

Урбанистика и городские системы <https://ugsjournal.ru>
Urban Studies and Urban Systems

2025, Том 2, № 1 / 2025, Vol. 2, Iss. 1 <https://ugsjournal.ru/issue-1-2025.html>

URL статьи: <https://ugsjournal.ru/PDF/01SAUG125.pdf>

2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности

Ссылка для цитирования этой статьи:

Абрамян, Ф. Т. Технологии 3D печати в архитектуре и строительстве: современное состояние и перспективы / Ф. Т. Абрамян // Урбанистика и городские системы. — 2025. — Т. 2. — № 1. — URL: <https://ugsjournal.ru/PDF/01SAUG125.pdf>.

For citation:

Abramyan Ph.T. 3D printing technologies in architecture and construction: current state and prospects. *Urban Studies and Urban Systems*. 2025;2(1): 01SAUG125. Available at: <https://ugsjournal.ru/PDF/01SAUG125.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 72.023

Абрамян Филипп Тигранович

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия
E-mail: philipp.pfur@inbox.ru

Технологии 3D печати в архитектуре и строительстве: современное состояние и перспективы

Аннотация. Аддитивное производство, основанное на технологиях трехмерной печати, в настоящее время формирует новый технолого-типологический уровень развития архитектурной и строительной отрасли, обеспечивая переосмысление принципов проектирования, формообразования и организации строительных процессов. Цель исследования заключается в обобщении и систематизации представлений о современных технологиях трехмерной печати и анализе возможностей их интеграции в архитектурную практику. На базе анализа научных публикаций предложена комплексная классификация ключевых технологий аддитивного производства, применяемых в архитектуре и строительстве, включая стереолитографию, моделирование плавлением и осаждением, селективное лазерное спекание, метод прямого письма чернилами и технологию связующего напыления. Особое внимание уделено трехмерной печати с использованием цементно-бетонных составов как наиболее перспективному направлению для крупномасштабного строительного производства и индустриализации строительных процессов. Показано, что сочетание параметрического проектирования, информационного моделирования зданий и роботизированных строительных комплексов создает выраженный синергетический эффект, позволяющий реализовать потенциал аддитивных технологий на этапах проектирования, подготовки производства и строительного монтажа. Экологический анализ подтверждает снижение расхода материалов и строительных отходов, уменьшение углеродного следа и соответствие принципам циклической экономики. Отмечены ключевые ограничения, связанные с нормативно-правовой неурегулированностью, недостаточной прогнозируемостью механических характеристик напечатанных конструкций, ограничениями качества поверхности и высокой капиталоемкостью технологического оборудования. Полученные результаты могут служить методологической основой для дальнейших исследований и разработки стратегий внедрения технологий трехмерной печати в архитектурно-строительную практику.

Ключевые слова: аддитивное производство; роботизированное строительство; цифровое моделирование; устойчивое строительство; экологически чистое строительство;

архитектурное прототипирование; крупноформатная 3D печать; автоматизация строительства; инновационные строительные технологии; цифровое производство

Введение

Строительная и архитектурная отрасли испытывают глубокие трансформационные изменения, вызванные цифровизацией, внедрением инновационных технологий и растущим спросом на устойчивые строительные решения [1]. Одной из наиболее перспективных инноваций является технология трёхмерной печати, или аддитивного производства. Эта технология кардинально трансформирует традиционные подходы к проектированию и возведению зданий, открывая новые возможности для реализации архитектурных идей и повышения эффективности строительных процессов.

Аддитивное производство представляет собой процесс создания трёхмерных объектов путём послойного нанесения материала до достижения готового изделия¹. В отличие от традиционных субтрактивных методов производства, при которых материал удаляется для получения необходимой формы, аддитивное производство строит объекты снизу вверх. Этот принципиальный подход открывает широкие возможности с точки зрения гибкости проектирования, эффективности использования материалов и скорости производства. Технология позволяет реализовывать сложные геометрические формы, органические структуры и инновационные конструкции, которые были бы экономически нецелесообразны при использовании традиционных методов строительства.

История развития 3D печати берёт своё начало в 1986 году, когда Чарльз Халл запатентовал стереолитографию — процесс, основанный на фотополимеризации². Данный метод позволял преобразовывать жидкие материалы в твёрдые полимеры при воздействии ультрафиолетового света. Это революционное изобретение заложило основу для развития различных техник 3D печати, которые затем нашли применение в аэрокосмической промышленности, медицине и производстве. За последние четыре десятилетия технология прошла путь от экспериментальной лабораторной техники к практическому инструменту, применяемому в промышленных масштабах. Развитие новых материалов, совершенствование аппаратного обеспечения и интеграция цифровых технологий способствовали расширению области применения 3D печати.

Мировой рынок 3D печати демонстрирует стремительный рост, отражающий растущее признание потенциала этой технологии. По прогнозам аналитических агентств, объём рынка достигнет приблизительно 98,31 миллиарда долларов США к 2032 году, в сравнении с 17,38 миллиардом долларов в 2022 году, что соответствует среднегодовому темпу роста в 18,92%. Эта позитивная динамика отражает растущие инвестиции в технологии аддитивного производства и расширение применения этих методов в различных секторах экономики. Строительная отрасль является одним из наиболее динамичных сегментов рынка аддитивного производства благодаря значительным преимуществам, которые может предоставить технология.

В строительстве и архитектуре 3D печать открывает беспрецедентные возможности для решения актуальных проблем отрасли. Технология позволяет реализовывать сложные геометрические формы, параметрические конструкции и органические формы, которые были

¹ 3D Printing Technologies in Architectural Design and Construction: A Systematic Literature Review // Buildings. — 2022. — Vol. 12, № 9. — Article 1319.

² 3D Concrete Printing: Recent Progress, Applications, Challenges, and Role in Achieving Sustainable Development Goals // Buildings. — 2023. — Vol. 13, № 4. — Article 924.

бы экономически нецелесообразны при использовании традиционных методов строительства. Применение аддитивного производства может способствовать сокращению сроков строительства, что является критической задачей в условиях дефицита жилого фонда. Кроме того, технология обеспечивает снижение затрат на рабочую силу благодаря автоматизации ряда строительных этапов, минимизацию отходов материалов и снижение воздействия на окружающую среду. Эти факторы в совокупности делают 3D печать привлекательной для решения современных архитектурных и строительных вызовов.

Несмотря на перспективность технологии, существуют значительные пробелы в знании и противоречия, требующие систематического анализа. Текущие строительные нормы и правила всё ещё находятся в процессе разработки для адаптации к 3D печатным конструкциям. Данные о долгосрочной надёжности и структурной устойчивости напечатанных элементов ограничены. Контроль качества и стандартизация процессов печати остаются проблемными областями. Первоначальные инвестиционные расходы на оборудование крупного масштаба остаются значительными. Эти факторы обуславливают необходимость комплексного исследования технологии 3D печати в контексте её архитектурного применения.

Целью настоящей работы является систематизация знаний о технологиях 3D печати в архитектуре и строительстве, анализ их применения, выявление перспектив развития и определение направлений дальнейших исследований. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи: (1) классифицировать основные технологии 3D печати и описать их характеристики в контексте архитектурного применения; (2) проанализировать преимущества и вызовы, связанные с внедрением 3D печати в архитектурной практике; (3) систематизировать знания о параметрическом дизайне и его интеграции с 3D печатью; (4) исследовать роль цифровых технологий, включая Building Information Modeling (BIM — Система информационного моделирования зданий) и роботизацию, в развитии аддитивного производства в строительстве; (5) оценить экологические и устойчивые аспекты 3D печати; (6) определить основные препятствия и перспективы развития технологии.

Материалы и методы

Настоящее исследование базируется на анализе современной научной литературы, посвящённой технологиям 3D печати в архитектуре и строительстве. Методологический подход включал систематизацию материала в соответствии с ключевыми аспектами применения технологии и её влияния на архитектурную практику. Исследование охватывает публикации, изданные преимущественно в период 2020–2024 годов, что обеспечивает фокус на современном состоянии и актуальных тенденциях в области.

Основные понятия, использованные в работе, определены следующим образом. Аддитивное производство понимается как совокупность технологий, позволяющих создавать физические трёхмерные объекты на основе цифровых моделей путём послойного нанесения материала. Технология 3D печати представляет собой практическую реализацию принципов аддитивного производства с использованием специализированного оборудования. Параметрический дизайн определяется как методология проектирования, при которой архитектурные элементы определяются посредством математических параметров и отношений между ними [1]. Building Information Modeling (BIM) рассматривается как комплексный подход к управлению информацией о строительных проектах на всех этапах их жизненного цикла [9]. Устойчивое развитие в контексте архитектуры связывается с минимизацией экологического воздействия, эффективностью использования ресурсов и социальной ответственностью строительной деятельности.

Методология анализа предусматривала классификацию технологий 3D печати по принципу действия, источнику энергии и типу обрабатываемого материала. Разработанная классификация позволила систематизировать информацию о различных технологических подходах и определить их специфические применения в архитектурной практике. В рамках анализа были рассмотрены публикации, содержащие описания реальных проектов и кейсов применения 3D печати, что обеспечило возможность оценки практической целесообразности и результативности технологии [2].

Источники информации включали научные статьи из рецензируемых журналов, таких как *Buildings*, *Sustainability*, *Urban Science* и *Advances in Civil Engineering*, а также препринты из архива arXiv (препринт-архив — специализированный репозиторий научных статей, предшествующих или параллельных их публикации в рецензируемых журналах), содержащие последние разработки в области. Обработка материала осуществлялась путём выявления ключевых тем, анализа аргументации авторов, сопоставления различных подходов и синтеза информации в единую систему знаний. Особое внимание уделялось выявлению противоречий между потенциалом технологии и реальными препятствиями на пути её внедрения.

Ограничения исследования связаны, прежде всего, с относительно молодостью технологии 3D печати в архитектуре и недостатком данных о долгосрочной производительности напечатанных конструкций. Кроме того, анализ фокусируется на англоязычной и русскоязычной научной литературе, что может не охватывать все значимые разработки, проводимые в других языковых регионах. Работа базируется на анализе открытых научных источников и не включает закрытые разработки коммерческих компаний. Наконец, исследование имеет описательный характер и не предусматривает проведение экспериментального валидирования представленных данных.

Результаты

На основании анализа научной литературы разработана комплексная классификация технологий 3D печати, применяемых в архитектурной практике. Классификация охватывает пять основных категорий технологий, каждая из которых обладает специфическими характеристиками, преимуществами и ограничениями [3].

Стереолитография (SLA — Stereolithography) является одной из первых и наиболее зарекомендовавших себя технологий 3D печати. В этом методе используется ультрафиолетовый свет для селективной полимеризации жидких фоточувствительных смол. Стереолитография обеспечивает высокую точность и мелкое разрешение, что делает её идеальной для создания детальных архитектурных моделей и прототипов. Однако скорость печати при данном методе остаётся относительно низкой, что ограничивает возможность применения SLA для полномасштабных строительных проектов. На основании анализа практического опыта выявлено, что стереолитография в настоящее время используется преимущественно для создания высокоточных архитектурных моделей и деталей на этапе проектирования.

Метод моделирования плавлением и осаждением (FDM — Fused Deposition Modeling) основан на непрерывной экструзии полимерной нити или пластиковых материалов через нагретый сопло. FDM является наиболее доступной и широко распространённой технологией 3D печати в образовательных и проектных организациях, что обусловило её популярность при создании архитектурных моделей в небольших масштабах. Относительно низкая стоимость оборудования и материалов делает FDM привлекательной для начальных этапов экспериментирования с 3D печатью. Данный метод используется преимущественно для

полимерных конструкций, что ограничивает его применение в полномасштабном строительстве, где требуются материалы с высокими механическими характеристиками.

Селективное лазерное спекание (SLS — Selective Laser Sintering) использует лазерные технологии для спекания порошковых частиц материала с целью построения трёхмерных объектов. Хотя этот процесс относительно медлен из-за поточечного сканирования лазером, он обеспечивает хорошую универсальность с точки зрения материалов и может работать со сложными геометрическими формами [4]. SLS позволяет использовать различные материалы, включая металлы и керамику, что расширяет спектр возможных архитектурных применений.

Прямое письмо чернилами (DIW — Direct Ink Writing) представляет собой продвинутую экструзионную технику, способную печатать вязкие чернила, включая концентрированные полимерные растворы и пасты. Системы DIW с несколькими соплами могут одновременно наносить различные материалы, что позволяет создавать многоматериальные конструкции с дифференцированными свойствами. Эта способность особенно ценна для архитектурных применений, требующих сочетания различных материалов с разными функциональными характеристиками.

Связующее напыление (Binder Jetting) представляет собой порошковую технику, относительно недорогую и способную создавать крупные архитектурные элементы. В качестве материалов могут использоваться металлы и керамика в порошкообразном виде. Хотя метод позволяет изготавливать крупные структуры без обширной опалубки, итоговые части обычно требуют постобработки, такой как спекание или жидкостная инфильтрация. Несмотря на необходимость дополнительной обработки, Binder Jetting демонстрирует значительный потенциал для создания архитектурных компонентов на полустроительных масштабах.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики основных технологий 3D печати в архитектуре

Технология	Материалы	Точность	Скорость	Масштабируемость	Основное применение
SLA	Полимеры	Очень высокая	Низкая	Ограниченная	Архитектурные модели
FDM	Полимеры	Средняя	Средняя	Ограниченная	Прототипы, малые модели
SLS	Полимеры, металлы	Высокая	Средняя	Средняя	Функциональные детали
DIW	Разные материалы	Средняя	Средняя	Средняя	Многоматериальные конструкции
Binder Jetting	Керамика, металлы	Средняя	Средняя	Средняя-высокая	Крупные элементы

Составлено автором

В таблице 1 представлено обобщённое сравнение основных технологий 3D печати по ключевым параметрам. Как видно из данных, каждая технология обладает специфическими преимуществами в отношении точности, скорости и масштабируемости. Выбор конкретной технологии зависит от конкретных требований проекта, включая требуемые размеры конструкции, материальные характеристики, бюджет и сроки реализации. На рисунке 1 представлено схематическое изображение процесса бетонной 3D печати, демонстрирующее интеграцию технологии в контексте строительного производства.



Рисунок 1. Бетонная 3D печать на строительной площадке: схема процесса
(автор Денис Якушев)

Иллюстрация показывает крупноформатный робот для 3D печати, установленный на строительной площадке. Робот выполняет послойное нанесение бетонной смеси, создавая конструкционные элементы здания. Видны завершённые слои с характерными следами, частично построенная конструкция и цифровая модель проекта в фоне. Изображение демонстрирует автоматизированный характер технологии и её применимость в полномасштабном строительстве.

Бетонная 3D печать, известная также как 3D печать цементных материалов (3DCP — 3D Concrete Printing), выделяется как особенно перспективная технология для строительной отрасли в целом [6]. Этот метод заключается в послойном нанесении бетонных смесей для построения как конструкционных, так и неконструкционных элементов зданий. В отличие от технологий печати полимерными материалами, бетонная печать позволяет работать с материалами, уже широко применяемыми в строительстве, что облегчает адаптацию технологии в архитектурной практике.

Анализ практического применения бетонной 3D печати выявил множество значительных преимуществ для строительной отрасли. На основании анализа исследований и реальных проектов установлено, что технология обеспечивает минимизацию материальных потерь, снижая отходы материалов на 20–90% в сравнении с традиционными методами литья [7]. Это достигается благодаря точному послойному нанесению материала, при котором бетон наносится исключительно в необходимых местах, исключая избыточные порции. Гибкость проектирования позволяет создавать сложные геометрические формы и произвольные конфигурации, которые практически невозможны при использовании обычных методов, требующих сложных и дорогостоящих опалубочных систем.

Ускорение строительных процессов представляет собой один из наиболее значимых факторов применения бетонной 3D печати. Технология способна значительно сократить сроки возведения в сравнении с классическим строительством благодаря автоматизированному процессу печати, который может работать непрерывно. Снижение трудозатрат достигается благодаря автоматизации ряда строительных этапов, что особенно ценно в условиях дефицита квалифицированной рабочей силы. Повышение экономической эффективности потенциально обеспечивается через механизм автоматизации и повышения производительности, хотя окончательные экономические расчёты требуют тщательного анализа для каждого конкретного проекта. Улучшение точности конструктивных элементов позволяет достичь высокого уровня соответствия проектным спецификациям, что улучшает общее качество строительных работ.

Вместе с тем, внедрение бетонной 3D печати сталкивается со значительными вызовами, требующими адресных решений. Текущие строительные нормы и правила всё ещё находятся в процессе разработки для адаптации к 3D печатным конструкциям, что создаёт правовую неопределённость для проектировщиков и строителей. Данные о долгосрочной надёжности и структурной устойчивости ограничены, поскольку технология относительно молода и полномасштабные здания из напечатанного бетона существуют ещё недолго. Контроль качества и стандартизация процессов печати остаются проблемными областями, поскольку отсутствуют унифицированные процедуры обеспечения качества. Первоначальные инвестиционные расходы на оборудование крупного масштаба остаются значительными, что ограничивает доступность технологии для небольших строительных компаний [2].

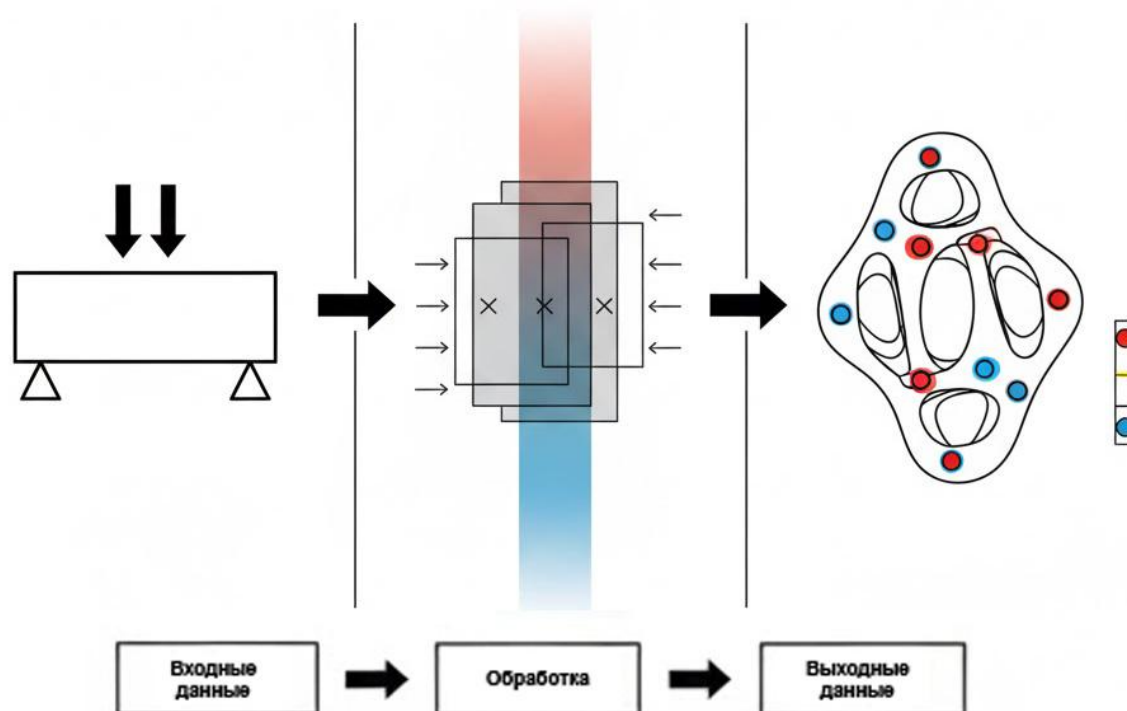
Параметрический дизайн представляет собой методологию проектирования, при которой архитектурные элементы определяются посредством математических параметров и отношений между ними, позволяя создавать динамичные и адаптивные конструкции [1]. Технология 3D печати особенно хорошо подходит для реализации принципов параметрического проектирования, позволяя архитекторам разрабатывать высокооптимизированные конструкции, которые откликаются на экологические условия, структурные требования и эстетические предпочтения [4]. Синергия между параметрическим проектированием и 3D печатью создаёт мощный инструмент для инновационной архитектурной практики.

Параметрический подход в сочетании с 3D печатью предоставляет несколько существенных преимуществ для архитектурного проектирования и строительства. Массовая кастомизация представляет собой ключевую возможность, так как технология позволяет создавать каждый архитектурный элемент с учётом конкретных требований без значительного увеличения затрат. Это особенно ценно при проектировании уникальных фасадов, внутренних компонентов или специализированных конструктивных элементов, которые могут быть изготовлены в соответствии с индивидуальными спецификациями. Быстрое макетирование и прототипирование позволяют архитекторам стремительно создавать физические модели своих проектов, что облегчает визуализацию концепций, коммуникацию с клиентами и итерационное совершенствование конструкции до перехода к полномасштабному производству.

Оптимизация ресурсов достигается благодаря тому, что параметрические алгоритмы могут автоматически минимизировать использование материалов, снижать нагрузки на конструкции и оптимизировать распределение силовых потоков, что особенно важно в контексте устойчивого развития [6].

Как показано в исследованиях, по всему миру реализуются архитектурные проекты, успешно интегрирующие технологию 3D печати в сочетании с параметрическим проектированием, что демонстрирует жизнеспособность и практический потенциал этого подхода. Одним из наиболее значительных примеров является построение жилых зданий полностью с использованием бетонной 3D печати. Эти проекты продемонстрировали возможность существенного сокращения сроков строительства и объёмов ручного труда в сравнении с обычными методами. Следующим этапом развития применения технологии стала реализация проектов с адаптивными фасадными элементами. Фасадные элементы успешно создаются с помощью 3D печати, включая адаптивные фасады, реагирующие на условия окружающей среды, такие как солнечная радиация и погодные явления [4]. Эти конструкции демонстрируют, как параметрический дизайн в сочетании с 3D печатью может обеспечивать функциональность и эстетику одновременно. Несущие стены, колонны и другие конструкционные компоненты были успешно напечатаны с использованием бетона и иных материалов, подтверждая способность технологии к применению в критически важных конструкционных элементах, требующих высоких механических характеристик.

На рисунке 2 представлена визуализация параметрического алгоритма, используемого для оптимизации архитектурных форм в сочетании с 3D печатью.



*Рисунок 2. Параметрическая оптимизация архитектурных форм для 3D печати
(Составлено автором).*

Иллюстрация демонстрирует трансформацию архитектурной формы на основе параметрических алгоритмов. Слева показана исходная геометрия; в центре — процесс параметрической оптимизации с указанием ключевых параметров (нагрузки, граничные условия, ограничения материала); справа — оптимизированная форма, готовая к 3D печати. Цветовое кодирование показывает распределение напряжений и интенсивности материала.

Обсуждение

Интеграция 3D печати с современными цифровыми технологиями представляет собой критически важное направление развития, обеспечивающее реализацию полного потенциала аддитивного производства в архитектуре. Building Information Modeling (BIM — Система информационного моделирования зданий) представляет собой комплексный подход к управлению информацией о строительных проектах на всех этапах их жизненного цикла, от концепции до демонтажа [9]. Интеграция BIM с 3D печатью создаёт мощный инструмент для архитекторов и инженеров, обеспечивающий беспрецедентный уровень координации и точности в строительных проектах.

BIM-модели содержат детальную информацию о каждом элементе здания, включая его геометрические параметры, материальные характеристики и отношения с другими компонентами. При сочетании с технологией 3D печати эта информация может быть непосредственно преобразована в инструкции для управления печатающим оборудованием [6]. Таким образом, цифровой проект превращается в физическую конструкцию без промежуточных ручных этапов обработки информации. Цифровые двойники зданий, созданные на основе BIM, позволяют проводить виртуальное моделирование всего процесса строительства ещё до начала физического возведения. Это обеспечивает выявление потенциальных конфликтов проектирования, несовместимостей между различными системами и возможность их разрешения на ранних стадиях, когда стоимость корректировок минимальна. Таким образом, модель BIM служит не только документом проекта, но и инструментом оптимизации всего строительного процесса.

Роботизированные системы трансформируют возможности 3D печати в строительстве благодаря своей способности обеспечивать высокую точность и повторяемость операций. Автономные роботы, контролируемые BIM-моделями, могут выполнять точные операции печати с высокой степенью повторяемости и надёжности [10]. Модульные роботизированные системы демонстрируют особенно многообещающие результаты, позволяя быстро адаптировать оборудование к конкретным требованиям строительной задачи. Интеграция модульных робот-компонентов с BIM обеспечивает безшемную адаптацию к специфичным запросам каждого проекта [11]. Человеко-ориентированные робототехнические решения, где роботы не заменяют человеческих рабочих, а оказывают им поддержку, показывают значительный потенциал для повышения производительности при сохранении занятости и включительности трудовых процессов [12]. Такой подход соответствует социально ответственному развитию технологии и обеспечивает плавный переход к новым производственным методам.

На рисунке 3 показана интеграция BIM-модели с роботизированной системой 3D печати.

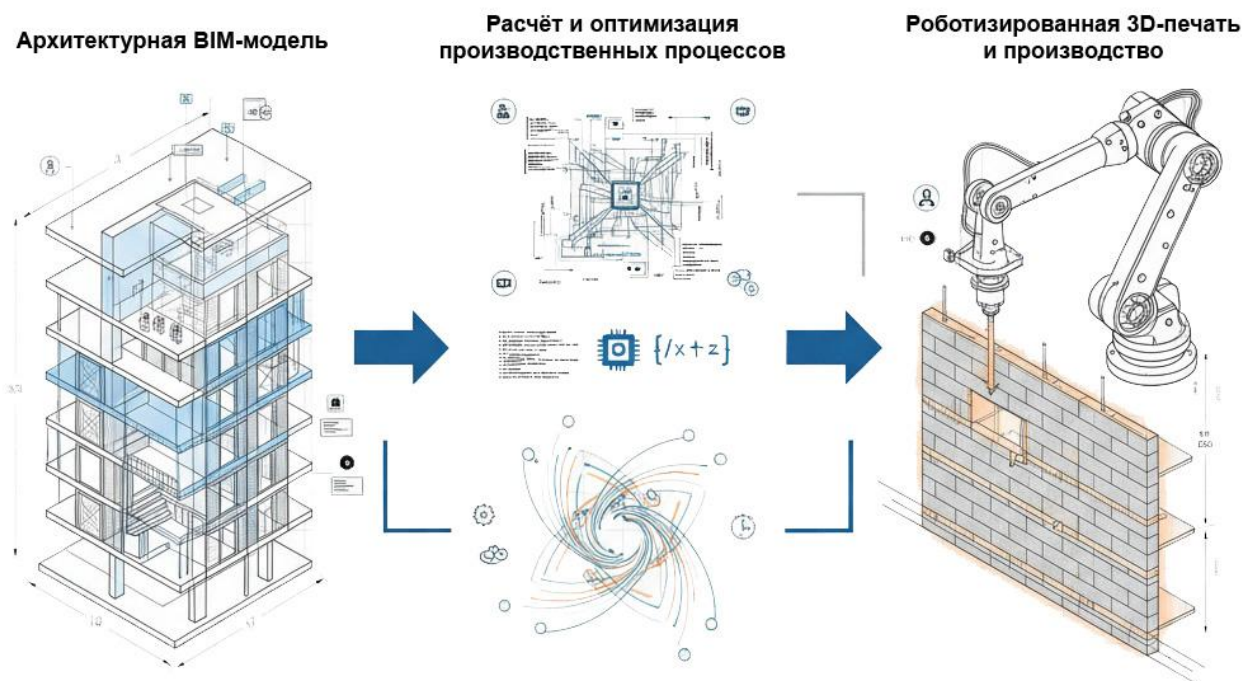


Рисунок 3. Интеграция BIM и роботизированной 3D печати
(Составлено автором).

Схема демонстрирует цифровой поток информации от BIM-модели к робототехнической системе. Слева — трёхмерная BIM-модель здания с детальной информацией об элементах; в центре — процесс трансформации данных и генерации траекторий печати; справа — роботизированная система, выполняющая печать в соответствии с цифровыми инструкциями. Стрелки показывают обратную связь и мониторинг процесса.

Технология 3D печати предлагает существенные экологические преимущества, которые соответствуют целям устойчивого развития и современным требованиям к снижению углеродного следа строительной деятельности [6]. На основании анализа исследований выявлено, что посредством нанесения материала исключительно в необходимых местах, 3D печать минимизирует отходы в сравнении с субтрактивными производственными процессами. Исследования показывают значительное сокращение потребления материалов, варьирующееся от 20 % до 90 % в зависимости от специфики применения [7]. Более того, автоматизированные процессы 3D печати могут быть более энергоэффективны, чем традиционные строительные методы, особенно если учитывать снижение потребности в транспортировке рабочих и уменьшение требуемого на месте строительства оборудования.

Применение аддитивного производства активно поддерживает принципы циклической экономики посредством ряда взаимодополняющих механизмов. Технология позволяет интегрировать переработанные материалы и промышленные отходы в бетонные смеси, поддерживая ресурсную эффективность и снижая спрос на первичные материалы [13]. Точное материальное нанесение сокращает конструкционные отходы в сравнении с традиционными методами литья, что имеет долгосрочное положительное воздействие на окружающую среду. Возможность создания модульных компонентов, подлежащих замене, улучшает возможность восстановления материалов и способствует удлинению жизненного цикла зданий. Концепция восстановления и повторного применения материалов получает новые возможности с развитием технологий 3D печати, открывая путь к более циклической архитектурной практике [2].

Несмотря на значительный потенциал, 3D печать в архитектуре сталкивается с рядом серьёзных технических проблем, требующих адресных решений. Качество поверхности 3D печатных конструкций часто проявляет видимые следы слоёв и неправильности поверхности, требующие последующей обработки или отделки [8]. Это означает, что напечатанные элементы могут потребовать дополнительных операций шлифования, обработки или оштукатуривания для достижения желаемого финального внешнего вида, что частично нивелирует экономию времени на печати. Механические характеристики напечатанного бетона могут отличаться от традиционно отливаемого бетона, в частности с учётом растягивающей прочности и долговечности при воздействии экологических факторов. Данные о долгосрочной производительности всё ещё накапливаются в процессе расширенного внедрения технологии, что создаёт неопределённость при планировании долгосрочной эксплуатации зданий [3].

Масштабирование и скорость остаются значительными проблемами для практического применения технологии. Несмотря на совершенствование скоростей печати, полномасштабные архитектурные проекты всё ещё требуют значительных временных инвестиций. Масштабирование печатающей технологии для конструкций строительного размера остаётся сложной инженерной задачей, требующей разработки новых подходов к управлению производством и контролю качества. Диапазон подходящих для архитектурной 3D печати материалов остаётся ограниченным, что ограничивает проектные и прикладные возможности [6]. Хотя исследования в области новых материалов активно развиваются, в практической архитектурной работе по-прежнему применяется относительно узкий набор материалов.

На основании анализа литературы установлено, что строительная индустрия опирается на комплексные коды и стандарты, обеспечивающие безопасность и надёжность, однако действующие строительные коды и стандарты конструирования не в полной мере учитывают 3D печатные конструкции, создавая правовые и нормативные препятствия для широкого внедрения [4]. Инженеры и архитекторы должны ориентироваться в неясных нормативных рамках при проектировании 3D печатных конструкций, поскольку большинство существующих кодексов не содержат явных указаний на технологии аддитивного производства. Стандартизированные процедуры тестирования и протоколы обеспечения качества для архитектурных элементов, произведённых методом 3D печати, всё ещё находятся в стадии разработки [10]. Это означает, что каждый новый проект требует специальных согласований с органами надзора и разработки индивидуальных протоколов тестирования.

Проведённый анализ позволяет интерпретировать текущее состояние 3D печати в архитектуре как находящееся на переломном этапе развития. Технология продемонстрировала свою техническую целесообразность через множество успешных проектов по всему миру. Одновременно с этим выявленные вызовы — нормативная неопределённость, технические ограничения и значительные начальные инвестиции — демонстрируют, что широкое масштабное внедрение технологии требует координированных усилий всех заинтересованных сторон, включая исследователей, практиков, нормотворцев и финансовые институты. Практическое значение проведённого анализа состоит в систематизации знаний о технологии для архитекторов и инженеров, которые могут использовать эту информацию при принятии решений о целесообразности применения 3D печати в конкретных проектах.

Заключение

Технология 3D печати представляет собой значительное инновационное достижение в архитектурной и строительной практике, предлагая замечательные возможности для архитектурных экспериментов, повышения производительности и реализации стратегий устойчивого развития. В процессе исследования была осуществлена систематизация знаний о

технологиях 3D печати в архитектуре и строительстве, проведён анализ их преимуществ и ограничений, а также определены ключевые направления развития.

На основании анализа установлено, что технология продемонстрировала свою техническую целесообразность через множество успешных проектов по всему миру и продолжает развиваться в ускоренном темпе. Основные выводы исследования заключаются в следующем: (1) классификация и анализ различных технологий 3D печати выявили, что наиболее перспективной для архитектурного применения является бетонная 3D печать, обеспечивающая сочетание масштабируемости, материальной совместимости и экономической эффективности; (2) интеграция параметрического проектирования, BIM-технологий (Система информационного моделирования зданий) и роботизированных систем создаёт мощный синергетический эффект, позволяющий реализовать полный потенциал аддитивного производства в строительстве; (3) 3D печать предоставляет значительные экологические преимущества, поддерживая принципы циклической экономики и снижение углеродного следа строительной деятельности.

Однако широкое внедрение 3D печати в архитектуру сталкивается со значительными препятствиями, включая неопределённость в нормативных рамках, технические ограничения в отношении качества поверхности и механических характеристик, а также экономические вызовы, связанные с начальными инвестициями в оборудование. Преодоление этих барьеров требует координированных усилий архитекторов, инженеров, строительных специалистов, законодателей и исследователей, работающих в направлении разработки единых стандартов, совершенствования технологии и демонстрации экономической целесообразности применения 3D печати.

Перспективы 3D печати в архитектуре являются многообещающими. По мере совершенствования технологии, обновления строительных кодексов и снижения стоимости оборудования, 3D печать должна становиться всё более неотъемлемой компонентой архитектурной практики. Потенциал этой технологии в разрешении современных вызовов — от дефицита жилого фонда до требований по устойчивости и необходимости более эффективных методов строительства — делает её критической областью концентрации усилий для профессионального сообщества в области построенной среды. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на разработке стандартизированных практик, совершенствовании материалов и процессов печати, изучении долгосрочной производительности напечатанных конструкций и интеграции новых технологий искусственного интеллекта (ИИ — технология, позволяющая компьютерным системам выполнять задачи, требующие человеческого интеллекта) и интернета вещей (IoT — Internet of Things, система подключённых устройств, обменивающихся данными). Координированное сотрудничество между различными заинтересованными сторонами будет существенно для полной реализации потенциала аддитивного производства в архитектуре и строительстве в ближайшем десятилетии

ЛИТЕРАТУРА

1. Di Salvo S. Insights into New Trends and Contemporary Challenges in 3D Printing in Architectural Sector / S. Di Salvo // Engineering Innovations. – 2024. – Т. 8. – С. 43–61. – URL: <https://doi.org/10.4028/p-vpn0le>.
2. Prasittopin L. How 3D Printing Technology Makes Cities Smarter: A Review, Thematic Analysis, and Perspectives / L. Prasittopin // Urban Science. – 2024. – Т. 7, № 6. – URL: https://www.researchgate.net/publication/385739928_How_3D_Printing_Technology_Makes_Cities_Smarter_A_Review_Thematic_Analysis_and_Perspectives.
3. Al-Nfmimi A.K. Framework of 3D Concrete Printing Potential and Challenges / A.K. Al-Nfmimi, H.H. Alqamish, A. Khaldoune, H. Alhaidary // Buildings. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 827.
4. Li Z. Fresh and Hardened Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Cementitious Materials: A Review / Z. Li, M. Hojati, Z. Wu, J. Piasente // Sustainability. – 2020. – Т. 12, № 14. – С. 5628.
5. Fonseca M.M. 3D Construction Printing Standing for Sustainability and Circularity: Material-Level Opportunities / M. Fonseca, A.M. Matos // Buildings. – 2023. – Т. 13, № 2. – С. 24–41.
6. Khosravani M.R. Large-Scale Automated Additive Construction: Overview, Robotic Solutions, Sustainability, and Future Prospect / M.R. Khosravani, A. Haghighi // Sustainability. – 2022. – Т. 14, № 15. – С. 9782.
7. Rodriguez J.F. Implementation of BIM Virtual Models in Industry for the Graphical Coordination of Engineering and Architecture Projects / J.F. Rodriguez // Buildings. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 743.
8. Ning X. 3D Printing in Construction: Current Status, Implementation Hindrances, and Development Agenda / X. Ning, T. Liu, C. Wu, C. Wang // Advances in Civil Engineering. – 2021. – Т. 2021. – С. 6665333.
9. Külz J. Holistic Construction Automation with Modular Robots: From High-Level Task Specification to Execution / J. Külz, M. Terzer, M. Magri, A. Giusti // arXiv preprint. – 2024. – arXiv:2412.20867.
10. Yu H. Cloud-Based Hierarchical Imitation Learning for Scalable Transfer of Construction Skills from Human Workers to Assisting Robots / H. Yu, V.R. Kamat, C.C. Menassa // arXiv preprint. – 2023. – arXiv:2309.11619.
11. Tay Y. 3D printing trends in building and construction industry: a review / Y.W.D. Tay, B. Panda, S.C. Paul, N.A. Noor Mohamed, M.J. Tan, K.F. Leong // Virtual and Physical Prototyping. – 2017. – Т. 12, № 3. – С. 261–276. – URL: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>.
12. Jipa A. 3D Printed Formwork for Concrete: State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications / A. Jipa, B. Dillenburger // Materials. – 2021. – Т. 14, № 18. – С. 5244. – DOI: [10.1089/3dp.2021.0024](https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0024).
13. Asaf O A 3D Printing Platform for Design and Manufacturing of Multi-Functional Cementitious Construction Components and Its Validation for a Post-Tensioned Beam / O. Asaf, A. Bentur, O. Amri, P. Larionovsky, O.Y. Meyuhas, E. Michli, A. Sprecher // Materials. – 2024. – Т. 17, № 18. – С. 4653. – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/18/4653>.

Abramyan Philipp Tigranovich

Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia
E-mail: philipp.pfur@inbox.ru

3D printing technologies in architecture and construction: current state and prospects

Abstract. Additive manufacturing, grounded in three-dimensional printing technologies, currently forms a new technological-typological level of development in the architectural and construction industry, enabling a reconceptualization of design principles, morphogenesis, and the organization of construction processes. The objective of this research is to synthesize and systematize contemporary understandings of three-dimensional printing technologies and to analyze the potential for their integration into architectural practice. Based on a comprehensive analysis of scientific literature, a multifaceted classification of key additive manufacturing technologies applied in architecture and construction is proposed, encompassing stereolithography, fused deposition modeling, selective laser sintering, direct ink writing, and binder jetting. Particular emphasis is placed on three-dimensional printing utilizing cement-based and concrete compositions as the most promising avenue for large-scale construction production and the industrialization of building processes. The study demonstrates that the synergistic integration of parametric design, building information modeling, and automated construction systems produces a pronounced synergetic effect, enabling the realization of the full potential of additive technologies at the stages of design, production planning, and construction assembly. Environmental analysis confirms the reduction of material consumption and construction waste, the diminution of the carbon footprint, and alignment with circular economy principles. Key limitations are identified, encompassing regulatory and legal insufficiencies, inadequate predictability of mechanical properties of printed structures, constraints on surface quality, and the capital intensity of technological equipment. The findings presented serve as a methodological foundation for further research and the development of implementation strategies for three-dimensional printing technologies in architectural and construction practice.

Keywords: additive manufacturing; robotic construction; digital modeling; sustainable construction; eco-friendly construction; architectural prototyping; large-scale 3D printing; construction automation; innovative construction technologies; digital manufacturing