

А.В. АЛЕКСАНИН¹, К.В. ЛЮБАВИНА²¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия

ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МАТЕРИАЛОЕМКОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ВОЗВОДИМЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

***Аннотация:** Внедрение аддитивных технологий в строительную отрасль ведет к технологическому обновлению всего строительного комплекса. Строительная 3D-печать формирует принципиально новый подход не только к производственным процессам, но и к самой архитектуре, открывая новые, беспрецедентные возможности. Обладая значительным потенциалом для оптимизации процессов и снижения материалоемкости, аддитивное производство открывает перспективы для устойчивого развития высокоэффективного строительства. Несмотря на растущий интерес к аддитивным технологиям, вопросы их комплексной оценки и оптимального применения требуют дальнейшего изучения. Особую актуальность приобретает системный анализ теплотехнических характеристик строительных конструкций, создаваемых методами 3D-печати. Статья посвящена актуальной проблеме оптимизации строительных конструкций, возводимых методами аддитивного производства. Несмотря на увеличение распространения 3D-печати в строительстве, комплексное исследование взаимосвязи геометрических параметров, теплотехнических характеристик и материалоемкости остается недостаточно изученным. Целью работы является оценка влияния ключевых геометрических параметров на эксплуатационные и ресурсные показатели ограждающих конструкций. В исследовании применялась комплексная методика, сочетающая параметрическое моделирование с последующим теплотехническим анализом. Были рассмотрены три различные конфигурации стеновых элементов с синусоидальной геометрией, варьируемые по толщине стенки и количеству синусоид. Практическая значимость работы заключается в разработке принципов проектирования оптимальных строительных конструкций для аддитивного производства, позволяющих одновременно достигать снижения материалоемкости и улучшения энергоэффективности. Полученные результаты представляют ценность для дальнейшего развития устойчивого строительства и оптимизации ресурсопотребления в строительной отрасли.*

***Ключевые слова:** аддитивные технологии, строительная 3D-печать, тепловая эффективность, энергоэффективность, материалоемкость*

A. V. ALEKSANIN¹, K. V. LYUBAVINA²¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), MGSU, Moscow, Russia² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), MGSU, Moscow, Russia

THE INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS ON THERMAL CHARACTERISTICS AND MATERIAL CAPACITY OF BUILDING STRUCTURES CONSTRUCTED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHODS

Abstract. *The integration of additive technologies into the construction industry is driving a technological renewal of the entire building sector. Construction 3D printing is creating a fundamentally new approach, not only to manufacturing processes but also to architecture itself, unlocking unprecedented new possibilities. With significant potential for process optimization and reducing material consumption, additive manufacturing opens up prospects for the sustainable development of high-performance construction. Despite the growing interest in additive technologies, the issues surrounding their comprehensive assessment and optimal application require further study. A systematic analysis of the thermal performance characteristics of building structures created by 3D printing methods is becoming particularly relevant. This article addresses the pressing problem of optimizing building structures constructed using additive manufacturing methods. Despite the increasing prevalence of 3D printing in construction, a comprehensive investigation into the relationship between geometric parameters, thermal performance characteristics, and material consumption remains insufficiently studied. The aim of this work is to evaluate the influence of key geometric parameters on the operational performance and resource efficiency of building envelopes. The study employed a comprehensive methodology combining parametric modeling with subsequent thermal performance analysis. Three different configurations of wall elements with sinusoidal geometry were examined, varying in wall thickness and the number of sinusoids. The practical significance of this work lies in developing design principles for optimizing building structures intended for additive manufacturing, enabling a simultaneous reduction in material consumption and improvement in energy efficiency. The results obtained are valuable for the further development of sustainable construction and the optimization of resource consumption in the building industry.*

Keywords: *additive technologies, 3D construction printing, thermal efficiency, energy efficiency.*

1. Введение

Внедрение аддитивных технологий оказало трансформационное воздействие на строительный комплекс, существенно расширив потенциал смежных направлений - от архитектурного искусства до инжиниринга и, непосредственно, строительного производства [1]. Увеличение объемов инвестиций в 3D-печать подтверждает, что ее широкое распространение — это лишь вопрос времени. Рост числа специализированных компаний обусловлен высокой инновационностью метода, который радикально трансформирует устоявшиеся технологические цепочки [2]. Таким образом, технологическое превосходство аддитивных процессов над традиционными становится ключевым фактором их растущей конкурентоспособности [3,4].

Аддитивные технологии дарят архитектуре свободу форм, позволяя воплощать в жизнь самые сложные параметрические оболочки. Уникальные задумки обретают реальность благодаря послойной печати, которая управляется точными компьютерными алгоритмами [5,6]. Разнообразие доступного оборудования, от порталных систем до роботизированных манипуляторов, позволяет гибко адаптировать технологию под задачи конкретного проекта [7]. Разработка специализированных строительных смесей - от быстросхватывающихся бетонов до составов с фиброй и полимерами - обеспечивает необходимые эксплуатационные характеристики возводимых конструкций [8].

Фундаментальные исследования в области строительной 3D-печати охватывают как разработку новых материалов, так и оценку их практического применения. С одной стороны, ведутся интенсивные работы по созданию и изучению свойств специализированных составов, включая цементные смеси [9], бетоны на цементном вяжущем [10] и геополимеры [11], что позволяет целенаправленно формировать требуемые эксплуатационные характеристики конструкций. С другой стороны, комплексный анализ реальных проектов, таких как строительство полноценных домов, демонстрирует не только технологическую осуществимость метода, но и его значительные преимущества с точки зрения снижения воздействия на окружающую среду [12] и экономической эффективности [13, 14].

Для укрепления конкурентоспособности аддитивных технологий на строительном рынке ключевым условием является обеспечение научно-технического сопровождения их устойчивого развития. Несмотря на увеличивающийся объем исследований в области 3D-печати, комплексный анализ её производственного цикла и сравнительная оценка

энергоэффективности и материалоемкости на фоне традиционных процессов остаются без должного внимания.

Количество реализованных проектов с применением 3D-печати неуклонно растет. В условиях повышенного внимания к экологии и энергоэффективности данные технологии становятся ключевым инструментом достижения целей «зеленого» строительства. Аддитивное производство предлагает комплекс преимуществ, включая свободу в создании сложных геометрических форм и возможность оптимизировать заполнение внутренних полостей в конструкциях, что в совокупности ведет к значительному снижению расхода материалов [15].

Многочисленные исследования посвящены сравнительному анализу строительной 3D-печати и традиционных методов. Ряд работ особо подчеркивает критическую важность выбора печатного материала, обусловленную требованиями к теплотехническим свойствам ограждающих конструкций [16,17]. Анализ научных публикаций выявил противоречие: в случае монолитной печати конструктивная надежность напечатанного бетона возрастает с усложнением его геометрии, тогда как при использовании технологии печати опалубок-оболочек максимальная эффективность достигается, напротив, за счет упрощения форм. При этом аспект влияния геометрической сложности на общие теплотехнические показатели ограждающих конструкций остается практически не изученным.

2. Модели и методы

Исследование проводилось на основе анализа работы принтера типа XYZ (см. рисунок 1) со стандартной бетонной смесью для аддитивных работ. В качестве объекта исследования была выбрана синусоидальная геометрия стенки, в рамках которой варьировались толщина и взаимное расположение слоев. Изменения тепловых показателей отслеживались с помощью методологии анализа жизненного цикла (LCA). К анализу был принят принтер компании AMT S300 стандартной модификации, параметры печати принтера приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры печати.

Диаметр сопла [мм]	40-60
Мощность [кВт]	1
Скорость печати [мм/с]	100
Потребление энергии [Вт·ч/кг]	1,67



Рисунок 1 - Строительный 3D принтер козлового типа XYZ

Процесс монолитной 3D-печати происходит непосредственно на строительной площадке, где ограждающие конструкции возводятся как единое целое. Ключевое преимущество метода - отсутствие необходимости изготовления и монтажа множества отдельных элементов. Каждый этаж формируется за один непрерывный цикл печати, ограниченный лишь рабочим полем портальной системы.

Портальный принтер представляет собой каркасную конструкцию с экструзионной головкой, перемещающейся по осям XYZ. Для его обслуживания требуется операторская группа из 4-5 человек. Особые требования предъявляются к печатающей смеси: её состав, включающий пластификаторы, должен обеспечивать оптимальную текучесть для экструзии и достаточную вязкость для сохранения формы каждого слоя. Примечательно, что приготовление смеси осуществляется непосредственно на строительной площадке.

После выбора типа печатающей установки следующим этапом является проектирование геометрической конфигурации ограждающих конструкций. Для достижения эффекта удлинения пути теплового потока и повышения конструктивной прочности было применено синусоидальное взаиморасположение внутренних стенок. Образованные в результате такого подхода полости подлежат заполнению теплоизоляционным материалом.

Для сравнительного анализа различных вариантов в среде Rhino с использованием программного обеспечения Grasshopper разработана общая параметрическая модель. Модель позволяет генерировать весь спектр требуемых конфигураций путем вариации четырех ключевых параметров: количества синусоид (NS), толщины стенки (T), а также ее длины (X) и ширины (Y) (рисунок 2).

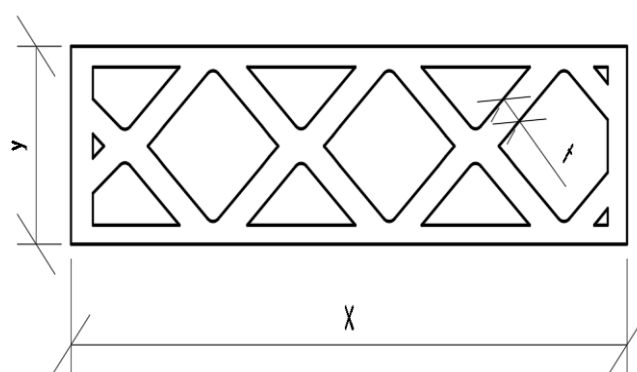


Рисунок 2 - Геометрические параметры анализируемой модели

Базовыми параметрами модели были приняты: толщина стенки - 40 мм, длина насадки - 60 мм и общая длина элемента - 100 мм. Вариация количества и протяженности внутренних синусоид достигается за счет корректировки толщины слоя и длины насадки соответственно. Для проведения сравнительного анализа геометрические конфигурации были выделены три основные модели: М1 — с одной синусоидой, М2 — с двумя синусоидами, и М2.1. с двумя синусоидами, но увеличенной толщиной стенки (рисунок 3).

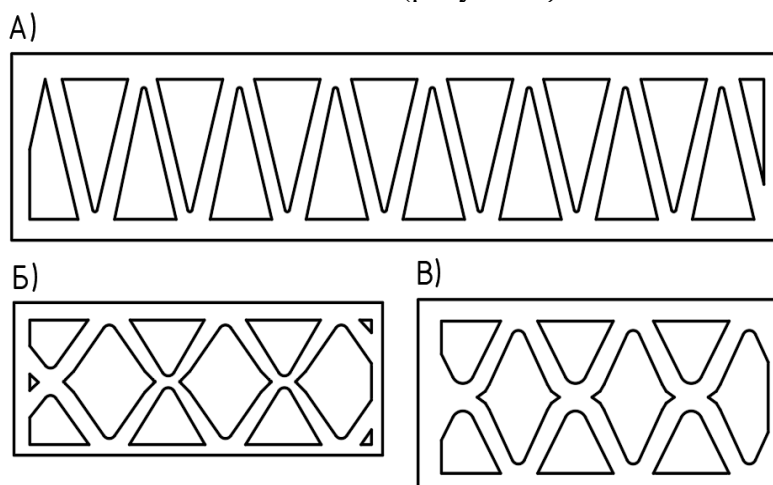


Рисунок 3 – Геометрические модели конфигурации: А – модель с одной синусоидой (М1); Б – модель с двумя синусоидами (М2); В – модель с двумя синусоидами, но увеличенной толщиной стенки (М2.1)

Коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций, при выполнении конструктивных требований, можно скорректировать за счет вариации двух ключевых

параметров 3D-печати: толщины стенок и уровня геометрической сложности. Эти параметры, в свою очередь, непосредственно определяют расход материала и время печати, что необходимо учитывать при количественной оценке. В данном исследовании сравнительный анализ проводился для элементов оболочки с идентичным коэффициентом теплопередачи, что соответствует требованию стандарта ГОСТ Р ИСО 14040—2022 о необходимости обеспечения единых количественных характеристик при сопоставлении различных сценариев.

Методология включала разработку параметрического алгоритма, генерирующего конфигурации на основе заданных критериев. Для расчета коэффициента теплопередачи полученных сечений использовалось интегрирование с программным комплексом THERM, реализующим метод конечных элементов. Данный подход позволил осуществлять итеративное изменение геометрии в режиме прямого взаимодействия с оценкой ее теплотехнических свойств.

Решение задачи было выполнено в три этапа:

1. Параметризация геометрических характеристик элементов. Для проведения анализа было выбрано 3 различных конфигурации элементов ограждающих конструкций. При моделировании образцов изменялись не только общая толщина элемента, варьируемыми параметрами стали также толщина слоя и количество синусоид.

2. Определение тепловых параметров исследуемых элементов. В качестве материала для печати была выбрана печатающая смесь с теплопроводностью 0,28 Вт/(мК). В качестве материала для заполнения ячеек был выбран изоляционный материал на основе целлюлозного волокна с теплопроводностью 0,04 Вт/(мК).

3. Итеративный термический анализ каждой из трех конфигураций элементов. Анализ был выполнен на основе параметрической модели, к которой был применен алгоритм термического анализа с использованием базы Grasshopper на основе программного обеспечения THERM (рисунок 4).

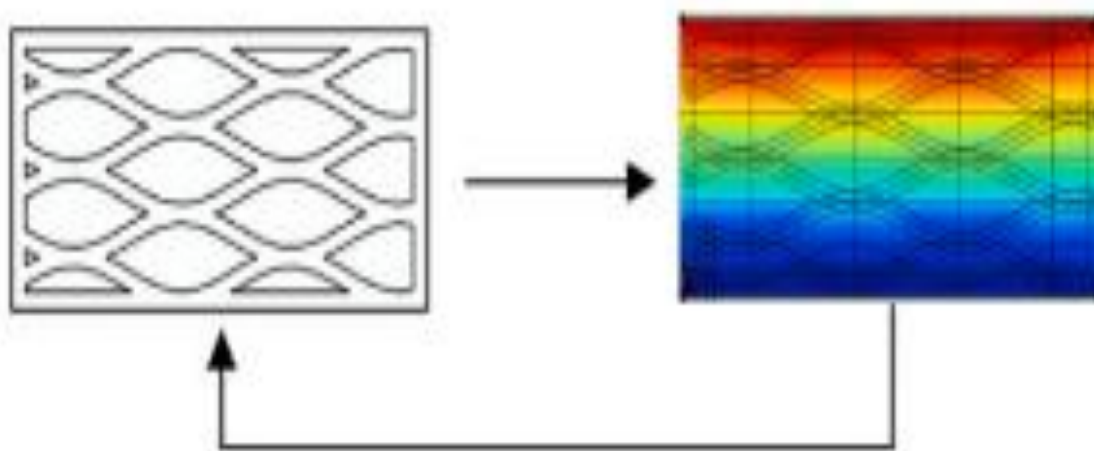


Рисунок 4 - Схематичный анализ данных конфигурации модели

Единый критерий - идентичные тепловые характеристики - позволил объективно оценить корреляцию между расходом материала и конструктивной сложностью, выявив тем самым как перспективные преимущества, так и ограничения применяемой технологии. Данные по трем элементам и их параметрам отражены в таблице 2. За функциональную единицу исследования принята секция наружной ограждающей стены здания со средним коэффициентом теплопередачи от 0,28 до 0,29 Вт/м²·К.

Таблица 2 - Сводная таблица параметров трех анализируемых элементов конфигурации

№ модели	Толщина стенки, (см)	Число синусоид, (шт)	X, (см)	Y, (см)	Коэффициент теплопередачи, (Вт/(м²·К))
M1	6	1	100	49	0,29
M2	4	2	100	40	0,28
M2.1	6	2	100	51	0,29

Параметры материалов для моделей задавались с учетом использования суперпластификаторов, добавок для регулирования вязкости, а также полипропиленовых волокон. В анализе применялся бетон плотностью 2,30 т/м³. Вес бетона и изоляционного материала для каждой конфигурации был принят на основе моделирования, которые в свою очередь принимаются по включенным базам данных.

3. Результаты исследования и их анализ

В рамках оценки теплотехнических характеристик для достижения нормируемого сопротивления теплопередаче была оптимизирована геометрия элементов: за счёт увеличения толщины стенки и числа синусоид. Это решение позволило значительно удлинить путь теплового потока и, как следствие, снизить общую толщину конструкции при сохранении её высоких теплоизоляционных свойств. Основные результаты моделирования по трем анализируемым элементам отражены в таблице 3. В результате исследования установлено, что наиболее эффективной конструкцией является модель №M2, которая имеет наименьшую массу (441,8 кг) и при этом достигает лучшего (наименьшего) коэффициента теплопередачи (0,28 Вт/(м²·К)). Это указывает на успешную оптимизацию: удалось снизить вес и улучшить теплоизоляционные характеристики одновременно.

Таблица 3 - Результаты теплотехнического моделирования, на основании нормируемого коэффициента теплопередачи

№ Модели	Масса элемента, кг			Геометрические параметры элементов				
	Всего	Бетон	Изоляц ия	<u>Толщина стенки, (см)</u>	<u>Число синусо ид, (шт)</u>	<u>X, (см)</u>	<u>Y, (см)</u>	<u>Коэффициент теплопередачи, (Вт/(м²·К))</u>
№M1	620,5	609,9	10,6	<u>6</u>	<u>1</u>	<u>100</u>	<u>49</u>	<u>0,29</u>
№M2	441,8	431,6	10,2	<u>4</u>	<u>2</u>	<u>100</u>	<u>40</u>	<u>0,28</u>
№M2.1	688,3	678,0	10,3	<u>6</u>	<u>2</u>	<u>100</u>	<u>51</u>	<u>0,29</u>

В ходе исследования также проведён сравнительный анализ материалоёмкости рассматриваемых геометрических моделей. Установлено, что использование порталной системы для монолитной 3D-печати объективно приводит к повышенному расходу бетонной смеси. Ключевыми факторами, определяющими объём затрачиваемого материала, являются толщина стенки и количество синусоид, формирующих её внутреннюю конфигурацию. Результаты моделирования подтверждают данную зависимость: для достижения заданного коэффициента теплопередачи необходимо увеличение диаметра сопла и числа синусоид, а также требуется увеличение толщины стенки (рисунок 5). Это, в свою очередь, приводит к увеличению массы конструкции и росту её ударной вязкости. Следовательно, с экологической точки зрения, приоритетными являются решения с более тонкими стенами и упрощенной геометрией, характеризующиеся меньшей материалоёмкостью.

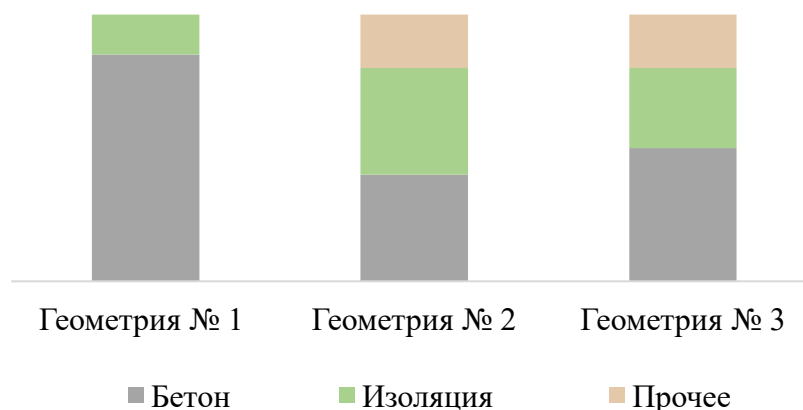


Рисунок 5 - Соотношение материалов для всех конфигураций анализа

Повышение экологичности бетонных смесей может быть достигнуто за счет замены портландцемента на альтернативные вяжущие, такие как геополимерный бетон. Дальнейшее снижение воздействия на окружающую среду возможно при использовании полипропиленовой фибры из переработанных материалов.

4. Заключение

1. Проведенное исследование демонстрирует значительное влияние геометрических параметров на теплотехнические характеристики и материалоемкость строительных конструкций, возводимых методами аддитивного производства. Сравнительный анализ трех конфигураций с идентичными требованиями к теплоизоляции выявил существенные различия в их массе и расходе материалов.

2. Ключевым результатом работы стало выявление оптимальной конфигурации (Модель М2), сочетающей минимальную массу (441,8 кг) с наилучшим коэффициентом теплопередачи (0,28 Вт/м²·К). Этот результат подтверждает гипотезу о возможности одновременного улучшения энергоэффективности и снижения материалоемкости за счет целенаправленной геометрической оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галишникова В.В., Коренева А.И. Техничко-экономическое сравнение строительства зданий с применением аддитивной и традиционной технологий производства. Строительное производство. 2025. № 2. С. 118-127.
2. Петросян Р.С., Абрегов М.А. Перспективы внедрения аддитивных технологий при проведении капитального ремонта многоквартирных жилых домов (МКД). Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. С. 255-259.
3. Титов Г.А. Материалы для аддитивных технологий в строительстве. Инженерные исследования. 2022. № 3 (8). С. 38-49.
4. Сулейманова Л.А., Огнев Н.В. Оценка возведения стен здания с помощью 3d-принтера в сравнении с традиционным строительством из бетонных блоков. Университетская наука. 2017. № 2 (4). С. 13-15.
5. Красных С.С., Шапошников А.В. Использование технологии 3d-печати при строительстве малоэтажных зданий. Техника и технологии строительства. 2025. № 1 (41). С. 45-51.
6. Kazemian A., Yuan X., Meier R., Khoshnevis B. Performance-Based Testing of Portland Cement Concrete for Construction-Scale 3D Printing. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 2: 13–35. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00002-6
7. Hambach M., Rutzen M., Volkmer D. Properties of 3D-Printed Fiber-Reinforced Portland Cement Paste. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J. G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 5: 73–113. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00005-1
8. Nam Y.J., Hwang Y.K., Park J.W., Lim Y.M. Fiber-Reinforced Cementitious Composite Design with Controlled Distribution and Orientation of Fibers Using Three-Dimensional Printing Technology. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 4: 59–72. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00004-X

9. Sanjayan J.G., Nematollahi B. 3D Concrete Printing for Construction Applications. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 1: 1–11. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00001-4
10. Feng P., Meng X., Chen J.F., Ye L. Mechanical Properties of Structures 3D-Printed With Cementitious Powders. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 9: 181–209. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00009-9
11. Xia M., Nematollahi B., Sanjayan J.G. Properties of Powder-Based 3D Printed Geopolymers. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 13: 265–280. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00013-0
12. Abdalla, H., Parvez Fattah, K., Abdallah, M., Tamimi, A.K., Tajani, F., Locurcio, M., Di Liddo, F., 2021. Environmental footprint and economics of a full-scale 3D-printed house, 2021 Sustainability 13, 11978. <https://doi.org/10.3390/SU132111978>, 11978 13.
13. Берсенева М.Л., Клиндух Н.Ю., Данченко Т.В., Якшина А.А. Экономическая эффективность аддитивных технологий в строительной отрасли. Вестник евразийской науки. 2020. Т 12. №1. С. 3.
14. Тиньков С.А., Нарежная Т.К. Использование строительного 3d принтирования для решения жилищных проблем населения. Экономика и предпринимательство. 2021. № 6 (131). С. 1261-1265.
15. В.П. Грахов, С.А. Мохначев, О.В. Бороздов. Влияние развития 3D-технологий на экономику строительства // Фундаментальные исследования. – 2014. – 11–12: 2673–2676. DOI:10.18720/CUBS.63.4
16. Gaudillière N., Duballet R., Bouyssou C., Mallet A., Roux Ph., Zakeri M., Dirrenberger J. Building Applications Using Lost Formworks Obtained Through Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 3: 37–58. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00003
17. Cao X., Li Z. Factors Influencing the Mechanical Properties of Three-Dimensional Printed Products From Magnesium Potassium Phosphate Cement Material. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 10: 211–222. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00010-5

REFERENCES

1. Galishnikova V.V., Koreneva A.I. Technical and economic comparison of building construction using additive and traditional production technologies. *Construction Production*. 2025;2:118-127. (rus.)
2. Petrosyan R.S., Abregov M.A. Prospects for the implementation of additive technologies in the overhaul of apartment buildings (AB). *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2024;255-259. (rus.)
3. Titov G.A. Materials for additive technologies in construction. *Engineering Research*. 2022;3(8):38-49. (rus.)
4. Suleymanova L.A., Ognev N.V. Evaluation of building walls using a 3d printer in comparison with traditional construction of concrete blocks. *University Science*. 2017;2(4):13-15. (rus.)
5. Krasnykh S.S., Shaposhnikov A.V. Use of 3d printing technology in the construction of low-rise buildings. *Technique and Construction Technologies*. 2025;1(41):45-51. (rus.)
6. Kazemian A., Yuan X., Meier R., Khoshnevis B. Performance-Based Testing of Portland Cement Concrete for Construction-Scale 3D Printing. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:2:13-35. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00002-6
7. Hambach M., Rutzen M., Volkmer D. Properties of 3D-Printed Fiber-Reinforced Portland Cement Paste. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:5:73-113. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00005-1
8. Nam Y.J., Hwang Y.K., Park J.W., Lim Y.M. Fiber-Reinforced Cementitious Composite Design with Controlled Distribution and Orientation of Fibers Using Three-Dimensional Printing Technology. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:4:59-72. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00004-X
9. Sanjayan J.G., Nematollahi B. 3D Concrete Printing for Construction Applications. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:1:1-11. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00001-4
10. Feng P., Meng X., Chen J.F., Ye L. Mechanical Properties of Structures 3D-Printed With Cementitious Powders. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:9:181-209. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00009-9
11. Xia M., Nematollahi B., Sanjayan J.G. Properties of Powder-Based 3D Printed Geopolymers. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:13:265-280. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00013-0
12. Abdalla H., Parvez Fattah K., Abdallah M., Tamimi A.K., Tajani F., Locurcio M., Di Liddo F. Environmental footprint and economics of a full-scale 3D-printed house. *Sustainability*. 2021;13:11978. doi:10.3390/SU132111978.

Berseneva M.L., Klindukh N.Yu., Danchenko T.V., Yakshina A.A. Economic efficiency of additive technologies in the construction industry. *Bulletin of Eurasian Science*. 2020;12(1):3. (rus.)

13. Tinkov S.A., Narezhnaya T.K. The use of construction 3d printing to solve housing problems of the population. *Economics and Entrepreneurship*. 2021;6(131):1261-1265. (rus.)

14. Grakhov V.P., Mokhnachev S.A., Borozdov O.V. The Impact of 3D Technology Development on the Construction Industry. *Fundamental Research*. 2014;11-12:2673-2676. doi:10.18720/CUBS.63.4 (rus.)

15. Gaudillière N., Duballet R., Bouyssou C., Mallet A., Roux Ph., Zakeri M., Dirrenberger J. Building Applications Using Lost Formworks Obtained Through Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:3:37-58. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00003-8

16. Cao X., Li Z. Factors Influencing the Mechanical Properties of Three-Dimensional Printed Products From Magnesium Potassium Phosphate Cement Material. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; [date unknown].

17. , The Netherlands. 2019: 10: 211–222. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00010-5

Информация об авторах

Алексанин Александр Вячеславович

НИУ МГСУ (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет), г.Москва, Россия, доцент, к.т.н., доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, E-mail: AleksaninAV@mgsu.ru

Любавина Ксения Валерьевна

НИУ МГСУ (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет), студентка, E-mail: Lyubavin.19682@gmail.com

Information about authors

Aleksanin Aleksandr V.

NRU MGSU (National Research Moscow State University of Civil Engineering), Moscow, Russia, Associate Professor, PhD, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, E-mail: AleksaninAV@mgsu.ru

Lyubavina Ksenia V.

NRU MGSU (National Research Moscow State University of Civil Engineering), student, E-mail: Lyubavin.19682@gmail.com

Статья поступила в редакцию 30.10.2025
Одобрена после рецензирования 23.01.2026
Принята к публикации 01.02.2026

The article was submitted 30.10.2025
Approved after reviewing 23.01.2026
Accepted for publication 01.02.2026