dvuhfaznaja smes' na osnove cementa dlja kompozitov v tehnologii stroitel'noj 3D-pechati // Patent na izobretenie RU 2729283 C1, 05.08.2020. Zajavka № 2019133428 ot 21.10.2019. (in Russian)
39. Slavcheva G.S., Razov I.O., Solonina V.A., Panchenko Ju.F. Obosnovanie kriterial'nyh trebovanij k napolniteljam v sostavah smesej dlja stroitel'noj 3D-pechati // Nanotehnologii v stroitel'stve. – 2023. – Т. 15. – № 4. – P. 310–318. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-310-318>. – EDN: IFTQOV. (in Russian)
40. Shorstova E.S., Kljuev S.V., Kljuev A.V. Fibrobeton dlja 3D-pechati // Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. – 2019. – № 3. – P. 22–27. DOI: 10.34031/article_5ca1f6300a4956.62644399. (in Russian)
41. Та-Юан Н. Influence of polyolefin fibers on the engineering properties of cement-based composites containing silica fume // Materials & Design. – 2012. – Vol. 37. – Pp. 569 - 576.

Работа представлена на II Международном научно-практическом симпозиуме «Будущее строительной отрасли: Вызовы и перспективы развития».

Земскова Ольга Викторовна – доцент кафедры строительного материаловедения, кандидат химических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)
E-mail: ZemskovaOV@mgsu.ru

Филимонов Артем Андреевич - студент, лаборант кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

E-mail: FilimonovAA@gic.mgsu.ru

Борисенков Никита Сергеевич – студент, лаборант кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

E-mail: BorisenkovNS@mgsu.ru

Шаповалова Ирина Анатольевна – студентка, инспектор учебно-методического центра института промышленного и гражданского строительства ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

E-mail: ShapovalovaIA@gic.mgsu.ru

Zemskova Olga Viktorovna - Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)
E-mail: ZemskovaOV@mgsu.ru.

Filimonov Artem Andreevich - student, laboratory assistant at the Department of Construction Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)
E-mail: FilimonovAA@gic.mgsu.ru

Borisenkov Nikita Sergeevich – student, laboratory assistant at the Department of Construction Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)
E-mail: BorisenkovNS@mgsu.ru

Shapovalova Irina Anatolyevna – student, inspector of the Educational and Methodological center of the Institute of Industrial and Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)
E-mail: ShapovalovaIA@gic.mgsu.ru

The authors declare that there is no conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.