

EDN: TUEOJL

УДК [681.6-3+69.001.5](691.32)

**Л. Д. ПАНТЕЛЕЕНКО**ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова»,  
Российская Федерация, г. Белгород

## **СТРОИТЕЛЬНАЯ ПЕЧАТЬ КАК РЕСУРСОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АДДИТИВНО-МОДУЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Аннотация.** В работе обозначены основные преимущества строительной 3д-печати и применение современной технологии для осуществления экономии трудовых и временных ресурсов. В статье обозначены особенно значимые проблемы, с которыми столкнулась строительная отрасль при внедрении в практику технологию печати, а также их возможное решение. Предложена концепция технологии строительной 3д-печати, которая позволит автоматизировать создание ресурсоэффективного структурообразования конструктивного объема сооружения с целью его оптимальной строительной печати, составлен каталог возможных типовых пространственно-криволинейных печатных сооружений, поставлены основные задачи исследования, приведены результаты качественного и количественного анализов, применяемых в научной работе. В ходе исследований были выявлены оптимальные топологические решения, то есть обладающие минимальным весом при фиксированной прочности в разных условиях нагружения.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, строительная печать, 3д-печать, строительный принтер, ресурсоэффективная топология, топологическая решетка, печать строительных конструкций.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В настоящее время наблюдается технологические барьеры в проектировании и создании энергоэффективных и быстровозводимых геометрически сложных зданий и сооружений, а также неразвитость программного обеспечения цифровой префабрикации и G-кодирования поверхностно-криволинейных сооружений для строительной печати.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве, преимущества и недостатки применения технологии строительной 3д-печати отображены в работах ученых П. С. Горбач, П. А. Шустов, С. С. Левчук, Д. А. Лунева, А. С. Иноземцев, В. С. Лесовик.

### **ЦЕЛИ**

Описать концепцию технологии строительной 3д-печати и ее возможности, сформулировать преимущества использования аддитивно-модульных технологий в строительной 3д-печати.

### **ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

Сегодня технологический процесс не стоит на месте, внедрение современных инновационных технологий в промышленные отрасли выводит производство на принципиально новый уровень [1]. Несмотря на весь консерватизм строительной отрасли, она не стала исключением, и сегодня мы можем наблюдать большое количество успешно реализованных проектов как за рубежом, так и в России.



Ниже приведены наиболее часто упоминаемые преимущества строительной 3д-печати в сравнении с традиционными методами:

- существенное сокращение времени производства строительных конструкций за счет возможной непрерывной работы строительного принтера;
- большое множество архитектурных решений, реализуемых принтером без применения дорогостоящей опалубки;
- сокращение трудовых ресурсов за счет простого обслуживания оборудования;
- минимизация человеческого фактора и производственных неполадок;
- снижение потребления всех видов ресурсов.

Но, как и у всех инноваций у строительной печати есть, как и преимущества, которые уже не раз упоминали авторы в своих работах [2–13], так и недостатки. В частности, остается нерешенной проблема недостатка исследований и рабочих типовых шаблонов ресурсоэффективной структурной топологии объектов для строительной печати.

В ходе исследования было выявлено, что чаще всего строительная 3д-печать используется для создания несъемной бетонной опалубки, которую затем заполняют другим материалом (керамзитобетон, мелкозернистый бетон, пенобетон и др.). Такой способ прост с точки зрения подготовки к печати (моделирование и расчет), но при этом не раскрывает потенциал строительного принтера на 100 %, и нарушает основную идею строительной печати – создание готового изделия одной установкой.

Трудность состоит в том, что на данный момент нет четких рекомендаций и общепринятой эффективной внутренней топологии напечатанной строительной конструкции. Применяются как треугольные, квадратные, так и нелинейные синусоидального типа внутренние решетки. Но при этом нет аналитических алгоритмов, универсального инструмента выбора внутренней топологии решетки.

В связи с этим была поставлена задача, с помощью различных математических инструментов, к которым относятся инструменты качественного анализа, такие как метод анализа иерархий и количественного, такие как метод конечных элементов, сформулировать подходы к рационализации внутренней топологии строительной печатной конструкции. То есть, определить, какое топологическое решение будет являться оптимальным (обладающим минимальным весом при фиксированной прочности) и в каких условиях нагружения.

Для эффективного решения поставленной задачи были отобраны перспективные образцы решеток (таблица) и проведен комплексный конструктивно-технологический анализ. В качестве технологических параметров были взяты такие параметры, как *простота* формы печати (плавность, резкость траектории), *гибкость* решетки, зависящая от количества изменяемых параметров (чем больше гибкость, тем больше возможность строительной оптимизации), *дефектоемкость*, включающая в себя возможность накопления потенциальных дефектов и возможность формирования концентраторов напряжения (жизнестойкость, долговечность, ремонтпригодность, удобство эксплуатации). К конструктивным показателям были отнесены: число *внутренних типов* элементов в решетке, число *коллизий* (пересечений объемов бетона при печати), количество *пересечений линий* траектории печати под острым углом, степень *геометрической неустойчивости*. Методом анализа иерархий (МАИ) были отобраны образцы решеток, лидирующих и по конструктивному, и по технологическим показателям (рис. 1).

Таким образом, наиболее рациональной топологией обладали образцы № 4, 5, 7 (рис. 1), которые в сравнении с остальными образцами показали наилучший результат, а именно:

- минимальные максимальные напряжениями (главные, эквивалентные);
- равномерно распределенные напряжения;
- минимальные осевые перемещения узлов;
- минимальная чувствительность к условиям нагружения (сжатие, горизонтальное нагружение, граничные условия нагружения);
- максимальная эффективность по конструктивно-технологическим показателям.

На основе полученных результатов исследования был разработан алгоритм, обеспечивающий автоматизированное создание информационных моделей пространственно-криволинейного обитаемого сооружения, допускающих параметризацию не менее чем по 10 ключевым параметрам, описывающих геометрическую форму внешней поверхности и свободно транслируемых в открытый и нейтральный формат файлов IFC. В зависимости от введенных параметров на выходе пользователь получает информационную модель печатного блока с подобранной внутренней топологией решетки (рис. 2, 3), объем материала, актуальную стоимость печати конструкции, массу блока, площадь покрытия (для внутренней/внешней отделки) и др.

Таблица – Исследуемые варианты топологий решеток

№ п/п	Наименование	Схема
1	Образец 1	
2	Образец 2	
3	Образец 3	
4	Образец 4	
5	Образец 5	
6	Образец 6	
7	Образец 7	
8	Образец 8	



Рисунок 1 – Результаты отбора образцов решеток четырем показателям.

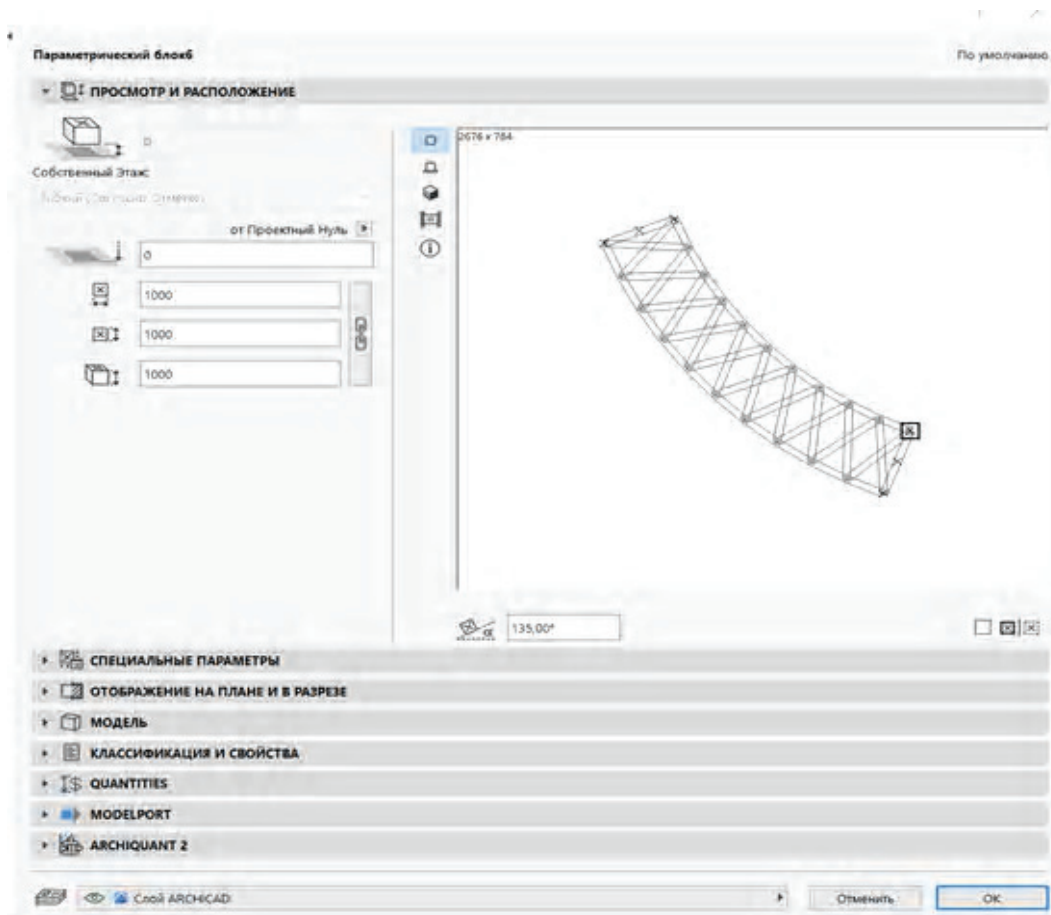


Рисунок 2 – Окно Параметров пользователя.



Рисунок 3 – Изображение типового блока длиной  $L = 2\,500$  мм с типом внутренней топологии решетки № 1.

## ВЫВОД

Применение технологии строительной 3д-печати позволит существенно ускорить процесс проектирования и подготовки к печати сложных пространственно-криволинейных элементов, подобрать оптимальную топологию структуры печати, что позволит преодолеть технологические барьеры создания энергоэффективных и быстровозводимых геометрически сложных сооружений, а также повысить доверие застройщиков к строительной печати в целом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пантелеенко, Л. Д. Технология строительной 3д-печати ресурсоэффективного формообразования внутренней топологии печатной конструкции / Л. Д. Пантелеенко, М. О. Суворова. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2023. – Выпуск 2023-4(162) Научно-технические достижения студентов строительной-архитектурной отрасли. – С. 24–30. – URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2023/2023-4\(162\)/st\\_04\\_panteleenko\\_suvorova.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2023/2023-4(162)/st_04_panteleenko_suvorova.pdf) (дата обращения: 10.03.2024). – EDN: PYSRAB.
2. Горбач, П. С. Аддитивные методы производства в строительной отрасли / П. С. Горбач, П. А. Шустов, С. С. Левчук // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2016. – № 10. – С. 174–177. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28296775> (дата обращения: 10.03.2024). – EDN: XVFRIZ.
3. Perrot, A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques / A. Perrot, D. Rangedard, A. Pierre. – Текст : электронный // Materials and Structures. – 2016. – Volume 49. – P. 1213–1220. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/272789508\\_Structural\\_built-up\\_of\\_cement-based\\_materials\\_used\\_for\\_3D-printing\\_extrusion\\_techniques](https://www.researchgate.net/publication/272789508_Structural_built-up_of_cement-based_materials_used_for_3D-printing_extrusion_techniques) (дата обращения: 10.03.2024).
4. Аддитивные технологии и современные технологии строительства / Н. Ю. Гуроров, А. С. Чепенко, Н. А. Науменко [и др.]. – Текст : электронный // Молодежь и научно-технический прогресс : сборник докладов X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Губкин, 20 апреля 2017 года : в 4 томах, том 3. – Губкин : ООО «Ассистент плюс», 2017. – С. 85–87. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29765629> (дата обращения: 12.03.2024). – EDN: ZBJJYV.
5. Преимущества аддитивных технологий и пути совершенствования 3D строительства / А. А. Матюхина, Н. А. Никифорова, А. С. Никулина [и др.]. – Текст : электронный // Сборник трудов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2017 года. – 2017. – С. 2185–2189. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35107804> (дата обращения: 12.03.2024). – EDN: XQPWZF.
6. Panda, V. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material / V. Panda, S. C. Paul, M. J. Tan. – Текст : электронный // Materials Letters. – 2017. – Volume 209. – P. 146–149. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/318751278\\_Anisotropic\\_mechanical\\_performance\\_of\\_3D\\_printed\\_fiber\\_reinforced\\_sustainable\\_construction\\_material](https://www.researchgate.net/publication/318751278_Anisotropic_mechanical_performance_of_3D_printed_fiber_reinforced_sustainable_construction_material) (дата обращения: 12.03.2024).
7. Лунева, Д. А. Технология 3D-печати с использованием метода послойного экструдирования в строительстве / Д. А. Лунева, Е. О. Кожевникова, С. В. Калошина. – Текст : электронный // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – № 2. – С. 251–261. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-3d-pechati-v-stroitelstve-i-perspektivy-ee-razvitiya> (дата обращения: 15.03.2024).
8. Krassenstein, Brian. Contour crafting inventor Dr. Khoshnevis: Widespread 3D printed homes in 5 years, highrises in 10 years / Brian Krassenstein. – Текст : электронный // 3dprint.com : [сайт]. – 2015. – URL: <https://3dprint.com/53437/contour-crafting-dr-khoshnevis/> (дата обращения: 31.03.2015).
9. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology / G. Cesaretti, E. Dini, X. De. Kestelier [et al.]. – Текст : электронный // Acta Astronautica. – 2014. – Volume 93. – P. 430–450. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/250614255\\_Building\\_Components\\_for\\_an\\_Outpost\\_on\\_the\\_Lunar\\_Soil\\_by\\_Means\\_of\\_a\\_Novel\\_3D\\_Printing\\_Technology](https://www.researchgate.net/publication/250614255_Building_Components_for_an_Outpost_on_the_Lunar_Soil_by_Means_of_a_Novel_3D_Printing_Technology) (дата обращения: 12.03.2024).
10. Duballet, R. Classification of building systems for concrete 3D printing / R. Duballet, O. Baverel, J. Dirrenberger. – Текст : электронный // Automation in Construction. – 2017. – Volume 83. – P. 247–258. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/319242795\\_Classification\\_of\\_building\\_systems\\_for\\_concrete\\_3D\\_printing](https://www.researchgate.net/publication/319242795_Classification_of_building_systems_for_concrete_3D_printing) (дата обращения: 12.03.2024). – DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.018.
11. Иноземцев, А. С. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев, Зыюнг Тхань Куй. – Текст : электронный // Вестник МГСУ. – 2018. – № 12. – С. 863–876. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-suschestvuyuschih-tehnologicheskikh-resheniy-3d-pechati-v-stroitelstve/viewer> (дата обращения: 20.03.2024). – DOI: 10.22227/19970935.2018.7.863876.
12. Формирование свойств композиций для строительной печати / В. С. Лесовик, М. Ю. Елистраткин, Е. С. Глаголев [и др.]. – Текст : электронный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 10. – С. 6–14. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-svoystv-kompozitsiy-dlya-stroitelnoy-pechati> (дата обращения: 20.03.2024).

Получена 13.04.2024

Принята 23.04.2024

LILIA PANTELEENKO  
CONSTRUCTION PRINTING AS A RESOURCE-EFFICIENT TECHNOLOGY FOR  
ADDITIVE-MODULAR PRODUCTION OF BUILDING STRUCTURES  
FSBEI HE «Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov», Russian  
Federation, Belgorod

**Abstract.** The paper outlines the main advantages of 3D construction printing and the use of modern technology to save labor and time resources. The article identifies particularly significant problems faced by the construction industry when introducing printing technology into practice, as well as their possible solution. The concept of 3D construction printing technology is proposed, which will automate the creation of resource-efficient structure formation of the structural volume of a structure in order to optimize its construction printing, a catalog of possible typical spatially curved printing structures is compiled, the main research objectives are set, the results of qualitative and quantitative analyses used in scientific work are presented. During the research, optimal topological solutions were identified, that is, having a minimum weight with a fixed strength under different loading conditions.

**Keywords:** additive technologies, construction printing, 3d printing, construction printer, resource-efficient topology, topological grid, printing of building structures.

**Пантелеенко Лилия Дмитриевна** – инженер лаборатории «bimlab» ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова». Научные интересы: развитие строительной 3д-печати.

**Panteleenko Lilia** – an engineer, at the bimlab laboratory of the FSBEI HE «Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov». Scientific interests: development of construction 3D printing.