АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ 3D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.С. Иноземцев, Е.В. Королёв, Зыонг Тхань Куй

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ: представлен международный опыт реализации технологии 3D-печати в строительстве. Выполнен анализ существующих технологических решений отечественных и зарубежных организаций (WinSun, AMT-СПЕЦАВИА, StroyBot, BetAbram, Contour Crafting Corp., ApisCor, Loughborough University, CyBe Construction, Batiprint3D, MIT Media Lab и DUS Architects). Показаны преимущества и недостатки различных подходов к выполнению послойного возведения строительных конструкций.

Предмет исследования: в работе выполнен анализ изделий и конструкций из цементных бетонов, произведенных методом послойной экструзии.

Цели: выявление преимуществ и недостатков технологии 3D-печати в строительстве на основе анализа особенностей изготовления изделий и конструкций и свойств материалов.

Материалы и методы: используется комплекс общенаучных логических методов исследования, основанных на теоретическом анализе технологических решений, представленных в научно-технической литературе, информационных ресурсах разработчиков и средствах массовой информации, в том числе патентах, научных статьях и научных отчетах.

Результаты: проанализированы существующие технологические решения 3D-печати в строительстве, показаны их преимущества и недостатки, сформулированы проблемы развития технологии. Установлено, что основным материалом для 3D-печати является цементный тяжелый мелкозернистый бетон, в состав которого входят заполнитель размером не более 4 мм, минеральные добавки, микрофибра, противосадочные химические добавки и регуляторы сроков схватывания. Такие бетоны имеют среднюю плотность 2100...2200 кг/м³ и прочность при сжатии 25...50 МПа. Установлено, что неоптимальные реологические свойства смесей и отсутствие решений по повышению эксплуатационных свойств бетона не позволяют расширить функциональное назначение напечатанных элементов более ограждающих конструкций или несъемной опалубки и в полной мере реализовать потенциал 3D-печати.

Выводы: необходимо формулирование общих требований к материалам для 3D-печати из бетона и разработка универсальных рецептурных решений, позволяющих одновременно управлять вязкостью и текучестью смеси в процессе экструзии, а также формировать требуемые физико-механические и эксплуатационные свойства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: 3D-технологии, 3D-печать, контурное строительство, быстрое прототипирование, материалы для 3D-печати, экструзия, послойное возведение конструкции, 3D-принтер, смесь для 3D-печати, строительные чернила, высокопрочные бетоны, сухие строительные смеси

Благодарности: Работа выполнена в рамках соглашения № 14.583.21.0072 о предоставлении субсидий для реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (идентификатор проекта — RFMEFI58318X0072) при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иноземцев А.С., Королёв Е.В., Зыонг Тхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 7 (118). С. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876

ANALYSIS OF EXISTING TECHNOLOGICAL SOLUTIONS OF 3D-PRINTING IN CONSTRUCTION

A.S. Inozemtcev, E.V. Korolev, Duong Thanh Qui

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavlshoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT: the paper discusses the international experience of 3D-printing technology implementation in construction. The analysis of existing technological solutions of domestic and foreign organizations such as WinSun, AMT-SPETSAVIA, StroyBot, BetAbram, Contour Crafting Corp., ApisCor, Loughborough University, CyBe Construction, Batiprint3D, MIT Media Lab and DUS Architects is performed. The advantages and disadvantages of different approaches to performing layer-by-layer construction of building structures are shown.

Subject: the analysis of products and structures made of cement concretes produced by the layer-by-layer extrusion method is carried out in this paper.

Materials and methods: in this work we use a complex of general scientific logical methods of research based on a theoretical analysis of technological solutions presented in the scientific and technical literature, information resources from developers and the media recourses, including patents, scientific articles and scientific reports.

Results: the existing technological solutions of 3D-printing in construction are analyzed, their advantages and disadvantages are shown, and the problems of technology development are formulated. It is established that the main material for 3D-printing is the cement heavyweight fine-grained concrete, which includes a filler of size no more than 4 mm, mineral additives, microfiber, anti-shrinkage chemical additives and setting time regulators. The concrete has an average density of 2100...2200 kg/m³ and a compressive strength of 25...50 MPa. It was found that the non-optimal rheological properties of mixtures and the absence of solutions to improve the operational properties of concrete do not allow us to expand the functionality of printed elements beyond enclosing structures or permanent formwork and fully realize the potential of 3D printing.

Conclusions: the process of extrusion for building construction must be based on general principles and requirements to materials and structures. The search of the complex technological solutions on the each stage of construction is a promising task for the development of 3D-printing in construction. It is necessary to formulate general requirements to materials used in concrete 3D-printing and develop universal prescription solutions that allow us to simultaneously control the viscosity and flow of the mixture during extrusion and also create the required physical, mechanical and operational properties.

KEY WORDS: 3D-technology, 3D-printing, contour construction, rapid prototyping, materials for 3D-printing, extrusion, layer-by-layer design construction, 3D-printer, mixture for 3D-printing, building ink, high-strength concretes, dry building mixtures

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the agreement No. 14.583.21.0072 on granting awards for implementation of the federal target program "Research and development in priority directions of development of the scientific and technological complex of Russia for 2014–2020" (project identifier RFMEFI58318X0072) with the financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

FOR CITATION: Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong Thanh Qui. Analiz suschestvuyuschikh tekhnologicheskikh resheniy 3D-pechati v stroitel'stve [Analysis of existing technological solutions of 3D-printing in construction]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 7 (118), pp. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение конкурентного преимущества в экономике внутри страны или на глобальном рынке возможно за счет снижения периода внедрения высокотехнологичной продукции и ее доступности. Одним из источников таких инновационных продуктов может быть создание товаров посредством технологии быстрого прототипирования (БП-технологии), сущность которой заключается в создании прототипа (модели) или его части непосредственно на основе цифровой версии объекта. Основной принцип этой технологии заключается в масштабируемом послойном воспроизведении детали из цифровой 3D-модели посредством автоматизированных (роботизированных) устройств и механизмов.

В связи с ростом финансирования технология 3D-печати в различных отраслях получила свое развитие в начале 90-х гг. XX в. Объем капиталовложений за четыре года (с 1992 по 1996 г.) вырос на 1200 % до 421 млн долл. [1]. К концу 2000 г. количество выпущенных 3D-принтеров составило 1320 машин, 45 % которых было изготовлено в Северной Америке, 28,6 и 24,6 % — в Азии (Тихоокеанский регион) и Европе, соответственно [1, 2].

В настоящее время ведущими странами по развитию БП-технологии являются США, Китай, Япония, Германия [3, 4] и в последнее время Россия [5–7]. Существует множество технических решений, в том числе уже представленных в виде

коммерческих продуктов (3D-принтеров), позволяющих изготавливать 3D-объекты различного назначения.

БП- или 3D-технология вызывает интерес и в строительной отрасли [8–11], что связано с недостаточной автоматизацией как производства строительных материалов, так и технологических процессов непосредственно на строительной площадке. Актуальность подобных технологий возрастает в связи с проблемами в мировой строительной отрасли: низкая производительность труда и квалификация рабочей силы, сложность осуществления контроля на строительной площадке, высокая материало- и энергоемкость. Возможность реализации автоматизированной системы возведения зданий (3D-печати) на месте строительства в кратчайшие сроки позволит сократить технологическое отставание строительной индустрии и повысить ее эффективность.

Решением задачи по организации компьютеризированного строительного процесса посредством 3D-печати занимаются в различных производственных и исследовательских организациях США, Китая, Великобритании, Голландии, России, других странах Европы. Однако различные технологии реализации 3D-печати не предлагают универсализированных решений, позволяющих осуществить промышленное применение. Необходим анализ мирового опыта для обобщения достижений и формулирования проблем, препятствующих развитию 3D-технологии в строительстве.

Табл. 1. Особенности технологии 3D-печати в строительстве
Table 1. Features of 3D-printing in construction

№	Разработчик / Developer	Ширина/ Толщина слоя, мм / Layer width and thick- ness, m	Материал / Material	Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	Прочность*, МПа / Strength*, MPa		Преимущества технологии / Advantages of technology	Недостатки технологии / Disadvantages of technology	Ссылка / Reference
					при изгибе / in bending	при сжатии / in compres- sion			
1	WinSun (Китай) / (China)	30–60 н/д n/a	Цементно-песчаная смесь с отходами от сноса зданий, стекловолокном и специаль- ными добавками / Cement-sand mixture with waste from building demolition, fiberglass and special additives	2000–2200	8,2	34,5	Используются продукты перера- ботки строительных материалов, микроармирование / Products of building materials processing are used, micro- reinforcement	Требуется больших производственных площадей и обслуживающего пер- сонала, наличие нефункциональной опалубки, неровная вертикальная поверхность / Requires large production areas and maintenance staff, the presence of non- functional formwork, uneven vertical surface	[20–23]
2	АМТ- СПЕЦАВИА (Россия) / AMT-SPECSA V- IA (Russia)	20–50 5–10	Высокопрочная цементная смесь, стеклофибробетон, пескобетон М300, каолиновая смесь / High-strength cement mixture, fiberglass concrete, sand concrete M300, kaolin mixture	2200–2350	н/д / n/a	от 30 / from 30	Армирование, вариативность материалов / Reinforcement, variability of materials	Наличие нефункциональной опалуб- ки, неровная вертикальная поверх- ность / The presence of non-functional formwork, uneven vertical surface	[30, 31]
3	StroyBot (Rudenko 3D Printer)	30 10	Геополимерный бетон с примесями вулканического пепла / Geopolymer concrete with impurities of volcanic ash	2100–2250	н/д / n/a	н/д / n/a	Использование местного сырья для бетонных смесей / Use of local raw materials for concrete mixtures	Неровная вертикальная поверхность / Uneven vertical surface	[37–39]
4	BetAbram (Словения) / (Slovenia)	40 10–20	Торкретбетон с песчаным (0–4 мм) и гравийным (4–8 мм) заполнителем / Shotcrete with sand (0–4 mm) and gravel (4–8 mm) aggregate	2300–2350	н/д / n/a	н/д / n/a	Наличие в составе противоусадоч- ных добавок / Presence of anti-shrinkage additives in composition	Нефункциональная опалубка / The presence of non-functional formwork	[42]
5	Contour Crafting Corp. (США) / (USA)	25–50 30–40	Цементный раствор для опалубки, бетон для конструк- ций / Cement mortar for formwork, concrete for structures	2250	н/д / n/a	45–50	Выровненная вертикальная поверх- ность, армирование / Even vertical surface, reinforcement	Низкая прочность между слоями / Low strength between the layers	[16–19]
6	ApisCor (Россия) / (Russia)	40–50 30	Мелкозернистый фибробетон B20 F200 W6/ Fine-grained fibrous concrete B20 F200 W6	2050	н/д / n/a	27,4	Микроармирование / Micro-reinforcement	Неровная вертикальная поверхность, ограничение по высоте 3,3 м / Uneven vertical surface, maximum height limit 3.3 m	[27–29]

№	Разработчик / Developer	Ширина/ Толщина слоя, мм / Layer width and thick- ness, m	Материал / Material	Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	Прочность*, МПа / Strength*, MPa		Преимущества технологии / Advantages of technology	Недостатки технологии / Disadvantages of technology	Ссылка / Reference
					при изгибе / in bending	при сжатии / in compres- sion			
7	Loughborough University (UK)	25 25	Цементный бетон / Cement concrete	2250–2350	12–13	100–110	Высокая прочность, армирование конструкций / High strength, reinforcement of structures	Неровная вертикальная поверхность / Uneven vertical surface	[43–45]
8	SyBe Construction (Голландия) / (Holland)	40/ 20	Цементный бетон / Cement concrete	2200	6	45	Выровненная вертикальная по- верхность, быстрое схватывание и твердение слоев / Even vertical surface, fast setting and hardening of layers	Несинхронизированная подача смеси и движение печатающей головки / Non-synchronized supply of the mixture and movement of the printhead	[40, 41]
9	Vat1print3D (Франция) / (France)	40–100**	Пенополиуретановая опалуб- ка, заполненная бетоном / Foamed polyurethane formwork filled with concrete	30	н/д / n/a	0,16	Опалубка выполняет теплоизоля- ционную функцию / Formwork performs heat insulation function	Неконтролируемые геометрические свойства конструкций, неровная вер- тикальная поверхность, требующая защиты от внешнего воздействия / Uncontrolled geometric properties of structures, uneven vertical surface that requires protection from external influences	[46, 47]
10	MIT Media Lab (США) / (USA)	40–100**	Пенополиуретановая опалуб- ка, заполненная бетоном / Foamed polyurethane formwork filled with concrete	н/д / n/a	н/д / n/a	н/д / n/a	Мобильность экструдера, опалубка выполняет теплоизоляционную функцию, выполняется одновре- менное армирование (сварка метал- лического каркаса) конструкций / Extruder mobility, formwork performs heat insulation function, simultaneous reinforcement of structures is executed (metal framework welding)	Неконтролируемые геометрические свойства конструкций, неровная вер- тикальная поверхность, требующая защиты от внешнего воздействия / Uncontrolled geometric properties of structures, uneven vertical surface that requires protection from external influences	[32, 33]
11	DUS Architects (Голландия) / (Holland)	5–15 2–5	Вторичный пластик для опа- лубли, облегченный бетон / Secondary plastics for formwork, lightweight concrete	н/д / n/a	н/д / n/a	н/д / n/a	Используется вторичное сырье / Secondary raw materials are used	Длительность процесса изготовления опалубки / Formwork manufacturing process is long	[34–36]

Примечание: * — после испытания стандартных отформованных образцов или вырубок при приложении нагрузки перпендикулярно слою формования

** — толщина и высота слоя формируется в процессе вспенивания полиуретанового материала

Note: * — after testing of standard molded specimens or cuttings with the load applied perpendicular to the molding layer

** — thickness and height of the layer is formed during the foaming process of the polyurethane material

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Особенности технологии представлены в табл. 1.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В работе авторов [12] начало развития 3D-печати, как автоматизированной технологии изготовления строительных конструкций, сопоставляется с появлением первых патентов Т. Эдисона в начале XX в. Однако справедливее считать одним из первых проект Countour Crafting Corp., представившей в 1998 г. [13–15] концепцию послойного возведения конструкций в строительстве.

Развитием технологии, получившей также название контурное строительство, занимаются исследователи под руководством доктора Б. Хошневиса из Университета Южной Калифорнии. Такая технология за счет сокращения сроков строительства направлена на решение глобальной проблемы обеспечения дешевым жильем населения с низким доходом, локального восстановления жилья после стихийных бедствий (землетрясений, наводнений), а также военных действий. К преимуществам 3D-печати относят меньшую на 25–30 % ресурсоемкость строительства, включая расход материалов и трудозатраты, а также меньший на 45–55 % экологический вред (отходы, шумовые загрязнения). Несмотря на это, коммерчески реализованную на практике технологию, созданную по порталному (рамочному) принципу, Countour Crafting Corp. планирует представить только в 2018 г.

Согласно трудам исследователей [16, 17], для печати по технологии Countour Crafting используются растворы на основе сульфатостойкого цемента и песка с размером частиц не более 2,36 мм. В качестве функциональных добавок применяется пластификатор на поликарбоксилатной основе, регулятор вязкости для обеспечения сплошности печатного слоя и полипропиленовая фибра с длиной волокон 6 мм. Кроме того, с целью повышения прочности и водонепроницаемости композита в смесь вводится уплотненный диоксид кремния.

Авторами [17] предложены критерий и методика оценки стабильности слоя смеси после формирования, которые основываются на определении величины просадки цилиндра диаметром 80 мм при нагружении 5,5 кг. При этом смеси Countour Crafting характеризуются вертикальной деформацией цилиндра 12,7...14,7 мм. Так называемое «окно печати», связанное со сроками схватывания смеси и характеризующее период, когда смесь отвечает требованиям сплошности и стабильности до момента затвердевания и затруднения подачи смеси, регулируется ускорителями твердения и составляет от 10 до 30 мин. В отвержденном виде растворная смесь имеет среднюю плотность 2250 кг/м³ и предел прочности при сжатии 45–50 МПа. К преимуществам

решений Countour Crafting Corp. можно отнести проработанную технологию армирования и формирования ровного слоя смеси.

Одним из технологических преимуществ 3D-печати называется возможность роботизированного возведения конструкций по заранее заданному проекту непосредственно на строительной площадке. Это объясняется очевидной экономической выгодой, заключающейся в снижении расходов на производственные и складские помещения, транспортировку и монтаж. Тем не менее компания Shanghai WinSun Decoration Design Engineering Co (Китай) [21–23] добилась определенного успеха в изготовлении конструкций методом 3D-печати на производственной площади 1500 м² завода Suzhou с последующей их сборкой (рис. 1). WinSun мотивирует выбранный подход экологической целесообразностью, что совместно с необходимостью обслуживания технологии сотрудниками в количестве до 100 человек скорее свидетельствует об отсутствии современных решений для 3D-печати. То есть существующая технология WinSun является пыле- и шумозагрязняющим производством, не позволяющим обеспечивать строительство без ущерба окружающей среде непосредственно на месте строительства, а большой объем ручного труда очевидно связан со сложностью обслуживания, неуниверсальностью технологических процессов и громоздкостью оборудования. Основным компонентом «чернил» 3D-принтера WinSun является смесь на цементно-песчаной основе, содержащая строительные отходы от сноса зданий, армирующие волокна и специальную запатентованную добавку.

К успехам компании WinSun относят строительство одной из первых с помощью 3D-принтера 10 домов в 2013 г. (рис. 1). С учетом заявленного сокращения сроков строительства на 30–60 %, экономии на трудозатратах 50–70 % и общего снижения расходов на строительство на 50–80 % стоимость таких домов составила около 150 000 руб. [24]. При этом построенные дома можно отнести к дешевому сегменту не только по экономическому критерию, но и с точки зрения архитектурно-эстетической реализации. В 2015 г. построен 6-этажный дом (рис. 2), где проблема неровности вертикальных поверхностей решена за счет навесных декоративных панелей. В 2016 г. [26] заявлено о возведении 17 офисных зданий в Дубае, однако, в действительности технология 3D-печати использовалась лишь для формирования изделий из бетона. Причем конструкции были изготовлены на 3D-принтере в Китае и экспортированы контейнерами на расстояние более 6000 км в ОАЭ. Себестоимость готового объекта с учетом доставки не публикуется.

В России наиболее известной в применении технологии 3D-печати в настоящее время можно считать компанию ApisCor [27]. Особенность предлагаемого решения заключается в безрамном

Рис. 1. Процесс сборки домов, напечатанных с помощью 3D-принтера компанией WinSun [24]

Figure 1. Process of assembling houses printed with a 3D-printer by WinSun [24]

Рис. 2. Шестиэтажный дом, напечатанный с помощью 3D-принтера компанией WinSun [25]

Figure 2. A six-story house, printed with a 3D-printer by WinSun [25]

устройстве принтера, представляющего собой моноопорную конструкцию с печатающей головкой кранового типа. Печать принтера ограничена 12,8 м в горизонтальной плоскости и 3,3 м — в вертикальной, что нивелируется простотой монтажа и мобильностью. Компанией разработана и опубликована техническая документация, учитывающая особенности проектирования зданий, технологического процесса строительства, материалов и оборудования. Разработчиками предложено несколько решений в области материалов для печати и сформулированы минимальные требования к ним: класс по прочности на сжатие бетона — не менее B20, марка по морозостойкости — не менее F200, марка по водонепроницаемости — не менее W6, марка по средней плотности — не ниже D2000. При этом составы представляют собой сухие смеси, приготовление которых осуществляется непосредствен-

но на месте строительства перед печатью. Проблема усадочных деформаций, возникающих вследствие большой открытой поверхности слоев и соответствующей потере влаги, решается использованием микрофибры. На рис. 3 представлены различные конструктивные решения компании ApisCor, которые схожи для большинства реализуемых конструкций в других проектах, свидетельствующие о монофункциональности каждого из напечатанных рядов стены.

В феврале 2017 г. [28] компания ApisCor объявила о завершении строительства дома площадью 38 м² на полигоне в городе Ступино. Преимуществом этого проекта является полноценная печать конструкций на строительном объекте. Выполнение всех этапов строительства осуществлялось в зимний период, что потребовало установки закрытого тента для поддержания рабочей температуры (рис. 4).

Рис. 3. Типы и функциональность конструктивных решений ApisCor [29]

Figure 3. Types and functionality of structural solutions of ApisCor [29]

Рис. 4. Процесс печати конструкций дома с помощью 3D-принтера ApisCor [28]

Figure 4. The process of printing house's structures using the 3D-printer of ApisCor [28]

Суммарная продолжительность печати стен, перегородок и ограждающих конструкций составила 24 ч. В результате стоимость строительства дома по данным разработчиков составила около 600 000 руб. или менее 17 000 руб. за 1 м². Детализация расходов [29] свидетельствует о том, что непосредственно для 3D-печати использовано около 9 м³ бетона на этапе возведения фундамента и стен. При этом доля в общей стоимости здания составила около 71 000 руб. (цена бетона 8000 руб. за м³) или 12 % от общей сметы. То есть почти 90 % стоимости возведенного объекта составляют затраты на осуществление строительных операций по традиционным технологиям. Однако даже такие расходы складываются исключительно из материальных затрат, то есть не учитывают непосредственно расходы на выполне-

ние работ. Экономический эффект на возведение ограждающих конструкций здания при реализации этого проекта оценивается в 70 % по сравнению с блочной технологией строительства, что с учетом вышесказанного вызывает сомнения.

В октябре 2017 г. АМТ-СПЕЦАВИА презентовало жилой дом [30, 31], изготовленный методом 3D-печати. Особенность данного проекта состоит в юридической легитимности строительства: для объекта получено разрешение на строительство, оформлен паспорт в БТИ, а готовое сооружение поставлено на кадастровый учет. Отметим, что общая продолжительность строительства такого жилого дома составила около двух лет, а сам процесс представлял собой аналогичный с компанией WinSun подход, заключающийся в изготовлении сборных элементов и последующем их монтаже в соответствии с проектом (рис. 5, 6 [31]). Для строительства использовался принтер с рабочим полем не более 13 м², что предопределило невозможность изготовления полномасштабного непрерывного контура стен. Однако очевидным технико-экономическим преимуществом можно назвать выполнение всех операций (приготовление смеси и формование элементов) непосредственно на строительной площадке. При этом в качестве смеси принтер АМТ-СПЕЦАВИА может использовать различные составы. Компания предлагает применение как специализированных высокопрочных цементных смесей, стеклофибробетона, так и традиционного пескобетона М300, что свидетельствует об универсальности оборудования и программного обеспечения.

В то же время, решения обозначенных выше проблем слоистой конструкции, связанных с неоднородностью, низкой прочностью сцепления и трещиностойкостью, функциональной ограничен-

Рис. 5. Процесс печати сборных строительных элементов на 3D-принтере АМТ-СПЕЦАВИА

Figure 5. The process of printing prefabricated construction elements using the 3D-printer of АМТ-SPETSАVIA

Рис. 6. Процесс сборки конструкций стен жилого дома из напечатанных элементов

Figure 6. The process of assembling the wall structures of a residential house from printed elements

ностью и эстетической несовершенностью, АМТ-СПЕЦАВИА не предлагает.

Альтернативным на первый взгляд является принцип реализации технологии 3D-печати, предложенный MIT Media Lab, Batiprint3D и DUS Architects (рис. 7, 8), который основывается на выполнении опалубки из пенополиуретана или пластика и последующим заполнением полостей тяжелым бетоном. Технология подразумевает аналогичный с блочным строительством подход, заключающийся в изготовлении несъемной опалубки из вспененного полиуретана и дальнейшим ее заполнением цементобетоном. В течение 30 сек. после экструзии из сопла принтера слой материала увеличивается до 80 раз от начального объема и приобретает плотность менее 30 кг/м³ при прочности на сжатии не более 160 кПа. Однако очевидным недостатком такого подхода является неконтролируемое вспучивание, что приводит к формированию хаотичной формы внутренних и внешних поверхностей опалубки, требующей дополнительной обработки, что недопустимо для обеспечения надежности бетонной конструкции.

Отличительной особенностью 3D-принтера, разработанного Массачусетским технологическим институтом, является платформа на гусеничном ходу [32, 33]. Роботизированный манипулятор имеет модульную систему сопел, позволяющую выполнять в зависимости от вида функциональной головки широкий перечень работ: подготовка оснований и грунтов с помощью ковша, сварка металлических конструкций, заливка бетона, нанесение изоляционного материала или покраска. Основное преимущество разработанной мобильной установки — отсутствие несущих рам или опор, рельсов или кранов, что позволяет в отсутствии пространственных ограничений выполнять строительство объектов различного размера.

В технологии с применением пластиковой опалубки [35, 36] DUS Architects предлагает использовать ячеистые формы (рис. 8) с тонкой стенкой из сырья от переработки пластмассовых изделий, где каждая из ячеек заполняется функциональным материалом — теплоизоляционным или конструкционным бетоном. В этом случае возводимая конструкция представляет собой аналог блочной или кирпичной кладки. Но вопрос надежности сцепления разнородных по природе материалов (пластика и бетона) авторами разработки не рассматривался или не раскрыт в открытых источниках.

В настоящее время реализацию 3D-печати для массового строительства ограничивают действующие требования государственных стандартов и региональных строительных норм и правил. Отсутствие мирового нормативного регулирования для этой технологии снижает потенциал ее применения, заставляя разработчиков подстраиваться под локальные существующие стандарты, адаптируя процессы под сборное или монолитное строительство (например, WinSun или АМТ-СПЕЦАВИА).

В таких условиях помимо «пилотного» полностью напечатанного ApisCor здания первым юридически согласованным и эксплуатируемым в настоящее время строительным объектом, возведенным с помощью 3D-принтера, является проект коммерческого назначения от Rudenko 3D Printer [37–39]. Реализованный в 2015 г. посредством 3D-принтера StoryBot в г. Пампанг (Манила, Филиппины) он представляет собой пристройку к действующему гостиничному комплексу (рис. 9, 10 [37, 38]).

Конструкция принтера позволила осуществлять печать стен на площади 10,5×12,5 м и высотой до 3 м. В качестве состава для печати использовался цементный бетон из местного вулканического песка. Несмотря на более благоприятный климат по срав-

Рис. 7. Возведение пенополиуретановой опалубки гусеничным 3D-принтером MIT Media Lab [34]

Figure 7. Construction of foamed polyurethane formwork by crawler 3D-printer of MIT Media Lab [34]

Рис. 8. Ячеистая пластиковая опалубка, напечатанная DUS Architects [35]

Figure 8. The cellular plastic formwork, printed by DUS Architects [35]

Рис. 9. Строительство конструкций гостиничного комплекса с помощью 3D-принтера StoryBot

Figure 9. Construction of structures of a hotel complex using 3D-printer of StoryBot

Рис. 10. Вид конструкций после работы принтера Rudenko 3D Printer

Figure 10. View of structures after operation of the Rudenko 3D Printer

нению с условиями, в которых выполнялась печать компанией ApisCor, при возведении на строительной площадке на Филиппинах также использовался шатер для уменьшения потери влаги из свежесложенных слоев бетона. Общая продолжительность возведения конструкций составила около 100 ч, а непрерывность процедуры печати нарушалась лишь для устройства арматуры и коммуникаций. Суммарное энергопотребление принтера на весь строительный цикл не превысило 500 Вт. По данным разработчиков [38], затраты на материалы и работы по возведению конструкций площадью 130 м² с помощью 3D-принтера составили около 120 000 руб.

В 2017 г. [40, 41] голландская компания CyBe Construction объявила о завершенном в Дубае в инновационном центре Solar Park строительстве лаборатории R&Drone (рис. 11, 12). В отличие от компа-

нии WinSun сборные элементы конструкций были изготовлены на строительной площадке, что стало возможным за счет мобильности и компактности принтера, сконструированного на гусеничном ходу.

Для строительства здания лаборатории, состоящего из 27 отдельных элементов, общей площадью 168 м², потребовалось 46 ч. При этом компания из Голландии использовала бетонную смесь для формирования слоев с заполнителем 0...3 мм. С помощью специальных добавок период схватывания и твердения был установлен в диапазоне от 3 до 5 мин для начала и конца схватывания, соответственно, притом, что подвижность смеси на встряхивающем столике (ASTM C 1437-15) составляла 160 мм. Прочность отвержденного слоя в первые пять часов достигала 4 и 15 МПа, а через 28 дней — 6 и 45 МПа при изгибе и при сжатии, соответственно.

Рис. 11. Процесс изготовления сборных конструкций принтером CyBe в Дубае [41]

Figure 11. The process of manufacturing prefabricated structures by the CyBe printer in Dubai [41]

Рис. 12. Общий вид здания лаборатории R&Drone, построенной принтером CyBe [40]

Figure 12. General view of the R&Drone laboratory building, built by the CyBe printer [40]

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовательские центры и лаборатории некоторых стран предлагают всевозможные варианты реализации технологий 3D-печати, однако, анализ описанного выше опыта разработки эффективных строительных 3D-принтеров показывает, что процесс экструдирования в строительстве необходимо основывать на общих технологических принципах и требованиях к материалам и конструкциям. Основным материалом для 3D-печати становится цементный тяжелый бетон или фибробетон. Отсутствие нормативной документации не позволяет развиваться технологии в аспекте права, а предлагаемые решения в разных странах имеют, как правило, схожие недостатки (как следствие нерешенных технических задач) по реализации:

- неровная вертикальная поверхность конструкций вследствие неоптимальной реологии смесей, требующая обработки или защиты от эксплуатационных воздействий;
- замалчиваемый вопрос высокого модуля открытой поверхности, способствующий быстрой потере воды из цементных композиций и приводящий к очевидным проблемам клинкерного фонда, усадки, трещиностойкости, стойкости к эксплуатационным средам и т.д.;
- нефункциональные напечатанные элементы, выполняющие роль опалубки или самонесущей ограждающей конструкции из-за низких эксплуатационных свойств используемых материалов.

ВЫВОДЫ

Тем не менее можно отметить формирование общей тенденции для решения проблем составов строительных «чернил»: использование цементных систем с мелкозернистым наполнителем до

4 мм, минеральных добавок, микрофибры, противосадочных химических добавок и регуляторов схватывания. Такие материалы, представляющие собой, как правило, тяжелые бетоны имеют среднюю плотность 2100...2200 кг/м³ и прочность при сжатии 25...50 МПа.

Анализ научной литературы демонстрирует наиболее обстоятельный подход к разработке технологии 3D-печати в строительстве со стороны Countour Crafting Corp., выполняющей научно-исследовательскую работу по широкому перечню проблем от устройства экструзионной головки и программного обеспечения до материалов и методов контроля качества.

Очевидно, что описанные в данной работе результаты свидетельствуют об определенных успехах в реализации принципа послойного возведения конструкций, в том числе и в России. Однако можно констатировать, что предлагаемые в настоящее время решения являются лишь начальным этапом для формирования основ новой технологии строительства и в большей степени относятся к вопросам автоматизации. Если со времен первого патента Т. Эдисона [48] по автоматизации строительства зданий из бетона потребовалось около 100 лет для достижения существующего уровня развития традиционных на сегодня строительных бетонных технологий, то перспективной задачей для 3D-печати видится поиск комплексных технологических решений на всех этапах строительства, для чего необходима консолидация специалистов различного профиля. Необходимо формулирование общих требований к материалам для 3D-печати из бетона и разработка универсальных рецептурных решений материала, обладающего одновременно управляемой вязкостью и текучестью в процессе экструзии, а также требуемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rapid prototyping report // Business New. 1997. Vol. 008. No. 2. URL: <http://www.cadcamnet.com>.
2. Kim D.M. Contour crafting: a future method of building. 2013. URL: <http://illuminate.usc.edu/assets/submissions/755/Contour20Crafting20revision.pdf>.
3. Ashley S. Rapid prototyping is coming of age // Mechanical Engineering. 1995. Vol. 117. No. 7. Pp. 62–68.
4. Griffith M., Lamancusa J.S. Rapid Prototyping Technologies. 1998. URL: <http://www.me.psu.edu/lamancusa/me415/rpintro2.pdf>.
5. Назаров А.П. Перспективы быстрого прототипирования методом селективного лазерного спекания/плавления // Вестник МГТУ Станкин. 2011. № 4 (16). С. 46–51.
6. Наумкин Н.И., Купряшкин В.Ф., Князьков А.С. и др. Использование инновационных технологий быстрого прототипирования и вакуумного литья для сокращения времени на проектирование ИП // Современные проблемы теории машин. 2013. № 1. С. 125–127.
7. Баева Л.С., Маринин А.А. Современные технологии аддитивного изготовления объектов // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2014. Т. 17. № 1. С. 7–12.
8. Duballet R., Baverel O., Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D printing // Automation in Construction. 2017. Vol. 83. Pp. 247–258.

9. Mehmet S., Yusuf C.K. 3D printing of buildings: construction of the sustainable houses of the future by BIM // *Energy Procedia*. 2017. No. 134. Pp. 702–711.
10. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С. и др. 3D-печать в строительстве // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 1 (52). С. 27–46.
11. Клюев С.В., Клюев А.В., Кузик Е.С. Аддитивные технологии в строительной индустрии // *Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства : сб. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика. Белгород : Изд-во Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. С. 54–58.
12. Steven J.K., Julian C.L., Levi C.N.O. Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales // *Science Robotics*. 2017. Vol. 2. No. 5. eaam8986. DOI: 10.1126/scirobotics.aam8986.
13. Khoshnevis B. Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials // *Materials Technology*. 1998. Vol. 13. Pp. 52–63.
14. Hwang D., Khoshnevis B. An innovative construction process-contour crafting (CC) // *22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2005. 90–111.
15. Khoshnevis B., Russell R., Kwon H., Bukapatnam S. Contour crafting — a layered fabrication technique // *IEEE Robotics and Automation Magazine*. 2001. Vol. 8. No. 3. Pp. 33–42.
16. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies // *Automation in Construction*. 2004. Vol. 13. No. 1. Pp. 5–19.
17. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 145. Pp. 639–647.
18. Lim S., Buswell R.A., Le T.T. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes // *Automation in Construction*. 2012. Vol. 21. Pp. 262–268.
19. Hwang D., Khoshnevis B. Concrete wall fabrication by contour crafting // *21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2014. URL: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB13506.pdf>.
20. Пат. CN 101985849A, E04C2/26;C04B28/00;C04B28/04;C04B14/42. High density glass fiber reinforced cement curved plate and manufacturing method thereof / Ma Yihe. No. 201010184261 Заявл. 25.05.2010. Опубл. 16.03. 2011.
21. 7 standards of winsun 3D printing architecture // *Yingchuang building technique ShanghaiCo.Ltd*. (WinSun). URL: <http://www.winsun3d.com/En/Technology/>.
22. Winsun. Future of Construction. URL: <https://futureofconstruction.org/case/winsun/>.
23. WinSun 3D printed sections of building then assembled them into a 5 story apartment. URL: <https://www.nextbigfuture.com/2015/01/winsun-3d-printed-sections-of-building.html>.
24. World's first 3D apartment complex printed in China. URL: <http://popcity.net/34961>.
25. Shanghai-based WinSun 3D Prints 6-story apartment building and an incredible home // *3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing*. URL: <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>.
26. Winsun Released World's First 3D Printed Office Building in Dubai. URL: <http://blog.luxresearchinc.com/blog/2016/06/winsun-released-worlds-first-3d-printed-office-building-in-dubai/>.
27. Apis Cor. We print buildings. URL: <http://apis-cor.com/>.
28. В России напечатали первый жилой дом. Apis Cor. We print buildings. URL: <http://apis-cor.com/about/news/first-house>.
29. Смета по реализации жилого дома «под ключ». Apis Cor. We print buildings. URL: http://apis-cor.com/files/ApisCor_estimateStupino_ru.pdf.
30. СПЕЦАВИА: В Ярославле напечатан дом. URL: <http://3dtoday.ru/blogs/specavia/spetsavia-in-yaroslavl-printed-house/>.
31. Первый в Европе жилой дом, напечатанный на 3D-принтере, представили в Ярославле. URL: <https://specavia.pro/articles/pervyj-v-evrope-zhiloj-dom-napechatannyj-na-3d-printere-predstavili-v-yaroslavle/>.
32. Mobility Comes to Large-Scale 3D Printing. URL: <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-design/mobility-comes-largescale-3d-printing>.
33. DCP: Digital Construction Environment. MIT Media Lab. URL: <https://www.media.mit.edu/projects/3d-printed-hemi-ellipsoidal-dome/overview/>.
34. MIT develops solar-powered rolling robot that can 3D print entire buildings. URL: <https://www.designboom.com/technology/mit-dcp-3d-print-buildings-04-28-2017/>.
35. 3D-printcanalhouse by DUS Architects. URL: <http://3dprintcanalhouse.com/>.
36. DUS Architects — Public architecture and design that consciously influences everyday life. URL: <http://houseofdus.com>.
37. Looking for outstanding 3D Concrete Printing Project to invest? URL: <http://www.totalkustom.com/>.
38. Строительный принтер. 3D today. URL: <http://3dtoday.ru/blogs/andreyr/building-the-printer/>.
39. Man to 3D print his own home in his own home — 3D Printing Industry. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-home-rudenko-27199/>.

40. CyBe Construction : Redefining construction with 3D Concrete printing. URL: <https://www.cybe.eu/>.
41. CyBe construction announces that 3D printing is complete for Dubai's R&Drone Laboratory. URL: <https://3dprint.com/176561/cybe-3d-printed-dubai-laboratory/>.
42. Betabram — visit report. URL: <http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/BetAbram.pdf>.
43. Le T.T., Austin S.A., Lim S. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. No. 3. Pp. 558–566.
44. Lim S., Buswell R.A., Le T.T. et al. Development in construction-scale additive manufacturing processes // Automation in Construction. 2012. Vol. 21. № 1. Pp. 262–268.
45. Godbold O., Kang J., Buswell R.A., Soar R.C. Fabrication of acoustic absorbing topologies using rapid manufacturing // Canadian Acoustics. 2008. Vol. 36. No. 3. Pp. 144–145.
46. A robot 3d printer is building a house in nantes. URL: <http://batiprint3d.fr/en/>.
47. French Batiprint 3d project to construct house with “Inside-Out” 3d printing. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/french-batiprint3d-project-construct-house-inside-3d-printing-110099/>.
48. Пат. US 1219272A Process of constructing concrete buildings / Edison Thomas. A Inc Priority. No. 1219272D. Заявл. 13.08.1908. Опубл. 13.03.1917.

Поступила в редакцию 24 марта 2018 г.

Принята в доработанном виде 17 мая 2018 г.

Одобрена для публикации 19 июня 2018 г.

ОБ АВТОРАХ: Иноземцев Александр Сергеевич — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов и материаловедения, младший научный сотрудник НОЦ «Наноматериалы и нанотехнологии», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МСГУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, InozemcevAS@mgsu.ru;

Королев Евгений Валерьевич — доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и материаловедения, директор НОЦ «Наноматериалы и нанотехнологии», проректор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МСГУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, KorolevEV@mgsu.ru;

Зыонг Тхань Куй — аспирант кафедры строительных материалов и материаловедения, НОЦ «Наноматериалы и нанотехнологии», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МСГУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, quiduonhthanh@gmail.com.

REFERENCES

1. Rapid prototyping report. *Business New*. 1997, vol. 008, no. 2. URL: <http://www.cadcamnet.com>. Accessed: Jun 13, 2017.
2. Kim D.M. *Contour crafting: a future method of building*. 2013. URL: <http://illumina.usc.edu/assets/submissions/755/Contour20Crafting20revision.pdf>.
3. Ashley S. Rapid prototyping is coming of age. *Mechanical Engineering*. 1995, vol. 117, no. 7, pp. 62–68.
4. Griffith M., Lamancusa J.S. *Rapid Prototyping Technologies*. 1998. URL: <http://www.me.psu.edu/lamancusa/me415/rpintro2.pdf>.
5. Nazarov A.P. Perspektivy bystrogo prototipirovaniya metodom selektivnogo lazernogo spekaniya/plavleniya [Prospects of rapid prototyping using the technique of selective laser sintering]. *Vestnik MGTU Stankin* [Vestnik of the Moscow state technological University “STANKIN”]. 2011, no. 4, pp. 46–51. (In Russian)
6. Naumkin N.I., Kupryashkin V.F., Knyazkov A.S. et al. Ispol'zovanie innovatsionnykh tekhnologiy bystrogo prototipirovaniya i vakuumnogo lit'ya dlya sokrashcheniya vremeni na proektirovanie IP [The use of innovative technologies for rapid prototyping and vacuum casting to reduce the time for the design of an IP]. *Sovremennye problemy teorii mashin* [Modern problems of the theory of machines]. 2013, no. 1, pp. 125–127. (In Russian)
7. Baeva L.S., Marinin A.A. Sovremennye tekhnologii additivnogo izgotovleniya ob'ektov [Modern technologies of additive manufacturing of objects]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Murmansk State Technical University]. 2014, vol. 17, no. 1, pp. 7–12. (In Russian)
8. Duballet R., Baverel O., Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction*. 2017, vol. 83, pp. 247–258.
9. Mehmet S., Yusuf C.K. 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*. 2017, no. 134, pp. 702–711.

10. Vatin N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S. et al. 3D-pechat' v stroitel'stve [3D printing in construction]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy* [Journal Construction of Unique Buildings and Structures]. 2017, no. 1 (52), pp. 27–46. (In Russian)
11. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Kuzik E.S. Additivnye tekhnologii v stroitel'noy industrii [Additive technologies in the construction industry]. *Intellectual'nye stroitel'nye kompozity dlya zelenogo stroitel'stva : Sb. Mezhdunar. nauchno.-praktich. konf., posvyashchennoy 70-letiyu zasluzhennogo deyatelya nauki RF, chlenakorrespondenta RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk, professora Valeriya Stanislavovicha Lesovika* [Intellectual Building Composites for Green Construction : Collection of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 70th anniversary of the Honored Scientist of the Russian Federation, Corresponding Member of RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor Valery Lesovik]. Belgorod, Izd-vo Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova [Publishing house of Belgorod state technological University. V.G. Shukhov]. 2016, pp. 54–58. (In Russian)
12. Steven J.K., Julian C.L., Levi C.N.O. Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales. *Science Robotics*. 2017, vol. 2. no. 5, eaam8986.
13. Khoshnevis B. Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. *Materials Technology*. 1998, vol. 13, pp. 52–63.
14. Hwang D., Khoshnevis B. An innovative construction process-contour crafting (CC). *22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2005, 90111.
15. Khoshnevis B., Russell R., Kwon H., Bukapatnam S. Contour Crafting — A Layered Fabrication Technique. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2001, vol. 8, no. 3, pp. 33–42.
16. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 2004, vol. 13, no. 1, pp. 5–19.
17. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 145, pp. 639–647.
18. Lim S., Buswell R.A., Le T.T. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 2012, vol. 21, pp. 262–268.
19. Hwang D., Khoshnevis B. Concrete wall fabrication by contour crafting. *21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2014. URL: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB13506.pdf>.
20. Ma Yihe. Patent CN 101985849A, E04C2/26; C04B28/00; C04B28/04; C04B14/42. *High density glass fiber reinforced cement curved plate and manufacturing method thereof*. No. 201010184261 Appl. May 25, 2010. Publ. 16.03. 2011.
21. 7 standards of winsun 3D printing architecture. *Yingchuang Building Technique (Shanghai) Co.Ltd. (WinSun)*. URL: <http://www.winsun3d.com/En/Technology/>.
22. Winsun. Future of Construction. URL: <https://futureofconstruction.org/case/winsun/>.
23. WinSun 3D printed sections of building then assembled them into a 5 story apartment. URL: <https://www.nextbigfuture.com/2015/01/winsun-3d-printed-sections-of-building.html>.
24. World's first 3D apartment complex printed in China. URL: <http://popupcity.net/34961>.
25. Shanghai-based WinSun 3D prints 6-story apartment building and an incredible home. *3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing*. URL: <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>.
26. Winsun Released World's First 3D Printed Office Building in Dubai. URL: <http://blog.luxresearchinc.com/blog/2016/06/winsun-released-worlds-first-3d-printed-office-building-in-dubai/>.
27. Apis Cor. We print buildings. URL: <http://apis-cor.com/>.
28. V Rossii napechatali pervyy zhiloy dom [The first residential house was printed In Russia]. *Apis Cor. We print buildings*. URL: <http://apis-cor.com/about/news/first-house>. (In Russian)
29. Smeta po realizatsii zhilogo doma «pod klyuch» [The estimate for the implementation of a residential house “turnkey”]. *Apis Cor. We print buildings*. URL: http://apis-cor.com/files/ApisCor_estimateStupino_ru.pdf. (In Russian)
30. SPETSAVIA: V Yaroslavle napechatan dom [A house is printed in Yaroslavl]. URL: <http://3dtoday.ru/blogs/specavia/spetsavia-in-yaroslavl-printed-house/>. (In Russian)
31. Pervyy v Evrope zhiloy dom, napechatanny na 3D-printere, predstavili v Yaroslavle [The first residential building in Europe, printed on a 3D printer, was presented in Yaroslavl]. URL: <https://specavia.pro/articles/pervyj-v-evrope-zhiloy-dom-napechatannyj-na-3d-printere-predstavili-v-yaroslavle/>. (In Russian)
32. Mobility Comes to Large-Scale 3D Printing. URL: <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-design/mobility-comes-largescale-3d-printing>.
33. DCP: Digital Construction Environment. *MIT Media Lab*. URL: <https://www.media.mit.edu/projects/3d-printed-hemi-ellipsoidal-dome/overview/>.
34. MIT develops solar-powered rolling robot that can 3D print entire buildings. URL: <https://www.designboom.com/technology/mit-dcp-3d-print-buildings-04-28-2017/>.
35. 3D-printcanalhouse by DUS Architects. URL: <http://3dprintcanalhouse.com/>. Accessed: Jan 10, 2018.

36. *DUS Architects — Public architecture and design that consciously influences everyday life*. URL: <http://houseofdus.com>.
37. *Looking for outstanding 3D Concrete Printing Project to invest?* URL: <http://www.totalkustom.com/>.
38. Stroitel'nyy printer [Building printer]. *3D today*. URL: <http://3dtoday.ru/blogs/andreyr/building-the-printer/>. (In Russian)
39. *Man to 3D Print His Own Home in His Own Home — 3D Printing Industry*. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-home-rudenko-27199/>.
40. *CyBe Construction : Redefining construction with 3D Concrete printing*. URL: <https://www.cybe.eu/>.
41. *CyBe Construction Announces That 3D Printing is Complete for Dubai's R&Drone Laboratory*. URL: <https://3dprint.com/176561/cybe-3d-printed-dubai-laboratory/>.
42. *Betabram — Visit Report*. URL: <http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/BetAbram.pdf>.
43. Le T.T., Austin S.A., Lim S. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012, vol. 42, no. 3, pp. 558–566.
44. Lim S., Buswell R.A., Le T.T. et al. Development in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*. 2012, vol. 21, no. 1, pp. 262–268.
45. Godbold O., Kang J., Buswell R.A., Soar R.C. Fabrication of acoustic absorbing topologies using rapid manufacturing. *Canadian Acoustics*. 2008, vol. 36, no. 3, pp. 144–145.
46. *A robot 3D printer is building a house in Nantes*. URL: <http://batiprint3d.fr/en/>. Date of access: 13.01.2018.
47. *French Batiprint 3D project to construct house with “Inside-Out” 3D printing*. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/french-batiprint3d-project-construct-house-inside-3d-printing-110099/>.
48. Edison Thomas. Patent US 1219272A. *Process of constructing concrete building*. A Inc Priority. No. 1219272D. Appl. 13.08.1908. Publ. 13.03.1917

Received 24 March, 2018.

Adopted in final form on May 17, 2018.

Approved for publication on June 19, 2018.

ABOUT THE AUTHORS: **Inozemtcev Aleksandr Sergeevich** — Candidate of technical sciences, Assistant professor, Department of Construction Materials and Materials Science, Junior researcher, SEC “Nanomaterials and nanotechnology”, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, InozemtcevAS@mgsu.ru;

Korolev Evgeniy Valer'evich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Construction Materials and Materials Science, Director, SEC “Nanomaterials and nanotechnology”, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, KorolevEV@mgsu.ru;

Duong Thanh Qui — graduate student, Department of Construction Materials and Materials Science, SEC “Nanomaterials and nanotechnology”, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, quiduongthanh@gmail.com.