

ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ/THEORY AND HISTORY OF ARCHITECTURE, RESTORATION AND RECONSTRUCTION OF HISTORICAL AND ARCHITECTURAL HERITAGE

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.4>

ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА 3D-ПЕЧАТИ В ПРОЦЕССЕ АРХИТЕКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Научная статья

Утяковская Д.Н.^{1,*}, Короткова С.Г.²

¹ ORCID : 0009-0005-0676-2908;

² ORCID : 0000-0001-8303-5580;

^{1,2} Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (daria.utiakowskaya[at]yandex.ru)

Аннотация

В данной статье рассматривается актуальный подход интеграции революционной технологии 3-D прототипирования в процесс архитектурного проектирования объектов капитального строительства. Цель исследования состоит в создании и эффективном внедрении алгоритма 3-D печати в работу архитектора, который будет способствовать увеличению качества работы.

В современном мире с быстро растущей сложностью архитектурных решений поиск новых инновационных методов становится крайне необходимым. Уникальность использования аддитивных технологий состоит в том, что возможно напечатать объект любой формы и любого размера. Создание алгоритма позволит сформировать комплексный подход с интеграцией аддитивных технологий во все этапы проектирования.

В работе представлены основные факторы формирования алгоритма, включающий в себя анализ типов принтера, анализ особенностей напечатанных моделей. Опираясь на мировой опыт архитектурных бюро, которые задействуют аддитивные технологии, были выявлены основные приемы формирования информационной модели для ее дальнейшей печати и сформирован общий алгоритм внедрения данной технологии в этапы архитектурного проектирования объектов капитального строительства.

Ключевые слова: аддитивные технологии, программное обеспечение, 3D-печать, информационная модель.

FORMATION OF 3D-PRINTING ALGORITHM IN THE PROCESS OF ARCHITECTURAL DESIGN OF CAPITAL CONSTRUCTION OBJECTS

Research article

Utyakovskaya D.N.^{1,*}, Korotkova S.G.²

¹ ORCID : 0009-0005-0676-2908;

² ORCID : 0000-0001-8303-5580;

^{1,2} Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

* Corresponding author (daria.utiakowskaya[at]yandex.ru)

Abstract

This article examines the current approach of integrating the revolutionary 3-D prototyping technology into the process of architectural design of capital construction objects. The aim of the research is to create and effectively implement a 3D printing algorithm in the architect's work, which will contribute to increasing the quality of work.

In the modern world, with the rapidly increasing complexity of architectural solutions, the search for new innovative methods is becoming essential. The uniqueness of using additive technologies is that it is possible to print an object of any shape and any size. Creation of an algorithm will allow to form a comprehensive approach with integration of additive technologies into all stages of design.

The work presents the main factors of the algorithm formation, including the analysis of printer types, analysis of the features of the printed models. Based on the world experience of architectural offices that use additive technologies, the main techniques of forming an information model for its further printing have been identified and a general algorithm for implementing this technology in the stages of architectural design of capital construction objects has been developed.

Keywords: additive technologies, software, 3D printing, information model.

Введение

Архитектурное проектирование представляет собой сложный и многогранный процесс, в котором огромное значение имеют как творческие, так и технологические аспекты. В последние время мы наблюдаем значительный рост интереса архитекторов к аддитивным технологиям, особенно к 3д-печати, которая уже зарекомендовала себя в различных областях, таких как промышленный дизайн, медицинская практика и даже в производстве строительных компонентов. Интеграция технологий 3д-печати в архитектурное проектирование открывает новые горизонты, создает дополнительные возможности по улучшению и оптимизации работы над объектами капитального строительства. Этого возможно достичь при помощи аддитивных технологий, которые грамотно войдут в традиционный метод проектирования на всех его этапах.

Требуется выявить шаги по применению современных строительных технологий в проектировании. Алгоритм формирования информационной модели объектов капитального строительства для последующей 3д-печати представляет из себя комплексный подход в реализации поставленных задач. Он позволит контролировать и предлагать гибкую настройку аддитивной модели еще до стадии физического прототипирования, что, в свою очередь, будет способно повысить качество конечного результата, сократить время проектирования, увеличить степень детализации.

Таким образом, это исследование направлено на изучение теоретических и практических аспектов аддитивных технологий и разработку универсального алгоритма.

Целью исследования является создание алгоритма формирования информационной модели объектов капитального строительства для последующей 3д-печати.

В связи с поставленной целью решались следующие задачи:

- выявить особенности 3д-печати при ревалоризации объектов капитального строительства;
- проанализировать мировой опыт архитектурных объектов, созданных при помощи аддитивных технологий;
- предложить алгоритм формирования информационной модели архитектурного объекта для дальнейшего 3д-прототипирования.

При написании статьи были использованы следующие методики:

- графоаналитический метод, заключающийся в построении блок-схем, сравнительных таблиц;
- исторический сравнительный анализ;
- метод систематизации, который обеспечивает грамотный экспорт полученных данных в единую информационную 3д-модель для дальнейшего 3д-прототипирования.

Основная часть

С появлением новых технологий перед архитекторами появляются большие возможности, так произошло и с технологией 3д-печати, которая открыла новые горизонты в ревалоризации зданий. В контексте научного исследования была поставлена задача: изучение особенностей 3д-печати при ревалоризации зданий для воссоздания утраченных конструкций, архитектурных элементов и создание новых уникальных объектов, которые будут грамотно дополнять существующую историческую застройку.

В рамках проведения научного исследования необходимо изучить особенности использования аддитивных технологий, рассмотреть сам процесс 3д-печати. Выбор технологии и метода 3д-печати зависит от заложенного бюджета, степени необходимой детализации прототипа, материалов для печати.

Создание качественного прототипа, максимально похожего на будущее изделие — весьма непростая задача. Приходится решать проблему точного повторения геометрической формы, собираемости, внешнего вида и поиска материалов, максимально похожих на заданные. В последнее время популярными стали технологии быстрого прототипирования (RP — rapid prototyping), то есть послойного синтеза макета по компьютерной модели изделия [4]. На сегодняшний день печать архитектурных элементов может быть выполнена при помощи следующих методов, а именно:

1. FDM-метод послойной экструзии. Во время работы принтера происходит нагрев пластичного материала, который под давлением выходит через сопло, сопло же, в свою очередь, послойно наносит экструдированный материал, формируя 3д-объект. Этот метод подходит для создания макетов и 3д-прототипов небольшого размера. При помощи него можно воссоздать утраченные исторические элементы, такие как: розетки, дверные ручки, пилястры и так далее. Одна из архитектурных фирм DUS разработало по индивидуальному заказу в Нидерландах дизайн фасада с использованием 3д-печатных элементов с использованием FDM-принтеров. Дизайн которых, черпает вдохновение из исторических парусных судов [7].

Особенность использования данного метода состоит в том, что на объекте можно наблюдать напечатанные слои, которые создают эффект шероховатости, в зависимости от поставленных задач, это можно отнести как к преимуществу, так и к недостатку.

2. SLA-метод стереолитографии. В процессе аддитивного производства гладкая фотополимерная смола, загружаемая в принтер, облучается ультрафиолетовым лазером или другим схожим по мощности источником энергии. Уникальность метода стереолитографии в том, что слои у напечатанного объекта едва заметны, это позволяет достичь высокую детализацию, что критически важно для получения идеальной копии. Данный метод можно задействовать для создания сложной геометрии, текстур и узоров. Технология SLA обеспечивает гладкую и стекловидную поверхность.

3. SLS-метод лазерного спекания, при котором мощный лазер в определённых местах нагревает мельчайшие частицы полимерного порошка до состояния плавления, а после затвердевания повторяет ранее выполненную операцию. Метод селективного лазерного спекания имеет огромный потенциал для создания совершенно нового и независимого производственного процесса, а также находит применение в классических производственных процессах таких как: литье в песчаные формы, литье по выплавляемым моделям [6, С. 46–51]. В качестве материала для построения используется широкий спектр гранулированных (порошковых) материалов. Чаще всего применяются воск, полистирол, нейлон, керамика, стекло, нержавеющая сталь, титан, алюминий и другие металлические сплавы [3, С. 7–12].

4. Binder jetting- метод струйного нанесения связующего материала, который по своей технологии схож с SLS-методом, только вместо лазера используется сопло, которое послойно наносит связующее вещество. Большой спектр материалов увеличивает возможности и даёт архитекторам простор для фантазии и экспериментов. Особенность этой технологии состоит в том, что для изготовления модели характерна низкая прочность, поскольку при печати используются пористые материалы, скреплённые смолой. Однако при добавлении небольшого количества гипсового порошка в печатную смесь-можно добиться увеличения прочностных характеристик [8]. Учитывая этот факт,

необходимо применять данную технологию для выставочных экспонатов и декоративных элементов. Помимо этого, модели, напечатанные из таких пористых материалов, следует располагать в местах с умеренной влажностью или предусматривать дополнительный влагозащитный слой.

5. Material jetting- метод струйного нанесения материала, при котором печатающая головка в виде капель наносит либо конструкционный материал детали, либо поддерживающий водорастворимый полимер. А после всю конструкцию засвечивает ультрафиолетовой лампой. По завершению печати, как и во всех ранее описанных методах, происходит процесс удаления поддержек, в данном методе этого можно достичь при помощи ультразвуковой ванны или же струи воды.

Принтеры с этим методом печати способны создавать объекты из различных материалов, комбинируя их между собой, от этого появляется возможность корректировки цвета и прозрачности модели. Учитывая эти особенности, при ревалоризации здания такие принтеры можно задействовать для создания фотополимерных витражей, уникальных плафонов, светильников.

6. Concrete printing — метод печати бетоном, в процессе которого происходит послойная экструзия специально разработанной бетонной смесью, состав которой постоянно корректируется и видоизменяется для увеличения прочностных характеристик. Чаще всего эта технология используется для печати больших конструкций, таких как стены, перегородки, строительные блоки. Однако необходимо учитывать тот факт, что дефекты в бетонах и растворах для аддитивного производства образуются вследствие нарушения технологического процесса их 3D-печати и/или условий твердения и/или условий эксплуатации, а также наследуются из материала исходного сырья, используемого при их получении [1, С. 107–116].

Отличительной особенностью технологии является большой масштаб 3д-принтеров, рабочее поле которых может достигать 15-30 метров, что позволяет печатать крупные протяжённые объекты, затрачивая при этом оптимальное количество бетонной смеси. Помимо этого современные строительные 3д-принтеры предусматривают не только возможность устраивать различные по конфигурации сооружения, а также дополнять этапы строительства изоляционными и отделочными работами [10, С. 66–69].

7. Экструзионная 3д-печать глиной. Область применения данного метода послойной печати состоит из печати небольших архитектурных, отделочных элементов при помощи глиняной смеси. Данный инновационный подход с использованием современных процессов цифрового изготовления при помощи глины способен воплотить в реальность самые разнообразные формы и текстуры с использованием алгоритмического дизайна [11].

Рассмотрев различные методы 3д-печати, можно сделать вывод, что у технологии есть большой потенциал в ревалоризации зданий и восстановлении архитектурного наследия. Одним из основным материалов для 3D-печати является цементный тяжелый бетон или фибробетон. Отсутствие нормативной документации не позволяет развиваться технологии в аспекте права, а предлагаемые решения в разных странах имеют, как правило, схожие недостатки (как следствие нерешенных технических задач) по реализации [2, С. 863–876].

Так, выбор технологии 3д-прототипирования является сложной задачей, так как необходимо учитывать особенности каждого из методов, такие как материал печати, габариты принтера, прочностные и эстетические характеристики будущей модели, нормативно и экономические возможности заказчика. Все перечисленные особенности оказывают влияние на процесс архитектурного проектирования, и в зависимости от поставленных задач архитектор склоняется к наилучшему из методов, который будет способен удовлетворить все его потребности.

Таблица 1 - Преимущества и недостатки использования 3д-печати в архитектурном проектировании

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.4.1>

Параметр	Преимущества	Недостатки
Технологические	1. Высокая детализация 3D-сканирования 2. Создание сложных геометрических форм без опалубки 3. Индивидуальный подход к существующей местности 4. Большой выбор материалов с разными характеристиками 5. Широкий диапазон настроек модели 6. Автоматизация. Человеческий труд задействован в меньшей степени	1. Ограничения по габаритам печати. Необходима сборка для крупномасштабных моделей 2. Слоистость поверхности 3. Необходимость специального ПО 4. Необходимость обученных специалистов 5. Проблемы с армированием конструкций 6. Отсутствие нормативной базы 7. Сложность подбора материала печати
Экономические	1. Снижение трудозатрат: автоматизация процессов 2. Контроль использованного материалов: сокращение отходов, поскольку используется метод	1. Высокая стоимость оборудования, большие вложения в аренду оборудования 2. Высокая стоимость специализированных

Параметр	Преимущества	Недостатки
	«добавления» 3. Сокращение сроков работы	материалов, технологичных смесей, связующего вещества 3. Необходимость обучения работников ПО принтера
Экологические	1. Возможность использования переработанных материалов 2. Уменьшение строительного мусора 3. Использование биоразлагаемых материалов	1. Высокое энергопотребление оборудования, увеличение парникового эффекта 2. Необходимость фильтрации воздуха в процессе печати, так как некоторые материалы выделяют вредные вещества 3. Преобладание фотополимеров и пластмассы над натуральными материалами
Социальные	1. Увеличение новых рабочих мест 2. Восстановление и сохранение культурного наследия 3. Возможность создания специализированных курсов, мастерских с обучением технологии 3-д печати 4. Увеличение спроса на изучение инновационных технологий со стороны молодежи	1. Риск утраты традиционных методов ревалоризации зданий 2. Риск безработицы для людей, не владеющих ПО 3д принтера
Эстетические	1. Точность воспроизведения геометрии исторических элементов, декора, конструкций 2. Точность воспроизведения текстур 3. Возможность создания уникальных архитектурных форм	1. Сложность в воспроизведении точных оттенков 2. Парадокс аутентичности между напечатанным и оригинальным элементами 3. Неестественный вид искусственного состаривания при ревалоризации зданий

В предложенной таблице 1 (см.табл.1) можно наблюдать преимущества и недостатки метода 3д-прототипирования в архитектурном проектировании, которые были разделены на 5 основных параметров. Анализ критериев выявил не только сильные и слабые стороны технологии, но и подсветил более глубокие технологические и экономические аспекты, которые можно успешно раскрыть и ввести в процесс архитектурного проектирования объектов капитального строительства.

В рамках исследования был выполнен анализ мирового опыта использования этих технологий при помощи различных видов принтера, предлагающих широкий спектр возможностей по работе с промышленными и историческими объектами.

Таблица 2 - Область применения 3д-принтеров

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.4.2>

№	Модель 3d принтера и технология печати	Страна производства	Ключевые особенности 3d принтера	Области применения в ревалоризации промышленных зданий
1	Ultimaker S5 (FDM)	Нидерланды	Надежность, простота использования, возможность печати несколькими материалами одновременно, широкий выбор материалов	1. Печать шаблонов и форм для ручной реставрации (например, для восстановления лепнины или декоративных элементов) 2. Изготовление кастомных крепежных элементов для монтажа нового оборудования в исторических интерьерах
2	Formlabs Form 3 (SLA)	США	Высокая точность, гладкая поверхность, относительно доступная цена, большой диапазон фотополимеров	1. Воссоздание утраченных элементов лепнины и декора фасада. 2. Создание мастер-моделей для литья металлических элементов (перила, решетки) 3. Прототипирование новых осветительных приборов, адаптированных к индустриальному стилю
3	WASP Clay Printer (FDM)	Италия	Возможность использования глины и биоматериалов, экологичность, создание необычных и индивидуальных текстур	1. Создание глиняной облицовки стен, имитирующей кирпичную кладку или другие исторические материалы 2. Печать элементов интерьера (перегородки, скамейки, элементы освещения) 3. Создание арт-объектов и

№	Модель 3d принтера и технология печати	Страна производства	Ключевые особенности 3d принтера	Области применения в ревалоризации промышленных зданий
				инсталляций, интегрированных в индустриальное пространство
4	Desktop Metal Shop System (Binder Jetting)	США	Относительно доступная цена (среди принтеров для печати металлом), возможность производства деталей из нержавеющей стали, высокая точность и производительность	1. Изготовление креплений для нового оборудования к старым стальным балкам (кастомные кронштейны) 2. Воссоздание металлических элементов фасада или кровли, которые невозможно найти в продаже 3. Производство фурнитуры для окон и дверей, выполненных в индустриальном стиле
5	COBOD BOD2 (Concrete Printing)	Дания	Возможность автоматизированного строительства зданий и крупных элементов, адаптация к существующей геометрии здания	1. Надстройка этажей на существующем промышленном здании с использованием 3D-печатных бетонных стен 2. Создание новых лестничных клеток и лифтовых шахт 3. Усиление существующих стен и колонн с помощью 3D-печатных бетонных слоев
6	BigRep ONE (FDM)	Германия	Огромный объем печати, возможность использования различных термопластиков	1. Создание прототипов элементов фасада в масштабе 1:1 для оценки внешнего вида и функциональности. 2. Изготовление крупногабаритных элементов интерьера, таких как перегородки или элементы

№	Модель 3d принтера и технология печати	Страна производства	Ключевые особенности 3d принтера	Области применения в ревалоризации промышленных зданий
				мебели. 3. Печать форм для заливки бетоном или другими материалами
7	ExOne S-Max Pro (Binder Jetting)	США	Очень большой объем печати, возможность использовать песок для экономичного создания крупных литейных форм	1. Создание форм для отливки крупных металлических элементов фасада (декоративные панели, карнизы) 2. Изготовление форм для отливки чугунных колонн или других несущих элементов

Анализ таблицы 2 (см.табл.2) показал нам, что одной из распространённых технологий печати является fdm технология, благодаря своей доступности и относительно невысокой стоимости по сравнению с другими аналогами. Многие из распространённых принтеров обладают возможностью совместной работы с традиционными методами при помощи воспроизведения форм и шаблонов для дальнейшего литья, тем самым ускоряя и улучшая процесс проектирования.

При всех недостатках следует отметить перспективность данного направления строительных технологий. Сейчас еще рано говорить об экономической целесообразности внедрения аддитивных технологий в строительство. Строительные 3Д-принтеры еще только разрабатываются, однако очевидное преимущество данной технологии заключается в высокой скорости и точности строительства [9, С. 14–15].

Также одна из особенностей, на которой следует сделать акцент-это экологичность. На сегодняшний день существует большое количество принтеров, которые специализируются на этом, так фирма Winsun является экологически чистой технологией, которая использует до 50% отходов в своих чернилах и генерирует нулевые отходы во время своих производственных работ [5].

Таким образом, анализ мирового опыта 3д-принтеров и выявление их области применения показал нам, что у технологии аддитивного производства есть большие шансы на развитие и широкое применение в архитектуре. Для успешного внедрения этой технологии перед специалистами появляются различные задачи по созданию новых и совершенствованию существующих смесей материалов.

Таблица 3 - Примеры использования аддитивных технологий в мировой практике
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.4.3>

Наименование прототипированного элемента	Фасад	Архитектурные детали гаргулья	Отделка рельефная плитка New Delft Blue
Наименование постройки	Здание на Питой авеню 574	Собор Парижской Богоматери	Жилой комплекс PoortMeesters
Авторы	Компания EDG	Компания Concr3de	Компания Studio RAP
Дата печати	2018	2019	2019
Место нахождения постройки	Нью-Йорк, США	Париж, Франция	Делфт, Нидерланды
Изображение прототипированного элемента			
Вид принтера, материал печати	FDM 3D-принтер MakerBot Replicator Z18, PLA-пластик, Voxeljet VX1000, песок	Binder jetting, зола и известняк, оставшиеся после пожара	Экструзионная 3D-печать глиной манипулятором KUKA robot, глиняная смесь
Описание прототипированного элемента	Восстановление фасада происходило по технологии "Model Optimental", которая представляет из себя воссоздание сложной архитектуры фасада при помощи 3D-печати форм для их последующей заливки бетонной смесью. Благодаря технологии 3D-прототипирования удалось воссоздать колонны, капители и сложные орнаменты при помощи специальной бетонной смеси.	Архитекторы воссоздали при помощи 3D-принтера утраченную гаргюлю Собора Парижской Богоматери из глина и известняка, оставшихся после пожара. Тем самым авторы показали, что возможно воссоздать исторические декоративные архитектурные элементы здания, не утратив своей аутентичности, и сохранив многовековую историю.	Керамическая рельефная плитка нового образца New Delft Blue представляет из себя отделочный фарфоровый образец размером 30x40x7 см. Один изразец объединил в себя труд архитекторов, дизайнеров, программистов. Такой отделочный материал сочетает в себе метод 3D-печати, компьютерные технологии и ручной труд. По завершению печати, плитки были покрыты глазурью глубокого синего цвета и подвержены обжигу.
Шаги 3D-прототипирования	1. Исторический анализ существующего здания по архивным данным и фото. 2. Анализ существующих строительных материалов (цвет, текстура, плотность). 3. Лазерное 3D-сканирование здания в высоком разрешении. 4. Получение облаков точек с последующей сшивкой в единую модель. 5. Моделирование здания при помощи 3DMax, Rhino и пользовательского программного плана Grasshopper. Создание детальной информационной модели с учетом всех деталей на фасаде. 6. При создании информационной модели учитывалась стабильность проектирования. 7. Прототипирование при помощи FDM-принтера с созданием точных пластиковых форм. Для поиска оптимальных решений по 3D-прототипированию на основе небольших напечатанных моделей. 8. Установка арматуры в полученную форму, изготовленную на 3D-принтере. 9. Заливка цементной смеси в напечатанную форму. 10. Анализ полученных пробных элементов с возможной корректировкой. 11. Изготовление итоговых фасадных элементов здания при помощи промышленного 3D-принтера Voxeljet VX1000 с учетом ранних пробных моделей.	1. Использование полного 3D-сканирования собора, сделанного американским профессором еще до пожара, в 2010 году. 2. Обследование здания после пожара с помощью дрона. 3. Autodesk создает 3D BIM-модель собора Парижской Богоматери в том виде, в котором он существовал до катастрофического события на основе захвата реальности (3D-сканирования и архивных фото). 4. Использование ПО Rescar для чтения лазерного сканирования. 5. Моделирование и детализация гаргульи, которую предполагается напечатать на 3D-принтере. 6. Сбор пепла, камня, известняка, золы с места пожара, для его дальнейшего использования в качестве основного материала для печати. 7. Символ старого материала и новых технологий. 8. Подбор процентного соотношения материалов, для получения необходимого оттенка будущего 3D-прототипа. 9. Измельчение собранного материала в однородную порошковую массу. 10. Печать гаргульи при помощи струйного 3D-принтера и технологии Binder jetting с последующим нанесением порошка. 11. Полученная гаргулья устойчива к погодным условиям и физическим воздействиям. Помимо этого на гаргулье видны слои с темным пеплом, которые оставляют легкое напоминание о произошедшем.	1. Анализ исторического центра города, к которому примыкает жилой комплекс PoortMeesters. Переосмысление культовых декоративных элементов и традиций изготовления фарфоровых плиток при помощи современных технологий. 2. Определение общей концепции нового здания в историческом центре. 3. Замер арочного проема в месте монтажа изразцов. 4. Разработка при помощи алгебраических расчетов основного синусоидального узора в 2-D форме, который, согласно концепции, напоминает форму листьев. 5. Разбивка основного узора на второстепенные составляющие, которые имитируют прожилки листьев. 6. Перенос 2-D узора в программу для 3-D моделирования. 7. Преобразование 2-D узора в рельефную модель с учетом необходимой глубины рельефа. 8. Наложение равномерной прямоугольной сетки на узор. 9. Детализация и корректировка плитки с учетом последующей усадки после обжига. 10. Печать глиняной смесью при помощи экструзионного манипулятора. 11. Ручное покрытие изразцов глазурью темного синего цвета с добавлением белой глазури на выпуклых частях плитки для увеличения глубины рельефа. 12. Обжиг плитки. 13. Монтаж плитки по всей площади арки.

Анализ мирового опыта в таблице 3 (см.табл.3) позволил сформировать алгоритм формирования информационной модели для дальнейшего 3д-прототипирования. Представленный алгоритм состоит из последовательных шагов, которые необходимо выполнить для создания организованной информационной модели. Данный алгоритм был разработан с целью предоставить архитекторам и проектировщикам структурированную методологию, способную сформировать качественную и грамотную информационную модель, готовую к передаче специалистам по 3д-печати.

Алгоритм состоит из 3 последовательных этапов: 1 этап-предпроектный анализ, 2 этап-лазерное сканирование, 3 этап-проектирование, моделирование.

2.1. Алгоритм формирования информационной модели архитектурного объекта капитального строительства для дальнейшего 3д-прототипирования

1 этап. Предпроектный анализ.

1.1. Исторический анализ.

Исторический анализ представляет из себя изучение архивов, чертежей, старых фотографий. На этом этапе необходимо выявить ценные исторические элементы, которые представляют общественно-культурную значимость, требующую сохранения и реставрации.

1.2. Техническое обследование. Дефектовка здания.

- Определение степени разрушения здания.
- Оценка технического состояния здания, а именно: несущие конструкции, фундамент, стены, балки, колонны и т.д.
- Фиксация деформаций при помощи фотографий, эскизов, текстовых заметок для дальнейшего формирования отчета.

- Анализ строительных материалов и их характеристик (цвет, текстура, плотность).

1.3. Постановка целей и задач проектирования. Определение общей концепции ревалоризации здания.

1.4. Определение элементов для 3д-печати.

Определение моделей, которые будут созданы при помощи 3-д принтера в соответствии с:

- историческим анализом;
- общей концепцией ревалоризации здания;
- экономическими возможностями;

1.5. Выбор типа принтера в зависимости от необходимого результата, габаритов 3д-прототипа. Выбор материала и его цвета.

2 этап. Лазерное сканирование и фотограмметрия.

- Сканирование существующего объекта при помощи технологий лазерного сканирования и фотограмметрии (при необходимости).

- Получение облака точек с лазерного сканера, учитывающий все особенности существующего объекта.

- Обработка полученных файлов их объединение в единую модель (склейка, сшивка).

3 этап. Проектирование, моделирование.

3.1. Экспорт облака точек.

- Экспорт облака точек в программу для его просмотра, например в программу autodesk Recap, которая позволяет перемещаться по существующему отсканированному зданию при помощи кнопок управления, в деталях просматривать сложные архитектурные узлы, останавливаться в определенных точках и на 360 градусов просматривать фотофиксацию вокруг одной точки. Также имеется возможность производить замеры с высокой точностью, без выезда на местность.

- После обработки облака точек происходит экспорт полученных данных захвата реальности в программу для 3д-проектирования, например в ПО Revit.

- Экспорт облака точек в виде связи в bim-программу. При помощи этого действия у архитекторов появляется возможность моделировать существующую сохранившуюся ситуацию, ориентируясь на отмасштабированную и скоординированную подложку в полутонах из облака точек.

3.2. Моделирование с учетом стадийности.

- На этом этапе происходит создание детализированной 3д-модели, учитывающей все особенности существующего объекта. Формирование геометрии архитектурной модели проводится с учетом стадий проектирования. Существует 3 основные стадии проектирования в bim-программах, отражающие определенные временные промежутки, а именно:

1 — существующая стадия, где отображаются элементы здания, которые сохранились до наших дней;

2 — стадия демонтажа, здесь видны те существующие конструкции и архитектурные части здания, которые будут подвержены сносу по разным факторам. К этим факторам можно отнести: аварийное и технически неудовлетворительное состояние конструкций, несоответствие существующей ситуации здания с концепцией реновации;

3 — стадия новой конструкции. На этой стадии архитектор моделирует новые элементы, к ним относятся и те части здания, которые в дальнейшем будут созданы при помощи 3д-принтера.

При необходимости, возможно видоизменять и создавать новые стадии, например стадия «Временная», куда можно отнести все временные поддерживающие конструкции, которые в будущем могут понадобиться во время 3д-печати либо при возведении напечатанных элементов.

- Моделирование утраченных исторических архитектурных элементов по архивным фото и аналогам.

- Создание универсальных параметрических семейств для оптимизации процесса моделирования повторяющихся элементов.

Все последующие стадии 3д-прототипирования, которые включают в себя загрузку информационной модели в ПО принтера, разработка поддерживающих конструкций (при необходимости), печать, постобработка финальной модели, предлагается осуществлять специалистам по 3д-прототипированию.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования были выявлены и проанализированы особенности 3д-печати, которые необходимо учитывать еще на стадии концепции и выбора типа принтера. Очевидно, что описанные в данной работе результаты по исследованию особенностей 3д-печати свидетельствуют о том, что в первую очередь необходимо учитывать следующее: материал печати, габариты прототипа, степень детализации, экологичность печати.

На основе мировой практики использования 3д-печати в архитектурном проектировании был сформирован общий алгоритм по созданию стандартизированной информационной модели для дальнейшего прототипирования, который состоит из 3-х последовательных этапов: предпроектный анализ, лазерное сканирование, проектирование, моделирование. Каждый из этапов представляет из себя совокупность шагов с подробным описанием. Данный алгоритм является общим руководством для архитекторов по воссозданию утраченных элементов и сохранению исторического облика здания.

Можно отметить тот факт, что алгоритм 3д-печати расширяет горизонт развития архитектурного проектирования объектов капитального строительства, где идея аутентичности реализации зданий подкрепляется инновационными технологиями.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Эминов Б.Ф., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.4.4>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Eminov B.F., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.61.4.4>

Список литературы / References

1. Мухаметрахимов Р.Х. Виды дефектов бетонов и растворов в технологии аддитивного строительного производства. / Р.Х. Мухаметрахимов, Л.В. Зиганшина // Известия КГАСУ. — 2024. — 1 (67). — С. 107–116. — DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.11
2. Иноземцев А.С. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве / А.С. Иноземцев, Е.В. Королёв, Т.Х. Зюнг // Вестник МГСУ. — 2018. — Т. 7. — Вып.118. — С. 863–876.
3. Баева Л.С. Современные технологии аддитивного изготовления объектов / Л.С. Баева, А.А. Маринин // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2014. — Т. 17. — № 1. — С. 7–12.
4. Зорин С. Технологии быстрого прототипирования / С. Зорин // ВЗРТ - Арсенал. — URL: http://www.vzrt.ru/rp_tec.php (дата обращения: 06.04.2025).
5. Winsun. Future of Construction. — URL: <https://futureofconstruction.org/case/winsun/> (accessed: 06.04.2025).
6. Назаров А.П. Перспективы быстрого прототипирования методом селективного лазерного спекания/плавления. / А.П. Назаров // Вестник МГТУ Станкин. — 2011. — № 4 (16). — С. 46–51.
7. DUS Architects — Public architecture and design that consciously influences everyday life. — URL: <http://houseofdus.com> (accessed: 06.04.2025).
8. Christ S. Fiber reinforcement during 3D printing / S. Christ [et al.] // Materials Letters. — 2015. — Vol. 139. — P. 165–168.
9. Пермяков М.Б. Аддитивные технологии в строительстве. / М.Б. Пермяков, А.Ф. Пермяков, А.М. Давыдова // European research. — 2017. — № 1 (24). — С. 14–15.
10. Дребезгова М.Ю. Современные аддитивные технологии в малоэтажном строительстве. / М.Ю. Дребезгова // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2017. — № 6. — С. 66–69.
11. RAP Challenging Architecture. — URL: <https://studiorap.nl/New-Delft-Blue> (accessed: 03.04.2025).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Muxametraximov R.X. Vidy' defektov betonov i rastvorov v texnologii additivnogo stroitel'nogo proizvodstva [Types of defects in concrete and mortars in 3D concrete printing (3DCP)]. / R.X. Muxametraximov, L.V. Ziganshina // News KSUAE. — 2024. — 1 (67). — P. 107–116. — DOI: 10.48612/NewsKSUAE/67.11 [in Russian]
2. Inozemtsev A.S. Analiz sushchestvuyushchikh tekhnologicheskikh reshenii 3D-pechati v stroitel'stve [Analysis of existing technological solutions for 3D printing in construction] / A.S. Inozemtsev, Ye.V. Korolev, T.Kh. Ziong // Vestnik MGSU [Bulletin MGSU]. — 2018. — Vol. 7. — Iss.118. — P. 863–876. [in Russian]
3. Baeva L.S. Sovremennye tekhnologii additivnogo izgotovleniya obektov [Modern technologies of additive manufacturing of objects] / L.S. Baeva, A.A. Marinin // Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Murmansk State Technical University]. — 2014. — Vol. 17. — № 1. — P. 7–12. [in Russian]
4. Zorin C. Tehnologii bystrogo prototipirovaniya [Technologies of rapid prototyping] / C. Zorin // VZRT - Arsenal. — URL: http://www.vzrt.ru/rp_tec.php (accessed: 06.04.2025). [in Russian]
5. Winsun. Future of Construction. — URL: <https://futureofconstruction.org/case/winsun/> (accessed: 06.04.2025).
6. Nazarov A.P. Perspektivy' by'strogo prototipirovaniya metodom selektivnogo lazernogo spekaniya/plavleniya [Prospects of rapid prototyping using the technique of selective laser sintering]. / A.P. Nazarov // Bulletin of the Moscow state technological University "STANKIN". — 2011. — № 4 (16). — P. 46–51. [in Russian]
7. DUS Architects — Public architecture and design that consciously influences everyday life. — URL: <http://houseofdus.com> (accessed: 06.04.2025).
8. Christ S. Fiber reinforcement during 3D printing / S. Christ [et al.] // Materials Letters. — 2015. — Vol. 139. — P. 165–168.
9. Permyakov M.B. Additivny'e tekhnologii v stroitel'stve [Additive Technologies In Construction]. / M.B. Permyakov, A.F. Permyakov, A.M. Davy'dova // European research. — 2017. — № 1 (24). — P. 14–15. [in Russian]
10. Drebezgova M.Yu. Sovremennyye additivny'e tekhnologii v maloe'tazhnom stroitel'stve [Modern Additive Technology In A Low-Rise Construction]. / M.Yu. Drebezgova // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov. — 2017. — № 6. — P. 66–69. [in Russian]
11. RAP Challenging Architecture. — URL: <https://studiorap.nl/New-Delft-Blue> (accessed: 03.04.2025).