

УДК [72+69]:004.94

DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-4-108-114

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ (3D-ПЕЧАТЬ)
В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Р.Ш. Акбаралиев, В.С. Семенов

Аннотация. Рассматриваются особенности применения аддитивных технологий (3D-печать) в современной архитектуре и строительстве. Анализируются основные методы строительной 3D-печати, используемые материалы и технологические особенности аддитивного производства. Особое внимание уделяется архитектурным возможностям, которые открывает использование цифровых технологий в проектировании и строительстве зданий. Рассматриваются примеры реализованных объектов, созданных с применением строительной 3D-печати, включая башню Tor Alva в Швейцарии, экологический дом TECLA в Италии, проекты доступного жилья компании ICON в США. Показано, что аддитивные технологии позволяют значительно сократить сроки строительства, снизить расход материалов и расширить возможности архитектурного формообразования. Сделан вывод о высоком потенциале применения 3D-печати в строительстве и её перспективной роли в развитии устойчивой архитектурной среды.

Ключевые слова: аддитивные технологии; 3D-печать; цифровая архитектура; строительные технологии; BIM-моделирование; роботизированное строительство; параметрическая архитектура.

**АЗЫРКЫ АРХИТЕКТУРАДА ЖАНА КУРУЛУШТАГЫ
КОШУМЧА ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫ (3D-БАСЫП ЧЫГАРУУ) КОЛДОНУУ**

Р.Ш. Акбаралиев, В.С. Семенов

Аннотация. Макалада азыркы архитектурада жана курулуш тармагында кошумча технологияларды (3D-басып чыгарууну) колдонуу өзгөчөлүктөрү каралат. Курулуштагы 3D-басып чыгаруунун негизги ыкмалары, колдонулган материалдар жана кошумча өндүрүш технологияларынын өзгөчөлүктөрү талданат. Архитектуралык долбоорлоодо жана имараттарды курууда санариптик технологияларды колдонуу ачкан мүмкүнчүлүктөргө өзгөчө көңүл бурулат. 3D-басып чыгаруу технологиясын колдонуу менен ишке ашырылган объектилердин мисалдары каралат, алардын ичинде Швейцариядагы Tor Alva мунарасы, Италиядагы TECLA экологиялык үйү, ошондой эле АКШдагы ICON компаниясынын жеткиликтүү турак жай долбоорлору бар. Изилдөөнүн жыйынтыгында кошумча технологиялар курулуш мөөнөтүн кыйла кыскартууга, материалдардын сарпталышын азайтууга жана архитектуралык формаларды жаратуунун мүмкүнчүлүктөрүн кеңейтүүгө шарт түзөрү көрсөтүлдү. Макалада 3D-басып чыгаруунун курулуш тармагында колдонулушунун чоң потенциалы жана туруктуу архитектуралык чөйрөнү өнүктүрүүдөгү келечектүү ролу белгиленет.

Түйүндүү сөздөр: кошумча технологиялар; 3D-басып чыгаруу; санариптик архитектура; курулуш технологиялары; BIM-моделдөө; роботтоштурулган курулуш; параметрдик архитектура.

**APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES (3D-PRINTING)
IN MODERN ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION**

R.Sh. Akbaraliev, V.S. Semenov

Abstract. The article examines the features of the application of additive technologies (3D-printing) in modern architecture and construction. The main methods of construction 3D-printing, the materials used, and the technological features of additive manufacturing are analyzed. Particular attention is paid to the architectural opportunities opened by the use of digital technologies in the design and construction of buildings. Examples of implemented projects created using construction 3D-printing are considered, including the Tor Alva Tower in Switzerland, the TECLA ecological

house in Italy, and affordable housing projects developed by ICON in the United States. It is shown that additive technologies make it possible to significantly reduce construction time, decrease material consumption, and expand the possibilities of architectural form generation. The article concludes that 3D-printing has high potential for application in the construction industry and may play a significant role in the development of a sustainable architectural environment.

Keywords: additive technologies; 3D-printing; digital architecture; construction technologies; BIM-modeling; robotic construction; parametric architecture.

Введение. В XXI веке архитектура и строительная индустрия переживают этап активной технологической трансформации, связанной с развитием цифровых технологий, роботизации и автоматизации строительных процессов. Современные методы проектирования все чаще основываются на использовании информационных технологий, параметрического моделирования и информационного моделирования зданий (BIM) [1].

Одним из наиболее перспективных направлений развития строительной отрасли является применение аддитивных технологий, или технологий трёхмерной печати. Аддитивное производство (Additive Manufacturing) представляет собой процесс создания объектов путем послойного нанесения материала на основе цифровой модели [2].

В строительстве данная технология получила название строительной 3D-печати. В отличие от традиционных методов возведения зданий, основанных на использовании опалубки и значительных трудовых ресурсов, аддитивные технологии позволяют автоматизировать строительный процесс и существенно сократить сроки строительства [3].

В последние годы интерес к строительной 3D-печати значительно возрос. Архитектурные бюро, научно-исследовательские центры и строительные компании активно экспериментируют с новыми методами аддитивного строительства и реализуют пилотные проекты. Среди наиболее известных примеров можно отметить башню Tor Alva в Швейцарии, экспериментальный дом TECLA в Италии и проекты жилых кварталов компании ICON в США [4].

Цель данной статьи – рассмотреть особенности применения аддитивных технологий в современной архитектуре, проанализировать основные методы строительной 3D-печати и рассмотреть примеры реализованных архитектурных объектов.

Технологические основы строительной 3D-печати. Технология строительной 3D-печати основана на использовании цифровых моделей зданий, созданных в системах автоматизированного проектирования (CAD) или информационного моделирования зданий (BIM). На основе цифровой модели формируется программа управления строительным принтером, которая определяет траекторию движения печатающей головки и параметры нанесения строительной смеси [5].

Наиболее распространённым методом строительной 3D-печати является экструзия бетонной смеси. В данном процессе роботизированный строительный принтер через специальное сопло выдавливает бетонную смесь, формируя конструкцию здания слой за слоем. Каждый последующий слой наносится поверх предыдущего, постепенно создавая пространственную форму конструкции [6].

Помимо экструзионной технологии в строительстве исследуются и другие методы аддитивного производства. К ним относятся селективное лазерное спекание (SLS), технология Binder Jetting и стереолитография. Однако в масштабах строительных объектов наибольшее распространение получила именно экструзия бетонных смесей [7].

В качестве материалов для строительной 3D-печати применяются специальные бетонные смеси с модифицирующими добавками, обеспечивающими необходимую пластичность и скорость твердения. В состав таких материалов могут входить фиброволокна, полимерные добавки, а также переработанные строительные отходы, что способствует повышению экологичности строительства [8].

Развитие строительной 3D-печати тесно связано с развитием робототехники. Современные строительные принтеры представляют собой крупногабаритные роботизированные системы, способные перемещаться по строительной площадке или работать в составе порталных конструкций. Управление такими системами осуществляется при помощи специализированного программного обеспечения.

Архитектурные возможности аддитивных технологий. Использование аддитивных технологий открывает новые возможности для архитектурного формообразования. Одним из ключевых преимуществ 3D-печати является возможность создания сложных геометрических форм без использования традиционной опалубки [9].

Традиционные методы строительства часто ограничивают архитекторов в выборе форм, поскольку создание криволинейных конструкций требует значительных затрат времени и материалов. Аддитивные технологии позволяют создавать органические архитектурные формы, параметрические структуры и сложные декоративные элементы с высокой точностью.

Еще одним важным преимуществом аддитивных технологий является сокращение сроков строительства. Роботизированные строительные системы способны работать непрерывно, что позволяет существенно ускорить процесс возведения зданий. В некоторых проектах печать стен небольшого жилого дома занимает менее суток [10].

Кроме того, применение 3D-печати способствует снижению количества строительных отходов. В традиционном строительстве значительная часть материалов теряется в процессе обработки. В аддитивном производстве материал используется только там, где он необходим для формирования конструкции.

Также использование роботизированных строительных систем позволяет снизить трудозатраты и повысить безопасность строительных работ.

Технологические основы строительной 3D-печати. Строительная 3D-печать представляет собой технологию аддитивного производства, основанную на послойном формировании строительных конструкций с использованием роботизированных систем и цифровых моделей зданий. Основой данной технологии является интеграция методов цифрового проектирования, автоматизированного управления строительными процессами и использования специальных строительных материалов, пригодных для послойного нанесения [5].

Процесс аддитивного строительства начинается с разработки цифровой модели объекта в системах автоматизированного проектирования (CAD) или информационного моделирования зданий (BIM). Цифровая модель содержит геометрические параметры конструкции, информацию о материалах, инженерных системах и строительных элементах. Далее модель преобразуется в специальный формат, который используется программным обеспечением строительного принтера для управления процессом печати.

На следующем этапе формируется программа управления принтером (G-code или аналогичные форматы), которая определяет траекторию движения печатающей головки, скорость подачи материала, толщину слоев и другие технологические параметры печати. Роботизированная система перемещает печатающую головку по заданной траектории и наносит строительный материал слой за слоем, формируя пространственную структуру здания.

Одной из ключевых особенностей строительной 3D-печати является необходимость использования специальных строительных смесей. Такие смеси должны обладать рядом технологических характеристик, включая высокую пластичность, способность сохранять форму после нанесения и достаточную прочность после затвердевания. Для этого в состав материалов добавляются модифицирующие компоненты, ускорители твердения, фиброволокна и полимерные добавки [6].

Наиболее распространенной технологией строительной 3D-печати является экструзия бетонной смеси. В данной технологии бетонная смесь подается через сопло печатающей головки и послойно укладывается на строительной площадке. Каждый новый слой наносится поверх предыдущего до формирования полной конструкции стен или других элементов здания. Экструзионная технология широко применяется при строительстве жилых домов, малых архитектурных форм и экспериментальных сооружений.

В зависимости от конструкции оборудования строительные 3D-принтеры могут иметь различные типы кинематических систем. Наиболее распространены:

- порталные принтеры, перемещающиеся по направляющим над строительной площадкой;
- роботизированные манипуляторы, обеспечивающие высокую гибкость движения печатающей головки;
- мобильные строительные роботы, способные перемещаться непосредственно по строительной площадке.

Использование роботизированных систем позволяет автоматизировать значительную часть строительных процессов и повысить точность выполнения конструктивных элементов.

Помимо экструзионной технологии в строительстве исследуются и другие методы аддитивного производства, которые могут применяться для создания отдельных элементов зданий или архитектурных деталей (рисунок 1).

Применение технологий 3D-печати в строительной практике. В последние годы аддитивные технологии начинают активно внедряться в практику архитектурного проектирования и строительства. Основными направлениями их применения являются:

1. Строительство жилых зданий. Одним из наиболее распространённых направлений применения строительной 3D-печати является возведение малоэтажных жилых домов. Роботизированные строительные принтеры позволяют печатать стеновые конструкции домов непосредственно на строительной площадке. Такой подход позволяет значительно сократить сроки строительства и уменьшить стоимость возведения зданий.

2. Создание архитектурных элементов сложной формы. Аддитивные технологии позволяют изготавливать декоративные элементы, фасадные панели и архитектурные конструкции сложной геометрии. Благодаря цифровому моделированию архитекторы получают возможность реализовывать параметрические и органические формы, которые трудно реализовать традиционными строительными методами.

3. Быстрое строительство в чрезвычайных ситуациях. Строительная 3D-печать может использоваться для быстрого возведения временного жилья после стихийных бедствий или гуманитарных

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ		
ТЕХНОЛОГИЯ	ПРИНЦИП	ПРИМЕНЕНИЕ
ЭКСТРУЗИЯ БЕТОНА	ПОСЛОЙНОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ СМЕСИ	 жилые дома
Binder Jetting (струйное связывание)	СКЛЕИВАНИЕ ПОРОШКА СВЯЗУЮЩИМ	 экспериментальные конструкции
SLS	ЛАЗЕРНОЕ СПЕКАНИЕ МАТЕРИАЛА	 элементы конструкций
Роботизированная печать	АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ НАНЕСЕНИЕ	 элементы конструкций

Рисунок 1 – Основные технологии 3D-печати в строительстве

кризисов. Благодаря высокой скорости печати такие технологии позволяют создавать жилые конструкции за короткое время.

4. Устойчивое и экологичное строительство. Аддитивное производство способствует снижению количества строительных отходов и более эффективному использованию материалов. В некоторых проектах применяются переработанные строительные материалы, природные компоненты и геополлимерные смеси.

5. Строительство в экстремальных условиях. Перспективным направлением является использование 3D-печати для строительства объектов в удалённых регионах, включая арктические территории, пустыни и потенциально внеземные базы. В таких условиях автоматизированные строительные системы могут значительно упростить процесс возведения сооружений.

Таким образом, строительная 3D-печать представляет собой инновационную технологию, способную существенно изменить традиционные методы строительства. Интеграция аддитивных технологий с цифровым проектированием и роботизированными системами открывает новые возможности для развития современной архитектуры.

Примеры применения 3D-печати в современной архитектуре. Одним из наиболее значимых проектов в области аддитивного строительства является расположенная в швейцарской деревне Мулегнс башня *Tor Alva* (рисунок 2). Высота сооружения составляет около 30 метров, что делает его одним из самых высоких зданий, созданных с использованием строительной 3D-печати [11].

Башня состоит из тридцати двух бетонных колонн сложной геометрической формы, формирующих четырехэтажную конструкцию. Особенностью проекта является использование 3D-печатных элементов в качестве несущих конструкций. В процессе строительства применялись роботизированные системы, выполнявшие печать бетонных элементов и установку армирующих компонентов.

Проект был разработан архитекторами Майклом Ханзмайером и Бенджамином Дилленбургером совместно с исследователями ETH Zurich.

Экологический дом TECLA (Италия). Другим значимым примером применения аддитивных технологий является экспериментальный жилой дом TECLA, созданный компанией WASP совместно с архитектурным бюро Mario Cucinella Architects (рисунок 3) [12].

Особенностью данного проекта является использование экологически чистых материалов. Дом был напечатан из смеси местной глины, рисовой шелухи и природных волокон. Использование

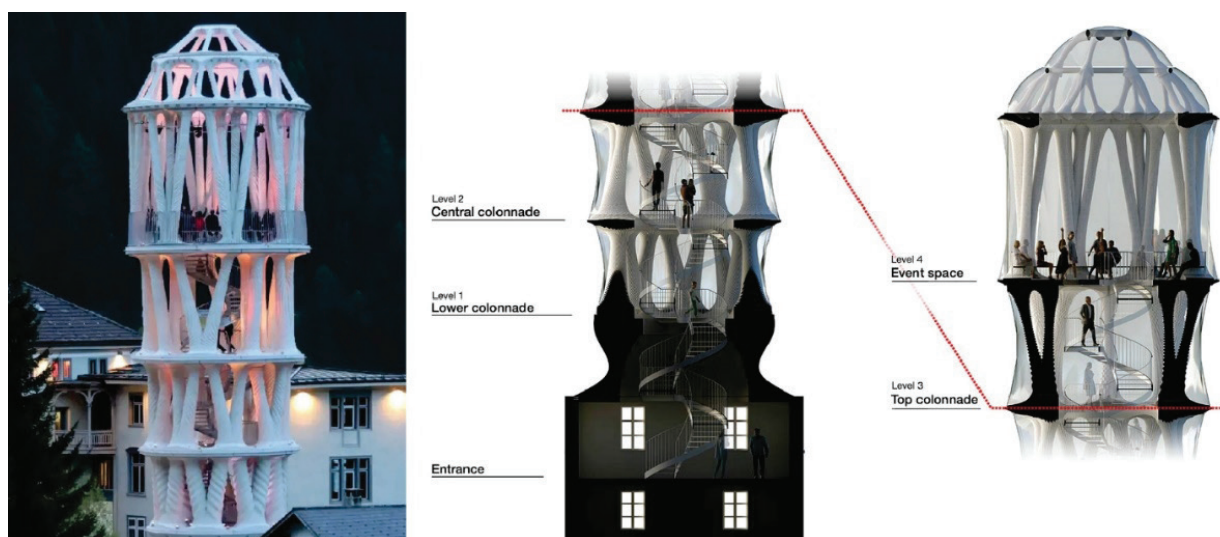


Рисунок 2 – Башня Tor Alva (Швейцария) [11]



Рисунок 3 – Экологический дом TECLA (Италия) [12]



Рисунок 4 – Жилой дом компании ICON, построенный (напечатанный) 3D-принтером

локальных материалов позволяет значительно снизить экологический след строительства. Архитектурная форма здания имеет органический характер и напоминает купольную структуру. Такая форма обеспечивает эффективную естественную вентиляцию и комфортный микроклимат внутри здания.

Проекты компании ICON (США)

Компания ICON активно развивает технологии строительной 3D-печати для создания доступного жилья [13]. В штате Техас реализованы проекты жилых кварталов, где дома печатаются с использованием роботизированных строительных систем (рисунок 4).

Строительные принтеры компании позволяют печатать основные конструкции зданий всего за несколько дней. После завершения печати выполняется монтаж кровли, окон и инженерных систем. Основной целью данных проектов является снижение стоимости строительства и повышение доступности жилья.

Заключение. Аддитивные технологии становятся важным инструментом современной архитектуры и строительной индустрии. Использование строительной 3D-печати позволяет существенно сократить сроки возведения зданий, уменьшить расход материалов и расширить возможности архитектурного формообразования. Реализованные проекты, такие как башня Tor Alva, дом TECLA, жилые дома и комплексы компании ICON, демонстрируют высокий потенциал данной технологии. Развитие

роботизированных строительных систем, новых строительных материалов и цифровых технологий открывает широкие перспективы для применения аддитивного производства в архитектуре.

В будущем 3D-печать может стать одним из ключевых методов строительства, способствующих созданию устойчивой, экологичной и технологичной архитектурной среды.

Поступила: 11.03.2026; рецензирована: 25.03.2026; принята: 27.03.2026.

Литература

1. *Eastman C.* BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling / C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston. Hoboken: Wiley, 2018. URL: <https://www.wiley.com/en-us/BIM+Handbook%3A+A+Guide+to+Building+Information+Modeling+for+Owners%2C+Designers%2C+Engineers%2C+Contractors%2C+and+Facility+Managers%2C+3rd+Edition-p-9781119287537> (дата обращения: 15.02.2026).
2. *Gibson I.* Additive Manufacturing Technologies / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. New York: Springer, 2021. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-56127-7> (дата обращения: 17.02.2026).
3. *Buswell R.* 3D-printing using concrete extrusion: A roadmap for research / R. Buswell, W. Leal de Silva, S. Jones, J. Dirrenberger // Cement and Concrete Research. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884618300976> (дата обращения: 19.02.2026).
4. *Lim S.* Developments in construction-scale additive manufacturing / S. Lim, R. Buswell, T. Le, S. Austin // Automation in Construction. 2012. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580511001602> (дата обращения: 21.02.2026).
5. *Khoshnevis B.* Automated construction by contour crafting / B. Khoshnevis // Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction. URL: https://www.researchgate.net/publication/228829909_Automated_construction_by_contour_crafting (дата обращения: 23.02.2026).
6. *Perrot A.* Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques / A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre // Materials and Structures. URL: <https://chatgpt.com/c/69b142b2-8fe4-8388-aabc-90d8d1e45237> (дата обращения: 25.02.2026).
7. *Ngo T.* Additive manufacturing in construction / T. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. Nguyen, D. Hui // Composites Part B. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816309936> (дата обращения: 27.02.2026).
8. *Panda B.* Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3-D concrete printing / B. Panda, M. Tan. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817310171> (дата обращения: 01.03.2026).
9. *Oxman N.* Digital fabrication in architecture / N. Oxman // Architectural Design. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ad.1923> (дата обращения: 03.03.2026).
10. *Bos F.* Additive manufacturing of concrete in construction / F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet // Automation in Construction. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580516302226> (дата обращения: 05.03.2026).
11. *Dillenburger B.* Digital Grotesque: Architecture Beyond Representation / B. Dillenburger, M. Hansmeyer. URL: <https://dfab.ch/projects/digital-grotesque> (дата обращения: 07.03.2026).
12. *Cucinella M.* TECLA: Technology and Clay Architecture / M. Cucinella. URL: <https://www.mcarchitects.it/en/projects/tecla> (дата обращения: 10.03.2026).
13. Through additive construction and thoughtful design, we deliver innovative and sustainable structures built for the future. URL: <https://www.iconbuild.com/projects/house-zero> (дата обращения: 10.03.2026).