

УДК 624.014.2

Кузнецов И.Л. – доктор технических наук, профессор

E-mail: kuznetsov@kgasu.ru

Исаев А.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: isaev@kgasu.ru

Пальмов Д.А. – ассистент

E-mail: palmow@kgasu.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### Усиление бескаркасного арочного сооружения системой хордовых затяжек

#### Аннотация

В статье рассматривается конструктивное решение по усилению тонкостенных арочных элементов бескаркасного арочного сооружения путем установки системы хордовых затяжек. Предложенный способ усиления бескаркасного арочного сооружения системой хордовых затяжек показал достаточную эффективность по расходу стали в реализации усиления. Приведена методика расчета усиленной арочной конструкции по разработанной программе «ARHOR». Приведены примеры расчетов вариантов усиления и технико-экономические показатели по их эффективности.

**Ключевые слова:** конструкции, затяжки, надежность, критерии оптимальности, технико-экономические показатели.

Строительство бескаркасных арочных сооружений, изготавливаемых на месте строительства из рулонированной оцинкованной стали на мобильных агрегатах, привело в ряде случаев к их разрушениям [1, 2]. Это вызвано, с одной стороны, техническими возможностями применяемой технологии изготовления, позволяющими реализовывать любой пролет арочных сооружений, в том числе и необоснованно большой, а с другой стороны, в отечественной практике отсутствует нормативно-техническая документация по их расчету [2]. Сложившаяся ситуация со строительством рассматриваемых арочных сооружений требует разработки конструктивных решений по обеспечению и повышению несущей способности, в том числе и усилению зданий, находящихся в эксплуатации. Усиление бескаркасного арочного сооружения может быть выполнено различными способами, а именно: установкой усиливающих арок, установкой системы хордовых затяжек [2, 3]. В статье подробно рассматривается вариант усиления бескаркасного арочного сооружения системой хордовых затяжек. Конструктивное решение усиления включает тонкостенный арочный элемент кругового очертания, по дуге которого с определенным шагом располагаются узлы крепления хордовых затяжек. При этом хордовые затяжки включают два яруса со смещением узлов крепления на один их шаг [3]. Расчетная схема усиленной конструкции арочного сооружения приведена на рис. 1. Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) усиленной арочной конструкции дугу арки разбиваем на  $n$  элементов радиусом  $R$  и центральным углом  $\theta$ . Круговые элементы имеют свои геометрические и механические характеристики и загружены распределенными нагрузками  $P$  и  $P_1$ . Узловыми элементами являются опорные узлы арки, точки крепления затяжек и точки, где терпят разрывы механические характеристики и компоненты приложенных нагрузок. Хордовые затяжки – это гибкие элементы, способные воспринимать только растягивающие усилия; при этом хордовым затяжкам может быть задано усилие предварительного натяжения.

Для кругового элемента, материал которого работает в линейно-упругой области, а для поперечного сечения справедлива гипотеза Кирхгофа-Лява, в работе [4] получены основные соотношения и уравнения равновесия. С учетом полученных соотношений и уравнений равновесия для каждого кругового элемента дифференциальные уравнения можно представить как систему из шести обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

$$\frac{-Y}{-\theta} = L(Y, \theta) + b(\theta). \quad (1)$$

Фундаментальное решение этой системы дифференциальных уравнений в пределах каждого арочного элемента можно представить в виде:

$$\bar{Y}(T, Q, M, u, w, \varphi) = \sum_k A_k \bar{y}_k(\theta) + \bar{y}_0(\theta), \tag{2}$$

где  $\bar{Y}$  – вектор состояния арочного элемента [2], компонентами которого являются обобщенные силовые факторы, изгибающие моменты, обобщенные перемещения и углы поворота;  $\bar{y}_0(\theta)$  – частное решение системы дифференциальных уравнений равновесия арочного элемента, зависящее от вида действующей на этот момент нагрузки;  $A_k$  – неизвестные постоянные интегрирования.

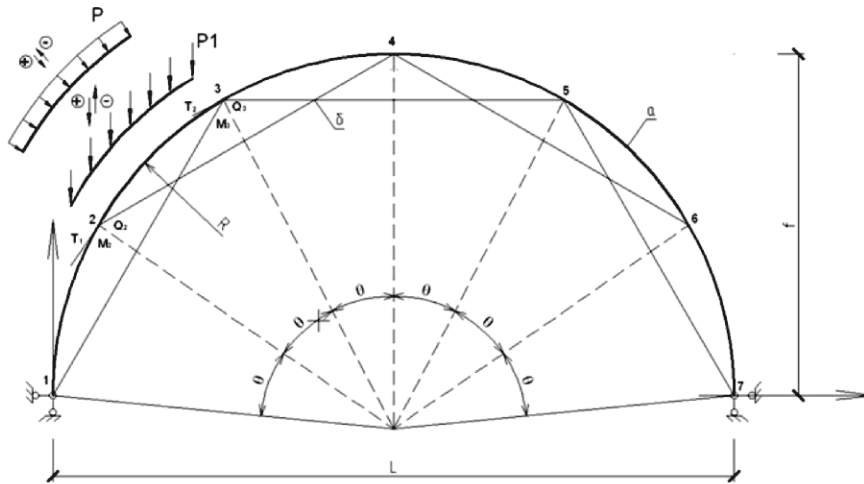


Рис. 1. Пример расчетной схемы двухшарнирной арки с пятью хордовыми затяжками:  
 а – тонкостенный арочный элемент, б – хордовые затяжки, 1-7 – узлы крепления хордовых затяжек,  
 L – пролет арки, f – стрела подъема, R – радиус кривизны арки

Для исследования НДС рассматриваемой арочной конструкции в целом необходимо найти  $6n$  неизвестных постоянных интегрирования и  $m$  усилий в затяжках ( $n$  – число арочных элементов конструкции,  $m$  – число хордовых затяжек).

Удовлетворяя  $6(n-1)$  условиям сопряжения  $n$  – арочных элементов, условиям нерастяжимости  $m$  затяжек, а также условиям закрепления в начале и в конце арочной конструкции, приходим к системе  $(6n+m)$  алгебраических уравнений для определения неизвестных постоянных интегрирования и усилий в затяжках:

$$[L]A=B. \tag{3}$$

Здесь  $A$  – вектор неизвестных  $A_k^{(i)}$  и  $N_j$  – неизвестных усилий в затяжках ( $k = \overline{1,6}; i = \overline{1,n}; j = \overline{1,m}$ );  $[L]$  – квадратная матрица;  $B$  – вектор свободных членов.

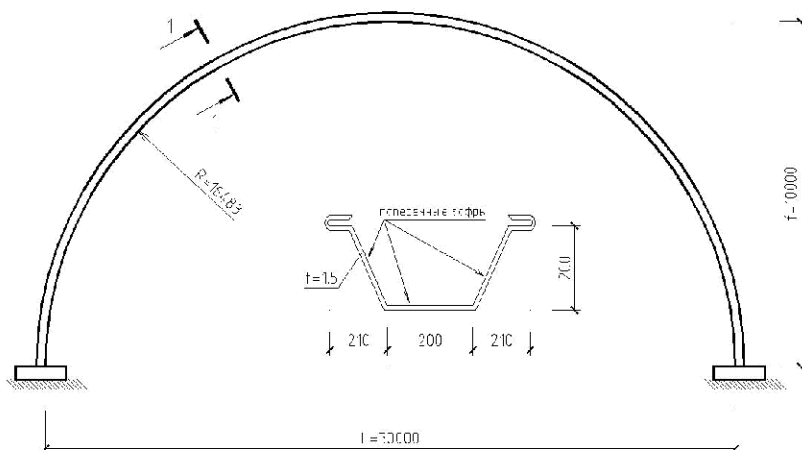
Таким образом, решая систему уравнений (3), находим неизвестные  $A_k^{(i)}$  и усилия  $N_j$  в затяжках, следовательно, полные усилия в них будут определяться по формулам:

$$\bar{N}_j = N_j + \bar{N}_j, \tag{4}$$

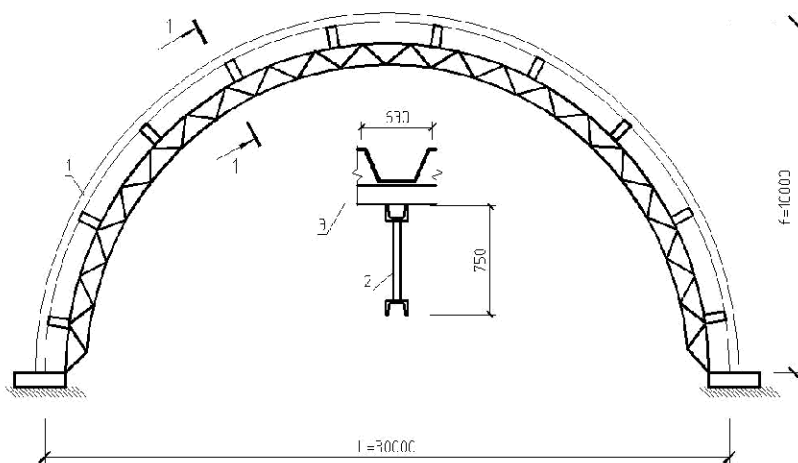
где  $\bar{N}_j$  – предварительное натяжение в затяжках.

На основе формул (1)-(4) можно исследовать НДС арочной конструкции только численным методом.

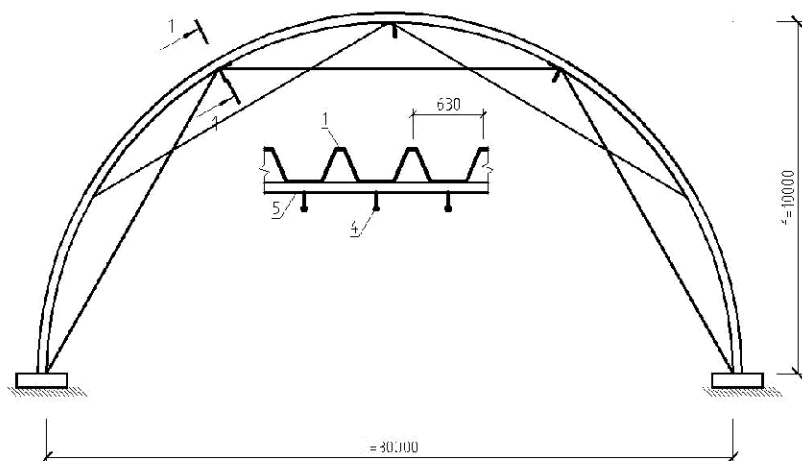
Система линейных алгебраических уравнений (3) решается методом Гаусса. В результате выполнения этой процедуры в определенном массиве размещается результат решения системы (3) и усилия в затяжках. Далее проводится проверка работы затяжек на растяжение, поскольку хордовые затяжки считаются гибкими. Если же определенная часть затяжек сжата, то эти затяжки не учитываются, соответственно, порядок системы (3) понижается и счет проводится сначала. Процесс повторяется до тех пор, пока не будут исключены все сжатые затяжки. Далее определяются все компоненты вектора состояния арочного элемента по формуле (1). Реализация указанного алгоритма нашла отражение в программе «ARHOR» [5].



а) арочное сооружение без усиления



б) усиление решетчатыми арками



в) усиление хордовыми затяжками

Рис. 2. Поперечный разрез арочного сооружения (а) и варианты его усиления (б) и (в):  
 1 – тонкостенный арочный элемент; 2 – арка; 3 – прогон; 4 – хордовые затяжки;  
 5 – продольный крепежный элемент

Численные исследования по данной программе выполнялись на реально существующей конструкции арочного сооружения пролетом 30 м, находящегося в Верхнеуслонском районе РТ (рис. 2а).

Рассмотрено два варианта усиления (рис. 2б, в). Первый вариант усиления предусматривал установку арок пролетом 30 м. Решетчатые арки устанавливались изнутри здания с шагом 4 м и при помощи прогонов обеспечивали подкрепление тонкостенного арочного элемента. Расход стали в данном варианте, включая арки, прогоны, связи, затяжки, составил 28,4 кг/м<sup>2</sup>. Как видим, данный вариант усиления приводит к значительному расходу стали и, кроме того, требует устройства дополнительных фундаментов под усиливающие арки. Поэтому рассмотрим второй вариант усиления (рис. 2в), используя рассмотренную выше систему хордовых затяжек. Применяя разработанную программу «ARHOR», выполнялись статические расчеты усиления при различном количестве хордовых затяжек. В таблице для сравнения приведены усилия в арке без усиления и с учетом усиления при 7 и 15 хордовых затяжках. Усилие в арке приведено для трех сечений: в середине левой полуарки, в коньке и в середине правой полуарки.

Таблица

Усилия в арке и затяжках без усиления и при усилении

Вид арки	Сечение арки	Усилия в арке			Максимальное усилие в хордовых затяжках
		N (кг)	M (кг*м)	Q (кг)	
Арка без хордовых затяжек	1	-1012	2800	3	-
	2	-977	1078	36	
	3	-1456	-1017	27	
Арка с 15-ю хордовыми затяжками	1	-8940	1720	308	4198
	2	-3650	770	-41	
	3	-6940	1470	35	
Арка с 7-ю хордовыми затяжками	1	-7480	500	45	2967
	2	-2410	477	-65	
	3	-4977	-371	21	

По результатам расчета следует, что увеличение количества хордовых затяжек приводит к уменьшению изгибающих моментов в арке, но увеличивает в ней значение продольного усилия и максимального усилия в затяжке. В рассмотренном случае наиболее рациональное число хордовых затяжек равно семи.

Расход стали на усиление семью хордовыми однотипными затяжками составляет 4,1 кг/м<sup>2</sup>. Сравнивая рассмотренный вариант усиления хордовыми затяжками (рис. 2в) с вариантом усиления арками (рис. 2б), видим, что расход стали снижается в 6 раз.

#### Выводы:

1. Предложенный способ усиления бескаркасного арочного сооружения системой хордовых затяжек и методика расчета показали достаточную эффективность как по расходу стали в реализации усиления, так и по удобству определения напряженно-деформированного состояния при его проектировании.

2. Для практической реализации предлагаемого способа повышения несущей способности арочного сооружения необходимо исследовать вопросы определения оптимального числа хордовых затяжек, в том числе с предварительным их напряжением и в разработке рациональных узловых соединений.

#### Список литературы

1. Кузнецов И.Л., Исаев А.В., Гимранов Л.Р. Причины обрушения бескаркасного сооружения пролетом 30 м // Известия КГАСУ, 2011, № 4 (18). – С. 166-170.

2. Айрумян Л., Липлечко М.А. Особенности работы бескаркасных арочных покрытий из стальных холодногнутых профилей // Промышленное и гражданское строительство, 2011, № 6. – С. 40-44.
3. Кузнецов И.Л. Арка А.С. № 1244256. М.кл. E04B1/32 от 19.11.84. «Бюллетень» № 26 от 15.07.86.
4. Кузнецов И.Л., Камалов А.З. Аналитико-численный метод определения напряженно-деформированного состояния и критической нагрузки арок // Известия вузов. Строительство, 1991, № 12. – С.15-19.
5. Пальмов Д.А., Кузнецов И.Л., Камалов А.З. Аналитико-численный метод определения напряженно-деформированного состояния арок с хордовыми затяжками // Вестник ТГАСУ, № 4-207. – С. 97-102.

**Kuznetsov I.L.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: kuznetsov@kgasu.ru

**Isaev A.V.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: isaev@kgasu.ru

**Palmov D.A.** – assistant

E-mail: palmow@kgasu.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Enhancement of frameless arch building by the system of chordates puffs**

#### **Resume**

Construction of arched structures of thin-walled elements, produced by mobile units of rolled galvanized steel on the construction site is promising, reducing the cost of construction. In the manufacture of arched elements to make them curvature transverse corrugations are formed on their surface that significantly reduces their carrying capacity. In this regard, in order to prevent accidents must be reduced to 12 spans of 15 m. If necessary, the construction of buildings has to resort to their strengthening. In this paper we propose a new method for enhancing the arched structures by setting chord puffs. The design of a complex system gain, for calculating the use of special techniques. The authors present the method of amplification, a description of the analytical and numerical methods for calculating the gain realized in the program «ARHOR» and a concrete example of using this method for enhancing the arch structures span 30 m. According to the calculation results, it follows that increasing the number of puffs chord reduces the bending moments in the arch, but it increases the value of the longitudinal force and the maximum force in tightening. In the above case, the most rational chord delays is seven.

**Keywords:** design, torque, reliability, optimization criteria, technical and economic indicators.

#### **References**

1. Kuznetsov I.L., Isaev A.V., Gimranov L.R.. The causes of collapse of 30 m span frameless arch structure // News of the KSUAE, 2011, № 4 (18). – P. 166-170.
2. Airumian L., Liplechko M.A. Features of frameless arched surfaces of steel cold-formed profiles // Industrial and Civil Construction, 2011, № 6. – P. 40-44.
3. Kuznetsov I.L. Arch. Author's certificate № 1244256. E04B1/32 от 19.11.84. «Bulletin» № 26, 15.07.86.
4. Kuznetsov I.L., Kamalov A.Z. Analytical-numerical method for determining the stress-strain state and the critical load of arches // Proceedings of the universities. Construction, 1991, № 12. – P.15-19.
5. Palmov D.A., Kuznetsov I.L., Kamalov A.Z. Analytical-numerical method for determining the stress-strain state of arches with chord bongs // Herald TGASU, № 4-207. – P. 97-102.