

Задушнов Егор Игоревич, студент, Санкт-Петербургский Государственный Университет Путей Сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург

Egor Zadushnov, student, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg

e-mail: zadushnovegor@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА АРОЧНЫХ МОСТОВ НА ПРИМЕРЕ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА ЧЕРЕЗ РЕКУ ОКА

Аннотация. В статье рассматриваются конструктивные и расчётные особенности пролетных строений типа «сетчатая арка», представляющих собой комбинированные арочные системы с гибкой металлической аркой, жёсткой затяжкой и системой наклонных гибких подвесок. Целью исследования является анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции на основе расчётной модели. Выполненное пространственное моделирование в программном комплексе с учётом нормативных нагрузок показало равномерное распределение усилий и снижение напряжений в основных элементах конструкции. Результаты анализа подтверждают высокую конструктивную и архитектурную целесообразность использования сетчатых арок при проектировании мостов средних и больших пролётов. Полученные данные могут быть использованы при проектировании новых инженерных сооружений и модернизации существующих мостов с целью повышения их надёжности и долговечности.

Ключевые слова: сетчатая арка, арочные мосты, гибкая арка с затяжкой, наклонные подвески, напряжённо-деформированное состояние, расчёт устойчивости и пространственной жёсткости конструкции.

Annotation. The article deals with the structural and design features of “mesh arch” type spans, which are combined arch systems with a flexible metal arch, rigid pantile and a system of inclined flexible hangers. The aim of the study is to analyze the stress-strain state (SS) of the structural elements based on the computational model.

The performed spatial modeling in the software complex taking into account the standard loads has shown the uniform distribution of forces and stress reduction in the main elements of the structure. The results of the analysis confirm the high constructive and architectural feasibility of using mesh arches in the design of medium and large span bridges. The obtained data can be used in the design of new engineering structures and modernization of existing bridges in order to increase their reliability and durability.

Keywords: network arch, arch bridges, flexible arch with tightening, inclined suspensions, stress–strain state, calculation of stability and spatial rigidity of the structure.

Современный подход к проектированию искусственных сооружений формируется под влиянием постоянно возрастающих требований к их надёжности, несущей способности, долговечности, экономичности и архитектурной выразительности. Одновременно с этим конструкции должны обладать высокой технологичностью при возведении, эксплуатации, техническом обслуживании и капитальном ремонте. Комплекс указанных факторов обуславливает необходимость разработки и внедрения инновационных проектных и строительных решений, обеспечивающих соответствие современным нормативным и эксплуатационным требованиям.

В настоящее время в проектной практике для перекрытия больших пролётов применяется широкий спектр конструктивных схем, включающий вантовые, висячие, балочные и арочные системы. Наибольшее распространение получили вантовые и висячие мосты, благодаря рациональному распределению усилий и эффективному использованию высокопрочных материалов. Вместе с тем продолжается развитие и иных решений, включая арочные мосты различных конфигураций. Среди многообразия арочных систем особое внимание заслуживает схема с гибкой аркой, жёсткой затяжкой и вантовыми подвесками. Такая компоновка сочетает в себе высокую несущую способность, экономичность в расходе материала и удобство монтажа.

Настоящая статья посвящена анализу конструктивных и расчётных особенностей комбинированных систем мостов «гибкая арка с затяжкой и наклонными гибкими подвесками» на примере одного из вариантов автодорожного моста, проектируемого в составе скоростной автомагистрали М-12 «Москва – Нижний Новгород – Казань» через реку Ока на обходе города Муром. В проекте рассматривается комбинированная арочная система пролетного строения с металлической гибкой аркой, жёсткой стальной затяжкой и набором наклонных гибких подвесок, работающих преимущественно на растяжение. Такой подход позволяет эффективно распределять усилия в пролетном строении, обеспечивая необходимую прочность и устойчивость при действии нормативных нагрузок.

Цель исследования — на основе расчётной модели провести анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции, оценить влияние формы и расположения гибких наклонных подвесок на прочность и устойчивость всей системы, а также сформулировать выводы, полезные при дальнейшем проектировании арочных мостов аналогичной схемы.

«Сетчатая арка» представляет собой пространственную конструкцию, в которой классическая арочная форма дополняется системой гибких связей, образующих сетчатую структуру. Основной несущий элемент, воспринимающий сжимающие продольные усилия, — гибкая арка, соединенная с жесткой затяжкой. Взаимодействие с затяжкой и гибкой сеткой обеспечивает пространственную жёсткость, снижает изгибающие моменты и повышает устойчивость к внеплоскостным воздействиям.

Затяжка выполняется в виде жёсткой балки (например, ортотропной плиты проезжей части). Пространственная решётка распределяет как вертикальные, так и горизонтальные нагрузки между элементами, снижая локальные напряжения и прогибы.

Различают схемы с радиальными, диагональными и перекрёстными гибкими связями, в соответствии с основными гипотезами построения схем наклонных подвесок: теорией П. Твейта [1,2,4] и теорией Б.Брунна и Ф. Шеннака

[1,2,3]. Архитектурная выразительность и конструктивная эффективность делают комбинированные пролетные строения типа «сетчатая арка» перспективными для городских и магистральных мостов.

Для понимания работы конструкции «сетчатой арки» рассмотрим упрощенную статическую схему конструкции – трехшарнирную арку.

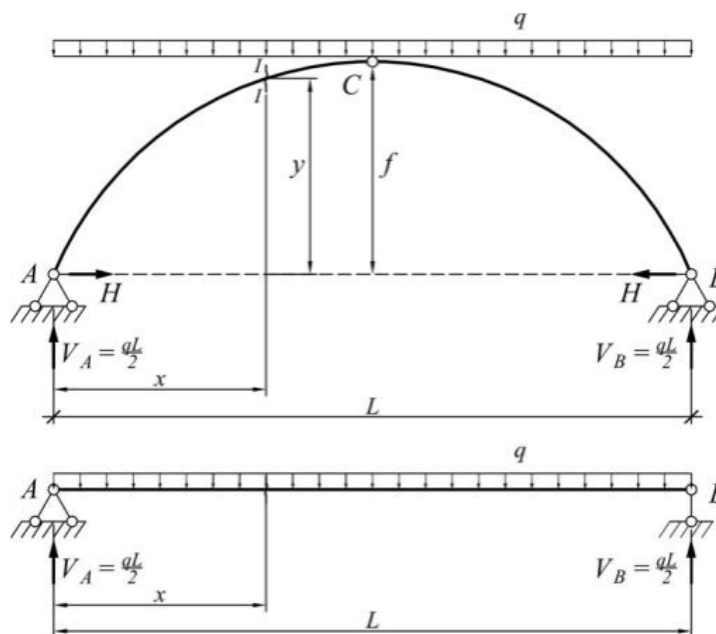


Рисунок 1 – Статическая схема конструкции

Уравнение изгибающего момента для трехшарнирной арки имеет вид:

$$M_x = M_x^0 - H' \cdot y'$$

где M_x – изгибающий момент в произвольном сечении арки от внешней нагрузки, кН·м;

M_x^0 – изгибающий момент в сечении балки, расположенном под сечением арки, от внешней нагрузки, кН·м;

H' – распор арки, кН;

y' – ордината оси арки в соответствующем сечении, м.

Из вышеизложенного следует, что изгибающие моменты в сечениях арки меньше моментов в соответствующих сечениях балки. Однако, наличие горизонтального распора, воспринимаемого опорами, требует значительного увеличения их размеров и усиления фундаментов. С целью минимизации распорных усилий и повышения технологичности строительства применяется конструктивное решение в виде арки с затяжкой, где горизонтальный распор

воспринимает жёсткая балка – затяжка. Такое решение позволяет значительно снизить требования к опорам, а также способствует рациональному распределению внутренних сил в пролётном строении.

Комбинированные арочные мосты относятся к статически неопределимым системам, в которых перераспределение усилий зависит от гибкости элементов и геометрической схемы. Основной расчетной задачей является определение усилий в арке, затяжке и подвесках в условиях совместной работы под действием расчетных нагрузок. Гибкая арка, как основной несущий элемент, воспринимает продольные сжимающие усилия, а затяжка — изгибающий момент и поперечную силу, возникающие в результате изгиба пролётного строения.

Расчёт арочной конструкции выполнен методами линейной теории изгиба, теорией упругости, а также численными методами, включая метод конечных элементов. Основные уравнения, описывающие поведение арки, строятся на основе дифференциальных уравнений равновесия с учётом изгиба, осевого сжатия и внецентренной нагрузки.

Уравнение нормальных напряжений в арке имеет вид:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x \cdot y}{I_x}$$

где N – продольная сила от внешней нагрузки, кН;

A – площадь поперечного сечения элемента, м²;

M_x – изгибающий момент относительно оси ОХ от внешней нагрузки, кН·м;

I_x – осевой момент инерции сечения относительно оси ОХ, м⁴;

y – расстояние до нейтральной оси, м.

Уравнение критической силы потери устойчивости (метод Эйлера):

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}}{(\mu \cdot l)^2}$$

где E – модуль упругости материала (модуль Юнга);

I_{min} – минимальный момент инерции сечения;

l – длина стержня;

μ – коэффициент приведения длины стержня.

Для расчёта напряжённо-деформированного состояния (НДС), определения усилий в элементах конструкции, анализа деформаций и прогибов элементов конструкции, подбора сечений был использован расчетно-вычислительный комплекс Midas Civil. Результаты моделирования подтвердили эффективность предложенной схемы в части равномерного распределения усилий и снижения максимальных напряжений в арке и затяжке.

Расчет производился при наиболее невыгоднейшем загрузении пролетного строения. Нагрузки включают собственный вес конструкции, временные автомобильные нагрузки А14 и Н14 [9], температурные воздействия, снеговую и ветровую нагрузку, а также нагрузку от торможения, ледовую нагрузку и неравномерную осадку опор.

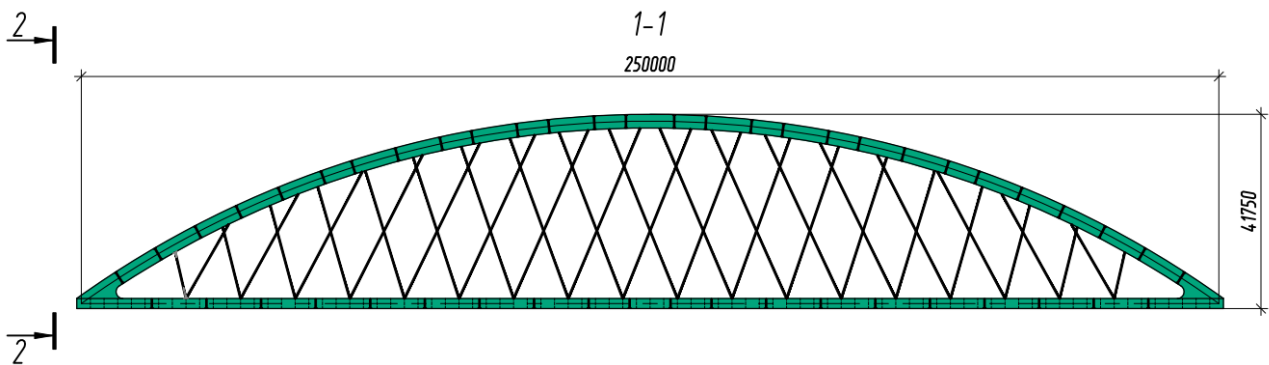


Рисунок 2 – Схема пролетного строения моста

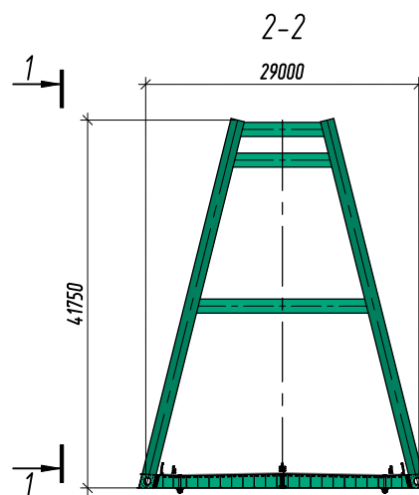


Рисунок 3 – Схема поперечного сечения пролетного строения

Арка моделировалась как шарнирно-опёртая, с возможностью учёта податливости основания. Основные расчётные усилия концентрируются в нижней трети арки, где возникает максимальное сжатие, а растягивающее усилие

в затяжке рассчитывается с учётом предельных деформаций. Подвески рассчитывались как растянутые элементы с учётом предварительного напряжения.

Для устойчивости арки проведён расчёт на внеплоскостную потерю устойчивости, включая определение критической силы и сравнение с расчётными воздействиями. Применён МКЭ с учётом нелинейности, геометрических параметров и фактической схемы закрепления.

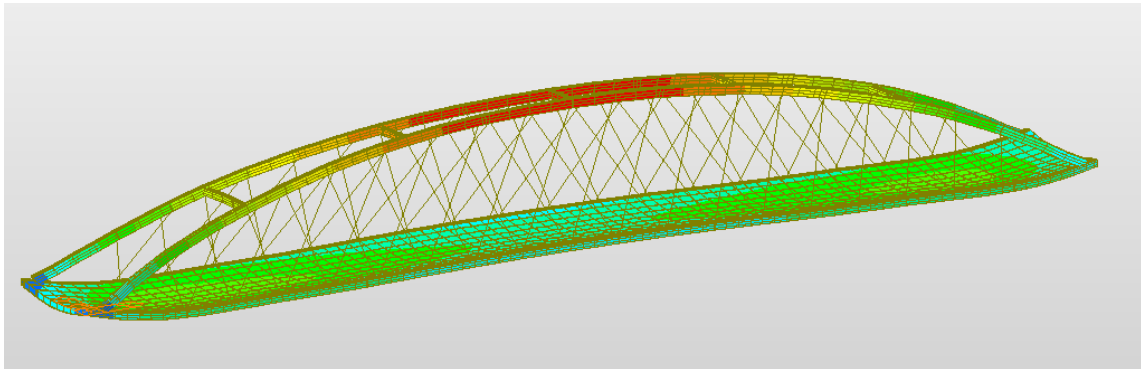


Рисунок 4 – Схема деформаций пролетного строения

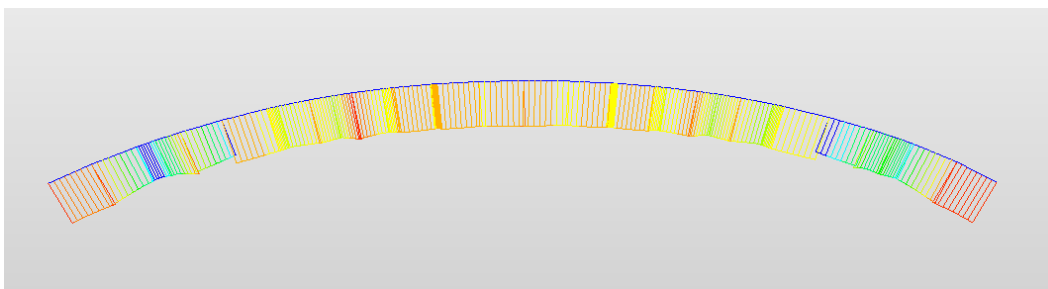


Рисунок 5 – Эпюра нормальных напряжений арочного свода

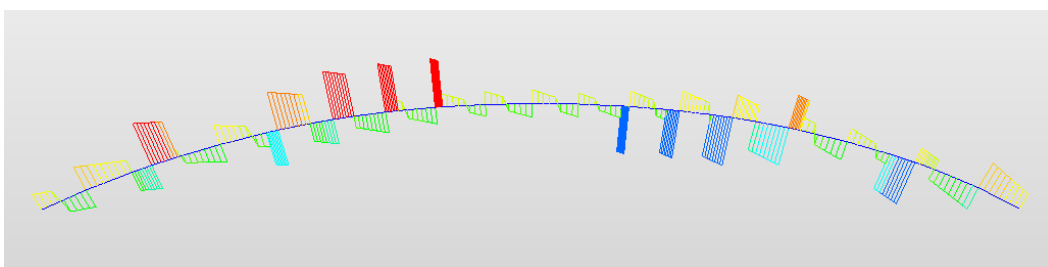


Рисунок 6 – Эпюра касательных напряжений арочного свода



Рисунок 7 – Эпюра нормальных напряжений в затяжке

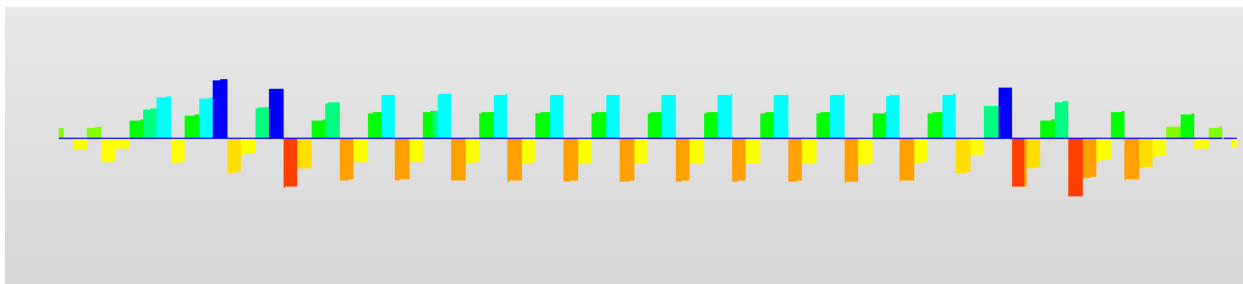


Рисунок 8 – Эпюра касательных напряжений в затяжке

Проведённый анализ конструктивных и расчётных особенностей комбинированной системы пролетного строения типа «сетчатая арка» позволяет сделать вывод об эффективности данного типа конструкций при проектировании средних и больших мостов. Совмещение гибкой арки, жёсткой затяжки и системы диагональных гибких подвесок обеспечивает рациональное распределение усилий, снижение изгибающих моментов и повышение пространственной жёсткости пролетного строения.

Расчёты, выполненные в программном комплексе Midas Civil с учётом нормативных нагрузок, подтвердили высокую надёжность и работоспособность системы в различных эксплуатационных режимах. Результаты моделирования показали, что основная часть усилий сосредотачивается в нижней трети арки и затяжке, а система гибких подвесок способствует снижению деформаций и прогибов.

Сетчатые арки обладают высоким конструктивным и архитектурным потенциалом, особенно в условиях повышенных требований к надёжности и эстетике мостовых сооружений. Их применение целесообразно как в городских агломерациях, так и на транспортных магистралях, где необходимо сочетание высокой несущей способности, технологичности монтажа и выразительного внешнего облика. Полученные результаты могут служить методической основой для проектирования новых и модернизации существующих мостов, обеспечивая повышение их эксплуатационной эффективности и долговечности.

Библиографический список

1. Суровцев Б. А. Проектирование пролетных строений мостов комбинированных систем с гибкими наклонными подвесками // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2012. – № 2. – С. 31–38.
2. Суровцев Б. А. Особенности проектирования пролетных строений мостов комбинированных систем с гибкими наклонными подвесками // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2012. – № 3. – С. 32–38.
3. Nielsen O. F. Discontinuous systems applied at arches with inclined hangers. – Copenhagen: G.E.C. Gad, 1930. – 125 p.
4. Tveit P. Optimal design of network arches // Contribution to the IABSE Symposium in Melbourne. – 2002. – 13 p. – ISBN 3-85748-107-2.
5. Владимирский С. Р. Современные методы проектирования мостов. – СПб.: Папирус, 1998. – 493 с.
6. Мамлин Г. А. Производство конструкций стальных мостов. – М.: Транспорт, 1994. – 391 с.
7. Протасов К. Г., Теплицкий А. В., Крамарев С. Я., Никитин М. К. Металлические мосты. – М.: Транспорт, 1973. – 352 с.
8. Рабинович И. М. Основы строительной механики стержневых систем. – М.: Стройиздат, 1960. – 519 с.
9. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*. – М.: Минрегион России, 2011. – 341 с.
10. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. – М.: Минстрой России, 2016. – 106 с.

Информация о себе: 8(981)839-63-94, zadushnovegor@gmail.com