



Перспективы применения 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации

А.К. Демиденко ^{1*}, А.В. Кулибаба ², М.Ф. Иванов ³

¹⁻² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

³ Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 86123, Украина, Донецкая область, Макеевка, ул.Державина, 2

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

doi: 10.18720/CUBS.63.4

ИСТОРИЯ

Подана в редакцию: 26.04.2017

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

3D принтеры;
аддитивное производство;
строительство;
здания и сооружения;
автоматизированное проектирование и программирование;
автоматизация производственных процессов;
строительство зданий и сооружений.;

АННОТАЦИЯ

Основной проблемой в процессах выполнения строительных работ является их тесная связь с большим количеством ручного труда, что не только замедляет темпы проведения этих работ, но и влечет за собой дополнительные расходы. Применение 3D-принтеров в данной отрасли поможет решить существующие проблемы, а также позволит вывести сферу строительства зданий и сооружений на новый уровень. Целью данной статьи является определение существующих возможностей развития строительных 3D-принтеров на мировом уровне и применение их для перспектив активизации строительного комплекса Российской Федерации (РФ). В процессе изучения разновидностей данных устройств и принципов их работ, было установлено, что современные строительные 3D-принтеры хоть и находятся на ранних стадиях своего развития, но уже позволяют строить здания различных форм и размеров. Была представлена классификация данных устройств в соответствии с их параметрами по мобильности, пространственному методу работы, скорости печати и видам объектов. На примерах зданий, напечатанных в разных странах мира, были продемонстрированы гибкие возможности оборудования и озвучены реальные темпы строительных работ. Были сделаны выводы о технических и экономических преимуществах использования строительных 3D-принтеров в малоэтажном строительстве. Особое внимание было уделено вопросу о перспективах применения 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации. Масштабы распространения данной технологии были подтверждены существующими достижениями на рынке РФ, а ее перспективы – современной политикой заинтересованности государства в исследованиях по аддитивным технологиям.

Контактная информация:

- 1* +79992275467, asyademidenko@gmail.com (Демиденко Анастасия Константиновна, студент)
2 +79819559384, kulibaba_al@mail.ru (Кулибаба Алина Валерьевна, студент)
3 +79819633364, mixivanov@mail.ru (Иванов Михаил Федорович, д. э. н., доц., заведующий кафедрой, профессор)

1. Введение

Технология 3D-печати появилась в середине XX века, и через некоторое время уже были созданы первые 3D принтеры. Эти устройства используют принцип постепенного (послойного) создания твердого объекта, на основе виртуальной объемной модели. Пока они применяются, в основном, для разработки различных прототипов перед запуском их в массовое производство. Но в последние годы, начались активные исследования в области 3D строительства. Концепция строительства зданий при помощи 3D-принтеров уже заинтересовала несколько крупных строительных компаний, которые уже применяют данную технологию на практике. В перспективе 3D-принтеры можно будет использовать не только для строительства небольших коттеджей, но и для возведения небоскрёбов.

В настоящее время на мировом инвестиционно-строительном рынке происходят значительные инновационные и технологические изменения в направлении применения 3D принтеров. Интенсивное развитие аддитивных технологий существенно меняет соотношение экономических факторов в строительстве. Применение принтеров объемной печати для создания зданий и сооружений открывает новые возможности, ведь на сегодняшний день единственной полностью не автоматизированной отраслью производства является именно строительство. Поэтому большую актуальность приобрели вопросы, связанные с механизацией строительного производства, упрощением технологических цепочек в строительной отрасли, уменьшением стоимости готовой продукции, сокращением сроков строительства и снижением доли ручного труда.

Главное отличие 3D-принтера от любого другого промышленного робота заключается в способе создания продукции. Так, сначала готовится раствор, в составе которого присутствуют цемент, стекловолокно, иногда могут добавляться керамзит и другие материалы. Затем принтер этот вязкий бетон выдавливает через специальные сопла при одновременной трассировке вдоль распечатанной схемы стен и наносит на основание слой за слоем. Постепенно выстраиваются слои, которые уплотняют нижние, вследствие чего помогают им выдерживать увеличивающийся вес.

Применение строительного 3D-принтера имеет широкий диапазон: от создания небольших конструкций вроде строительных блоков, вазонов до крупных конструкций или даже целых домов. 3D-печать зданий незаменима для строительства в местностях, пострадавших от стихийных бедствий, в бедных развивающихся странах и во всех других случаях, когда требуется за короткое время обеспечить жильём большое количество людей. Трёхмерная печать позволяет получать изделия различных сложных форм с минимальными временными и материальными затратами. Использование 3D-принтеров в строительстве позволит отойти от традиционных форм зданий и создавать дома неправильной формы, с изогнутыми контурами и линиями. Автоматизация ручного труда позволит сократить численность строительных рабочих и минимизировать риск производственных травм. Сейчас уже начинается переход строительной 3D-печати от экспериментальных машин к серийному производству и массовому строительству.

2. Обзор литературы

Истории развития 3D-печати в строительстве посвящены работы [1,2]. Так, в статье Грахова В.П., Мохначева С.А., Бороздова О.В. на конкретных примерах описываются события, произошедшие в данной отрасли за период с 2005 по 2014 год [1], а в статье Кудрявцевой И.С., Месяченко А.А. описан исторический переход к использованию 3D-принтеров в строительной сфере [2].

Принцип работы строительных 3D-принтеров и используемые в процессе строительства рабочие материалы подробно описаны в статьях [1,3,4]. Исследования, проведенные Торшиным А.О. и Потаповой Е.Н., показали, что введение к гипсоцементным-пуццолановым вяжущим веществам в составе раствора комплекса водоредуцирующих, водоудерживающих и загущающих добавок приводит к достижению требуемых свойств и повышению прочностных характеристик рабочей смеси [3]. В работе зарубежных авторов Perrot A., Rangeard D., Pierre A. описано и экспериментально подтверждено поведение бетонной смеси, находящейся под различными видами нагрузок [4]. Все те же авторы Грахов В.П., Мохначев С.А., Бороздов О.В. уделили особое внимание объяснению принципов работы строительных 3D-принтеров, а именно процессам создания моделей и их преобразования в G-code для дальнейшей работы с оборудованием [1].

Большой спектр функций программ для создания моделей зданий рассмотрен зарубежными авторами Edenhofer S., Radler S., Hob M., Von Mammen S. на примере программы Autodesk Revit [5].

Существует ряд работ, в которых раскрыты основные преимущества и недостатки использования 3D печати по сравнению с традиционными технологиями в строительной отрасли [6,7,8,9]. В своей работе Мустафин Н. Ш. и Барышников А. А. изучили технологии, которые используются 3D принтерами для создания различных объектов, и выделили преимущества, такие как: быстрое и точное строительство, снижение затрат труда и снижение образования отходов [7]. В статье Далинчук В. С. и Власенко Д. А. отмечены недостатки 3D-печати: ограничение в размерах изготавливаемой детали, зависимость результата от системы охлаждения, необходимость в обработке деталей из-за шероховатостей [8]. Указанные и иные положительные и отрицательные качества подчеркивались многими исследователями, включая Шувалова Н. Е., Лесовик В.С., Глаголева Е.С., Дребезгова М.Ю., Ермолаева А.Э.

Глубокое и всестороннее рассмотрение перспектив, возложенных на практическое внедрение 3D-печати в процесс возведения зданий и сооружений, содержится в работах [2,8,9,10,11,12]. На сегодняшний день активно разрабатываются технологии для 3D строительства зданий во всех крупных странах: в Китае (Шанхайская компания «WinSun Decoration Design Engineering Co»: пятиэтажный дом в Сучжоу, 10 домов по 200м² в Шанхае), США (павильон Bloom в Калифорнии [6]), Великобритании, Японии и т.д. Владея инновационными продуктами, строительные предприятия получают новые конкурентные преимущества [2]. Зарубежные авторы Labonnote N., Ronnquist A., Manum B., Ruther P. в своей статье отмечают, что развитие аддитивных технологий обладает высоким потенциалом [11]. На взгляд Табаева И.А., Дегтярева Г.В. наибольшую перспективу имеет направление печати с использованием углеводородного волокна [10]. Ивасюта А. В. и Иванов Н. А. в своей работе оценивают перспективы российской строительной отрасли. Исследователи высказывают предположения о потенциальных изменениях в работе менеджмента строительной организации при практическом внедрении технологии [12].

3. Цели и задачи

Целью данной статьи является определение существующих возможностей развития строительных 3D-принтеров на мировом уровне и применение их для перспектив активизации строительного комплекса РФ.

Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Изучить виды строительных 3D-принтеров и их устройство.
2. Рассмотреть принципы их работы и используемое программное обеспечение.
3. Определить основные преимущества и недостатки 3D-принтеров в строительстве.
4. Рассмотреть примеры использования строительных 3D-принтеров в различных странах мира.
5. Проанализировать возможности 3D-печати для активизации строительного комплекса РФ.

4. Виды строительных принтеров и их устройство

Строительные 3D-принтеры представляют собой инженерные устройства, создающие конструктивные элементы зданий, малые архитектурные формы или целые строения послойно [13]. От обычного 3D-принтера строительный отличается используемым материалом и размерами — рабочей поверхностью ему служит участок стройплощадки или цеха, а печатает он цементной смесью [14]. Есть и конструктивные отличия, обусловленные спецификой материала — в частности, в строительном 3D-принтере нет необходимости в нагревающем элементе. Такие аппараты позволяют быстро и без лишних сложностей печатать объекты почти любых заданных форм [15]. Почти все строительные принтеры, предназначенные для печати зданий, являются промышленными, но их классификация тоже существует.

По пространственному методу работы различают:

1. XYZ-принтеры (портальные), построенные по принципу декартовой системы координат: печатная головка движется только строго по осям X, Y и Z. Внешне напоминает башенный кран. Самый распространённый тип строительных принтеров сегодня, преимущество — простота конструкции, надёжность. Основной недостаток — ограничение в размерах. По данному методу работает принтер S-1160 большого формата серии S, строительным объемом около 380 куб.м., позволяет печатать различные элементы зданий и сооружений в цехе для последующей сборки домов на фундаментах, либо печати домов площадью 140 кв.м. непосредственно на фундаменте. Достоинство оборудования — лёгкий конструктив, простое обслуживание и

управление. Принтер в базе комплектуется электроподъемниками 3 метра в высоту и дополнительной стрелой для быстрой печати. Возможно увеличение рабочего поля по высоте до 8 метров. В такой комплектации возможно применение принтера для работы непосредственно на фундаменте при строительстве зданий до 3 этажей. Принтер S-1160 печатает стандартными составами на основе цемента, можно применять смеси с минеральными добавками и фиброволокном [16].



Рисунок 1. Строительный 3D-принтер S-1160

2. Дельта принтеры. Все оси у Delta 3D принтера располагаются параллельно на трех ребрах жесткости, которые одновременно могут быть и направляющими для кареток осей. Ребра жесткости образуют треугольник с углами в 120° , образуя латинскую букву Δ - Дельта. Основные преимущества конструкции заключаются в том, что дельта принтеры способны воспроизводить более высокие и сложные объекты, среди недостатков можно отметить невысокую надежность сборки и точность печати.

В качестве примера можно привести самый большой на данный момент 12 метровый строительный принтер – Big Delta, созданный организацией WASP (World's Advanced Saving Project). Поддерживаемое прочной металлической рамой вращающееся сопло диаметром 6 метров, слой за слоем накладывает необходимый материал для строительства. 3D-принтер способен работать со множеством разных материалов, включая грязь и глину, к которым небольшое количество химических добавок, а также цемент [6,17].



Рисунок 2. Строительный 3D-принтер Big Delta [6]



Рисунок 3. Вращающееся сопло 3D-принтера Big Delta [6]

3. Роботизированные принтеры-манипуляторы. Наиболее наглядно их можно описать на примере ProTo R 3DP, который разработала компания СуВе Additive Industries в Нидерландах [6]. Устройство способно сооружать конструкции произвольной формы на расстоянии до 3,15 метров в любом направлении от себя. Стандартная печатающая головка диаметром 30 мм пропускает цемент со скоростью до 175 мм/сек, при этом высота каждого слоя составляет 30 мм. Особый интерес представляет материал для печати — бетонный раствор СуВе, состав которого держится в секрете, но компания утверждает, что этот материал отвердевает в течение нескольких минут, что позволяет ускорить печать. При использовании нового типа бетона в атмосферу выбрасывается на 32% меньше углекислого газа, по сравнению с обычным бетоном. Кроме того, бетон СуВе полностью подлежит вторичной переработке, что позволит значительно сократить количество отходов.



Рисунок 4. Робот-манипулятор ProTo R 3DP [6]



Рисунок 5. Процесс работы принтера-манипулятора ProTo R 3DP

По мобильности 3D-принтеры делятся на:

1. Полностью мобильные. Принтеры, которые с легкостью можно доставить на объект и потратить немного времени на установку и запуск системы. Таким принтером является ApisCor. Изобретатель использовал принцип выдвижного строительного крана, который способен вращаться вокруг своей оси и печатать объект, находясь как рядом с ним, то есть снаружи, так и внутри объекта. Такой подход решил проблемы с монтажом и демонтажом оборудования, предоставил возможность вести печать на месте строительства, и снял запрет на возведение сооружений, намного превосходящих в размерах сам принтер. Установка и запуск системы ApisCor занимает не более часа. ApisCor — сторонник полной автоматизации процессов, поэтому инженеры компании разработали Мобильный Автоматический Комплекс смешивания и подачи строительной смеси (МАК), С помощью МАКа смесь замешивается и автоматически подаётся на печать, в чёткой синхронизации с принтером.

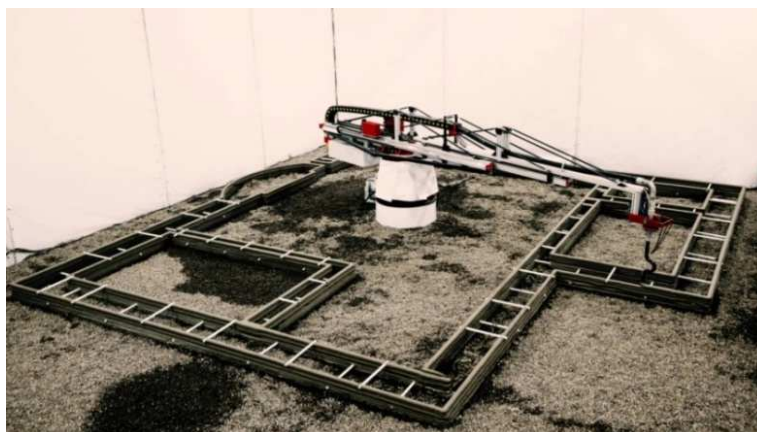


Рисунок 6. 3D-принтер ApisCor

2. Мобильные. Принтеры, монтаж которых может длиться до нескольких дней, (чаще всего таковыми являются порталные принтеры) или принтеры, способные передвигаться по стройплощадке.

В СуВе разработали принтер, который не требует огромной опорной рамы, однако может перемещаться по стройплощадке. В конструкции устройства СуВе RC 3Dp вместо стационарного основания использовано гусеничное шасси, дополнительно оснащенное гидравлическими упорами, которые выдвигаются перед началом работ. Рабочий радиус манипулятора с экструдером составляет 2,75 метра, однако благодаря выдвигающимся упорам

высота печатаемых объектов может достигать 4,5 метров. 3D-принтер печатает быстросохнущими смесями со средней скоростью 200 миллиметров в секунду, при этом толщина слоя достигает 30 миллиметров.

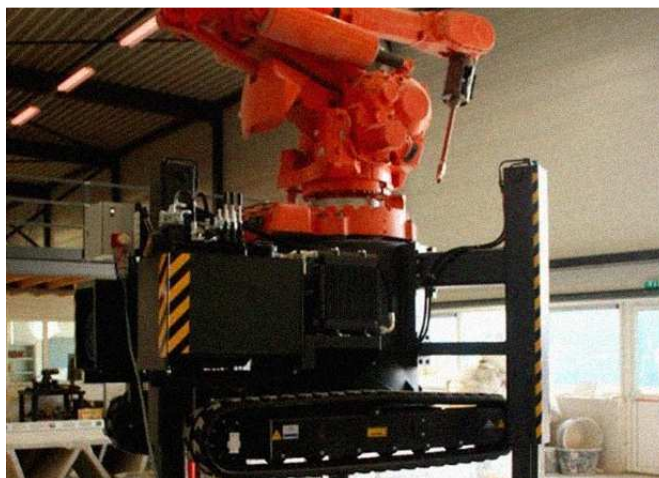


Рисунок 7. 3D-принтер CyBe RC 3Dp

3. Немобильные. Подавляющее большинство существующих строительных 3D-принтеров стационарны. И многие из них не предполагают печати за рамками рабочего объема. Такие устройства работают либо с небольшими фрагментами будущего здания, либо собираются сразу на большой раме, которая покрывает всю необходимую площадь на стройплощадке.

По скорости печати:

1. Сверхбыстрые. 3D-принтеры, печатающие дом менее чем за час. Используются с целью быстрого возведения прочного и безопасного временного жилья для ускорения восстановления после стихийных бедствий в мире. Команда ученых из французского НИИ гражданского строительства и машиностроения (IRCCyN) от университета Нанта разработали 3D-принтер INNOprint, способный построить временное жилье всего за 30 минут [6]. INNOprint состоит из роботизированного манипулятора с прикрепленным к нему печатающим механизмом. Настоящий прототип работает только с полиуретановой нитью, но в будущем разработчики планируют расширить спектр используемых для печати материалов. Распечатанный небольшой дом для временного размещения полностью приспособлен для проживания – он изолирован, герметизирован и безопасен. Даже крыша 3D-печатного дома была изготовлена без опорных конструкций.



Рисунок 8. Процесс печати дома принтером INNOprint [6]

2. Быстрые. 3D-принтеры, печатающие дом от нескольких часов до 4 дней. Промышленный 3D принтер Winsun имеет следующие размеры: 150 (Д) x 10 (Ш) x 6,6 (В) м, гигантский принтер способен печатать любые здания в течение нескольких часов [18]. Основа чернил состоит из высококачественного цемента и стекловолокна. С помощью компьютера и программного обеспечения для 3D моделирования, в конструкцию здания можно вносить и учитывать такие дополнения как: изоляционные материалы, сантехника, прокладка электропроводки и окна, которыми затем можно легко оборудовать дом, когда он уже полностью построен [1,2,6].

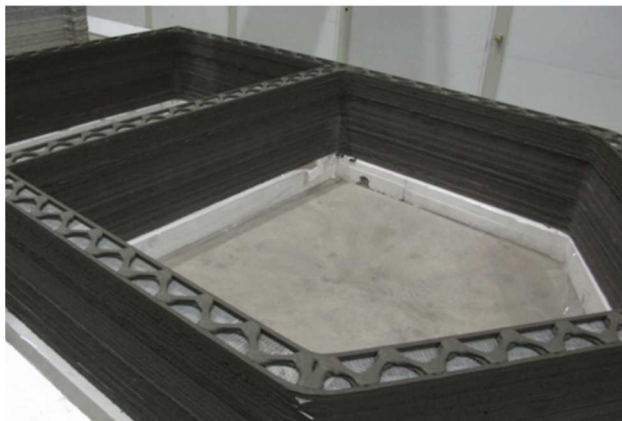


Рисунок 9. Процесс печати дома принтером Winsun

3. Длительные. 3D-принтеры, печатающие дом дольше недели.

По объектам печати:

1. Принтеры, печатающие стройматериалы. В Голландии печатают кирпичи уникальной формы - Polybricks - которые можно описать, как шлакоблоки, изготовленные из керамики. Для их изготовления команда использовала порошковый 3D-принтер Z Corp 510 [8]. Благодаря высокой точности печати каждого из кирпичиков, исследователям удалось создать сложные геометрические фигуры, которые идеально сочетаются друг с другом. Возможность использовать только один материал и печатать кирпичи необходимой формы и количества, приведет к значительному уменьшению отходов, при одновременном снижении количества рабочей силы, необходимой для строительства.

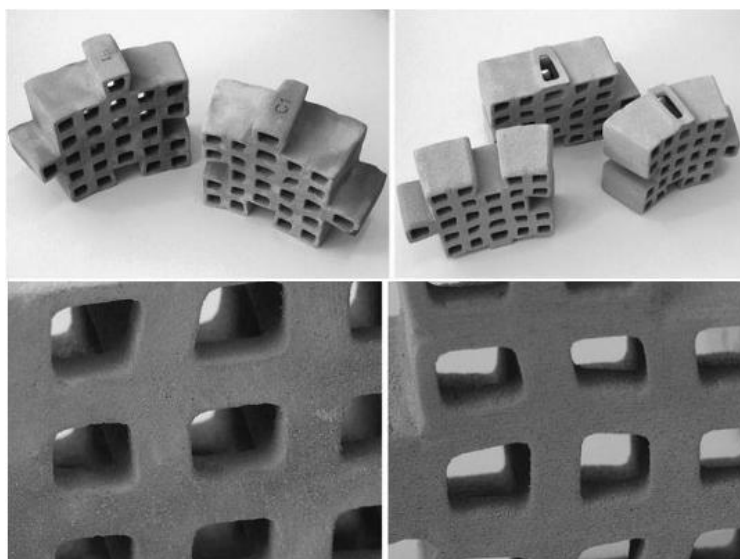


Рисунок 10. Кирпичи Polybricks

2. Принтеры, печатающие отдельные конструкции. Уже известная компания Winsun спроектировала принтер высотой 6,6 метров, 10 метров в ширину и 40 метров в длину [6]. Устройство изготавливает отдельные цельные блоки будущих домов, которые собираются на месте, укрепляясь арматурой и дополняясь изоляционными материалами, чтобы соответствовать всем необходимым стандартам современного строительства. Стены огромной виллы выполняются практически полыми, имеющими внутри зигзагообразные элементы для повышения надёжности конструкции (См. Рисунок 12). Главным преимуществом описанного способа строительства называется экономическая составляющая, позволяющая снизить расход строительных материалов на 30–60% благодаря применению переработанных отходов [19]. Себестоимость представленной виллы на 1100 м² метров составила \$161 тыс.



Рисунок 11. Вила, построенная компанией Winsun



Рисунок 12. Элемент строящейся виллы

3. Принтеры, печатающие здание целиком.

5. Принцип работы строительных 3D-принтеров и их программное обеспечение

В настоящее время разработаны программы для 3D-моделирования, такие, как SketchUp, FreeCAD, Blender, OpenSCAD, Rhinoceros, 3ds Max, Revit и другие [20]. После создания модели в одной из вышеперечисленных программ ее отправляют в программу для создания G-code, затем данная информация передается по проводу с компьютера в 3D-принтер. Для управления непосредственно самим принтером существуют программы CURA, POLYGON, Repetier-Host [1]. Рассмотрим каждый из этапов строительства зданий с помощью 3D-принтеров более подробно.

1. Создание 3D-модели здания с помощью программ Autodesk Revit, ArchiCAD, SketchUp [21].
2. Экспорт геометрии в формат STL с помощью встроенных команд, онлайн-конвертеров или специальных программ. Файл STL содержит описание модели, которое состоит из набора координат трех точек по трем осям. Каждая группа из трех точек образует полигон, из числа которых и состоит трехмерная модель (См. Рисунки 13 и 14).

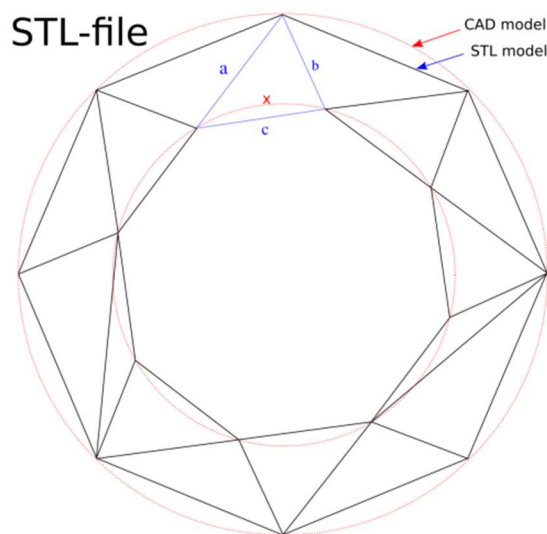


Рисунок 13. Сравнение CAD и STL моделей

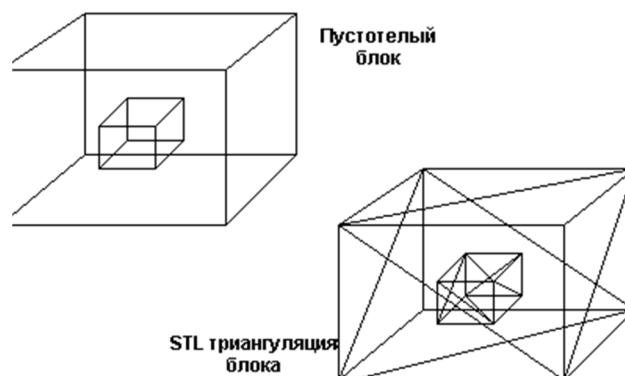


Рисунок 14. STL триангуляция блока

3. Открытие файла STL в программах-слайсерах вида CURA, POLYGON, Repetier-Host, обслуживающих 3D-принтеры. Основной функцией слайсера является рассечение твердого объекта на множество слоев малой толщины и создание G-кода — языка программирования для устройств с числовым программным управлением. В данном случае он представляет собой набор команд по созданию сечений каждого слоя в плоскости, перпендикулярной оси Z.
4. Передача G-кода на 3D-принтер с помощью кабеля.
5. Послойная печать трёхмерной модели дома с помощью 3D-принтера [22,23].

6. Преимущества и недостатки использования 3D-принтеров в малоэтажном строительстве

6.1 Технологические преимущества использования 3D-принтеров в малоэтажном строительстве

С точки зрения технологического прогнозирования развитие 3D печати для инвестиционно-строительной сферы происходит по следующим направлениям, во-первых, модернизации самих 3D принтеров, во-вторых, совершенствование используемых материалов для данной технологии строительства и, в-третьих, развитие технологических способов создания объемных конструкций и сооружений. Определяющими факторами перспективного развития данной технологии в строительстве, по нашему мнению, являются используемые строительные материалы и технологические способы строительства. В настоящее время существует три метода создания зданий и сооружений по указанной технологии: метод послойного экструдирования вязкой, в основном бетонной смеси, метод спекания (селективного спекания) и метод напыления (компонентной склейки). В настоящее время наибольшее распространение получает первый метод, а бетон является основным материалом для строительства с помощью 3D печати.

В настоящее время в сфере строительства присутствует слишком большое количество ручного труда. Данный факт не только тормозит темпы различных видов строительных работ, но и влечет за собой дополнительные траты и дальнейшие сложности в процессах отделочных работ. Именно поэтому преимуществами использования 3D-принтеров в малоэтажном строительстве можно считать их точность, скорость и автоматизацию [24].

Также важно отметить, что значительным преимуществом является возможность легко изменять толщину и конфигурацию стен на стадии разработки модели в зависимости от климатических условий и нужд заказчика, что также делает процесс выбора утеплителя для стен в таком доме в разы проще. Кроме того, влияние на дом погодных условий сводится к минимуму из-за специальных добавок в бетонную смесь.

Многие виды принтеров для строительства малоэтажных зданий имеют небольшие размеры и тем самым обеспечивают возможность для свободной транспортировки на строительные площадки. Сборка данных видов принтеров обычно составляет от 30 минут до нескольких часов, что значительно ускоряет темпы строительства [25].

Отпадает нужда в сложных процессах проведения различных коммуникаций, т.к. в ходе проектирования модели здания заранее планируются все коммуникационные развязки, узлы и инженерные системы, и получается готовая схема для их прокладки.

Так как при печати здания бетон подается дозированно с машинной точностью, то при завершении процесса строительных работ принтер не оставляет за собой следов и отходов, которые могли бы потребовать последующей уборки [26].

6.2 Экономические преимущества и недостатки использования 3D-принтеров в малоэтажном строительстве

Использование методов прогнозирования для маркетинговых исследований перспектив развития мирового рынка 3D строительства позволяет говорить об значительном увеличении спроса на 3D печать в целом, в том числе для строительства из бетона. По оценкам экспертов [27] мировая экономика продолжает восстанавливаться и в ближайшее время до 2021 года указанный рынок будет расширяться до 56,4 млн. долларов. Второй метод спекания (селективного спекания) предусматривает в рабочей зоне 3D-принтера расплавление рабочей смеси лазером или солнечным лучом, а в качестве рабочей смеси используется обычный песок. Это один из вариантов такого технического решения, запатентован изобретателем М.Кайзером из Королевского колледжа искусств. Этот же метод используется в проекте Швейцарской высшей технической школы в Цюрихе в сфере 3D печати. В рамках проекта MeshMould 3D разработан способ печати непрерывных конструкций для создания крупных, геометрически сложных структур. Ранее для их создания использовали пластик, а сейчас уже и металл. При этом создаются ажурные и сложные металлические конструкции из проволоки диаметром 3 мм. Третий метод напыления (компонентной склейки), представленный группой Каталонского Института передовой архитектуры (группа Петра Новикова) и системой D-Share частной компании Monolite.UK, состоит в том, что струя песка из сопла 3D принтера смешивается с клеящим составом (катализатором), образуя объем в заданной точке

по цифровой модели сооружения. Этот метод также предусматривает использование солнечной энергии. Следует отметить, что итальянский изобретатель системы D-Share уже заключил контракт с Европейским космическим агентством по разработке технологий 3D строительства в сфере освоения космического пространства [28].

Для наглядного сравнения экономических преимуществ использования 3D-принтера в малоэтажном строительстве была рассчитана стоимость строительных работ тремя различными способами.

Схема-образец представляла собой здание, параметры которого равны: длина – 9 м, ширина – 9 м, высота – 3 м, толщина стен – 0,3 м. Будем рассматривать в данном случае только стены. Объем всех стен равен 41м³. Площадь внешних поверхностей стен равна 108 м², внутренних – 90 м².

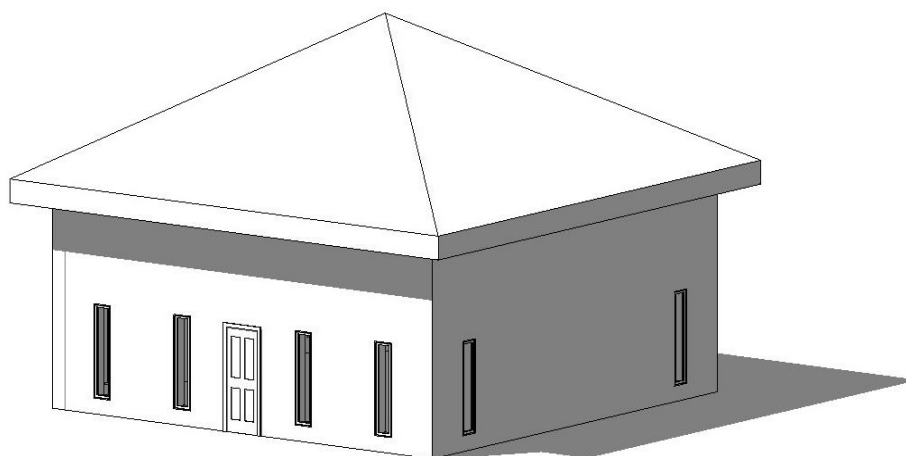


Рисунок 15. Схема здания с заданными параметрами

Данная схема была использована для 3 вариантов строительства:

1. Монолит.
2. Несъемная опалубка (на примере опалубки «Velox»).
3. Несъемная опалубка с использованием строительного 3D-принтера.

Был получен результат:

Таблица 1. Сравнительный анализ стоимости и трудозатрат выполнения работ с помощью различных материалов

Материал	Стоимость, руб.	Трудозатраты, чел.-ч.
3D опалубка	421886	357
Опалубка Velox	606525	574
Монолит	519640	469

По данным таблицы видно, что строительство данного дома выгоднее всего с использованием строительного 3D-принтера как по стоимости, так и по трудозатратам. Кроме того, данный способ является наиболее быстрым среди остальных [9].

Также экономическими преимуществами 3D-печати малоэтажных зданий можно считать:

- Снижение стоимости внешних и внутренних отделочных работ до 60% благодаря ровным стенам, напечатанным с высокой машинной точностью.
- Снижение материалоемкости строительства за счет уменьшения потребностей в лишнем строительных материалах и инструментах.
- Снижение затрат на электрическую энергию.
- Снижение стоимости строительства зданий с уникальной архитектурой.
- Существенное снижение затрат на утилизацию строительного мусора.

Тем не менее, несмотря на весомые экономические преимущества использования 3D-печати в строительной сфере, существует также ряд их экономических недостатков:

- Отсутствие полной законодательной и нормативной базы для подобного рода строительства.
- На данный момент еще не разработан бетон, который не затвердевает при подаче на большую высоту и не пропускает холод в дом, что ограничивает масштабы возведения

сооружений и требует применения дополнительных строительных материалов для утепления построенного здания.

- Зависимость проведения строительных работ от климатических условий и сезона года.

Однако все перечисленные недостатки могут быть легко устранены с помощью изобретения новых видов строительных смесей для бетона и широкого распространения данной технологии по территории РФ, что приведет к необходимости создания законодательной и нормативной базы для данного вида строительства.

7. 3D-принтинг зданий в разных странах

Сферы применения 3D-печати, современные разработки и уже существующие проекты достаточно разнообразны. Наиболее перспективна 3D-печать в таких сферах, как медицина, промышленность, строительство и архитектура.

Промышленные принтеры могут работать в крупных габаритах и с высокопрочными материалами, что может сделать производство выгодным, быстрым и точным. Прогресс в строительстве очевиден, исследователи научились печатать как конструкции вроде отдельных строительных блоков, так и полноразмерные дома [29].

7.1 3D-принтинг зданий в Китае

Впервые жилые дома при помощи 3D-принтера возвели в Китае [6, 30]. С позиций стадийности инновационного менеджмента и «вертикальности перемещений» при технологическом прогнозировании наиболее высокой степени готовности для промышленного внедрения технологий 3D печати в строительстве достигла в настоящее время китайская компания WinSun, которая не только на практике больше всех в мире выполнила объем работ по технологии 3D строительства, но и активно участвует в проектах по открытию 100 заводов по 3D печати в 11 городах, включая Шанхай и Дубай, а также парка 3D печати в г.Баотоу в Китае. Кроме этого, компания WinSun подписала официальное соглашение о сотрудничестве с американской исследовательской организацией НТТ для 3D строительства рельсов, станций, платформ и т.д. при осуществлении перспективного проекта системы высокоскоростного транспорта в пневматической трубе, предложенного Илоном Маском, основателем компании Tesla [31].

В начале июля 2014 года компания Yingchuang New Materials использовала четыре принтера, чтобы в течение суток напечатать десять однокомнатных домов. Стены печатали на заводе, после чего цементу давали застыть, и только после этого готовые блоки перевозили на стройплощадку и собирали из них дома. Все остальные элементы (перекладки, крыша, окна, двери, отделка и т.д.) тоже устанавливали вручную. Себестоимость каждого из них составила примерно 5000 долларов [1,10].



Рисунок 17. Первый напечатанный дом в Китае

С позиций стадийности инновационного менеджмента и «вертикальности перемещений» при технологическом прогнозировании наиболее высокой степени готовности для промышленного внедрения технологий 3D печати в строительстве достигла в настоящее время китайская компания WinSun, которая не только на практике больше всех в мире выполнила объем работ по технологии 3D строительства, но и активно участвует в проектах по открытию 100 заводов по 3D печати в 11 городах, включая Шанхай и Дубай, а также парка 3D печати в г.Баотоу в Китае. Кроме этого, компания WinSun подписала официальное соглашение о сотрудничестве с американской исследовательской организацией НТТ для 3D

строительства рельсов, станций, платформ и т.д. при осуществлении перспективного проекта системы высокоскоростного транспорта в пневматической трубе, предложенного Илоном Маском, основателем компании Tesla [31]. По другому источнику [6] компания WinSun напечатала уже пятиэтажное здание-особняк площадью 1100 кв.метров [2]. При этом технология предусматривает производство укрупненных блоков на отдельной площадке и затем их перевозка к месту возведения здания и укрупнительная сборка в единое целое, включая установку арматуры, термоизоляции, труб, оконных и дверных блоков. В ходе эксперимента была достигнута значительная экономия строительных материалов, которая составила около 60%, а на строительство этого здания было потрачено 30% времени, необходимого для строительства аналогичного объекта на основе традиционной технологии строительства [32]. Одновременно приводятся данные со ссылкой на эту же компанию, что 3D технология позволяет сохранить 30-60% строительных отходов, сократить затраты на рабочую силу на 50-80% и таким образом повысить экологичность строительной продукции и существенно снизить производственный травматизм [33].



Рисунок 18. Напечатанный пятиэтажный дом в Китае

Кроме этого, имеется информация, что правительство Египта сделало компании WinSun заказ на 20000 модулей одноэтажных жилых домов, для строительства которых компания намерена соорудить порядка 12 мини-фабрик 3D строительства прямо в пустыне и использовать песок для производства строительных смесей. Одновременно WinSun ведет переговоры с властями Саудовской Аравии для реализации крупнейшего в мире проекта 3D печати: строительство 1,5 млн. жилых домов для среднего класса в течении пяти лет. Так же известно, что к этой компании обратилось правительство Ирака, которое считает, что для решения проблем восстановления пострадавших в ходе военных действий населенных районов целесообразно использовать технологию 3D строительства.

7.2 3D-принтинг зданий в США

Вторые позиции по развертыванию рассматриваемой технологии 3D строительства принадлежат США, которые имеют в целом значительные достижения в становлении аддитивных технологий и существует развитая инновационная инфраструктура по активизации привлечения инвестиций в инновации. Университет Южной Калифорнии представил свою новую разработку – специальный 3D-принтера Contour Crafting, удивительной функцией которого является, с помощью трехмерной печати, создание жилого дома в течение суток [1]. 3D-принтер способен выполнить до 90% постройки дома, он способен возвести бетонные стены, провести монтаж перекрытий, проложить трубопровод и электропроводку, установить кровлю и покрасить наружные стены. После его работы строителям остается доделать не так уж и много: установить окна и двери, сантехнику, заняться внутренней отделкой помещений, а также различные мелкие работы. Использование подобной технологии может помочь строителям отойти от традиционных форм домов и создавать здания неправильной формы, с множеством изогнутых линий. По заявлению одного из разработчиков, данный 3D-принтера способен возвести дом площадью до 230-ти кв.м. за 20 часов [6].

Первоначальной целью проекта было быстрое строительство небольших домов в развивающихся странах, а также местах, пострадавших от различных стихийных бедствий, когда требуется быстро и качественно обеспечить жильем пострадавших людей. Однако, по уверениям разработчиков, после небольших доработок этот 3D-принтера можно будет использовать для строительства недвижимости класса люкс в США.

Также, ВМС США всерьез заинтересовались методами печати бетоном. Национальный научный фонд США при поддержке оборонных ведомств решили финансировать разработки компании Contour Crafting.



Рисунок 19. Макет работы 3D-принтера

7.3 3D-принтинг зданий в Дубае

На третьих позициях по уровню освоения технологий 3D строительства находятся, по нашим мнению, Объединенные Арабские Эмираты, а именно столица Дубаи, которая позиционирует себя, как город инноваций, особенно в сфере 3D печати. В Дубае открылось первое в мире офисное здание, созданное при помощи технологии 3D-печати, сообщается на сайте правительства Объединенных Арабских Эмиратов (ОАЭ). Здание находится в центре города недалеко от Дубайского международного финансового центра. Оно получило название «Офис будущего» [34]. В нем расположится временная штаб-квартира Дубайского фонда будущего — организации, инициировавшей проект.

Площадь одноэтажного здания составляет около 250 кв. м. С целью обеспечения устойчивости конструкции крышу сделали округленной. Здание полностью пригодно для работы людей: в него проведены электричество, телекоммуникации, водоснабжение и установлена система кондиционирования воздуха. Для создания постройки использовался 3D-принтер высотой 6 м, длиной 37 м и шириной 12 м [35]. При строительстве использовались специальная цементная смесь и материалы, разработанные и произведенные в ОАЭ и США. Испытания на надежность стройматериалов проводились в Китае и Великобритании.

Затраты на оплату труда при реализации этого проекта оказались на 50% меньше, чем при традиционном строительстве здания такого же размера. В работе над зданием участвовала команда из 19 человек: один из них следил за работой 3D-принтера, восемь собирали дом из напечатанных элементов на месте, остальные занимались проведением электричества и обеспечением работоспособности других систем. Создание конструкции заняло 17 дней, еще два ушло на оформление офиса внутри.



Рисунок 20. Офис в Дубае



Рисунок 21. Офис в Дубае изнутри

Именно Дубаи ставят самые амбициозные задачи в сфере 3D строительства. Недавно Управление водными ресурсами и электричеством Дубаи объявило о заключении контракта с компанией Convrngnt Value Engineering на разработку и строительство первого в ОАЭ здания, полностью напечатанного на стройплощадке, а также о формировании специальной лаборатории, которая впервые в мире сосредоточится на исследованиях 3D печати и беспилотных летательных аппаратах (дронах). В ОАЭ на государственном уровне считают, что 3D печать в целом, в том числе в инвестиционно-строительной сфере станет важнейшей технологией повседневной жизни. В указанном выше контракте предусматривается, что 3D строительство здания специальной лаборатории будет осуществляться на стройплощадке в пустыне и одновременно будут решаться все проблемы, связанные с созданием и испытанием этой технологии, а также будут отрабатываться технологии специальных дронов с солнечными батареями для мониторинга производства воды и электроэнергии [31].

7.4 3D-принтинг зданий в Словении

Словенская компания Bet Abram занялась серийным производством строительных принтеров. На данный момент модельный ряд продукции ограничен тремя моделям – P1, P2 и P3.

Стоимость бюджетной модели составит 12000 евро, в то время как флагманы линейки будут продаваться по цене от 20000 евро. Учитывая, что аппарат может печатать несущие конструкции, его стоимость полностью себя оправдывает. В компании утверждают, что принтер Bet Abram P1 способен напечатать бетонное здание без опалубки объемом 144 куб.м. Примечательно, что высота аппарата составляет чуть больше двух метров. Специальная платформа, водруженная на регулируемые по высоте рельсы, поднимает экструдер по оси Z, в то время как размеры осей X и Y ограничены.



Рисунок 22. 3D-принтер Bet Abram

Вышеприведенный анализ с точки зрения технологического прогнозирования развития 3D печати для инвестиционно-строительной сферы показывает, что прогресс происходит по следующим направлениям, во-первых, модернизации самих 3D принтеров, во-вторых, совершенствованию используемых материалов для данной технологии строительства и, в-третьих, развитие технологических способов создания объемных конструкций и сооружений.

Определяющими факторами перспективного развития данной технологии в строительстве, по нашему мнению, являются используемые строительные материалы и технологические способы строительства. В настоящее время существует три метода создания зданий и сооружений по указанной технологии: метод послойного экструдирования вязкой, в основном бетонной смеси, метод спекания(селективного спекания) и метод напыления(компонентной склейки). Сейчас наибольшее распространение получает первый метод, а бетон является основным материалом для строительства с помощью 3D печати.

Использование методов прогнозирования для маркетинговых исследований перспектив развития мирового рынка 3D строительства позволяет говорить об значительном увеличении спроса на 3D печать в целом, в том числе для строительства из бетона. По оценкам экспертов [27] мировая экономика продолжает восстанавливаться и в ближайшее время до 2021 года указанный рынок буде расширяться до 56,4 млн. долларов. Второй метод спекания(селективного спекания) предусматривает в рабочей зоне 3D принтера расплавление рабочей смеси лазером или солнечным лучом, а в качестве рабочей смеси используется обычный песок. Это один из вариантов такого технического решения, запатентован изобретателем М.Кайзером из Королевского колледжа искусств. Этот же метод используется в проекте Швейцарской высшей технической школы в Цюрихе в сфере 3D печати. В рамках проекта MeshMould 3D там разработан способ печати непрерывных конструкций для создания крупных, геометрически сложных структур. Ранее для их создания использовали пластик, а сейчас уже и металл. При этом создаются ажурные и сложные металлические конструкции из проволоки диаметром 3 мм. Третий метод напыления(компонентной склейки), представленный группой Каталонского Института передовой архитектуры (группа Петра Новикова) и системой D-Shape частной компании Monolite.UK, состоит в том, что струя песка из сопла 3D принтера смешивается с клеящим составом(катализатором), образуя объем в заданной точке по цифровой модели сооружения. Этот метод также предусматривает использование солнечной энергии. Следует отметить, что итальянский изобретатель системы D-Shape уже заключил контракт с Европейским космическим агентством по разработке технологий 3D строительства в сфере освоения космического пространства [28].

8. Перспективы 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации

В РФ накоплены значительные научно-технический и инновационный потенциалы по разработке и применению аддитивных технологий. С середины 2015 года в стране проводится большая системная работа в рамках Национальной технологической инициативы (НТИ), которую представил Президент РФ В.В. Путин Федеральному Собранию 4 декабря 2014 года. НТИ – это программа мер по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства России к 2035 году. В рамках ее реализации была сформирована Матрица НТИ, объединяющая рынки, технологии, инфраструктуру и институты. Институт Передовых Производственных Технологий (ИППТ) Санкт-Петербургского технологического университета Петра Великого занимает в глобальной матрице НТИ место на "пересечении" базовых Технологий Будущего / Перспективных Направлений деятельности: цифровое моделирование и проектирование, создание новых материалов, аддитивное производство и перспективные Рынки Будущего, которые будут сформированы к 2035 году - AeroNet, AutoNet, MariNet и др. (объем каждого из рынков будет превышать 100 млрд долларов). Проект создания Фабрик Будущего: Digital / Цифровая&Smart / Умная&Virtual / Виртуальная {D – S – V FoF} как основного элемента экономики Будущего – Цифровой экономики, находится в русле глобальных трендов и разворачивающейся IV промышленной революции и демонстрирует все достижения ИППТ – Фабрика будущего (Factory of Future, FoF) - передовая производственная площадка по созданию глобально конкурентоспособной и кастомизированной / персонализированной продукции нового поколения - содержит в своей основе ядро ("перечисление множеств") базовых Технологий Будущего: цифрового моделирования и проектирования, создание новых материалов и аддитивных технологий» [36].

В целом в РФ сейчас начинает организовываться промышленное производство 3D принтеров. Первые продажи таких принтеров уже начались в 2011 году [37]. В настоящее время в России отрасли аддитивных технологий находятся в активной стадии развития. По оценкам экспертов, этот рынок растет на 30% в год. Однако для решения комплекса возникающих в связи с их внедрением проблем для ускоренного технологического «прорыва» целесообразно объединение усилий органов государственной власти, бизнеса, профильных НИИ и специализированных высших и средних профессиональных образовательных учреждений [38].

8.1 Существующие достижения использования 3D-печати

В инвестиционно-строительной сфере проектов с государственной поддержкой по освоению 3-D печати на данный момент не принято, но предприниматели и ученые России упорно работают в данном направлении. Инновационный анализ состояния развития технологий 3D строительства в РФ показывает, что необходимые наработки в указанной сфере имеются. Необходимо отметить, что первым в мире в 1995 году обосновал концепцию применения прообраза 3D принтера в строительстве промышленный дизайнер Сергей Дудин совместно с учеными Московского химико-технологического института им. Д.И.Менделеева [39].

В России отрасль 3D-принтинга зданий только начинает развиваться. Высоких результатов по уровню практического внедрения 3D принтеров для строительного производства в России достигла компания ЗАО «Спецавиа», которая базируется в Ярославле. Эта компания не только наладила производство таких принтеров, но и практически внедряет указанную технологию на рынке строительных услуг РФ. Сейчас ЗАО «Спецавиа» предлагает для реализации следующие три модели соответствующих принтеров: во-первых, S-4063 стоимостью 8,5 тыс.долларов, которая предназначена для печати малых архитектурных форм, отдельных элементов для домов, а так же бетонных конструкций площадью до 18 кв.м, во-вторых, S-6045 стоимостью 21 тыс.долларов, которая предусматривает печать сложных бетонных конструкций площадью до 12,6 кв.м, в-третьих, S-1160 стоимостью 29 тыс.долларов, способная печатать крупные конструкции и здания площадью до 280 кв.м. [40].

На рынке строительных 3D принтеров в России в настоящее время работает пока от десяти до пятнадцати компаний или творческих групп, которые также разработали или еще разрабатывают свои модели соответствующих принтеров. Среди них можно отметить творческую группу в Набережных Челнах, создающую принтер, который будет размещаться не «над зданием», а «внутри здания», и соответственно печатающего не «под собой», а «вокруг себя». Таким образом, строительство здания происходит «изнутри» и оставляется специальный выход, через который робот-строитель будет покидать готовое здание, а этот выход также будет заделываться [41].

В США российские инженеры-предприниматели Никита Чэнь Юн-Тай и Андрей Руденко выполнили комплекс работ по конструированию своих моделей 3D принтеров для строительства. Первый спроектировал новую модификацию 3D принтера для строительства, которая получила название ApisCog и сейчас аналогичная модель уже предлагается на российском рынке. Предприниматель А.Руденко в настоящее время уже в Подмоскowie начинает инновационный проект по 3D строительству, однако электроника для соответствующих принтеров будет привозиться из США. Как он говорит, что «в США в первую очередь есть спрос на строительство домов, в Европе – запрос от университетов на научную работу по развитию технологии, а в России в основном запрос от строительных организаций на покупку и использование 3D принтеров для строительства» [42]. А.Руденко указывает, что в России отсутствует государственная финансовая поддержка в данном направлении инноваций и он будет использовать для финансирования своих проектов метод crowdfunding, который предусматривает коллективное и добровольное сотрудничество заинтересованных в данном случае во внедрении технологий 3D строительства людей, объединяющих в основном через Интернет свои ресурсы, в том числе и финансовые, чтобы поддержать его инновационный проект.

В октябре 2015 года в рамках выставки «Станкостроение» (Крокус-Экспо) ЗАО «СПЕЦАВИА» были представлены российские разработки и промышленные образцы строительных 3D-принтеров. Уже в декабре 2016 года компания ApisCog в сотрудничестве с ГК ПИК приступила к печати здания, площадью 38 м², с помощью мобильного 3D-принтера. Строительство проходило на испытательной базе компании ApisCog в городе Ступино на территории Ступинского завода ячеистого бетона. Печать самонесущих стен, перегородок и ограждающих конструкций здания длилась меньше суток.

Впервые в российской строительной практике дом был отпечатан целиком, а не собран из отпечатанных панелей.



Рисунок 16. Процесс работы 3D-принтера ApisCor

Дизайн одноэтажного жилого дома необычный. Такой проект был выбран неслучайно, так как одна из главных целей строительства — продемонстрировать гибкие возможности оборудования и разнообразность доступных форм. Дом может быть любой формы, в том числе и привычной квадратной.

Дом возводили в самое холодное время года. Зима добавила сложности для участников проекта, поскольку применение бетонной смеси, используемой в качестве «чернил» возможно только при температуре от +5°C, хотя само оборудование способно работать при температуре до -35°C. Задачу решили с помощью установки крытого тента, где поддерживался необходимый температурный режим. В скором времени с применением новых материалов, например геобетона, можно будет печатать дома в любое время года.

Кровля коттеджа в Ступино в соответствии с архитектурным проектом — плоская. Решение, предложенное компанией ТехноНИКОЛЬ, способно эффективно выдерживать высокие снеговые и эксплуатационные нагрузки, а по сроку службы и стоимости сопоставимо с привычными для нашей страны скатными крышами.

Внутри отпечатанный дом ничем не отличается от обычного.



Рисунок 17. Первый в России напечатанный 3D принтером жилой дом

С приходом новой технологии строительной 3D-печати меняется представление и подход к строительству малоэтажных зданий, открываются новые возможности для реализации нестандартных архитектурных решений. Проект, реализованный компаниями ApisCor и ГК ПИК в Подмосковном Ступино, продемонстрировал выгоды применения новой технологии на практике.

Теперь можно с уверенностью сказать, что вместе с решением ApisCor строительная 3D-печать шагнула на новый эволюционный этап. Компания ApisCor и её партнёры уверены, что дом в Ступино стал первым шагом, способным убедить мир в том, что 3D-технологии на строительном рынке — это реальность.

8.2 Перспективы активизации применения 3D печати в строительном комплексе РФ

В России консолидация участников инновационного процесса по созданию и внедрению аддитивных технологий на уровне государственных структур и научных кругов уже происходит в Москве, где в октябре этого года на базе технопарка «Калибр» и Российско-Сингапурского Делового Совета при поддержке Департамента науки, промышленной политики и предпринимательства г.Москвы, Агентства инноваций г.Москвы и при участии Наньянского технологического университета (КНР), Московского политехнического университета, Санкт-Петербургского политехнического университета и других научно-образовательных и предпринимательских организаций и фирм прошла. Первая международная конференция «Аддитивные технологии на российском рынке: от научных разработок к производству будущего». Одним из основных государственных органов, оказывающим поддержку внедрению инновационных проектов по применению аддитивных технологий, является вышеназванное Агентство стратегических инициатив, которое реализует вышеназванную НТИ по формированию принципиально новых рынков и созданию условий для глобального технологического лидерства России к 2035 году. В рамках ее реализации ИППТ СПбПУ занимает, как уже говорилось выше, место на "пересечении" базовых Технологий Будущего / Перспективных направлений деятельности. Однако это все касается применения 3D принтеров в промышленности.

Необходимо отметить, что в России ряд строительных университетов, а именно: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства и др. проводят научные исследования по строительным материалам для принтеров 3D печати в строительстве. Тем не менее, в строительных университетах сейчас отсутствуют масштабные научные исследования и опытно-конструкторские разработки по 3D принтерам для строительства, т.к. в целом исследования по аддитивным технологиям проводятся в СПбПУ, Московском политехническом университете и других государственных научных и образовательных учреждениях по направлению «робототехника». Таким образом, в СПбПУ созданы самые благоприятные условия для разработки проекта научных исследований в направлении создания технологий 3D в строительстве или для печатания крупногабаритных конструкций в рамках TexNet НТИ, а также и в формате Федеральной целевой программы «Исследование и разработка по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», которая уже используется для проектов ИППТ и Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ в сфере ракетостроения, автомобилестроения, вертолетостроения, сельскохозяйственного машиностроения и др. [43].

Однако, учитывая специфические и крупногабаритные характеристики 3D принтеров для сферы строительного производства, является целесообразным создание специализированного Инжинирингового центра крупногабаритной 3D-печати для строительства в ИППТ СПбПУ. При этом, учитывая значительные достижения Китая в использовании 3D-принтеров в строительстве, а также тесные научно-образовательные связи СПбПУ с Китаем и наличие Китайско-российского научно-инновационного центра, предлагаемый выше специализированный Инжиниринговый центр может являться и совместным Российско-китайским центром. Кроме этого, в СПбПУ целесообразно формирование специализированных лабораторий по технологиям 3D строительства в особых условиях для потребностей госкорпораций Росатом и Роскосмос, в чрезвычайных и специфических условиях для нужд Министерства по чрезвычайным ситуациям и Министерства обороны РФ. Для обсуждения всего комплекса проблем, связанных с разработкой и внедрением технологий 3D строительства считаем целесообразным в Инженерно-строительном институте СПбПУ организация и проведение Международной научно-практической конференции или международного научно-практического семинара с привлечением СРО «Объединение строителей Санкт-Петербурга» и других заинтересованных организаций и ведомств.

С позиций использования методов инновационного менеджмента, технологического прогнозирования и методов прогнозирования для маркетинговых исследований [39,41] можно обоснованно говорить об значительных потенциальных возможностях применения 3D-печати для активизации производства в строительной сфере России. Таким образом перспективы создания и развития технологий 3D-печати в инвестиционно-строительном комплексе РФ имеют огромные потенциальные возможности для обеспечения инновационного «толчка» по опережающему импортозамещению этих аддитивных технологий в условиях стратегии инновационного развития как строительной отрасли РФ в целом на период до 2030 года, так и для применения при строительстве уникальных сооружений и решения соответствующих задач в специальных условиях для госкорпораций Роскосмос и Росатом, а также в особых и чрезвычайных условиях для МЧС и МО РФ.

9. Заключение

В настоящее время в сферах промышленного производства важной проблемой является разработка и внедрение новых технологий. Резкий рост интереса к аддитивным технологиям, в том числе к их использованию в архитектуре и строительстве, наблюдается как за рубежом, так и в России.

На примерах конкретных видов строительных 3D-принтеров, существующих и разрабатываемых сегодня в мире, были продемонстрированы их возможности, что позволило сделать вывод о современном уровне развития данной технологии в сфере строительства зданий и сооружений. Так, для возведения различных типов зданий были изобретены специальные виды строительных 3D-принтеров, отличающихся по пространственным методам работы, мобильности, скорости печати, а также объектам их печати, что свидетельствует о разнообразии рынка строительных 3D-принтеров и возможности их широкого применения в данной отрасли. Среди преимуществ использования 3D-принтеров для строительства зданий можно выделить сокращение потерь и расходов производства, снижение затрат на электрическую энергию, уменьшение стоимости строительства зданий с уникальной архитектурой и возможность легко изменять толщину и конфигурацию стен на стадии разработки модели благодаря специальным программам. По причине того, что направление 3D-печати в строительстве возникло только в последнем десятилетии, многие технические возможности данного оборудования остаются не раскрытыми до конца, а существующие проблемы - не решенными в полной мере. Так, проблемы ограниченности габаритов зданий, сложности в процессах создания перекрытий и крыш таких сооружений, а также вопросы о прочности строений до сих пор остаются открытыми.

Несмотря на недостатки строительных 3D-принтеров, данный вид строительного оборудования можно считать перспективным, так как оживленное развитие аддитивных технологий существенно меняет соотношение экономических факторов в строительстве, значительно упрощает производственные процессы и открывает новые возможности.

В РФ разработка 3D принтеров для строительства пока ведется не так активно, как в Китае или США, и без должной государственной поддержки. Данный факт можно объяснить современными экономическими трудностями в России и преобладанием на ее территории суровых климатических условий, что требует решения более сложного комплекса задач, связанных с перспективой создания и внедрения технологий 3D строительства в инвестиционно-строительной сфере РФ. В связи с этим необходимо инициировать разработку и реализацию соответствующих проектов для строительства в особых, чрезвычайных и специальных условиях для МЧС и МО РФ, и госкорпораций Роскосмос, Росатом и др.. Кроме этого следует также искать взаимодействия с инвестиционно-строительным бизнесом в России, который в настоящее время имеет достаточный уровень организационно-финансового развития на основе принципов саморегулирования.

Благодарности

Авторы выражают признательность Инженерно-строительному институту Санкт-Петербургского политехнического университета, а также Донбасской национальной академии строительства и архитектуры за оказанную помощь при проведении данного исследования и написании настоящей статьи. Работа выполнена в рамках проекта MARUEEB Erasmus+ 561890-EPP-1-2015-1-IT-EPPKA2-SBHE-JP.

Литература

- [1]. Грахов В.П., Мохначев С.А., Бороздов О.В. Влияние развития 3D-технологий на экономику строительства // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-12. С. 2673-2676.
- [2]. Кудрявцева И.С., Месяченко А.А. 3D принтеры в строительстве // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Инновации в строительстве. 2016. № 2. С. 38-41.
- [3]. Торшин А.О., Потапова Е.Н. Перспективы использования 3D-принтера в строительстве // Успехи химии и химической технологии. 2016. № 7 (176). С. 118-120.
- [4]. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures/Materiaux et Constructions. 2016. Vol. 49. Pp. 1213-1220.
- [5]. Edenhofer S., Radler S., Hob M., Von Mammen S. Self-organised construction with Revit. IEEE 1st International Workshops on Foundations and Applications of Self-Systems, FAS-W 2016. 2016. Pp. 160-161.
- [6]. Лесовик В.С., Чернышева Н.В., Глаголев Е.С., Дребезгова М.Ю., Ермолаева А.Э. 3D-аддитивные технологии в сфере строительства // Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства. 2016. С. 157-167.

- [7]. Мустафин Н.Ш., Барышников А.А. Новейшие технологии в строительстве. 3D принтер // Региональное развитие. 2015. № 8. С. 13.
- [8]. Далинчук В.С., Власенко Д.А. Основные аспекты печати домов с помощью 3D принтера // Инновационное развитие. 2016. № 2 (2). С. 6-13.
- [9]. Шувалов Н.Е. Целесообразность 3D печати в малоэтажном строительстве // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 11 (67). С. 190-192.
- [10]. Табаев И.А., Дегтярев Г.В. Печать домов - миф или реальность // Научное обеспечение агропромышленного комплекса. 2016. С. 887-889.
- [11]. Labonnote N., Ronnquist A., Manum B., Ruther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. Automation in Construction. 2016. Vol. 72. Pp. 347-366.
- [12]. Ивасюта А.В., Иванов Н.А. Перспективы использования технологии 3D-печати при строительстве зданий и сооружений // Научное обозрение. 2016. № 9. С. 53-55.
- [13]. Рошин В.А., Гнездилов С.Г. Применение объемной печати в строительстве // Механизация строительства. 2016. № 4. С. 16-21.
- [14]. Salet T., Wolfs R. Potentials and challenges in 3D concrete printing. Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing. 2016. Pp. 8-13.
- [15]. Dominguez I., Romero L., Espinosa M., Dominguez M. 3D printing of models and prototypes in architecture and construction. Revista de la construccion. 2013. Vol. 12. Pp. 41-55.
- [16]. Шумаев В.А., Тузов Е.Ю. Инновационное развитие 3D-технологий // InSitu. 2015. № 3 (3). С. 79-82.
- [17]. Henke K., Talke D., Winter S. Additive manufacturing of building elements by extrusion of wood concrete. WCTE 2016 – World Conference on Timber Engineering. 2016. Code 124667
- [18]. Плеханова В.А. 3D-технологии и их применение в дизайне // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2015. № 2 (29). С. 144-153.
- [19]. 3D-печать в архитектуре // Сапр и графика. 2012. № 8 (154). С. 12-16.
- [20]. Кидрас И.Н., Макаров К.А. 3D - печать в строительстве // Научная дискуссия: инновации в современном мире. 2016. № 13 (56). С. 152-157.
- [21]. Савочкин А. Использование 3D-принтеров в обучении САПР // САПР и графика. 2015. № 7 (225). С. 22-23.
- [22]. Кушнир Н.В., Кушнир А.В., Геращенко А.М., Тыртышный А.Д. 3D-принтеры: история и технологии трехмерной печати // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2015. № 6. С. 147-155.
- [23]. Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudilliere N., Dirrenberger J., Morel P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. Materials & Design. 2016. Vol. 100. Pp. 102-109.
- [24]. Пермьяков М.Б., Пермьяков А.Ф., Давыдова А.М. Аддитивные технологии в строительстве // European Research. 2017. № 1 (24). С. 14-15.
- [25]. Сембаев Б.Н., Билялова С.А. Применение 3D печати в строительстве // Электронный научный журнал. 2016. № 10-3 (13). С. 279-282.
- [26]. Wolfs R., Salet T. An Optimization Strategy for 3D Concrete Printing. EG-ICE 2015 – 22nd Workshop of the European Group of Intelligent Computing in Engineering. 2015. Code 114260
- [27]. Перспективы применения 3D печати в строительстве до 2021 года [Интернет-источник] – URL: <http://gearmix.ru/archives/28651> (Дата обращения: 15.05.2017)
- [28]. Обзорная статья по 3D строительным технологиям [Интернет-источник] – URL: <https://geektimes.ru/post/224299/> (Дата обращения: 15.05.2017)
- [29]. Квартальнов С.В., Макулов В.В. 3D печать в строительстве // European Science. 2016. № 7 (17). С. 10-11.
- [30]. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? International Conference on Ecology and new Building materials and products, ICEBMP 2016: Hotel SladovnaCerna Hora: Czech Republic. 2016. Code 131448
- [31]. Информационно-аналитическое агентство. 3D строительство [Интернет-источник] – URL: <http://www.3dpulse.ru/news/stroitelstvo/> (Дата обращения: 15.05.2017)
- [32]. Fischer T., Herr C. Parametric customization of a 3D concrete printed pavilion. Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (Caadria 2016): Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing. 2016. Pp. 549-558.

- [33]. WinSun: дом, распечатанный на 3D-принтере (Китай) [Интернет-источник] – URL: <http://terra-z.com/archives/76078> (Дата обращения: 15.05.2017)
- [34]. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. №1 (52). С. 27-46.
- [35]. Кокцинская Е.М. Технология 3D-печати: обзор последних новостей // Видеонаука. 2016. № 2 (2). С. 6.
- [36]. Национальная технологическая инициатива (НТИ) [Интернет-источник] – URL: <http://fea.ru/compound/national-technology-initiative> (Дата обращения: 15.05.2017)
- [37]. Производство российских 3D принтеров спотыкается о стереотипы [Интернет-источник] – URL: <http://expert.ru/2014/03/25/proizvodstvo-rossijskih-3d-printerov-spotykaetsya-o-stereotipy/> (Дата обращения: 15.05.2017)
- [38]. Аддитивные технологии на российском рынке: от научных разработок к производству будущего [Интернет-источник] – URL: <http://3dtoday.ru/events/additive-technology-in-the-russian-market-from-res/> (Дата обращения: 15.05.2017)
- [39]. Литвинова Щ.Щ., Белякова Ю.И., Технология строительного производства. К.: Высшая школа, 1985. – 376 с.
- [40]. 3D принтер для строительства домов как бизнес [Интернет-источник] – URL: <http://p-business.ru/3d-printer-dlya-stroitelstva-domov-kak-biznes/> (Дата обращения: 15.05.2017)
- [41]. Ильенковой С.Д., Инновационный менеджмент. М.: Юнити-Дана, 2012. – 335 с.
- [42]. Rudenko 3D printer [Интернет-источник] – URL: <http://www.totalcustom.com/> (Дата обращения: 15.05.2017)
- [43]. Проекты Института передовых производственных технологий (ИППТ) СПбПУ и Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) СПбПУ победили в конкурсе Федеральной целевой программы по развитию научно-технологического комплекса России [Интернет-источник] – URL: <http://fea.ru/news/6482> (Дата обращения: 15.05.2017)

Prospects of 3D-printing in the building complex of the Russian Federation

A.K. Demidenko ^{1*}, A.V. Kulibaba ², M.F. Ivanov ³

¹⁻² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

³ Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2, Derzhavin str., Makiyivka, Donetsk region, Ukraine, 86123

Article info

scientific article

doi: 10.18720/CUBS.63.4

Article history

Received 26.04.2017

Keywords

3D printers;
Additive Manufacturing;
Construction;
Buildings;
Cad/cams;
Computer aided manufacturing;
Civil Engineering.;

ABSTRACT

The close affinity between hand work and building processes is a main problem in Civil Engineering. It causes not only slowing down the speed of building, but increases additive spendings on some processes like finishing works too. Application of 3D-printers in this branch of building sector can solve some modern problems, and also allow bringing the sphere of building and construction to a new level. The purpose of the study was to find out the level of technical development of 3D-printers in building, their advantages and disadvantages and also their possible application for the prospects of activation in the building complex of the Russian Federation. The study was based on learning different versions of 3D-printers and their software. It showed that they were able to erect different buildings and substructures despite their entry-levels of technical development. There were described processes of generating STL-models of buildings and their following transformations into G-codes. Also 3D-printers were divided in accordance with their conditions into mobile, fast-printing, having different spatial operating methods and others. In article there were showed flexible performance capabilities of this equipment and sounded real building progress rates via the examples of printed houses in different countries. Based on the findings there were drawn some conclusions about technical and economic advantages of using 3D-printers in low rise buildings. There was a special attitude for the question of application 3D-printing in the building complex of the Russian Federation. Estimation of expansion of this technology was confirmed by the existing achievements in the market of the Russian Federation. The prospects of this technology were also confirmed by modern state policy of interest in researches of additive technologies.

Contact information:

1* +79992275467, asyademidenko@gmail.com (Anastasia Demidenko, Student)

2 +79819559384, kulibaba_al@mail.ru (Alina Kulibaba, Student)

3 +79819633364, mixivanov@mail.ru (Mikhail Ivanov, Ph.D., Associate Professor, Head of the Department, Professor)

References

- [1]. Grakhov V.P., Mokhnachev S.A., Borozdov O.V. Vliyanie razvitiya 3D-tekhnologiy na ekonomiku stroitel'stva [The impact of the development of 3D-technologies on construction economics] Fundamental'nye issledovaniya. 2014. No.11-12. Pp. 2673-2676. (rus)
- [2]. Kudryavtseva I.S., Mesyachenko A.A. 3D printery v stroitel'stve [3D printing in building] Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Innovatsii v stroitel'stve. 2016. No. 2. Pp. 38-41. (rus)
- [3]. Torshin A.O., Potapova E.N. Perspektivy ispol'zovaniya 3D-printera v stroitel'stve [Perspectives of 3D-printer in constructing] Uspekhi khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2016. No. 7 (176). Pp. 118-120. (rus)
- [4]. Perrot A., Rangeard D., Pierre A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. Materials and Structures/Materiauxet Constructions. 2016. Vol. 49. Pp. 1213-1220. (rus)
- [5]. Edenhofer S., Radler S., Hob M., Von Mammen S. Self-organised construction with Revit. IEEE 1st International Workshops on Foundations and Applications of Self-Systems, FAS-W 2016.2016. Pp. 160-161. (rus)
- [6]. Lesovik V.S., Chernysheva N.V., Glagolev E.S., Drebezhgova M.Yu., Ermolaeva A.E. 3D-additivnye tekhnologii v sfere stroitel'stva [3D-additive technologies in the sphere of construction] Intellektual'nye stroitel'nye kompozity dlya zelenogo stroitel'stva. 2016. Pp. 157-167. (rus)
- [7]. Mustafin N.Sh., Baryshnikov A.A. Noveyshie tekhnologii v stroitel'stve. 3D printer [The progressive technology in construction] Regional'noe razvitie. 2015. No. 8. Pp. 13. (rus)
- [8]. Dalinchuk V.S., Vlasenko D.A. Osnovnye aspekty pechati domov s pomoshch'yu 3D printera [Key aspects of printing houses using 3D printer] Innovatsionnoe razvitie. 2016. No. 2 (2). Pp. 6-13. (rus)
- [9]. Shuvalov N.E. Tselesoobraznost' 3D pechati v maloetazhnom stroitel'stve [Feasibility of 3D printing in low-rise building] Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii. 2016. No. 11 (67). Pp. 190-192. (rus)
- [10]. Tabaev I.A., Degtyarev G.V. Pechat' domov - mif ili real'nost' [The printing of houses: myth or reality] Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa. 2016. Pp. 887-889. (rus)
- [11]. Labonnote N., Ronnquist A., Manum B., Ruther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. Automation in Construction. 2016. Vol. 72. Pp. 347-366. (rus)
- [12]. Ivasyuta A.V., Ivanov N.A. Perspektivy ispol'zovaniya tekhnologii 3D-pechati pri stroitel'stve zdaniy i sooruzheniy [Prospects of using 3D-printing technology in the construction of buildings and structures] Nauchnoe obozrenie. 2016. No. 9. Pp. 53-55. (rus)
- [13]. Roshchin V.A., Gnezdilov S.G. Primenenie ob'emnoy pechati v stroitel'stve [Use of 3d printing in construction] Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2016. No. 4. Pp. 16-21. (rus)
- [14]. Salet T., Wolfs R. Potentials and challenges in 3D concrete printing. Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing. 2016. Pp. 8-13. (rus)
- [15]. Dominguez I., Romero L., Espinosa M., Dominguez M. 3D printing of models and prototypes in architecture and construction. Revista de la construccion. 2013. Vol. 12. Pp. 41-55. (rus)
- [16]. Shumaev V.A., Tuzov E.Yu. Innovatsionnoe razvitie 3D-tekhnologiy [The innovative development of 3D- technology] InSitu. 2015. No. 3 (3). PP. 79-82. (rus)
- [17]. Henke K., Talke D., Winter S. Additive manufacturing of building elements by extrusion of wood concrete. WCTE 2016 – World Conference on Timber Engineering. 2016. Code 124667. (rus)
- [18]. Plekhanova V.A. 3D-tekhnologii i ikh primeneniye v dizayne [3D-technologies and application in the design] Territoriya novykh vozmozhnostey. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa. 2015. No. 2 (29). Pp. 144-153. (rus)
- [19]. 3D-pechat' v arkhitekture [3D printing in art of building] Sapri i grafika. 2012. No. 8 (154). Pp. 12-16.
- [20]. Kidras I.N., Makarov K.A. 3D - pechat' v stroitel'stve [3D printing in construction] Nauchnaya diskussiya: innovatsii v sovremennom mire. 2016. No. 13 (56). Pp. 152-157. (rus)
- [21]. Savochkin A. Ispol'zovanie 3D-printerov v obuchenii SAPR [The application of 3D-printing in teaching of CAD system] SAPR i grafika. 2015. No. 7 (225). Pp. 22-23. (rus)
- [22]. Kushnir N.V., Kushnir A.V., Gerashchenko A.M., Tyrtshynny A.D. 3D-printery: istoriya i tekhnologii trekhmernoy pechati [3D-printers: history and technologies of three-dimensional printing] Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. No. 6. Pp. 147-155. (rus)
- [23]. Gosselin C., Duballet R., Roux P., Gaudilliere N., Dirrenberger J., Morel P. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. Materials & Design.2016.Vol. 100. Pp. 102-109.

- [24]. Permyakov M.B., Permyakov A.F., Davydova A.M. Additivnye tekhnologii v stroitel'stve [Additive technologies in construction] European Research. 2017. No. 1 (24). Pp. 14-15. (rus)
- [25]. Sembaev B.N., Bilyalova S.A. Primenenie 3D pechati v stroitel'stve [The application of 3D-printing in the construction industry] Elektronnyy nauchnyy zhurnal. 2016. No. 10-3 (13). PP. 279-282. (rus)
- [26]. Wolfs R., Salet T. An Optimization Strategy for 3D Concrete Printing. EG-ICE 2015 – 22nd Workshop of the European Group of Intelligent Computing in Engineering. 2015. Code 114260. (rus)
- [27]. Perspektivy primeneniya 3D pechati v stroitel'stve do 2021 goda (Prospects of using 3D printing in construction until 2021) Available at: <http://gearmix.ru/archives/28651> (accessed 15 May 2017)
- [28]. Obzornaya stat'ya po 3D stroitel'nym tekhnologiyam (Review article of 3D building technologies) Available at: <https://geektimes.ru/post/224299/> (accessed 15 May 2017)
- [29]. Kvartal'nov S.V., Makulov V.V. 3D pechat' v stroitel'stve [3D printing in construction] European Science. 2016. No. 7 (17). Pp. 10-11. (rus)
- [30]. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? International Conference on Ecology and new Building materials and products, ICEBMP 2016: Hotel SladovnaCerna Hora: Czech Republic. 2016. Code 131448. (rus)
- [31]. Informatsionno-analiticheskoe agentstvo. 3D stroitel'stvo (Information-analytical agency. 3D construction) Available at: <http://www.3dpulse.ru/news/stroitelstvo/> (accessed 15 May 2017)
- [32]. Fischer T., Herr C. Parametric customization of a 3D concrete printed pavilion. Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (Caadria 2016): Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing. 2016. Pp. 549-558. (rus)
- [33]. WinSun: dom, raspechatanny na 3D-printere (Kitay) (WinSun: home, printed on a 3D printer (China) Available at: <http://terra-z.com/archives/76078> (accessed 15 May 2017)
- [34]. Vatin N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S., Zykova V.V., Karpenya A.N., Kim A.A., Finashenkov E.A.. 3D-pechat' v stroitel'stve [3D printing in construction]. Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2017. No. 1 (52). Pp. 27-46.
- [35]. Koktsinskaya E.M. Tekhnologiya 3D-pechati: obzor poslednikh novostey [3D-printing technology: an overview of the latest news] Videonauka. 2016. No. 2 (2). Pp. 6. (rus)
- [36]. Natsional'naya tekhnologicheskaya initsiativa (NTI) (National Technology Initiative (STI) Available at: <http://fea.ru/compound/national-technology-initiative> (accessed 15 May 2017)
- [37]. Proizvodstvo rossiyskikh 3D printerov spotykaetsya o stereotipy (Production of Russian 3D printers stumbles on stereotypes) Available at: <http://expert.ru/2014/03/25/proizvodstvo-rossijskikh-3d-printerov-spotykaetsya-o-stereotipy/> (accessed 15 May 2017)
- [38]. Additivnye tekhnologii na rossiyskom rynke: ot nauchnykh razrabotok k proizvodstvu budushchego (Additive technologies in the Russian market: from scientific developments to production of the future) Available at: <http://3dtoday.ru/events/additive-technology-in-the-russian-market-from-res/> (accessed 15 May 2017)
- [39]. Litvinova Shch.Shch., Belyakova Yu.I., Tekhnologiya stroitel'nogo proizvodstva [Technology of construction production]. Vysshaya shkola, 1985. 376 p.
- [40]. 3D printer dlya stroitel'stva domov kak biznes (3D printer for building houses as a business) Available at: <http://p-business.ru/3d-printer-dlya-stroitelstva-domov-kak-biznes/> (accessed 15 May 2017)
- [41]. Il'yenkovoy S.D., Innovatsionnyy menedzhment [Innovative management]. Yuniti-Dana, 2012. 335 p.
- [42]. Rudenko 3D printer. Available at: <http://www.totalkustom.com/> (accessed 15 May 2017)
- [43]. Proekty Instituta peredovykh proizvodstvennykh tekhnologiy (IPPT) SPbPU i Inzhiniringovogo tsentra «Tsentri komp'yuternogo inzhiniringa» (CompMechLab®) SPbPU pobedili v konkurse Federal'noy tselevoy programmy po razvitiyu nauchno-tekhnologicheskogo kompleksa Rossii (Projects of the Institute of Advanced Production Technologies of SPbPU and Engineering Center "Center for Computer Engineering" (CompMechLab®) SPbPU won the competition of the Federal Target Program for the Development of the Scientific and Technological Complex of Russia) Available at: <http://fea.ru/news/6482> (accessed 15 May 2017)

Демиденко А.К., Кулибаба А.В., Иванов М.Ф., Перспективы применения 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации, Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, №12(63). С.71-96.

Demidenko A.K., Kulibaba A.V., Ivanov M.F. Prospects of 3D-printing in the building complex of the Russian Federation, Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 12 (63). Pp. 71-96. (rus)