

Филюшина Кристина Эдуардовна
Томский государственный архитектурно-строительный университет
Костов Сергей Александрович
Томский государственный архитектурно-строительный университет

Экономический расчет эффективности строительства жилых малоэтажных домов с использованием 3D-печати в сравнение с традиционным строительством

Аннотация. Строительная индустрия переживает революционные изменения благодаря 3D-печати. Эта технология, ранее считавшаяся экспериментальной, теперь становится реальной коммерческой силой, способной кардинально изменить традиционные подходы к строительству. 3D-печать – это не просто автоматизация, а синтез цифрового дизайна, робототехники и новых материалов, призванный упростить и ускорить один из самых сложных этапов строительства. Суть технологии в том, что она позволяет роботизированно создавать конструкции, послойно выдавливая специальные материалы, руководствуясь при этом цифровой моделью. Но при этом данная разработка требует более детального изучения.

Использование трехмерной печати в строительстве стало настоящим прорывом последних десятилетий. Современная концепция 3D-печати основывается на сочетании передовых цифровых инструментов моделирования, автоматизированных роботов и инновационных композитных материалов. Вместо традиционных методов кирпичной кладки или заливки бетоном, современные принтеры способны создать полноценные стены, перекрытия и фасады буквально за считанные часы, что значительно сокращает сроки строительства и снижает трудозатраты.

Ключевые характеристики 3D-печати в строительстве:

Высокая скорость строительства. Процесс печати может выполняться круглосуточно, не завися от человеческого фактора усталости рабочих.

Минимальное количество отходов. Материал расходуется исключительно на создание объекта, исключая излишки и бракованные детали.

Гибкость и разнообразие форм. Благодаря цифровому дизайну, возможны любые геометрически сложные формы, невозможные при традиционном подходе.

Устойчивость и энергоэффективность. Многие современные проекты используют материалы, обеспечивающие высокую теплоизоляцию и устойчивость к внешним воздействиям.

Однако важно отметить, что на сегодняшний день существуют некоторые барьеры, препятствующие массовому распространению 3D-печати в строительстве:

Стоимость оборудования и материалов. Несмотря на экономию труда, стоимость начальных инвестиций остается достаточно высокой.

Отсутствие стандартизации. Строительные нормы и стандарты не успевают за технологическим прогрессом, затрудняя сертификацию и контроль качества построенных объектов.

Проблемы с материалами. Некоторые композиты и смеси недостаточно изучены для долгосрочного использования, что вызывает сомнения относительно долговечности и надежности конструкций.

Тем не менее, многие ведущие мировые застройщики уже начинают тестировать и применять 3D-принтеры в реальных проектах, начиная от частных домов и заканчивая крупными коммерческими объектами.

Ключевые слова: аддитивные технологии, жилищное малоэтажное строительство, инновации, архитектура.

Filyushina Kristina Eduardovna

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering

Kostov Sergey Alexandrovich

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering

Economic calculation of the efficiency of building low-storey residential houses using 3D printing in comparison with traditional construction

Abstract. The construction industry is undergoing a revolutionary transformation thanks to 3D printing. Previously considered an experimental technology, 3D printing is now becoming a real commercial force that has the potential to revolutionize traditional construction practices. 3D printing is not just about automation; it is a synthesis of digital design, robotics, and new materials that aims to simplify and accelerate one of the most complex stages of construction. The essence of this technology lies in its ability to create structures robotically by extruding specialized materials layer by layer based on a digital model. However, this development requires further exploration.

The use of three-dimensional printing in construction has been a real breakthrough in recent decades. The modern concept of 3D printing is based on a combination of advanced digital modeling tools, automated robots, and innovative composite materials. Instead of traditional methods of bricklaying or concrete pouring, modern printers can create complete walls, floors, and facades in just a few hours, significantly reducing construction time and labor costs.

The key features of 3D printing in construction include:

High construction speed. The printing process can be performed around the clock, eliminating the human factor of worker fatigue.

Minimal waste. The material is used exclusively for the creation of the object, eliminating excess and defective parts.

Flexibility and variety of shapes. Thanks to digital design, any geometrically complex shapes that are impossible with a traditional approach are possible.

Sustainability and energy efficiency. Many modern projects use materials that provide high thermal insulation and resistance to external influences.

However, it is important to note that there are currently some barriers that prevent the widespread adoption of 3D printing in construction:

The cost of equipment and materials. Despite the labor savings, the initial investment remains relatively high.

The lack of standardization. Building codes and standards are not keeping up with technological advancements, making it difficult to certify and monitor the quality of constructed objects.

Material issues. Some composites and mixtures are not sufficiently studied for long-term use, which raises doubts about the durability and reliability of structures.

However, many leading global developers are already testing and using 3D printers in real projects, from private homes to large commercial facilities.

Keywords. Additive technologies, low-rise housing, innovations, and architecture.

Введение

Архитектурно-инженерно-строительная сфера стоит на пороге глубокой трансформации. 3D-печать в строительстве, или аддитивное производство, перестает быть просто футуристической идеей и превращается в реальную коммерческую технологию, готовую переключить привычные методы возведения зданий. Этот процесс объединяет в себе цифровое проектирование, робототехнику и передовые материалы, чтобы автоматизировать и оптимизировать один из самых трудоемких этапов строительства. Главное преимущество 3D-печати – это возможность роботизированного создания строительных элементов путем послойного нанесения специализированных материалов, полностью контролируемого цифровой моделью.

Этот переход от традиционных, преимущественно субтрактивных и трудоёмких методов к аддитивному, управляемому данными подходу знаменует собой тектонический сдвиг. Традиционное строительство на протяжении веков полагалось на ручной труд, что делало его уязвимым к нехватке квалифицированных кадров, человеческому фактору и низкой производительности.

Аддитивное строительство предлагает альтернативу, где скорость, точность и сложность формы определяются возможностями машины, а не физическими ограничениями человека. Первичные рыночные сигналы указывают на зарождающийся, но быстрорастущий сектор, который обещает радикальное сокращение сроков возведения несущих конструкций, снижение затрат и минимизацию отходов.

Потенциал этой технологии выходит за рамки простого совершенствования существующих строительных процессов; он способен полностью переключить бизнес-модели отрасли. Исторически, стоимость строительства была тесно связана с доступностью и ценой квалифицированных кадров. 3D-печать, беря на себя самую трудоемкую задачу – возведение стен, – ослабляет зависимость от непредсказуемого рынка труда и повышает предсказуемость проектных смет. Это знаменует собой стратегический сдвиг для строительных компаний: их фокус переместится с управления человеческими ресурсами на инвестиции в передовые технологии, программные решения и материаловедческие исследования. Таким образом, будущие конкурентные преимущества будут определяться не столько размером рабочей силы, сколько уровнем технологической оснащенности и эффективностью управления данными.

Ключевая технология и процесс строительной 3D-печати

Печать зданий начинается с детальной цифровой модели. Сначала создается 3D-проект в программах САПР или BIM, включающий не только форму, но и конструктивные детали. Затем это цифровое представление подготавливается к печати с помощью специального ПО. Оно разбивает модель на множество тонких слоев и генерирует G-код – набор команд для 3D-принтера, управляющих его движениями и процессом печати. Точность этой цифровой модели и ее преобразования в машинный код напрямую влияют на качество и прочность готового здания. Поэтому навыки цифрового проектирования становятся основой современной строительной отрасли.

Портальные системы – это крупногабаритные рамные конструкции, которые, как правило, имеют три оси (X, Y, Z) для управления движением печатающей головки. Они устанавливаются непосредственно на месте строительства, окружая будущий объект. Их основное преимущество заключается в возможности печати на очень больших площадях с высокой точностью позиционирования. Это делает их идеальным выбором для создания крупных, монолитных конструкций в контролируемых условиях. Вероятно, именно такие крупноформатные портальные системы, способные охватить всю площадь застройки, были задействованы в реализации масштабных проектов, таких как 3D-остановки в городе Томск.

Роботизированные манипуляторы - это, промышленные роботы с несколькими степенями свободы, оснащенные экструдером. Они более мобильны, гибки и способны создавать сложные криволинейные геометрии, недоступные для некоторых порталных систем. Однако их рабочая зона, как правило, меньше, что может потребовать перемещения робота в процессе строительства или использования нескольких роботов, работающих согласованно.

Выбор между двумя типами систем зависит от конкретных задач проекта: масштаба, сложности геометрии, условий на строительной площадке и логистических соображений.

Состав строительной смеси заложенный в производстве жилых малоэтажных домов

Успех строительной 3D-печати напрямую зависит от двух составляющих: качества оборудования и свойств используемых материалов. Важно понимать, что это не стандартный бетон, а специально разработанная, высокотехнологичная смесь, призванная удовлетворить целый ряд сложных и порой противоречивых требований. Основным компонентом является быстросхватывающийся бетон или цементный раствор, обладающий уникальным свойством – тиксотропностью. Это означает, что материал должен быть достаточно текучим, чтобы беспрепятственно выдавливаясь через сопло экструдера под давлением. Однако, как только давление снимается, он должен мгновенно затвердевать, сохраняя свою форму и выдерживая вес последующих слоев, не деформируясь. [1, с. 353-354]

Для достижения такого двойного эффекта в состав смеси вводятся различные химические добавки, такие как ускорители схватывания, пластификаторы и фиброволокно, придающее материалу дополнительную прочность.

Рабочий процесс строительства

Несмотря на высокий уровень автоматизации, процесс возведения 3D-печатного дома представляет собой гибридную методику, сочетающую роботизированный труд с традиционными строительными операциями. Типичный проект включает следующие этапы:

1. **Подготовка площадки:** Этот этап аналогичен традиционному строительству и включает расчистку территории, земляные работы и заливку фундамента. Принтер устанавливается на готовый фундамент.

2. **Печать:** Роботизированная система начинает послойную экструзию стен в соответствии с загруженной цифровой моделью. Этот этап является основным, где достигается максимальная экономия времени и трудозатрат.

3. **Пост-обработка и отделка:** Важно понимать, что принтер создаёт только несущую «коробку» здания. После завершения печати стен к работе приступают бригады рабочих, которые выполняют монтаж кровли, установку окон, дверей, а также прокладку всех инженерных сетей — электрики, сантехники и систем отопления, вентиляции и кондиционирования. [2, с. 152-158]

Таким образом, термин «3D-печатный дом» может вводить в заблуждение, создавая нереалистичные ожидания полной автоматизации. На текущем этапе развития технология представляет собой мощный инструмент для автоматизации возведения структурной оболочки здания, однако значительная часть работ по-прежнему требует участия традиционных строительных специальностей. Это означает, что общие сроки и стоимость проекта все еще находятся под влиянием конвенциональных методов, их графиков и затрат. Реалистичная оценка экономического эффекта технологии должна рассматривать ее как революционную оптимизацию одного, хотя и критически важного, этапа строительства, а не как готовое решение «дом под ключ за один день». Эта нюансировка имеет решающее значение для инвесторов и девелоперов при расчете истинной рентабельности инвестиций.

Трансформация структуры затрат

Снижение затрат является прямым следствием ускорения процесса, сокращения трудозатрат и оптимизации использования материалов. Отраслевые оценки показывают, что общее снижение стоимости проекта при использовании 3D-печати может достигать 20-25% по сравнению с традиционными методами.

Экономия складывается из нескольких компонентов.

Во-первых, это прямое сокращение отходов. Аддитивный процесс по своей природе является безотходным — используется только тот материал, который необходим для создания структуры. Это позволяет сократить количество строительного мусора на величину до 60% по сравнению с традиционными методами, где обрезка материалов (дерево, гипсокартон, блоки) неизбежна. [3, с. 18-26]

Во-вторых, как будет рассмотрено ниже, происходит резкое сокращение затрат на рабочую силу.

Аддитивное строительство коренным образом меняет требования к рабочей силе на стройплощадке. Для управления процессом печати, включая подготовку смеси и контроль за работой оборудования, требуется небольшая команда из 2-4 человек. Это кардинальное отличие от традиционного подхода, который требует больших бригад, включающих каменщиков, плотников и подсобных рабочих, для возведения стен. Такое резкое сокращение численности персонала на этапе возведения коробки здания является одним из ключевых драйверов общей экономии затрат, указанной в диапазоне 20-25%.

Для наглядного представления сравнительных преимуществ технологии ниже приведена сводная таблица.

Таблица 1

Сравнительные показатели строительных методологий

Показатель	Аддитивное строительство (3D-печать)	Традиционное строительство (Каркасное/Кирпичное)
Время возведения стен	24-48 часов	1-3 недели
Рабочая сила на объекте (возведение коробки)	2-4 оператора	Бригада 10-20+ человек
Материальные отходы	Сокращение до 60%	Базовый уровень
Гибкость проектирования	Высокая (криволинейные, органические формы)	Средняя (преимущественно прямолинейные формы)

Расчет стоимости материалов (на 1м² стены)

Газобетонная кладка:

Материалы: газобетон (примерно 4500 руб./м³) и клей. Стоимость материалов на 1 м² стены — около 2200 руб.

Работы: кладка газобетонных блоков. В Томске стоимость кладки может варьироваться, например, от 350 руб./м² (простые работы) - 1870 руб./м² и выше. Средняя цена за кладку — около 1000–1500 руб./м².

Общая стоимость материалов и работ:

Материалы: 2200 руб./м² × 120 м² = 264 000 руб.

Работы: 1250 руб./м² × 120 м² = 150 000 руб.

Итого: 414 000 руб.

3D-печать стен:

Материалы: бетонная смесь (примерно 22 000 руб./м³) и пенобетон для заполнения (2000 руб./м³). Стоимость материалов на 1 м² стены — около 2400 руб.

Работы: обслуживание 3D-принтера, подготовка смеси, печать. Стоимость работ может быть выше из-за сложности технологии и необходимости специализированных операторов.

Общая стоимость материалов и работ:

Материалы: $2400 \text{ руб./м}^2 \times 120 \text{ м}^2 = 288 \text{ 000 руб.}$

Работы: предположим, $1500 \text{ руб./м}^2 \times 120 \text{ м}^2 = 180 \text{ 000 руб.}$ (цена может варьироваться).

Итого: 468 000 руб.

Таблица 2

Сравнение и дополнительные факторы

Параметр	Газобетон	3D-печать
Стоимость материалов (120 м ²)	264 000 руб.	288 000 руб.
Стоимость работ (120 м ²)	150 000 руб.	180 000 руб.
Общая стоимость	414 000 руб.	468 000 руб.

Дополнительные факторы:

Армирование: для 3D-стен требуется более частое армирование (каждые 30 см), что увеличивает затраты. Газобетон армируется реже (1, 5 и 9 ряды).

Погодные условия: 3D-печать чувствительна к жаре, дождю, ветру и минусовым температурам. Газобетонная кладка возможна при более широком диапазоне условий. [4, с. 157-167]

Оборудование: стоимость 3D-принтера (например, модель «АМТ» S-300 стоит около 8,5 млн руб.) и его обслуживание могут значительно увеличить общую стоимость проекта.

Отделка: 3D-стены часто требуют дополнительной отделки из-за неровностей поверхности, что добавляет к стоимости.

На основе данного расчета можно сделать следующий вывод, газобетонная кладка обычно обходится дешевле 3D-печати как по материалам, так и по общим затратам. Однако 3D-печать может быть выгодна для крупных строительных проектов с типовыми решениями, где можно окупить стоимость оборудования. Для индивидуального дома размером 10×10 м газобетон остаётся более экономичным вариантом. Армирование 3D-стен производится более часто. Примерно каждые 30см – это 10 периметров или 400мп. Газобетонная кладка армируется 1, 5 и 9 ряды в 2 линии – это 6 периметров или 240мп. При этом, армирование 3D стены производится стеклопластиковыми сетками или арматурой, которая стоит дороже стальной, используемой для газобетонной стены. Кроме того, 3D-стены в основании нужно дополнительно анкерить, а перемычки и армопояс выполняются по одинаковой технологии.

Т.е. можно констатировать, что стоимость строительства стен по технологии 3D-печати дороже, чем кладка стен из газобетона. В свою очередь высокая стоимость может компенсироваться большой скоростью печати домов 3D-принтером по сравнению с традиционным методом печати.

Свобода проектирования и устойчивое развитие

Аддитивное строительство открывает новые горизонты в области архитектурного дизайна и экологической устойчивости. Технология позволяет не только строить дешевле и быстрее, но и строить лучше — создавая более выразительные, эффективные и экологически ответственные здания.

Одним из самых значительных качественных преимуществ 3D-печати является освобождение архитекторов от «ограничения прямого угла», навязанной традиционными

строительными материалами (кирпич, блоки, балки). Процесс послойной экструзии по своей природе не делает различий между прямой и кривой линией. Это означает, что создание сложных, криволинейных и органических форм не влечет за собой дополнительных затрат или трудоемкости, в отличие от традиционного строительства, где любая кривизна требует сложных опалубок, ручной резки и подгонки материалов.

Геометрическая свобода имеет не только эстетическое, но и практическое значение. Она позволяет проектировать здания, которые лучше адаптированы к окружающей среде, оптимизируют использование естественного света и вентиляции, а также обладают лучшими акустическими и прочностными характеристиками. Органические формы могут быть более устойчивы к ветровым и сейсмическим нагрузкам. Аддитивное строительство предлагает несколько путей для снижения негативного воздействия строительной индустрии на окружающую среду. Эти преимущества можно разделить на три основные категории: сокращение отходов, инновационные материалы и повышение энергоэффективности. [5, с. 66-69]

Инновационные материалы: Технология стимулирует исследования и разработку новых, более экологичных строительных материалов. Потенциал использования переработанного пластика, промышленных отходов и других вторичных ресурсов для создания печатных смесей открывает путь к интеграции строительства в модель экономики замкнутого цикла. Кроме того, разработка геополимерных бетонов, которые используют промышленные отходы (например, золу-унос) в качестве связующего вместо портландцемента, может значительно сократить углеродный след, поскольку производство цемента является одним из крупнейших источников выбросов CO₂ в мире. Но данная растворная смесь все еще требует доработки.

Энергоэффективность: Гибкость 3D-печати позволяет легко создавать сложные полости внутри стен. Эти полости могут быть спроектированы для оптимального размещения утеплителя, что приводит к созданию более энергоэффективных зданий с меньшими затратами на отопление и кондиционирование в течение всего срока их службы. [6, с. 14-15]

Несмотря на эти очевидные преимущества, важно подходить к оценке экологичности технологии сбалансированно. Хотя сам *процесс* 3D-печати является менее расточительным, доминирующий на данный момент *материал* — специализированный бетон — по-прежнему несет в себе значительные скрытые выбросы углерода из-за использования портландцемента. Следовательно, истинная «зеленая» революция в аддитивном строительстве произойдет только тогда, когда альтернативные связующие, такие как геополимеры, станут коммерчески жизнеспособными и масштабируемыми. Это представляет собой критическую задачу для научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и одновременно открывает огромные возможности для компаний, работающих в области материаловедения.

Отделка и интеграция инженерных систем: Как отмечалось ранее, технология автоматизирует только возведение стен. Необходимость привлечения ручного труда для монтажа кровли, окон, дверей и инженерных коммуникаций остается узким местом в процессе. Это ограничивает общую экономию времени и затрат и создает разрыв между высокотехнологичным этапом печати и традиционными, более медленными этапами отделки.

Долговечность материалов: Лабораторные испытания показывают высокую прочность печатных материалов, долгосрочные эксплуатационные характеристики, такие как устойчивость к циклам замораживания-оттаивания, воздействию влаги и ультрафиолета, все еще находятся на стадии изучения. Отсутствие многолетних данных о поведении таких конструкций в реальных условиях может вызывать осторожность у консервативных участников рынка.

Переход от демонстрационных и единичных проектов к серийному строительству сопряжен с экономическими и логистическими вызовами. Высокая первоначальная

стоимость самого 3D-принтера является значительным капиталовложением для строительных компаний. Кроме того, для эксплуатации этого сложного оборудования требуется персонал с новыми компетенциями, сочетающими знания в области строительства, робототехники и программного обеспечения. Логистика транспортировки и монтажа крупногабаритного порталного оборудования на каждой новой строительной площадке также добавляет сложности и затраты.

Таким образом, можно сделать вывод, что на данном этапе главным препятствием для внедрения является не столько потенциал самой технологии, сколько инерция окружающей экосистемы — регуляторов, страховщиков, финансистов и традиционных участников строительного рынка. Технология уже доказала свою способность строить быстро, недорого и в больших масштабах. Основные проблемы лежат в плоскости интеграции этого нового метода в существующие, сформировавшиеся десятилетиями системы утверждения, финансирования и выполнения строительных работ.

Следовательно, успех на рынке будет сопутствовать не только компаниям с лучшей технологией, но и тем, кто разработает наиболее эффективную стратегию для навигации в строительной среде, обучения заинтересованных сторон и создания стандартизированных систем и нормативов.

Заключение

На основании данного исследования можно сделать следующий вывод, перспектива развития 3D-печати в строительстве - это создание целостной экосистемы, где генеративный дизайн создает оптимальные проекты, роботизированные системы возводят их из многофункциональных, экологичных материалов. Путь от сегодняшнего дня к этому будущему потребует решения множества технических и нормативных проблем, но фундаментальные преимущества технологии делают ее одним из самых многообещающих направлений, способных определить облик строительства в XXI веке и за его пределами.

Технические и материаловедческие барьеры присутствуют. Несмотря на быстрый прогресс, технология всё ещё имеет ряд технических ограничений, которые должны изучаться и разрабатываться решения по модернизации и улучшению технологии.

Список источников

1. Мухаметрахимов Р.Х., Вахитов И.М. Аддитивная технология возведения зданий и сооружений с применением строительного 3D-принтера // Технология и организация строительства Известия КГАСУ, 2017, № 4 (42). С. 353-354.

2. Филюшина К. Э., Костов С. А. Научно-экономический анализ строительства малоэтажных домов с использованием современных материалов // Сетевой научно-практический журнал. Прикладные экономические исследования. 2024. № 6. С. 152-158.

3. Савицкий Н.В., Шатов С.В., Ожищенко О.А. 3D-печать строительных объектов // Вестник Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (216). С. 18-26.

4. Лесовик В.С., Чернышева Н.В., Глаголев Е.С., Дребезгова М.Ю., Ермолаева А.Э. 3D-аддитивные технологии в сфере строительства // Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика. 2016. С. 157-167

5. Дребезгова М.Ю. Современные аддитивные технологии в малоэтажном строительстве // Вестник Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. 2017. № 6 (216). С. 66-69.

6. Пермяков М. Б., Пермяков А. Ф., Давыдова А. М. Аддитивные технологии в строительстве // European Research. 2017. № 1 (24). С. 14-15

Сведения об авторах

Филюшина Кристина Эдуардовна доктор экономических наук, профессор кафедры экономики, организации, управления строительством жилищно-коммунальным комплексом ФГБОУ ВО Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Костов Сергей Александрович студент, молодой ученый ФГБОУ ВО Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия

Information about the authors

Filyushina Kristina Eduardovna, Doctor of Economics, Professor, Department of Economics, Organization, Construction Management of Housing and Communal Complex, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia

Kostov Sergey Alexandrovich, student, young scientist, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia