

УДК 69.001.5

doi: 10.33622/0869-7019.2023.12.83-97

Аддитивное строительное производство: обзор мирового опыта

Алексей Олегович АДАМЦЕВИЧ, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, adamtsevichao@mgsu.ru

Андрей Петрович ПУСТОВГАР, кандидат технических наук, доцент, научный руководитель, pustovgarap@mgsu.ru

Любовь Андреевна АДАМЦЕВИЧ, кандидат технических наук, доцент, зав. лабораторией энергоэффективности, экологии и устойчивого развития, adamtsevichla@mgsu.ru

Научно-исследовательский институт строительных материалов и технологий Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. В работе представлен обзор ключевых тенденций развития рынка строительной 3D-печати с использованием отечественного и зарубежного опыта применения технологии аддитивного строительного производства методом послойной экструзии бетона при возведении pilotных строительных объектов в разных странах мира. На основе проведенного обзора выполнены систематизация особенностей конструктивных и объемно-планировочных решений и анализ функционального назначения строительных объектов, при возведении которых наиболее оправдано применение технологии аддитивного строительного производства. Сформулирован перечень типов строительных объектов, при возведении которых с использованием технологии аддитивного строительного производства может быть достигнут максимальный технико-экономический эффект в сравнении с традиционными технологиями строительства, а именно: при строительстве объектов, для которых значительная доля сметы приходится на возведение вертикальных конструкций, прежде всего одноэтажных зданий и сооружений различного назначения с легкой кровлей; при возведении большого количества типовых объектов в одной локации, что обеспечивает сокращение экономических затрат и затрат рабочей силы; при сооружении сложных архитектурных форм и реализации уникальных объемно-планировочных решений; в условиях сложного доступа к рабочей силе, включая полевые походные условия.

Ключевые слова: аддитивные технологии, строительная 3D-печать, 3D-печать бетоном, pilotные проекты, экспериментальное строительство, малоэтажное домостроение

Для цитирования: Адамцевич А. О., Пустовгар А. П., Адамцевич Л. А. Аддитивное строительное производство: обзор мирового опыта // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 12. С. 83 – 97.

doi: 10.33622/0869-7019.2023.12.83-97

ADDITIVE CONSTRUCTION PRODUCTION: AN OVERVIEW OF WORLD EXPERIENCE

Aleksey O. ADAMTSEVICH, adamtsevichao@mgsu.ru

Andrey P. PUSTOVGAR, pustovgarap@mgsu.ru

Liubov A. ADAMTSEVICH, adamtsevichla@mgsu.ru

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

Abstract. This article provides an overview of the key trends in the development of the 3D construction printing market with the use of domestic and international experience in the application of additive construction technology using layer-by-layer concrete extrusion during the construction of pilot projects in different countries of the world. Based on the review, a systematization of the features of structural and space-planning solutions and an analysis of the functional purpose of construction projects are carried out, during the construction of which the use additive building production is most justified. A list of types of construction facilities is formulated, during the construction of which, using the technology of additive construction production, the maximum technical and economic effect can be achieved in comparison with traditional construction technologies, namely: during the construction of objects for which a significant share of the estimates is for the construction of vertical structures, primarily single-storey buildings and structures for various purposes with a light roof; when constructing a large number of typical objects in one location, which ensures a reduction in economic and labor costs; during construction of complex architectural forms and the implementation of unique spatial planning solutions; under conditions of difficult access to labor force, including field marching conditions.

Keywords: additive technologies, construction 3D printing, 3D concrete printing, pilot projects, experimental construction, low-rise housing construction

For citation: Adamtsevich A. O., Pustovgar A. P., Adamtsevich L. A. Additive Construction Production: An Overview of World Experience. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2023, no. 12, pp. 82 – 97. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.12.83-97



Введение

Развитие аддитивного строительного производства (строительной 3D-печати) открывает возможность сокращения сроков производства строительно-монтажных работ, снижения себестоимости и материалоемкости строительства, а также сокращения потребности в рабочей силе за счет автоматизации трудоемкого процесса производства бетонных работ.

Пилотные объекты капитального строительства, возведенные с применением технологии аддитивного строительного производства, начали появляться в разных странах, включая Россию, в период с 2014 по 2016 гг., а на сегодня количество таких объектов в мире исчисляется сотнями. Первый опыт применения новой технологии показал, что строительная 3D-печать может стать драйвером развития инфраструктурных проектов за счет повышения производительности труда и обеспечения сокращения продолжительности инвестиционно-строительного цикла. Однако ни одна технология не может гарантировать достижение экономического эффекта во всех случаях. Поэтому цель настоящей работы – обзор мировой практики применения строительной 3D-печати с учетом назначения реализуемых пилотных объектов, используемых проектных решений, климатических условий строительства и других факторов для выбора наиболее актуальных областей применения новой технологии.

Аддитивные технологии в строительстве

Учитывая высокую технологическую и ресурсную емкость строительной индустрии, для изготовления отдельных элементов и деталей, применяемых как в процессе строительства, так и на этапе эксплуатации зданий и со-

оружений, в том или ином виде могут применяться все известные на сегодня технологии и способы аддитивного производства согласно классификации технологических процессов по ГОСТ Р 57589–2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы». В то же время выбор конкретного процесса зависит как от требуемых характеристик изделия, так и от доступности материалов и экономической эффективности производственного процесса. В этой связи для возведения несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения подходят не все известные технологии и материалы, используемые в аддитивном производстве, а лишь те из них, которые обеспечивают достаточную конкурентоспособность конечной продукции с точки зрения себестоимости производства в сравнении с традиционными технологиями строительства.

На сегодня наиболее распространенный способ применения аддитивных технологий в строительстве – 3D-печать бетоном, выполняемая методом экструзии (3D Concrete Printing или сокращенно 3DCP в международной терминологии) [1, 2]. Под бетоном при этом понимается смесь минеральных вяжущих (портландцемент, алюминатный цемент, гипс, комплексные ГЦПВ и др.) и мелкого заполнителя (максимальный размер частиц не более 5 мм). Перспективным является также подход, основанный на печати зданий и сооружений с применением наполненных биоразлагаемых композитов на основе фотополимерных смол, предлагаемый, например, такими компаниями, как Mighty Buildings [3]. Такой подход обеспечивает значительный потенциал сокращения углеродного следа строительной продукции, однако он

пока не получил столь массового распространения в гражданском строительстве, как печать материалами на основе минеральных вяжущих, из-за более высокой себестоимости материала и необходимого оборудования.

Учитывая сказанное, в настоящей работе под строительной 3D-печатью и аддитивным строительным производством будут подразумеваться процессы изготовления строительных конструкций, зданий и сооружений из бетона в соответствии с терминологией ГОСТ Р 59095–2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Термины и определения».

Развитие рынка строительной 3D-печати

Прадорителем технологии аддитивного строительного производства (далее – технология АСП) как технологии 3D-печати бетоном методом послойной экструзии принято считать [1, 4] концепцию Contour Crafting, описанную в конце XX в. Б. Хошневисом из Университета Южной Калифорнии [5]. Одной из ее важных особенностей стал принцип компьютерного управления процессом послойной экструзии материала (в том числе бетона) с затиранием поверхности для получения гладких плоских поверхностей заданной формы с минимальными допусками [6, 7]. Следует однако отметить, что однотипная компания Contour Crafting Corporation для коммерциализации идеи Contour Crafting была создана лишь в 2017 г., когда перспективы развития строительной 3D-печати в мире уже не вызывали сомнений.

Несмотря на то, что прикладные исследования велись в США еще несколько десятилетий назад, первые массовые упоминания о практическом применении аддитивного строительного производства для возведения реаль-



Рис. 1. Жилой модуль компании Winsun, Китай, 2013–2014 гг. [8]



Рис. 2. Беседка в форме средневекового замка, проект А. Руденко, Total Kustom, США, 2014 г. [9]



Рис. 3. Первый жилой дом, напечатанный в России, «Спецавиа», г. Ярославль, 2015–2017 гг. [10]



Рис. 4. Печать одноэтажного здания отеля на строительной площадке, Total Kustom, Филиппины, 2015 г. [11]



Рис. 5. Возвведение офисного здания в г. Ступино по технологии мобильной строительной 3D-печати, Apis Cor, Россия, 2017 г. [12]

ных строительных объектов относятся к 2013–2014 гг., когда в международных изданиях были опубликованы отчеты о печати 10 жилых модулей компанией Winsun в Китае (*рис. 1*) [8], а также малой архитектурной формы в виде средневекового замка в США (*рис. 2*) [9], созданной выходцем из России А. Руденко с командой Total Kustom.

В 2015–2017 гг. компанией «Спецавиа» (ныне – АМТ) было построено первое в России здание с использованием аддитивной технологии (*рис. 3*) [10].

Все указанные объекты объединяет то, что 3D-печать использовалась для изготовления печатных блоков, которые затем собирали в готовый объект на строительной площадке. Однако уже в 2015 г. компания Total Kustom начала строительство гостиницы площадью 120 м² на Филиппинах [11] с монтажом строительного 3D-принтера портальной конструкции непосредственно на строительной пло-

щадке (*рис. 4*). А в 2017 г. в России в г. Ступино компания Apis Cor впервые в мире реализовала пилотный проект строительства офисного здания площадью 37 м² с использованием мобильного строительного 3D-принтера стреловидной конструкции, работающего по аналогии с башенным краном (*рис. 5*) [12].

С учетом успешной реализации пилотных проектов, во всем мире начался этап активного развития технологий строительной 3D-печати для возведения объектов различного функционального назначения, который сопровождался ростом прикладных научных исследований в данной области [13].

Сегодня становится все более заметен прогресс в сфере индустриализации технологии АСП, когда она перестает использоваться лишь для экспериментального строительства и начинает все активнее конкурировать в отдельных сегментах строительно-

го рынка с традиционными технологиями домостроения по всему миру. Таким образом, мировой рынок аддитивного строительного производства, который начал формироваться менее 10 лет назад, уже к 2021 г. оценивался примерно в 370 млн дол. и по некоторым прогнозам [14] способен увеличиться в тысячи раз в течение последующего десятилетия.

Анализ мирового опыта возведения пилотных объектов с применением технологии АСП

В этом разделе в хронологическом порядке представлена информация о некоторых знаковых пилотных объектах, реализованных в разных странах и в разные годы с применением технологии АСП.

«Дозорная башня замка Винтерфелл», г. Артемовский, Россия (2016 г.). Одноэтажный объект нежилого назначения был построен в г. Артемовском Свердловской обл.



Рис. 6. «Дозорная башня замка Винтерфелл» в Свердловской обл. (2016 г.) [15]



Рис. 7. Объект *The BOD*, Дания, 2017 г. [16]



Рис. 8. Лаборатория *R&Drone*, ОАЭ, 2017 г. [17]



Рис. 9. *Chicon House*, США, 2018 г. [18]



Рис. 10. Самая длинная в мире напечатанная конструкция, Китай, 2019 г. [19]



Рис. 11. Почтовое отделение, Индия, 2019 г. [20]

(рис. 6). Конструкция возведена с помощью портального строительного 3D-принтера как апробация дипломного проекта [15]. Его особенностью является то, что он стал одним из первых, построенных с применением технологии АСП в условиях отрицательной температуры окружающего воздуха, характерной для осенне-зимнего периода Урала и средней полосы России.

Объект *The BOD*, г. Коленгаген, Дания (2017 г.), — первое здание в Западной Европе [16], возведенное при помощи строительного 3D-принтера портальной конструкции с целью показа, как такая технология может изменить традиционные подходы к строительству (рис. 7). Здание имеет площадь 50 м², и его проект не предполагал возведение ни одной полностью прямой стены. Это было сделано специально для того, чтобы продемонстрировать возможность создания усложненных конструкций без дополнительных затрат благодаря применению концепции адди-

тивного строительного производства.

R&Drone, г. Дубай, ОАЭ (2017 г.). Первая в мире лаборатория, напечатанная на 3D-принтере, находится в здании Исследовательского центра дронов [17]. Объект площадью 168 м² (рис. 8) возведен компанией CyBe Construction по заказу Управления электроэнергетики и водоснабжения г. Дубая при помощи принтера на основе робота-манипулятора за 46 ч машинного времени в течение трех недель. Это был первый проект открытого тендера, в котором задействованы технологии строительной 3D-печати. Объект включен в книгу рекордов Гиннеса.

Chicon House, г. Остин, США (2018 г.). Проект первого напечатанного на строительном 3D-принтере жилого дома в США (рис. 9) создан некоммерческой организацией New Story как прототип доступного дома, разработанного с учетом потребностей развивающихся стран. Дом площадью около 32 м² окружен открытой террасой, в нем имеются

две спальни, ванная и кухня [18]. Пилотный объект был напечатан с помощью строительного 3D-принтера первого поколения от компании ICON в течение нескольких дней. Стоимость объекта оценена в 10 000 дол.

Самая длинная напечатанная конструкция, г. Сучжоу, Китай (2019 г.). Компания Win-Sun реализовала проект строительства крупнейшей в мире напечатанной конструкции — 432-метровой стены вдоль р. Янцзы в г. Сучжоу, в 80 км от Шанхая (рис. 10). Стена высотой около 1,5 м призвана защищать от наводнений. Конструкция создавалась путем 3D-печати отдельных модулей и их последующей сборки на строительной площадке. Материал разрабатывался с применением отходов строительного производства и металлургической промышленности [19].

Почтовое отделение, г. Халасуру, Индия (2019 г.). Первое в мире почтовое отделение (рис. 11), возведенное в Индии с помощью технологии строительной



Рис. 12. Дизайнерские колонны, Швейцария, 2019 г. [21]



Рис. 13. Здание муниципалитета, ОАЭ, 2019 г. [22]

3D-печати [20], по заявлению авторов проекта из компании L&T Construction, обошлось примерно на 75 % дешевле использования традиционных технологий строительства.

Дизайнерские колонны от компании ETH Zurich, Швейцария (2019 г.), были созданы в рамках студенческого проекта в ETH Zurich [21] с целью наглядно показать перспективы применения технологии АСП для реализации творческих задумок архитекторов (рис. 12).

Здание муниципалитета, г. Дубай, ОАЭ (2019 г.). Компания Apis Cor при помощи мобильного принтера собственного производства, работающего в полярных координатах, напечатала здание высотой 9,5 м и площадью 640 м² (рис. 13) для муниципалитета г. Дубая [22]. На момент завершения строительства в 2019 г. объект стал самым большим из когда-либо напечатанных на 3D-принтере объектов, что позволило ему попасть в книгу рекордов Гиннеса.

При строительстве использовался материал на основе местного сырья, разработанный в рамках научно-технического сопровождения проекта со стороны НИУ МГСУ. Печать проводилась на открытом воздухе, без устройства тепляков, чтобы продемонстрировать, что технология может использоваться в суровых



Рис. 14. Первое двухэтажное здание, Индия, 2020 г. [23]

климатических условиях, способствующих тепломассопереносу в тонких слоях свежеуложенной бетонной смеси. Строительный 3D-принтер перемещали по площадке с помощью крана, чтобы печатать различные захватки возводимого объекта. Здание строилось на монолитном фундаменте, изготовленном по традиционной технологии. Колонны здания сооружались в два этапа: сначала с помощью строительного 3D-принтера возводилась несъемная опалубка, после чего в нее укладывали обычную бетонную смесь. Это позволило выполнять расчет и армирование несущих конструкций с использованием традиционных подходов и норм, применяемых в монолитном строительстве. Для устройства перекрытий использовались сборные плиты, а монтаж оконных блоков и кровли выполнялся подрядчиком уже

после завершения работы 3D-принтера.

Первое двухэтажное здание в Индии (2020 г.). Пилотный проект компании L&T Construction по возведению двухэтажного жилого здания с применением технологии строительной 3D-печати бетоном (рис. 14), т. е. первый подобный проект, был реализован в Индии [23]. Целью проекта стала демонстрация потенциала применения аддитивного строительного производства для реализации индийской государственной программы «Жилье для всех», в рамках которой правительство страны планирует построить 60 млн домов экономкласса для обеспечения жильем малоимущих слоев населения.

Апартаменты PERI 3D Construction, г. Валленхаузен, Германия (2020 г.). Проект заявлен как первый в мире многоквартирный жилой дом (рис. 15) [24], реализованный группой PERI GmbH на территории Баварии в целях демонстрации возможностей архитектуры будущего [25]. На сегодняшний день здание остается крупнейшим жилым объектом в Европе, напечатанным на 3D-принтере. Оно состоит из подвала и пяти квартир на трех этажах. Жилая площадь объекта составляет порядка 380 м². Предполагается, что реализация подобных типовых объектов «под ключ», с учетом отработки технологии



Рис. 15. Апартаменты PERI 3D Construction, Германия, 2020 г. [24]



Рис. 16. KIEM, Бельгия, 2020 г. [26]



Рис. 17. Сборка ангаров для военной техники из конструкций, изготовленных в полевых условиях с использованием строительного 3D-принтера, США, 2020 г. [27]



Рис. 18. Тренировочные казармы в учебном центре Кэмп-Свифт в штате Техас, возведенные с использованием строительного 3D-принтера, США, 2021 г. [28]



Рис. 19. Одноэтажный жилой дом с тремя спальнями и гаражом, США, 2021 г. [29]

строительной 3D-печати, будет возможна не более чем за шесть недель.

Важной особенностью проекта можно назвать активное участие в нем компании PERI, которая производит опалубочные системы для монолитного домостроения. С 2018 г. компания стала акционером производителя портальных строительных 3D-принтеров COBOD, что подтверждает потенциал замещения части рынка монолитного домостроения технологией строительной 3D-печати в будущем.

KIEM, г. Вестерло, Бельгия (2020 г.). Проект KIEM («Knowledge Sharing – Inspiration – Elimination barriers – Market Introduction») можно перевести как «Обмен знаниями–Вдохновение – Устранение барьеров–Внедрение на рынок». Заявленная цель проекта (рис. 16) [26] связана с

решением задачи внедрения новых технологий строительства во Фландрии (Бельгия).

Важной целью проекта было показать, что современная строительная отрасль изменяется и переходит от этапа преобладания грязных и трудоемких физических процессов к использованию высокотехнологичных подходов и современной производственной техники. Реализация проекта происходила с использованием портального строительного 3D-принтера с привлечением государственных субсидий. Общая стоимость проекта составила 807 750 евро.

Объекты Военного назначения от компании ICON, США (2020–2021 гг.). Компания ICON совместно с отделом оборонных инноваций США разработала прототипы различных конструкций, возводимых с при-

менением технологий АСП, предусматривающих возможность быстрого развертывания в полевых условиях, в том числе при ведении военных действий. В частности, были разработаны модульные конструкции, изготавливаемые с применением строительного 3D-принтера для оперативного развертывания укрытий для военной техники (рис. 17) [27].

В 2021 г. был реализован проект строительства казарм для военного министерства в штате Техас [28] с использованием технологии АСП. На момент строительства вытянутый в длину объект стал самым большим по площади объектом, напечатанным с помощью 3D-принтера (рис. 18). Печать такого объекта стала возможной благодаря рельсовой конструкции принтера ICON, спроектированного для поточной



Рис. 20. Первый проданный объект жилой недвижимости в США, 2021 г. [30]



Рис. 21. Двухэтажный жилой коттедж PERI 3D Construction, Германия, 2021 г. [31]

печати жилых домов вдоль одной оси, например улицы.

Одноэтажный жилой дом с тремя спальнями и гаражом, г. Калвертон, США (2021 г.), – первый реализованный проект от компании SQ4D, позиционируемый как крупнейший на момент строительства жилой дом, напечатанный на 3D-принтере портальной схемы собственной разработки, а также первый подобный объект, получивший необходимые разрешения в США на эксплуатацию в качестве жилого строительного объекта [29]. Площадь дома (рис. 19) составляет 180 м², на печать ушло 48 ч в течение восьми дней. Печать выполнялась непосредственно на строительной площадке с использованием местных материалов, себестоимость которых, по заявлению авторов проекта, составила всего 6 000 дол. Кроме того, печать дома выполнялась в зимний период, в том числе при низкой положительной и слабой отрицательной температуре.

Первый объект напечатанной жилой недвижимости, г. Риверхед, США (2021 г.), от компании SQ4D, который, по заявлению застройщика, является первым в мире домом, выставленным на продажу через портал риэлторских услуг и получивший свидетельство о заселении [30]. Второе утверждение, вероятно, не соответствует действительности, поскольку первый жилой

дом на территории России, возведенный с использованием технологии АСП в Ярославле еще в 2017 г., также официально зарегистрирован и в нем проживает семья основателя компании «Спецавиа».

Стоимость объекта для конечного покупателя составила 299 999 дол. В жилой части дома свободной планировки площадью 130 м² предусмотрено три спальни и две ванные комнаты. Также в доме имеется гараж площадью 70 м² (рис. 20).

Двухэтажный коттедж, г. Беккум, Германия (2021 г.), был напечатан с помощью портального строительного 3D-принтера от компании COBOD [31]. Коттедж спроектирован архитектурным бюро Mense Korte Architekten и построен компанией PERI 3D Construction (рис. 21).

Здание имеет жилую площадь 160 м²: по 80 м² на каждом этаже. Все конструкции, выполняемые с использованием технологии АСП, печатались непосредственно на строительной площадке в своем проектном положении без использования дополнительной монтажной сборки. Особенностью проекта являлось активное использование 3D-принтера для печати элементов интерьера, таких как ниши для каминов и ванных, одновременно с возведением самонесущих строительных конструкций и несъемной опалубки под бетонирование не-



Рис. 22. Офисная пристройка, Австрия, 2021 г. [32]

сущих вертикальных конструкций.

Офисная пристройка, г. Хауслайтен, Австрия (2021 г.), – первая в Европе пристройка к офису, напечатанная на 3D-принтере и первое здание в Австрии, построенное с применением технологии АСП (рис. 22). Здание площадью 125 м² было напечатано за 45 ч [32].

Жилой дом для одной семьи в традиционном американском стиле, г. Вильямсбург, США (2021 г.). Организация Habitat for Humanity активно продвигает возможность применения технологии АСП для создания доступного жилья на территории США и Канады. Одним из объектов, реализованных с применением портального строительного 3D-принтера, стал одноэтажный жилой дом в Вильямсбурге площадью 110 м² с тремя спальнями, реализованный в сотрудничестве с компанией Alquist [33].

На печать стен дома на 3D-принтере ушло около 28 ч, при этом изнутри объект практически



Рис. 23. Жилой дом для одной семьи в традиционном американском стиле, США, 2021 г.



Рис. 24. Павильон в форме кота, г. Ярославль, Россия, 2021 г. [34]



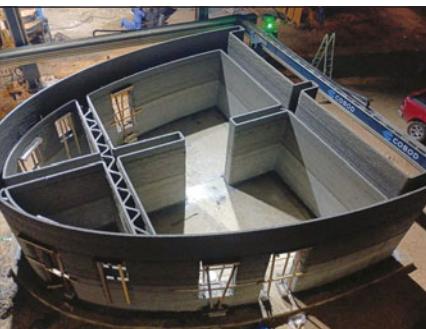
Рис. 25. Напечатанная школа, Малави, 2021 г. [35]



Рис. 26. Одноэтажный жилой коттедж, о. Борнео, Малайзия, 2022 г. [36]



Рис. 27. Кофейня и рыбакский домик, Оман, 2022 г. [37]



не отличается от любого другого современного жилого дома в США, возведенного по традиционным технологиям. Применение технологии строительной 3D-печати позволило снизить себестоимость строительства примерно на 15 % за 1 м². Авторы проекта (рис. 23) утверждают, что использование бетона для печати ограждающих конструкций сделало дом более устойчивым к торнадо, сейсмическим воздействиям и пожарам, чем большинство аналогичных жилых объектов на территории страны. Кроме того, ограждающие конструкции обеспечивают улучшенные теплоизолирующие свойства, что сокращает долгосрочные затраты на отопление и кондиционирование жилья для будущих владельцев.

Павильон в форме кота, г. Ярославль, Россия (2021 г.), представляющий собой сложную архитектурную форму (рис. 24), возвела команда 3D4art с использованием цехового портального строительного 3D-принтера от

компании АМТ. Фигура кота изготовлена из бетона путем печати полых сборных элементов в цеховых условиях с последующей сборкой на строительной площадке и заполнением полостей внутри конструкций пенобетоном. Куб имеет сварную металлическую конструкцию с остеклением из поликарбоната. Проект реализован в целях демонстрации возможностей применения технологии строительной 3D-печати для реализации проектов сложной архитектурной формы [34].

Напечатанная школа, г. Салима, Малави (2021 г.). Летом 2021 г. организация 14Trees объявила о вводе в эксплуатацию первой в мире школы, построенной с использованием технологии АСП [35] (рис. 25) в районе с населением 38 тыс. человек. Ее стены были напечатаны за 18 ч, что в разы быстрее, чем при использовании традиционных технологий строительного производства.

Проект реализован для демонстрации того, что 3D-печать

может играть ключевую роль в преодолении разрыва в мировой образовательной инфраструктуре благодаря возможности строительства высококачественной учебной инфраструктуры для детей с применением устойчивых, современных и доступных технологий. Авторы проекта утверждают, что такой способ печати с максимальным использованием местных материалов способен обеспечить сокращение до 50 раз негативного влияния строительной отрасли на экологию по сравнению с традиционными технологиями. Отмечается, что задачу возведения 36 000 классных комнат, которых сегодня не хватает в Малави, с использованием технологии АСП возможно реализовать за последующие 10 лет, в то время как при использовании традиционных технологий решение этой задачи потребует в 7 раз больше времени.

Одноэтажный жилой коттедж, о. Борнео, Малайзия (2022 г.), – это первый жилой коттедж в малайзийской части



Рис. 28. Вилла в пустыне, Саудовская Аравия, 2022 г. [38]



Рис. 29. House Zero, США, 2022 г. [39]



Рис. 30. Медицинский центр, Таиланд, 2023 г. [40]

о. Борнео от компании SCIB (*рис. 26*), возведенный с использованием портального строительного 3D-принтера [36]. Напечатанный дом площадью 90 м² расположен на территории Совета по развитию строительной индустрии Малайзии (CIDB) и используется в качестве помещения Малайзийской строительной академии (ABM). Известно, что общее время печати составило 46 ч, общая длина экструдированного печатного слоя — 9 км, что соответствует послойной укладке 145 слоев бетона высотой 2 см.

Кофейня, туалет и рыбакский домик, Оман (2022 г.). В 2022 г. компания GUtech напечатала три здания за восемь дней в специальной экономической зоне Омана: кофейню, общественный туалет и рыбакский домик (*рис. 27*) [37]. Коммерческая кофейня площадью 81 м² стала первым в мире объектом подобного рода, построенным с использованием технологии АСП. Общее время печати здания — 22 ч машинного времени, что эквивалентно трем дням работы на объекте при стандартной восьмичасовой смене участницеющей в проекте команды. Расход материала для аддитивного строительного производства составил 19,6 м³. Сам материал на 99 % состоял из местного сырья.

Вторая новостройка представляет собой общественный туалет площадью 20 м². Общее время печати — 13 ч, печать производи-

лась в течение двух дней. На строительство здания высотой 3,5 м потребовалось 10,6 м³ материала для аддитивного строительного производства.

Последнее напечатанное здание представляет собой рыбакский дом площадью 72 м² и было напечатано за 19 ч в течение двух дней. Объект имеет высоту 3 м, и на его постройку ушло 17,3 м³ бетона.

Общая себестоимость материала для печати всех трех объектов составила 3 600 дол. По итогам реализации проекта местные власти одобрили метод строительства с использованием технологии АСП и предоставили разрешение на реализацию новых проектов в регионе с использованием строительных 3D-принтеров.

Вилла в пустыне, г. Эр-Рияд, Саудовская Аравия (2022 г.). Это первая вилла в Саудовской Аравии, созданная с использованием технологии строительной 3D-печати (*рис. 28*) компанией Dar Al Arkan. Двухэтажная вилла высотой 9,9 м расположена в столице государства на территории жилого комплекса Шамс Аль-Рияд [38].

Застройщик делает особый акцент на том, что при реализации проекта применялись строгие процедуры и подход, основанный на доказательной базе, чтобы исключить сомнения в соответствии объекта общепринятым стандартам надежности и безопасности зданий и сооруже-

ний. При этом строительство велось в середине лета, без использования дополнительных мер для охлаждения или защиты возводимых конструкций от солнца, что подтверждает перспективность применения новой технологии в жарком пустынном климате.

Проект реализован в рамках содействия достижению целей государственной программы Saudi Vision 2030, поощряющей проекты, направленные на диверсификацию и цифровизацию экономики. Отмечается также, что после завершения пилотного объекта компания приступила к возведению второй виллы, а также тот факт, что применение технологии АСП позволило сократить сроки возведения этажа здания в 3,5 раза по сравнению с традиционными методами.

House Zero, г. Остин, США (2022 г.), — это дом площадью более 185 м² с тремя спальнями и дополнительный жилой блок площадью 32 м² с одной спальней и ванной комнатой. Стены здания изготовлены из бетона с помощью строительного 3D-принтера от компании ICON за две недели, что, по заверениям автора проекта, обеспечило значительную экономию времени строительства и сокращение материалаомкости [39].

Здание (*рис. 29*), спроектированное компанией Lake|Flato, имеет необычные архитектурные решения и энергоэффективный дизайн, что призвано подчерк-



Рис. 31. Печать крупнейшего в мире жилого дома, США, 2023 г. [42]



Рис. 32. Первое в мире здание в Заполярье, Россия, 2023 г. [43]



Рис. 33. Визуализация концепции поточной городской застройки от компании ICON, США [46]

нуть преимущества технологии АСП. Напечатанное здание отмечено множеством наград архитектурного и дизайнерского сообщества, в том числе проект был признан одним из лучших изобретений 2022 г. по версии TIME, проектом года по версии журнала «Builder Magazine» в номинации Builder's Choice Design Awards 2022 и удостоен множества других наград.

Медицинский центр, г. Сарабури, Таиланд (2023 г.). Производитель цемента и строительных материалов в Юго-Восточной Азии Siam Cement Group (SCG) реализовал проект первого в мире медицинского центра, напечатанного на 3D-принтере [40].

Фасад двухэтажного здания площадью 345 м² (рис. 30) имеет характерную волнистую форму, которую стало возможным выполнить благодаря технологии АСП. Проект реализован с использованием портального строительного 3D-принтера. Здание проектировалось с учетом возможности выдерживания сейсмических нагрузок, и при его строительстве применялись два различных состава материалов для строительной 3D-печати, соответствующих классу бетона по прочности C75/80 и C30/35 для несущих и самонесущих конструкций соответственно.

Крупнейший в мире напечатанный жилой дом, г. Хьюстон, США (2023 г.). Компания PERI 3D Construction совместно с архитектурной дизайнерской

фирмой HANNAH и строительно-инжиниринговой компанией CIVE реализовали проект печати элитного жилого дома в штате Техас, который на сегодня является крупнейшим в мире объектом жилого назначения,озвезденным по технологии АСП [41].

Объект общей площадью более 370 м² [42] имеет максимальную высотную отметку 12,2 м на уровне дымохода, а также двойные наружные стены для повышенной изоляции, что, по заявлению авторов проекта, делает дом водо-, ветро- и огнестойким. Авторы также отмечают, что этот объект призван, помимо прочего, продемонстрировать возможности технологии 3D-печати для массовой застройки и реализации дизайнерских решений, объединяющих традиционные методы строительства, что обеспечивается благодаря гибридному методу строительства, сочетающему 3D-печать бетона с деревянным каркасом. Такой подход позволяет достигать синергетического эффекта от совместного использования различных технологий строительства, а также обеспечивает сохранение спроса на традиционные для американского строительного рынка материалы, где деревянный каркас является одной из наиболее распространенных технологий строительства.

Здание включает в себя набор ядер, изготавляемых с использованием технологии АСП и содержащих функциональные пространства и лестницы. Простран-

ственные ядра соединены деревянным каркасом, создавая архитектурное чередование бетонных и каркасных интерьеров. Отмечается, что в процессе реализации проекта потребовалось внести несколько изменений в архитектурные и объемно-планировочные решения, в результате чего на строительство объекта (рис. 31) ушел почти целый год — с июля 2022 г. по май 2023 г.

Первое в мире здание за Полярным кругом, г. Лобытнанги, Россия (2023 г.), представляющее собой капсулу отдыха для сотрудников производственной базы «Газпромнефть Снабжение» [43], было построено (рис. 32) в рамках сотрудничества предприятия с проектом 3D4Art [44]. В качестве оборудования для аддитивного строительного производства использовался портальный строительный 3D-принтер от российского производителя АМТ. По данным компании-заказчика, это оказалось на 30 % дешевле и в 1,5 раза быстрее, чем при использовании традиционных способов строительства. На данный момент здание является самым северным объектом в мире, реализованным по технологии АСП.

Другими особенностями проекта можно считать эффективную реализацию концепции печати внутренних элементов интерьера одновременно с конструктивными элементами здания, а также уникальную декоративную перфорацию фасада, которая была выполнена непосредст-



Рис. 34. Напечатанная деревня из типовых домов эконом-класса, Мексика, 2019 г. [47]



Рис. 35. Процесс печати с помощью принтера ICON типовых жилых домов для бездомных (а) и вид построенных домов (б) в Техасе, США [48]

венно в процессе строительства при помощи 3D-принтера.

Индустриализация строительной 3D-печати

По данным [45], которые вероятнее всего значительно занижены, к концу 2022 г. в общей сложности на 105 строительных площадках в Америке, Азии, Европе и Африке было напечатано не менее 129 зданий из бетона. Отмечается, что более 40 % всех реализованных проектов напечатано в том же 2022 г., что говорит о быстром развитии и росте рынка строительной 3D-печати в мире и соответствует более ранним прогнозам развития данного сегмента строительного рынка.

В последние годы наметилась явная тенденция перехода рынка строительной 3D-печати от возведения единичных пилотных объектов к более массовой застройке территорий, что свидетельствует об индустриализации технологии. Так, дальнейшее развитие концепции проекта Chicon House от организации New Story [46] и компании ICON привело к идеи, что в случае перехода на массовое строительство типовых однотипных домов эконом-класса их площадь можно увеличить, а скорость строительства и стоимость дополнительно сократить. Воплощение этой идеи стало возможным благодаря оптимизации процесса печати и создания более производительного оборудова-

ния, а также возможности возведения не только отдельных объектов, но последовательной застройки целых улиц с использованием всего одного строительного 3D-принтера (рис. 33).

В конце 2019 г. New Story приступила к реализации проекта застройки деревни в штате Табаско (Мексика) доступными жильими домами, возводимыми по технологии строительной 3D-печати [47]. Проект рассчитан на несколько лет и реализуется до сих пор. В конечном итоге проект предусматривает печать до 500 подобных домов площадью порядка 50 м². При этом указывается, что печать одного дома с помощью используемой в данный момент обновленной версии принтера занимает около 24 ч.

Другой похожий проект строительства жилья для малообеспеченных слоев населения был реализован компанией ICON в 2020 г. в г. Остин, штат Техас, США [48]. В данном случае типовые социальные жилища площадью 40–50 м² строились для размещения бездомных граждан (рис. 35).

Летом 2021 г. компания АМТ-Спецавиа приступила к строительству коттеджного поселка в Ярославской обл. из 12 домов, возводимых с помощью портального 3D-принтера модели S-300 собственной разработки [49]. Согласно заявлению компании, возведение одного дома площа-

дью 46 м² будет обходиться в 914 тыс. р. без учета отделки. Дома планируется использовать для временного размещения студентов учебного центра компании (рис. 36).

В 2021 г. был возведен жилищный комплекс из нескольких двухэтажных домов площадью от 85 до 185 м² в г. Остине, США, которые уже сложно отнести к категории эконом-класса [50]. Уникальность проекта заключается в том, что в данном случае технология строительной 3D-печати первого этажа объектов эффективно совмешалась с широко распространенной в США технологией традиционного каркасного домостроения с применением пиломатериалов для устройства второго этажа здания (рис. 37).

В 2022 г. [51] компания 14Trees напечатала с помощью строительного 3D-принтера первую серию из 10 домов жилого поселка в Кении, которых в общей сложности будет 52 (рис. 38). Среднее время строительства каждого объекта первой серии, куда входили типовые дома площадью 56 м² с двумя спальнями и дома площадью 76 м² с тремя спальнями, составило одну неделю на дом. По оценкам 14Trees, стоимость печати каждого дома оказалась примерно на 20 % ниже, чем при использовании традиционных технологий.

В 2022 г. архитектурным бюро



Рис. 36. Возвведение первого из 12 домов коттеджного поселка в Ярославской обл., Россия, 2021 г. [49]



Рис. 37. Жилищный комплекс, возведенный путем комбинирования технологий, США [50]



Рис. 38. Печать первой серии из 10 домов жилого поселка, Кения, 2022 г. [51]



Рис. 39. Визуализация коттеджного поселка в Татарстане, Россия, 2022–2023 гг. [52]



Рис. 40. Визуализация поселка *The Genesis Collection at Wolf Ranch* в Техасе, США [53, 54]

3DLAND начата реализация проекта строительства жилого поселка с применением технологии АСП на территории Республики Татарстан [52]. Проект предусматривает строительство в общей сложности 34 типовых одноэтажных зданий площадью 102 м² с двумя спальнями, санузлом и объединенной кухней-гостиной (рис. 39).

Концепция массовой городской застройки с применением технологии АСП набирает обороты по всему миру. Наиболее амбициозным из таких проектов, по состоянию на момент подготовки настоящего обзора, можно назвать проект элитного поселка *The Genesis Collection at Wolf Ranch*, созданного компанией ICON совместно с Lennar в штате Техас, США [53, 54].

Проект предусматривает печать 100 одноэтажных жилых домов площадью 146–196 м² с тремя либо четырьмя спальнями (рис. 40). Рыночная стоимость объектов – от 450 тыс. дол. за

дом. Поселок возводится с применением одновременно нескольких строительных 3D-принтеров.

Анализ особенностей объектов, возводимых по технологии АСП

Представленный обзор рассматривает лишь небольшую часть реализованных за последние годы проектов, в которых применялась технология АСП. Однако обзор включает в себя наиболее характерные объекты и позволяет сделать общие выводы о тенденциях развития технологии и сферах ее практического применения в разных регионах мира, а также определить основные особенности их конструктивных и объемно-планировочных решений, а именно:

- технология АСП на сегодня применяется для возведения объектов до трех этажей, однако это может свидетельствовать о фактическом отсутствии ограничений в этажности, так как технологические различия при возве-
- дении второго, третьего и любого последующего этажа не являются принципиальными. В то же время можно отметить, что наибольшее развитие технологии АСП получила при строительстве одноэтажных объектов. Это обусловлено тем, что при помощи строительного 3D-принтера на текущем этапе развития технологии не могут возводиться пролетные и навесные конструкции, а эффективно изготовить можно лишь вертикальные конструкции либо горизонтальные конструкции, полностью опираемые на основание (например фундаментные плиты). В связи с этим задачи, связанные с устройством перекрытий и других несущих горизонтальных пролетных элементов, требуют использования дополнительных технологических подходов к производству работ на объекте;
- с учетом особенностей применения технологии АСП ее часто комбинируют с традиционными технологиями. Например, в Се-

верной Америке весьма распространен подход, при котором строительная 3D-печать применяется только для изготовления ограждающих конструкций сложной формы. При этом для внутренней части зданий активно используется технология каркасного домостроения с применением пиломатериалов. Такой подход позволяет придать зданиям уникальный архитектурный облик, при этом сохраняя высокий спрос на традиционные для американского рынка строительные материалы и технологии;

- способ аддитивного строительного производства применяется, как правило, для изготовления самонесущих ограждающих конструкций, перегородок, а также несъемной опалубки для последующего бетонирования несущих конструктивных элементов с использованием традиционной технологии монолитного домостроения [55]. Популярным подходом при использовании строительной 3D-печати является также печать параллельно с основными конструкциями зданий и сооружений дополнительных элементов интерьера (встраиваемые шкафы, камини, ниши для ванных), а также ниш для размещения инженерных сетей и оборудования;

- подходы к применению технологий АСП в Америке, Европе, Китае, России, в странах Африки и на Ближнем Востоке различаются с точки зрения особенностей конструктивных и объемно-планировочных решений возводимых объектов. Большинство реализованных за последние годы проектов в США, Мексике, Индии, а также в странах Африки были нацелены на создание типовых оптимизированных проектных решений в целях максимального сокращения себестоимости строительного производства при использовании новой технологии.

В Европе и на Ближнем Востоке реализуются преимущественно более дорогие дизайнерские проекты по возведению единичных строительных объектов с уникальной архитектурой и планировкой, что призвано показать потенциал развития архитектурного проектирования.

В Китае активно развиваются технологии заводского и цехового аддитивного строительного производства для печати мелко- и крупногабаритных сборных элементов зданий и сооружений в целях их последующего монтажа на строительной площадке.

В России на данный момент сложно выделить явный вектор развития рынка аддитивного строительного производства, что может быть связано как с отсутствием мер стимулирования спроса на эту продукцию со стороны государства и крупных девелоперских компаний, так и с большой сложностью и вариативностью климатических условий, в которых реализуются проекты.

Выводы

Проведенный обзор и анализ опыта реализации pilotных проектов показывает, что применение технологии АСП наиболее оправданно и может обеспечить высокую конкурентоспособность в сравнении с традиционными методами строительства в следующих случаях:

1. При строительстве объектов, для которых значительная доля затрат приходится на возведение вертикальных конструкций, прежде всего одноэтажных зданий и сооружений различного назначения с легкой кровлей, особенно в тех случаях, когда они возводятся в районах с теплым климатом. Например, одноэтажные дома эконом-класса для временного либо постоянного проживания, проекты которых не предусматривают устройства

сложного заглубленного фундамента, утепления ограждающих конструкций и специальной отделки. В таких случаях себестоимость возведения внешних стен «коробки» будущего здания может составлять до 90 % общей сметной стоимости строительно-монтажных работ, что делает применение технологии АСП крайне эффективным с точки зрения вклада в общую оценку экономической эффективности строительства.

2. При возведении большого количества типовых объектов в одной локации, что обеспечивает сокращение экономических затрат и затрат рабочей силы, связанных с транспортировкой и монтажом оборудования для строительной 3D-печати в расчете на среднюю себестоимость объекта в серии.

3. При сооружении сложных архитектурных форм и реализации уникальных объемно-планировочных решений. В этом случае экономическая эффективность достигается за счет исключения затрат на изготовление индивидуальных форм для бетонирования конструктивных элементов. При использовании технологии АСП, в отличие от большинства других технологий, почти любое усложнение архитектуры возводимых элементов не приводит к удороожанию производственного процесса. Эта особенность делает актуальным применение строительной 3D-печати в заводских условиях при производстве малых архитектурных форм и архитектурных элементов для последующей сборки, а также обеспечивает экономическую оправданность применения технологии при реализации сложных дизайнерских проектов строительства зданий и сооружений, даже в случае если они имеют два и более этажей и при их возведении должно выполняться комбинирование технологий.

гии АСП с традиционными технологиями строительства.

4. В условиях сложного доступа к рабочей силе, включая полевые походные условия, когда высокая автоматизация производственного процесса сокращает потребность в рабочей силе и повышает автономность и мобильность строительной 3D-печати, в

результате чего она может эффективно применяться для возведения временных инженерно-технических сооружений гражданского и специального назначения. Такая особенность может эффективно использоваться, например, для решения задачи временного размещения граждан в условиях чрезвычайных ситуаций

и стихийных бедствий, временного размещения рабочих при освоении новых территорий и др.

Работа выполнена в рамках государственного задания, утвержденного Министром России от 29 декабря 2022 г. № 069-00003-23-00 на 2023 г. и на плановый период 2024 и 2025 гг.

С П И С О К И С Т О Ч Н И К О В / R E F E R E N C E S

1. Zhang J., Wang J., Dong S. et al. A review of the current progress and application of 3D printed concrete [Обзор текущего прогресса и применения бетона, напечатанного на 3D-принтере]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 125, pp. 105533.
doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105533
2. Rehman A. U., Kim J.-H. 3D concrete printing: a systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics [3D-печать на бетоне: систематический обзор реологических свойств, конструкций, смесей, механических, микроструктурных характеристик и долговечности]. *Materials*, 2021, vol. 14(14), pp. 3800.
doi: 10.3390/ma14143800
3. Available at: <https://www.mightybuildings.com/projects-and-designs> (accessed: 03.07.2023).
4. Wan Qian, Yang Wenwei, Li Wang, Guowei Ma. Global continuous path planning for 3D concrete printing multi-branched structure [Глобальное непрерывное планирование траектории для 3D-печати многоразветвленной структуры из бетона]. *Additive Manufacturing*, 2023, vo. 71, pp. 103581.
doi: 10.1016/j.addma.2023.103581
5. Pat. USA № US5656230A. Additive fabrication method [Способ аддитивного изготовления] / Khoshnevis B. 08.12.1997.
6. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies [Автоматизированное строительство с помощью робототехники и информационных технологий, связанных с контурной обработкой]. *Automation in Construction*, 2004, vol. 13, iss. 1, pp. 5–19.
doi: 10.1016/j.autcon.2003.08.012
7. Khoshnevis B., Kazemian A. Contour crafting: a revolutionary platform technology [Контурная обработка: революционная технология платформы]. *Production&Application*, 2020, pp. 48–53.
8. Available at: <https://inhabitat.com/chinese-company-assembles-ten-3d-printed-concrete-houses-in-one-day-for-less-than-5000-each/> (accessed 03.11.2023).
9. Available at: <https://www.solidsmack.com/design/andrey-rudenko-3d-printed-castle-kingdom-printed-stuff/> (accessed 08.11.2023).
10. Available at: <https://specavia.pro/articles/pervyj-v-evrope-zhiloj-dom-na-pechatannyj-na-3d-printere-predstavili-v-yaroslavle> (accessed 12.06.2023).
11. Available at: <https://tcmaker.org/2015/09/18/tc-maker-andrey-rudenko-3d-printing-villas-in-philippines/> (accessed 04.08.2023).
12. Available at: <https://www.ixbt.com/news/2017/03/07/apis-cor-24-3d.html> (accessed 09.08.2023).
13. Гинзбург А. В., Адамцевич Л. А., Адамцевич А. О. Строительная отрасль и концепция «Индустрия 4.0»: обзор // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 7. С. 885–911.
doi: 10.22227/1997-0935.2021.7.885-911
14. Ginzburg A.V., Adamcevich L. A., Adamcevich A. O. The construction industry and the concept of "Industry 4.0": an overview. *Vestnik MGSU*, 2021, vol. 16, iss. 7, pp. 885–911. (In Russ.).
doi: 10.22227/1997-0935.2021.7.885-911
15. Available at: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/in-the-urals-has-completed-the-construction-of-a-3dprinted-lookout-tower> (accessed 03.09.2023).
16. Available at: <https://cobod.com/projects-partners/the-bod-building/> (accessed 17.08.2023).
17. Available at: <https://cybe.eu/cases/rdrone-lab/> (accessed 11.08.2023).
18. Available at: <https://archello.com/project/chicon-house> (accessed 19.08.2023).
19. Available at: <https://www.globalconstructionreview.com/chinese-3d-specialist-completes-worlds-largest-project/> (accessed 11.08.2023).
20. Available at: <https://www.indiatechonline.com/it-happened-in-india.php?id=4908> (accessed 26.07.2023).
21. Available at: <https://parametric-architecture.com/students-created-3d-printed-concrete-choreography-columns-for-dancers/> (accessed 11.08.2023).
22. Available at: <https://www.dezeen.com/2019/12/22/apis-cor-worlds-largest-3d-printed-building-dubai/> (accessed 15.07.2023).
23. Available at: <https://www.news18.com/news/tech/explained-the-tech-and-impact-of-indias-first-3d-printed-building>

- 3d-printed-two-storey-building-by-lt-3216011.html (accessed 22.07.2023).
24. Available at: <https://3dprint.com/292907/cemex-on-construction-3d-printing-investment-cobod-was-a-good-bet/> (accessed 23.08.2023).
25. Available at: <https://www.stirworld.com/see-features-peri-group-makes-germany-s-first-3d-printed-apartment-building> (accessed 12.08.2023).
26. Available at: <https://www.3dtide.com/blog/best-3d-printed-houses/> (accessed 15.09.2023).
27. Available at: <https://www.iconbuild.com/projects/usmc-vehicle-hide-structure-at-camp-pendleton> (accessed 24.08.2023).
28. Available at: <https://www.iconbuild.com/projects/3d-printed-barracks-at-camp-swift> (accessed 02.09.2023).
29. Available at: <https://www.sq4d.com/largest-3d-printed-home/> (accessed 25.08.2023).
30. Available at: <https://www.sq4d.com/first-3d-printed-house/> (accessed 06.09.2023).
31. Available at: <https://parametric-architecture.com/single-family-3d-printed-house-by-mense-korte-architekten-peri-3d-construction/> (accessed 20.08.2023).
32. Available at: <https://www.mynewsdesk.com/dk/cobod-international/pressreleases/europe-s-first-3d-printed-office-extension-is-now-complete-in-austria-3206117> (accessed 03.08.2023).
33. Available at: <https://www.architecturaldigest.com/story/habitat-for-humanity-3d-printer-home> (accessed 17.08.2023).
34. Available at: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/v-yaroslavl-vozveli-3d-pechatnoe-zdanie-v-forme-koski> (accessed 22.08.2023).
35. Available at: <https://www.holcim.com/who-we-are/our-stories/malawian-children-start-class-3d-printed-school> (accessed 04.09.2023).
36. Available at: <https://cobod.com/even-borneo-now-has-its-first-3d-printed-house/> (accessed 04.09.2023).
37. Available at: <https://cobod.com/record-speed-gutech-oman-3d-print-three-new-buildings-in-just-8-days/> (accessed 04.09.2023).
38. Available at: <https://www.thenationalnews.com/business/property/2022/10/31/dar-al-arkan-completes-first-3d-printed-villa-in-saudi-arabia/> (accessed 22.08.2023).
39. Available at: <https://www.iconbuild.com/projects/house-zero> (accessed 22.08.2023).
40. Available at: <https://parametric-architecture.com/scg-completed-the-worlds-first-3d-printed-medical-center-in-thailand/> (accessed 16.08.2023).
41. Available at: <https://www.peri-usa.com/projects/residential-and-multi-story/houston-3d.html> (accessed 17.08.2023).
42. Available at: <https://www.hannah-office.org/work/cores> (accessed 14.08.2023).
43. Available at: <https://expert.ru/2023/05/10/gazprom-neft-postroila-v-zapolyare-dlya-svoikh-sotrudnikov-dom-buduschego/> (accessed 04.09.2023).
44. Available at: <https://3d4art.ru/> (accessed 08.09.2023).
45. Available at: <https://cobod.com/global-inventory-over-3d-printing-buildings-shows-cobod-leading-position/> (accessed 24.08.2023).
46. Available at: <https://www.newstoryhomes.org/> (accessed 02.08.2023).
47. Available at: <https://www.iconbuild.com/projects/3d-printed-homes-in-nacajuca-mexico-with-new-story> (accessed 16.08.2023).
48. Available at: <https://www.iconbuild.com/projects/community-first-village> (accessed 16.08.2023).
49. Available at: <https://life.ru/p/1429776> (accessed 04.09.2023).
50. Available at: <https://www.iconbuild.com/projects/east-17th-street-residences> (accessed 18.08.2023).
51. Available at: <https://www.constructionkenya.com/11239/mvule-gardens-kilifi> (accessed 14.08.2023).
52. Available at: <https://kvadrum3d.ru/> (accessed 05.09.2023).
53. Available at: <https://homes.iconbuild.com/wolf-ranch/> (accessed 08.09.2023).
54. Available at: <https://newatlas.com/architecture/genesis-collection-wolf-ranch-icon-3d-print/> (accessed 08.09.2023).
55. Adamcevich A.O., Pustovgar A. P., Adamcevich L. A. Аддитивное строительное производство: особенности применения технологии // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 70–78. doi: 10.33622/0869-7019.2023.07.70-78
55. Adamcevich A. O., Pustovgar A. P., Adamcevich L. A. Additive construction production: features of the technology application. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2023, no. 7, pp. 70–78. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.07.70-78

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

НАПОМИНАЕМ, ЧТО ОФОРМИТЬ ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ
«ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»

МОЖНО НАЧИНАЯ С ЛЮБОГО МЕСЯЦА В ЛЮБОМ ОТДЕЛЕНИИ СВЯЗИ
ИЛИ В РЕДАКЦИИ, А ТАКЖЕ ПОДПИСАТЬСЯ НА ЭЛЕКТРОННУЮ ВЕРСИЮ ЖУРНАЛА.

ПОДПИСНЫЕ ИНДЕКСЫ ЖУРНАЛА В КАТАЛОГАХ:

• УРАЛ-ПРЕСС – **70695** • ПОЧТА РОССИИ – **ПП983** •