

Сравнение работы арочно-вантовых комбинированных систем двух типов с простыми арками

В.В. Долгушева, А.М. Ибрагимов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Строительство общественных зданий из металлического каркаса всегда связано с поиском рационального конструктивного решения, которое отвечает не только требованиям надежности, безопасности, но и архитектурным и дизайнерским решениям. Зачастую решением задачи рационализации конструкций покрытий в общественных зданиях становится использование арочных комбинированных систем, так как такие системы имеют ряд преимуществ по сравнению с простыми арками. Целью исследования является поиск рационального конструктивного решения двух арочно-вантовых систем, сравнение работы комбинированных арок и простых арок с точки зрения наименьших усилий, перемещений и металлоёмкости при различных соотношениях стрелы подъёма и пролёта в программном комплексе Lira Sapr 2020. По результатам расчетов определены наиболее неблагоприятные сочетания нагрузок, получены деформированные схемы арочных систем, перемещения, моменты и усилия, подобраны сечения арок и затяжек. Лучший результат с точки зрения эффективной работы и металлоёмкости показали арки с центрально сосредоточенными вантами с отношением стрелы подъёма к пролёту $f/L=1/3$ и радиально (веерно) расположенными вантами с отношением стрелы подъёма к пролёту $f/L=1/4$.

Ключевые слова: комбинированная система, арочно-вантовая конструкция, моделирование преднапряжения, арка с центрально сосредоточенными вантами, арка с радиально (веерно) расположенными вантами.

Введение

В России наблюдается рост строительства большепролётных общественных зданий с использованием металлических конструкций [1]. В каждом решении индивидуального проекта архитекторы, конструкторы, строители стремятся к созданию новых, уникальных сооружений. К сожалению, вследствие малоизученности и отсутствия опыта строительства конструкций нового типа, возникают ошибки при проектировании, монтаже, эксплуатации, которые приводят к авариям зданий и сооружений. В связи с этим, поиск рационального конструктивного решения, которое обеспечивает выполнение требований проектирования и конструирования, является весьма актуальной задачей [2]. Зачастую решением задачи рационализации

конструкций покрытий в общественных зданиях становится использование арочных комбинированных систем. Такие системы можно встретить в спортивных комплексах, крытых рынках, галереях, холлах торговых центров, вокзалах, выставочных павильонах, различного рода ангарах промышленного и сельскохозяйственного назначения и в других зданиях. Преимущества арочных комбинированных систем по сравнению с простыми арками и основные типы таких систем представлены в статьях [3, 4].

Наиболее часто арочные комбинированные системы применяются в качестве несущих конструкций здания в виде арочно-вантовой конструкции [4,5].

В связи с недостатком детальных теоретических и экспериментальных исследований действительной работы арочно-вантовых конструкций проектирование и применение арочных комбинированных систем ограничено.

Целью исследования является поиск рационального конструктивного решения двух арочно-вантовых систем: арка с центрально сосредоточенными вантами, арка с радиально (вверно) расположенными вантами, сравнение работы комбинированных арок и простых арок с точки зрения наименьших усилий, перемещений и металлоёмкости при различных соотношениях стрелы подъёма и пролёта в программном комплексе Lira Sapr 2020. Рациональной формой арки при заданных величинах нагрузки, пролёта и стрелы подъёма считают такую, которая обеспечивает необходимую прочность и устойчивость при наименьшем её объёме [6,7].

Методы

Для сравнения работы арочно-вантовых систем двух типов и простых арок в качестве исходных данных были приняты следующие параметры:

- нагрузки принимались для III снегового и I ветрового районов как для наиболее распространённых районов на территории РФ по картам в приложении Е СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»;

- вес кровли $q=300$ (кг/м) был задан как равномерно-распределённая нагрузка на верхний пояс арок;

- пролёт $L=21$ (м); стрелы подъёма были приняты из соотношения $f/L=1/2; 1/3; 1/4; 1/6; 1/8$;

- тип арок – двухшарнирные, так как такие арки имеют более благоприятное распределение изгибающих моментов по своей длине, менее чувствительны к температурным воздействиям и осадкам опор [8].

Чтобы создать равные условия для сравнения были введены ограничения по типу сечения для тросов и верхнего пояса коробчатого сечения. Тип сечения для тросов принимался по ГОСТ 3064-80 «Канат одинарной свивки типа ТК конструкции 1x37(1+6+12+18)», а для верхнего пояса по ГОСТ 30245-2012 «Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные для строительных конструкций». Верхний пояс рассматриваемых арочно-вантовых систем и арок геометрически представляет собой полигональную арку кругового очертания. Количество панелей принято равным 10.

В качестве критериев расчета и подбора сечений были приняты следующие ограничения:

- вертикальные и горизонтальные перемещения, не превышающие предельно допустимых значений (для вертикальных перемещений $f_{ult}=087$ мм; для горизонтальных перемещений $h_{ult}=90; 84; 80; 76; 74$ мм для соотношения $f/L=1/2; 1/3; 1/4; 1/6; 1/8$ соответственно по требованиям СП 20.13330.2016;

- выполнение проверок прочности и устойчивости при действии продольной силы с изгибом для сечения верхнего пояса по требованиям СП

16.13330.2017 «Стальные конструкции», выполнение проверки прочности троса на разрыв по требованиям СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы».

Моделирование и расчет арочно-вантовых систем проведен в программном комплексе Лира Сапр 2020, в котором реализован метод конечных элементов. Сравнимые схемы арок рассчитаны в плоской постановке задачи (три степени свободы: перемещения по горизонтали в плоскости арки и вертикали поворот вокруг оси, перпендикулярной плоскости, в которой расположена) с учетом физической и геометрической нелинейности для комбинированных систем и в линейной постановке для простых арок.

К расчетным схемам арочных комбинированных систем были приложены следующие нагрузки, определенные в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016: собственный вес арочной системы; вес от покрытия; преднапряжение затяжек (кроме схем простых арок); равномерно распределенная снеговая нагрузка; неравномерно распределенная снеговая нагрузка; статическая ветровая нагрузка в направлении слева-направо; статическая ветровая нагрузка в обратном направлении (справа-налево).

Преднапряжение затяжек в расчете было смоделировано с помощью задания температурных нагрузок [3,9].

По результатам анализа двенадцати расчетных сочетаний нагрузок, сформированных в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016, и работы арок без затяжек в линейной постановке было выявлено наиболее неблагоприятное сочетание: сочетание, в котором на конструкцию действуют собственный вес, вес покрытия, преднапряжение, неравномерная снеговая нагрузка и ветровая нагрузка (направление слева-направо). Расчет комбинированных арочных систем в нелинейной постановке произведен на выявленное неблагоприятное сочетание.

Результаты

Результаты расчетов представлены в таблицах №№ 1, 2, 3. Серым цветом выделены лучшие показатели для схемы простой арки, арки с центрально сосредоточенными вантами и для схемы с радиально (верно) расположенными вантами, а лучшие показатели по результатам сравнения обведены толстой линией.

Таблица № 1

Результаты расчета простых арок

№	Эскиз схемы №1					
1	Соотношение стрелы подъёма и пролёта f/L	1/2	1/3	1/4	1/6	1/8
2	Максимальное горизонтальное перемещение h_{ult} (мм)	113	102	77	49.8	36.1
3	Максимальное вертикальное перемещение f_{ult} (мм)	-67.6	-81.8	-84.9	-85.0	-84.9
4	Максимальная продольная сила в поясе арки N_{max1} (т)	-15.4	-17.6	-20.9	-22.1	-22.1
5	Максимальный изгибающий момент в поясе арки M_{max} (т·м)	-15.1 +11.4	-7.86 +7.84	-5.0 +7.6	-4.67 +7.16	-4.03 +6.51
6	Максимальная поперечная сила в поясе Q_{max} (т)	-3.81 +4.82	-2.85 +3.55	-3.25 +3.28	-3.11 +4.19	-2.69 +4.16
8	Подобранное сечение пояса арки	300x9	250x6	200x11	200x8.5	200x7
12	Вес всей конструкции, т	2.63	1.21	1.56	1.16	0.90
13	Приведённая масса (Общая масса/пролёт, т/м)	0.13	0.06	0.07	0.06	0.04
14	Запас по прочности %	2.9	0	1.3	6	10.1
15	Запас по устойчивости %	38.7	20.3	64.3	50.4	38.3

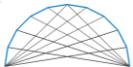
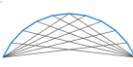
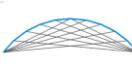
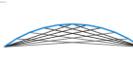
Таблица № 2

Результаты расчета арки с центрально сосредоточенными вантами

№	Эскиз схемы №2					
1	Соотношение стрелы подъёма и пролёта f/L	1/2	1/3	1/4	1/6	1/8
2	Максимальное горизонтальное перемещение h_{ult} (мм)	26.9	24.7	29.9	15.4	12.9
3	Максимальное вертикальное перемещение f_{ult} (мм)	-25.3	-29.9	-34.2	-27.2	-31.6
4	Максимальная продольная сила в поясе арки N_{max1} (т)	-17.2	-19.8	-24.1	-29.1	-29.9
5	Максимальный изгибающий момент в поясе арки M_{max} (т·м)	-2.57 +2.95	-2.41 +2.37	-2.81 +3.53	-1.65 +3.22	-1.56 +3.61
6	Максимальная поперечная сила в поясе Q_{max} (т)	-2.39 +3	-2.51 +2.97	-2.63 +2.59	-2.38 +2.66	-2.22 +2.87
7	Максимальное продольное усилие в затяжках N_{max2} (т)	7.55 for Ø14 5.35 for Ø12 2.59 for Ø8.5	9.24 for Ø15.5 1.99 for Ø8.5	11.2 for Ø17 1.45 for Ø7	26.0 for Ø27 2.34 for Ø7.8	28.0 for Ø27 2.49 for Ø9.2
8	Подобранное сечение пояса арки	180x9	180x6.5	200x8	200x8	200x8
9	Подобранное сечение тросов	Ø14, Ø12, Ø8.5	Ø15.5, Ø8.5	Ø17, Ø7	Ø27, Ø7.8	Ø27, Ø9.2
10	Вес пояса арки (т)	1.36	0.91	1.13	1.05	1.02
11	Вес тросов арки (т)	0.06	0.05	0.045	0.087	0.091
12	Вес всей конструкции, т	1.42	1.01	1.175	1.137	1.111
13	Приведённая масса (Общая масса/пролёт, т/м)	0.068	0.048	0.056	0.054	0.053
14	Запас по прочности %	57	50	52	53	48
15	Запас по устойчивости %	7	1	5	9	0.3

Таблица № 3

Результаты расчета арки с радиально (верно) расположенными вантами

№	Эскиз схемы №3					
1	Соотношение стрелы подъёма и пролёта f/L	1/2	1/3	1/4	1/6	1/8
2	Максимальное горизонтальное перемещение h_{ult} (мм)	22.1	20.6	19.9	17.1	12.3
3	Максимальное вертикальное перемещение f_{ult} (мм)	-25.4	-25	-24	-31.3	-32.1
4	Максимальная продольная сила в поясе арки N_{max1} (т)	-19.9	-21.4	-26.3	-35.5	-39.3
5	Максимальный изгибающий момент в поясе арки M_{max} (т·м)	-1.54 +2.31	-1.90 +1.81	-1.32 +1.70	-1.44 +2.13	-1.01 +2.47
6	Максимальная поперечная сила в поясе Q_{max} (т)	-2.46 +2.88	-2.35 +2.63	-2.03 +2.21	-1.89 +2.02	-1.76 +2.25
7	Максимальное продольное усилие в затяжках N_{max2} (т)	5.06 for Ø12 1.84 for Ø7	2.56 for Ø8.5	3.27 for Ø9.2	6.17 for Ø12.5 0.50 for Ø5	7.57 for Ø14 0.41 for Ø5
8	Подобранное сечение пояса арки	180x6.5	160x7.5	180x5.5	180x7	200x6.5
9	Подобранное сечение тросов	Ø12, Ø7	Ø8.5	Ø9.2	Ø12.5, Ø5	Ø14, Ø5
10	Вес пояса арки (т)	1.12	0.92	0.72	0.83	0.83
11	Вес тросов арки (т)	0.090	0.057	0.064	0.069	0.094
12	Вес всей конструкции, т	1.21	0.977	0.784	0.899	0.924
13	Приведённая масса (Общая масса/пролёт, т/м)	0.058	0.046	0.037	0.043	0.044
14	Запас по прочности %	51	52	49	48	45
15	Запас по устойчивости %	1	4	5	2	1

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

- наименьшие горизонтальные перемещения получены в схеме 3 с $f/L=1/8$; наименьшие вертикальные перемещения наблюдаются в схеме 3 с $f/L=1/4$,

- наименьшие продольные силы в верхнем поясе получены в схеме 2 с $f/L=1/2$, а минимальные моменты и поперечные силы получены в схеме 3 с $f/L=1/8$ и с $f/L=1/6$ соответственно;

- по металлоёмкости верхнего пояса и по приведенной металлоёмкости из рассматриваемых схем наиболее экономичны схема 2 с $f/L=1/3$ и схема 3 с $f/L=1/4$, а по расходу металла на канаты экономичнее схема 2 с $f/L=1/4$;

- в сравнении с простыми арками при использовании схемы №2 можно уменьшить металлоёмкость на 46% для арки с $f/L=1/2$; на 16% для арки с $f/L=1/3$; на 33% для арки с $f/L=1/4$; на 2% для арки с $f/L=1/6$. При соотношении $f/L=1/8$ с точки зрения металлоёмкости простая арка будет эффективнее чем арка по схеме №2 на 23%;

- в сравнении с простыми арками при использовании схемы №3 можно уменьшить металлоёмкость на 54% для арки с $f/L=1/2$; на 19% для арки с $f/L=1/3$; на 50% для арки с $f/L=1/4$; на 23% для арки с $f/L=1/6$. При соотношении $f/L=1/8$ с точки зрения металлоёмкости простая арка будет эффективнее чем арка по схеме №3 на 3%;

- в рассмотренных комбинированных арочных конструкциях в связи с заданными критериями расчета и подбора сечений во всех схемах сечения верхнего пояса по прочности имеют запас $\approx 50\%$, а по устойчивости не более 10%. Следовательно, возможен подбор более эффективных сечений и уменьшение расхода металла, если принять раскрепление арки не только в узлах крепления тросов к верхнему поясу, но и между ними.

Выводы

Результат сравнения двух типов комбинированных арочных систем и простых арок с различным соотношением стрелы подъём к пролёту показал,

что наиболее эффективными, рациональными с точки зрения металлоёмкости и работы конструкции являются арки с центрально сосредоточенными вантами с отношением стрелы подъёма к пролёту $f/L=1/3$ и арки с радиально (веерно) расположенными вантами с отношением стрелы подъёма к пролёту $f/L=1/4$, что подтверждается исследованиями, приведенными в [10,11,12].

При соотношении $f/L \geq 1/4$ более выгодными по расходу материала и работе конструкции из рассмотренных схем являются арочные комбинированные системы. При $f/L < 1/4$ целесообразнее применение простых арочных систем.

Литература

1. Еремеев П.Г. Современные стадионы. Опыт проектирования и возведения металлических конструкций покрытий. Расчёт и проектирование металлических конструкций // Сборник докладов научно-практической конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения профессора Е.И. Белени "Расчет и проектирование металлических конструкций". М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2013. С. 72-83.
2. Колюшев И.Е., Скорник О.Г., Тарбаев Н.А. Применение вантовых технологий в пролётных строениях различных статических систем // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2006. №5. С. 49-52.
3. Dolgusheva, V.V. and A.M. Ibragimov. Operation analysis of the main arch-cable-stayed systems when operating under unevenly distributed and asymmetrically working loads // Lecture Notes in Civil Engineering. Proceedings of the 5th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Springer, 2021. (issue 168), pp. 44-54.
4. Ибрагимов А.М., Гнедина Л.Ю., Долгушева В.В. Проблемы применения и проектирования арочных комбинированных систем // Вестник

Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2021. №2. С. 25-35.

5. Юнусов А.С. Арочные конструкции, востребованные временем, в строительной науке и архитектуре // Инженерный вестник Дона. 2016. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3586.

6. Киселёв В.А. Рациональные формы арок и подвесных систем. Москва: Гос. изд. лит. по стр. и арх., 1964. 356 с.

7. Стрелецкий Н.С., Стрелецкий Д.Н. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций. Москва: Стройиздат, 1964. 360 с.

8. Лебедева Н.В. Фермы, арки, тонкостенные пространственные конструкции. Москва : Издательство «Архитектура-С», 2006. 118 с.

9. Демидов, Н.Н. Расчет стальных рам с использованием программного комплекса ЛИРА-9 URL: search.rsl.ru/ru/record/01008558217.

10. Шухов В.Г. Избранные труды. Строительная механика. - М.: НАУКА, 1977. - 193 с.

11. Суворовцев Б.А. Особенности проектирования пролетных строений мостов комбинированных систем с гибкими подвесками // Современные технологии. Анализ. Моделирование. 2017. №1. С. 219-224.

12. Ибрагимов А.М., Кукушкин И.С. Сравнительный анализ вариантов конструктивных решений пологих арочных покрытий зданий // Вестник МГСУ. 2014. №3. С. 59-66.

13. Burford, N. K., Smith F. W., Gengnagel S. The Evolution of Arches as Lightweight Structures // A History of Empiricism and Science. Proceedings of the Third International Congress on Construction History, 2009. Cottbus. pp. 267-274.

References

1. Eremeev P.G. Sbornik dokladov nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchyonnoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora E.I. Beleni "Raschet i

proektirovanie metallicheskih konstrukcij". M.: Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet, EBS ASV, 2013. pp. 72-83.

2. Kolyushev I.E., Skornik O.G., Tarbaev N.A. Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike. 2006. №5. pp. 49-52.

3. Dolgusheva, V.V. and A.M. Ibragimov. Lecture Notes in Civil Engineering. Proceedings of the 5th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. Springer, 2021. (issue 168), pp. 44-54.

4. Ibragimov A.M., Gnedina L.YU., Dolgusheva V.V. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstrukcii. Tekhnologii. 2021. №2. p. 25-35.

5. YUnusov A.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3586.

6. Kiselyov V.A. Racional'nye formy arok i podvesnyh sistem [Rational forms of arches and suspension systems]. Moskva: Gos. izd. lit. po str. i arh., 1964. 356 p.

7. Streleckij N.S., Streleckij D.N. Proektirovanie i izgotovlenie ekonomichnyh metallicheskih konstrukcij [Design and manufacture of economical metal structures]. Moskva: Strojizdat, 1964. 360 p.

8. Lebedeva N.V. Fermy, arki, tonkostennye prostranstvennye konstrukcii [Trusses, arches, thin-walled spatial structures]. Moskva: Izdatel'stvo «Arhitektura-S», 2006. 118 p.

9. Demidov, N.N. Raschet stal'nyh ram s ispol'zovaniem programmnoogo kompleksa LIRA-9 [Calculation of steel frames using software LIRA-9]. URL: search.rsl.ru/ru/record/01008558217.

10. Shuhov V.G. Izbrannye trudy. Stroitel'naya mekhanika [Selected works. Construction mechanics]. M.: NAUKA, 1977. 193 p.

11. Suvorovcev B.A. Sovremennye tekhnologii. Analiz. Modelirovanie. 2017. №1. pp. 219-224.



12. Ibragimov A.M., Kukushkin I.S. Vestnik MGSU. 2014. №3. pp. 59-66.
13. Burford, N. K., Smith F. W., Gengnagel S. A History of Empiricism and Science. Proceedings of the Third International Congress on Construction History, 2009. Cottbus. pp. 267-274.