

# Информационное моделирование и аддитивные технологии в строительстве

УДК 69 : 004.62

## Игнатова Елена Валентиновна

Доцент, к.т.н., доцент кафедры «Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) (Москва, Россия); e-mail: [ignatova@mgsu.ru](mailto:ignatova@mgsu.ru)

## Преденна Валентина Павловна

Магистрант кафедры «Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) (Москва, Россия); e-mail: [predeina.valya@gmail.com](mailto:predeina.valya@gmail.com)

**Аннотация:** Обсуждаются аспекты цифровизации строительства, связанные с применением информационного моделирования и 3D-печати. Объект исследования — аддитивное производство и его особенности в строительстве. Предмет исследования — влияние аддитивного строительного производства на информационное моделирование объекта строительства. Цель исследования — разработка методики информационного моделирования объекта строительства с учетом 3D печати. В результате исследования проанализированы ограничения аддитивного строительного производства и сформирована методика информационного моделирования с их учетом. Методика включает формирование параметров модели, на которые накладываются ограничения, отображение значений параметров в информационной модели, проверку значений параметров на допустимые значения. Проверка значений параметров может стать частью обязательного процесса верификации информационной модели строительного объекта.

Предложенная методика не зависит от уровня развития технологии 3D-печати.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, аддитивное строительное производство, 3D-печать, BIM, информационное моделирование в строительстве

## Актуальность работы

Экономика России находится в процессе цифровой трансформации. Во все отрасли экономики внедряются сквозные цифровые технологии, в том числе во многих отраслях успешно используется 3D-печать или аддитивное производство. В строительных работах и типовых технологических процессах также нашло отражение применение 3D-печати. С 1 января 2021 года по 1 января 2024 года будет действовать предварительный национальный стандарт, в котором установлены общие требования к применению 3D-печати в строительстве. Кроме того, в

## INFORMATION MODELING AND ADDITIVE TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION

### Ignatova Elena

Associate Professor, Ph.D. in Engineering, associate professor of Department of Information Systems, Technologies and Automation in Civil Engineering at National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), (Moscow, Russia); e-mail: [ignatova@mgsu.ru](mailto:ignatova@mgsu.ru)

### Predeina Valentina

Master's Degree student of Department of Information Systems, Technologies and Automation in Civil Engineering of National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), (Moscow, Russia); e-mail: [predeina.valya@gmail.com](mailto:predeina.valya@gmail.com)

**Abstract:** The aspects of construction digitalization related to the use of information modeling of the construction object (BIM) and 3D printing are discussed. The object of the research is additive manu-

facturing and its features in development. The subject of the research is the influence of additive constructing on BIM. The purpose of the research is to develop a BIM methodology, using 3D printing. The limitations of additive constructing are analyzed, and the methodology of information modeling considering these limitations is formed as a result of the research. The main limitations of 3D printing are associated with the size of the construction object, size, shape and weight of structures, used materials, used reinforcement technology, costs, temperature and print speed. The methodology includes the formation of model with special parameters, showing their values, and the verification of parameter values for acceptability. Checking the values of the parameters can be a part of mandatory verification process of the information model. The proposed method does not depend on the level of development of a 3D printing technology.

**Keywords** additive technologies, additive construction manufacturing, 3D printing, BIM, building information modeling.

строительстве цифровую трансформацию обеспечивают путем создания информационных систем градостроительной деятельности, перевода процессов и услуг в электронный вид, управления жизненным циклом объектов капитального строительства на основе информационного моделирования. Применение технологии информационного моделирования в сфере строительства с 2014 года поддержано правительством России. С 1 января 2022 года формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства являются обязательными для всех объектов, финансирование которых осуществляется с привлечением бюджетных средств, кроме объектов капитального строительства, которые создаются в интересах обороны и безопасности.

Использование любой цифровой технологии имеет преимущества, недостатки, условия и ограничения. Совместное использование информационного моделирования и 3D-печати может дать синергетический эффект, но может потребовать адаптировать эти технологии для совместного использования. При этом цифровизация, как правило, требует изменения традиционных процессов строительного проектирования и производства.

Информационное моделирование объекта капитального строительства на любом этапе его жизненного цикла начинается с определения задач, которые будут решаться на основе данных информационной модели. Сформированный список задач позволяет определить уровень проработки информационной модели (LOD), в том числе набор необходимых параметров элементов информационной модели. На основе данных информационной модели формируется проектная документация, которая при использовании 3D-печати должна включать информацию о технологии печати. Выбор технологий строительного производства влияет на набор и значения характеристик объекта строительства и отражается в параметрах его информационной модели. Учитывая, что аддитивное строительное производство имеет много особенностей, необходимо выделить значимые параметры строительных конструкций для их учета в процессе информационного моделирования.

Целью работы является – разработка методики информационного моделирования объекта строительства с учетом особенностей 3D печати.

Объект исследования – аддитивное производство и его особенности в строительстве. Предмет исследования – влияние аддитивного строительного производства на информационное моделирование объекта строительства.

## Аддитивное производство

С развитием информационных технологий в целом, а также с созданием первых 3D принтеров открылись новые просторы для научных исследований, изобретений в области строительства: как проектирования, так и производства.

Технология трехмерной печати, появившаяся в 1948 году, имеет немалую историю. Развитие технического и программного обеспечения, увеличение количества доступных материалов подвели технологию к промышленному использованию. В начале 1980-х годов методы, основанные не на удалении материала, а на послойном выращивании изделия по модели САПР, начали развиваться для производства деталей [1]. Данный метод получил название метод аддитивного производства (Additive Manufacturing).

В 2008 году количество видов материалов для 3D-печати перевалило за сто, включая бетон, гипс, деревянное волокно. За два десятилетия технология выросла до тех объемов, когда благодаря ей можно получать металлические и неметаллические изделия, не требующие последующей механической обработки. В 2012 году технология трехмерной печати впервые была применена в строительстве США. В 2014 году китайская компания «WinSun» выпустила первый «напечатанный дом», а затем была напечатана целая серия домов [2]. В 2015 году началось практическое применение 3D-строительных принтеров в России.

## Аддитивное производство в строительстве

Существуют три основных метода печати, используемых в строительстве:

1. Метод селективного спекания. Источник энергии, например лазер или солнечный луч, расплавляет и спекает рабочую смесь;
2. Метод напыления. Используется метод компонентной склейки или стереолитография;
3. Послойное экструдирование. Выдавливается специальная смесь, в состав которой входят различные добавки для пластичности, быстрого твердения и прочности. Наибольшее количество зданий выполняется с помощью данного метода печати.

Сущность трехмерной печати строительных конструкций методом экструдирования заключается в послойном отверждении строительной смеси по 3D-модели, которая в свою очередь была создала с

помощью трехмерного моделирования [3]. Печатающая головка принтера печатает рисунок горизонтального сечения модели, двигаясь по осям X и Y, а после завершения нанесения слоя поднимается по оси Z на величину, равную толщине слоя. Данная последовательность действий сохраняется, пока объект не будет готов. Технологию экструдирования в 2012 году впервые описал профессор Южно-Калифорнийского университета Бехрох Хошневис. «Сама система для печати с помощью 3D-принтера содержит следующие элементы: систему движения (козловые краны или роботизированный манипулятор (рисунки 1, 3)); систему экструзии (печатающая головка с насадкой); портативную смесительную установку (просеивание и смешивание компонентов); систему накачки (контролируется электроникой); блок управления (электроника, позиционирование и система управления); систему мониторинга (камеры/мониторы слежения за процессом печати); систему безопасности (автоматически выключает систему при необходимости)» [4].

В качестве альтернативы принтеров, печатающих целые здания, используются принтеры, печатающие только строительные блоки или только отдельные конструкции. Кроме стационарных 3D принтеров используются мобильные и самоходные, которые можно легко доставить и установить на строительную площадку.

Строительство с помощью аддитивных технологий целесообразно при возведении монолитных конструкций. Например, «создание фундаментов с по-

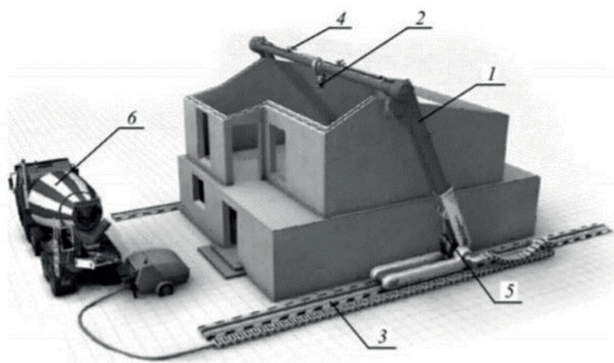


Рис. 1. Система для печати зданий с помощью 3д принтера:

- 1 – сопло (экструдер), 2 – рама; 3 – направляющие вдоль здания; 4 – механизм передвижения сопла;  
5 – устройство для поднятия конструкции принтера;  
6 – автобетоносмеситель для подачи цементного состава [4]

мощью 3D-принтера превосходит по скорости и эксплуатационным свойствам традиционные технологии. Средняя скорость печати современного строительного принтера составляет от 7 до 10 м<sup>2</sup>/мин» [5]. 3D-принтеры могут изготавливать отдельные сборные конструкции в заводских условиях. Неоспоримым преимуществом 3D-принтера является снижение количества строительных отходов по сравнению с классическим строительством [6].

«Аддитивные технологии в строительстве в целом повторяют традиционное возведение зданий и сооружений. Начало работ включает разработку общей концепции здания или сооружения, разработку проекта и подбор материалов. В случае трехмерной печати для возведения конкретных конструкций требуется корректировка состава бетонной смеси, на основе которой будут возводиться конструкции, например стены» [7].

Чтобы увеличить геометрическое разнообразие конструкций здания, слои можно укладывать нецентралью друг над другом. У каждой смеси для печати существует предельный сдвиг слоев, который не нарушит целостность конструкции и не приведет к сползанию слоя.

«Строительным материалом для возведения несущих элементов является быстротвердеющий реакционно-порошковый бетон, армированный стальной или полимерной микрофиброй» [8]. Особенностью такого бетона является отсутствие крупного заполнителя. «Добавка полиэфирной и стеклянной фибры дает некоторое увеличение прочности и обеспечивает трещиностойкость длинных деталей» [9]. «Введение добавки суперпластификатора улучшает поровую структуру цементного камня, что в свою очередь повышает морозостойкость бетона» [10]. В исследовании [11] разработаны оптимальные составы фиброцементных смесей, которые можно использовать для 3D-печати. Представлена таблица прочностных характеристик наиболее удачных составов бетонной смеси. Сложность разработки наилучшего состава обусловлена тем, что осадка бетона должна стремиться к нулю, но при этом бетон должен быть жидким, чтобы он смог выдавливаться из принтера.

При использовании бетонной смеси высокопрочного класса В50 «схватывание смеси происходит в течение 3–120 мин. В первые сутки конструкция обретает до 25% проектной прочности. Для бетонной смеси характерны малая усадка (0,6 мм/м в возрасте 28 суток) и минимальное водоцементное отношение» [4].

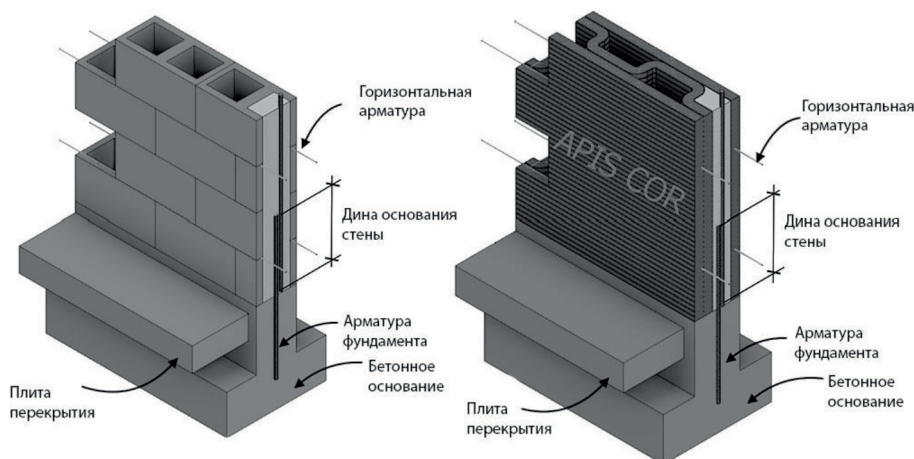


Рис. 2. Сравнение разреза по стене у здания, построенного стандартным способом и способом 3D-печати [15]

В качестве упрочняющих материалов, используемых при послойном экструдировании, могут применяться фибра (стеклянная, полипропиленовая, базальтовая, стальная) или арматура (стержни, прутья, сетка).

«Немаловажным также является необходимость введения в строительный материал наполнителей, влияющих на теплопроводность. Помимо физических и химических свойств потребителя все чаще интересует экологичность и биоразлагаемость материала» [12]. При изготовлении материала для строительной 3D печати предлагается использовать сланцевую золу и торф. Голландская компания DUS Architects заявила о строительстве канального дома в Амстердаме из биопластика, полученного в результате переработки зерновой культуры. Итальянская компания WASP представила экодом, для которого материал печати на 25% состоял из местной почвы (глина и песок), на 40% из соломы, на 25% из рисовой шелухи и на 10% из гидравлической извести.

Согласно источнику [13], стоимость квадратного метра «напечатанного» дома в среднем меньше 2,8 раз стоимости здания, построенного традиционным способом. Очевидно, что стоимость аддитивного строительства намного привлекательнее, учитывая сокращение сроков строительства. Например, срок строительства здания из пеноблоков площадью 120 м<sup>2</sup> составляет от 3 месяцев. Время возведения дома с помощью 3D-принтера сокращается до считанных дней, если здание возводится на готовом фундаменте.

Китайские изобретатели сконструировали 3D-принтер, который в состоянии создать 10 домов

в сутки площадью 200 м<sup>2</sup>. Причем стоимость каждого нового объекта недвижимости не превышает 5000 долларов США.

Производство небольшого дома от отечественной компании Apis Cor обойдется около 750000 р. Проблема состоит в том, что стоимость самого принтера может достигать от 18000 до 75 млн. р.

3D-принтеры позволяют архитекторам воплотить в жизнь самые разнообразные идеи. Можно предположить, что с развитием технологий в дальнейшем с помощью строительных принтеров можно строить дома класса люкс. Вполне вероятно, что данную технологию можно будет использовать для бюджетного строительства. Возможно, в будущем технологии адаптируют к многоэтажным и высотным зданиям [14].

Среди причин, по которым развитие 3D-печати не может расти стремительно можно отметить проблемы сертификации 3D-принтеров, отсутствие нормативных документов для данного строительства. Специалисты видят выход из ситуации, используя схожие конструктивные решения при традиционном и 3D-строительстве. Некоторые компании стремятся максимально повторить решения домов, построенных обыкновенным способом. Благодаря этому готовые дома имитируют конструкции, для которых разработана всевозможная документация (рисунок 2) [15].

В зависимости от выбранной строительной технологии на 3D-принтере можно печатать строительный объект целиком на строительной площадке, можно формировать его отдельные конструкции для последу-

ющего монтажа на строительной площадке, можно печатать материально-технические ресурсы (блоки, кирпичи и т.п.). Исходными данными для печати являются геометрические параметры объекта, информация о материалах, информация о вспомогательных процессах. Все исходные данные используются для формирования технологии (алгоритма) печати и программного G-кода для 3D-принтера. Геометрические параметры объекта могут быть получены путем оцифровки (сканирования) существующих прототипов или реконструируемых поверхностей. Форма и размер объекта могут быть созданы в программах 3D-САПР моделирования.

## Информационное моделирование

Информационное моделирование в строительстве — это процесс создания трехмерной, параметрической, объектно-ориентированной цифровой модели объекта капитального строительства, цифровой модели окружающей местности, а также набора электронных документов и сведений, необходимых для управления жизненным циклом объекта. Программы информационного моделирования могут не только формировать и хранить данные о геометрии объекта, но позволяют создавать и хранить информацию о его материалах, внутренней структуре (армирование), физических и других характеристиках. Так как на основе информационной модели формируется проектная документация, необходимо и возможно зафиксировать сведения о типе принтера, технологии печати и применяемых материалах. Дополнительно к физическим характеристикам отдельных материалов многослойных конструкций, можно хранить информацию об общей прочности напечатанной конструкции с учетом внутреннего строения, состава материалов, наличия несъемной опалубки, толщины печатного слоя материала и технологии печати. Можно хранить информацию о дополнительной обработке объекта перед использованием, например, очист-

ке, оштукатуривании, окраске и т.д. Данные о геометрии объекта могут быть представлены как твердотельные или поверхностные модели и экспортированы в стандартные САПР-форматы.

Переход от идей и общих теорий к конкретным решениям был показан на конференции Autodesk University Russia 2018 [16]. Был выдвинут примерный принцип работы и необходимый штат сотрудников, который включал бы архитектора (создание информационной модели), инженера-конструктора (расчет толщины стен, прочности компонентов, назначение времени затвердевания бетона), инженера по 3D-печати (настройка скорости печати и управление принтером). При этом, как и в обыкновенной информационной модели, все данные о проекте должны храниться в BIM-модели, из которой их можно извлечь в любой момент.

По мнению директора по развитию компании АОСГ Анис Ламри [17], 3D принтер легко может синхронизироваться с различными ПО, в том числе с программой информационного моделирования Autodesk Revit. Существует как минимум три способа экспорта информационной модели из Autodesk Revit в ПО для трехмерной печати [18]:

- использование плагина STL Exporter for Revit, конвертирующего формат .rvt в формат .stl;
- экспорт в формат .stl через предварительную конвертацию в .dwg;
- экспорт в программу Autodesk Inventor Professional с последующим выводом на печать через 3D принтер.

## Ограничения на моделирование строительных объектов для 3D-печати

В силу технологических особенностей строительства максимальная площадь и этажность здания огра-

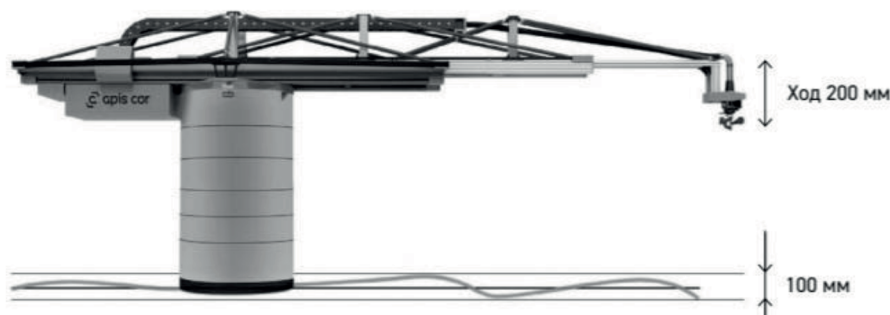


Рис.3. Условный разрез строительной площадки [19]

ничивается рабочим полем принтера. Особенностью объемно-планировочных решений зданий является отсутствие перепада высот, так как это обусловлено технологическими условиями строительства. Для нормальной работы строительного принтера перепад высот должен составлять не более 10 см (рисунок 3) [19].

Для индивидуального малоэтажного строительства максимальная этажность – 3. Если необходимо создать конструкцию выше трех этажей, то следует отдельно «напечатать» этаж и произвести монтаж на готовую конструкцию с помощью крана. Стоит учитывать, что все операции приведут к значительному увеличению стоимости строительства, так как будет задействована специальная техника, а также необходим отдельный расчет конструкций на дополнительную нагрузку от техники. Толщина стены может варьироваться от 300 до 500 мм, меньше 300 мм печать становится сложной и нерентабельной. Сама конструкция стены, выполненной с помощью 3D-принтера, представляет собой пространственную ферму с параллельными поясами, а раскосы (элементы, соединяющие пояса), как правило, образуют треугольник, который является геометрически неизменяемой системой и обеспечивает достаточную жесткость всей конструкции. Для стены может быть напечатана несъемная опалубка. Для зданий, проектируемых в сейсмически опасных районах, существует отдельные требования к этажности и расчету конструкций. Для каждого типа смеси для печати существуют предельные температуры для ее использования.

Таким образом, основные ограничения 3D-печати связаны с размером объекта в плане, высотой объекта, размерами, формой и весом конструкций, используемыми материалами, устройством армирования, стоимостью технологии, предельными температурами и скоростью печати.

## Методика разработки информационной модели объекта строительства с применением 3D-печати

Предложенная методика основана на формировании, визуализации и проверке параметров информационной модели объекта капитального строительства, которые необходимо учитывать при проектировании и аддитивном строительном производстве.

1. Формирование задачи использования данных информационной модели при проектировании и строительстве с учетом аддитивного производства

2. Определение конструкций и материально-технических ресурсов, которые могут быть изготовлены на 3D принтере.

3. Определение места аддитивного производства (завод или строительная площадка) и технологии возведения объекта капитального строительства.

4. Определение уровней проработки элементов информационной модели (конструкций), которые будут создаваться с применением 3D-печати.

5. Определение параметров элементов информационной модели, необходимых для конструирования и разработки технологии 3D-печати.

6. Определение типа 3D-принтера и его технических характеристик.

7. Выявление предельных значений параметров элементов информационной модели, соответствующих выбранному 3D-принтеру.

8. Создание библиотеки параметрических элементов информационной модели для повторного использования (3D элементы подготовлены для хранения информации, необходимой для аддитивного строительного производства).

9. Информационное моделирование объекта капитального строительства с учетом формирования точной 3D-геометрии конструкций и заполнения необходимых параметров соответствующих элементов информационной модели.

10. Автоматизированная визуализация параметров цифровой информационной модели в форме электронных таблиц (спецификаций) с фильтрацией параметров, связанных с 3D-печатью.

11. Оценка значений выделенных параметров цифровой информационной модели с точки зрения их допустимости в процессе 3D-печати. Проверка значений может быть выполнена средствами:

– самой программы информационного моделирования;

– дополнительных плагинов (например, приложение Dymato к программе Revit);

– внешних программ, которые используют табличную форму представления данных (например, Excel);

– внешних программ, которые формируют запросы к данным информационной модели, чтобы проанализировать их применимость (например, программа Solibri Model Checker)

Визуализация выявленных ошибок в табличной форме и в 3D цифровой модели объекта капитального строительства

## Выводы

В результате исследования проанализированы ограничения аддитивного строительного производства и сформирована методика информационного моделирования с учетом этих ограничений.

Методика включает:

– формирование и заполнение параметров модели, на которые накладываются ограничения;

– отображение значений параметров в информационной модели;

– проверку значений параметров на допустимые значения.

Проверка значений параметров должна быть автоматизированной. При этом существует разнообразие применяемых средств автоматизации. Проверка может стать частью обязательного процесса верификации информационной модели строительного объекта.

Предложенная методика не зависит от уровня развития технологии 3D-печати.

## Литература

- Смуrow Ю. И. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом // Инновации. – 2013. – №10. – С. 76-82.
- Алексанин А. В. Использование аддитивных технологий при возведении зданий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – №6. – С. 62-65.
- Максимов М. Н. Аддитивные технологии в строительстве: оборудование и материалы // Аддитивные технологии. – 2017. – №4. – С. 54-62.
- Лунева Д. А. Применение 3d-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – №1. – С. 90-101.
- Аддитивные технологии в строительстве: Брошюра // ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» Инженерно-строительный институт. Красноярск, 2017 – 12 с.
- Квартальнов С. В. 3D печать в строительстве // European science. – 2016. – №7 (17). – С. 10-11.
- Пермяков М. Б. Аддитивные технологии в строительстве // European research. – 2017. – № 24. – С. 14-15.
- Калугина Е. В. Возведение зданий с помощью контурного строительства // Современные инновации. – 2019. – №2 (30). – С. 27-31.
- СПЕЦАВИА: Russian 3D-technologies [Электронный ресурс]: Проектирование под 3D. Режим доступа: <https://specavia.pro/faq/voprosy-po-technologii-stroitelnoj-3d-pechati/smesi-materialy/> (дата обращения 27.01.2021).
- Денисова Ю. В. Аддитивные технологии в строительстве // Строительные материалы и изделия. – 2018. – Т.1, № 3. – С. 33-42.
- Шорстова Е. С. Фибробетон для 3D-печати // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2019. – №3. – С. 22-27.
- Дожделев А. М., Лаврентьев А. Ю., Степачёва А. А. Использование торфа в 3d печати // International Journal of Humanities and Natural Sciences, vol. 9-2 (48), 2020
- aDMa – База знаний 3D печати [Электронный ресурс]: Стоимость дома на 3D принтере – расчет. Режим доступа: [https://ad-ma.ru/stoimost-doma-na-3d-printere/#Tehnologia\\_3D-pecati\\_doma](https://ad-ma.ru/stoimost-doma-na-3d-printere/#Tehnologia_3D-pecati_doma) (дата обращения 04.02.2021).
- Абрамян С. Г., Илиев А. Б. Современные строительные аддитивные технологии. Часть 1 // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1. – С.
- Apis Cor. We print buildings. [Электронный ресурс]: Getting 3D printed homes permitted as residential. Режим доступа: <https://www.apis-cor.com/as-masonry> (дата обращения 27.01.2021).
- FILE-SYSTEM – онлайн-библиотека 3D и BIM-моделей [Электронный ресурс]: Эффективное сочетание BIM и 3D-печати бетоном. Режим доступа: <https://file-system.ru/poleznaya-informatsiya/news/4865/> (дата обращения 15.01.2021).
- «Умное Производство» – электронный журнал [Электронный ресурс]: Дом, который построит 3D FASTBUILD. Режим доступа: <https://umnpro.com/at/dom-kotoryj-postroit-3d-fastbuild/> (дата обращения 10.01.2021).
- ISICAD – Ваше окно в мир САПР [Электронный ресурс]: Создание архитектурно-строительной 3D-модели здания в Autodesk Revit для экспорта на 3D-принтер. Режим доступа: [https://isicad.ru/ru/articles.php?article\\_num=20719](https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20719) (дата обращения 02.02.2021).
- Альбом технических решений ApisCor. Издание первое // М.: 2016. – 40 с.