УДК 692.4

А.М. Ибрагимов, И.С. Кукушкин

ФГБОУ ВПО «ИвГПУ»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПОЛОГИХ АРОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ЗДАНИЙ

Рассмотрен ряд конструктивных решений пологих арочных покрытий большепролетных зданий. Представлен сравнительный анализ рассматриваемых конструктивных решений по расходу материала и распределению усилий от равномерно распределенной нагрузки. Рассмотрена работа лучевой хордовой арки, состоящей из разрезного верхнего пояса и лучевых затяжек, под единичной нагрузкой (равномерно распределенной и сосредоточенной в узлах) с различными пролетами и стрелами подъема. Решена задача оптимизации лучевой хордовой арки в зависимости от возникающих усилий и стрелы подъема.

Ключевые слова: арочные покрытия, лучевая хордовая арка, сравнение вариантов, оптимизация, конструктивные решения, стрела подъема, равномерно распределенная нагрузка.

Арочные конструкции покрытий большепролетных зданий являются более выгодными по затрате материала, чем балочные и рамные системы. Наиболее часто проектируют арки следующих статических схем: с затяжкой, воспринимающей усилие горизонтального распора, двух- либо трехшарнирные. Таким образом, конструктивные схемы стропильных конструкций арочных покрытий весьма разнообразны (рис. 1), следовательно, и работа их под нагрузкой значительно отличается. Предложено сравнить работу ряда конструктивных схем арочных систем: 1) с лучевыми затяжками [1]; 2) с впарушенным нижним поясом, объединенным с верхним подвесками [1]; 3) с провисающим нижним поясом, объединенным с верхним поясом распорками [1]; 4) аналогично схеме 3, но нижний пояс объединен с верхним двумя V-образными стойками [1]; 5) лучевой хордовой арки с разрезным верхним поясом и лучевыми хордовыми затяжками [2, 3].

Рис. 1. Виды схем (начало)

Рис. 1. Виды схем (окончание)

Сравнение производится для всех схем со следующими исходными данными: пролет $L = 70$ м; стрела подъема $f_1 = 7$ м (1/10 от пролета), погонная равномерно-распределенная нагрузка $p = 45$ кН/м, в качестве сечений пояса арки использовался прокатный профиль по СТО АСЧМ (табл. 1). Для предварительной оценки конструктивной схемы численные расчеты выполнялись в линейной постановке на равномерно-распределенную нагрузку [4].

Табл. 1. Сравнение вариантов конструктивных решений по расходу материала по результатам линейного расчета на равномерную нагрузку

№ варианта	L , м	f_1 , м	f_2 , м	p , кН/м	Верхний пояс	Нижний пояс	Распорки	Подвески	Затяжки
1	70	7	—	45	—	—	—	—	Круг 120
2	70	7	1,166	45	I40K2	II28×275	—	Круг 60	—
3	70	4,67	2,33	45	I35K2	II24×275	Тр140×5	—	—
4	70	4,67	2,33	45	I70Ш2	II24×275	Тр219×11	—	—
5	70	7	—	45	I40K5	—	—	—	Круг 120

Результаты расчета (максимальные усилия в элементах) по схемам 1—5 сведены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты расчета с сечением из прокатных профилей

Номер схемы	Верхний пояс		Нижний пояс	Максимальный прогиб, см
	N , кН	M , кН·м	N , кН	
1	-6160	6185	—	18
2	-4640	300	+4630	13,6
3	-3930	162	+3950	4,2
4	-3850	695	+3820	4,8
5	-5409,81	0	—	14,2

Поэлементные результаты усилий и коэффициенты использования элементов для схемы 5 сведены в табл. 3 с учетом нумерации элементов (рис. 2).

Табл. 3. Результаты расчета усилий и коэффициентов использования

Номер элемента	Продольное усилие N , кН	Коэффициент использования k (максимум)
1 (10) — пояс арки	-4857,97	0,91
2 (9) — пояс арки	-4973,64	0,89
3 (8) — пояс арки	-5202,17	0,92
4 (7) — пояс арки	-5337,77	0,95
5 (6) — пояс арки	-5409,81	0,96
11 (19) — опорный раскос	-30,77	0,92
12 (20) — затяжка	109,29	0,9
13 (21) — затяжка	198,16	0,97
14 (22) — затяжка	265,11	0,96
15 (23) — затяжка	302,67	0,96
16 (24) — затяжка	308,61	0,96
17 (25) — затяжка	290,9	0,78
18 (26) — затяжка	234,4	0,91
27 — затяжка (нижний пояс)	2887,0	0,96

Рис. 2. Нумерация элементов лучевой хордовой арки

Из вышеизложенного следует, что расход стали для схемы 5 значительно ниже, чем у схем 1 и 4. Верхний пояс лучевой хордовой арки разрезной, таким

образом его элементы однотипные, и мелкогабаритные, что значительно сокращает расходы на транспортировку. За счет возможности регулирования натяжения затяжек возможно изменение геометрии. Кроме того, схема 5 обладает свойством живучести [2], что выгодно ее отличает от схем 2 и 3.

Для широкого применения подобного рода схем необходимо решить вопрос оптимизации по пролету и стреле подъема. Для решения поставленной задачи был рассмотрен ряд схем с пролетами l от 18 до 36 м с шагом 1 м. Для каждой схемы был проведен анализ усилий в элементах от равномерно распределенной нагрузки $q = 1$ кН/м и сосредоточенной нагрузки в узлах $F = 1$ кН с учетом изменения стрелы подъема f , м, от $l/10$ до $l/3$ с шагом 0,5 м. Всего исследовано 216 конструктивных схем. В качестве иллюстраций представим полученные результаты для схем с пролетами $l = 18$ м и $l = 24$ м в виде графиков (рис. 3—6). Нумерация элементов на графиках соответствует рис. 2.

Рис. 3. Графики зависимости усилий в элементах 1—10, 11, 19 при стреле подъема f от 2 до 7 м, пролете $l = 18$ м

Рис. 4. Графики зависимости усилий в элементах 12—17, 20—25 при стреле подъема f от 2 до 7 м, пролете $l = 18 \text{ м}$

Рис. 5. Графики зависимости усилий в элементах 1—10, 11, 19 при стреле подъема f от 2 до 8 м, пролете $l = 24 \text{ м}$ (начало)

Рис. 5. Графики зависимости усилий в элементах 1—10, 11, 19 при стреле подъема f от 2 до 8 м, пролете $l = 24$ м (окончание)

Рис. 6. Графики зависимости усилий в элементах 12—17, 20—25 при стреле подъема f от 2 до 7 м, пролете $l = 24$ м (начало)

Рис. 6. Графики зависимости усилий в элементах 12—17, 20—25 при стреле подъема f от 2 до 7 м, пролете $l = 24$ м (окончание)

Исходя из выше представленных графиков можно сделать вывод, что для всех пролетов l от 18 до 36 м наиболее оптимальной является стрела подъема $f = (1/4 \dots 1/3)l$. В дальнейших работах будет выполнен анализ для пролетов свыше 36 м, а также решена задача на оптимизацию при ассиметричных загрузках.

Библиографический список

1. Еремеев П.Г. Справочник по проектированию современных металлических конструкций большепролетных покрытий. М. : Изд-во АСВ, 2011. 256 с.
2. Ибрагимов А.М., Кукушкин И.С. Анализ «живучести» лучевой арки // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 8. С. 63—65.
3. Ибрагимов А.М., Кукушкин И.С. Стропильная конструкция — лучевая хордовая арка // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 49—51.
4. Еремеев П.Г. Особенности проектирования уникальных большепролетных зданий и сооружений // Современное промышленное и гражданское строительство. 2006. № 1. Т. 2. С. 5—15.

Поступила в редакцию в январе 2014 г.

Об авторах: **Ибрагимов Александр Майорович** — доктор технических наук, профессор, советник РААСН, заведующий кафедрой архитектуры и графики, **Ивановский государственный политехнический университет (ФГБОУ ВПО «ИвГПУ»)**, 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20, igasu_alex@mail.ru;

Кукушкин Игорь Сергеевич — аспирант, ассистент кафедры строительных конструкций, **Ивановский государственный политехнический университет (ФГБОУ ВПО «ИвГПУ»)**, 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20, mr_scorpio89@mail.ru.

Для цитирования: *Ибрагимов А.М., Кукушкин И.С. Сравнительный анализ вариантов конструктивных решений пологих арочных покрытий зданий // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 59—66.*

A.M. Ibragimov, I.S. Kukushkin

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CONSTRUCTION SOLUTION VARIANTS FOR FLAT ARCH COVERINGS OF BUILDINGS

Arch structures of long span buildings' coverings are more beneficial in respect to material expenses, than beam and frame systems. Constructive schemes of roof frameworks of arch coverings are diverse, which means their operation under loading differs much.

The authors offer a number of construction solutions for flat arch coverings of long span buildings. The comparative analysis of these construction solutions is presented. The operation of radial link arch is observed. The arch consists of discontinuous top chord and radial bowstring under the single load (uniformly distributed and concentrated in nodes) with different spans and rises. The problem of radial link arch optimization is solved in dependence with arising forces and rise. The optimal camber of arch was found.

In further works the authors plan to analyze spans more than 36 meters and solve the problem in case of asymmetrical loadings.

Key words: arch coverings, radial link arch, results comparison, optimization, constructive decisions, camber of arch, uniformly distributed load.

References

1. Ereemeev P.G. Spravochnik po proektirovaniyu sovremennykh metallicheskiy konstruktsiy bol'sheproletnykh pokrytiy [Reference book on Design of Contemporary Metal Structures of Long Span Coverings]. Moscow, ASV Publ., 2011, 256 p.
2. Ibragimov A.M., Kukushkin I.S. Analiz «zhivuchesti» luchevoy arki [Analysis of Radial Arch Durability]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2013, no. 8, pp. 63—65.
3. Ibragimov A.M., Kukushkin I.S. Stropil'naya konstruktsiya — lucheovaya khordovaya arka [Building Structure — Radial Link Arch]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2013, no. 9, pp. 49—51.
4. Ereemeev P.G. Osobennosti proektirovaniya unikal'nykh bol'sheproletnykh zdaniy i sooruzheniy [Design Features of Unique Long Span Buildings and Structures]. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Contemporary Industrial and Civil Engineering]. 2006, no. 1, vol. 2, pp. 5—15.

About the authors: **Ibragimov Aleksandr Mayorovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, advisor, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, head, Department of Architecture and Graphics, **Ivanovo State Polytechnical University (IvGPU)**, 20, 8 Marta st., Ivanovo, Russian Federation; igasu_alex@mail.ru;

Kukushkin Igor' Sergeevich — postgraduate student, assistant, Department of Building Structures **Ivanovo State Polytechnical University (IvGPU)**, 20, 8 Marta st., Ivanovo, Russian Federation; mr_scorpio89@mail.ru.

For citation: Ibragimov A.M., Kukushkin I.S. Sravnitel'nyy analiz variantov konstruktivnykh resheniy plogikh arochnykh pokrytiy zdaniy [Comparative Analysis of the Construction Solution Variants for Flat Arch Coverings of Buildings]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 3, pp. 59—66.