

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074.5

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.1

Формообразование зданий на основе стержневых арок с изменяемой геометрией

Надежда Геннадьевна Царитова, Александр Анатольевич Тумасов,
Анастасия Алексеевна Курбанова, Анастасия Владиславовна Штанкевич

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ)); г. Новочеркасск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Пространственные стержневые конструкции покрытий применяют для более эффективного промышленного производства строительных конструкций, что позволяет снизить затраты от массовости их выпуска, специализации производства и рациональности конструктивных решений. При проектировании пространственных покрытий используют уникальные конструкции единичного исполнения, которые помогают решить грандиозные архитектурные и функциональные задачи. Большим спросом пользуются и покрытия, имеющие в своей основе стандартные элементы, которые способствуют созданию различных архитектурных форм.

Материалы и методы. Предметом исследования служит пространственная архитектурно-конструктивная система, которая дает возможность воплотить проектировочные задачи, являясь быстровозводимой, легкой, имеющей унифицированные элементы, исключающие монтажную сварку. Такие арки найдут широкое применение от спортивных до выставочных комплексов благодаря их быстрому монтажу. Арка может иметь очертания окружности, эллипса, параболы или, изгибаясь в двух направлениях, принимать форму произвольной кривой с сопряжением кривых, изогнутых в разные стороны.

Результаты. Пространственная арка собрана по принципу кристаллографической триангуляционной схемы, где можно выделить верхний и нижний пояса, раскосы и стержни. Предложен новый универсальный шарнирный соединительный элемент, связывающий от шести до двенадцати стандартных стержней, что дает возможность добиться минимального количества типоразмеров и выполнять наземную ручную сборку укрупненных элементов конструкции, пространственная жесткость системы обеспечена при их шарнирных связях между собой.

Выводы. Результаты исследования позволяют считать такой вариант стержневой пространственной арки перспективным решением. Установлено, что основным направлением усовершенствования пространственных стержневых конструкций является разработка новых узловых соединений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пространственные покрытия, металлические конструкции, архитектурно-конструктивные системы, пространственная арка, пространственная жесткость, шарнирное соединение, коннектор

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Царитова Н.Г., Тумасов А.А., Курбанова А.А., Штанкевич А.В. Формообразование зданий на основе стержневых арок с изменяемой геометрией // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 2. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.1

Автор, ответственный за переписку: Надежда Геннадьевна Царитова, ncaritova@yandex.ru.

Shaping of buildings based on rod arches with variable geometry

Nadezhda G. Tsaritova, Alexander A. Tumasov, Anastasia A. Kurbanova,
Anastasia V. Shtankevich

*South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI));
Novocherkassk, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Spatial core structures of coatings are used for more efficient industrial production of building structures, which reduces the costs of their mass production, specialization of production and rationality of design solutions. When designing spatial coverings, unique designs of single execution are used, which help to solve grandiose architectural and

© Н.Г. Царитова, А.А. Тумасов, А.А. Курбанова, А.В. Штанкевич, 2023

Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

functional tasks. But coatings that are based on standard elements that help to create various architectural forms are also in great demand.

Materials and methods. The subject of the study is a spatial architectural and structural system that is capable of implementing various design tasks, being fast-built, lightweight and having unified elements that exclude assembly welding. Such arches will find wide application from sports to exhibition complexes, thanks to their quick installation. The arch can take the shape of a circle, an ellipse, a parabola or bending in two directions, the arch can take the form of an arbitrary curve with the conjugation of curves curved in different directions.

Results. The spatial arch is assembled according to the principle of a crystallographic triangulation scheme, where the upper and lower belts, braces and rods can be distinguished. A new universal joint connecting element connecting from six to twelve standard rods is proposed, which allows achieving a minimum number of standard sizes and performing ground-based manual assembly of enlarged structural elements, the spatial rigidity of the system is ensured when they are articulated together.

Conclusions. The results of the present study allow us to consider such a variant of the rod spatial arch as a promising solution, as a result of the theoretical study, it was found that the main direction of improvement of spatial rod structures is the development of new nodal connections.

KEYWORDS: spatial coatings, metal structures, architectural and structural systems, spatial arch, spatial rigidity, hinge joint, connector

FOR CITATION: Tsaritova N.G., Tumasov A.A., Kurbanova A.A., Shtankevich A.V. Shaping of buildings based on rod arches with variable geometry. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(2):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.1

Corresponding author: Nadezhda G. Tsaritova, ncaritova@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Пространственные конструктивные системы покрытия дают возможность оптимизировать использование материалов и значительно облегчить конструкции, являясь фактором пространственного и объемного формирования сооружения. Одни из наиболее перспективных систем на сегодняшний день для применения в покрытиях — стержневые пространственные системы [1–3]. В строительстве актуальна задача поиска современных архитектурно-конструктивных систем, позволяющих разрабатывать новые методы возведения зданий и сооружений. Особое внимание стоит уделить исследованию пространственно-временных преобразований стержневых пространственных покрытий.

Пространственные металлические конструкции покрытия, отличающиеся легкостью, композиционной гибкостью форм, сборностью, служат основным инструментом архитектора и конструктора в создании зданий и сооружений средних и больших пролетов [4, 5]. Ключевую роль в них играют стержневые конструктивные элементы остова, при этом стержни имеют длину от 2 до 20 м.

В формировании пространственных покрытий используются нетиповые конструктивные системы разового исполнения, способные решать грандиозные архитектурно-художественные и функциональные задачи [6–8]. Широким спросом пользуются и системы, с помощью которых можно создавать значительный спектр архитектурных форм на основе стандартных элементов, отличающихся малым количеством типов стержней и соединительных элементов. Стандартизация и унификация предполагают существенное снижение сварочно-монтажных работ на объекте, выполнение которых сопряжено с высокой трудоемкостью и отсутствием контроля качества.

Авторами разрабатывается уникальная конструкция пространственного покрытия на основе стержневой арки, эта работа требует комплексного

подхода от архитектурной идеи (формообразования) до конструкторских расчетов и технологий возведения подобного рода зданий. Чтобы справиться с поставленной задачей, необходимо использовать современные программные комплексы — технологии информационного моделирования (ТИМ).

В настоящее время есть множество исследований похожих пространственных конструкций в РФ и за рубежом. Примерами могут служить спортивная арена в Лужниках, ледовая арена в г. Сочи, раздвижное покрытие стадиона в Торонто, покрытие летнего амфитеатра в Витебске, стадионы в Шанхае и Риме. Но все они посвящены проектированию и анализу напряженно-деформированного состояния элементов стационарных покрытий, авторами настоящего исследования предлагается изучение трансформируемой пространственной стержневой арки.

Почти все существующие архитектурно-конструктивные системы пространственных покрытий средних и больших пролетов не обладают мобильностью, т.е. способностью быстро монтироваться и демонтироваться. Это связано с типом соединений отдельных составляющих, которые, как правило, являются жесткими [9]. Разработанные в мировой практике отдельные системы мгновенно жестких стержне-вантовых конструкций, обладающие высокой мобильностью, ограничены по форме и размерам, что не позволяет использовать их на объектах строительства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предмет исследований и разработок авторов — пространственная архитектурно-конструктивная система дает возможность решать широкий круг архитектурных задач и при этом использовать комбинаторно гибкую и быстромонтируемую, легкую и унифицированную конструктивную основу. Инженерно-техническим условием в разработке является создание унифицированного соединения стержней, исключающего монтажную сварку.

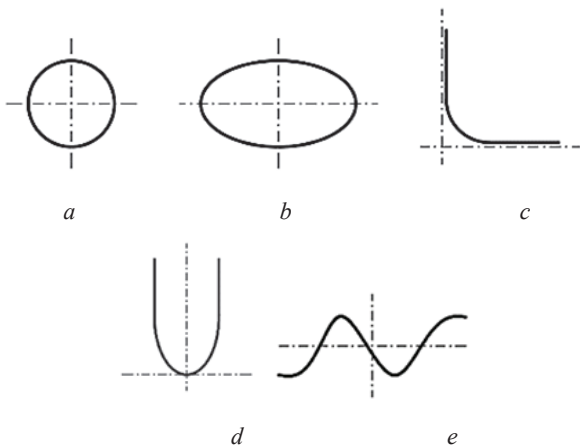


Рис. 1. Профили стержневых арок: *a* — окружность; *b* — эллипс; *c* — гипербола; *d* — парабола; *e* — кривая, изогнутая в двух направлениях (рисунок авторов)

Такая система теоретически создана и апробирована на моделях. В основе ее стержневая решетка триангуляционного вида [10], применяется как плоская (однослойная), так и пространственная (двухслойная).

Изменение очертания арки зависит от выбранной длины стержневых элементов [11–13]. Очертания арки и, соответственно, стрелу подъема и пролет можно выбирать согласно принципу оптимизации пространства под различные функциональные процессы (спорт, выставка, торговля, концерты, склад, производство и т.д.). Арка может, изгибаясь в одном направлении, принимать очертания, соответствующие математическим плоским алгебраическим кривым второго порядка: окружность, эллипс, гипербола, парабола, циклоида [14]. Изгибаясь в двух направлениях, арка может принимать форму произвольной кривой с сопряжением кривых, изогнутых в разные стороны (рис. 1).

Понятие «динамика» в архитектуре, кроме ассоциативно-образного содержания форм и композиций, получает физическое значение, связанное с пространственно-временными характеристиками организуемой среды. Это сравнительно новое качество понятия «динамика» в архитектуре связано и с архитектурной деятельностью — материальным и архитектурно-конструктивным формообразова-

Варианты форм геометрии

Геометрическая поверхность		Объемно-пространственная форма
Купольные	Сферические	
	Стрельчатые	

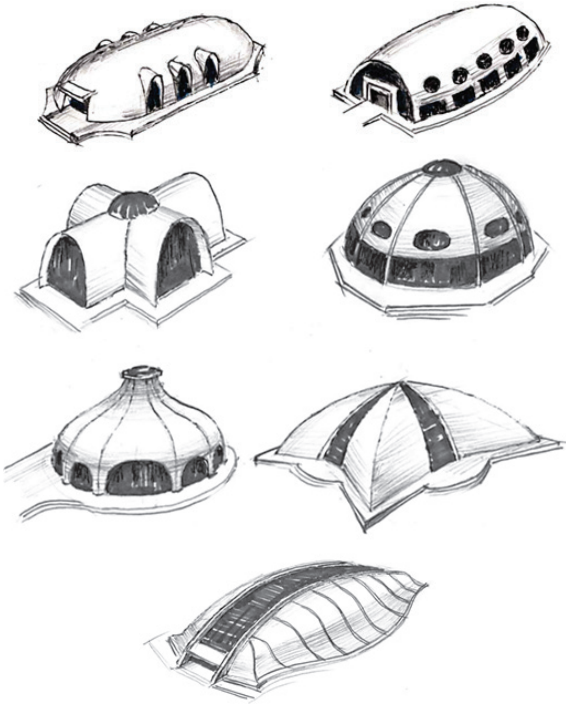


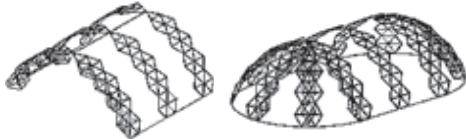
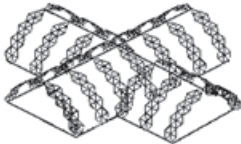
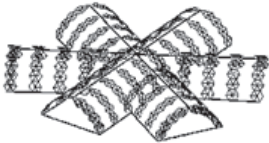
Рис. 2. Форма архитектурных объектов на основе стержневой пространственной арки (рисунок авторов)

нием. Под динамичным архитектурно-конструктивным формообразованием следует понимать совокупность трансформаций геометрических параметров изменяемой среды (кинматику) и механизма физических преобразований материальной оболочки организуемого пространства.

В истории архитектуры, особенно современной, известно множество примеров использования арок в формировании уникальных зданий и сооружений. Современный уровень строительного искусства и техники позволяет архитектору реализовать свои фантазии (рис. 2), создавая выразительный и предельно функциональный пространственный объект.

Предложенная авторами конструкция трансформируемой арки может принимать любую из форм, представленных на рис. 2, за счет подвижных (шарнирных) соединений между отдельными стержнями и изменения длины стержней нижнего пояса. Все виды получаемых таким образом кин-

Окончание табл.

Геометрическая поверхность		Объемно-пространственная форма
Купольные	Эллиптические	
	Свободной формы	
Цилиндрические	1/2 окружности	
	1/3 окружности	
Крестовые	Углы пересечения	
	90°	
	60°	
Сомкнутый		

матических систем способны трансформироваться из плоского состояния в пространственное.

В таблице представлены варианты использования трансформируемой стержневой арки в формообразовании зданий и сооружений. Такие формы являются законченными объемами, способными активно участвовать в формировании открытых пространств, в развитии и реконструкции существующих ансамблей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных исследований продуктивное преломление природной кинематической модели в архитектурно-конструктивную форму возможно при реализации следующих требований:

- геометрически неизменяемая схема структуры при шарнирном соединении всех стержней между собой;

- наличие шарнирных связей между стержнями, обеспечивающих необходимую кинематику всей структуре;
- возможность изменения длины стержней одного или обоих слоев сетей.

Интерес при конструировании пространственной арки представляет выбор узлового соединения. Узловые сопряжения по типу монтажных соединений можно разделить на: сварные; болтовые (осеболтовые, сдвигоболтовые); шпоночные; контактные, контактно-фрикционные; комбинированные.

В настоящей статье рассматриваются виды и конструктивные варианты шарнирных соединений стержней в системе, способной создавать значительный диапазон форм и размеров пролетных строений. В природе и в технике существуют три вида шарниров. Шарнир шаровой имеет три степени свободы и позволяет осуществлять вращение вокруг осей, проходящих через центр шара. В природе примерами такого шарнира являются тазобедренный и плечевой суставы человека. Шарнир блочно-поворотный производит вращение вокруг одной оси и поворот ее в данной плоскости. Две степени свободы такого шарнира дают возможность выполнять значительное количество перемещений. Самый простой вид шарнира, обладающий одной степенью свободы, — блочный (цилиндрический) шарнир. Скелет человека, как кинематическая система, в основном состоит из жестких элементов с одной степенью свободы (коленный, локтевой суставы, кисти рук), но каждый сустав как твердое тело может перемещаться в пространстве и дополнительно иметь три степени свободы.

Одно из направлений в разработке динамических архитектурно-конструктивных систем — это создание шарнирного соединения и механизма изменения длины стержней. На сегодняшний день разработан ряд предложений и получены авторские свидетельства и патенты на конструктивное решение шарнирного узла, способного соединять до 12 стержней.

В представленном варианте стержневой пространственной арки [15] применен принцип общей архитектурно-конструктивной системы: триангуляционная пространственная сетка стержней; стандартные стержневые элементы минимального количества типоразмеров (2–3); универсальный соединительный элемент, связывающий от 6 до 12 стержней, использующий блочный (цилиндрический) шарнир. Имеется возможность наземной ручной сборки укрупненных элементов конструкции, пространственная жесткость системы при их шарнирных связях между собой.

Если стержневой элемент прост в изготовлении и представляет собой линейную конструкцию с шаровидным завершением на концах, то важное значение имеет конструкция шарнирного соединения. В предыдущих работах авторами приводились варианты бионических аналогов такого соединения, которое обеспечивает подвижность всех стержней с одной степенью свободы, что достаточно для трансформации нашей кинематической системы [16–18]. Разработан наиболее универсальный и технологический соединительный элемент [19, 20] для изготовления в реальных арочных конструкциях средних и больших пролетов (рис. 3).

Три детали соединения связываются с одним универсальным и фиксируются периферийными винтами, а после трансформации, когда все элементы системы примут проектное положение, периферийные винты плотно затягиваются. Изучаются прочностные характеристики этого соединения в различных монтажных и эксплуатационных исследованиях.

Анализ формообразующих возможностей представленной архитектурно-конструктивной системы идет по нескольким направлениям, одно из которых — пространственные стержневые арки.

Пространственная арка собрана по принципу кристаллографической триангуляционной схемы, где можно выделить верхний и нижний пояса и раскосы (рис. 4).

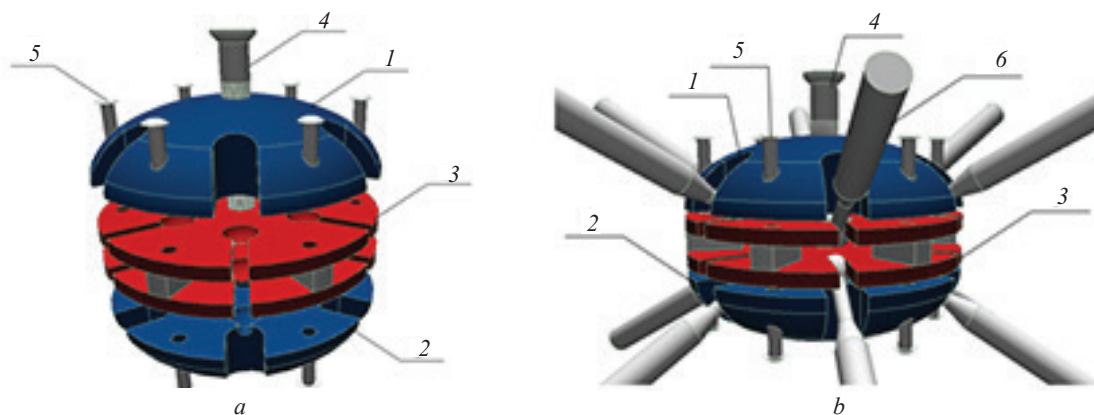


Рис. 3. Узел шарнирного соединения стержней: *a* — вид узла без стержней; *b* — вид узла со стержнями; 1 — верхняя крышка; 2 — нижняя крышка; 3 — промежуточный элемент; 4 — центральный болт; 5 — периферийный винт; 6 — стержень арки (рисунок авторов)

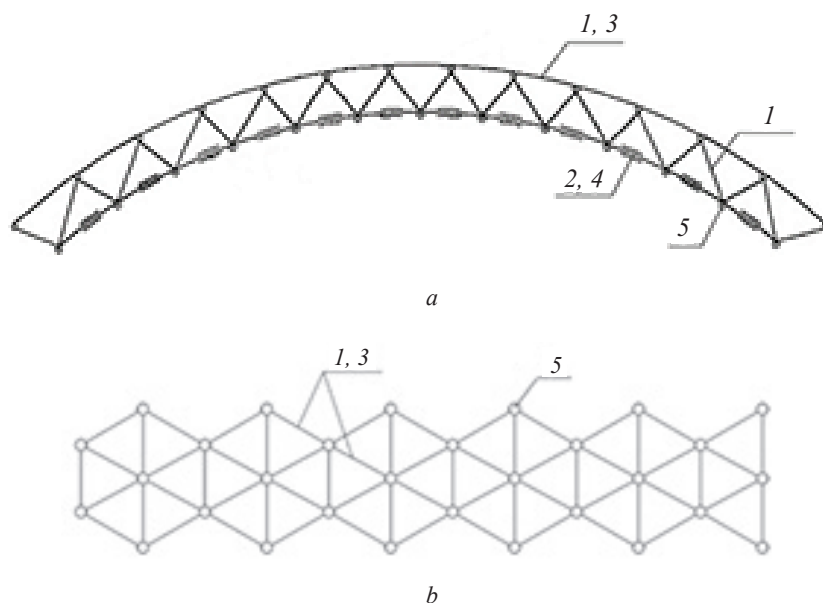


Рис. 4. Схема трансформируемой пространственной стержневой арки: *a* — профиль арки; *b* — вид сверху; 1 — верхний пояс; 2 — нижний пояс; 3 — стержни стандартной длины; 4 — стержни укороченные; 5 — узел шарнирного соединения стержней (рисунок авторов)

Как все арки в практике строительства, предлагаемая арка может быть одношарнирной, двухшарнирной и трехшарнирной. В сборном виде арочная конструкция удобна в трехшарнирном варианте, позволяющем выполнять укрупненную сборку полуарки.

Арочные трансформируемые системы имеют ряд преимуществ при рассмотрении их в плане биопозитивного строительства:

- по затрате металла арки оказываются значительно выгоднее, чем балочные и рамные конструкции;
- арочные покрытия позволяют в несколько раз снизить расход энергоносителей и эффективно использовать альтернативные источники тепла.

Процесс трансформации арки в проектное положение предлагается обеспечивать при помощи механических приводов (актуаторов) с учетом соб-

ственного веса конструкции. Устройство актуатора, предназначенного для шарнирного соединения в узлах, показано на рис. 5.

Высокие аэродинамические и конструктивные свойства, скорость и простота монтажа, возможность доставки в отдаленные районы всех составляющих элементов в компактно упакованном виде, возможность демонтажа и переноса сооружения на новое место, малая нагрузка на основание позволяют применять подобные конструкции с большой эффективностью.

Перечисленные характеристики трансформируемых пространственных стержневых конструкций позволяют также рекомендовать подобные конструкции для строительства в курортных районах, особенно расположенных в сейсмически опасных зонах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Композиция арочных систем различных очертаний служит решению многих функциональных и художественных задач. Предлагаемые арочные стержневые конструкции, обладающие свойством трансформации и позволяющие на основе одной архитектурно-конструктивной системы получать многообразие форм и параметров зданий и сооружений, могут стать важным компонентом в художественной палитре архитектора.

Для достижения поставленных целей рассмотрена база существующих пространственных конструктивных решений. Выявлено много аналогов, позволяющих создавать быстровозводимые здания, но обладающих рядом недостатков по сравнению с пространственными арками. Так, арочные

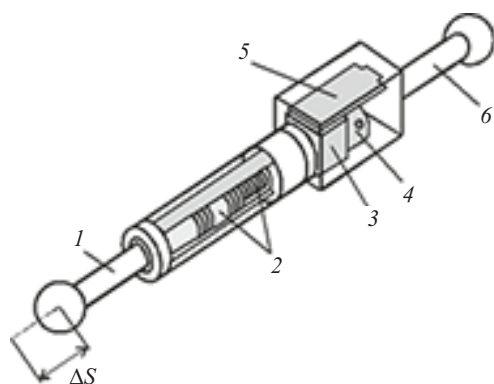


Рис. 5. Устройство актуатора: 1 — подвижный шток; 2 — передача «винт — гайка»; 3 — электродвигатель; 4 — энкодер; 5 — контроллер; 6 — опорный стержень

стержневые конструкции состоят из большого числа однотипных элементов, что позволяет наладить серийное производство; обладают меньшим весом благодаря применению полых труб круглого сечения; строительная площадка может служить непосредственным местом их сборки; также существует множество способов монтажа арок, упрощающих процесс возведения зданий и сооружений.

Авторами проведен поиск существующих форм на основе арочных конструкций. Удалось выделить следующие виды ключевых форм: купольные, цилиндрические, крестовые, сомкнутые и пологие.

Анализ теоретических исследований показал, что представленный узловой элемент наиболее эффективен для данного вида арки. Таким образом, разработана концепция новой системы пространственных арок, конструктивные решения которых дадут возможность сэкономить как материальные, так и человеческие ресурсы при строительстве различных крупнопролетных зданий.

В основу разработки систем арочных пространственных конструкций были положены следующие ключевые архитектурно-конструктивные предположения:

- единый унифицированный сортамент элементов с максимальными композиционными возможностями; использование оптимальных по форме малододефицитных профилей проката;
- применение высокопрочных материалов; полная индустриализация производства, основанная

на использовании высокопроизводительного автоматического оборудования, литья, штамповки и т.п.;

- компактность элементов системы и возможности их транспортировки любым видом транспорта; высокая надежность, быстрота сборки и монтажа элементов, включая конвейерную сборку и крупноблочный монтаж; широкие возможности объемно-пространственной композиции.

Здания на базе арок органично вписываются в существующие ландшафты и городские застройки. А их внутренние полезные объем и площадь достаточны для большого числа возможных функциональных назначений: от крытых садов и рынков до спортивных, развлекательных и торговых комплексов.

Отсутствие промежуточных опор создает свободу планирования пространства, возможность устройства верхнего естественного освещения в виде световых фонарей различной конфигурации, позволяет существенно экономить на дополнительном искусственном освещении. Внутри объектов из трансформируемых арок, предложенных авторами, можно создавать различные варианты планировки с помощью легких перегородочных систем, которые при необходимости могут быть легко разобраны и перенесены.

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что арочные стержневые покрытия представляют собой перспективную разработку конструктивных систем, способных найти применение в гражданском и промышленном строительстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шухов В.Г. Избранные труды: строительная механика. М. : Наука, 1977. 192 с.
2. Трофимов В.И., Бегун Г.Б. Структурные конструкции: исследование, расчет и проектирование. М. : Стройиздат, 1972. 272 с.
3. Бабич В.Н., Кремлев А.Г., Холодова Л.П. Методология системного анализа в архитектуре // Архитектон: известия вузов. 2011. № 2 (34). С. 3.
4. Клячин А.З. Металлические решетчатые пространственные конструкции регулярной структуры (разработка, исследование, опыт применения). Екатеринбург : Диамант, 1994. 277 с.
5. Еремеев П.Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений. М. : Ассоциация строительных вузов, 2009. 336 с.
6. Келасьева Н.Г. Особенности проектирования и строительства футбольного стадиона в Казани для проведения чемпионата мира по футболу // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 6. С. 51–55.
7. Свентиков А.А., Кузнецов Д.Н. Автоматизированное проектирование пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы // Строительство и реконструкция. 2021. № 1. С. 38–49. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-38-49
8. Goeppert K., Stein M. International stadium projects: each unique and easy to recognize // Structures Congress 2009. 2009. DOI: 10.1061/41031(341)266
9. Kim S. Shear strength investigation of connections between RC and strengthened steel frames // International Journal of Steel Structures. 2021. Vol. 21. Issue 5. Pp. 1845–1858. DOI: 10.1007/s13296-021-00538-2
10. Инжутов И.С., Дмитриев П.А., Деордиев С.В., Захарюта В.В. Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С. 61–71. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.3.61-71
11. Тумасов А.А., Царитова Н.Г., Курбанова А.И., Калинина А.А. Геометрические параметры стержневых трансформируемых арочных систем //

Строительство и архитектура. 2017. Т. 5. № 2. С. 135–140. DOI: 10.12737/article_59806881305c30.67459418

12. Емельянов Д.И., Кузнецов Д.Н., Федосова Л.А., Глушков А.А. Применение BIM-технологий для проектирования криволинейных покрытий на основе пространственных решетчатых конструкций // Строительная механика и конструкции. 2019. № 1 (20). С. 71–81.

13. Гайджуrow П.П., Царитова Н.Г. Моделирование процесса направленной трансформации регулярных шарнирно-стержневых систем // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2021. № 1 (209). С. 5–11. DOI: 10.17213/0321-2653-2021-1-5-11

14. Кривошапко С.Н. Оболочки и стержневые структуры в форме аналитически задаваемых поверхностей в современной архитектуре // Строительство и реконструкция. 2020. № 3. С. 20–30. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30

15. Tsaritova N.G., Tumasov A.A., Kalinina A.A., Kosogov I.V. Possibilities of Architectural and Constructive Shaping of Spatial Forms from Rod Arches // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Pp. 229–235. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_31

16. Семикин П.П., Бацунова Т.П. Динамическая архитектура. Кинетические фасады // Известия высших

учебных заведений. Строительство. 2018. № 6 (714). С. 86–96.

17. Tsaritova N.G., Buzalo N.A., Tumasov A.A., Platonova I.D., Kurbanov A.I., Kalinina A.A. et al. Transformable systems of spatial structures based on bionic analogues // Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.65

18. Kociekki M., Adeli H. Shape optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex geometries using evolutionary computing // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2015. Vol. 38. Pp. 168–182. DOI: 10.1016/j.engappai.2014.10.012

19. Buzalo N.A., Alekseev S.A., Tsaritova N.G. Numerical analysis of spatial structural node bearing capacity in the view of the geometrical and physical nonlinearity // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1748–1753. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.165

20. Алексеев С.А., Бузало Н.А., Царитова Н.Г., Моисеенко Г.А. Определение силового сопротивления узла пространственной стержневой конструкции // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2020. № 6 (1030). С. 36–38.

Поступила в редакцию 7 ноября 2022 г.

Принята в доработанном виде 10 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 10 мая 2023 г.

Об авторах: Надежда Геннадьевна Царитова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений; Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ)); 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132, ncaritova@yandex.ru;

Александр Анатольевич Тумасов — кандидат архитектуры, доцент, профессор кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений; Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ)); 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; tumasovalexander@gmail.com;

Анастасия Алексеевна Курбанова — аспирант кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений; Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ)); 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; anastasia.a.kalinina@yandex.ru;

Анастасия Владиславовна Штанкевич — аспирант кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений; Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ(НПИ)); 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; anastasiyashtankevich@mail.ru.

Вклад авторов:

Царитова Н.Г. — научное руководство, концепция исследования, доработка текста, итоговые выводы.

Тумасов А.А. — научное руководство, концепция исследования, итоговые выводы.

Курбанова А.А. — сбор и обработка данных, редактирование статьи, доработка текста.

Штанкевич А.В. — сбор и обработка данных, редактирование статьи, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

Spatial structural coating systems offer the opportunity to optimize the use of materials and to make structures

considerably lighter, being a factor in the spatial and volumetric formation of the structure. One of the most promising systems today for application in roofs is the rod

spatial systems [1–3]. In building construction the task of searching modern architectural and structural systems, allowing to develop new methods of erection of buildings and constructions is actual. Particular attention should be paid to the study of spatial and temporal transformations of rod spatial coverings.

Spatial metal coating structures, characterized by lightness, compositional flexibility of forms, and assemblage, serve as the main tool of the architect and designer in creating buildings and structures of medium and large spans [4, 5]. The key role in them is played by the rod structural elements of the skeleton, and the rods have a length from 2 to 20 m.

In the formation of spatial coverings, non-standard structural systems of single execution are used, capable of solving grandiose architectural and artistic and functional tasks [6–8]. Systems with which a considerable range of architectural forms can be created on the basis of standard elements characterized by a small number of types of rods and connecting elements are also in wide demand. Standardization and unification involves a significant reduction in on-site welding and assembly work, which is labour-intensive and lacks quality control.

The authors are developing a unique spatial coating structure based on a rod arch; this work requires an integrated approach from the architectural idea (shaping) to the design calculations and technologies for the construction of this type of building. To cope with the task, it is necessary to use modern software complexes — information modelling technologies (IMT).

Currently, there are many studies of similar spatial structures in the Russian Federation and abroad. Examples are the sports arena in Luzhniki, the ice arena in Sochi, the sliding stadium surface in Toronto, the summer amphitheatre surface in Vitebsk, stadiums in Shanghai and Rome. But all of them are devoted to the design and analysis of the stress-strain state of elements of stationary coverings, the authors of the present study propose the study of a transformable spatial rod arch.

Almost all existing architectural and structural systems of spatial coverings of medium and large spans lack mobility, i.e. the ability to be quickly assembled and dismantled. This is due to the type of connections of the individual components, which are usually rigid [9]. The individual systems of instantly rigid core-vane structures developed in world practice, which have high mobility, are limited in shape and size, which does not allow their use on construction sites.

MATERIALS AND METHODS

The subject of the authors' research and development is the spatial architectural and structural system, which makes it possible to solve a wide range of architectural problems while using a combinatorially flexible and quickly assembled, lightweight and unified structural basis. The engineering prerequisite in the development

is the creation of a unified connection of the rods, eliminating assembly welding.

Such a system is theoretically created and tested on models. It is based on a rod lattice of triangulated form [10], applied both flat (single layer) and spatial (double layer).

The change in the outline of the arch depends on the selected length of the rod elements [11–13]. The outline of the arch and consequently the lift and span can be selected according to the principle of space optimization for various functional processes (sports, exhibition, trade, concerts, warehouse, production etc.). The arch can, bending in one direction, take shapes corresponding to mathematical flat algebraic curves of the second order: circle, ellipse, hyperbola, parabola, cycloid [14]. By bending in two directions, the arch can take the form of an arbitrary curve with the conjugation of curves curved in different directions (Fig. 1).

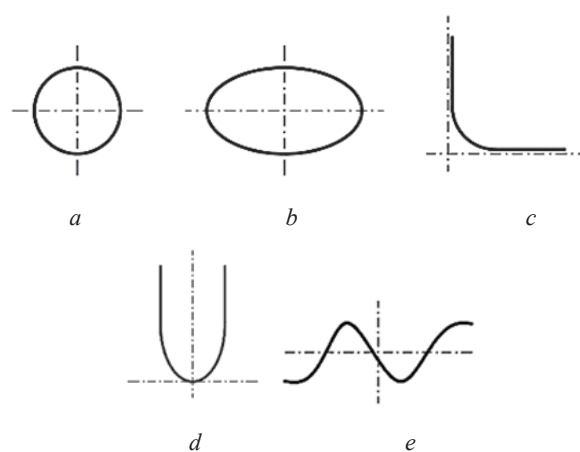


Fig. 1. Profiles of rod arches: *a* — circle; *b* — ellipse; *c* — hyperbola; *d* — parabola; *e* — curve, curved in two directions (authors' drawing)

The notion of “dynamics” in architecture, in addition to the associative and imaginative content of forms and compositions, is given a physical meaning associated with the spatial and temporal characteristics of the organized environment. This relatively new quality of the notion of “dynamics” in architecture is also associated with architectural activity — material and architectural and constructive form formation. By dynamic architectural and structural shaping should be understood a set of transformations of geometric parameters of the changing environment (kinematics) and the mechanism of physical transformations of the material shell of the organized space.

In the history of architecture, especially modern architecture, there are many examples of the use of arches in the formation of unique buildings and structures. The modern level of construction art and technology allows the architect to realize his fantasies (Fig. 2), creating an expressive and extremely functional spatial object.

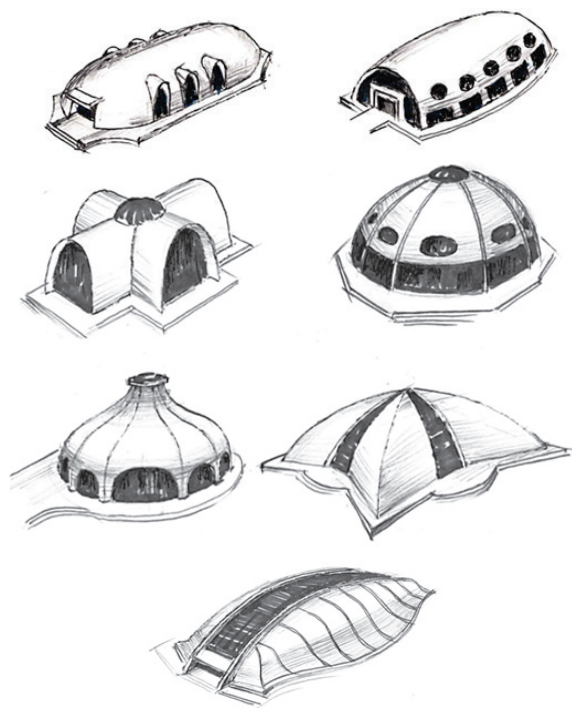


Fig. 2. Shape of architectural objects based on a rod spatial arch (authors' drawing)

The construction of a transformable arch proposed by the authors can take any of the shapes shown in Fig. 2 by means of movable (hinged) joints between

individual rods and changing the length of the lower chord rods. All types of kinematic systems obtained in this way are capable of transforming from a flat state to a spatial one.

The table shows the use of the transformable rod arch in the shaping of buildings and structures. These forms are complete volumes capable of actively participating in the formation of open spaces and in the development and reconstruction of existing ensembles.

RESEARCH RESULTS

As a result of the research carried out, a productive refraction of the natural kinematic model into an architectural and structural form is possible if the following requirements are realized:

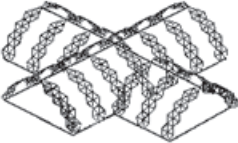
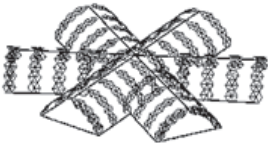
- geometrically invariable structure layout with all rods pivoting together;
- the presence of articulated links between the rods, providing the necessary kinematics for the entire structure;
- the possibility of changing the length of the rods of one or both layers of nets.

When designing a spatial arch, it is of interest to select a node connection. According to the type of assembly joints, node joints can be divided into:

Variations in geometric shapes

Geometric surface		Volumetric and spatial form
Dome	Spherical	
	Arrowheads	
	Elliptical	
	Freeform	
Cylindrical	1/2 circle	

End of the Table

Geometric surface		Volumetric and spatial form
Cylindrical	1/3 circle	
Crosses	Intersection angles	
	90°	
Crosses	60°	
Closed		

welded; bolted (axle-bolt, shear-bolt); keyed; contact, contact-friction; combined.

This article deals with the types and design options of rod joints in a system capable of producing a significant range of shapes and sizes of span structures. There are three types of joints in nature and in engineering. A ball-and-socket joint has three degrees of freedom and allows rotation around axes that pass through the centre of the ball. Examples of this type of joint in nature are the human hip and shoulder joint. A block-and-pivot joint rotates about one axis and rotates in a given plane. The two degrees of freedom of this type of joint allow for a large number of movements. The simplest type of joint with one degree of freedom is the block joint (cylindrical joint). The human skeleton as a kinematic system mainly consists of rigid elements with one degree of freedom (knee, elbow joints, hands), but each joint as a solid body can move in space and additionally have three degrees of freedom.

One of the directions in the development of dynamic architectural and structural systems is the creation of a hinged joint and a mechanism for changing the length of the rods. To date, a number of proposals have been developed and patents have been obtained for the design of a hinge joint capable of connecting up to 12 rods.

In the presented variant of the spatial rod arch [15] the principle of general architectural and structural system is applied: triangulated spatial grid of rods; standard rod elements of a minimum number of standard sizes (2–3); a universal connecting element linking 6 to 12 rods, using a block (cylindrical) hinge. There is a possibility of ground-based manual assembly of enlarged structural elements, spatial rigidity of the system when they are hinged to each other.

If the rod element is simple to fabricate and is a linear structure with a spherical termination at the ends, the design of the hinge joint is important. In previous works, the authors gave variants of bionic analogues of such a connection, which provides mobility of all rods with one degree of freedom, which is enough to transform our kinematic system [16–18]. The most versatile and technological connection element [19, 20] for manufacturing in real arch structures of medium and large spans has been developed (Fig. 3).

The three parts of the connection are bonded to one universal and secured with peripheral screws, and after transformation, when all system components have reached their designed position, the peripheral screws are tightened firmly. The strength characteristics of this connection are studied in various installation and performance studies.

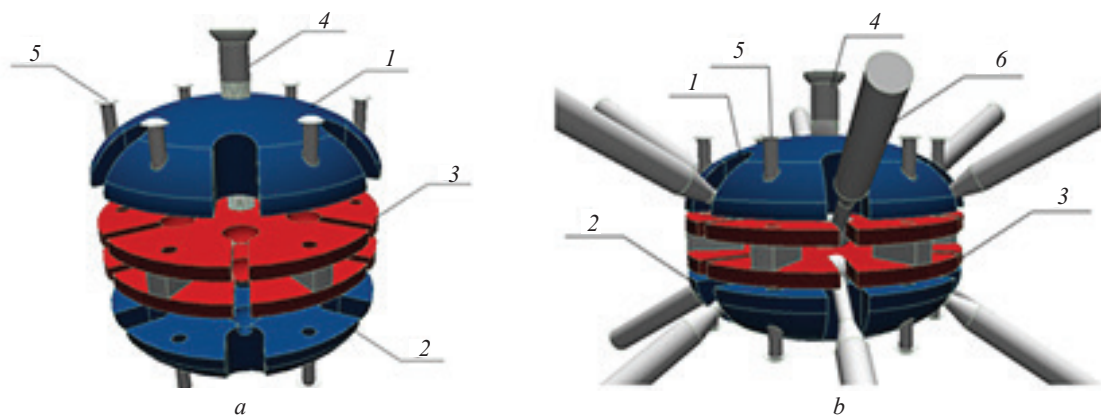


Fig. 3. Hinged rod assembly: *a* — view of assembly without rods; *b* — view of assembly with rods; 1 — top cover; 2 — bottom cover; 3 — intermediate element; 4 — central bolt; 5 — peripheral screw; 6 — arch rod (authors' drawing)

The analysis of the shape-forming possibilities of the presented architectural and structural system goes in several directions, one of which is — spatial rod arches.

The spatial arch is assembled according to the principle of a crystallographic triangulation scheme, where the upper and lower belts and struts can be distinguished (Fig. 4).

Like all arches in construction practice, the proposed arch can be single hinged, double hinged and triple hinged. In prefabricated form, the arch structure is convenient in the three-hinged version, allowing for the enlarged assembly of the half-arch.

The arched transformable systems have a number of advantages when considered in terms of biopositive construction:

- arches are considerably more cost-effective than girder and frame structures in terms of metal consumption;

- arch coverings can reduce energy consumption by several times and make efficient use of alternative heat sources.

The process of transforming the arch to its design position is proposed to be achieved by means of mechanical actuators, taking into account the dead weight of the structure. The design of an actuator designed for articulated joints is shown in Fig. 5.

The high aerodynamic and structural properties, the speed and ease of installation, the ability to transport all components in a compact package to remote areas, the possibility of dismantling and transferring the structure to a new location, and the low load on the substrate make these structures very effective.

The listed characteristics of the transformable spatial rod structures also allow such structures to be recommended for construction in resort areas, especially those located in seismically hazardous zones.

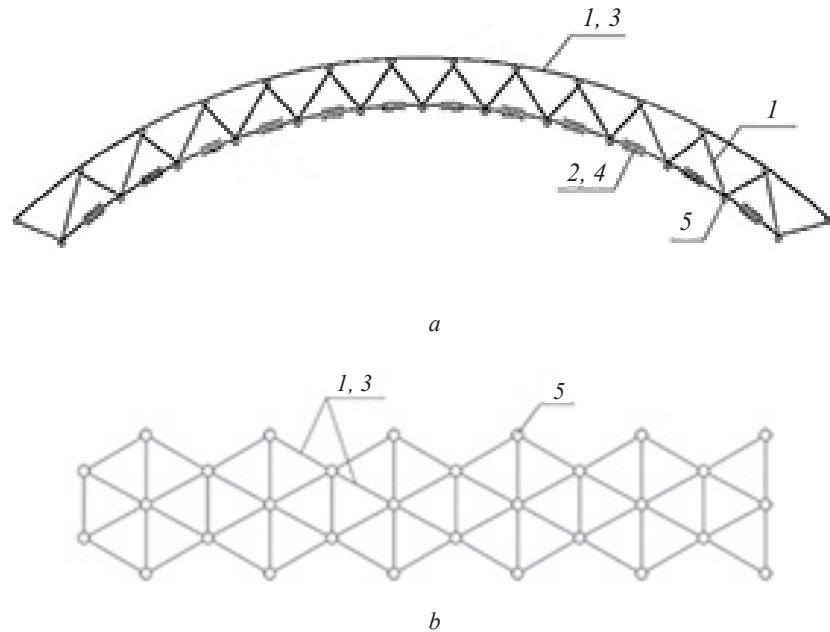


Fig. 4. Schematic diagram of a transformed spatial rod arch: *a* — arch profile; *b* — top view; 1 — top chord; 2 — bottom chord; 3 — standard length rods; 4 — shortened rods; 5 — rod hinge node (authors' drawing)

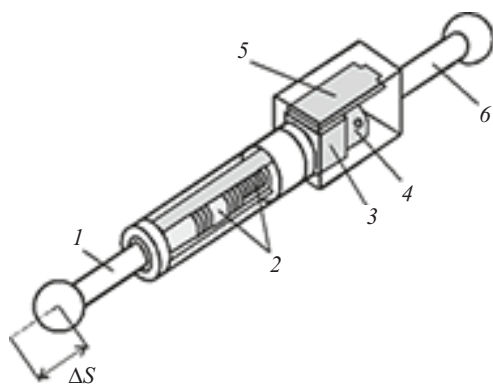


Fig. 5. Actuator design: 1 — moving rod; 2 — screw/nut gear; 3 — electric motor; 4 — encoder; 5 — controller; 6 — support rod

CONCLUSION AND DISCUSSION

The composition of arched systems of various shapes serves to solve many functional and artistic problems. The proposed arched rod structures, which have the property of transformation and allow a variety of forms and parameters of buildings and structures on the basis of a single architectural and structural system, can become an important component in the architect's artistic palette.

In order to achieve the objectives, the base of existing spatial structural solutions has been considered. There are many analogues which allow to create fast buildings, but have a number of disadvantages in comparison with spatial arches. Thus, arched bar constructions consist of a large number of one-type elements, which allows serial production; they have less weight due to the use of hollow tubes of round section; the construction site can serve as a direct place for their assembly; there are also many ways of arch installation, which simplifies the process of erecting buildings and structures.

The authors searched for existing forms based on arch structures. The following types of key forms were identified: domed, cylindrical, cross-shaped, closed and gently sloping.

The analysis of theoretical studies has shown that the presented nodal element is the most effective for this type of arch. Thus, the concept of a new system of spatial arches has been developed, whose design solutions will give an opportunity to save both material and human resources in the construction of various large-span buildings.

The following key architectural and structural assumptions were used as the basis for the development of the arched spatial construction systems:

- a single unified range of elements with the maximum compositional possibilities; the use of optimum low-deficit rolled sections in terms of shape;
- use of high-strength materials; full industrialization of production based on the use of high-performance automatic equipment, casting, stamping, etc.;
- compactness of the system elements and their transportability by any means of transport; high reliability, quick assembly and installation of the elements, including conveyor assembly and large block assembly; wide possibilities of spatial composition.

Arched buildings fit seamlessly into existing landscapes and urban developments. In addition, their internal usable volume and area are sufficient for a large number of possible functional uses: from indoor gardens and markets to sports, leisure and shopping complexes.

The absence of intermediate supports creates freedom of space planning, the possibility of overhead natural lighting in the form of skylights of different configurations, allows significant savings in additional artificial lighting. Inside the objects made of transformable arches suggested by the authors, various layout options can be created using lightweight partition systems, which can be easily dismantled and relocated if necessary.

As a result of this study, it can be concluded that arched rod coverings are a promising development of structural systems that can find application in civil and industrial construction.

REFERENCES

1. Shukhov V.G. *Selected works: construction mechanics*. Moscow, Nauka, 1977; 192. (rus.).
2. Trofimov V.I., Begun G.B. *Structural constructions: research, calculation and design*. Moscow, Stroyizdat, 1972; 272. (rus.).
3. Babich V.N., Kremlev A.G., Kholodova L.P. Methodology of systems analysis in architecture. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2011; 2(34):3. (rus.).
4. Klyachin A.Z. *Metal Lattice Space Structures Having Regular Structure (Development, Study, Application Experience)*. Ekaterinburg, Diamant, 1994; 276. (rus.).
5. Eremeev P.G. *Modern large-span steel structures for one of a kind building*. Moscow, Association of Construction Universities, 2009; 336. (rus.).
6. Kelasyev N.G. Peculiarities of design and construction of the football stadium in Kazan for the 21st world cup FIFA final tournament. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 6:51-55. (rus.).
7. Sventikov A.A., Kuznetsov D.N. Computer-aided design of spatial lattice steel structures for coatings of complex shape. *Building and Reconstruction*. 2021; 1(93):38-49. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-38-49 (rus.).

8. Goepfert K., Stein M. International stadium projects: each unique and easy to recognize. *Structures Congress 2009*. 2009. DOI: 10.1061/41031(341)266
9. Kim S. Shear strength investigation of connections between RC and strengthened steel frames. *International Journal of Steel Structures*. 2021; 21(5):1845-1858. DOI: 10.1007/s13296-021-00538-2
10. Inzhutov I.S., Dmitriev P.A., Deordiev S.V., Zakharyuta V.V. Analysis of Available Space Structure Joints and Design of Demountable Modular Joints. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2013; 3:61-71. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.3.61-71 (rus.).
11. Tumasov A.A., Tsaritova N.G., Kurbanov A.I., Kalinina A.A. Geometric parameters of rod transformable arch systems. *Construction and Architecture*. 2017; 5(2):135-140. DOI: 10.12737/article_59806881305c30.67459418 (rus.).
12. Emelyanov D.I., Kuznetsov D.N., Fedosova L.A., Glushkov A.A. Application of BIM technologies for the design of curved coatings based on spatial lattice structures. *Construction Mechanics and Structures*. 2019; 1(20):71-81. (rus.).
13. Gaydzurov P.P., Zaritova N.G. Modeling of the process of directed regular transformations hinge-rod systems. *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*. 2021; 1(209):5-11. DOI: 10.17213/0321-2653-2021-1-5-11 (rus.).
14. Krivoshapko S.N. Shells and rod structures in the form of analytically non-given surfaces in modern architecture. *Building and Reconstruction*. 2020; 3:20-30. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30 (rus.).
15. Tsaritova N.G., Tumasov A.A., Kalinina A.A., Kosogov I.V. Possibilities of Architectural and Constructive Shaping of Spatial Forms from Rod Arches. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 229-235. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_31
16. Semikin P.P., Batsunova T.P. Dynamic architecture. Kinetic facades. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2018; 6(714):86-96. (rus.).
17. Tsaritova N.G., Buzalo N.A., Tumasov A.A., Platonova I.D., Kurbanov A.I., Kalinina A.A. et al. Transformable systems of spatial structures based on bionic analogues. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. 2019. DOI: 10.2991/isees-19.2019.65
18. Kociecki M., Adeli H. Shape optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex geometries using evolutionary computing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2015; 38:168-182. DOI: 10.1016/j.engappai.2014.10.012
19. Buzalo N.A., Alekseev S.A., Tsaritova N.G. Numerical analysis of spatial structural node bearing capacity in the view of the geometrical and physical non-linearity. *Procedia Engineering*. 2016; 150:1748-1753. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.165
20. Alekseev S.A., Buzalo N.A., Tsaitova N.G., Moiseenko G.A. Determination of the force resistance of a spatial rod structure. *BST: Bulletin of Construction Equipment*. 2020; 6(1030):36-38. (rus.).

Received November 7, 2022.

Adopted in revised form on May 10, 2023.

Approved for publication on May 10, 2023.

Bionotes: **Nadezhda G. Tsaritova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department Urban planning, design of buildings and structures; **South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI))**; 132 Enlightenment st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ncaritova@yandex.ru;

Alexander A. Tumasov — Candidate of Architecture, Associate Professor, Professor of the Department Urban planning, design of buildings and structures; **South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI))**; 132 Enlightenment st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; tumasovalexander@gmail.com;

Anastasia A. Kurbanova — postgraduate student of the Department Urban planning, design of buildings and structures; **South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI))**; 132 Enlightenment st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; anastasia.a.kalinina@yandex.ru;

Anastasia V. Shtankevich — postgraduate student of the Department Urban planning, design of buildings and structures; **South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (SRSPU(NPI))**; 132 Enlightenment st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; anastasiyashtankevich@mail.ru.

Contribution of the authors:

Nadezhda G. Tsaritova — scientific guidance, research concept, revision of the text, final conclusions.

Alexander A. Tumasov — scientific guidance, research concept, final conclusions.

Anastasia A. Kurbanova — data collection and processing, article editing, text revision.

Anastasia V. Shtankevich — data collection and processing, article editing, text revision.

The authors declare that there is no conflict of interest.