

Сравнение напряженно-деформированного состояния
комбинированной арочной конструкции при различных
условиях опирания

Александр Майорович Ибрагимов¹, Надежда Юрьевна Трянина²,
Вера Витальевна Долгушева¹, Тимофей Владимирович Долгушев³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ);
г. Нижний Новгород, Россия;

³ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В комбинированных арочных системах опоры часто выполняют шарнирными для исключения передачи момента на нижележащие конструкции. Среди шарнирных опор для арочных комбинированных систем рассматривают либо шарнирно-неподвижные опоры с обеих сторон, либо шарнирно-подвижную с одной стороны и нижнюю затяжку для восприятия распора. Рассмотрены преимущества и особенности применения обоих вариантов опор на примере анализа напряженно-деформированного состояния арки с лучевыми затяжками.

Материалы и методы. Сравнение проведено с помощью предварительного теоретического исследования и последующих численных расчетов. Расчетные модели реализованы в программном конечно-элементном комплексе SCAD с учетом геометрически нелинейного характера работы конструкции. Подбор усилий натяжения в затяжках выполнен по ранее опубликованному алгоритму.

Результаты. На основе анализа проведенных исследований и численных расчетов определены напряжения и перемещения в сечениях арки, а также установлены силы предварительного напряжения в стяжках для достижения минимального расхода металла. Наглядно продемонстрировано влияние шарнирной и жесткой опоры с одной стороны арки на напряжения, деформации и расход металла.

Выводы. По результатам сравнения комбинированной арочной системы с двумя неподвижными шарнирными опорами и арочной системы с одной шарнирно-подвижной опорой и нижней затяжкой выявлено, что в арке с подвижной опорой горизонтальные и вертикальные перемещения пояса арки выше. После подбора и перераспределения усилий преднапряжения в затяжках возникающие продольные и поперечные усилия в поясах обеих арок сопоставимы, однако изгибающий момент в арке с подвижной опорой вдвое меньше. По металлоемкости пояса обе арки имеют практически одинаковый расход стали, а по металлоемкости материала на затяжки в арке с подвижной опорой требуется в полтора раза больше количества материала на затяжки, так как необходимо больше усилия натяжения затяжек. Если нижняя затяжка отсутствует, если распор от арки воспринимается другими опорными конструкциями, то целесообразно использовать арки с неподвижными опорами. В случае отсутствия такой возможности следует применять арку с нижней затяжкой и с одной подвижной опорой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: комбинированные конструкции, стальная арка с лучевыми затяжками, преднапряжение, шарнирно-неподвижная опора, шарнирно-подвижная опора, арочно-вантовая система, геометрическая нелинейность, SCAD, моделирование вант

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ибрагимов А.М., Трянина Н.Ю., Долгушева В.В., Долгушев Т.В. Сравнение напряженно-деформированного состояния комбинированной арочной конструкции при различных условиях опирания // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 7. С. 1114–1124. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1114-1124

Автор, ответственный за переписку: Вера Витальевна Долгушева, DolgushevaVV@yandex.ru.

Comparison of the stress-strain state of a combined arch structure
under different support conditions

Alexander M. Ibragimov¹, Nadezhda Yu. Tryanina², Vera V. Dolgusheva¹,
Timofey V. Dolgushev³

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² *Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNSAGU); Nizhny Novgorod, Russian Federation;*

³ *Bauman Moscow State Technical University (BMSTU); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. In combined arch systems, supports are often hinged to prevent moment transmission to underlying structures. For combined arch systems, support options include either hinged supports on both sides, or hinged supports on one side with a lower tie to support thrust. This paper analyzes the advantages and specific features of both support options using the stress-strain analysis of an arch with radial ties.

Materials and methods. The comparison was conducted using a preliminary theoretical study and subsequent numerical calculations. The calculation models were implemented in the SCAD finite element software package, taking into account the geometrically nonlinear nature of the structure's operation. Tension forces in the tie rods were selected using a previously published algorithm.

Results. Based on the results of experimental studies and numerical calculations, stresses and displacements in arch sections were obtained. The movements of the circuit, graphs of correspondence between experimental data and calculation results are shown. Directions for improving experimental models of such combined systems with ties are analyzed.

Conclusions. A comparison of a combined arch system with two fixed hinged supports and an arch system with a single hinged movable support and a lower tie revealed that the horizontal and vertical displacements of the arch chord are several times greater in the arch with a movable support. After selecting and redistributing the prestressing forces in the ties, the resulting longitudinal and transverse forces in the chords of both arches are comparable, but the bending moment in the arch with a movable support is half as strong. In terms of the required metal content for the chord, both arches require virtually the same amount of steel. However, in terms of the required metal content for the tie rods, the arch with a movable support requires one and a half times more material, as greater tensioning force is required for the tie rods. If there is no bottom tie rod, and the arch thrust is supported by other supporting structures, it is advisable to use arches with fixed supports. If this is not possible, an arch with a bottom tie rod and one movable support should be used.

KEYWORDS: combined structures, steel arch with radial ties, prestressing, hinged-fixed support, hinged-sliding support, cable roof system supported by arches, geometrical nonlinearity, SCAD, cable stay modelling

FOR CITATION: Ibragimov A.M., Tryanina N.Yu., Dolgusheva V.V., Dolgushev T.V. Comparison of the stress-strain state of a combined arch structure under different support conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(7):1114-1124. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.7.1114-1124 (rus.).

Corresponding author: Vera V. Dolgusheva, DolgushevaVV@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

По статической работе арки подразделяют на трехшарнирные, двухшарнирные и бесшарнирные [1–5]. Преимущества первой группы арок в том, что они не чувствительны к температурным изменениям и перемещениям опор, особенности — такие арки более деформативны и имеют повышенный расход материала по сравнению с другими системами [6]. Двухшарнирные являются самыми распространенными из-за простоты монтажа и изготовления. В них проявлены в меньшей степени недостатки трехшарнирной и бесшарнирной системы. В бесшарнирных арках более равномерно распределяются изгибающие моменты, они обладают наибольшей жесткостью, но требуется устройство более габаритных, более сложных опор.

В комбинированных системах, в том числе в арочно-вантовых, в которых реализована совместная работа растянутых затяжек с сжато-изогнутым поясом арки, в качестве опор часто применяются либо шарнирно-неподвижные опоры, либо одна опора шарнирно-неподвижная, а другая — подвижная (автовокзал в Куре [7], светопрозрачные покрытия галерей торговых центров «ГУМ», «Петровский Пассаж» [8] и «Гостиный двор» [9] в Москве, конькобежный центр «Уральская молния» в Челябинске и футбольный легкоатлетический манеж в Казани [9],

музей истории Гамбурга в Гамбурге¹, стадион «Уэмбли» в Лондоне [10, 11] и др.). В случае с одной подвижной опорой для восприятия распорного усилия вводят нижнюю затяжку между опорами. Преимущества шарнирно-неподвижных опор с обеих сторон в том, что они позволяют легче задавать, контролировать и поддерживать усилие натяжения в лучевых затяжках, однако при таком решении необходимо, чтобы нижележащие конструкции были способны воспринять передаваемое покрытием усилие распора. Область применения арок с лучевыми затяжками — покрытия протяженных в плане зданий и сооружений (выставочные залы, торговые галереи, покрытия вокзалов и др. [12]). Чаще всего усилия от распора покрытия в таких зданиях воспринимают массивные пилоны или контрфорсы, расположенные в плоскости арки (светопрозрачные покрытия галерей торговых центров «ГУМ» и «Петровский Пассаж» в г. Москве [8] и др.). Когда нижележащие конструкции представляют собой колонны или стены, не предназначенные для восприятия большого распорного усилия, требуется создание шарнирно-подвижной опоры с одной стороны конструкции и введение нижней затяжки, в таком случае исключается

¹ Museum of Hamburg History, Glass Roof // gmp. Germany : Hamburg, 1989. URL: <https://www.gmp.de/en/projects/410/museum-of-hamburg-history-glass-roof>

передача распорного усилия на нижележащие конструкции, его воспринимает затяжка.

В статьях [13–15] представлен теоретический и экспериментальный анализ работы арочных конструкций с гибкими решетками, в том числе на примере арок с веерными и лучевыми затяжками при различном соотношении стрелы подъема к пролету. Рассматриваются шарнирные опоры: шарнирно-неподвижная с левой стороны, шарнирно-подвижная — с правой. В докладе [16] и статье [17] более подробно исследуется напряженно-деформированное состояние двухшарнирной арки с веерными затяжками, проведен анализ работы конструкции, когда обе опоры шарнирно-неподвижные и когда одна из опор — шарнирно-подвижная. Также ряд публикаций авторов настоящей статьи посвящен теоретическому, численному и экспериментальному исследованию арок с лучевыми и веерными затяжками.

Как работает арка с лучевыми затяжками с шарнирно-неподвижными опорами и при наличии одной подвижной опоры и нижней затяжки, какое из двух решений опор для арки с лучевыми затяжками способствует возникновению наименьших усилий и перемещений в поясе арки, при каком решении опор требуется наименьшее усилие натяжения в затяжках, при каких опорах достигается наименьшая металлоемкость конструкции? Ответы на поставленные вопросы получены по результатам сравнительных расчетов, описанных в данной статье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сравнение работы арок кругового полигонального очертания с восьмью панелями и затяжками выполнено с использованием метода конечных элементов в программном комплексе SCAD. Восемь панелей и затяжек принято по ранее проведенным исследованиям, связанным с рационализацией по металлоемкости покрытия из арок с лучевыми затяжками [18, 19]. В первой схеме (рис. 1, а) обе опоры шарнирно-неподвижные, во второй (рис. 1, б) — правая опора шарнирно-подвижная и добавлена нижняя затяжка.

Сравнение двух схем арок с лучевыми затяжками, оценка влияния нижней затяжки и шарнирно-подвижной опоры на усилия, возникающие в конструкции,

и на металлоемкость осуществлено для следующих условий:

- рассмотрены арки с лучевыми затяжками пролетом 30 м, стрела подъема арки с лучевыми затяжками принята как четверть пролета [19] и составляет 7,5 м;
- плоская постановка задачи (шесть степеней свободы в узле, однако в каждом узле пояса арки введено ограничение линейных перемещений из плоскости);
- усилия предварительного натяжения приняты по результатам, представленным в статье [19]: 55, 45, 30, 40 кН от верхних до нижних затяжек соответственно;
- нагрузка от покрытия принята равной $100 \text{ кг/м}^2 = 0,981 \text{ кН/м}^2$, с учетом шага арок 6 м нагрузка приложена равномерно распределенной на пояс арки и составляет $600 \text{ кг/м} = 5,886 \text{ кН/м}$;
- снеговая нагрузка принята по третьему снеговому району СП 20.13330.2016²;
- расчеты проведены для двух расчетных сочетаний (рис. 2);
- пояс арок замоделирован с помощью конечного элемента (КЭ) 310 (пространственный геометрически нелинейный стержень), сечение принято по ГОСТ 30245³, а затяжки — с помощью КЭ 308 (вантовый элемент), сечение принято по ГОСТ 3064⁴.

При расчете снеговой нагрузки (12,6 кН/м) коэффициент учета снега c_e принят равным 1 в запас расчета, термический коэффициент c_t принят равным 1 из предположения, что таяния снега не происходит, коэффициент формы μ принят равным единице, несмотря на неравномерность распределения. Такое упрощение допустимо для сравнительного расчета и не вносит серьезных искажений в результаты.

В первом расчетном сочетании (РСН 1) рассматривается совместное действие собственного веса, веса покрытия и равномерно распределенной на-

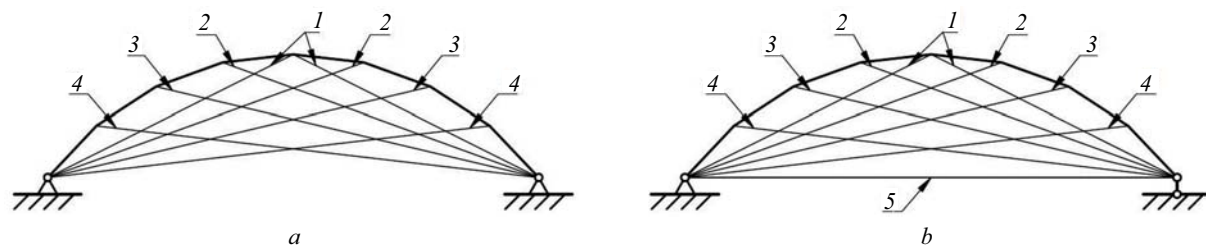


Рис. 1. Сравнимые схемы и нумерация групп затяжек: а — схема № 1; б — схема № 2; цифрами обозначены номера групп затяжек

Fig. 1. Comparable diagrams and numbering of tie groups: а — scheme No. 1; б — scheme No. 2; Numbers indicate the tie groups

² СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318>

³ ГОСТ 30245–2012. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия. 2014. 42 с.

⁴ ГОСТ 3064–80. Канат одинарной свивки типа ТК конструкции $1 \times 37 (1 + 6 + 12 + 18)$. 2014. 11 с.

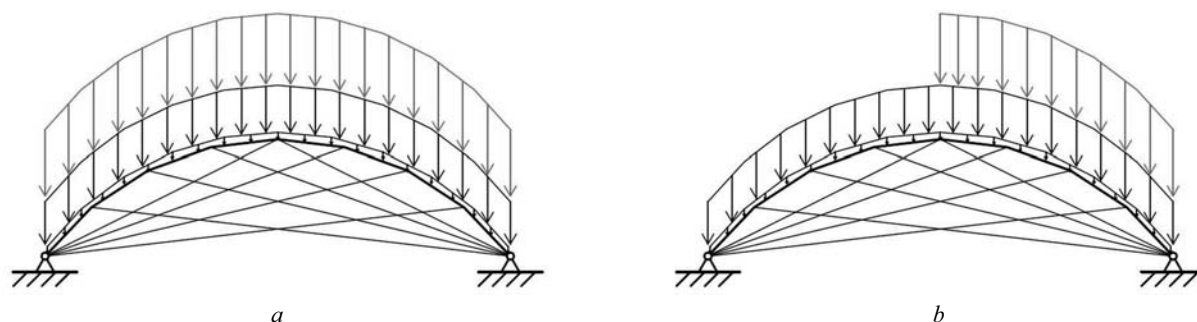


Рис. 2. Рассматриваемые расчетные сочетания нагрузок (PCH): *a* — PCH 1; *b* — PCH 2

Fig. 2. The considered design load combinations (DLC): *a* — DLC 1; *b* — DLC 2

грузки на всем пролете. Второе сочетание (PCH 2) отличается от первого только снеговой нагрузкой, распределенной на половине пролета (рис. 2). В расчетных сочетаниях не учитывается неравномерность распределения снега на арочном покрытии, представленная в СП 20.13330.2016¹, так как она незначительно влияет на изменение результатов в рамках поставленных задач.

Сопоставление работы арок с лучевыми затяжками проведено в два этапа. В первичном расчете для оценки влияния нижней затяжки и шарнирно-подвижной опоры во второй схеме нижней затяжке было задано малое значение преднапряжения (0,01 кН). Подбор усилий преднапряжения в затяжках, их сечения и сечения пояса арки не производился на первом этапе расчета, однако выполнен на втором этапе расчета по алгоритму, описанному в статье [19].

Для анализа смещений шарнирно-подвижной опоры при работе без снеговой нагрузки и вместе с ней было сформировано дополнительное сочетание (PCH 3), включающее совместное действие собственного веса и веса покрытия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 представлены результаты расчета первого этапа (когда нижней затяжке во второй схеме задано малое значение преднапряжения). Заданное затяжкам преднапряжение показано на рис. 3.

По результатам предварительного расчета (первого этапа) выявлено, что в арке с шарнирно-подвижной опорой и с нижней не преднапряженной затяжкой горизонтальные перемещения пояса арки больше, чем в арке с шарнирно-неподвижными опорами приблизительно в 5–10 раз, вертикальные пере-

мещения больше в 3–6 раз, максимальное значение продольной силы увеличивается в 1,3–1,7 раз, а изгибающий момент в 1–4,5 раза. Поперечная сила увеличивается в 1,1–1,3 раза. Максимальное усилие натяжения в затяжках увеличивается в 2,1–3 раза.

По характеру эпюры изгибающих моментов (рис. 4) видно, что для арки с подвижной опорой необходимо распределить преднапряжение в затяжках так, чтобы уменьшить изгибающий момент в четверти пролета (т.е. за счет преднапряжения первой (центральной) группы затяжек, ослабления преднапряжения в четвертой (нижней) группе затяжек (рис. 1) и за счет задания преднапряжения нижней затяжке).

Эпюры продольных сил (рис. 5) показывают, что в арке с шарнирно-неподвижными опорами наибольшее сжимающее продольное усилие возникает в приопорных зонах, а в арке с одной шарнирно-подвижной опорой — в середине пролета при PCH 1 (рис. 5, *b* с равномерным распределением снеговой нагрузки на всем пролете) и в середине, и в приопорной зоне при PCH 2 (рис. 5, *d* с равномерным распределением снеговой нагрузки на половине пролета).

В табл. 2 представлены результаты расчета второго этапа (после подбора усилий натяжения в затяжках арок, при которых достигается наименьшая металлоемкость, после подбора сечения пояса арки и затяжек). Обозначения в табл. 2 соответствуют обозначениям в табл. 1.

Подобранные усилия натяжения в затяжках представлены на рис. 6.

На рис. 7–9 показаны эпюры изгибающих моментов, продольных сил и деформированные схемы, полученные по результатам расчетов второго этапа.

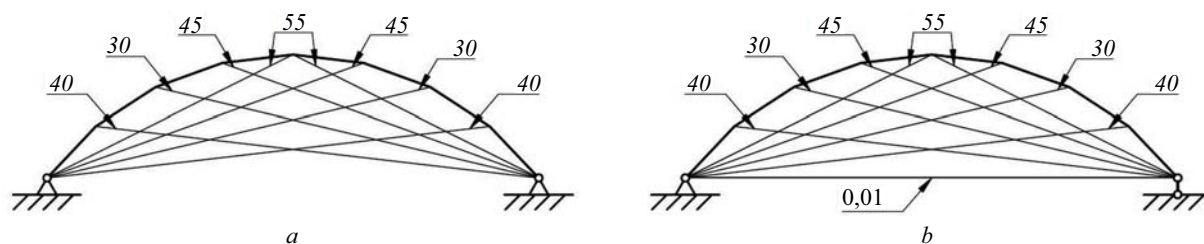


Рис. 3. Заданное усилие преднапряжения в затяжках, кН: *a* — схема № 1; *b* — схема № 2

Fig. 3. Specified prestressing force in ties, kN: *a* — scheme No. 1; *b* — scheme No. 2

Табл. 1. Результат расчета двух схем на первом этапе

Table 1. The result of the calculation of two schemes in the first stage

Расчетное сочетание нагрузок Design load combination (DLC)	PCH 1 DLC 1		PCH 2 DLC 2		PCH 3 DLC 3
Номер схемы (рис. 1) Scheme number (Fig. 1)	1	2	1	2	2
$x_{\max}$ пояса арки, мм $x_{\max}$ arch belt, mm	19,53	192,25	25,26	135,63	60,96
$x_{\max}$ правой опоры, мм $x_{\max}$ right support, mm	–	379,06	–	239,97	113,67
$z_{\max}$, мм / mm	–43,45	–244,48	–52,86	–174,97	–66,99
$N_{\max 1}$, кН / kN	–421,00	–702,29	–388,84	–499,11	–220,8
$M_{\max}$, кН·м / kN·m	23,57	105,95	34,3	60,65	24,26
	–49,03	–58,62	–45,47	–43,3	–15,8
$Q_{\max}$, кН / kN	39,61	49,83	42,36	46,78	15,29
	–43,51	–58,49	–42,86	–49,22	–16,77
$N_{\max 2}$, кН / kN	55,26	163,68	67,34	141,34	84,64
$R_{xл}$, кН / R_{xleft} , kN	282,54	0	190,25	0	0
$R_{zл}$, кН / R_{zleft} , kN	328,94	328,94	278,08	277,2	110,36
$R_{xп}$, кН / R_{xright} , kN	–282,54	–	–190,25	–	–
$R_{zп}$, кН / R_{zright} , kN	328,94	328,94	161,22	162,1	110,36

Примечание: $x_{\max}$ — максимальное горизонтальное перемещение; $z_{\max}$ — максимальное вертикальное перемещение; $N_{\max 1}$ и $N_{\max 2}$ — максимальное продольное усилие в поясе арки и в затяжках соответственно; $M_{\max}$ — максимальное значение изгибающего момента в поясе арки; $Q_{\max}$ — максимальное поперечное усилие в поясе арки; $R_{xл}$, $R_{zл}$, $R_{xп}$, $R_{zп}$ — опорная реакция горизонтальная (x) и вертикальная (z) в правой (п) и левой (л) опорах соответственно.

Note: $x_{\max}$ is the maximum horizontal displacement; $z_{\max}$ is the maximum vertical displacement; $N_{\max 1}$ and $N_{\max 2}$ are the maximum axial forces in the arch chord and ties, respectively; $M_{\max}$ is the maximum bending moment in the arch chord; $Q_{\max}$ is the maximum shear force in the arch chord; R_{xleft} , R_{zleft} , R_{xright} , R_{zright} are the horizontal (x) and vertical (z) support reactions at the left and right supports, respectively.

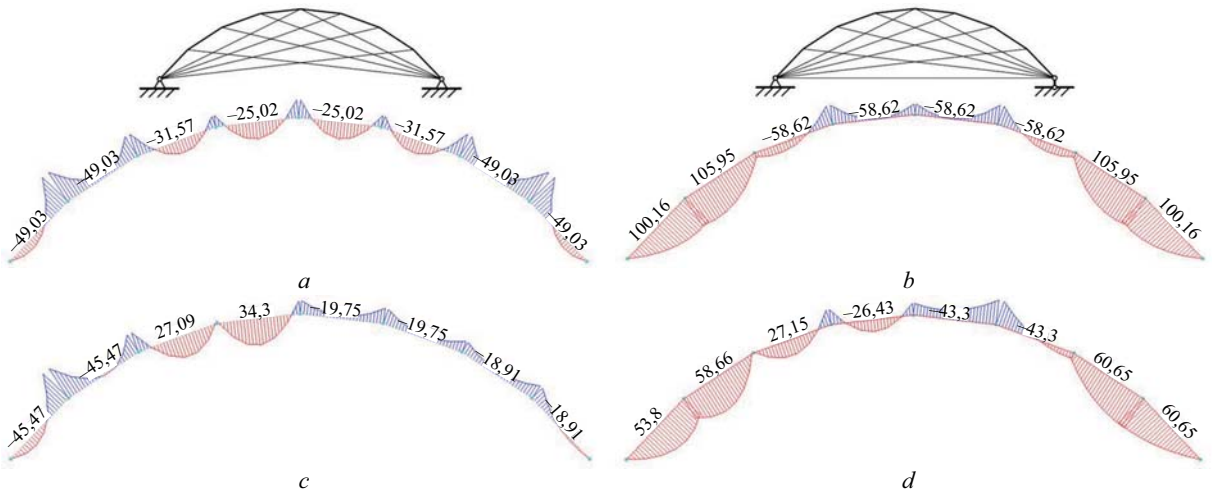


Рис. 4. Эпюры изгибающих моментов M , кН·м, при PCH 1 (a, b) и PCH 2 (c, d): a, c — для арки без нижней затяжки; b, d — для арки с нижней затяжкой

Fig. 4. Bending moment diagrams M , kN·m, at DLC 1 (a, b) and DLC 2 (c, d): a, c — for an arch without lower tie; b, d — for an arch with lower tie

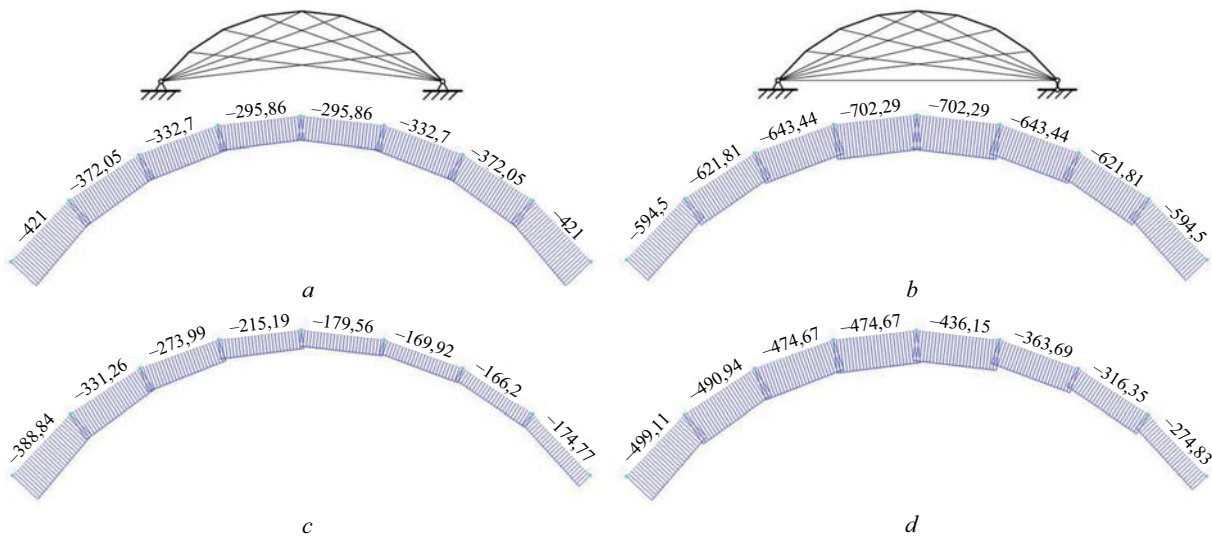


Рис. 5. Эпюры продольных сил N , кН, при РСН 1 (а, б) и РСН 2 (с, д): а, с — для арки без нижней затяжки; б, д — для арки с нижней затяжкой

Fig. 5. Diagrams of longitudinal forces N , kN, at DLC 1 (a, b) and DLC 2 (c, d): a, c — for an arch without lower tie; b, d — for an arch with lower tie

Табл. 2. Результат расчета двух схем на втором этапе

Table 2. The result of the calculation of two schemes in the second stage

Расчетное сочетание нагрузок Design load combination (DLC)	PCH 1 DLC 1		PCH 2 DLC 2		PCH 3 DLC 3
Обозначение схемы (рис. 1) Scheme designation (Fig. 1)	1	2	1	2	2
$x_{\max}$ пояса арки, мм $x_{\max}$ arch belt, mm	18,49	61,68	25,47	51,22	20,82
$x_{\max}$ правой опоры, мм $x_{\max}$ right support, mm	—	90,48	—	60,38	30,19
$z_{\max}$, мм / mm	−40,87	−72,69	−48,87	−75,10	−24,47
$N_{\max 1}$, кН / kN	−425,44	−466,66	−392,28	−419,51	−156,95
$M_{\max}$, кН·м / kN·m	25,48 −51,79	21,63 −25,2	36,4 −47,05	32,84 −26,81	7,17 −8,35
$Q_{\max}$, кН / kN	40,5 −43,37	40,65 −41,4	43,2 −43,33	40,76 −41,71	13,86 −13,91
$N_{\max 2}$, кН / kN	54,47	63,38 для наклонных затяжек и 276,67 для нижней 63.38 for inclined ties and 276.67 for the bottom	67,19	85,75 для наклонных затяжек и 206,27 для нижней 85.75 for inclined ties and 206.27 for the bottom	53,01 для наклонных затяжек и 135,63 для нижней 53.01 for inclined ties and 135.63 for the bottom
Подобранное сечение пояса арки, мм Selected section of the arch belt, mm	Ø14	Ø14 для наклонных затяжек и Ø27 для нижней Ø14 for inclined ties and Ø27 for the bottom	Ø14	Ø14 для наклонных затяжек и Ø27 для нижней Ø14 for inclined ties and Ø27 for the bottom	Ø14 для наклонных затяжек и Ø27 для нижней Ø14 for inclined ties and Ø27 for the bottom

Расчетное сочетание нагрузок Design load combination (DLC)	PCH 1 DLC 1		PCH 2 DLC 2		PCH 3 DLC 3
Обозначение схемы (рис. 1) Scheme designation (Fig. 1)	1	2	1	2	2
Подобранное сечение затяжек, мм Selected cross-section of ties, mm	200 × 9,5	200 × 9,5	200 × 9,5	200 × 9,5	200 × 9,5
Вес арочного пояса, т Weight of arched belt, t	1,888	1,888	1,888	1,888	1,888
Вес затяжек, т Weight of ties, t	0,163	0,262	0,163	0,262	0,262
Вес всей конструкции, т Weight of the entire structure, t	1,961	2,150	1,961	2,150	2,150
$R_{xn}, \text{кН} / R_{xleft}, \text{кН}$	284,34	0	191,89	0	0
$R_{zn}, \text{кН} / R_{zleft}, \text{кН}$	330,83	330,83	279,97	279,73	112,25
$R_{xn}, \text{кН} / R_{xright}, \text{кН}$	-284,34	—	-191,89	—	—
$R_{zn}, \text{кН} / R_{zright}, \text{кН}$	330,83	330,83	163,1	163,34	112,25

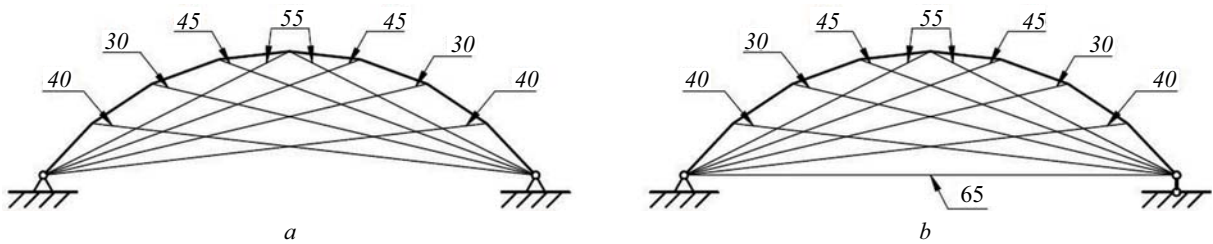


Рис. 6. Заданное усилие преднапряжения в затяжках, кН: а — схема № 1; б — схема № 2
Fig. 6. Specified prestressing force in ties, kN: a — scheme No. 1; b — scheme No. 2

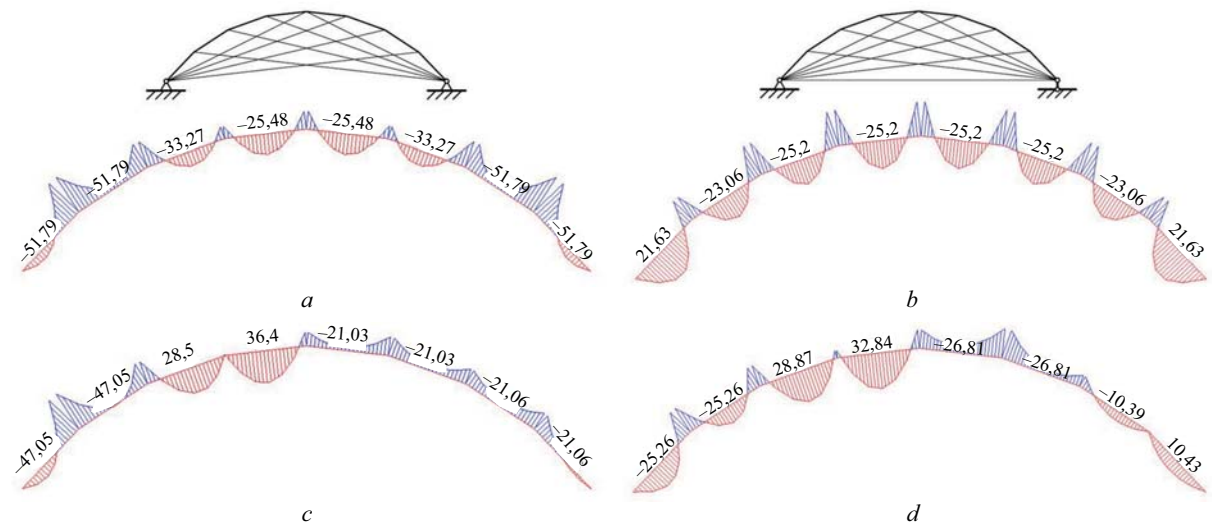


Рис. 7. Эпюры изгибающих моментов M , кН·м, при РСН 1 (а, б) и РСН 2 (с, д): а, с — для арки без нижней затяжки; б, д — для арки с нижней затяжкой
Fig. 7. Bending moment diagrams M , kN·m, at DLC 1 (a, b) and DLC 2 (c, d): a, c — for an arch without lower tie; b, d — for an arch with lower tie

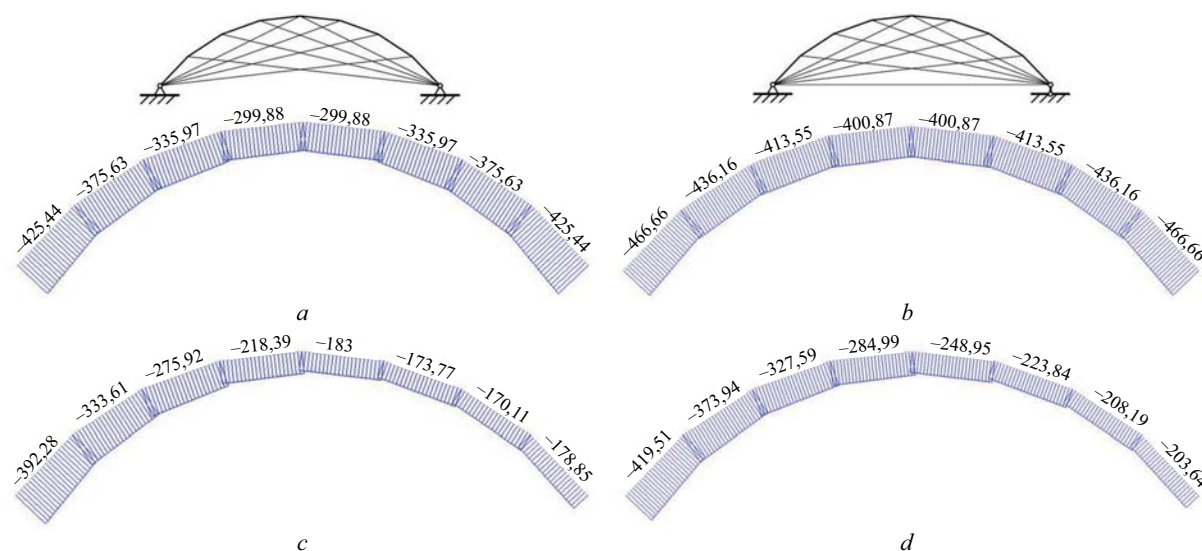


Рис. 8. Эпюры продольных сил N , кН, при РСН 1 (a, b) и РСН 2 (c, d): a, c — для арки без нижней затяжки; b, d — для арки с нижней затяжкой

Fig. 8. Diagrams of longitudinal forces N , kN, at DLC 1 (a, b) and DLC 2 (c, d): a, c — for an arch without lower tie; b, d — for an arch with lower tie

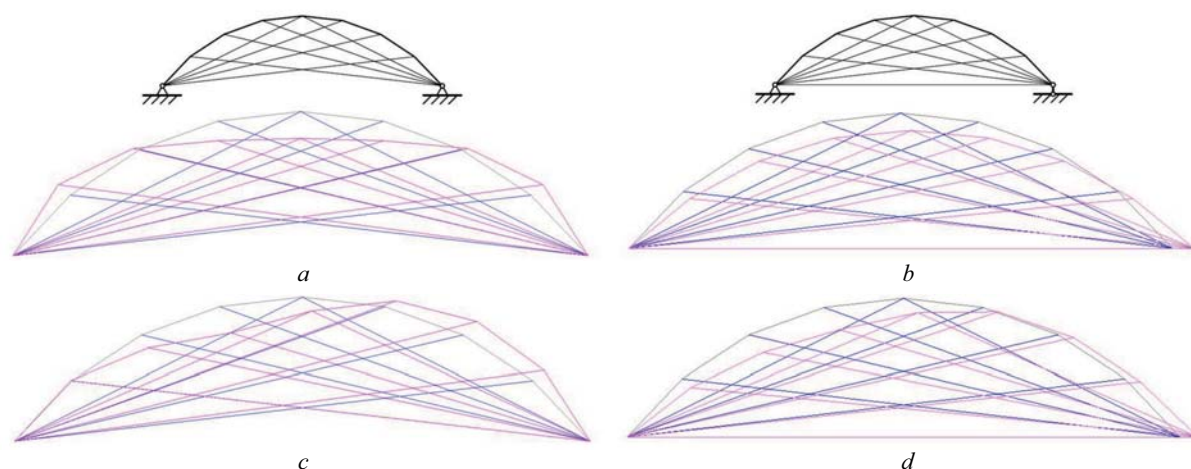


Рис. 9. Схемы деформирования при РСН 1 (a, b) и РСН 2 (c, d): a, c — для арки без нижней затяжки; b, d — для арки с нижней затяжкой. Синим цветом показано очертание модели до нагружения, фиолетовым цветом — после нагружения

Fig. 9. Deformation schemes at DLC 1 (a, b) and DLC 2 (c, d): a, c — for an arch without lower tie; b, d — for an arch with lower tie

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам сравнения двух арочных систем выявлено, что в арке с одной шарнирно-подвижной опорой горизонтальные перемещения пояса арки выше в 2–3,3 раза, а вертикальные перемещения в 1,5–1,8 раз, чем в арке с шарнирно-неподвижными опорами. После перераспределения усилий преднапряжения в затяжках возникающие продольные и поперечные усилия в поясах обеих арок сопоставимы и отличаются незначительно, однако изгибающий момент в арке с подвижной опорой вдвое меньше, чем в арке с неподвижными опорами. По метал-

лоемкости пояса обе арки сопоставимы, а по металлоемкости затяжек арка с подвижной опорой требует в 1,6 раз большего количества материала, чем арка с неподвижными опорами. При этом в арке с одной подвижной опорой необходимо задание большего усилия преднапряжения в затяжках, чем в арке с шарнирно-неподвижными опорами.

Рассматриваемая арка с подвижной опорой позволяет уменьшить поперечное сечение до значения 200×8 , однако при таком уменьшении требуется увеличение сечения нижней затяжки. Согласно ГОСТ 3068–80 на стальные канаты максимальный размер составляет $\varnothing 27$ мм, поэтому сечение пояса арки было

принято таким, при котором в затяжке максимальное продольное усилие не превышает предельно допустимое значение для выбранного типоразмера затяжки.

Таким образом, если конструкция опирается на опоры, которые способны воспринимать распор (поперечные стены, пилоны и другие массивные кон-

струкции), то целесообразно с точки зрения монтажа и задания преднапряжения затяжкам использовать арки с неподвижными опорами. В случае отсутствия возможности восприятия распора нижележащими конструкциями следует применять арку с нижней затяжкой и с подвижной опорой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Долгополов В.Е., Гринев Д.Д. Классификация и технологическая эффективность арочных конструкций // Научные труды КубГТУ. 2026. № 1. С. 67–78. DOI: 10.26297/2312-9409.2026.1.5. EDN MLSZZJ.

2. Ситников И.Р., Голиков А.В. Регулирование усилий в болшепролетных конструкциях при разработке рациональной конструктивной формы здания дельфинария в Волгограде // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 4. С. 278–292. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-278-292. EDN XXRMGL.

3. Лебедева Н.В. Фермы, арки, тонкостенные пространственные конструкции. М. : Архитектура-С, 2006. EDN QNMBCF.

4. Crocetti R. Timber Structures for Large-Span Structures // Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'16). 2016. DOI: 10.11159/icsenm16.124

5. Karnovsky I.A. Theory of Arched Structures. London : Springer New York, 2012. 429 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-0469-9

6. Инженерные конструкции / под ред. Ермолова В.В. М. : Высшая школа, 1991. 408 с.

7. Burford N.K., Smith F.W., Gengnagel C. The Evolution of Arches as Lightweight Structures A History of Empiricism and Science // Proceedings of the Third International Congress on Construction History. 2009. Pp. 267–274.

8. Грефе Р., Перчи О., Шухов Ф., Щербо Г., Гаппов М., Беленя Е. и др. В.Г. Шухов (1853–1939). Искусство конструкции. М. : Мир, 1994. 192 с. EDN UHDMZ.

9. Киселев Д.Б. Арочно-вантовые комбинированные конструкции. Численные и экспериментальные исследования // Современное промышленное и гражданское строительство. 2006. Т. 2. № 1. С. 17–27. EDN LALAXJ.

10. Кривошапко С.Н. Вантовые структуры // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 1. С. 9–22. EDN VCHTHN.

11. Сыч С. Проектирование вантовых конструкций в Autodesk Robot Structural Analysis Professional // CADmaster. 2012. № 6. С. 84–86.

12. Коряков А.С., Евстафьева Е.Б. Современное состояние светопрозрачных конструкций Шухова // Вестник МГСУ. 2013. № 12. С. 84–92. EDN RQAWIB.

13. Кожевников Е.Н. Предварительно напряженные фермы с жестким криволинейным верхним поясом и решеткой из гибких элементов // Труды III Междунар. конф. по предварительно напряженным металлическим конструкциям. 1971. С. 141–155.

14. Сингаевский П.М., Кожевников К.М., Караджичи К.М. К определению оптимальной геометрической схемы некоторых комбинированных арочных ферм с гибкой решеткой // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1971. № 4. С. 14–18.

15. Синицин Ю.Н. О конструктивных схемах и особенностях работы некоторых стальных стропильных ферм комбинированной системы // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1964. № 2. С. 33–41.

16. Королева Е.Ю., Трянина Н.Ю. Напряженно-деформированное состояние двухшарнирной арки с системой сходящихся затяжек // XIII Всеросс. фестиваль науки : сб. тез. 2023. С. 89–90. EDN MQRRUQ.

17. Королева Е.Ю., Трянина Н.Ю. Исследование работы сетчатого арочного свода с системой сходящихся затяжек // Междунар. конф. Нижегородского фестиваля науки : сб. тез. докл. 2025. С. 104–105. EDN WFPOWA.

18. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M. Comparing two types of combined arch-cable systems operation // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2791. P. 030021. DOI: 10.1063/5.0143530

19. Долгушева В.В., Ибрагимов А.М., Долгушев Т.В. Рациональное конструктивное решение комбинированной арочной системы с наклонными тягами // Academia. Архитектура и строительство. 2023. № 2. С. 168–174. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-2-168-174. EDN GCKCKR.

Поступила в редакцию 2 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 20 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 30 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Майорович Ибрагимов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 704948, Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022; ORCID: 0000-0003-3761-9213; igasu_alex@mail.ru;

Надежда Юрьевна Трянина — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры теории сооружений и технической механики; **Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ);** 603000 г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65; РИНЦ ID: 454862, ORCID: 0009-0008-3845-3917; nadial2005@mail.ru;

Вера Витальевна Долгушева — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1061655, Scopus: 57212309767, ORCID: 0000-0002-8530-9546; DolgushevaVV@yandex.ru;

Тимофей Владимирович Долгушев — кандидат технических наук, доцент, кафедра ИУ7 программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии; **Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана);** 125009, г. Москва, Тверская ул., д. 11, стр. 1,4; РИНЦ ID: 1061498, Scopus: 57218657350, ResearcherID: AFX-6017-2022, ORCID: 0000-0002-0306-8890; dolgushew@yandex.ru.

Вклад авторов:

Ибрагимов А.М. — научное руководство, анализ и интерпретация полученных данных, критический пересмотр черновика рукописи.

Трянина Н.Ю. — научное руководство, формулирование идеи, ключевых целей и задач, анализ и интерпретация полученных данных, критический пересмотр черновика рукописи.

Долгушева В.В. — развитие ключевых целей и задач, проведение исследований, составление черновика рукописи, разработка методологии, создание моделей.

Долгушев Т.В. — развитие ключевых целей и задач, проведение исследований, составление черновика рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Dolgoplov V.E., Grinev D.D. Classification and technological efficiency of arched structures. *Scientific Works of KubSTU*. 2026; 1:67-78. DOI: 10.26297/2312-9409.2026.1.5. EDN MLSZZJ. (rus.).
2. Sitnikov I.R., Golikov A.V. Adjustment of forces in large-span structures in the design of a rational constructive form of a dolphinarium in Volgograd. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018; 14(4):278-292. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-278-292. EDN XXRMGL. (rus.).
3. Lebedeva N.V. *Trusses, arches, thin-walled spatial structures*. Moscow, Architecture-S, 2006. EDN QNMBCF. (rus.).
4. Crocetti R. Timber Structures for Large-Span Structures. *Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'16)*. 2016. DOI: 10.11159/icsenm16.124
5. Karnovsky I.A. *Theory of Arched Structures*. London, Springer New York, 2012; 429. DOI: 10.1007/978-1-4614-0469-9
6. *Engineering structures* / Ed. by V.V. Ermolov. Moscow, Higher School, 1991; 408. (rus.).
7. Burford N.K., Smith F.W., Gengnagel C. The Evolution of Arches as Lightweight Structures a History of Empiricism and Science. *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*. 2009; 267-274.
8. Graefe R., Pertschi O., Shukhov F., Shcherbo G., Gappoev M., Belenya E. et al. V.G. Shukhov (1853–1939). *The Art of Construction*. Moscow, Mir, 1994; 192. EDN UHDMZ.
9. Kiselev D.B. Combined (hybrid) arch-cable structures. Numeric and experimental researches. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2006; 2(1):17-27. EDN LALAXJ. (rus.).
10. Krivoshapko S.N. Cable-stayed structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016; 1:9-22. EDN VCHTHN. (rus.).
11. Sych S. Design of cable-stayed structures in Autodesk Robot Structural Analysis Professional. *CADmaster*. 2012; 6:84-86. (rus.).
12. Koryakov A.S., Evstaf'eva E.B. Modern state of Shukhov's translucent structures. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 12:84-92. EDN RQAWIB. (rus.).
13. Kozhevnikov E.N. Prestressed trusses with a rigid curvilinear upper chord and a lattice of flexible elements. *Proceedings of the 3rd International Conference on Prestressed Metal Structures*. 1971; 141-155. (rus.).
14. Singaevsky P.M., Kozhevnikov K.M., Karadzhi K.M. On the determination of the optimal geometric scheme of some combined arched trusses with a flexible

lattice. News of Higher Educational Institutions. *Construction and Architecture*. 1971; 4:14-18. (rus.).

15. Sinitsyn Yu.N. On the design schemes and performance features of some steel rafter trusses of a combined system. News of Higher Educational Institutions. *Construction and Architecture*. 1964; 2:33-41. (rus.).

16. Koroleva E.Yu., Tryanina N.Yu. Stress-strain state of a two-hinged arch with a system of converging tie-rods. *XIII All-Russian Science Festival : collection of Abstracts*. 2023; 89-90. EDN MQRRUQ. (rus.).

17. Koroleva E.Yu., Tryanina N.Yu. Study of the work of a lattice arch vault with a system of converging ties.

International conference of the Nizhny Novgorod Science Festival : collection of abstracts. 2025; 104-105. EDN WFPOWA. (rus.).

18. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M. Comparing two types of combined arch-cable systems operation. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2791:030021. DOI: 10.1063/5.0143530

19. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M., Dolgushev T.V. Rational design concept of the combined arch system with inclined rods. *Academia. Architecture and Construction*. 2023; 2:168-174. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-2-168-174. EDN GCKCKR. (rus.).

Received March 2, 2026.

Adopted in revised form on March 20 2026.

Approved for publication on March 30, 2026.

B I O N O T E S: **Alexander M. Ibragimov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 704948, Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022, ORCID 0000-0003-3761-9213; igasu_alex@mail.ru;

Nadezhda Yu. Tryanina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Theory of Structures and Technical Mechanics; **Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNSAGU)**; 65 Ilyinskaya st., Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation; ID RSCI: 454862, ORCID: 0009-0008-3845-3917; nadial2005@mail.ru;

Vera V. Dolgusheva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1061655, Scopus: 57212309767, ORCID: 0000-0002-8530-9546; DolgushevaVV@yandex.ru;

Timofey V. Dolgushev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of IU7 Computer Software and Information Technology; **Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)**; build. 1.4, 11 Tverskaya st., Moscow, 125009, Russian Federation; ID RSCI: 1061498, Scopus: 57218657350, ResearcherID: AFX-6017-2022, ORCID: 0000-0002-0306-8890; dolgushew@yandex.ru.

Authors' contributions:

Alexander M. Ibragimov — scientific supervision, analysis and interpretation of data, critical revision of the draft manuscript.

Nadezhda Yu. Tryanina — scientific supervision, concept development, formulation of key goals and objectives, analysis and interpretation of data, critical revision of the draft manuscript.

Vera V. Dolgusheva — development of key goals and objectives, research, drafting of the manuscript, methodology development, model creation.

Timofey V. Dolgushev — development of key goals and objectives, research, drafting of the manuscript.

The authors declare no conflict of interest.