

УДК 624.016.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ  
МЕТАЛЛОДЕРЕВЯННОЙ АРОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ С  
ВАРИАНТНЫМ ИССЛЕДОВАНИЕМ ЕЕ ОПТИМАЛЬНОСТИ.  
СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
РЕЗУЛЬТАТОВ.**

***В.В. Стоянов** д.т.н., проф., Одесская государственная академия  
строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, г. Одеса, Украина,  
65000*

***А.А. Бояджи** асп., Одесская государственная академия  
строительства и архитектуры, ул. Дидрихсона, 4, г. Одеса, Украина,  
65000*

Проведенные испытания арочной комбинированной металлодеревянной конструкции подтвердили высокую степень достоверности численных расчетов, реализованных в современных программных комплексах, учитывающих физическую и геометрическую нелинейность.

The tests of the arched construction metal and wood combined confirmed the high degree of reliability of the numerical calculations implemented in modern software systems, using the physical and geometric nonlinearity.

Ключевые слова: металлодеревянные арочные конструкции, прочность, деформативность,

В связи с возрастанием загруженности автомобильных дорог в больших городах все острее становится проблема увеличения их пропускной способности. Решить ее можно в том числе и при помощи устройства надземных пешеходных переходов.

Кафедра Металлических, деревянных и пластмассовых конструкций ОГАСА занимается исследованиями надземных пешеходных переходов пролетом 12-24 м. В одном из проектных вариантов предполагается использовать арочную конструкцию (рис.

1), у которой арка и балка (затяжка) могут быть выполнены как из дерева, так и из металла.

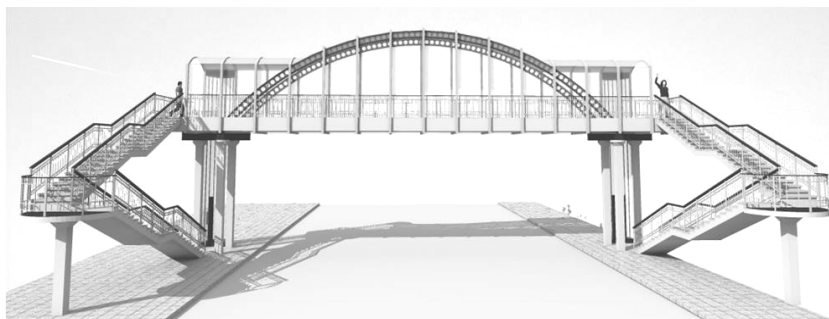


Рис. 1. Арочный надземный пешеходный переход

Для исследования был выбран вариант, в котором в качестве несущих элементов полотна предполагается использовать деревянные составные балки, работающие совместно с металлическими арками, т.е. комбинированную конструкцию, представляющую собой металлодеревянную ферму. Нагрузка с полотна передаётся на арки при помощи подвесок.

При проектировании опытной модели в качестве исходных параметров были приняты пролет конструкции (3м), поперечное сечение клееной деревянной балки (прямоугольник размерами 105x70 мм) и число подвесок равно 3. Значение расчетной нагрузки  $q=13,5$  кН/м в первом приближении считалось заданным техническим заданием. Остальные параметры конструкции – высота и сечение арки, расположение и сечение подвесок, а также окончательная несущая способность конструкции были определены численным линейным расчетом в программном комплексе ЛИРА 9.6 (расчетная схема рис.2) исходя из выбранного нами критерия оптимальности (оптимальным считается тот вариант, для которого при расчетной нагрузке и минимальных прочных размерах в элементах конструкции (арке, балке и подвесках) возникают напряжения, близкие к допускаемым ( $\sigma_{арк}^{дон} = 24кН / см^2$ ,  $\sigma_{подв}^{дон} = 24кН / см^2$ ,  $\sigma_{балк}^{дон} = 1кН / см^2$ )).

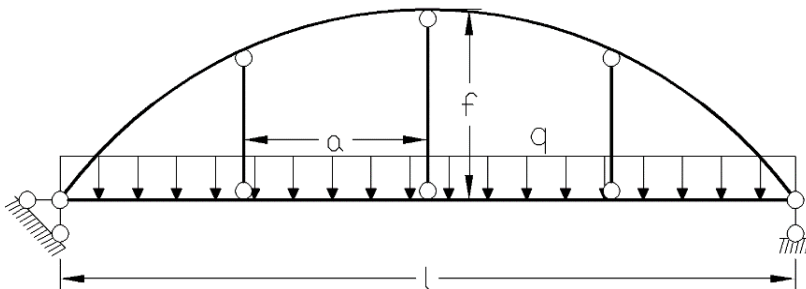


Рис.2. Расчетная схема

При расчете в ПК ЛИРА 9.6 варьировались геометрические и прочностные параметры конструкции, причем расстояние между средней и боковыми подвесками  $a$  варьировалось в пределах от  $0.125 l$  до  $0.375 l$  с шагом  $0,05$  м, высота арки  $f$  варьировалась в пределах от  $0.23 l$  до  $0.33 l$  с шагом  $0,01$  м. Для каждой из комбинаций варьируемых параметров определялись наибольшие напряжения в каждом из элементов конструкции (арке, балке, подвесках) и коэффициенты загруженности

$$\left( k_{арки} = \frac{\sigma_{арки}}{R_y^{арки}}, k_{подв} = \frac{\sigma_{подв}}{R_y^{подв}}, k_{балк} = \frac{\sigma_{балк}}{R_y^{балк}} \right).$$

Для каждого поперечного сечения арки и подвесок отбирался тот вариант, в котором коэффициенты  $k_{арки}$ ,  $k_{подв}$  и  $k_{балк}$  отличались друг от друга не более, чем на 5%. Если значения этих коэффициентов отличались от 1, то расчетную нагрузку  $q$ , принятую по техническому заданию, изменяли в  $\frac{1}{k}$  раз. Таким образом, для каждого поперечного

сечения арки и подвесок выделялся вариант конструкции со своими значениями  $a$  и  $f$ , несущая способность которого оказывалась наибольшей (если для какой-то комбинации поперечного сечения арки и подвесок варианта с одинаковыми значениями  $k_{арки}$ ,  $k_{подв}$  и  $k_{балк}$  не оказывалось, то это расценивалось как отсутствие при этих параметрах оптимального варианта конструкции в смысле, приведенном выше).

В результате проведенных расчетов для экспериментального исследования была принята конструкция со следующими геометрическими и прочностными характеристиками:

- пролет конструкции – 3 м;
- высота арки – 0,63 м;
- количество подвесок – 3;
- расстояние от средней подвески до боковых – 0,78 м;
- сечение деревянной балки (затяжки) – 105х70 мм;
- сечение арки – труба 48х3,5 мм;
- сечение подвесок – стержень Ø8 мм;

Характер приложенной нагрузки (равнораспределённая по затяжке) обусловлен работой конструкции в качестве несущего элемента пешеходного перехода. Рассматривались варианты нагрузки конструкции по всему пролету, по половине и по четверти его. Расчет показал, что наиболее опасна нагрузка, приложенная по всему пролету.

Также было установлено, что соединение арки с балкой, арки с подвесками и балки с подвесками должно быть шарнирным, что было учтено при проектировании конструкции (рис.3, рис.4, рис.5).

При испытаниях напряжения определялись с помощью датчиков сопротивления (тензодатчиков), прогиб балки – с помощью индикаторов. Размещение тензодатчиков и индикатора на конструкции показано на рис.6.

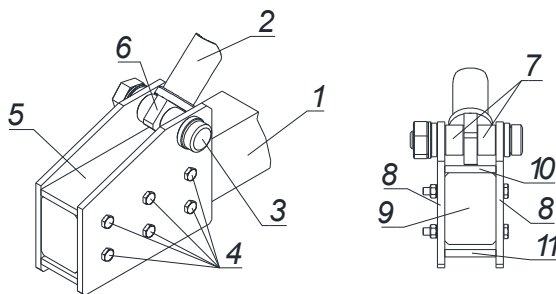


Рис.3. Узел примыкания арки к балке. 1- балка (затяжка); 2- арка; 3- палец; 4- болты; 5- башмак; 6- серьга; 7- втулки; 8- боковые щеки; 9- торец башмака; 10- верхняя планка; 11- нижняя планка.

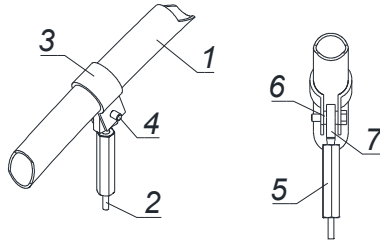


Рис. 4. Узел примыкания подвески к арке. 1-арка; 2- подвеска; 3- хомут; 4- палец; 5- талреп; 6- втулка; 7- проушина.

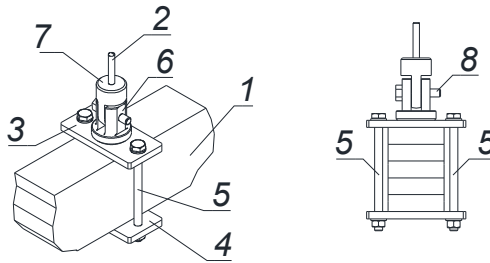


Рис. 5. Узел примыкания подвески к балке. 1- балка; 2- подвеска; 3- верхняя планка; 4- нижняя планка; 5- болты; 6- серьга; 7- проушина; 8- вал.

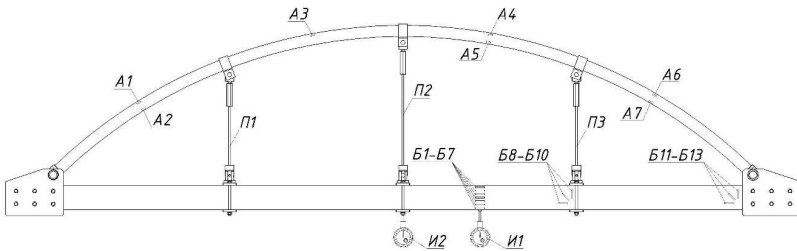


Рис. 6. Схема размещения датчиков и измерительных приборов на конструкции: А1–А7 тензодатчики для измерения нормальных напряжений в арке; П1–П3 – тензодатчики для измерения норм. напр. в подвесках; Б1–Б7 – тензодатчики для измерения норм. напр. в балке; Б8–Б13 – тензодатчики для измерения касательных напр. в балке; И1, И2 – индикаторы часового типа для измерения прогибов.

Для испытаний на прочность и деформативность опытной комбинированной металлодеревянной арочной конструкции пролетом

3 м был спроектирован (рис. 7) и изготовлен специальный стенд (рис. 8), обеспечивающий моделирование равномерно распределённого нагружения.

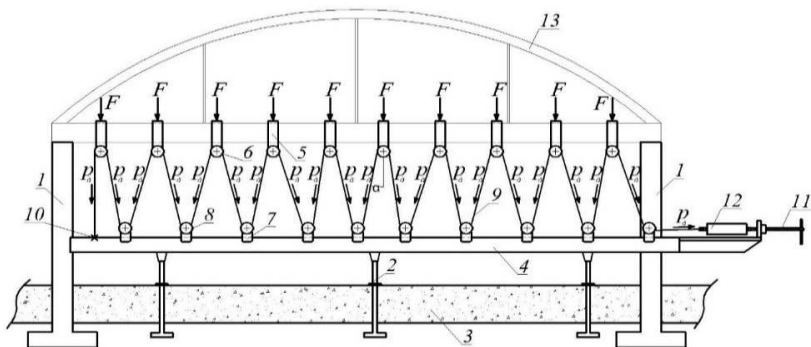


Рис. 7. Схема работы стенда для испытания арочной конструкции. 1 – опоры; 2 – анкерные болты; 3 – силовой пол; 4 – вспомогательная балка; 5, 7 – хомуты; 6, 8 – шкивы; 9 – трос; 10 – крепежное кольцо; 11 – винтовое устройство; 12 – динамометр; 13 – арочная конструкция. деревянной балки, которая воспринимает эксплуатационную нагрузку и является одновременно затяжкой в арочной конструкции.

Конструктивно это осуществлено следующим образом (рис. 3): под арочной конструкцией, которая опирается на две штатные опоры (1) (одна из которых представляет собой подвижный шарнир) при помощи трех мощных анкерных болтов (2) на высоте около 300 мм от силового пола (3) закреплена жесткая балка (4), сваренная из двух швеллеров. К деревянной балке на равном расстоянии (около 300 мм) при помощи специальных хомутов (5) закреплены 10 шкивов (6) (шкивы посажены на подшипники качения). Точно такие же хомуты (7) с шкивами (8) приварены к вспомогательной металлической балке (4) по схеме, приведенной на рис.7.

Через блоки переброшен трос (9) диаметром 5 мм, один конец которого закреплен к вспомогательной балке (4) при помощи скобы и приваренного крепежного кольца (рыма) (10). Другой конец троса связан с винтовым устройством (11), позволяющим натягивать этот трос. Усилие натяжения  $p_d$  показывает динамометр (12), к которому с одной стороны прикреплён трос, а с другой – винтовое устройство.

Величина равномерно распределенной нагрузки  $q$  связана с усилием  $p_0$  следующей формулой:

$$q = \frac{20 \cdot p_0 \cdot \cos \alpha}{l_{\text{балки}}} \quad (1),$$

где

$\alpha$  – угол отклонения ветви троса от вертикали,

$l_{\text{балки}}$  – расчетная длина балки.

Чтобы реализовать расчетную равномерно распределенную нагрузку  $q_p = 13,5$  кН/м нужно обеспечить натяжение троса (при помощи винта) равное 2,16 кН.

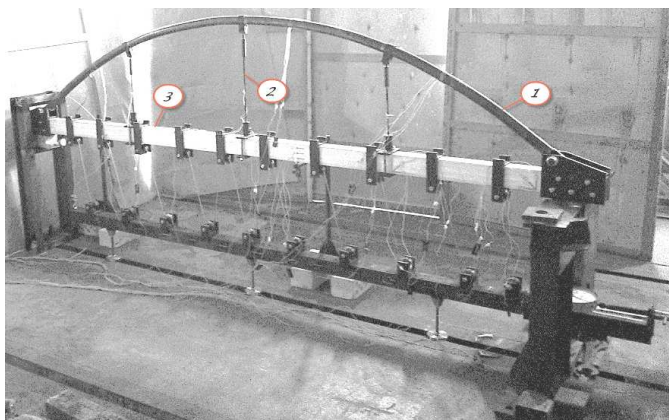


Рис. 8. Стенд для испытаний с установленной на нем арочной конструкцией

1 – арка; 2 – подвески; 3 – балка.

При испытаниях было проведено несколько этапов загрузки и разгрузки конструкции с шагом 1,25 кН/м (шаг 0,2 кН на динамометре). Показания снимались через 30 мин после каждого нагружения. Величина равномерно распределенной нагрузки была доведена до 18,78 кН/м (что соответствует показанию 3,2 кН на динамометре). Результаты испытаний сравнивались с результатами расчета в программном комплексе, учитывающем физическую и геометрическую нелинейность.

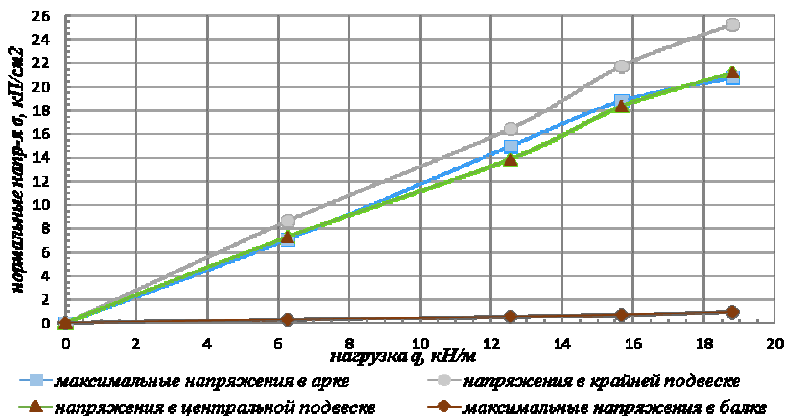


Рис. 9. Напряжения в конструкции при испытаниях

Согласно расчету в ПК ЛИРА 9.6 (без учета нелинейности) наибольшие напряжения в арке возникают на промежутке между опорой и крайней подвеской и достигают значений, близких к расчетному сопротивлению стали ( $R_y=24\text{кН/см}^2$ ) при величине нагрузки  $q=13,5\text{кН/м}$ . Испытания показали, что при расчетной нагрузке напряжения в указанном промежутке арки (наибольшие напряжения) меньше расчетных и равны  $\sigma_{\text{арки}}=17\text{кН/см}^2$  (рис.10).

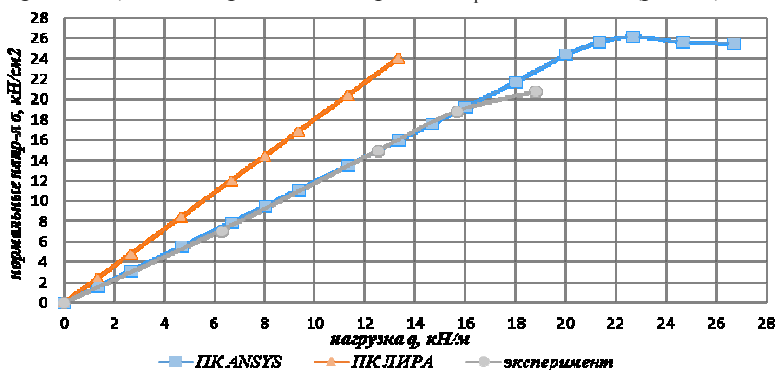


Рис.10. Сравнение значений максимальных нормальных напряжений в арке при испытаниях с результатами расчетов в ПК



По расчету в ПК ЛИРА напряжения в боковой (более нагруженной) подвеске при нагрузке 13,5 кН/м достигают 24 кН/см<sup>2</sup>, при расчете с учетом нелинейности напряжения при этой нагрузке составляют 19,5 кН/см<sup>2</sup>, а при испытаниях – 17,7 кН/см<sup>2</sup> (рис.11).

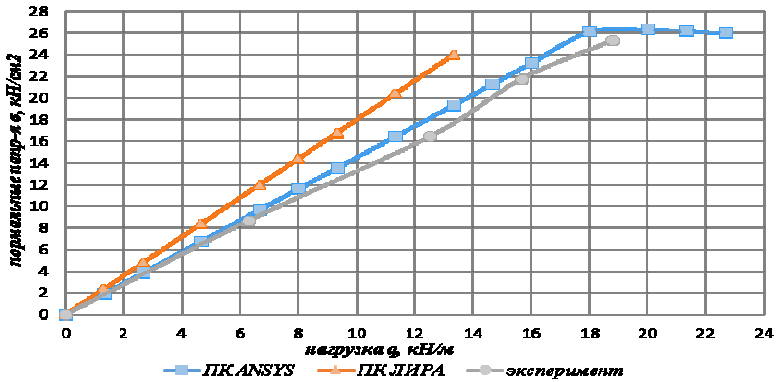


Рис.11. Сравнение значений нормальных напряжений в боковых подвесках при испытаниях с результатами расчетов в ПК

По расчету в ПК ЛИРА напряжения в балке (затяжке) при нагрузке 13,5 кН/м достигают 0,9 кН/см<sup>2</sup>, при расчете с учетом нелинейности – 0,8 кН/см<sup>2</sup>, а при испытаниях – 0,6 кН/см<sup>2</sup> (рис.12).

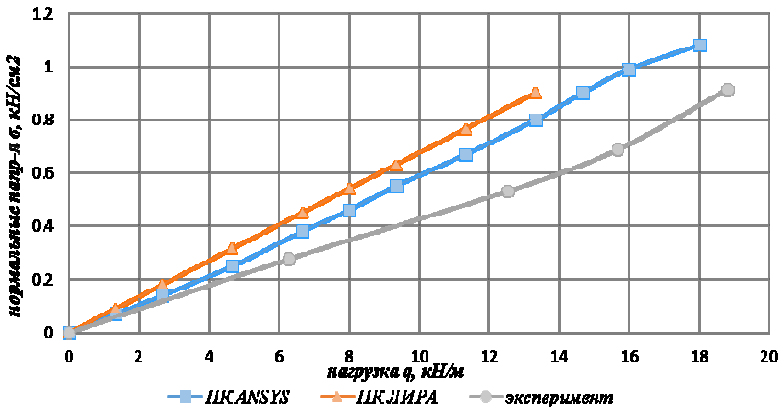


Рис.12. Сравнение значений нормальных напряжений в балке (затяжке) при испытаниях с результатами расчетов в ПК

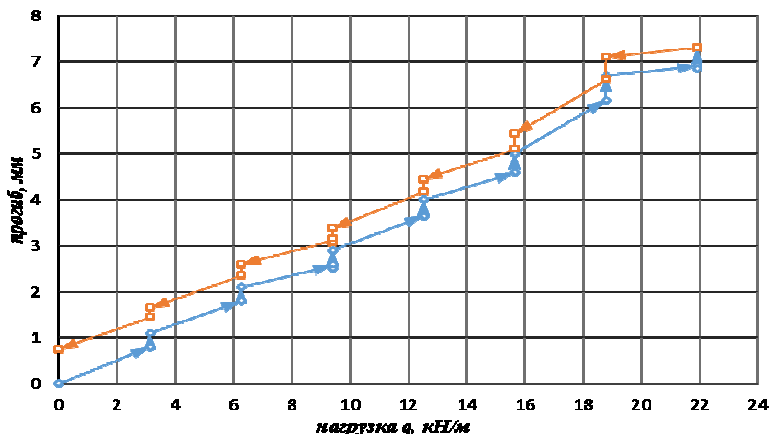


Рис. 13. Прогибы в конструкции при испытаниях

Выводы:

1. Наиболее напряженные участки конструкции по расчетам (как в линейной, так и в нелинейной постановке) и при испытаниях совпадают. Наибольшие напряжения возникают в крайней подвеске, в арке – на участке между боковой подвеской и опорой, в балке – на участке между центральной и боковой подвесками.
2. Несущая способность конструкции, определенная при помощи программного комплекса, учитывающего нелинейность ( $q=18,5$  кН/м) практически совпадает с результатами испытаний ( $q=18,8$  кН/м) – расхождение составляет 2%.
3. При испытаниях оказалось, что напряжения в арке и в боковой подвеске меньше значений напряжений, полученных при расчете (для арки наибольшее расхождение составило 2%, для боковой подвески – 4,5%). Наибольшим оказалось расхождение напряжений в балке (затяжке) (до 30% ниже напряжений, полученных при расчете) (рис.9), что можно объяснить сложным анизотропным строением материала, из которого она изготовлена – древесины, а также упрочнением ее при склеивании.

4. При приближении нагрузки к предельной деформированное состояние конструкции перестает быть плоским – появляются перемещения элементов конструкции, перпендикулярные ее плоскости, что полностью согласуется с картиной пространственной деформации, которую дает расчетный комплекс.
5. Главным результатом проведенных испытаний оптимально спроектированной при помощи ПК ЛИРА 9.6 конструкции является то, что реальная несущая способность этой конструкции, определенная во время испытаний ( $q=18,5$  кН/м) оказалась на 36% выше расчетной ( $q=13,5$  кН/м).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Окунь И.В. Эффективные клеодощатые несущие конструкции надземных пешеходных переходов / И.В. Окунь, С.М. Чучмай, В.П. Приступлюк // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, вип. № 46, Одеса: Зовнішньорекламсервіс, 2012. – С. 263 – 267
2. Стоянов В.В. и др. Архитектурные конструкции транспортных развязок на перегруженных городских магистралях / Сб. науч. тр. Современные строительные конструкции из металла и древесины. - Одесса. №15 ч.1, стр. 72-80, ВРС, 2011
3. Chad P. Kirilin. Experimental and Finite-Element Analysis of Stress Distributions Near the End of Reinforcement in Partially Reinforced Glulam. The Thesis / Oregon State University, 1996.