

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/06SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS226 (<https://doi.org/10.15862/06SATS226>)

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Арутюнян, Л. А. Аддитивные технологии в строительстве: анализ потенциала и ограничений цифрового производства (Обзор) / Л. А. Арутюнян, Н. Я. Цимбельман, Т. И. Чернова, Е. С. Исаева // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/06SATS226.

For citation:

Arutiunian L.A., Tsimbelman N.Ya., Chernova T.I., Isaeva E.S. Additive technologies in construction: analysis of the potential and limitations of digital fabrication. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 06SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/06SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/06SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК (681.6-3+69.001.5) (691.32)

Арутюнян Левон Анушаванович

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия

Аспирант

E-mail: Levon825988@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0568-5416>

Цимбельман Никита Яковлевич

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия

Департамент геоинформационных технологий

Директор, профессор

Доктор технических наук

E-mail: tsimbelman.nya@dvfu.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=469683

Чернова Татьяна Игоревна

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия

Доцент

E-mail: chernova.ti@dvfu.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=858744

Исаева Екатерина Сергеевна

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия

Аспирант

E-mail: isaeva.es@dvfu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0365-8505>

**Аддитивные технологии в строительстве:
анализ потенциала и ограничений цифрового
производства (обзор)**

Аннотация. Интеграция технологий трёхмерной печати и фрезерования в строительную отрасль существенно трансформирует текущую архитектурную практику, расширяя границы формообразования и изменяя логику проектирования. В статье представлен комплексный анализ применения аддитивных и субтрактивных технологий в строительстве, раскрыта их роль в реализации конструкций со сложной геометрией и индивидуализированных архитектурных компонентов. В рамках статьи авторами выявлено, что цифровое моделирование в сочетании с

трёхмерной печатью и фрезерованием с числовым программным управлением позволяет сместить акцент с традиционной строительной целесообразности на пространственно-планировочные и композиционные решения, обеспечивая при этом высокую точность изготовления и снижение материалоемкости в реальных строительных условиях.

Особое внимание уделено оценке гибкости проектирования, параметрической оптимизации форм и эффективности использования ресурсов. Вместе с тем в работе систематизированы ключевые барьеры, сдерживающие масштабную интеграцию данных технологий: ограничения, обусловленные свойствами строительных материалов, необходимость оптимизации траекторий инструмента, высокая капиталоемкость оборудования, а также вопросы экономической обоснованности и нормативного регулирования.

На основе анализа реализованных проектов и современных научных исследований сформулированы выводы о потенциале трёхмерной печати и фрезерования в переосмыслении строительных процессов и обеспечении устойчивого развития отрасли. Результаты исследования позволяют структурировать существующие проблемы и определить направления дальнейших разработок, направленных на более эффективную интеграцию цифрового производства в архитектурно-строительную практику.

Ключевые слова: трёхмерная печать бетона; аддитивные строительные технологии; цифровое производство в строительстве; роботизированное строительство; интеграция армирования; параметрическое проектирование; ресурсная эффективность; устойчивое строительство; цифровое моделирование конструкций

Введение

Развитие вычислительных методов проектирования и технологий цифрового производства в последние десятилетия существенно трансформирует процессы архитектурного проектирования и строительства. Появление вычислительных методов проектирования, параметрического моделирования и роботизированных систем изготовления привело к формированию новой модели архитектурного производства, в которой геометрическая сложность объектов перестаёт быть ограничивающим фактором. Использование алгоритмических методов формообразования позволяет архитекторам разрабатывать адаптивные и оптимизированные конструкции, учитывающие структурные, функциональные и экологические требования на ранних этапах проектирования [1; 2].

Одним из ключевых факторов данной трансформации является развитие технологий цифрового производства (digital fabrication), включая аддитивные и субтрактивные методы изготовления архитектурных элементов. В частности, технология трёхмерной печати бетона (3D Concrete Printing, 3DCP) и ЧПУ-фрезерование (CNC milling) рассматриваются как перспективные инструменты автоматизации строительных процессов и повышения материальной эффективности конструкций. Эти технологии позволяют реализовывать геометрически сложные архитектурные формы и без использования традиционной опалубки, снижать объём строительных отходов и обеспечивать высокую точность изготовления элементов [3].

Параметрическое проектирование, основанное на вычислительных алгоритмах, играет важную роль в развитии данных технологий, поскольку позволяет интегрировать процессы геометрического моделирования и цифрового производства в единую проектную среду. Программные инструменты, такие как Rhino и Grasshopper, обеспечивают возможность формирования сложных параметрических моделей, в которых геометрические параметры связаны с конструктивными и технологическими характеристиками объекта [4]. Такой подход позволяет оптимизировать распределение материала, анализировать конструктивное поведение элементов и формировать производственные данные непосредственно из цифровой модели [5].

Несмотря на значительный потенциал цифрового производства, его внедрение в архитектурно-строительную практику сопровождается рядом технологических и организационных ограничений [6]. Современные исследования указывают на существование нескольких ключевых барьеров, включая ограниченный спектр материалов, пригодных для аддитивного строительства, сложности интеграции армирования в 3D-печатные бетонные конструкции, а также проблемы межслойной адгезии и структурной надёжности печатных элементов. Дополнительным фактором является недостаточная интеграция процессов цифрового проектирования и производственных технологий, что приводит к разрыву между экспериментальными исследованиями и их практическим применением в строительстве.

Предварительный анализ научной литературы показывает, что большинство исследований сосредоточено на отдельных аспектах цифрового производства — разработке материалов для аддитивной печати, алгоритмах параметрического проектирования или оптимизации производственных процессов. Однако системная интеграция этих компонентов в единую архитектурно-строительную производственную систему остаётся ограниченной. Это приводит к ситуации, при которой многие экспериментальные разработки демонстрируют высокую технологическую эффективность в лабораторных условиях, но сталкиваются с трудностями при масштабировании в реальных строительных проектах [7]. В области цифрового проектирования значительное внимание уделяется автоматизации параметрического моделирования конструкций, что позволяет формировать производственные данные непосредственно из цифровой модели [8].

В связи с этим возникает необходимость в систематизации существующих исследований и выявлении ключевых направлений развития технологий цифрового производства в архитектуре.

Целью настоящего исследования является систематический обзор научных публикаций, посвящённых применению аддитивных и субтрактивных технологий в архитектурно-строительной практике, с целью выявления основных технологических возможностей, ограничений и перспектив их дальнейшего развития.

Для достижения поставленной цели в работе рассматриваются следующие задачи:

1. Анализ ключевых исследований, посвящённых технологиям 3D-печати бетона и цифрового производства архитектурных элементов.
2. Выявление основных технологических барьеров, препятствующих масштабному внедрению аддитивных строительных технологий.
3. Систематизация современных подходов к интеграции цифрового проектирования, материаловедения и роботизированного производства в архитектуре.

Таким образом, исследование направлено на формирование целостного представления о современном состоянии технологий цифрового архитектурного производства и выявление перспективных направлений их развития в контексте устойчивого строительства.

1. Методология исследования

Настоящее исследование выполнено в формате систематического обзора научной литературы (Systematic Literature Review, SLR), направленного на выявление ключевых направлений развития технологий цифрового производства в архитектуре и строительстве.

Отбор публикаций осуществлялся на основе их релевантности следующим направлениям:

- аддитивные строительные технологии (3D Concrete Printing);
- цифровое проектирование и параметрическое моделирование;

- роботизированные методы изготовления архитектурных конструкций;
- интеграция материаловедения и цифрового производства.

Поиск научных источников был проведён с использованием международных академических баз данных, включая Web of Science, Scopus и Google Scholar. Для структурирования исследовательского поля был использован библиометрический анализ, выполненный с применением платформы Research Rabbit. Библиометрическая сеть позволила выявить ключевые публикации, формирующие научный дискурс в области цифрового производства, а также установить взаимосвязи между исследованиями и основными тематическими кластерами.

Анализ взаимосвязей между публикациями позволяет определить основные направления развития исследований, включая:

- стратегии армирования 3D-печатных конструкций;
- алгоритмы планирования траекторий печати;
- интеграцию цифрового проектирования и производственных процессов;
- устойчивость и ресурсную эффективность аддитивного строительства.

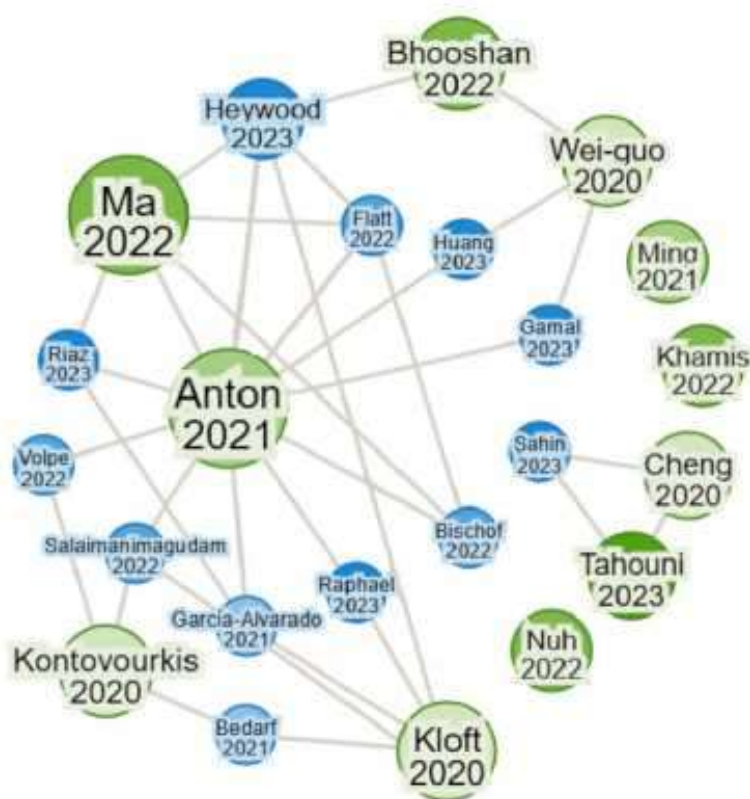


Рисунок 1. Библиометрическая сеть, полученная на основе анализа публикаций (рисунок создан авторами при помощи онлайн ресурса «Research Rabbit»)

На рисунке 1 показана библиометрическая сеть, полученная в результате структурированного поиска литературы с использованием платформы Research Rabbit. Она отражает взаимосвязи между ранее сформировавшимся массивом научных работ и 25 новыми исследованиями, опубликованными в течение последних пяти лет. Узлы сети обозначены именами первых авторов, что позволяет получить общее представление о ключевых исследователях и формирующихся научных тенденциях в данной сфере.

Применение библиометрического подхода служит основой для формирования теоретической рамки настоящего исследования, обеспечивая структурированный анализ ключевых понятий, взаимосвязей и эволюционирующих подходов в литературе по совместному производству общественных услуг. Анализируя данные взаимосвязанные исследования, авторы стремятся сформировать устойчивую аналитическую модель, отражающую как теоретические достижения, так и практические импликации в данной области.

2. Обсуждение исследовательской модели

В центральной части блок-схемы, наиболее связанным и цитируемым исследованием является работа *A 3D Concrete Printed Tower* [9], которая служит опорной точкой теоретического фундамента данного исследования. Проект башни *Tor Alva*, реализованный исследовательскими группами ETH Zürich совместно с фондом Origen, представляет собой пример интеграции 3D-печати бетоном в несущие конструкции здания. Башня высотой 30 м возведена в деревне Мулеш (Граубюнден, Швейцария) и является первым многоэтажным сооружением с несущими 3D-печатными колоннами.

С точки зрения параметрического проектирования проект демонстрирует принципиальное расширение формообразовательных возможностей: ветвящиеся колонны с разрешением 8 мм не могут быть воспроизведены традиционными опалубочными методами. Конструктивная система из 41 сборного элемента на сухих соединениях обеспечила точность сопряжений на субмиллиметровом уровне — результат, достигнутый адаптацией техники *match-casting* из практики сборных мостов.

В части интеграции армирования авторы реализовали трёхслойный подход: наружный слой формирует орнаментальную текстуру, средний — размещает поперечную арматуру, внутренний — создаёт каналы для продольного армирования [9]. Это решение непосредственно адресует барьер, систематизированный в настоящем исследовании: совмещение конструктивной функции и точности изготовления.

Ресурсная эффективность обеспечена отказом от ненесущей опалубки: авторы прямо констатируют расточительность использования высококачественного 3DCP-материала исключительно в качестве потерянной опалубки. Стратегия сборки/разборки с последующим переносом башни верифицирует тезис о потенциале аддитивных технологий в циркулярном строительстве.

Данное исследование является ключевой точкой отсчёта для настоящей работы, поскольку в нём концентрируются основные вопросы цифрового производства в архитектуре — прежде всего интеграция проектного интеллекта с характеристиками материалов и точностью изготовления. Опираясь на этот прецедент при формировании методологического подхода, авторы подчёркивают необходимость междисциплинарных рамок, выходящих за пределы традиционного разделения процессов проектирования и строительства.

Проблемы, обозначенные Anton A. et al., такие как сложность стратегий армирования и требования к высокому разрешению изготовления, напрямую соотносятся с тематикой нашего исследования, посвящённого рабочим процессам ЧПУ-фрезерования и 3D-печати. Это подтверждает важность разработки адаптивных, ориентированных на эксплуатационные характеристики стратегий цифрового производства как ключевого направления устойчивых архитектурных инноваций.

Вторая по числу цитирований работа — *Technology Readiness: A Global Snapshot of 3D Concrete Printing* — вносит вклад в данное исследование за счёт структурированной концепции, основанной на уровнях технологической готовности (Technology Readiness Levels, TRL) [10].

Систематический анализ 430 публикаций в базе Web of Science (1997–2021) фиксирует структурный дисбаланс в исследовательской повестке: 80 % работ сосредоточено на материалах, 10 % — на процессах, 9 % — на программном обеспечении, и лишь 1 % — на интеграции технологии в здание [10].

Этот дисбаланс непосредственно объясняет разрыв между лабораторными достижениями и масштабным строительным применением, систематизированный в настоящем исследовании.

Уровень технологической готовности (TRL) 3DCP определён авторами на отметке 6–7 по девятибалльной шкале NASA. Для перехода к TRL 8–9 идентифицированы четыре фронта: материалы, процесс, программное обеспечение и строительная интеграция. Последнее направление остаётся наиболее критическим барьером: допуски геометрической точности 3DCP-компонентов пока не соответствуют требованиям совместимости с существующими строительными системами.

Принципиально важен вывод об операторной зависимости технологии: большинство практических применений по-прежнему опирается на экспертный опыт, а не на формализованные протоколы контроля качества. Это напрямую ограничивает масштабируемость, обозначенную в аннотации настоящей работы как ключевой исследовательский вопрос.

Нормативный барьер также верифицирован: отсутствие кодов структурного проектирования для 3D-печатного бетона, включая требования по надёжности и долговечности, блокирует переход от экспериментальных объектов к серийному строительству. Вопрос устойчивости остаётся дискуссионным — данные о реальном экологическом эффекте 3DCP в сравнении с традиционным производством противоречивы и требуют дальнейшей верификации.

Интеграция данного источника в настоящее исследование позволяет углубить понимание процессов перехода технологий цифрового производства от экспериментальных установок к их широкому внедрению в отраслевую практику. Обращение к рамочной модели, основанной на уровнях технологической готовности (TRL), подчёркивает значимость оценки проектных и технических характеристик систем 3D-печати, а также степени их готовности к интеграции в реальные строительные процессы. Данная связь усиливает методологическую обоснованность исследования, помещая ЧПУ-фрезерование и 3D-печать в более широкий контекст технологической эволюции и зрелости, тем самым подтверждая актуальность согласования стратегий изготовления с требованиями промышленной масштабируемости и долгосрочной устойчивости.

С противоположной стороны блок-схемы расположено исследование *Reinforcement Strategies for 3D-Concrete-Printing*, в котором представлена интегрированная по принципу «материал-процесс» концепция адаптивного армирования в цифровом производстве [11]. Стратегии армирования в 3D-печати бетоном [11].

Исследование группы TU Braunschweig вскрывает системное противоречие традиционного железобетонного строительства: основной вклад в CO₂-эмиссии отрасли обусловлен не производством цемента, а неэффективным расходом материалов — ортогональная арматура устанавливается по всему сечению, тогда как конструктивно требуется лишь в растянутой зоне [11]. Это наблюдение формирует прямое обоснование потенциала аддитивных технологий в снижении материалоёмкости строительных конструкций.

Ключевым тезисом работы является принципиальная возможность размещения арматуры по траекториям главных напряжений при отсутствии опалубки — без монтажной арматуры и сопутствующего перерасхода стали. Результатом служит гибридная плита-балка (500×210×10 см), изготовленная методом Shotcrete 3D Printing: экономия материала составила около 60 % по сравнению со сплошной плитой толщиной 25 см при времени печати рёбер менее 30 минут.

Авторы предлагают бинарную систематизацию совмещённого аддитивного производства — «бетон поддерживает арматуру» и «арматура поддерживает бетон», включая одновременное производство методом WAAM — что структурирует пространство технических решений для интеграции армирования, систематизированной в настоящем исследовании как ключевой барьер масштабирования.

Выявленным ограничением остаётся межслойное сцепление: зона контакта между слоями критически чувствительна к однородности материальных свойств, а риск образования «холодных швов» сдерживает надёжность несущих 3D-печатных конструкций и требует дальнейшего нормативного и экспериментального обоснования.

Развивая данные подходы, ориентированные на автоматизацию, Kontovourkis и Tryfonos (2019) предлагают параметрически интегрированный алгоритм планирования траекторий роботизированного инструмента для работы с грунтовыми и глинистыми материалами [12]. Исследование Университета Кипра разрабатывает параметрически интегрированный алгоритм планирования траектории для роботизированной 3D-печати нестандартных стеновых компонентов из глиносодержащих материалов — как альтернативы бетону с меньшим экологическим воздействием и возможностью рециклинга [12]. Выбор материала принципиален: авторы явно позиционируют глину как устойчивую альтернативу бетону.

Центральным результатом является выявленная количественная зависимость между диаметром сопла и временем печати: при переходе от сопла 4 мм к 24 мм время печати одного кирпичного блока сокращается с 1741 до 98 минут при сопоставимом объёме материала — то есть в 17,7 раза. Это прямое операционное свидетельство того, что выбор технологических параметров на раннем этапе проектирования критически определяет производительность процесса.

Не менее значимым является сравнение нестандартной и стандартной стены из 145 блоков: суммарное время роботизированной печати составило 8784 и 8446 минут соответственно — разница около 4 %. Авторы интерпретируют это как доказательство того, что геометрическая сложность практически не увеличивает производственные затраты при 3D-печати, тогда как при традиционном строительстве нестандартная геометрия ведёт к кратному росту трудоёмкости.

Значительным ограничением остаётся угол нависания: без заполнения геометрия разрушается при угле 34° , тогда как применение гексагональной решётки инфилла позволяет печатать при углах до 39° — однако это одновременно увеличивает время печати и объём материала, что требует явной параметрической балансировки на стадии проектирования.

Данное исследование усиливает центральную проблематику настоящего исследования, демонстрируя, каким образом ранняя интеграция производственных ограничений в процесс проектирования может повысить реализуемость параметрических форм в архитектурной практике. Методология, предложенная Kontovourkis и Tryfonos (2019), подчёркивает важность согласования логики цифрового проектирования с поведением материалов. Такой подход соответствует стремлению настоящего исследования к формированию рабочих процессов изготовления, которые одновременно являются практико-ориентированными и теоретически обоснованными. Акцент на устойчивости и нетрадиционных геометриях формирует ценные прецеденты для расширения применения ЧПУ-фрезерования и 3D-печати за пределы стандартных архитектурных типологий, тем самым способствуя развитию аналитической рамки, учитывающей текущие ограничения и перспективы масштабирования.

Дополняя научный дискурс примером крупномасштабной практической реализации, работа *Fabrication and Application of 3D-Printed Concrete Structural Components in the Baoshan Pedestrian Bridge Project*, опубликованная Xu et al. (2020), представляет собой комплексную

концепцию, объединяющую фиброармированный бетон, точную координацию цифрового проектирования и материальных характеристик, а также высокоразрешающие системы 3D-печати [13]. Исследование группы из университета Цинхуа представляет первый опыт применения 3D-печатного бетона в несущей конструкции публичного масштаба: пешеходный арочный мост в районе Баошань (Шанхай) полностью собран из 44 напечатанных бетонных вуссуаров, пролёт 14,47 м, ширина 3,6 м, стрелка подъёма 2,17 м [13]. Принципиальное значение этого кейса для настоящего исследования состоит в том, что он переводит 3D-печать из лабораторного прототипирования в область публично эксплуатируемой несущей инфраструктуры.

Ключевым материальным решением стала специальная рецептура фибробетона на сульфоалюминатном цементе с добавлением волокон ПВА: водоцементное соотношение определяет прочность на сжатие (максимум 65 МПа у отдельных образцов, среднее по 12 образцам — 46 МПа), а дозировка волокон управляет прочностью на изгиб (максимум 15 МПа, среднее — 10 МПа). Авторы не обнаружили значимой анизотропии прочности на сжатие между направлениями вдоль и поперёк слоёв — это первое свидетельство против одного из часто декларируемых структурных барьеров 3DCP.

Сечения вуссуаров были топологически оптимизированы: избыточный материал в треугольных зонах удалён, оставлены два X-образных ребра жёсткости. Испытание модели в масштабе 1:4 подтвердило несущую способность полноразмерной конструкции свыше 120 кН/м². Стоимость моста составила около двух третей от стоимости аналогичного традиционного бетонного моста — экономия достигнута за счёт отказа от опалубки и арматуры.

Выявленным ограничением остаётся неполная автоматизация: смешивание сухой смеси и транспортировка раствора к насосу выполнялись вручную, а управление печатью требовало двух несвязанных программных платформ. Авторы прямо указывают на необходимость интеграции цифрового и материального потоков как условие дальнейшего снижения производственных затрат.

Включение данного исследования усиливает практическую направленность настоящего исследования, демонстрируя успешное применение цифрового производства в инфраструктурном масштабе. Xu et al. показывают, каким образом синхронизированные стратегии взаимодействия цифрового проектирования и материалов, а также модульное производство позволяют преодолеть ограничения масштабируемости, часто возникающие в параметрическом проектировании [13]. Это соответствует цели настоящей работы, заключающейся в анализе операционной реализуемости технологий ЧПУ-фрезерования и 3D-печати в реальных архитектурно-строительных условиях. Опираясь на выводы, полученные в ходе данной крупномасштабной реализации, исследование укрепляет свою аналитическую модель эмпирическими данными, подтверждающими возможность экономически эффективных, конструктивно надёжных и готовых к автоматизации производственных практик, критически важных для развития устойчивого цифрового строительства.

Развивая границы аддитивного производства, Ming et al. (2021) предлагают инновационную технологию, объединяющую роботизированную точность с физической логикой ударного взаимодействия материала [14].

На стыке традиционной кладки и классической 3D-печати данный метод использует шестиосевой роботизированный манипулятор для метания мягких частиц, которые при ударе пластически деформируются, формируя дискретные, но связанные структуры. В отличие от экструзионных методов, здесь процесс осаждения материала основан на преобразовании кинетической энергии. Векторы дальнейшего развития технологии связаны с расширением рабочей зоны и снижением энергозатрат за счёт совершенствования механизма разгона, включая возможное применение пружинных систем для устранения проблем засорения и неэффективной перезагрузки, характерных для существующих экспериментальных установок.

Экспериментальная методика, представленная Ming et al. (2021), предлагает концептуально новое осмысление аддитивного производства, вводя кинетическую логику как альтернативный способ осаждения материала [14]. Несмотря на отличие от традиционного ЧПУ-фрезерования и экструзионной 3D-печати, данный подход расширяет теоретические и технологические границы цифрового производства, что соответствует центральной проблематике настоящего исследования. Его значимость заключается в демонстрации того, как альтернативные логики изготовления способны решать устойчивые проблемы, связанные с непрерывностью материала, энергоэффективностью и механическими ограничениями. Включение подобных стратегий в аналитическую рамку исследования способствует достижению его основной цели — критической оценке и интеграции разнообразных методов изготовления, повышающих адаптивность, эффективность и устойчивость параметрического архитектурного производства.

Развивая модель цифрового производства, Cheng et al. (2020) предлагают иерархическую модель проектирования, ориентированную на технологии 4D-печати, которая позволяет интегрировать многофункциональные свойства в мезоструктуры [15]. Авторы исследования показывают, что природные материалы обладают сложной иерархической организацией, обеспечивающей высокую механическую эффективность и адаптивность. В качестве примеров приводятся биологические структуры, такие как ткань шишек хвойных растений и костная ткань, где функциональные свойства формируются за счёт внутренней архитектуры материала, а не только его химического состава.

В контексте цифрового производства это приводит к смене модели проектирования: объект рассматривается не только как геометрическая форма, но как система структурно запрограммированных свойств материала. Аддитивные технологии позволяют создавать элементы с дифференцированной внутренней структурой, благодаря чему становится возможным управлять механическими характеристиками, деформацией и функциональными свойствами изделия уже на этапе проектирования. Таким образом, цифровое производство начинает рассматриваться как инструмент *material programming*, а не только как способ изготовления геометрически сложных архитектурных форм.

Однако авторы подчёркивают ряд фундаментальных ограничений, препятствующих масштабному внедрению подобных подходов. Прежде всего отмечается, что существующие CAD-системы ориентированы преимущественно на моделирование поверхностей и объёмов и практически не позволяют эффективно описывать внутренние структурные характеристики материалов. В результате возникает разрыв между возможностями современных аддитивных технологий и инструментами цифрового проектирования.

Дополнительным барьером является высокая сложность проектирования функционально программируемых материалов, поскольку подобные задачи требуют объединения методов вычислительного проектирования, материаловедения и технологий цифрового производства. Отсутствие интегрированных инструментов, позволяющих одновременно учитывать геометрию объекта, структуру материала и параметры производственного процесса, существенно ограничивает применение таких решений в архитектуре и строительстве.

Таким образом, Cheng et al. (2020) демонстрируют, что потенциал цифрового производства заключается не только в изготовлении геометрически сложных форм, но и в возможности проектирования материалов с заданными свойствами. В то же время исследование показывает, что ключевым барьером дальнейшего развития остаётся недостаточная интеграция процессов проектирования, моделирования и производства, что ограничивает практическое использование подобных технологий в реальных инженерных и архитектурных системах.

Исследование от Nuh et al. (2022) представляет технологию Automated Robotic Concrete Spraying (ARCS) — инновационный метод цифрового производства, предназначенный для

создания ребристых бетонных оболочек с использованием стеклофибробетона (GFRC), напыляемого на гибкую криволинейную опалубку [16]. Цифровое производство тонких ребристых железобетонных оболочек с использованием автоматизированного роботизированного напыления бетона (Automated Robotic Concrete Spraying, ARCS). Авторы рассматривают проблему изготовления двояко-криволинейных оболочечных конструкций, которые обладают высокой материальной эффективностью и способны перекрывать большие пролёты при существенно меньшем расходе материала по сравнению с традиционными плоскими плитами перекрытия.

Исследование показывает, что оболочечные конструкции исторически демонстрировали высокую структурную эффективность, однако их распространение существенно сократилось во второй половине XX века из-за высокой трудоёмкости изготовления криволинейной опалубки и ручного формования бетонных поверхностей. В результате строительная индустрия постепенно перешла к более простым призматическим формам, которые проще производить, но которые требуют большего количества материала и обладают меньшей конструктивной эффективностью.

В контексте цифрового строительства авторы рассматривают современные методы цифровой фабрикации бетонных элементов, включая гибкие опалубочные системы, pin-bed mould, кабельные сети, а также 3D-печатные и фрезерованные формы. Эти технологии потенциально способны автоматизировать производство сложных бетонных конструкций и повысить материальную эффективность благодаря управляемому распределению материала и оптимизации траекторий нанесения.

Однако исследование подчёркивает ряд существенных технологических барьеров. Во-первых, традиционная экструзионная 3D-печать бетона плохо подходит для изготовления двояко-криволинейных оболочек с рёбрами жёсткости, поскольку направление печати трудно определить, а слабая адгезия между слоями может приводить к расслоению материала.

Во-вторых, отдельной проблемой остаётся интеграция армирования в аддитивно изготовленные бетонные конструкции. В отличие от традиционного бетонирования, где арматура легко закладывается в форму, в 3D-печати её размещение остаётся сложной инженерной задачей.

Третьим ограничением является производительность оборудования: скорость печати большинства строительных 3D-принтеров остаётся относительно низкой, что ограничивает их использование в промышленных условиях, например на заводах сборного железобетона, где требуется высокая производительность и быстрый оборот производственных площадей.

Таким образом, Nuh et al. (2022) демонстрируют, что цифровая фабрикация способна вернуть в архитектурную практику конструктивно эффективные оболочечные формы, однако для масштабного внедрения подобных решений необходимо преодолеть ряд технологических барьеров, связанных с методами нанесения материала, интеграцией армирования и производственной скоростью цифровых строительных систем.

Следующее исследование от Tahouni et al. (2022) предлагает интегрированную стратегию совместного проектирования для 4D-печати гигроморфных конструкций с использованием биополимерных филаментов, наполненных целлюлозой. Путём введения целлюлозного порошка в различных концентрациях (0–30 %) в два полимерных материала с разной жёсткостью была сформирована линейка филаментов с дифференцированной гигросквозистивностью [17]. Эти материалы были объединены с мезомасштабными приёмами формообразования для создания конструкций, способных к программируемым и обратимым изменениям формы (например, открытию и закрытию) в ответ на колебания относительной влажности воздуха (35–90 %), имитируя сезонные климатические изменения. Данное

взаимодействие между рецептурой материала и архитектурной структурой демонстрирует потенциал 4D-печати в области климатически адаптивного проектирования. Примечательно, что трансформация формы происходит в течение нескольких минут и сохраняет стабильность в ходе многократных циклов. В качестве направлений дальнейших исследований обозначены моделирование на основе теории Тимошенко, изучение полностью биобазированных матриц, возможность переработки путём повторного плавления, а также более точная настройка процессов морфинга формы. Работа открывает новые направления в области адаптивной архитектуры, предлагая устойчивые решения для «умных» фасадов и экологически чувствительных компонентов в регенеративном проектировании [18]. Располагаясь на стыке материаловедения и вычислительного проектирования, исследование Tahouni et al. (2022) представляет собой убедительный пример того, каким образом цифровое производство может быть использовано для создания климатически адаптивных архитектурных систем [18]. Ещё одно исследование, выполненное Tahouni et al. (2023), посвящено разработке метода совместного проектирования (codesign) материалов и мезоструктур для 4D-печати гигрореактивных архитектурных элементов. Работа рассматривает аддитивное производство как инструмент создания адаптивных строительных систем, способных изменять форму в ответ на изменения влажности окружающей среды. Авторы подчеркивают, что подобные структуры могут применяться в погодо-адаптивных фасадных системах и строительных оболочках, что напрямую связано с задачей повышения энергоэффективности зданий и сокращения эксплуатационных энергозатрат.

В исследовании предложен интегрированный подход к разработке материалов и геометрии печатных элементов, в рамках которого одновременно проектируются:

1. Био-основанные композитные филаменты, содержащие порошок целлюлозы.
2. Мезоструктуры печатных элементов, определяющие направление и величину деформации конструкции.

Материальная система была сформирована путем компаундирования целлюлозного наполнителя с двумя полимерными матрицами — термопластичным полиуретаном (TPU) и поликетонем (PK), что позволило получить несколько типов филаментов с различной жесткостью и гигроскопичностью. Такие филаменты были использованы для печати экспериментальных прототипов, демонстрирующих управляемое изменение формы при изменении относительной влажности воздуха.

Экспериментальные испытания показали, что созданные конструкции способны автономно изменять конфигурацию при изменении относительной влажности в диапазоне примерно 35–90 %, что соответствует естественным климатическим колебаниям окружающей среды. При этом деформация происходит достаточно быстро (в течение нескольких минут), полностью обратима и может повторяться многократно без существенной деградации механических свойств.

Несмотря на демонстрацию высокого потенциала технологии, авторы подчёркивают ряд ключевых барьеров, ограничивающих её применение в архитектурно-строительной практике. Во-первых, существенным ограничением остаются материальные свойства существующих композитных филаментов, включая их печатаемость, механическую прочность и степень гигроскопической реакции. Во-вторых, многие существующие решения на основе природных волокон демонстрируют недостаточную стабильность и повторяемость деформации, включая слабую обратимость движения и ограниченный срок службы конструкций.

Кроме того, авторы отмечают важную системную проблему современной научной литературы: материаловедение, цифровое проектирование и технологии производства чаще всего исследуются отдельно, что препятствует разработке комплексных решений для практического применения адаптивных архитектурных систем.

В связи с этим в работе предлагается междисциплинарная модель «codesign», объединяющая разработку материала, цифровое моделирование и технологию аддитивного производства в единую проектную среду.

Таким образом, исследование Tahouni et al. демонстрирует, что интеграция био-основанных материалов, параметрического проектирования и аддитивного производства может стать основой для создания адаптивных архитектурных конструкций нового поколения. Вместе с тем авторы подчеркивают, что дальнейшее развитие технологии требует решения проблем стабильности материалов, предсказуемости деформаций и интеграции различных дисциплин в единую систему цифрового проектирования и производства. Эти выводы напрямую соотносятся с задачей системной интеграции цифровых производственных технологий в архитектурно-строительную практику.

В 2023 году Heywood и Nicholas предложили триадную концептуальную модель для 3D-печати бетоном (3DCP), объединяющую материаловедение, вычислительное проектирование и конструктивную эффективность в целях оценки устойчивости [18]. В рамках данной работы авторы рассматривают аддитивные строительные технологии как часть более широкой парадигмы цифрового строительства, объединяющей автоматизацию, роботизацию и цифровое моделирование. Основное внимание уделяется преимуществам технологии — сокращению времени строительства, снижению трудозатрат и уменьшению материальных отходов за счёт послойного формирования конструкций.

В исследовании показано, что 3D-печать позволяет реализовывать сложные геометрические формы, которые трудно или экономически нецелесообразно создавать традиционными строительными методами. Однако авторы подчёркивают, что несмотря на значительный потенциал технологии, её внедрение в строительную практику сопровождается рядом системных барьеров. Одним из ключевых ограничений является ограниченный спектр материалов, пригодных для аддитивного строительства. Для успешной печати смеси должны одновременно обладать достаточной текучестью для экструзии и высокой прочностью для сохранения формы после укладки, что существенно ограничивает выбор доступных составов.

Вторым существенным барьером авторы называют проблемы структурной надёжности и армирования печатных элементов. В отличие от традиционного железобетона, интеграция арматуры в процессе печати остаётся технологически сложной задачей, что ограничивает применение 3D-печати для несущих конструкций и требует разработки новых методов армирования и гибридных строительных систем.

Отдельно в исследовании отмечается нормативный и институциональный барьер. Отсутствие единых стандартов проектирования, контроля качества и сертификации 3D-печатных конструкций существенно замедляет масштабное внедрение технологии в строительной индустрии. Это создаёт разрыв между экспериментальными прототипами и их реальным применением в строительной практике.

Таким образом, данное исследование подтверждает, что аддитивные строительные технологии обладают значительным потенциалом для трансформации архитектурно-строительной отрасли, однако их широкое внедрение ограничивается комплексом технологических, материаловедческих и нормативных проблем. Эти выводы напрямую коррелируют с тематикой настоящего исследования, поскольку подчёркивают необходимость интеграции цифрового моделирования, оптимизации строительных материалов и разработки новых методов армирования для эффективного применения технологий 3D-печати в реальных строительных условиях. Иной структурированный обзор конструктивных элементов, изготовленных методом 3D-печати бетоном (3DCP), выполненный Raphael et al. (2022), основан на трёхэтапной методологии: планирование, компиляция и анализ.

Исследование опирается на положения теории строительных конструкций и охватывает вопросы стратегий армирования, межслойного сцепления, реологического поведения материала и прогнозирования разрушений с использованием модифицированной теории сжатого поля (Modified Compression Field Theory, MCFT) и методов топологической оптимизации [19]. исследование, опубликованное в журнале *Frontiers in Built Environment*, посвящено анализу технологических возможностей трёхмерной печати бетона и её потенциала для трансформации строительных процессов. Авторы рассматривают аддитивное производство как одну из ключевых технологий цифровизации строительной индустрии, позволяющую автоматизировать процесс возведения конструкций и сократить зависимость от традиционных трудоёмких строительных операций.

В работе подчёркивается, что технология 3D-печати бетона позволяет реализовывать архитектурные формы со сложной геометрией и высокой степенью индивидуализации. За счёт послойного формирования элементов становится возможным производить конструкции непосредственно из цифровой модели без использования традиционной опалубки, что существенно снижает материалоёмкость и сокращает строительные отходы.

Однако авторы исследования отмечают, что несмотря на значительный потенциал технологии, её практическое внедрение сталкивается с рядом существенных ограничений. Одним из ключевых барьеров является контроль качества печатных слоёв и их межслойной адгезии, поскольку прочность конструкций во многом определяется качеством сцепления между слоями материала, формируемыми в процессе экструзии. Недостаточная межслойная связь может приводить к снижению прочностных характеристик и повышенной анизотропии материала.

Дополнительным ограничением является необходимость точной синхронизации параметров печати, включая скорость подачи материала, траекторию печатающей головки и время схватывания смеси. Нарушение этих параметров может привести к деформациям печатной структуры и потере геометрической точности конструкции.

Отдельно авторы подчёркивают проблему интеграции армирования, которая остаётся одной из наиболее сложных задач в аддитивном строительстве. Традиционные методы армирования железобетона плохо совместимы с непрерывным процессом послойной печати, что требует разработки новых гибридных технологий, сочетающих аддитивное производство и традиционные методы усиления конструкций.

Таким образом, исследование демонстрирует, что 3D-печать бетона обладает значительным потенциалом для повышения эффективности строительного производства и расширения возможностей архитектурного формообразования. Вместе с тем авторы подчёркивают, что дальнейшее развитие технологии требует решения ключевых технологических задач, связанных с контролем качества печати, оптимизацией параметров процесса и интеграцией армирования, что напрямую соотносится с проблематикой интеграции аддитивных технологий в современную архитектурно-строительную практику. В качестве направлений дальнейших исследований обозначены синхронизированное размещение армирования, развитие реологических моделей и применение устойчивых численных симуляций для повышения конструктивной эффективности и масштабируемости 3DCP в промышленных условиях.

Развивая данную проблематику, Flatt и Wangler (2022) изучают вопросы устойчивости в цифровом производстве бетонных конструкций с акцентом на экструзионную 3D-печать и связанные с ней экологические последствия. Предложенная ими рамочная модель оценивает эффективность формообразования, материальный след и долговечность, а также вводит упрощённое уравнение для оценки экологического воздействия [20]. Работа рассматривает цифровое производство не только как инструмент расширения архитектурного формообразования, но и как потенциальный механизм повышения ресурсной эффективности строительства.

В рамках исследования авторы отмечают, что одной из ключевых предпосылок внедрения цифровых строительных технологий является возможность повышения геометрической и конструктивной эффективности формы (shape efficiency). Благодаря цифровому производству становится возможным создавать конструкции, в которых материал используется только в тех зонах, где он необходим для восприятия нагрузок. В качестве исторической аналогии приводятся ребристые перекрытия Пьера Луиджи Нерви, демонстрирующие потенциал оптимизированных конструктивных форм, которые ранее были экономически нецелесообразны из-за высокой трудоёмкости изготовления опалубки.

Существенным технологическим барьером авторы называют проблемы долговечности и межслойной адгезии печатных элементов. В процессе послойного формирования конструкций могут возникать так называемые «холодные швы» между слоями, которые снижают прочность сцепления и создают пути проникновения влаги и агрессивных веществ в структуру материала, что потенциально ухудшает долговечность конструкций.

Кроме того, в работе отмечается проблема избыточного проектирования прочности печатных смесей. Для обеспечения устойчивости слоёв в процессе печати часто применяются смеси с завышенными прочностными характеристиками, что приводит к избыточному расходу цемента. В качестве возможного решения авторы рассматривают использование двухкомпонентных систем с алюминатными ускорителями, позволяющих разделить требования к ранней прочности при печати и к конечной прочности конструкции в эксплуатации.

Таким образом, исследование Flatt и Wangler демонстрирует, что устойчивость цифрового производства бетона определяется не только возможностью оптимизации формы, но и рядом технологических и материаловедческих факторов. Авторы подчеркивают необходимость дальнейших исследований, направленных на оптимизацию составов печатных смесей, повышение долговечности конструкций и снижение углеродного следа материалов, что напрямую соотносится с задачами интеграции аддитивных технологий в устойчивую архитектурно-строительную практику.

В качестве направлений дальнейших исследований обозначены проблемы образования «холодных» швов, усадочного растрескивания, а также оптимизация использования заполнителей и химии ускорителей с целью повышения устойчивости и эксплуатационных характеристик.

Другое исследование [21], выполненное Huang et al. (2023) и опубликованное в журнале *Architectural Intelligence*, рассматривает применение биоинспирированных геометрических алгоритмов и методов генерации траекторий печати для архитектурных структур, создаваемых методом аддитивного производства. Работа направлена на изучение того, каким образом цифровые алгоритмы формообразования и оптимизированные траектории печати могут повысить конструктивную и производственную эффективность 3D-печатных архитектурных элементов.

Авторы демонстрируют, что ключевым фактором успешной реализации сложных архитектурных форм является интеграция алгоритмов генеративного проектирования и алгоритмов построения траекторий печати. В исследовании предлагаются методы построения непрерывных печатных траекторий, основанных на геометрических принципах пространственного заполнения (например, Voronoi-структурах и фрактальных кривых), позволяющие формировать сложные пористые и пространственные структуры без прерывания процесса печати. Такой подход позволяет повысить непрерывность производства и уменьшить количество технологических остановок, что напрямую влияет на производительность строительных аддитивных систем.

В то же время исследование подчёркивает, что проектирование траекторий печати является одним из ключевых технологических барьеров цифрового строительства. При реализации геометрически сложных архитектурных формы возникают проблемы непрерывности

печати, самопересечения траекторий и обеспечения устойчивости элементов в процессе послойного формирования.

Для решения этих задач авторы предлагают алгоритмические методы оптимизации печатных путей, включая генерацию непрерывных траекторий и алгоритмы переразбиения геометрии, позволяющие избежать конфликтов движения печатающей системы.

Дополнительным ограничением, выявленным в исследовании, является проблема соединения печатных элементов и обеспечения надёжности межслойного сцепления при сборке сложных пространственных структур. Авторы указывают, что для решения этой проблемы требуется разработка специальных схем построения траекторий и последовательностей печати, позволяющих уменьшить эффект слабых межслойных соединений и повысить структурную целостность конструкции.

Таким образом, данное исследование демонстрирует, что успешная интеграция аддитивных технологий в архитектурную практику зависит не только от свойств материалов и оборудования, но и от развития алгоритмических методов проектирования и управления процессом печати. Результаты работы подчеркивают необходимость дальнейших исследований в области генеративного проектирования, оптимизации траекторий и цифровой интеграции CAD/CAM-процессов, что непосредственно соотносится с задачей комплексной интеграции аддитивных технологий в архитектурно-строительное производство.

Авторы указывают на необходимость дальнейших исследований в области мобильных роботизированных систем, краевого армирования и топологической оптимизации для повышения адаптивности и конструктивной целостности в сложных средах. Представленный вычислительно обоснованный подход дополняет настоящее исследование, усиливая его акцент на точности и масштабируемости производственных процессов. Использование алгоритмов пространственного заполнения для крупноформатной 3D-печати соответствует общей задаче оптимизации планирования траекторий инструмента для сложных геометрий.

Оценочную рамку устойчивости цифрового производства бетонных конструкций предлагают Bischof et al. (2023), сосредотачиваясь на таких показателях, как эффективность формы, воплощённый углерод и долговечность. Сравнивая однокомпонентные (1K) и двухкомпонентные (2K) бетонные системы, авторы демонстрируют потенциал алюминийсодержащих ускорителей для повышения ранней прочности без существенного увеличения углеродных выбросов [22]. Исследование, представленное в работе Vos et al. (2022), посвящено анализу структурного поведения и технологических особенностей бетонных элементов, изготовленных методом 3D-печати, с акцентом на механические свойства, анизотропию материала и влияние технологических параметров печати на прочность конструкций. Авторы рассматривают аддитивное производство бетона как перспективный инструмент для создания геометрически сложных архитектурных форм, однако подчёркивают необходимость глубокого понимания механики материала, формируемого послойным способом.

В исследовании показано, что послойная природа аддитивного производства формирует выраженную анизотропию механических свойств материала. Прочность печатных элементов зависит не только от состава смеси, но и от ориентации слоёв, времени между их укладкой и условий твердения. В ряде экспериментов выявлено, что прочность на сжатие и растяжение может значительно различаться в зависимости от направления нагрузки относительно слоёв печати. Это означает, что традиционные расчётные модели, разработанные для монолитного бетона, не всегда корректно описывают поведение 3D-печатных конструкций.

Авторы также подчёркивают, что межслойное сцепление является одним из ключевых технологических барьеров аддитивного строительства. Снижение адгезии между слоями может происходить из-за увеличения временного интервала между их укладкой или из-за

недостаточной пластичности смеси в момент контакта. Этот фактор напрямую влияет на прочностные характеристики конструкции и может приводить к формированию зон потенциальной слабости внутри элемента.

Дополнительным ограничением, выявленным в исследовании, является отсутствие стандартизированных методов испытаний и расчёта для 3D-печатного бетона. Поскольку свойства материала существенно отличаются от традиционного литого бетона, существующие нормативные методы испытаний и проектирования не всегда позволяют корректно оценивать его эксплуатационные характеристики. В связи с этим авторы указывают на необходимость разработки специализированных методик испытаний и новых моделей расчёта, учитывающих послойную структуру материала.

Таким образом, результаты исследования демонстрируют, что ключевым направлением дальнейших исследований является интеграция материаловедческих знаний, технологических параметров печати и структурного анализа. Без комплексного понимания этих факторов масштабное внедрение аддитивных технологий в строительную отрасль остаётся ограниченным, несмотря на очевидный потенциал цифрового производства для создания геометрически сложных архитектурных форм, повышения ресурсной эффективности строительства.

Новый подход к цифровому производству, описанный Sahin et al. (2023), — концепция Cross-Sectional 4D-Printing (CS4DP) — использует экструзионное аддитивное производство для создания самоформирующихся, биоинспирированных мономатериальных конструкций [23]. Исследование, выполненное Sahin et al. (2023) и опубликованное в журнале *Biomimetics*, посвящено разработке биоинспирированного метода 4D-печати, позволяющего создавать самоформирующиеся конструкции с программируемыми механическими свойствами. Работа рассматривает аддитивное производство как инструмент переноса принципов природной морфологии в инженерные системы.

Авторы предлагают новую технологию, названную cross-sectional 4D-printing (CS4DP). В отличие от традиционных методов 4D-печати, основанных на формировании тонких двухслойных поверхностей (bilayer systems), предложенный подход предполагает поворот оси печати и программирование свойств материала непосредственно в поперечном сечении структуры. Это позволяет создавать элементы с дифференцированными механическими и гигроскопическими свойствами по глубине сечения и тем самым значительно расширяет возможности управления формообразованием конструкции.

Ключевым источником биомиметической модели в исследовании является механизм локального деформирования листьев хищного растения *Pinguicula grandiflora*, которое способно формировать углубления вокруг добычи за счёт дифференциальных деформаций тканей. Авторы проводят морфологический анализ структуры листа и переводят выявленные принципы в инженерную модель, позволяющую программировать локальные деформации печатных элементов при воздействии внешних стимулов, таких как влажность или температура.

Экспериментальная часть исследования демонстрирует, что изменение параметров функциональных паттернов в глубинных слоях структуры позволяет управлять гигроскопическими деформациями и кривизной конструкции. Например, в ходе испытаний было показано, что увеличение глубины поперечного сечения структуры (с 33,1 мм до 58,7 мм) приводит к увеличению кривизны до приблизительно $0,0012 \text{ мм}^{-1}$, что подтверждает возможность масштабирования таких систем без потери функциональности.

Вместе с тем исследование выявляет ряд существенных технологических ограничений, которые могут препятствовать масштабному внедрению подобных решений в архитектурно-строительную практику.

Во-первых, точное управление деформациями требует детального понимания взаимосвязи между геометрией функциональных паттернов и механическими свойствами материала, что в настоящее время во многом определяется эмпирическими экспериментами. Во-вторых, при увеличении масштаба конструкций возникает проблема недостаточной прочности в направлении печати (ось Z), что требует дополнительного структурного анализа и применения методов конечно-элементного моделирования.

Кроме того, авторы отмечают, что для дальнейшего масштабирования подобных систем необходимо интегрировать вычислительное моделирование, экспериментальные испытания и алгоритмическое проектирование, включая использование voxel-моделей и FEM-анализа для прогнозирования деформаций и напряжений в структуре. Только такая интеграция цифрового проектирования и цифрового производства позволит применять биоинспирированные самоформирующиеся конструкции в архитектурных и строительных масштабах.

Таким образом, исследование Sahin et al. демонстрирует потенциал объединения биомиметики, параметрического моделирования и аддитивного производства для создания адаптивных архитектурных структур. Одновременно работа подчёркивает, что переход от лабораторных прототипов к строительным масштабам требует решения задач структурной надёжности, прогнозирования деформаций и интеграции цифрового моделирования с технологическими параметрами печати. Эти выводы напрямую соотносятся с задачей комплексной интеграции цифровых производственных технологий в архитектурно-строительную практику.

Отбор основных источников был осуществлён с учётом их релевантности ЧПУ-фрезерованию, 3D-печати и параметрическому архитектурному проектированию. Детальный анализ данных публикаций позволил выявить как фундаментальные теоретические основания, так и практические траектории развития. Критическое рассмотрение 23 рецензируемых научных работ позволило обозначить сложное взаимодействие между вычислительным проектированием, материаловедением и принципами устойчивого развития. Рассмотренные исследования охватывают широкий спектр методологических аспектов, включая стратегии армирования, оптимизацию траекторий инструмента, анализ жизненного цикла и адаптивное поведение материалов. В совокупности данные выводы обеспечивают формирование устойчивой аналитической модели, направленной на интеграцию производственных рабочих процессов с ключевыми экологическими и эксплуатационными требованиями. Тем самым исследование закладывает прочную основу для архитектурного производства, ориентированного на масштабируемость, эффективность и экологическую адаптивность.

Как можно заметить из библиометрического картирования, значительная часть современного исследовательского ландшафта в области цифрового производства формируется вокруг фундаментальной работы [9], и исследование [11] не является исключением. Работа Kloft et al. [11], в которой основное внимание уделяется адаптивным стратегиям армирования для 3D-печати бетоном, согласованным с траекториями передачи нагрузок, формирует прямые концептуальные и методологические связи с рядом ключевых исследований. Связи с работами [18; 25] дополнительно усиливают влияние исследования Kloft et al.: первая ориентирована на практическую реализацию адаптивных систем в архитектурных прототипах, тогда как вторая включает принципы армирования Kloft et al. в более широкий контекст устойчивости и анализа жизненного цикла. Принципиально важно, что все указанные исследования прямо или косвенно соотносятся с работой [9], междисциплинарный синтез цифровой тектоники и материального интеллекта в которой формирует общее теоретическое основание.

Таким образом, исследование Kloft et al. [11] не просто развивается параллельно работе Anton et al. [9], но расширяет и операционализирует ключевые аспекты логики производственного процесса, структурной оптимизации и устойчивости, занимая роль важнейшего связующего

звена в данной научной сети. Его значение подчёркивает, каким образом теоретическая база, заложенная Anton et al., позволяет последующим исследованиям обращаться к всё более специализированным областям архитектурного цифрового производства.

Следующая группа исследований — [13; 21; 25] — связана между собой последовательно и в значительной степени опирается на фундамент, сформированный работой [11], что представляется как логически, так и аналитически обоснованным. Исследование Anton et al. заложило прочную междисциплинарную основу, объединившую проектную логику, эксплуатационные характеристики материалов и высокоразрешающее изготовление в рамках префабрикационных архитектурных систем. Указанные последующие работы развивают данные принципы в различных, но взаимодополняющих направлениях.

Bhooshan et al. (2022) исследуют цифровую материальность и проектирование, ориентированное на эксплуатационные характеристики, подчёркивая взаимную обусловленность формообразования и изготовления в рамках вычислительных рабочих процессов — направление, созвучное интеграции цифровой тектоники, предложенной Anton et al. Xu et al. (2020) развивают аспект материальной эффективности, анализируя стратегии построения траекторий инструмента и конструктивную согласованность сложных сборок, тем самым уточняя параметры параметрического управления, обозначенные Anton et al. Huang et al. [21] продолжают данную линию, применяя продвинутые вычислительные алгоритмы, такие как пространственно-заполняющие разбиения и фрактальные подразделения, к крупномасштабной 3D-печати, трансформируя логику префабрикации Anton et al. [9] в масштабируемые, топографически адаптивные системы. В совокупности данные исследования выявляют операционные принципы, геометрические инновации и условия структурной масштабируемости, необходимые для трансляции теоретических положений Anton et al. в продвинутые практические приложения. Тем самым они подтверждают, что работа Anton et al. [9] представляет собой не замкнутую модель, а генеративную основу, стимулировавшую развитие углублённых исследований в области оптимизации траекторий инструмента, адаптивного формообразования и алгоритмической пространственной логики в цифровом производстве.

Несмотря на концентрацию исследований вокруг работы [9] и расширенной сети её цитирования, ряд других исследований — в частности [14–17] — остаются вне описанного фундаментального кластера. Эти работы исследуют иные измерения цифрового производства, включая кинетическое осаждение материала [14], 4D-печать с внедрёнными метаданными [15], роботизированные системы напыления бетона [16] и гигроморфные биополимерные конструкции [17], каждая из которых вводит альтернативные логики, материальные системы или производственные модели. Их относительная изолированность от доминирующего дискурса 3D-печати, сформированного вокруг [9], указывает на то, что современная исследовательская область, будучи глубоко развитой в таких направлениях, как префабрикация, стратегии армирования и метрики устойчивости, ещё не в полной мере интегрировала возникающие или дивергентные подходы. Эти периферийные исследования убедительно демонстрируют, что поле цифрового производства является более широким, чем это отражено в доминирующих цитатных кластерах.

В связи с этим для формирования всестороннего понимания текущего состояния исследований в данной области аналитическая модель, предложенная в настоящей работе, должна быть расширена с целью включения данных недопредставленных, но методологически и концептуально значимых траекторий.

Такой подход позволит обогатить теоретическую базу, зафиксировать инновационные разработки на периферии научного поля и обеспечить целостное представление эволюции цифрового производства в аддитивных, субтрактивных и гибридных методологиях.

Анализ рассмотренных исследований показывает, что современный научный дискурс в области цифрового архитектурного производства характеризуется структурным разрывом между тремя ключевыми компонентами: цифровым проектированием, свойствами материалов и производственными процессами. Значительная часть исследований сосредоточена либо на разработке новых материалов для аддитивного производства, либо на алгоритмах параметрического формообразования, тогда как интеграция этих аспектов в единую производственную систему остаётся ограниченной.

Этот разрыв объясняет существующее несоответствие между экспериментальными лабораторными разработками и их масштабным внедрением в строительную практику, что подтверждается результатами систематического анализа публикаций по технологии 3D-печати бетона.

Заключение и дальнейшие исследования

Проведённый анализ научной литературы показывает, что технологии цифрового производства, включая 3D-печать бетона и ЧПУ-фрезерование, обладают значительным потенциалом для трансформации архитектурно-строительной практики. Рассмотренные исследования демонстрируют, что применение аддитивных и роботизированных методов изготовления позволяет реализовывать геометрически сложные архитектурные формы, повышать материальную эффективность и расширять возможности параметрического проектирования.

Вместе с тем анализ публикаций выявил ряд системных ограничений, препятствующих масштабному внедрению данных технологий. К основным барьерам относятся:

- ограниченный спектр материалов, пригодных для строительной 3D-печати;
- сложность интеграции армирования в аддитивные конструкции;
- проблемы межслойного сцепления и структурной надёжности печатных элементов;
- недостаточная интеграция цифрового проектирования и производственных процессов;
- отсутствие унифицированных нормативных стандартов для проектирования и эксплуатации 3D-печатных конструкций.

Кроме того, анализ показывает, что значительная часть существующих исследований рассматривает отдельные аспекты цифрового производства — материалы, алгоритмы проектирования или технологии изготовления — тогда как их системная интеграция остаётся ограниченной.

В связи с этим дальнейшие исследования должны быть направлены на развитие междисциплинарных подходов, объединяющих методы вычислительного проектирования, материаловедения и цифрового производства. Особое значение имеют исследования, ориентированные на повышение надёжности аддитивных конструкций, разработку устойчивых строительных материалов и интеграцию CAD (Computer-Aided Design) / CAM (Computer-Aided Manufacturing) процессов в единые производственные рабочие процессы. Развитие данных направлений позволит обеспечить более широкое внедрение технологий цифрового производства и повысить их эффективность в архитектурно-строительной практике.

Обсуждение

Ценность настоящей работы представлена во всестороннем обзоре литературы прикладных исследований по применению аддитивных систем в строительстве. Приведены основные *ограничения, препятствующие* процессу возведения конструкций зданий и сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sacks R. Parametric 3D modeling in building construction with examples from precast concrete / R. Sacks, C. M. Eastman, G. Lee // Automation in Construction. — 2004. — Т. 13, № 3. — С. 291–312. — DOI: [10.1016/S0926-5805\(03\)00043-8](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(03)00043-8). (дата обращения: 12.02.2026).
2. Yussuf N. Parametric-based Approach in Architectural Design Procedures / N. Yussuf, I. Maarouf, M.M. Abdelhamid // Fayoum University Journal of Engineering. — 2024. — Т. 7, № 2. — С. 127–133. — DOI: [10.21608/fuje.2024.343806](https://doi.org/10.21608/fuje.2024.343806). — EDN: [UHCHBW](https://www.edn.net/UHCHBW). (дата обращения: 12.02.2026).
3. Ooms T. A parametric modelling strategy for the numerical simulation of 3D concrete printing with complex geometries / T. Ooms [et al.] // Additive Manufacturing. — 2021. — Т. 38. — С. 101743. — DOI: [10.1016/j.addma.2020.101743](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101743). — EDN: [TWTWXV](https://www.edn.net/TWTWXV). (дата обращения: 12.02.2026).
4. Riekstins A. Parametric Biodigital Inspired Tessellation for Mass Customized Digital Fabrication / A. Riekstins // Landscape Architecture and Art. — 2021. — Т. 19, № 19. — С. 116–120. — DOI: [10.22616/j.landarchart.2021.19.11](https://doi.org/10.22616/j.landarchart.2021.19.11). — EDN: [LSNRVK](https://www.edn.net/LSNRVK). (дата обращения: 12.02.2026).
5. Cao X. Construction and application of online parametric modeling platform for face milling cutters based on WebGL and Open CASCADE / X. Cao [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. — 2025. — Т. 239, № 1-2. — С. 14–28. — DOI: [10.1177/09544054241236814](https://doi.org/10.1177/09544054241236814). — EDN: [IAHFSR](https://www.edn.net/IAHFSR). (дата обращения: 12.02.2026).
6. Неустроев Д. В. Аддитивные технологии и их применение в промышленном и транспортном строительстве / Д. В. Неустроев, И. Г. Овчинников // Вестник Евразийской науки. — 2021. — Т. 13, № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/26SAVN221.pdf>. — EDN: [DBGWPY](https://www.edn.net/DBGWPY). (дата обращения: 17.03.2026).
7. Baduge S.K. Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods / S.K. Baduge [et al.] // Structures. — Elsevier, 2021. — Т. 29. — С. 1597–1609. — DOI: [10.1016/j.istruc.2020.12.061](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.061). — EDN: [QEIEGR](https://www.edn.net/QEIEGR). (дата обращения: 12.02.2026).
8. Aso N. Automatic parametric modeling technique for structural design standardization / N. Aso, H. Yanami, M. Ogawa // IEEE Access. — 2022. — Т. 10. — С. 81031–81041. — DOI: [10.1109/access.2022.3196001](https://doi.org/10.1109/access.2022.3196001). — EDN: [QAWSUF](https://www.edn.net/QAWSUF). (дата обращения: 12.02.2026).
9. Anton A. TOR Alva a 3D concrete printed tower / A. Anton [et al.] // Fabricate 2024: Creating Resourceful Futures. — 2024. — Т. 5. — С. 252–259. — URL: https://www.researchgate.net/publication/379578698_TOR_ALVA_A_3D_CONCRETE_PRINTED_TOWER. — DOI: [10.2307/jj.11374766.35](https://doi.org/10.2307/jj.11374766.35) (дата обращения: 12.02.2026).
10. Ma G. Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development / G. Ma [et al.] // Cement and Concrete Research. — 2022. — Т. 156. — С. 106774. — DOI: [10.1016/j.cemconres.2022.106774](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106774). — EDN: [PXOGCN](https://www.edn.net/PXOGCN). (дата обращения: 12.02.2026).
11. Kloft H. Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing / H. Kloft [et al.] // Civil Engineering Design. — 2020. — Т. 2, № 4. — С. 131–139. — DOI: [10.1002/cend.202000022](https://doi.org/10.1002/cend.202000022). — EDN: [QWILYW](https://www.edn.net/QWILYW). (дата обращения: 12.02.2026).

12. Kontovourkis O. Robotic 3D clay printing of prefabricated non-conventional wall components based on a parametric-integrated design / O. Kontovourkis, G. Tryfonos // Automation in Construction. — 2020. — Т. 110. — С. 103005. — DOI: [10.1016/j.autcon.2019.103005](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103005). — EDN: [QVEYUC](https://www.edn.net/QVEYUC). (дата обращения: 12.02.2026).
13. Xu W. Fabrication and application of 3D-printed concrete structural components in the Baoshan Pedestrian Bridge Project / W. Xu [et al.] // Fabricate 2020: Making Resilient Architecture. — 2020. — С. 140–147. — URL: <https://www.jstor.org/stable/j.ctv13xpsvw.22>. — DOI: [10.2307/j.ctv13xpsvw.22](https://doi.org/10.2307/j.ctv13xpsvw.22). (дата обращения: 12.02.2026).
14. Singh V.N. Nanomaterials for Energy and Sensor Applications / V.N. Singh, S.S. Kushvaha. — CRC Press, 2024. — URL: <https://api.taylorfrancis.com/content/book/s/mono/download?identifierName=doi&identifierValue=&type=googlepdf>. — DOI: [10.1201/9781003350965](https://doi.org/10.1201/9781003350965). (дата обращения: 12.02.2026).
15. Cheng T. Multifunctional mesostructures: design and material programming for 4D-printing / T. Cheng [et al.] // Proceedings of the 5th Annual ACM Symposium on Computational Fabrication. — 2020. — С. 1–10. — URL: <https://dl.acm.org/doi/epdf/>. — DOI: [10.1145/3424630.3425418](https://doi.org/10.1145/3424630.3425418). (дата обращения: 12.02.2026).
16. Nuh M. Digital fabrication of ribbed concrete shells using automated robotic concrete spraying / M. Nuh [et al.] // Additive Manufacturing. — 2022. — Т. 59. — С. 103159. — DOI: [10.1016/j.addma.2022.103159](https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103159). — EDN: [RRWPTA](https://www.edn.net/RRWPTA). (дата обращения: 12.02.2026).
17. Tahouni N. Codesign Strategy for 4D-Printed Hygromorphic Structures Using Biobased Composites / N. Tahouni, R. Zarei, A. Fatahi // COMPASS '24, July 8–11, 2024, New Delhi, India. — New York, NY, USA: ACM, 2022. — DOI: [10.1089/3dp.2022.0061](https://doi.org/10.1089/3dp.2022.0061). (дата обращения: 12.02.2026).
18. Heywood K. Sustainability and 3D concrete printing: identifying a need for a more holistic approach to assessing environmental impacts / K. Heywood, P. Nicholas // Architectural Intelligence. — 2023. — Т. 2, № 1. — С. 12. — DOI: [10.1007/s44223-023-00030-3](https://doi.org/10.1007/s44223-023-00030-3). — EDN: [NAMONB](https://www.edn.net/NAMONB). (дата обращения: 12.02.2026).
19. Raphael B. A review of concrete 3D printed structural members / B. Raphael [et al.] // Frontiers in Built Environment. — 2023. — Т. 8. — С. 1034020. — DOI: [10.3389/fbuil.2022.1034020](https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1034020). — EDN: [TKCLWU](https://www.edn.net/TKCLWU). (дата обращения: 12.02.2026).
20. Flatt R. Environmental Metrics and Design Trade-offs in Extrusion-Based 3D Concrete Printing / R. Flatt, T. Wangler // COMPASS '24, July 8–11, 2024, New Delhi, India. — New York, NY, USA: ACM, 2022. — DOI: [10.1016/j.cemconres.2022.106837](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106837). (дата обращения: 12.02.2026).
21. Huang S. Space-filling and print path generation methods for large-area 3D concrete printing pavements / S. Huang, W. Xu, H. Hu // Architectural Intelligence. — 2023. — Т. 2, № 1. — С. 13. — DOI: [10.1007/s44223-023-00032-1](https://doi.org/10.1007/s44223-023-00032-1). — EDN: [UCOYNY](https://www.edn.net/UCOYNY). (дата обращения: 12.02.2026).
22. Flatt R.J. On sustainability and digital fabrication with concrete / R.J. Flatt, T. Wangler // Cement and Concrete Research. — 2022. — Т. 158. — С. 106837. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884622001284>. — DOI: [10.1016/j.cemconres.2022.106837](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106837). (дата обращения: 12.02.2026).
23. Sahin M. Cross-Sectional 4D Printing for Self-Shaping Architectural Structures / M. Sahin, J. Chen, I. Bakar // Biomimetics. — 2023. — Т. 8, № 2. — С. 233. — DOI: [10.3390/biomimetics8020233](https://doi.org/10.3390/biomimetics8020233). (дата обращения: 12.02.2026).

24. Bedarf P. Foam 3D printing for construction: A review of applications, materials, and processes / P. Bedarf [et al.] // Automation in Construction. — 2021. — Т. 130. — С. 103861. — DOI: [10.1016/j.autcon.2021.103861](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103861). — EDN: [CYNQHI](https://www.edn.net/CYNQHI). (дата обращения: 12.02.2026).
25. Bhooshan S. The Striatu bridge: Computational design and robotic fabrication of an unreinforced, 3D-concrete-printed, masonry arch bridge / S. Bhooshan [et al.] // Architecture, structures and construction. — 2022. — Т. 2, № 4. — С. 521–543. — DOI: [10.1007/s44150-022-00051-y](https://doi.org/10.1007/s44150-022-00051-y). — EDN: [SOBCKU](https://www.edn.net/SOBCKU). (дата обращения: 12.02.2026).

Arutiunian Levon Anushavanovich

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
E-mail: Levon825988@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0568-5416>

Tsimbelman Nikita Yakovlevich

Department of Geoinformation Technologies
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
E-mail: tsimbelman.nya@dvfu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=469683

Chernova Tatiana Igorevna

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
E-mail: chernova.ti@dvfu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=858744

Isaeva Ekaterina Sergeevna

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
E-mail: isaeva.es@dvfu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0365-8505>

Additive technologies in construction: analysis of the potential and limitations of digital fabrication

Abstract. The integration of three-dimensional printing and milling technologies into the construction industry significantly transforms current architectural practice, expanding the boundaries of form generation and reshaping the logic of design. The article presents a comprehensive analysis of the application of additive and subtractive technologies in construction and examines their role in the realization of structures with complex geometries and individualized architectural components. Within the framework of the study, the authors reveal that digital modeling combined with three-dimensional printing and numerically controlled milling makes it possible to shift the focus from traditional construction feasibility toward spatial planning and compositional solutions, while ensuring high manufacturing accuracy and reduced material consumption under real construction conditions.

Particular attention is given to the evaluation of design flexibility, parametric optimization of forms, and the efficiency of resource use. At the same time, the study systematizes key barriers that hinder the large-scale integration of these technologies, including limitations related to the properties of construction materials, the need for toolpath optimization, the high capital cost of equipment, as well as issues of economic feasibility and regulatory frameworks.

Based on the analysis of implemented projects and contemporary scientific research, conclusions are drawn about the potential of three-dimensional printing and milling to rethink construction processes and support the sustainable development of the industry. The results of the study make it possible to structure existing challenges and identify directions for further development aimed at a more effective integration of digital fabrication into architectural and construction practice.

Keywords: three-dimensional concrete printing; additive construction technologies; digital fabrication in construction; robotic construction; reinforcement integration; parametric design; resource efficiency; sustainable construction; digital structural modeling