

УДК 727

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ НА ОСНОВЕ 3D-ПРИНТИНГА

С.А. Гриднева, К.О. Боровкова, О.С. Царёва

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. Дается анализ выбора и экономической эффективности использования малых архитектурных форм (МАФ), напечатанных на 3D-принтере, на примере благоустройства территории Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия). Обосновывается актуальность использования 3D-печати в строительстве и подчеркивает важность МАФов для формирования городской среды, в том числе и для благоустройства территорий университетов и особенно территорий формирующие ансамбли являющимися объектами культурного наследия. Обсуждаются преимущества 3D-печати, такие как возможность создавать сложные формы и структуры, сокращение времени производства, экономическая эффективность. Также описываются ограничения 3D-печати, связанные с размерами и материалами и необходимостью послепечатной обработки. Рассматриваются роль и значение МАФов в городской среде. Приводятся примеры типичных МАФов для университетских территорий, обсуждается влияние данных элементов на формирование стимулирующей среды для учебной и культурной деятельности. В заключительной части работы проводится сравнительный анализ стоимости создания МАФов с использованием 3D-печати и традиционных методов, обосновывая потенциальную экономическую выгоду от применения новых технологий. Полученные результаты могут быть полезны для архитекторов, градостроителей и всех заинтересованных сторон, исследующих современные подходы к благоустройству и дизайну городской среды.

Ключевые слова: малые архитектурные формы, 3D-печать, городская среда, благоустройство территории университетов, общественные пространства, бетонный 3D-принтер, инновационные технологии.

Ссылка для цитирования: Гриднева С.А., Боровкова К.О., Царёва О.С. Эффективность применения малых архитектурных форм на основе 3D-принтинга // Инженерные исследования. 2024. №5(20). С. 13-21. EDN: XZZZYU

EFFICIENCY OF USING SMALL ARCHITECTURAL FORMS BASED ON 3D PRINTING

S.A. Gridneva, K.O. Borovkova, O.S. Tsareva

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This article is a study devoted to the analysis of the choice and economic efficiency of using small architectural forms (SAF) printed on a 3D printer, using the example of landscaping of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Russia). The article substantiates the relevance of the use of 3D printing in construction and emphasizes the importance of SAF for the formation of the urban environment, including for the improvement of university territories. The advantages of 3D printing are discussed, such as the ability to create complex shapes and structures, reduce production time, and economic efficiency. The limitations of 3D printing related to dimensions and materials and the need for post-printing are also described. The role and importance of the SAF in the urban environment are considered. Examples of typical SAF for university territories are given, and the influence of these elements on the formation of a stimulating environment for educational and cultural activities is discussed. In the final part of the article, a comparative analysis of the cost of creating an SAF using 3D printing and traditional methods is carried out, justifying the potential economic benefits from the use of new technologies. The results obtained can be useful for architects, urban planners and all interested parties exploring modern approaches to urban landscaping and design.

Keywords: small architectural forms, 3D printing, urban environment, landscaping of the university grounds, public spaces, concrete 3D printer, innovative technologies.

For citation: Gridneva S.A., Borovkova K.O., Tsareva O.S. Efficiency of using small architectural forms based on 3D printing // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.5(20). Pp. 13-21. EDN: XZZZYU

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире строительство и благоустройство общественных пространств становятся все более технологичными и инновационными благодаря использованию передовых технологий, таких как трехмерная печать. В России и за границей технология 3D-печати уже нашла широкое применение в строительстве жилых домов, мостов, архитектурных элементов и других объектов инфраструктуры. 3D-принтеры обеспечивают экономию ресурсов и времени, а также повышают производительность, что делает строительство быстрым, экологичным и более доступным [1].

Малые архитектурные формы (МАФ) – архитектурные сооружения, несущие вспомогательный характер, служат акцентом-ориентиром и дополняют общую архитектурную композицию. Понятие "малые архитектурные формы" охватывает разнообразные элементы, такие как скамейки, уличные фонари, велосипедные стойки, беседки, контейнерные кафе и другие небольшие сооружения, предназначенные для удобства и комфорта горожан.

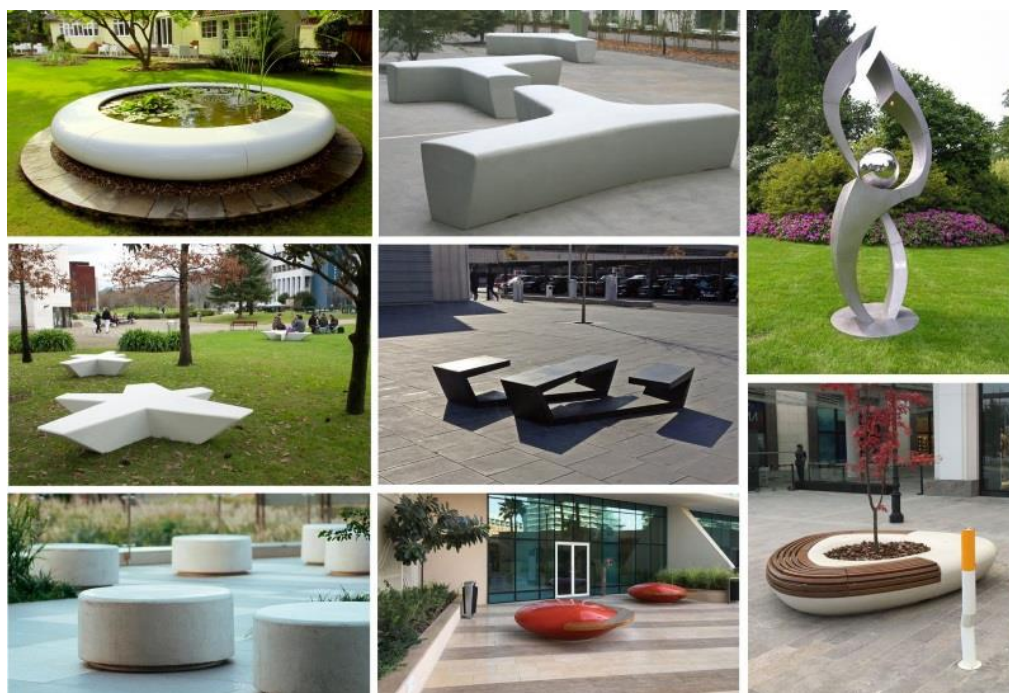


Рис. 1. Примеры МАФ в городской среде
Fig.1. Examples of small architectural forms in the urban environment

Современная практика градостроительства показывает, какую существенную роль в формировании архитектуры города играет широкое разнообразие малых архитектурных форм различного назначения. Малые архитектурные формы практически постоянно находятся в поле зрения человека, воздействуя на формирование его эстетического вкуса, поэтому они должны отвечать высоким требованиям современного художественного оформления и иметь качественную отделку [2-3]. В некоторых случаях малым архитектурным формам отводится ответственная роль связующего звена между значительными искусственными сооружениями и их природным окружением, они придают индивидуальность планировочной организации территории, создают своеобразный ландшафт. Все используемые в благоустройстве участка отдельные компоненты должны отвечать единому замыслу организации пространственной среды, учитывающему природно-климатические условия и народные традиции [11].

МАФы выполняют ряд функций:

- обеспечение удобства и доступности городских пространств. МАФ призваны сделать город более комфортным для его жителей.
- вклад в эстетику. Во время выполнения самых приземлённых задач (выбросить мусор в урну или воспользоваться фонтаном для питьевой воды) люди могут полюбоваться элементами благоустройства города и оценить их эстетичность.
- социокультурное влияние. Многие МАФ стимулируют социальную интеграцию, помогая горожанам больше общаться. Это, прежде всего, беседки, павильоны и скамейки, где люди могут отдыхать, знакомиться и беседовать.

– улучшение экологии. Малые архитектурные формы, дополненные растительностью, не только украшают город, но и позволяют его жителям дышать более чистым воздухом [12].

Понимание и анализ роли МАФ в городской среде являются важными аспектами разработки стратегий управления городским пространством и создания комфортной и функциональной среды для проживания и работы горожан. Внимание к этим элементам позволит оптимизировать процессы благоустройства и обеспечить устойчивое развитие городской инфраструктуры.

Материалы, применяемые при формировании малых архитектурных объектов, играют значительную роль в их эстетике и внешнем виде. Современные технологии, программные комплексы и разнообразие материалов позволяют создавать выразительные композиции с различными текстурами и характерами поверхностей, что открывает широкие возможности для дизайнеров и архитекторов в создании инновационных и функциональных малых форм [4-5].

Проектирование и реконструкция (реставрация) университетских кампусов – это сложный процесс, который требует учета современных стандартов и структурного развития городской среды. Особое внимание следует уделить малым архитектурным формам при организации таких территорий. Различные элементы, такие как скамейки, лавки, арт-объекты и другие, должны гармонично сочетаться с общей концепцией кампуса, создавая уютную и приятную атмосферу [6]. В зависимости от предназначения малые архитектурные формы могут быть разделены на несколько категорий. Например, декоративные элементы, вроде скульптур и фонтанов, добавляют особое очарование ландшафту кампуса, в то время как универсальные формы, такие как цветочные вазоны и скамейки, обеспечивают комфортное и функциональное пространство для студентов и преподавателей. Игровые и спортивные элементы, такие как качели и горки, предоставляют возможности для активного отдыха и занятий спортом [7].

Одним из ключевых аспектов, который необходимо учитывать при использовании 3D-печати для создания малых архитектурных форм, являются трудозатраты на сам процесс печати. Вопросы, связанные с выбором материалов, подготовкой моделей к печати, настройкой оборудования и контролем качества изделий, играют важную роль в определении эффективности и экономической целесообразности данного метода производства.

В современной архитектурной практике технологии 3D-печати привлекают все большее внимание благодаря своей потенциальной способности трансформировать процесс проектирования и производства. Они позволяют обеспечить гибкость дизайна, сокращение времени производства, экономическую выгоду и возможность индивидуализации, что делает их подходящими для использования в создании архитектурных элементов.

Одним из главных преимуществ 3D-печати является ее способность создавать сложные формы и структуры, которые трудно или невозможно воспроизвести с помощью традиционных методов производства [13]. Это открывает новые возможности для архитекторов в создании инновационных и уникальных дизайнов, а также позволяет адаптировать архитектурные элементы к конкретным потребностям и требованиям заказчика. Колонна, ротонда, свод павильона, плита перекрытия, строительные леса, искусственные рифы, предметы внутреннего интерьера, узлы соединения и элементы конструкций – всё это лишь малая часть того, что можно создать с помощью 3D-печати [9,25].

Кроме того, использование 3D-печати позволяет существенно сократить время на производство архитектурных элементов. Благодаря автоматизации процесса и возможности печатать несколько элементов одновременно, можно значительно ускорить процесс создания конструкций, что особенно важно при выполнении проектов с ограниченными сроками [16].

Экономическая выгода также является важным аспектом использования 3D-печати в архитектуре. В некоторых случаях она может быть более экономически выгодной по сравнению с традиционными методами производства, особенно при создании небольших серий или уникальных элементов. Это связано с возможностью оптимизации материальных затрат и снижения затрат на трудовые ресурсы.

Однако, несмотря на все преимущества, использование 3D-печати в архитектуре также имеет определенные ограничения. В частности, ограничения размеров и материалов могут ограничить применение данной технологии в определенных условиях эксплуатации [17,19-21]. Кроме того, качество поверхности и точность печати могут варьироваться в зависимости от используемой технологии и параметров печати, что может потребовать дополнительной послепечатной обработки [10].

Несмотря на свои ограничения, технология 3D-печати представляет собой мощный инструмент для архитекторов, открывающий новые возможности в области дизайна и производства архитектурных элементов. Однако для успешной реализации проектов необходимо учитывать как преимущества, так и

ограничения данной технологии, а также подходить к их преодолению с учетом конкретных требований и особенностей проекта.

Цель исследования – выявить экономическую эффективность применения 3D-печати в создании МАФ для благоустройства территории Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия) вблизи Гидротехнического корпуса-2 в сравнении с традиционными подходами к их изготовлению. Задачи исследования: определить наиболее подходящие типы малых архитектурных форм для благоустройства территории СПбПУ вблизи Гидрокорпуса-2, и произвести расчёт стоимости печати определенного типа МАФ на бетонном 3D-принтере и сравнить её с ценой готовой продукции.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы исследования:

1) анализ - разложение предмета или описываемого явления на признаки и свойства, чтобы изучить его более конкретно. В работе выявлены различные функции МАФ и примеры типичных МАФ для университетских территорий. Кроме того, будут рассмотрены существующие подходы к благоустройству университетских территорий и подобран подходящий для Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Россия).

2) сравнение: сопоставление двух или нескольких объектов исследования по определенному признаку. Так будет произведен расчёт стоимости печати скамейки на бетонном 3D-принтере. Полученное число будет сравниваться со стоимостью готовой скамейки.

ПРИМЕРЫ ТИПИЧНЫХ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ ДЛЯ УНИВЕРСИТЕТСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

В университетской среде малые архитектурные формы играют особенно важную роль, поскольку они не только способствуют созданию благоприятной атмосферы для студентов, преподавателей и посетителей, но и отражают культурные и образовательные ценности учебного заведения. Примеры типичных МАФ для университетских территорий могут включать в себя:

- скульптуры и инсталляции, отражающие историю и дух университета, а также его академические и культурные достижения.
- павильоны и киоски, предоставляющие пространство для общения, отдыха и проведения мероприятий на открытом воздухе.
- уличное освещение, обеспечивающее безопасность и комфортные условия вечером и ночью.
- удобные скамейки и площадки для отдыха и работы студентов и преподавателей.
- велопарковки и элементы инфраструктуры для стимулирования экологических видов транспорта.
- ландшафтные композиции, способствующие созданию природного уюта и гармонии на территории университета.

Эти элементы не только улучшают визуальное и функциональное оформление университетской территории, но и способствуют формированию приятной и стимулирующей среды для академической и культурной деятельности, обогащая образовательный опыт студентов и сотрудников университета.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К БЛАГОУСТРОЙСТВУ УНИВЕРСИТЕТСКИХ ТЕРРИТОРИЙ. ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАЛЫХ АРХИТЕКТУРНЫХ ФОРМ ДЛЯ УНИВЕРСИТЕТОВ

Существует несколько подходов к благоустройству университетских территорий, каждый из которых направлен на создание функциональных и привлекательных пространств.

Один из подходов заключается в создании университетских кампусов, где основное внимание уделяется интеграции архитектурных элементов с природным окружением. Такие кампусы обычно включают в себя ландшафтные композиции, парки, аллеи, фонтаны и другие элементы, которые способствуют созданию уютной и гармоничной атмосферы.

Другой подход основан на активном использовании современных технологий и инновационных архитектурных решений для создания современных и функциональных пространств. Сюда входит использование малых архитектурных форм, таких как павильоны, скульптуры, арки, скамейки, освещение и другие элементы, которые не только обогащают внешний облик территории, но и предоставляют удобные и практичные возможности для отдыха, работы и общения.

На территории вблизи Гидрокорпуса-2 из элементов благоустройства присутствуют только две мусорные урны и одна скамейка непосредственно перед входом в здание.



Рис. 2. Благоустройство территории вблизи Гидротехнического корпуса-2

Fig.2. Landscaping of the HydroCorpus-2

Поэтому использование МАФ будут актуальны для создания комфортной, функциональной и привлекательной среды для всех участников учебного процесса. Кроме того, МАФ, напечатанные на бетонном 3D-принтере, отлично впишутся в архитектуру учебного корпуса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнительный анализ стоимости создания малых архитектурных форм с использованием 3D-печати и традиционных методов является важным аспектом при рассмотрении экономической эффективности применения технологии 3D-печати в архитектурном проектировании и строительстве.

Традиционные методы создания малых архитектурных форм обычно включают в себя процесс изготовления с использованием стандартных материалов, таких как бетон, металл, дерево или камень [13]. Этот процесс требует физического формования и обработки материалов, что может быть трудоемким и затратным с точки зрения рабочего времени и материалов.

С другой стороны, технология 3D-печати позволяет создавать малые архитектурные формы с помощью нанесения материала по слоям на основе цифровой модели. Этот процесс обычно менее трудоемкий и требует меньше физического труда, так как большая часть работы выполняется автоматически благодаря программному управлению процессом печати.

Рассмотрим пример расчета.

Для расчёта стоимости затрат на печать на строительном 3D-принтере необходимо учитывать несколько факторов, таких как стоимость материалов, энергозатраты и износ оборудования. Рассмотрим пример печати цилиндрической скамейки на 3D-принтере.

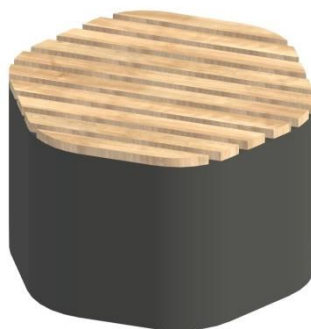


Рис. 3. Модель скамейки в Revit

Fig.3. The bench model in Revit

Затраты на материалы:

Необходимо определить объем материала, который будет использован для печати скамейки. Для полого цилиндра объем можно вычислить по формуле (1).

$$Q = P \cdot t \cdot V = \pi \cdot h \cdot (R^2 - r^2) \quad (1)$$

где V – объем, м^3 ,

π – число Пи (3,14),

h – высота цилиндра, м,

R – внешний радиус (радиус внешней части скамейки), м,

r – внутренний радиус (радиус внутренней пустоты скамейки, если она полая), м.

Высота скамейки (h) = 45 см = 0,45 м.

Внешний радиус (R) = 50 см = 0,5 м.

Внутренний радиус (r) = 47 см = 0,47 м (толщина стенок скамейки составляет 0,03 м).

Объем скамейки:

$$V = 3.14 \cdot 0.45 \cdot (0.5^2 - 0.47^2) = 0.1298 \text{ м}^3$$

Исследования показывают, что наиболее распространенными материалами, используемыми в 3D-печати, являются: цементирующие материалы, полимерные материалы и металлические материалы. Полимерные материалы обычно используются в эстетических целях из-за отсутствия у них структурных свойств. Металлические материалы также популярны в качестве строительного материала; однако конструкции с 3D-печатью, состоящие только из металлических материалов, довольно тяжелые. Цементирующие материалы являются наиболее часто используемыми [14-15, 18, 23].

Для печати используется стандартный пескобетон, доступный на любом строительном рынке, обладающий классом прочности М300 (плотность $\rho=2000 \text{ кг/м}^3$). При расчете стоимости и других параметров мы принимаем во внимание использование обычного бетона без различных добавок, которые могут изменить его свойства. Это означает, что мы используем стандартную бетонную смесь, состоящую из цемента, песка и воды без добавления каких-либо модификаторов или усилителей. Такой подход позволяет нам оценить базовые затраты и характеристики материала, что облегчает анализ и планирование проекта 3D-печати.

Перед началом работ сухую смесь смешивают с водой для получения готового раствора. Оптимальный состав пропорции пескобетона М300: 1 кг смеси к 170 мл жидкости, т.е. на 10 кг – 1,7 л. Для объема в 1 м^3 необходимо 1700 кг сухой смеси. Рассчитаем необходимое количество пескобетона М300, исходя из расхода материала по формуле (2).

$$\frac{0,1298 \text{ м}^3 \cdot 1700 \text{ кг}}{1 \text{ м}^3} = 221 \text{ кг} \quad (2)$$

Средняя закупочная стоимость пескоцемента на декабрь 2024 г. - 244 руб. за 25 кг сухой смеси [28].

Таким образом, стоимость смеси определяется по формуле (3):

$$\frac{221 \text{ кг} \cdot 244 \text{ руб}}{25 \text{ кг}} = 2157 \text{ руб} \quad (3)$$

Расходы на материалы могут зависеть от ряда факторов, таких как энергоэффективность оборудования, трудозатраты на смешивание и заливку бетона. Для нашего примера оценим их в 10% от стоимости бетонной смеси. Тогда стоимость вычисляется по формуле (4):

$$2157 \text{ руб} + 10\% = 2373 \text{ руб} \quad (4)$$

Аренда 3D-принтера:

Строительный 3D-принтер «АМТ» S-6044 для печати МАФ предоставляется университетом. Все последующие технические характеристики оборудования взяты из технического паспорта 3D-принтера.

Расходы на электроэнергию:

Для расчета расхода электроэнергии при печати на 3D-принтере используется формула (5):

$$Q = P \cdot t \quad (5)$$

где Q – энергозатраты принтера, кВтч;

P – мощность принтера, $P = 2,5 \text{ кВт}$;

t – время печати, ч.

Время печати рассчитывается исходя из производительности принтера. Производительность (Π) 3D-принтера – $0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Время печати скамейки t определяем по формуле 6:

$$t = \frac{V}{\Pi}, \quad (6)$$
$$t = \frac{0.1298}{0.6} = 0.22 \text{ ч}$$

Кроме того, следует учитывать время для подготовки и настройки принтера к печати. Обычно это время варьируется от 30 минут до 1 часа. Для нашего расчёта возьмём среднее значение – 45 минут. Тогда общее время печати составит $0,22+0,75=0,97$ ч.

Расход электроэнергии в киловатт-часах (кВтч), который требуется для печати скамейки:

$$Q = 2.5 \cdot 0.97 = 2.425 \text{ кВтч}$$

При расчете стоимости электроэнергии в городе Санкт-Петербурге мы учитываем тарифы, установленные местными энергокомпаниями, а также потребление электроэнергии, которое определяется в киловатт-часах. Затраты на печать в денежном эквиваленте на декабрь 2024 г.:

$$6.19 \text{ руб} / \text{кВтч} \cdot 2,425 \text{ кВтч} = 15 \text{ руб.}$$

В расчет стоимости не включены дополнительные расходные материалы, такие как клеи, абразивные материалы и другие компоненты, необходимые для обработки или отделки печатных деталей. Эти материалы обычно используются для широкого спектра продукции и не привязаны к конкретному изделию, такому как скамейка. Поэтому их стоимость не учитывается при расчете затрат на печать одной скамейки.

Суммарная стоимость затрат на печать одной скамейки на 3D-принтере определяем по формуле 7:

$$\sum P = 2373 + 15 = 2388 \text{ руб.}, \quad (7)$$

В специализированных магазинах стоимость семейки варьируется в зависимости от бренда, размера, качества материалов и других факторов.

Так, например, скамейка, выполненная в виде бетонно-монолитной конструкции с фактурой натурального камня как на рис.4 имеет стоимость 20 900 руб. на декабрь 2024 г. Размеры скамейки соответствуют размерам скамейки, рассмотренной в статье.

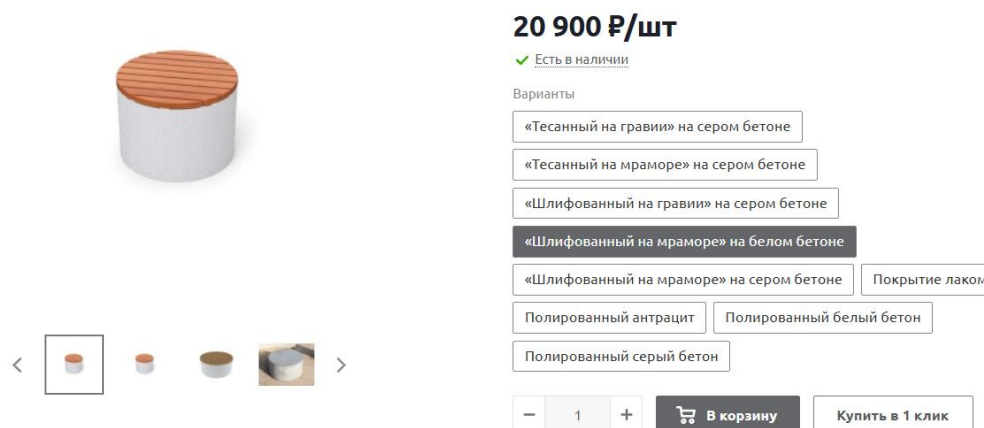


Рис. 4. Скамейка
Fig.4. The bench

Можно сделать вывод, что в случае наличия у университета бетонного 3D-принтера печать на нём малых архитектурных форм выходит дешевле в 33 раза, чем приобретение готовых изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье мы определили, что для благоустройства территории университета наиболее популярными малыми архитектурными формами являются павильоны, скульптуры, арки, скамейки, элементы освещения. Была рассчитана стоимость печати скамейки на бетонном 3D-принтере – 2388 руб. В специализированных магазинах стоимость скамеек около 21 000 руб. Таким образом, сравнительный анализ стоимости показывает, что использование 3D-печати для создания малых архитектурных форм может быть более экономически эффективным, учитывая сокращение трудозатрат и более эффективное использование материалов. Однако конкретные результаты могут варьироваться в зависимости от специфики проекта, доступных технологий и условий рынка. Ещё одним немаловажным преимуществом использования 3D-печати, является тот факт, что возможно быстро адаптировать печать под изготовление элементов близким к исторической стилистике зданий и сооружений, формирующих окружающее пространство, даже если они являются объектами культурного наследия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов Р.Т., Прокопьев А.П., Якшина А.А., Пиндур С.В. Моделирование 3D печати малых архитектурных форм // Вестник Евразийской науки. 2020. №2(12). С. 1-9.
2. Дорошук Н.Р. Малые архитектурные формы в городской среде // International scientific review. 2016. №21(31). С. 92-93.
3. Кулагина А.А., Барина Д.В. Роль малых архитектурных форм в благоустройстве города // НАУ. 2015. №7-3(12). С. 64-65.
4. Алиева Р.И., Соколова М.А. Материал в формировании облика малых архитектурных форм // АМІТ. 2023. №1(62). С. 327-346.
5. Самигуллина Р.Р. Роль информационных технологий в процессе проектирования малых архитектурных форм // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. №10(3).
6. Моторина Ю.В., Москвин Н.А. Формирование пространства университетских кампусов с целью создания благоприятных условий с учетом современных требований и развития в структуре города // Вестник РУДН. Серия: Агротомия и животноводство. 2013. №5. С. 76-84.
7. Валькова А.Н., Сорокина Т.С. Малые архитектурные формы. Их виды и значение в ландшафтном дизайне. Садовые фигуры из природных материалов // Евразийский научный журнал. 2018. №4. С. 111-113.
9. Проектирование малых архитектурных форм для 3D-печати // Наука и образование ON-LINУ.
10. Коротеев Д.Д., Коренева А.И. Применение аддитивных технологий производства в строительстве на примере разработки 3D-модели с последующей печатью // Системные технологии. 2021. №2 (39). С. 20-28.
11. Ли Лулу. строительные 3D-принтеры и их преимущества и недостатки // Экономика и социум. 2023. №10 (113)-1. С. 503-507.
12. Гетманченко О.В., Вяткина Б.М. Роль городского дизайна и малых архитектурных форм в развитии туристической индустрии // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2014. №5 (10). С. 103-112.
13. Мустафин Н.Ш., Барышников А.А. Новейшие технологии в строительстве. 3D-принтер // Региональное развитие. 2015. № 8 (12).
14. Лысыч М. Н. Материалы, доступные в рамках различных технологий 3D печати // М. Н. Лысыч, М. Л. Шабанов, Р. В. Воронцов // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 5. С. 20-25. EDN UHWEIN.
15. C.M. Rangel, A.S. Guimaraes, T.A.M. Salet, S.S. Lucas 3D printing lightweight mortars with cork to improve thermal efficiency in buildings // Construction and Building Materials. 2023. № 425. С. 1-19.
16. Rassokhin A.S., Ponomarev A.N., Shambina S.L., Karlina A.I. High performance lightweight concretes for 3D printing // Magazine of Civil Engineering. 2022. 115(7). Article № 11510.
17. Mukhametrakhimov, R.Kh., Lukmanova, L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // Magazine of Civil Engineering. 2021. 102(2). Article № 10206.
18. Peng Wu, Jun Wang, Xiangyu Wang A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry // Automation in construction. 2016. № 68. С. 21-31.
19. Khan M., Sanchez F., Zhou H. 3-D printing of concrete: Beyond horizons // Cement and Concrete Research.
20. Khan M., Sanchez F., Zhou H. A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2020. № 20.
21. Songyuan Geng, Qiling Luo, Kun Liu, Yunchao Li , Yuchen Hou, Wujian Long Research status and prospect of machine learning in construction 3D printing // Case Studies in Construction Materials . 2023. № 18.
22. Romdhane L. 3D Printing in Construction: Benefits and Challenges // International Journal of Structural and Civil Engineering Research . 2020. № 9. С. 314-317.
23. Gonçalo Duarte, Nathan Brown, Ali Memari, José Pinto Duarte Learning from historical structures under compression for concrete 3D printing construction // Journal of Building Engineering. 2021. № 43.
24. Rafael Robayo-Salazar, Ruby Mejía de Gutiérrez, Mónica A. Villaquirán-Cacedo, Silvio Delvasto Arjona 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector // Automation in Construction. 2022. № 146.
25. Alireza Hasani, Sattar Dorafshan. Transforming construction? Evaluation of the state of structural 3D concrete printing in research and practice // Automation in Construction. 2024. Article № 137027.

ОБ АВТОРАХ

Софья Александровна Гриднева – студент специалитета Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: gridneva.sa@edu.spbstu.ru

Ксения Олеговна Боровкова – студент специалитета Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: borovkova.ko@edu.spbstu.ru

Ольга Сергеевна Царёва – доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: tsareva_os@spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Sofia A. Gridneva - specialist student of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: gridneva.sa@edu.spbstu.ru.

Ksenia O. Borovkova - specialist student of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: borovkova.ko@edu.spbstu.ru.

Olga S. Tsareva – Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: tsareva_os@spbstu.ru.