

УДК 69.024.4:624.011.1

DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-3-243-248

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Определение разрушающих усилий в стержне-вантовой арке

И.К. Дмитриев¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26***Ключевые слова:**

усиленная стержне-вантовая арка;
компьютерная модель;
физически и геометрически нелинейные
конечные элементы;
сравнение экспериментальных данных
с результатами численного расчета;
наибольшие скальвающие
и растягивающие усилия;
алгоритм расчета конструкции

Аннотация

Цель исследования – сравнение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования работы усиленной стержне-вантовой арки.

Метод исследования – экспериментально-теоретический.

Результаты. Для определения характера разрушения рассматриваемой конструкции сначала проводились эксперименты на небольших настольных моделях. В ходе них было установлено, что разрушение арки происходит из-за скальвания мелкогабаритных деревянных брусков или в результате разрыва стального усиливающего элемента. Далее в ПК «ЛИРА-САПР» создавалась расчетная модель конструкции с использованием физически и геометрически нелинейных конечных элементов. Полученная модель загружалась сосредоточенной нагрузкой в зоне конька таким же образом, как и в ранее проведенных экспериментальных исследованиях. В результате расчета были получены численные значения деформации, которые отличаются от экспериментальных менее чем на 10 %, что говорит о близости компьютерной модели к реальной конструкции. В ходе дальнейшего анализа численной модели определялись наибольшие сжимающие силы в арке, а также растягивающие силы – в усиливающих ее стальных элементах. По формулам СП 64.13330.2017 и СП 20.13330.2016 вычислялись предельно допустимые скальвающие и наибольшие растягивающие усилия. Выявлено, что при заданном внешнем усилии деревянные бруски имеют более чем 7-кратный запас по прочности, а стальные ленты по их верху лишь 1,5-кратный, и при увеличении внешнего воздействия разрушение арки произойдет из-за разрыва стальных шпренгельных лент. По результатам исследования определен алгоритм расчета подобного рода конструкций с использованием ПК «ЛИРА-САПР». Рекомендуется сначала проводить расчет усиленной стержне-вантовой арки по II предельному состоянию с дальнейшей проверкой деревянных элементов на скальвание, а стальных шпренгельных элементов – на предельно допустимое растяжение. Расчет сечения исследуемой арки на устойчивость плоской формы деформирования решается так же, как расчет клеюдеревянной арки по причине плотного соединения деревянных брусков с ликвидацией их податливости из плоскости.

История статьи:

Поступила в редакцию: 26 октября 2018 г.

Доработана: 17 февраля 2019 г.

Принята к публикации: 15 марта 2019 г.

Для цитирования

Дмитриев И.К. Определение разрушающих усилий в стержне-вантовой арке // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 3. С. 243–248. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-3-243-248>

Введение

Сокращение полезных ископаемых, уменьшение биологического разнообразия и всемирное ухудшение экологии привело к быстрому росту бионики – науки о инженерном моделировании природы, ее флоры и фауны, развитие которой способ-

ствует созданию новых конструкций из экологически чистых материалов, копирующих статику и динамику объектов живой и неживой природы [1–15]. Одной из таких конструкций является стержне-вантовая гирлянда, позаимствовавшая образ и характер работы у позвоночника животных и человека.

В статье [1] рассказывалось о испытаниях разных моделей стержне-вантовых арок, состоящих их деревянных мелкогабаритных брусков, нанизанных на два стальных каната, по результатам которых была определена арка с наибольшими несущими способностями. Это оказалась конструк-

¹ Дмитриев Игорь Кимович, кандидат технических наук, доцент, кафедра металлических и деревянных конструкций, eLIBRARY SPIN-код: 6639-7600, AuthorID: 656114, igkd@yandex.ru

© Дмитриев И.К., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

ция, усиленная стальными лентами по верхней грани брусков и образующая так называемую шпренгельную арку. Именно такой тип составной арки наиболее близко соответствует клеедеревянной по своим несущим способностям. В результате испытаний обе конструкции продемонстрировали примерно одинаковую деформацию в зоне конька, составляющую $\sim 1/200$ Lпрол, при заданной внешней нагрузке. Трансформация гибкой стержне-вантовой нити, напоминающей змею, в арочную дугу осуществлялась путем натяжения двух внутренних стальных канатов, а шпунтовое соединение деревянных брусков друг с другом создавало плотное примыкание элементов и исключало податливость конструкции в узлах из плоскости.



Рис. 1. Вид стержне-вантовой нити до ее трансформации в арку
[Figure 1. View of the brich-cable thread before its transformation to the arch]

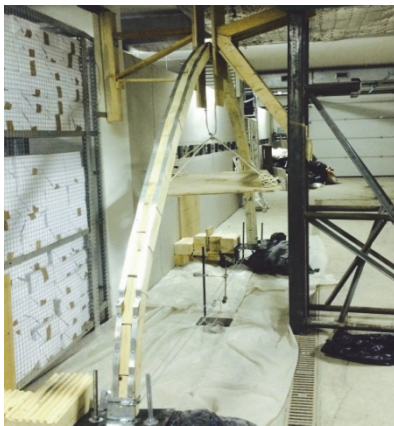


Рис. 2. Превращение нити в арку после натяжения внутренних канатов
[Figure 2. Conversion thread to the arch after the internal cable tension]

Результаты исследований и их анализ

Перед созданием компьютерной расчетной модели стержне-вантовой арки, усиленной стальными лентами, необходимо было выяснить, в резуль-

тате чего происходит ее разрушение. Для этого была проведена серия экспериментов на небольшой настольной арочной модели, состоящей из маленьких деревянных брусочков с пазами по верхней и нижней граням, в которых проходила стальная проволока, стягивающая элементы в арочную конструкцию. При ее нагружении сосредоточенной силой в зоне конька было установлено, что разрушение арки происходит из-за скалывания деревянных брусков или в результате разрыва проволоки, соединяющей их. Причем деревянные элементы работали только на сжатие, а стальные только на растяжение. В случае возникновения растягивающих усилий в брусках они просто расходились в этом месте, образуя зазор между торцами.

Создание расчетной модели усиленной стержне-вантовой арки проводилось в ПК «ЛИРА-САПР» с использованием нелинейного алгоритма расчета. При его создании учитывалось, что два стальных каната, проходящих внутри деревянных брусков, служат только для плотного соединения элементов и придания конструкции арочной формы (что и было ранее доказано в [1] по результатам первого эксперимента, до усиления конструкции стальными лентами).

В расчетной модели деревянные элементы моделировались как физически нелинейные с использованием графика напряжение – деформация, работающие только на сжатие, поэтому их график располагался в III четверти декартовой системы координат. Древесина брусков соответствовала 3 сорту, их расчетное сопротивление сжатию R_c/σ (-)/, модуль упругости E/E_0 (-,+)/ принимался на основании нормативного документа [17]. Стальные ленты по верху брусков рассматривались как геометрически нелинейные элементы, работающие только на растяжение. Для них выбирался КЭ 310 – стальная нить, или вантовый канат, который можно задавать и в прямоугольном виде. Сам расчет проводился на основе автоматического выбора шага для геометрически и физически нелинейных КЭ.



Рис. 3. Скалывание деревянных брусков при нагружении настольной модели арки
[Figure 3. Splitting the timber bricks under loading the desktop model of the arch]

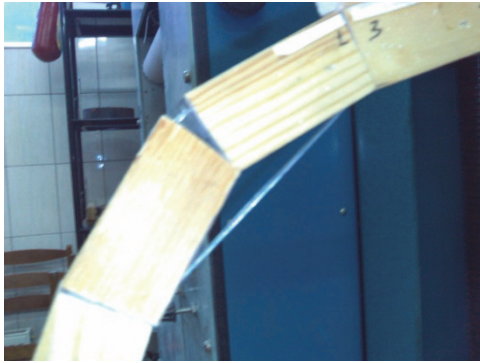


Рис. 4. Перед разрывом стальной проволоки, соединяющей бруски
[Figure 4. Before breaking the steel wire, connected the bricks]

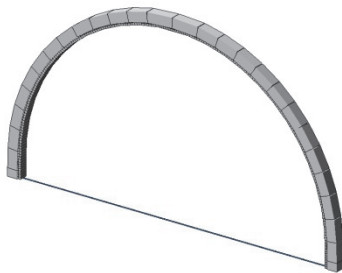


Рис. 5. Компьютерная модель усиленной стержне-вантовой арки
[Figure 5. Computer model of the strengthened brick-cable arch]

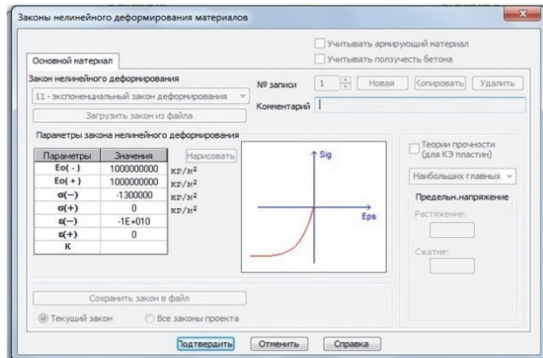


Рис. 6. Задание физически нелинейного КЭ при моделировании брусков арки
[Figure 6. Setting physically nonlinear finite element during modeling the arch bricks]

Компьютерная модель загружалась усилием 76,5 кгс в коньке. Как показали экспериментальные исследования, при этом усилия вертикальная деформация конструкции образуется после окончания «рыхлой деформации», предшествовавшей ей, и вступления в работу стальных лент, составляя $f_3 = 1,78$ см, что эквивалентно $\sim 1/185$ пролета

арки, равного 330 см, а это больше допустимой величины – $1/150$ – в соответствии с нормативным документом [16]. В результате компьютерного расчета прогиб в коньке оказался равен $f_k = 1,89$ см. Разница между экспериментальными данными и численным расчетом составит

$$\Delta = [(1,89 - 1,78) / 1,89] \times 100 \% \sim 5,8 \% < 10 \% \quad (1)$$

Полученный результат говорит о хорошем совпадении компьютерного расчета и экспериментального исследования. На схеме изополей напряжений по N_x видно, что в большинстве КЭ арки возникают сжимающие усилия, окрашенные в темные тона, или практически равные нулю напряжения, окрашенные в светлые тона. Именно в этих светлых прямоугольниках и возникают щели между деревянными брусками. Заметно, что при заданной нагрузке расхождение элементов происходит только по внешней грани конструкции. Просматривая численную мозаику напряжений по N_x можно определить, что максимальное сжимающее напряжение возникает примерно в четверти пролета арки и составляет $15,5$ кгс/см². Чтобы перейти к нормальной силе, нужно эту величину умножить на ширину арки (8 см) и высоту элементарного пластинчатого КЭ с наибольшим напряжением (1,94 см). Так определяется наибольшее сжимающее усилие в деревянных элементах конструкции, которое составляет $N_{дер} = -241$ кгс.

Проведя фрагментацию и оставив на экране только стальную ленту по верху брусков и затяжку из двух канатов между опорными точками арки, можно просмотреть усилия, возникающие в них, включив мозаику N . Хорошо видно, что в ленте образуется только растяжение с наибольшим значением $H_1 \sim 200$ кгс в $1/8$ пролета арки. В затяжке усилие совсем незначительное и составляет $H_3 \sim 27$ кгс. Таким образом, компьютерный расчет усиленной стержне-вантовой арки на основе физически и геометрически нелинейных КЭ позволяет определить усилия и деформации всех ее составных частей с приемлемой для прикладных задач точностью.

Для проверки сечения арки на скалывание требуется использовать формулу (7) раздела 6 п. 6.7 и формулы (64) и (65) раздела 8 пп. 8.1–8.3 нормативного документа [3]:

$$R^A_{ска} = \frac{R^A_{ск}}{1 + \left[\frac{R^A_{ск}}{R^A_{ск90}} - 1 \right] \sin^3 \alpha} = 24 \text{ кгс/см}^2. \quad (2)$$

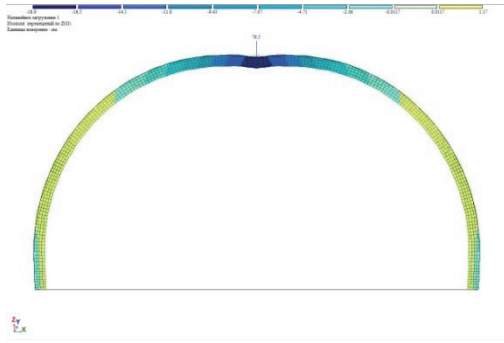


Рис. 7. Наибольшая деформация конструкции в зоне конька
[Figure 7. The largest deformation of the construction at its top zone]

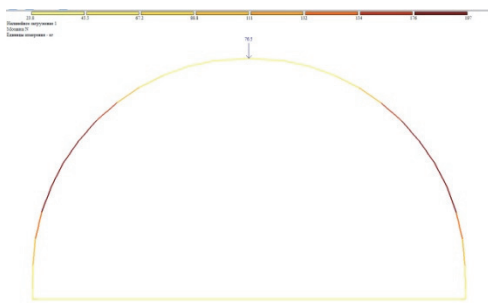


Рис. 8. Растягивающие усилия в стальных лентах по верхней грани арки
[Figure 8. Stretching forces in steel bands along the upper border of the arch]

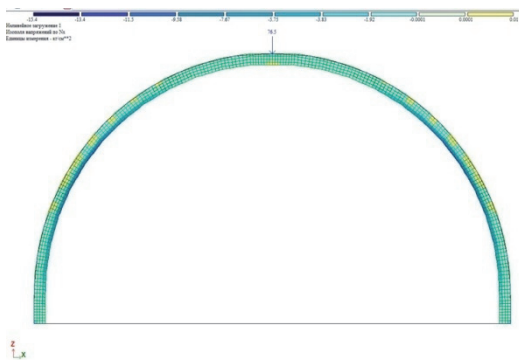


Рис. 9. Распределение сжимающих напряжений в деревянных брусках арки
[Figure 9. The compressive stress distribution in timber bricks of the arch]

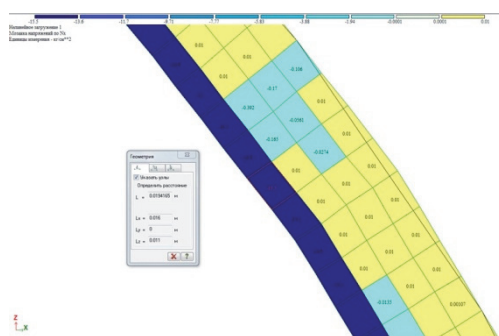


Рис. 10. Мозаика численных значений нормальных напряжений N_x
[Figure 10. Mosaic of numerical values of normal stresses N_x]

$$R^{A_{ск}} = 24 \text{ кгс/см}^2.$$

Отклонение скальвающей силы от 0° , т.е. угол скальвания составляет $3,8^\circ \sim 4^\circ$ и $(\sin^3 4^\circ) \sim 0$.

$$R_{ск}^{cp} = \frac{R^{A_{ск}}}{1 + \beta \frac{l_{ск}}{e}} = 10,4 \text{ кгс/см}^2, \quad (3)$$

где $\beta = 0,125$ – при расчете соединений шип – паз; $l_{ск} = 21$ см – расчетная длина плоскости скальвания; $e = h/4 = 8/4 = 2$ см – при расчете симметрично нагруженных элементов.

Расчетная несущая способность соединения определяется по формуле

$$T = R_{ск}^{cp} \cdot F_{ск} = 1747 \text{ кгс}, \quad (4)$$

где $F_{ск} = 21 \text{ см} \cdot 8 \text{ см} = 168 \text{ см}^2$.

Можно сделать вывод, что расчетная несущая способность деревянных элементов усиленной стержне-вантовой конструкции, из условия их скальвания, во много раз выше наибольшего сжимающего усилия, возникающего в них:

$$T = 1747 \text{ кгс} \gg N_{дер} = 241 \text{ кгс} \text{ и } T / N_{дер} = 7,2. \quad (5)$$

Расчет несущей способности всей арки нужно вести по несущей способности стальных лент, выполняющих роль шпренгельных канатов в конструкции. В соответствии с формулой (5) раздела 7 пп. 7.1–7.2 нормативного документа [17]

$$N_{ст} = A_{нт} \cdot R_{\gamma} \cdot \gamma_c = 302 \text{ кгс}, \quad (6)$$

где $A_{нт} = A_{ст} \cdot 0,8 = 4 \cdot 0,05 \cdot 0,8 = 0,16 \text{ см}^2$; $A_{нт}$ – площадь стальных лент с учетом ослабления; $R_{\gamma} = 2100 \text{ кгс/см}^2$ – расчетное сопротивление стали СТ 3 (наименьшая величина для строительных сталей); $\gamma_c = 0,9$;

$$N_{ст} = 302 \text{ кгс} > H_{л} = 200 \text{ кгс} \text{ и } N_{ст} / H_{л} = 1,51. \quad (7)$$

Полученные данные говорят о том, что разрушение конструкции произойдет в результате разрыва стальных лент, натянутых по верху деревянных брусков. Их выбор представляет собой более важную инженерную задачу, чем подбор деревянных брусков, из-за условия минимизации толщины этих шпренгельных элементов.

Выводы

Подводя итог проведенного исследования, можно сказать, что нелинейная компьютерная модель усиленной стержне-вантовой арки полностью подтвердила свою состоятельность при сравнении результатов ее расчета с результатами экспериментов. Из приведенного алгоритма следует, что расчет можно начинать со II предельного состояния, т.е. с определения деформации и ее сравнения с нормативной величиной. Следующим этапом является расчет по I предельному состоянию. Сначала проводится проверка несущей способности стальных лент – шпренгелей, а далее определяются скальвающие усилия, возникающие в деревянных элементах, которые сравниваются с допустимыми значениями. Расчет конструкции на устойчивость плоской формы деформирования можно вести так же, как и в случае клеедеревянной арки, путем плотного шпунтового соединения деревянных элементов в узлах, устраняющего их податливость из плоскости.

Список литературы

1. *Дмитриев И.К.* Исследование деформации стержне-вантовой арки // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2015. № 5. С. 72–77.
2. *Дмитриев И.К.* Исследование работы стержне-вантовой гирлянды // *Промышленное и гражданское строительство*. 2010. № 11. С. 68–70.
3. *Дмитриев И.К., Петухова К.Г.* К вопросу возведения экспериментального большепролетного стержне-вантового купола // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 12. С. 18–19.
4. *Дмитриев И.К.* Результаты исследования несущей способности стержне-вантовой гирлянды и формы обо-

лочек на ее основе // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 9. С. 4–6.

5. *Дмитриев И.К.* Экспериментальное исследование арочной гирлянды // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 10. С. 58–61.

6. *Лебедев Ю.С., Темнов В.Г.* Пространственные конструктивные системы бионического типа: опыт применения в строительстве. Л.: ЛДНТП, 1980. 26 с.

7. *Темнов В.Г.* Конструктивные системы в природе и строительной технике. Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1987. 256 с.

8. *Лебедев Ю.С. и др.* Архитектурная бионика. М.: Стройиздат, 1990. 268 с.

9. *Шмидт А.Б., Дмитриев П.А.* Атлас строительных конструкций из клееной древесины и влагостойкой фанеры. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2002. 292 с.

10. *Бойтемиров Ф.А.* Конструкции из дерева и пластмасс. М.: Академия, 2013. 288 с.

11. *Вознесенский С., Ханухов Х.* Оболочки нового типа // *Архитектурная композиция*. Современные проблемы. М.: Стройиздат, 1970. С. 147–149.

12. *Козлов Д.Ю.* Регулярные узлы и зацепления – структурный принцип кинематических архитектурных конструкций // *Архитектурная бионика*. М.: ЦНИИЭПжилища, 1989. С. 72–82.

13. *Kozlov D.* Dome structures for flexible material // *Roofs*. Part 1. Human settlements and socio-cultural environment. Paris, UNESCO, 1991. Pp. 27–131.

14. *Bocco A., Valcárcel E.C.M., Trovato L.* Yona Friedman's Roofs: manuals for simple, low-cost building // *NOCMAT-2015 Proceedings*. 2015.

15. *Nerdinger W.* Frei Otto. Complete works. Lightweight construction. Natural design. Birkhauser, Architekturmuseum, TU Munchen, 2005. 396 p.

16. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М., 2016.

17. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. М., 2017.

RESEARCH PAPER

Determination of destructive forces in a rod-cable arch

Igor K. Dmitriev¹

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

Keywords:

the strengthened brick-cable arch; computer model; physically and geometrically nonlinear finite elements; comparison the experimental data with the results of the computer calculation; largest splitting and stretching forces; the calculation algorithm of the construction

Abstract

The aim of research – comparison the results of the experimental data with the computer modeling the work of the strengthened brick-cable arch.

Methods. Experimental and theoretical methods of research.

Results. Firstly, the tests on a small desktop models were performed, for the determination the nature of destruction of the construction. During them, it was discovered, that the arch crash is taking place because of the splitting the small size timber bricks, or as the result of the breaking its steel strengthening elements. Further, the computer model of the construction was created with

¹ *Igor K. Dmitriev*, Cand. Sci.(Eng), Associate Professor, Metall and Timber Department, igkd@yandex.ru

Article history:

Received: October 26, 2018

Revised: February 17, 2019

Accepted: March 15, 2019

For citation

Dmitriev I.K. (2019). Determination of destructive forces in a rod-cable arch. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(3), 243–248. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-3-243-248> (In Russ.)

the help of physically and geometrically nonlinear finite elements at LIRA-SAPR PC. The generated model was load by a concentrated force at its top zone, the same one, as it had been during the experiments before. On the results of the calculation, the maximum deformation was received, which are different from the experimental one on a value less than 10%, what suggests the nearness the computer model to the real construction. The highest compressive strengths of the arch and the largest stretching forces of its steel bands were determined during the further analysis of the model. Maximum splitting and stretching forces also were calculated theoretically, according to the formulas of SP 64.13330.2017 and SP 20.13330.2016. It was determined that the timber bricks have more than 7 times reserve of strength, and the steel bands over them – only 1.5 times, and during the growth of external force, the arch will crash because of its steel sprengel bands breakage.

By the results of the research, the calculation algorithm of such kind constructions was generated, at the base of LIRA-SAPR PC. It was recommended first, to determine deformation of the strengthened brick-cable arch, with further checking the timber elements for splitting and steel sprengel elements for maximum permissible stretching. The problem of stability the flat form of deformation for the brick-cable arch are the same as for the glued one, because of the tight connection the timber bricks, with elimination their exit from the frontal plane.

References

1. Dmitriev I.K. (2015). Research the deformation of the brick-cable arch. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstrukcij i sooruzhenij [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]*, (5), 72–77. (In Russ.)
2. Dmitriev I.K. (2010). Issledovanie raboty sterzhnevantovoi girlyandy [Research work rod-cable-stayed garlands]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Construction]*, (11), 68–70. (In Russ.)
3. Dmitriev I.K., Petuhova K.G. (2012). K voprosu vozvedeniya eksperimental'nogo bol'sheproletnogo sterzhnevantovogo kupola [To the question of the construction of an experimental long-span cable-stayed dome]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Construction]*, (12), 18–19. (In Russ.)
4. Dmitriev I.K. (2013). Rezul'taty issledovaniya nesushchei sposobnosti sterzhnevantovoi girlyandy i formy obolochek na ee osnove [The results of the study of the bearing capacity of the rod-cable garland and the shape of the shells on its basis]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Construction]*, (9), 4–6. (In Russ.)
5. Dmitriev I.K. (2014). Eksperimental'noe issledovanie arochnoi girlyandy [Experimental study of the arch garland]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Construction]*, (10), 58–61. (In Russ.)
6. Lebedev J.S., Temnov V.G. (1980). *Prostranstvennye konstruktivnye sistemy bionicheskogo tipa: opyt primeneniya v stroitel'stve [Spatial design systems bionic type: experience in construction]*. Leningrad: LDNTP Publ. (In Russ.)
7. Temnov V.G. (1987). *Konstruktivnye sistemy v prirode i stroitel'noj tekhnike [Structural systems in nature and construction machinery]*. Leningrad: Stroyizdat Publ. (In Russ.)
8. Lebedev J.S. et al. (1990). *Arhitekturnaya bionika [Architectural bionics]*. Moscow: Stroyizdat Publ. (In Russ.)
9. Schmidt A.B., Dmitriev P.A. (2002). *Atlas stroitel'nykh konstrukcij iz kleenoi drevesiny i vlagostojkoj fanery [Atlas of building structures made of laminated wood and moisture-resistant plywood]*. Moscow: The Association of the Civil Engineering High Schools Publ. (In Russ.)
10. Boytemirov F.A. (2013). *Konstrukcii iz dereva i plastmass [Wood and plastic structures]*. Moscow: Academy Publishing Centre. (In Russ.)
11. Voznesencki S., Hanyhov H. (1970). *Obolochki novogo tipa. Arhitekturnaya kompoziciya. Sovremennye problemy [New type shells. Architectural composition. Modern problems]*, 147–149. (In Russ.)
12. Kozlov D.J. (1989). *Regulyarnye uzly i zacepleniya – strukturnyj princip kinematcheskikh arhitekturnykh konstrukcij. Arhitekturnayabionika [Regular knots and links – a structural principle of kinematic architectural structures. Architectural bionics]*, 72–82. (In Russ.)
13. Kozlov D.J. (1991). Dome structures for flexible material. *Roofs. Part 1. Human settlements and socio-cultural environment*, 27–131.
14. Bocco A., Valcárcel E.C.M., Trovato L. (2015). Yona Friedman's Roofs: manuals for simple, low-cost building. *NOCMAT-2015 Proceedings*.
15. Nerding W. (2005). *Frei Otto. Complete works. Lightweight construction. Natural design*. Birkhauser, Architekturmuseum, TU Munchen.
16. SP 20.13330.2016. *Loads and impacts*. Updated version of SNiP 2.01.07-85*.
17. SP 64.13330.2017. *Wooden structure*. Updated version of SNiP II-25-80.