

УДК 624.05

3D-ПЕЧАТЬ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Н.И. Михайлов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. Развитие современных технологий и 3D-принтеров привело к росту популярности 3D-печати и в строительной сфере. 3D-принтеринг в строительстве избавляет человечество от множества проблем, связанных с этой отраслью, таких как: потребность в большом количестве рабочей силы, денежных затратах на строительство зданий и сооружений, увеличении скорости строительства и многое другое. Данный метод возведения зданий и сооружений выведет строительную отрасль совершенно на новый уровень. За счет скорости развития современных технологий и спроса в данной отрасли 3D-принтеринг развивается непомерными шагами. Однако не стоит забывать, что это относительно новое направление в строительстве, которое требует дальнейших исследований, в частности, определения прочностных характеристик напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов, изучения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, оценки экономической эффективности и т.д. Статья посвящена перспективному направлению в области аддитивных технологий, а именно использованию в строительстве 3D-принтеров, которые сильно снижают затраты труда и увеличивают скорость строительства зданий и сооружений. В данной статье рассматриваются плюсы и минусы данной технологии, перспективы ее развития в сравнении с другими методами строительства, приводятся примеры успешного возведения зданий и сооружений с помощью 3D-печати.

Ключевые слова: 3D-принтер, 3D-печать, строительные смеси, строительство, аддитивные технологии, послойное экструдирование, метод спекания, лазерная стереолитография.

Ссылка для цитирования: Михайлов, Н.И. 3D-печать в строительстве / Н.И. Михайлов// Инженерные исследования. - 2021. - № 3(3). - С. 28-35. – URL: <http://eng-res.ru/archive/2021/3/28-35.pdf>

3D-PRINTING IN CONSTRUCTION

N.I. Mikhailov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. The development of modern technology and 3D printers has led to an increase in the popularity of 3D printing in the construction industry. 3D printing in construction saves humanity from many problems associated with this industry, such as: the need for a large number of labor, the cost of building buildings and structures, increasing the speed of construction, and much more. This method of erecting buildings and structures will take the construction industry to a whole new level. Due to the speed of development of modern technologies and the demand in this industry, 3D printing is developing at exorbitant steps. However, do not forget that this is a relatively new direction in construction, which requires further research, in particular, determining the strength characteristics of structural elements printed on a construction printer, studying the thermal characteristics of enclosing structures, assessing economic efficiency, etc. The article is devoted to a promising direction in the field of additive technologies, namely the use of 3D printers in construction, which greatly reduce labor costs and increase the speed of construction of buildings and structures. This article examines the pros and cons of this technology, the prospects for its development in comparison with other construction methods, provides examples of the successful construction of buildings and structures using 3D printing.

Keywords: 3D printer, 3D printing, building mixtures, construction, additive technologies, layer-by-layer extrusion, sintering method, laser stereolithography.

For citation: Mikhailov, N.I. 3D-printing in construction / N.I. Mikhailov // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. - 2021. - No. 3(3). - Pp. 28-35. – URL: <http://eng-res.ru/archive/2021/3/28-35.pdf>

ВВЕДЕНИЕ

На фоне развития современных технологий и 3D-принтеров во многих отраслях промышленности и машиностроения их применение стало актуальным и в строительной сфере [1, 2].

3D-принтеры для строительства домов подразделяются на несколько типов и отличаются методами возведения стен и конструкцией самого 3D-принтера. В основном методы возведения зданий отличаются самим процессом постройки, одни виды принтеров создают архитектурные элементы здания и последующая их сборка на строительной площадке, другие позволяют сразу напечатать полноценное здание. Конструкция 3D-принтера основана на базе руки манипулятора и состоит, как правило, из четырех или двух опор. Габариты печатаемого сооружения напрямую зависят от габаритов самого 3D-принтера. Процесс печати зданий и сооружений не во многом отличается от печати других 3D-принтеров, только вместо пластика или другого более податливого материала 3D-принтер зданий и сооружений использует быстротвердеющую бетонную смесь с разными добавками. Чтобы сделать конструкцию более прочной производится ее армирование, горизонтальный армированный пояс укладывается между слоями, а вертикальную арматуру укладывают после затвердевания конструкции и затем заливают бетонной смесью.

Классификация 3D-принтеров по мобильности [3]:

- Стационарные - работают либо с небольшими фрагментами будущего здания, либо собираются сразу на всю площадь строительной площадки и полную высоту здания.
- Мобильные (портальные) - могут устанавливать несколько дней, чаще всего это порталные принтеры.
- Полностью мобильные - их можно доставить на объект и потратить минимальное количество времени на их установку и запуск системы.

ПРИМЕРЫ ЗДАНИЙ, ПОСТРОЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ 3D-ПРИНТЕРОВ

В августе 2014 года в США компания Totalkustom напечатала замок. 3D-принтер печатал со скоростью полметра в восемь часов, а общее время, затраченное на строительство замка, составило два месяца. Основная часть замка была напечатана цельной единой частью, башни и другие элементы были напечатаны отдельно (рис. 1, рис.2)



Рис. 1. Процесс печати основной части замка¹
Fig. 1. The process of printing the main part of the castle



Рис. 2. Полностью напечатанный замок¹
Fig. 2. Fully printed castle

В России также индустрия 3D-печати зданий и сооружений не стоит на месте, и в октябре 2017 года в Ярославле компания Спецавиа построила первый в СНГ и Европе жилой дом с помощью метода 3D-печати. Печать данного дома в общей сложности заняло 2 года, однако сами работы на строительной площадке по возведению дома заняли всего один месяц, за счет того, что вся основная часть здания была напечатана по частям и собрана непосредственно на строительной площадке. Строительство крыши и внутренние отделочные работы были завершающим этапом строительства данного жилого здания (рис. 3).

¹ 3D-печатный замок, построенный на заднем дворе дома, предвещает будущее архитектуры [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.vzavtra.net/stroitelnye-texnologii/3d-pechatnyj-zamok-postroennyj-na-zadnem-dvore-doma-predveshhaet-budushhee-arxitektury.html> (дата обращения: 21.05.2021)

В декабре 2019 года в Мексике американская компания Icon по заказу компании New Story напечатала два жилых здания общей площадью 46,5 м². Напечатанные сооружения имеют плоскую крышу и изогнутые стены. Напечатаны данные здания были одной цельной конструкцией, что делает данную работу особенно уникальной в перечне данных примеров (рис. 4).



Рис. 3. Полностью напечатанный дом²
Fig. 3. Fully printed house



Рис. 4. Завершенный вариант зданий³
Fig. 4. Completed version of buildings

Также прекрасным примером является самое большое в мире здание, построенное с помощью 3D-принтера в октябре 2019 года компанией Apis Core. Данное здание было отпечатано непосредственно на строительной площадке в Дубае. Площадь здания составляет 650 квадратных метров, а высота 9,5 метров, благодаря этому здание было занесено в Книгу рекордов Гиннеса как самое большое здание, напечатанное 3D-принтером на строительной площадке. (рис. 5)



а)



б)

Рис. 5. Здание, построенное с помощью 3D-принтера компанией Apis Core⁴: а - процесс печати, б – готовое здание
Fig. 5. A building built with a 3D printer by Apis Core: a - printing process, b - finished building

Данный пример отображает перспективы развития данной сферы аддитивных технологий, в будущем за счет развития технологий и материалов печати данный рекорд будет побит.

В ноябре 2018 года на территории Саудовской Аравии Нидерландская компания CyBe Construction напечатала здание за максимально возможный короткий срок, всего за восемь дней. На печать необходимых элементов ушло семь дней, а для сборки здания потребовался всего день. Всего было напечатано 48 архитектурных элементов, блоков ушло на стены и 21 блок на парапеты (рис. 6).

² Мы обогнали французов [Электронный ресурс]. - URL: <https://rg.ru/2018/04/19/reg-cfo/pod-iaroslavlem-postroi-at-3d-poselok.html> (дата обращения: 22.05.2021)

³ Жилой район, напечатанный на 3D-принтере, в Мексике [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.admagazine.ru/the-city/zhiloy-rajon-napechatannyj-na-3d-printere-v-meksike> (дата обращения: 22.05.2021)

⁴ В Дубае появилось самое большое в мире здание, напечатанное с помощью 3D-принтера [Электронный ресурс]. - URL: <https://archi.ru/news/85248/-v-dubae-poyavilos-samoe-bolshoe-v-mire-zdanie-napechatannoe-s-pomoschyu-d-printera> (дата обращения: 22.05.2021)



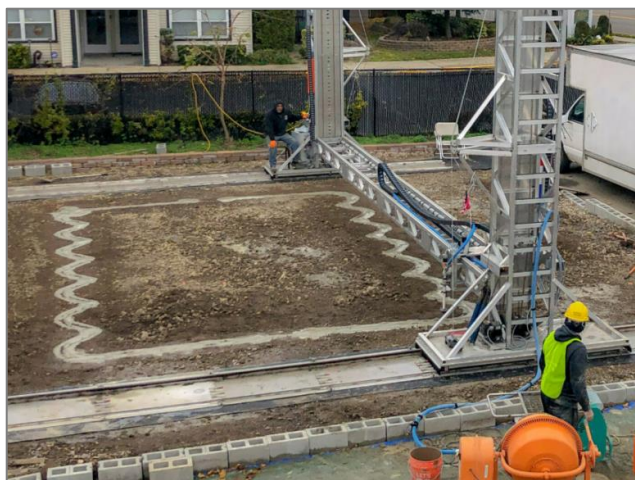
а)



б)

Рис. 6. Здание компании CyBe Construction⁵: а – процесс печати, б - готовое здание
Fig. 6. CyBe Construction building: a - printing process, b - finished building

В августе 2019 года на территории США компания S-Squared 3D Printers представила прототип жилого здания, которое можно напечатать в пределах 12 часов, с помощью 3D-принтера двухопорной конструкции. Дом площадью 46 квадратных метров (рис. 7).



а)



б)

Рис. 7. Здание компании S-Squared 3D Printers⁵: а – процесс печати, б - готовое здание
Fig. 7. S-Squared 3D Printers building: a - printing process, b - finished building

Смотря на все вышеприведенные примеры зданий и проектов, можно сделать вывод что данная индустрия развивается непомерными шагами. Все больше и больше предприятий видят перспективы в данной сфере, что привлекает множество инвесторов, которые развивают данную область. В будущем за счет этого процесс строительства станет еще более доступным и автоматизированным. Объемы производства и масштабы возводимых зданий в перспективе будут увеличиваться что выведет 3D-принтеринг зданий на новый уровень.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ 3D ПЕЧАТИ В РОССИИ

Многие ошибочно полагают что 3D-принтеринг слабо развит в России [4], это ошибочное мнение поскольку Россия является одной из лидирующих стран в данной сфере, за счет компании упомянутого ранее ярославского инженера Александра Маслова Спецавиа. Александр Маслов создал множество моделей 3D-принтеров и напечатал стены своего собственного семейного дома. Александр занялся популяризацией 3D-принтеринга зданий в Европе и странах СНГ, за счет продажи 3D-принтеров и их производства. Также Маслов является резидентом «Сколково» и обладателем гранта от Фонда Бортника. Компания Спецавиа опережает своих конкурентов за счет качества производимых принтеров и качества

⁵ 17 реальных зданий, напечатанных на 3D-принтере [Электронный ресурс]. - URL: <https://concreteunion.ru/novosti-otrasli/17-realnyh-zdaniy-napechatannyh-na-3d-printere/> (дата обращения: 25.05.2021)

построенных домов, в этом можно убедиться на примере дома самого Александра Маслова и множества других жилых домов, напечатанных принтерами компании Спецавиа (рис.8).

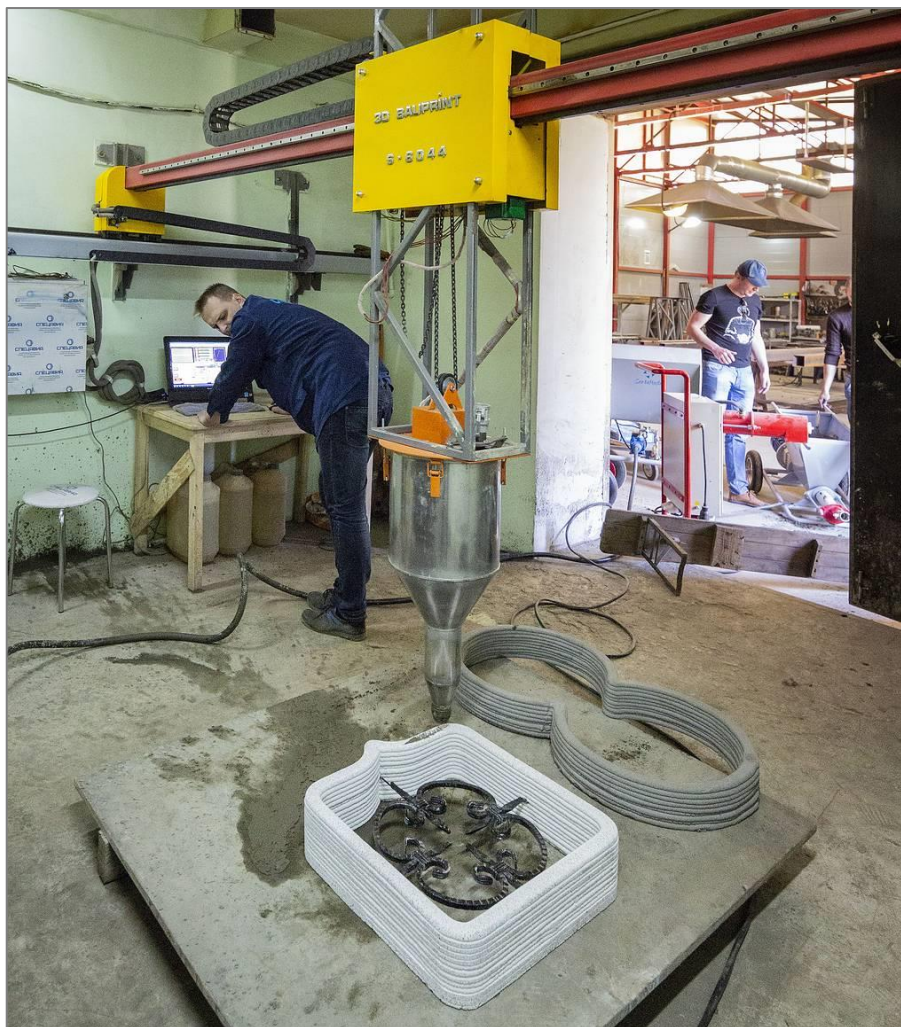


Рис. 8. Принтер компании Спецавиа⁶
Fig. 8. Printer of the Spetsavia company

Компания Спецавиа также успешна за счет разнообразия и количеству принтеров в модельном ряду. Примеры принтеров, созданных компанией Александра Маслова [5]:

- S-6045: устройство может использоваться для печати сложных конструкций размером до 12,6 квадратных метров. Стоимость устройства: 21 тыс. долларов.

- S-1160: этот принтер позволяет печатать крупные конструкции и здания площадью до 280-ти квадратных метров. Стоимость устройства: 29 тысяч долларов.

- S-4063: это небольшое устройство используется для печати малых архитектурных форм, отдельных элементов для домов, бетонных конструкций площадью до 18-ти квадратных метров. Стоимость устройства: 8,5 тыс. долларов.

С помощью данных принтеров компании Спецавиа появляется возможность печатать дома разной формы и размера.

СПОСОБЫ ОБЪЕМНОЙ ПЕЧАТИ

Помимо разнообразия конструкций и размеров 3D-принтеров, также можно выделить три способа печати [6], представленных на рис.9.

⁶ Как ярославский инженер напечатал на принтере дом для своей семьи [Электронный ресурс]. - URL: <https://tass.ru/obschestvo/5206214> (дата обращения: 27.05.2021)

Послойное экструдирование вязкой рабочей смеси

- В этом случае из рабочего «сопла» выдавливается сметанообразная смесь бетона с добавками. Первым обосновал концепцию применения робота в строительстве в виде крана-манипулятора, укладывающего вязкую бетонную смесь по заданной программе, промышленный дизайнер Сергей Дудин совместно со специалистами МХТИ имени Д.И. Менделеева в 1995 году.

Метод спекания / селективное спекание

- При этой технологии в рабочей зоне 3D-принтера происходит расплавление рабочей смеси, причем плавление достигается сконцентрированным лазером или солнечным лучом, а рабочей смесью выступает обычный песок. Объект формируется из плавкого порошкового материала (пластик, металл) путём его плавления под действием лазерного излучения.

Лазерная стереолитография

- Технология лазерной стереолитографии основана на фотоинициированной лазерным излучением или излучением ртутных ламп полимеризации фотополимеризующейся композиции (ФПК). С помощью этой технологии спроектированный на компьютере трёхмерный объект выращивается из жидкой ФПК последовательными тонкими (0,1-0,2 мм) слоями, формируемыми под действием лазерного излучения на подвижной платформе, погружаемой в ванну с ФПК.

Рис. 9. Способы 3D-печати

Fig. 9. 3D printing methods

Смеси для печати на строительных 3D-принтерах заслуживают отдельного внимания и изучения. Экспериментальному исследованию свойств бетонных смесей для 3D-печати, в частности, посвящены работы [7-9].

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ 3D-ПЕЧАТИ

Достоинства и недостатки 3D-печати по сравнению с другими видами строительства представлены в таблице 1 [10].

Таблица 1. Достоинства и недостатки 3D-печати
Table 1. Advantages and disadvantages of 3D printing

Достоинства	Недостатки
<ul style="list-style-type: none">- Точность и скорость строительства: 3D-принтер преобразовывает цифровую версию здания в физическую с помощью материала и самой установки шанс ошибки либо какой-либо другой неточности сводится к нулю.- Снижается риск опасных ситуаций на строй площадке, за счет того, что в работе принтера человек практически не участвует.- Сокращается количество отходов после строительства за счет печати деталей по заранее установленным моделям и цифровым версиям.- Экономия средств за счет снижения расходов на рабочую силу, 3D-принтер печатает дома практически без участия человека.	<ul style="list-style-type: none">- Уменьшается число рабочих мест в строительной сфере.- Высокая цена за ошибку: всего одна ошибка в цифровой модели здания может повлечь за собой большие траты на ее устранение на строительной площадке.- Большие траты на обслуживание оборудования и хранение 3D-принтера, поскольку промышленный 3D-принтер для строительства зданий имеет большие габариты, приходится тратить средства на его хранение.- В процессе строительства может использоваться небольшое разнообразие материалов, поскольку один и тот же принтер не может работать сразу с несколькими материалами.- Траты на транспортировку самой установки: из-за больших габаритов принтера приходится тратить средства на транспортировку все частей конструкции чтобы собрать ее непосредственно на строительной площадке.

Как модно заметить недостатков оказалось больше нежели достоинств, но это не значит, что эта технология является безнадёжной и бесперспективной. Все недостатки вытекают лишь из стоимости самого производства. В будущем стоимость производства будет снижаться и большинство недостатков наоборот преобразятся в достоинства данного метода строительства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении хотелось бы подвести итог, что 3D-принтеринг зданий и сооружений - это суперперспективное направление в индустрии строительства, за счет своих преимуществ в сравнении с другими методами строительства. 3D-принтеры быстрее, дешевле и экономичнее нежели другие виды строительства зданий и сооружений. 3D-печать - это будущее индустрии и данный метод строительства даст толчок новым идеям и больше свободы фантазии дизайнерам и инженерам, за счет пластичности материала и порталной конструкции самого принтера.

В результате работы удалось выяснить, что 3D-принтеринг развивается не только за рубежом, как все считают, но и в нашей стране, которая занимает лидирующие позиции в данном направлении строительной отрасли. 3D-принтеринг зданий и сооружений имеет очень большие перспективы в нашей стране так как одними из самых больших мировых компаний в данной сфере строительства являются российскими организациями, за счет этого в нашей стране 3D-принтеринг может развиваться намного быстрее нежели в других странах, и это не может не радовать.

3D-печать зданий и сооружений - это очень перспективное и современное направление строительства и многие инженеры или студенты строительных вузов заинтересованы развиваться в данном направлении, поэтому конкуренция только растет. Но за счет конкуренции данное направление достигнет новых высот и станет ведущим на рынке технологий строительства зданий и сооружений.

Однако не стоит забывать, что это относительно новое направление в строительстве, которое требует дальнейших исследований [11-13]: определение прочностных характеристик напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов, изучение теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, оценки экономической эффективности и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляева, С.В. Применение 3D-принтера в строительной отрасли / С.В. Беляева, О.М. Кротов, А.И. Гокканен, В.А. Обмачкин // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием, Инженерно-строительный институт: В 3 частях. Ответственные редакторы: Н.Д. Беляев, В.В. Елистратов. - 2019. - С. 83-85.
2. Симакова, Е.А. Применение 3D-печати в строительстве / Е.А. Симакова, К.И. Селякова, Д. Кравченко // Инженерные исследования. - 2021. - № 1 (1). - С. 3-11.
3. Астафьев, М.Ю. 3D-строительство / М.Ю. Астафьев // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова. - 2017. - С. 4607-4610.
4. Гришин, А.В. Использование 3D-технологий в строительстве / А.В. Гришин // Управление инновациями: теория, методология, практика. 2016. № 19. С. 94-98.
5. Рукосуева, Е.А. Перспективы использования 3D-печати в российском строительстве / Е.А. Рукосуева, Б.Р. Юлдашев, М.М. Яворский // Молодежь и XXI век - 2019. Материалы IX Международной молодежной научной конференции. - 2019. - С. 179-181.
6. Закревская, Л.В. 3D-печать в строительстве: состояние и перспективы / Л.В. Закревская, О.Е. Закревский, П.А. Любин, И.В. Козлов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2017. - № 7-8 (222-223). - С. 35-38.
7. Самохвалова, К.А. Экспериментальное исследование свойств бетонных смесей для 3D-печати / К.А. Самохвалова, В.И. Клещевникова, С.В. Беляева // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург. - 2021. - С. 56-58.
8. Самохвалова, К.А. Смеси для строительной печати в условиях пониженных температур / К.А. Самохвалова, Д.В. Rogozinnikova, С.В. Беляева // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург. - 2021. - С. 59-61.
9. Usanova, K. Heat release and thermal conductivity of expanded-clay concrete for 3D printer / K. Usanova, Yu.G. Varabanshchikov, L. Pakrastins, S.V. Akimov, S.V. Belyaeva // Magazine of Civil Engineering. - 2021. - № 2 (102). - С. 10210.
10. Булах, Р.В. 3D-технологии в строительстве и проектировании / Р.В. Булах // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова. Посвящена 165-летию В. Г. Шухова. Белгород. - 2018. - С. 2300-2307.

11. Gamayunova, O. Thermotechnical calculation of enclosing structures of a standard type residential building / O. Gamayunova, M. Petrichenko, A. Mottaeva // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. Сер. "International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies". - 2020. - С. 012066.

12. Школяр, Ф.С. Определение прочностных характеристик напечатанных на строительном принтере конструктивных элементов / Ф.С. Школяр, О.М. Кротов // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург. - 2021. - С. 35-38.

13. Shatornaya, A.M. Efficiency of 3D printing in Civil Engineering / A.M. Shatornaya, M.M. Chislova, M.A. Drozdetskaya, I.S. Ptuhina // Construction of Unique Buildings and Structures. - 2017. - № 9 (60). - С. 22-30.

ОБ АВТОРАХ

Никита Игоревич Михайлов – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: nickitamixaylow@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Nikita I. Mikhailov – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: nickitamixaylow@yandex.ru