

EDN: **PYSRAB**

УДК [681.6-3+69.001.5](691.32)

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

## **ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ЗД-ПЕЧАТИ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

**Аннотация.** В работе обозначены основные существующие проблемы строительных аддитивных технологий и предложено возможное решение части этих проблем. Приведены результаты критического анализа применяемых на практике и перспективных топологических решений внутреннего объема печатной строительной конструкции. Предложена концепция технологии строительной 3д-печати, которая позволит упростить и автоматизировать процесс подготовки к печати, заключающийся в создании 3д-модели, выборе внутреннего структурообразования конструкции, проведении расчета на нагрузки, разбиении модели на слои и переводе в формат G-кода. Поставлены основные задачи исследования, план развития, а также показаны результаты текущих исследований структурного формообразования строительных печатных конструкций, позволяющих прийти к наиболее рациональному решению при выборе внутренней топологической решетки. Сделан вывод о целесообразности дальнейшего развития в выбранном направлении.

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

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Технологический процесс не стоит на месте, внедрение современных инновационных технологий в промышленные отрасли выводит производство на принципиально новый уровень. Но с решением при помощи новых технологий одних задач, появляются другие, требующие нестандартного, прогрессивного подхода. Так, очень скоро динамически развивающиеся быстрыми темпами аддитивные технологии стали востребованы во многих сферах науки: машиностроение, судостроение, космонавтика, медицина и др. Строительная отрасль не стала исключением, и можно наблюдать успешно реализованные проекты с использованием 3д-печати зданий, сооружений не только за рубежом, но и в России.

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

Уже не раз авторы в своих работах [1–11] упоминали преимущества в сравнении с традиционными методами и перспективы развития аддитивных технологий в строительстве. Одними из главных таких достоинств являются:

- существенный потенциал в повышении архитектурной выразительности строительных объектов, возможность создания сложных криволинейных форм;
- сокращение сроков и стоимости строительства за счет низкой трудоемкости;
- снижение потребления всех видов ресурсов.

Но несмотря на множество положительных сторон применения строительной 3д-печати, проблема фактической реализации в строительной отрасли до конца не решена.



## ЦЕЛИ

Фактически только зарождающиеся строительные аддитивные технологии, обладающие огромным потенциалом, остро нуждаются в научной поддержке, которая будет способствовать его раскрытию, позволит избежать лишних ошибок и найти короткий путь к широкомасштабному применению, которое, вероятно, совершит революцию в сфере ресурсосбережения и строительства [12].

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

На сегодняшний день существует ряд барьеров, препятствующих полномасштабному внедрению аддитивных технологий в строительную отрасль, например, не до конца решенная проблема армирования печатной конструкции, особенно в случае необходимости предварительного напряжения, отсутствие нормативной базы и серийного оборудования, рецептурно-технологических особенностей строительной печати, эксплуатационных показателей получаемых объектов. Помимо технологических и производственных проблем существуют проблемы, связанные с подготовкой к процессу печати, такие как:

- неразвитость программного обеспечения цифровой префабрикации и G-кодирования для строительной печати;
- недостаток типовых шаблонов ресурсоэффективной структурной топологии объектов для строительной печати;
- отсутствие моделей с управляемой архитектурной уникальностью;
- технологические барьеры в проектировании и создании ресурсоэффективных и быстровозводимых геометрически сложных сооружений;
- отсутствие софта, который обеспечивает рационализацию проектных решений;
- отсутствие шаблонных типовых стандартных методик печати криволинейных форм.

На практике для осуществления процесса строительной 3D-печати необходимо провести ряд подготовительных работ: ручное создание информационной модели с использованием платформ 3D-моделирования (ArchiCAD, Revit, Tekla, Renga и др.) и специального программного обеспечения; проведение расчета нагрузок в программно-расчетном комплексе (ЛИРА-САПР, SCAD и др.); загрузка объекта в специальное ПО для 3D-печати – слайсер (самым популярным для этого форматом файла является STL-формат); преобразование STL-файла в G-код – управляющий код для принтера, содержащий команды для печати каждого слоя модели и последовательность их применения.

В связи с этим была поставлена задача разработать аппаратно-программную технологию строительной печати, которая позволила бы в автоматизированном режиме формировать информационные модели, осуществлять цифровую префабрику, оптимизировать топологию структуры и формировать управляющий строительной печатью G-код сложных пространственно-криволинейных сооружений. Для эффективного решения задачи исследование было разбито на несколько этапов:

1. Анализ и систематизация существующих и перспективных топологических шаблонов структуры аддитивно-модульных конструкций.
2. Построение расчетно-аналитического обоснования.
3. Создание алгоритма автоматизированного ресурсоэффективного структурообразования конструктивного объема сооружения.
4. Создание алгоритмов автоматического построения G-кода для строительной печати проектируемого сооружения на совместимых моделях строительных принтеров.
5. Создание параметрической информационной модели широкого диапазона варьируемых параметров.
6. Апробация технологии.

На первом этапе работы в ходе анализа было выявлено, что чаще всего строительная печать используется для создания несъемной опалубки, то есть печатают не весь объем несущей стены, а наружную и внутреннюю ее части толщиной от 3 до 5 см, образовавшуюся полость заливают наполнителем (керамзитобетон, мелкозернистый бетон, пенобетон и др.). Такой способ прост с учетом подготовки к печати (создание 3д-модели сооружения, конструкции и расчет нагрузок), но при этом не раскрывает потенциал строительного принтера на сто процентов, и нарушает основную идею 3д 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 решетки самых разных форм, например, решетки треугольного типа (рис. 1), криволинейной формы (рис. 2),



**Рисунок 1** – Решетка треугольного типа, компания «WinSun», Китай.



**Рисунок 2** – Решетка криволинейной формы.

формы сот и др. Также используют решетки и смешанного типа (рис. 3), например, в ранее российской компании «ApisCor». Но при этом нет разработанных аналитических алгоритмов, позволяющих осуществить рациональный подбор внутреннего заполнения конструкции, обеспечивающего минимальную ресурсоемкость сооружения при прочих равных условиях, таких как габаритный размер, силовое, температурное нагружение и др.

В ходе работы 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.

В рамках работы исследуется цеховой способ печати сооружения, а именно модульно-печатное строительство криволинейных сооружений. Таким образом, модель делится на блоки с внутренним заполнением решетки, печатается в цеху, а затем собирается на строительной площадке.

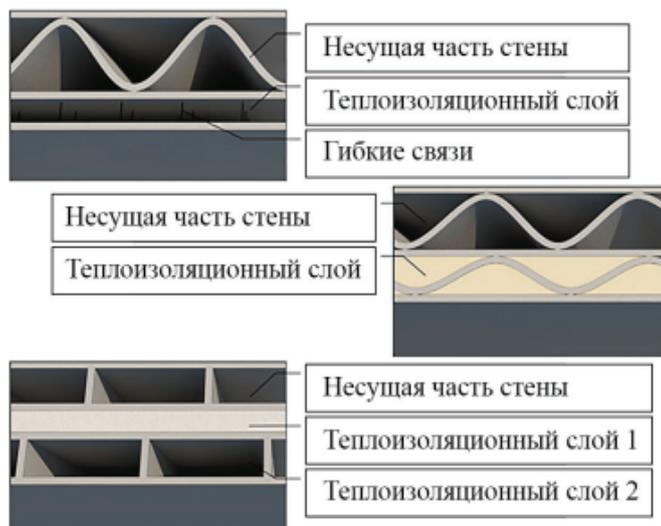


Рисунок 3 – Типы и функциональность конструктивных решений ApisCor.

Для эффективного решения поставленной задачи были отобраны несколько образцов решеток (рис. 4) и проведен сравнительный структурный анализ строительных печатных конструкций, обеспечивающих минимальную удельную ресурсоемкость, где параметрами для анализа являются эквивалентные, главные напряжения, осевые перемещения узлов, а варьируемыми параметрами являются силовое нагружение, температурная нагрузка и степень заполненности патерном (в %) и соответственно масса.

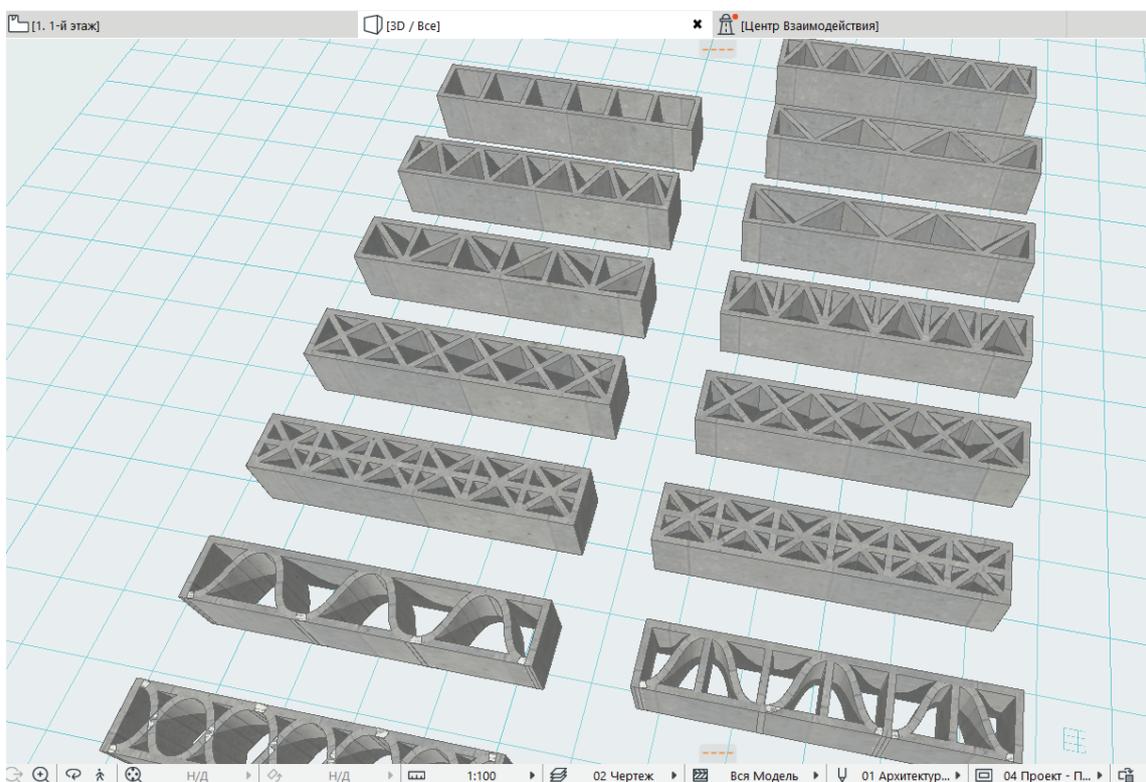


Рисунок 4 – Образцы внутренних топологических решеток.

В рамках работы будет создан алгоритм для исследования влияния формообразования конструкции на ее прочность с помощью программного обеспечения LIRA-SAPR. Для проведения расчетов запроектированы стеновые конструкции с различными топологиями, имеющие одинаковые габаритные размеры.

Результатами структурного анализа являются главные напряжения, эквивалентные напряжения, перемещения, а сравнение, ранжирование осуществляем по удельным характеристикам: главные напряжения и перемещения, отнесенные к единице объема. Одна из топологий объявляется за базу со стопроцентной эффективностью, а все остальные топологии сравниваются с ней. Для каждого из видов напряженно-деформированного состояния будет выявлена рациональная топология, т. е. про-ранжирование существующих топологий на предмет их рациональности. Поэтому теперь в модели здания/сооружения относительно каждого блока, на которые оно будет делиться, можно будет определить рациональную топологию и в G-коде делать переменную итоговую топологию зданий. Т. е. один блок в одной топологии выполняется, другой в другой, и т. д. Причем эта оптимизация идет по контуру и по высоте.

Конечным результатом работы является создание завершенных закрытых алгоритмов, в которых в качестве входящей информации используются параметры габаритного размера конструкции, толщина стены, высота и толщина слоя печати (которая зависит от вида строительного принтера), класс бетона, также учитываются параметры температурного и силового нагружения. На выходе же пользователь получает готовую к печати информационную модель с ресурсоэффективным распределением внутреннего объема печатной конструкции, данные об объеме бетона, времени, стоимости печати (при заданных характеристиках принтера и актуальных расценках материалов), а также автоматическую выгрузку завершеного G-кода, необходимого для печати непосредственно на принтере.

Кроме того, пользователь при необходимости может добавлять в уже готовый алгоритм и другие существенно важные характеристики, обеспечивая тем самым актуальность, полноту и целостность вводимых данных.

## ВЫВОДЫ

Конечным результатом работы является создание завершенных закрытых алгоритмов, в которых в качестве входящей информации используются параметры габаритного размера конструкции, а также учитываются параметры температурного и силового нагружения. Кроме того, пользователь при необходимости может добавлять в уже готовый алгоритм и другие существенно важные характеристики, обеспечивая тем самым актуальность, полноту и целостность вводимых данных.

Итогом работы является создание модели, адаптированной под заданные критерии, отвечающей требованиям строительной 3D-печати и имеющей оптимизированную ресурсоэффективную топологическую структуру. Такая энергоэффективная решетка при прочих равных условиях, при сравнении с любой другой возможной решеткой, является менее материалоемкой, более прочной и обладающей минимальным коэффициентом теплопроводности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбач, П. С. Аддитивные методы производства в строительной отрасли / П. С. Горбач, П. А. Шустов, С. С. Левчук. – Текст : электронный // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2016. – № 10. – С. 174–177. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28296775> (дата обращения: 10.03.2023). – EDN: XVFRIZ.
2. Perrot, A. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques / A. Perrot, D. Rangeard, 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: 10.03.2023).
3. Аддитивные технологии и современные технологии строительства / Н. Ю. Гуров, А. С. Чепенко, Н. А. Наumenko [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 : Издательство : ООО «Ассистент плюс», 2017. – С. 85–87. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29765629> (дата обращения: 12.03.2023). – EDN: ZBJJYV.
4. 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 : Издательство: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35107804> (дата обращения: 12.03.2023). – EDN: XQPWZF.

5. Panda, B. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material / B. 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: 12.03.2023).
6. 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/primeneniye-3d-pechati-v-stroitelstve-i-perspektivy-ee-razvitiya> (дата обращения: 15.03.2023).
7. Krassenstein, Brian. Contour crafting inventor Dr. Khoshnevis: Widespread 3D printed homes in 5 years, high-rises 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).
8. Khoshnevis, B. Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies / B. Khoshnevis. – Текст : электронный // Automation in construction. – 2004. – Volume 13, № 1. – P. 5–19. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/222539948\\_Automated\\_construction\\_by\\_contour\\_crafting\\_-\\_Related\\_robotics\\_and\\_information\\_technologies](https://www.researchgate.net/publication/222539948_Automated_construction_by_contour_crafting_-_Related_robotics_and_information_technologies) (дата обращения: 12.04.2023).
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: 12.03.2023).
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: 12.03.2023). – 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, Зыонг Тхань Куй. – Текст : электронный // Вестник МГСУ. – 2018. – № 12. – С. 863–876. – DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-suschestvuyuschih-tehnologicheskikh-resheniy-3d-pechati-v-stroitelstve> (дата обращения: 20.03.2023).
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: 20.03.2023).

Получена 07.04.2023

Принята 23.05.2023

Л. Д. ПАНТЕЛЕЄНКО, М. О. СУВОРОВА  
ТЕХНОЛОГІЯ БУДІВЕЛЬНОГО ЗД-ДРУКУ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОГО  
ФОРМОУТВОРЕННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ТОПОЛОГІЇ ДРУКОВАНОЇ  
КОНСТРУКЦІЇ

ФДБОУ ВО «Белгородський державний технологічний університет  
ім. В. Г. Шухова»,  
м. Белгород, Російська Федерація

**Анотація.** У роботі позначені основні існуючі проблеми будівельних адитивних технологій і запропоновано можливі рішення частини цих проблем. Наведено результати критичного аналізу застосовуваних на практиці і перспективних топологічних рішень внутрішнього об'єму друкованої будівельної конструкції. Запропонована концепція технології будівельного Зд-друку, яка дозволить спростити і автоматизувати процес підготовки до друку, що полягає в створенні Зд-моделі, виборі внутрішнього структуроутворення конструкції, проведенні розрахунку на навантаження, розбитті моделі на шари і перекладі в формат G-коду. Поставлені основні завдання дослідження, план розвитку, а також показані результати поточних досліджень структурного формоутворення будівельних друкованих конструкцій, що дозволяють приступити до найбільш раціонального рішення при виборі внутрішньої топологічної решітки. Зроблено висновок про доцільність подальшого розвитку в обраному напрямку.

**Ключові слова:** адитивні технології, будівельний друк, ЗД-друк, будівельний принтер, ресурсоефективна топологія, топологічна решітка, друк будівельних конструкцій.

LILIA PANTELEENKO, MARIA SUVOROVA  
TECHNOLOGY OF CONSTRUCTION 3D PRINTING OF RESOURCE-  
EFFICIENT SHAPING OF THE INTERNAL TOPOLOGY OF THE PRINTED  
STRUCTURE

FSBEI HE «Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov»,  
Belgorod, Russian Federation

**Abstract.** The paper identifies the main existing problems of construction additive technologies and suggests a possible solution to some of these problems. The results of a critical analysis of practical and promising topological solutions of the internal volume of a printed building structure are presented. The concept of 3D construction printing technology is proposed, which will simplify and automate the process of preparing for printing, which consists in creating a 3D model, selecting the internal structure formation of the structure, calculating loads, dividing the model into layers and translating it into G-code format. The main objectives of the study, the development plan are set, and the results of current studies of structural shaping of building printed structures are shown, which allow us to come to the most rational decision when choosing an internal topological lattice. The conclusion is made about the expediency of further development in the chosen direction.

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

**Пантелеенко Лилия Дмитриевна** – магистрант кафедры экспертизы и управления недвижимостью ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация. Научные интересы: автоматизация процессов информационного моделирования в строительстве, строительная 3д-печать, ресурсоэффективное формообразование печатных строительных конструкций.

**Суворова Мария Олеговна** – старший преподаватель кафедры экспертизы и управления недвижимостью ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация. Научные интересы: ресурсоэффективное строительство, зеленое строительство, достижение углеродной нейтральности в строительстве.

**Пантелеенко Лілія Дмитрівна** – магістрант кафедри експертизи та управління нерухомістю ФДБОУ ВО «Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова», м. Белгород, Російська Федерація. Наукові інтереси: автоматизація процесів інформаційного моделювання в будівництві, будівельний 3Д-друк, ресурсоєфективне формоутворення друкованих будівельних конструкцій.

**Суворова Марія Олегівна** – старший викладач кафедри експертизи та управління нерухомістю ФДБОУ ВО «Белгородський державний технологічний університет ім. В. Г. Шухова», м. Белгород, Російська Федерація. Наукові інтереси: ресурсоєфективне будівництво, зелене будівництво, досягнення вуглецевої нейтральності у будівництві.

**Panteleenko Lilia** – master's student, Expertise and Real Estate Management Department, FSBEI HE «Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov», Belgorod, Russian Federation. Scientific interests: automation of information modeling processes in construction, 3D construction printing, resource-efficient shaping of printed building structures.

**Suvorova Maria** – Senior Lecturer, Expertise and Real Estate Management Department, FSBEI HE «Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov», Belgorod, Russian Federation. Scientific interests: resource-efficient construction, green building, carbon neutrality in construction.