

Academia. Архитектура и строительство, № 2, стр. 168–174.
Academia. Architecture and Construction, no. 2, pp. 168–174.

Исследования и теория
Научная статья
УДК 624.072.2/4
doi: 10.22337/2077-9038-2023-2-168-174

Рациональное конструктивное решение комбинированной арочной системы с наклонными тягами

Долгушева Вера Витальевна (Москва). Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл.почта: dolgushevavv@yandex.ru

Ибрагимов Александр Майорович (Москва). Доктор технических наук, профессор. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл.почта: igasu_alex@mail.ru

Долгушев Тимофей Владимирович (Москва). Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл.почта: dolgushew@yandex.ru

Аннотация. Одним из решений задачи рационализации несущих конструкций покрытия является применение арочных комбинированных систем. Работа посвящена исследованию комбинированной арочной системы с лучевыми затяжками. Основное внимание уделено совершенствованию конструктивных решений посредством поиска рационального количества панелей пояса арки и затяжек, анализу работы арочных систем и установлению зависимостей напряженно-деформированного состояния при изменении количества панелей и затяжек, поиску усилий преднапряжения затяжек, позволяющих уменьшить поперечное сечение арочного пояса. По результатам численных расчетов в программном комплексе SCAD определено рациональное количество панелей и затяжек, усилия преднапряжения затяжек, профиль поперечного сечения пояса арки, которые способствуют уменьшению металлоёмкости и более эффективному использованию несущей способности арочной системы с лучевыми затяжками.

Ключевые слова: комбинированные системы, арочно-вантовые конструкции, арка с лучевыми затяжками, моделирование преднапряжения

Для цитирования. 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.

Rational Design Concept of the Combined Arch System with Inclined Rods

Dolgusheva Vera V. (Moscow). National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia. NRU MGSU). E-mail: dolgushevavv@yandex.ru

Ibragimov Aleksandr M. (Moscow). Doctor Candidate of Sciences in Technology, Professor. National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia. NRU MGSU). E-mail: igasu_alex@mail.ru

Dolgushev Timofei V. (Moscow). National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia. NRU MGSU). E-mail: dolgushew@yandex.ru

Abstract. One of the solutions to the stressed-skin roof decks' rationalization problem is the use of arched combined systems. The article concentrates on the research of a combined arch system with inclined rods. The main attention is paid to the design concepts' improvement by searching for a rational number of arch rib panels and ties, analyzing the arch system's operation and establishing strain-stress dependencies when changing the number of rib panels and ties, searching for prestressing forces of cables that allow reducing the arch rib cross section. Based on the results of numerical calculations in the SCAD software, a rational number of panels and ties, prestressing forces of cables, and a cross-sectional profile of the arch rib were determined, which contribute to a reduction in metal intensity and more efficient use of bearing of the arch system with inclined ties.

Keywords: combined systems, arch-cable constructions, arch with inclined rods, simulation of prestress

For citation. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M., Dolgushev T.V. Rational Design Concept of the Combined Arch System with Inclined Rods. In: *Academia. Architectute and construction*, 2023, no. 2, pp. 168–174. doi: 10.22337/2077-9038-2023-2-168-174.

В соответствии с Программой фундаментальных научных исследований¹ снижение материалоемкости строительства является одной из основных задач в области строительных наук, поэтому поиск рационального конструктивного решения для большепролётных зданий продолжает оставаться актуальной задачей. Одним из решений задачи поиска рациональных несущих конструкций покрытия является применение арочных комбинированных систем, которые характеризуются следующими параметрами: статическая схема, пролёт, стрела подъёма, очертание плана, провисы затяжек, расположение и количество дополнительных стержневых элементов, материал конструкций, методы изготовления и монтажа. Сочетание элементарных схем позволяет создавать сложные пространственные структуры [1].

В опубликованном ранее исследовании [2] были приведены примеры применения арочных комбинированных систем в качестве покрытий общественных зданий, отражены преимущества комбинированных арочных систем в сравнении с простыми арками. Среди проблем проектирования и применения арочно-вантовых систем отмечены отсутствие детальных теоретических и экспериментальных исследований действительной работы различных арочно-вантовых конструкций, нехватка чётких рекомендаций по конструированию и расчёту арочно-вантовых систем. Для разработки рекомендаций по конструированию и расчёту предлагается проведение исследований по различным видам арочно-ван-

товых систем, в которых решается задача рационализации конструктивных решений арочных конструкций. Среди основных арочно-вантовых комбинированных систем наиболее рациональными с точки зрения металлоёмкости являются арки с веерными и лучевыми затяжками [3; 4]. Идея создания арочных конструкций с затяжками, соединяющими опорные узлы с поясом арки, была предложена и осуществлена В.Г. Шуховым [5]. «Несмотря на столетнюю историю данные системы актуальны и по сей день, а ряд вопросов, связанных с их проектированием и практическим применением, до сих пор остаётся малоизученным» [6].

Арка с лучевыми затяжками имеет множество параметров для варьирования: пролёт, стрела подъёма арки, количество панелей, количество затяжек, тип поперечного сечения, материал. Для решения задачи рационализации ранее были проведены расчёты двух арочных систем: с веерными и лучевыми затяжками, соединяющими опору и пояс арки [5]. Параметром варьирования было соотношение стрелы подъёма к пролёту. По результатам сравнения двух типов арочно-вантовых комбинированных систем для арок с лучевыми затяжками с соотношением стрелы подъёма к пролёту $f: L=1:4$ получен наименьший расход металла, что подтверждается исследованиями, приведёнными в статьях [5; 8; 9].

Целью проведённого исследования является поиск рационального конструктивного решения комбинированной арочной конструкции с лучевыми затяжками путём варь-

¹ Программа фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) / Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 31 декабря 2020 года № 3684-р (с изменениями на 21 апреля 2022 года) (<http://government.ru/docs/all/132190/>).
² Все иллюстрации, представленные в статье, выполнены авторами на основании проведённых ими исследований.

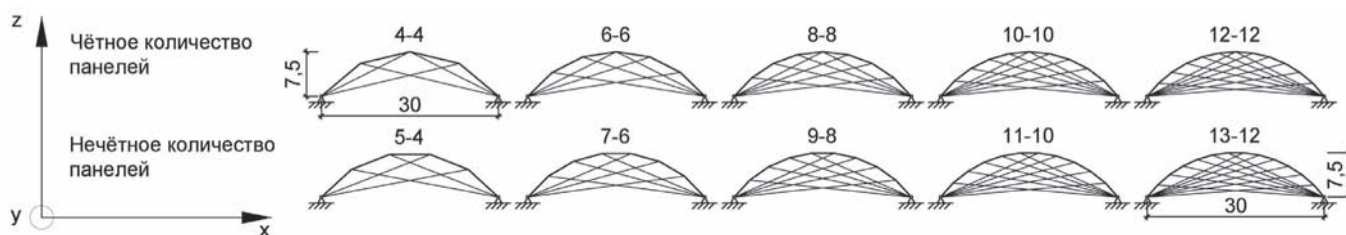


Рис. 1². Схемы сравниваемых арочных конструкций

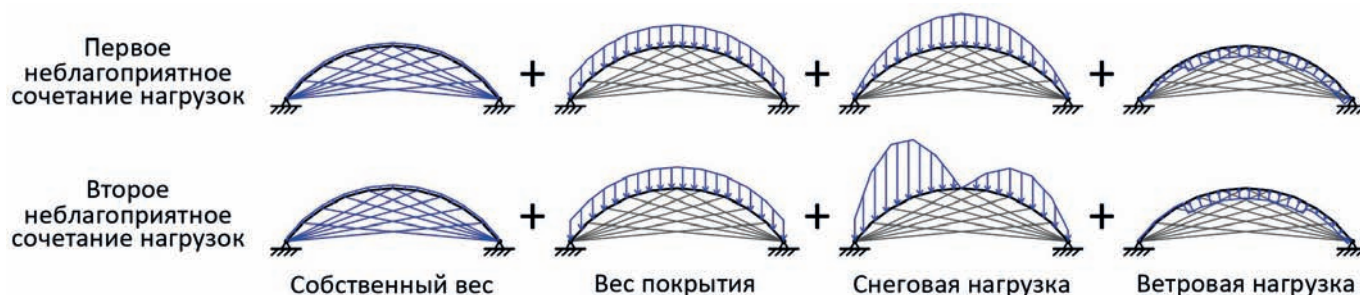


Рис. 2. Схема неблагоприятных сочетаний нагрузок на примере схемы 10-10 (см. рис. 1)

рования количества затяжек, количества панелей и типом поперечного сечения пояса арки.

Для расчёта были приняты I ветровой и III снеговой районы как самые распространённые на территории Российской Федерации в соответствии с СП 20.13330.2016³; вес покрытия 100 кг/м²; пролёт $L=30$ м; шаг арок $B=6$ м; соотношение стрелы подъёма к пролёту $f: L=1:4$; тип арок – двухшарнирные; очертание пояса арки – полигональное; пояс арки из квадратных профилей (ГОСТ 30245-2012⁴); затяжки из каната по ГОСТ 14954-80⁵. Количество панелей арки варьировалось от 4 до 12. Расчётные схемы арок были разделены на две группы: арки с чётным и нечётным количеством панелей. Схемы представлены на рисунке 1. Принято обозначение схем $a-b$, где a – количество панелей, b – количество тросов.

В качестве критериев рационального решения рассматривались соответствие проверкам прочности и устойчивости для пояса арки и для затяжек в соответствии с требованиями СП 16.13330.2017⁶ и СП 35.13330.2011⁷ и перемещения пояса арки, не превышающие предельно допустимых значений [13; 14] при минимальной металлоёмкости.

Расчёт арочных комбинированных систем производился с использованием программного комплекса SCAD. Расчёты выполнены в пространственной постановке с учётом геометрически нелинейного характера работы. Для моделирования работы в плоскости в каждом узле пояса арки была введена связь, ограничивающая линейные перемещения по оси u . Пояс арок смоделирован с помощью конечного элемента № 305 (стержень общего положения), затяжки замоделированы с помощью конечного элемента № 308 (вантовый элемент). При расчётах рассматривались следующие нагрузки на арочно-

вантовые конструкции: собственный вес, вес покрытия, снеговая нагрузка (равномерно и неравномерно распределённая), ветровая нагрузка (с учётом динамического воздействия). По результатам анализа напряжённо-деформированного состояния арочно-вантовых систем были выявлены два самых неблагоприятных сочетания нагрузок (рис. 2):

1) одновременное действие собственного веса, веса покрытия, снеговой нагрузки (симметрично распределённой), ветровой нагрузки в направлении против оси X ;

2) одновременное действие собственного веса, веса покрытия, снеговой нагрузки (несимметрично распределённой), ветровой нагрузки в направлении вдоль оси X .

Подбор усилий преднапряжения лучевых затяжек для обеспечения рационального решения был проведён по следующему алгоритму:

1) анализ эпюры моментов пояса арки при выявленных двух неблагоприятных сочетаниях нагрузок, поиск сечений пояса арки, в которых действуют максимальные значения изгибающих моментов (четверть и половина пролёта арки);

2) «выравнивание» эпюры моментов при первом и втором сочетаниях нагрузок путём преднапряжения одной группы затяжек. Величина преднапряжения группы затяжек в килоньютонах численно равна разнице значений по модулю максимальных моментов в килоньютонах на метр в четверти пояса арки и в середине. Так, усилие для первой группы напрягаемых затяжек определяется по эпюре моментов от сочетания с несимметричным распределением снеговой нагрузки (второе сочетание), а усилие для второй группы затяжек определяется по эпюре моментов от сочетания с симметричным распределением снеговой нагрузки (первое сочетание). Последовательность преднапряжения группы затяжек показана на рисунке 3;

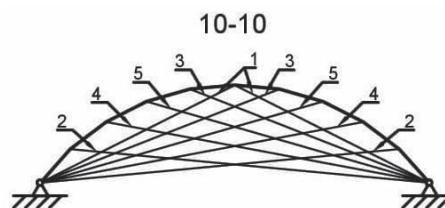


Рис. 3. Последовательность преднапряжения групп затяжек на примере схемы 10-10 (см. рис. 1)

³ СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* / Дата введения 2017-06-04 (<https://docs.cntd.ru/document/456044318>).

⁴ ГОСТ 30245-2012 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций» / Дата введения 2014-10-01 (<https://docs.cntd.ru/document/1200109847>).

⁵ ГОСТ 14954-80. «Канат двойной свивки типа ЛК-Р конструкции $6 \times 19(1+6+6/6)+7 \times 7(1+6)$. Сортамент» / Дата введения 1982-01-01 (<https://docs.cntd.ru/document/1200007643>).

⁶ СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» / Дата введения 2017-08-28 (<https://docs.cntd.ru/document/456069588>).

⁷ СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» / Дата введения 2011-05-20 (<https://docs.cntd.ru/document/1200084849>).

3) перерасчёт схемы. Если разница значений по модулю между максимальным моментом в четверти пролёта для первого и второго сочетания нагрузок и между максимальным моментом в середине пролёта для первого и второго сочетаний нагрузок не превышает десяти килоньютон, максимальная продольная сила в затяжках не превышает

предельного значения и всем группам затяжек задано пред-напряжение, то следует перейти к четвёртому пункту. Если превышает, то надо вернуться к первому пункту, заменив, при необходимости, сечения затяжек;

4) подбор сечения пояса арки. Если запас по результатам проверок по прочности и устойчивости пояса арки более 5%,

Таблица 1. Результат расчёта арок с чётным количеством панелей

1	Обозначение схемы	4-4	6-6	8-8	10-10	12-12
2	Максимальное горизонтальное перемещение h_{max} , мм	37,70	44,14	34,18	43,01	42,50
3	Максимальное вертикальное перемещение f_{max} , мм	-48,09	-50,70	-93,36	-47,78	-45,84
4	Максимальная продольная сила в поясе арки N_{max1} , кН	-545,05	-570,78	-597,36	-600,38	-599,88
5	Максимальный изгибающий момент в поясе арки M_{max} , кН·м	-142,90	-73,30	-47,89	-35,77	-36,23
		159,75	96,68	60,43	50,92	50,14
6	Максимальная поперечная сила в поясе арки Q_{max} , кН	-97,12	-74,02	-54,71	-44,12	-38,61
		85,06	73,74	57,00	49,14	41,27
7	Максимальная сила натяжения в затяжках N_{max2} , кН	99,90	92,54	87,68	82,68	75,74
8	Подобранное сечение верхнего пояса, мм	300×9,5	250×8	200×9	200×8	200×7,5
9	Подобранное сечение затяжек, мм	Ø 14,0	Ø 12,5	Ø 12,0	Ø 12,0	Ø 12,0
10	Вес арочного пояса, т	2,902	2,046	1,797	1,581	1,522
11	Вес затяжек, т	0,065	0,084	0,101	0,128	0,155
12	Вес всей конструкции, т	2,967	2,130	1,897	1,709	1,677
13	Приведённая металлоёмкость (отношение общей массы к пролёту), т/м	0,099	0,071	0,063	0,057	0,056
14	N , соответствующее M_{max} , кН	-492,88	-450,00	-508,02	-484,38	-496,15
15	M_{max} / N соотв	0,32	0,21	0,12	0,11	0,10

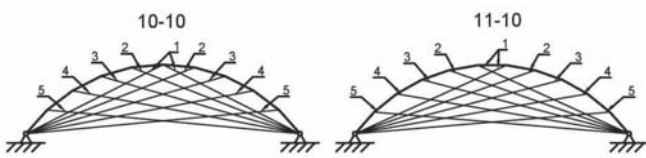
Таблица 2. Результат расчёта арок с нечётным количеством панелей

1	Обозначение схемы	5-4	7-6	9-8	11-10	13-12
2	Максимальное горизонтальное перемещение h_{max} , мм	51,30	45,92	52,81	37,51	39,24
3	Максимальное вертикальное перемещение f_{max} , мм	-58,95	-50,92	-59,85	-41,23	47,21
4	Максимальная продольная сила в поясе арки N_{max1} , кН	-543,63	-568,83	-575,37	-588,84	-600,15
5	Максимальный изгибающий момент в поясе арки M_{max} , кН·м	-100,41	-70,27	-69,33	-58,80	-64,99
		110,79	97,77	72,02	66,16	63,58
6	Максимальная поперечная сила в поясе арки Q_{max} , кН	-80,90	-62,64	-50,65	-41,57	-38,59
		81,41	65,98	54,37	45,55	40,58
7	Максимальная сила натяжения в затяжках N_{max2} , кН	109,11	110,58	88,72	92,86	94,80
8	Подобранное сечение верхнего пояса, мм	250×10	250×7,5	200×9,5	250×7	250м7
9	Подобранное сечение затяжек, мм	Ø 14,0	Ø 14,0	Ø 12,0	Ø 12,5	Ø 12,5
10	Вес арочного пояса, т	2,512	1,927	1,888	1,809	1,810
11	Вес затяжек, т	0,072	0,109	0,105	0,151	0,182
12	Вес всей конструкции, т	2,584	2,036	1,993	1,960	1,992
13	Приведённая металлоёмкость (отношение общей массы к пролёту), т/м	0,086	0,068	0,066	0,065	0,066
14	N , соответствующее M_{max} , кН	-496,20	-458,79	-431,18	-482,66	-545,31
15	M_{max} / N соотв	0,22	0,21	0,17	0,14	0,12

то нужно заменить сечения пояса арки на рекомендуемое программой и вернуться к первому пункту. Если запас по прочности и устойчивости пояса арки менее 5% и максимальная продольная сила в затяжках не превышает предельного значения, то расчёт заканчивается на подобранных сечениях пояса и затяжек.

Для оценки материалоемкости в сравнении с простыми арками были рассчитаны те же модели, но без затяжек.

В таблицах 1 и 2 представлены основные результаты проведённых расчётов. Серым цветом отмечены лучшие показатели: наименьшие перемещения, изгибающие моменты и поперечные силы, наибольшие продольные силы.



1 – затяжки, приходящие в центр арки; 2–5 – все последующие группы затяжек, считая от центра арки

Рис. 4. Нумерация групп тросов на примере схемы 10-10 и 11-10

По полученным результатам расчётов можно сказать, что:

- 1) по критерию наименьших перемещений и усилий среди арок с чётным количеством панелей рациональнее схема 12-12;

- 2) по критерию металлоёмкости среди арок с чётным количеством панелей наиболее эффективны схемы 10-10 и 12-12;

- 3) по критерию наименьших перемещений и усилий среди арок с нечётным количеством панелей рациональнее схема 11-10;

- 4) по критерию металлоёмкости среди арок с нечётным количеством панелей наиболее эффективны схемы 9-8, 11-10 и 13-20;

- 5) по критерию металлоёмкости при количестве затяжек четыре и шесть рациональнее арки с нечётным количеством панелей, при количестве затяжек восемь, десять и двенадцать рациональнее арки с чётным количеством панелей (рис. 5);

- 6) арочные конструкции с лучевыми затяжками по сравнению с простыми арками позволяют уменьшить расход металла на 27,5...58,1 % (в 1,4...2,4 раза), уменьшить максимальный изгибающий момент на 40% (в 1,7 раза), увеличить максимальную продольную силу на 25% (в 1,25 раза) (рис. 5, 6, 7);

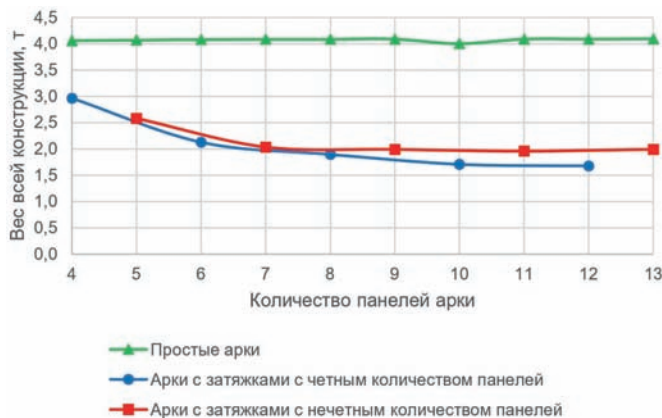


Рис. 5. Зависимость веса конструкции от количества затяжек арки

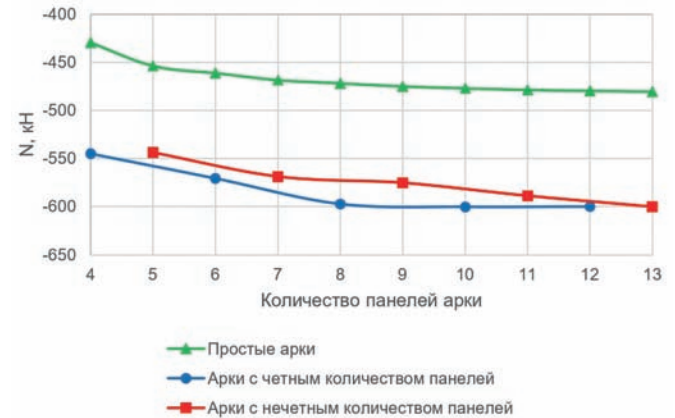


Рис. 6. Зависимость максимальной продольной силы N от количества панелей арки

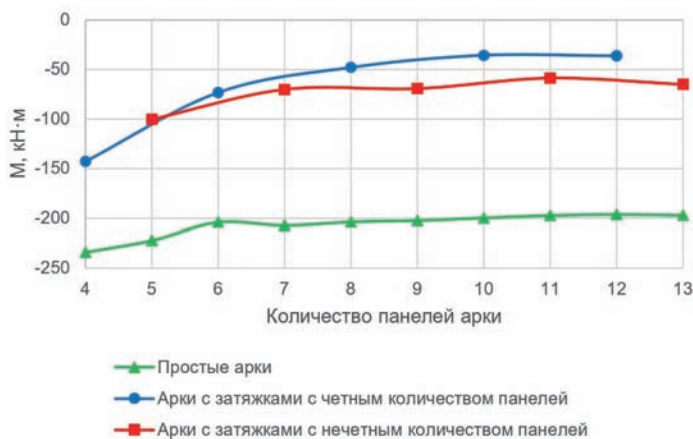
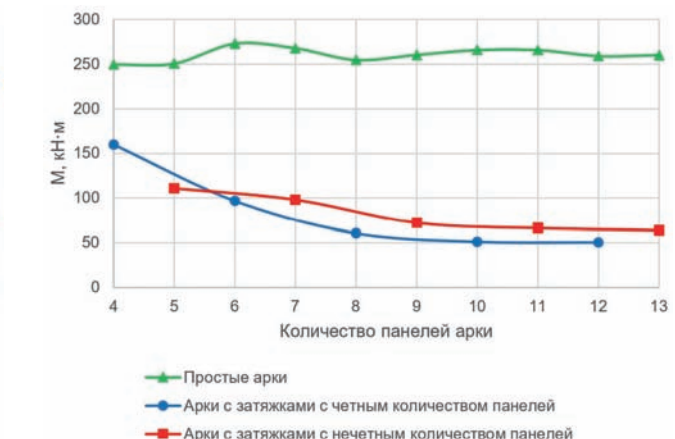


Рис. 7. Зависимость максимального изгибающего момента M от количества панелей арки: а) отрицательные значения; б) положительные значений



7) для арок с чётным и нечётным количеством панелей и одинаковым количеством затяжек требуется различное усилие преднапряжения для одинаковых групп затяжек: так, для арок с чётным количеством панелей требуется меньшее усилие преднапряжения соответствующих групп тросов, чем для арок с нечётным количеством (рис. 8).

Для строительных конструкций критерием рациональности служит не только материалоемкость, но и простота изготовления и монтажа. По результатам проведённых расчётов наиболее рациональными являются арки с восьмью затяжками (схема 8-8 и 9-8). С точки зрения монтажа, работы конструкции рациональнее арки с чётным количеством панелей.

Для поиска рационального по металлоёмкости профиля поперечного сечения пояса арки были проведены сравнительные расчёты арочной конструкции по схеме 8-8 с различными профилями пояса арки: квадратным³, прямоугольным³, круглым⁸, балочным двутавровым нормальным⁹, балочным двутавровым широкополочным⁸, спаренными равносторонними уголками¹⁰. По результатам расчётов, представленных в таблице 3, видно, что самыми рациональными по расходу металла являются поперечные сечения

из квадратных, прямоугольных и круглых труб. Среди труб лучший показатель по весу арочного пояса и приведённой металлоёмкости у арочной конструкции с поясом из трубы с прямоугольным поперечным сечением.

- По результатам исследований было определено:
- рациональное количество панелей и затяжек для арочной конструкции пролётом тридцать метров (восемь панелей и восемь затяжек);
 - рациональное поперечное сечение пояса арки в виде прямоугольных профилированных труб арочно-вантовой конструкции пролётом тридцать метров;
 - рациональные усилия преднапряжения затяжек;
 - зависимость усилий преднапряжения от группы затяжек;
 - выявлено снижение металлоёмкости в сравнении с простыми арками (в 1,4...2,4 раза).

Результаты исследований в дальнейшем могут быть использованы при проектировании покрытий с использованием комбинированных арочных систем с лучевыми затяжками.

⁸ ГОСТ 32931-2015 «Трубы стальные профильные для металлоконструкций. Технические условия» / Дата введения 2016-09-01 (<https://docs.cntd.ru/document/1200130601>).

⁹ ГОСТ Р 57837-2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия» (с Поправкой, с Изменением N 1) / Дата введения 2018-05-01. (<https://docs.cntd.ru/document/1200157342>).

¹⁰ ГОСТ 8509-93 «Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент» / Дата введения 1997-01-01 (<https://docs.cntd.ru/document/1200001025>).

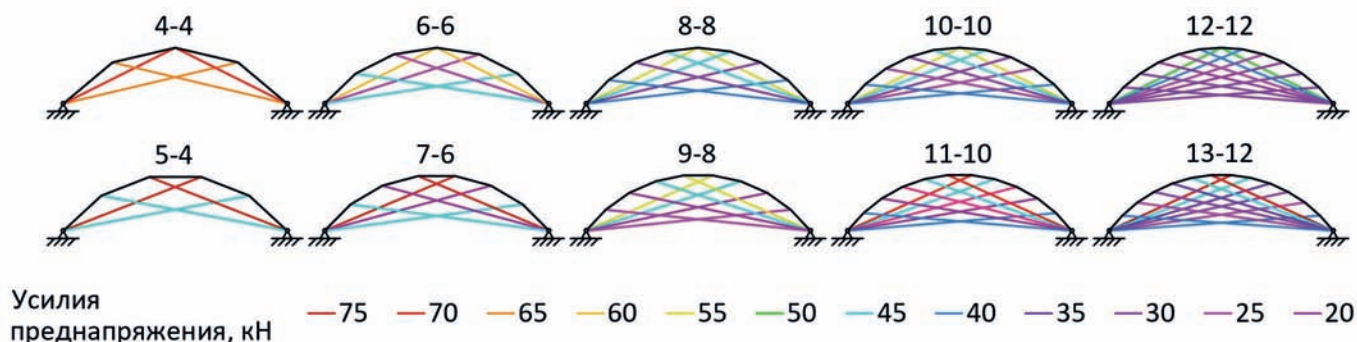


Рис. 8. Величины предварительного напряжения в зависимости от расположения затяжек

Таблица 3. Результаты расчёта арочной конструкции с различными поперечными сечениями пояса арки

Наименование профиля	Квадратный	П р я м о - угольный	Круглый	Нормальный балочный дву- тавр	Широкополочный балочный двутавр	С п а р е н н ы е равнополочные уголки
Подобранное сечение верхнего пояса, мм	200×9	300×200×6	355,6×5,5	40Б2	35Ш1	220×16
Вес арочного пояса, т	1,797	1,570	1,648	2,290	2,266	3,735
Вес всей конструкции, т	2,115	1,848	1,939	2,695	2,667	4,397
Приведённая металлоёмкость (отношение общей массы к пролёту), т/м	0,071	0,062	0,065	0,090	0,089	0,147

Список источников

1. Киселёв, Д.Б. Арочно-вантовые комбинированные конструкции. Численные и экспериментальные исследования / Д.Б. Киселёв. – Текст: непосредственный // Современное и гражданское промышленное строительство. – 2006. – Т. 2, № 1. – С. 17–27.

2. Ибрагимов, А.М. Проблемы применения и проектирования арок комбинированных систем / А.М. Ибрагимов, Л.Ю. Гнедина, В.В. Долгушева. – Текст: непосредственный // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2021. – № 2. – С. 25–35.

3. Dolgusheva, V.V. Operation Analysis of the Main Arch-Cable-Stayed Systems When Operating under Unevenly Distributed and Asymmetrically Working Loads / V.V. Dolgusheva, A.M. Ibragimov // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – № 168. – С. 44–54.

4. Трянина, Н.Ю. Исследование работы арок конструкций с системой наклонных тяг / Н.Ю. Трянина, М.А. Карзанов. – Текст: непосредственный // Приволжский научный журнал. – 2011. – № 2. – С. 16–19.

5. Шухов, В.Г. Строительная механика. Избранные труды / В.Г. Шухов. – Москва : Наука, 1977. – 193 с. – Текст: непосредственный.

6. Трянина, Н.Ю. Анализ работы арок систем с наклонными тягами / Н.Ю. Трянина, М.А. Карзанов. – Текст: непосредственный // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. – 2011. – № 14. – С. 175–182.

7. Долгушева, В.В. Сравнение работы арочно-вантовых комбинированных систем двух типов с простыми арками / В.В. Долгушева, А.М. Ибрагимов. – Текст: электронный // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 6. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7739 (дата обращения: 06.12.2021).

8. Суворовцев, Б.А. Особенности проектирования пролётных строений мостов комбинированных систем с гибкими наклонными подвесками / Б.А. Суворовцев. – Текст: непосредственный // Современные технологии. Анализ. Моделирование. – 2017. – № 1. – С. 219–224.

9. Ибрагимов, А.М. Сравнительный анализ вариантов конструктивных решений пологих арок покрытий зданий / А.М. Ибрагимов, И.С. Кукушкин. – Текст: непосредственный // Вестник МГСУ. – 2014. – № 3. – С. 59–66.

References

1. Kiselev D.B. Arochno-vantovye kombinirovannye konstruktsii. Chislennye i eksperimental'nye issledovaniya [Combined (Hybrid) Arch-Cable Structures. Numeric and

Experimental Researches]. In: *Sovremennoe i grazhdanskoe promyshlennoe stroitel'stvo [Modern Industrial and Civil Construction]*, 2006, Vol. 2, no. 1, pp. 17–27. (In Russ., abstr. in Engl.)

2. Ibragimov A.M., Gnedina L.Yu., Dolgusheva V.V. Problemy primeneniya i proektirovaniya arochnykh kombinirovannykh sistem [Problems of Application and Design of Combined Arc Systems]. In: *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies]*, 2021, no. 2, pp. 25–35. (In Russ., abstr. in Engl.)

3. Dolgusheva V.V. Ibragimov A.M. Operation Analysis of the Main Arch-Cable-Stayed Systems When Operating under Unevenly Distributed and Asymmetrically Working Loads. In: *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, no. 168, pp. 44–54. (In Engl.)

4. Tryanina N.Yu., Karzanov M.A. Issledovanie raboty arochnykh konstruktsii s sistemoi naklonnykh tyag [Tensile Fabric Surface Formfinding Control]. In: *Privolzhskii nauchnyi zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]*, 2011, no. 2, pp. 16–19. (In Russ., abstr. in Engl.)

5. Shukhov V.G. Stroitel'naya mekhanika. Izbrannye trudy [Structural mechanics. Selected works]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 193 p. (In Russ.)

6. Tryanina N.Yu. Analiz raboty arochnykh sistem s naklonnymi tyagami [Analysis of the Work of Arch Systems with Inclined Rods]. In: *Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya RAASN [Bulletin of the Volga Regional Branch of the RAASN]*, 2011, no. 14, 175–182. (In Russ.)

7. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M. Sravnenie raboty arochno-vantovykh kombinirovannykh sistem dvukh tipov s prostymi arkami [Comparison of the Work of Arch-Stay Combined Systems of Two Types with Simple Arches]. In: *Inzhenernyi vestnik Dona [Engineering Journal of Don]*, 2022, no. 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7739 (Accessed 12/06/2021). (In Russ., lit. in Engl.)

8. Suvorovtsev B.A. Osobennosti proektirovaniya proletrykh stroenii mostov kombinirovannykh sistem s gibkimi podveskami [Features of the design of spans of bridges of combined systems with flexible suspensions]. In: *Sovremennye tekhnologii. Analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. Analysis. Modeling]*, 2017, no. 1, pp. 219–224. (In Russ., lit. in Engl.)

9. Ibragimov A.M., Kukushkin I.S. Sravnitel'nyi analiz variantov konstruktivnykh reshenii pologikh arochnykh pokrytii zdaniy [Comparative Analysis of the Construction Solution Variants for Flat Arch Covering of Buildings]. In: *Vestnik MGSU*, 2014, no. 3, pp. 59–66. (In Russ., lit. in Engl.)