

## Проектирование пролетных строений мостов комбинированных систем с гибкими наклонными подвесками

### Design of bridges span structures of the combined systems with flexible inclined suspension brackets

Суровцев Борис Алексеевич

*Руководитель группы проектирования ЗАО «Институт «Стройпроект»*

**Boris Alexeevich Surovtcev**

*Design Team Leader of JSC "Institute Strojproject"*

**Ключевые слова:** комбинированные системы, вертикальные подвески, наклонные подвески, верхний пояс, гипотезы систем подвесок, количество подвесок.

В статье рассматриваются аспекты проектирования пролетных строений комбинированных систем с полигональным верхним поясом и гибкими наклонными подвесками типа «жесткая арка – жесткая затяжка». Описана работа автора по обобщению и систематизации зарубежного опыта и рекомендаций к проектированию указанных систем. Представлены результаты собственных исследований в части проектирования комбинированных систем с наклонными подвесками. Исследования проводились путем проведения большого количества статистических расчетов с использованием математических моделей, базирующихся на Методе Конечных элементов. Приведены практические рекомендации к основным положениям проектирования пролетных строений с наклонными подвесками применительно к нормам и нагрузкам, действующим на территории Российской Федерации. Определены рекомендуемые оптимальные диапазоны значений основных параметров проектирования – количество подвесок, угол падения, высота стрелы и форма очертания верхнего пояса. Статья представляет практическую ценность для инженеров проектных организаций.

**Key words:** arch superstructures, vertical hangers, inclined hangers, top chord, theories of hangers system, number of hangers.

Author analyzes the Network arches designing aspects in his article. It includes the analysis of the abroad experience of designing constructions of such type. Author tells about the advantages of such systems comparing with the traditional arch bridges with vertical hangers. The article contains the author's recommendations to design network arches. Also author represents the results of his own researches of the Network arches. The researches were carried out with by the large number of the statistical analyses by using the mathematical models, based on the Finite Element Method. The article contains the practical recommendations to the main provisions of the designing the Network arches according to the loads and code rules of Russian Federation – optimal ranges of the design general parameters values – the number of hangers, angle of the inclination, the rise of the arch and its geometrical shape. This article will be useful for the civil design engineers, working in the transport infrastructure.

В последние годы в Российской Федерации наблюдается рост объемов строительства объектов транспортной инфраструктуры, строится значительное количество дорог, в том числе скоростных трасс, городских автомагистралей, в составе которых необходимо предусматривать различные искусственные сооружения (мосты, тоннели, путепроводы, эстакады).

В случаях строительства трассы с пересечением судоходных рек необходимо выдерживать требования навигационных водных инстанций, связанные с обеспечением необходимых габаритов судоходства по реке. Параметры навигационных габаритов зачастую определяют тип мостового перехода, обуславливают применение мостовых систем больших пролетов, требующих особого внимания и подхода при проектировании и строительстве.

Применяемые схемы мостов больших пролетов достаточно разнообразны, среди них преобладают вантовые, висячие моста, но находится применение и иным конструктивным решениям - различные пролетные строения со сквозными главными фермами, арочные мосты различных схем и комбинированные системы. В настоящее время в качестве элементов связей таких конструкций в некоторых случаях успешно находят применение ванты.

Комбинированные схемы, как правило, представляют собой сочетания нескольких простых систем. Чаще всего комбинированные системы образуют путем сочетания балки или фермы с полигональным поясом, аркой, шпренгельной системой или отдельными дополнительными стержнями.

В технической литературе широко распространено мнение, что в большинстве случаев применение традиционных комбинированных систем не приносит преимуществ по сравнению с простыми системами в отношении затрат металла. Однако современные технологии проектирования и

расчета позволяют говорить о разработке новых решений в пролетных строениях, эффективно снижающих затраты на основные материалы при строительстве [4]. Например, комбинированная схема с наклонными пересекающимися подвесками (рисунок 1, рисунок 2).

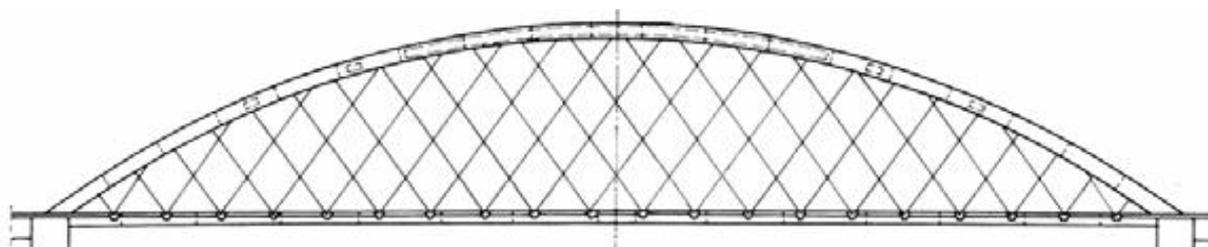


Рисунок 1. Комбинированная схема с наклонными пересекающимися подвесками

В практике отечественного и зарубежного проектирования и строительства комбинированных мостов наиболее распространенная схема пролетного строения – арка с системой вертикальных подвесок. Данное решение достаточно широко распространено по всему миру, успешно реализуется как под железнодорожные, так и под автодорожные, пешеходные мосты.

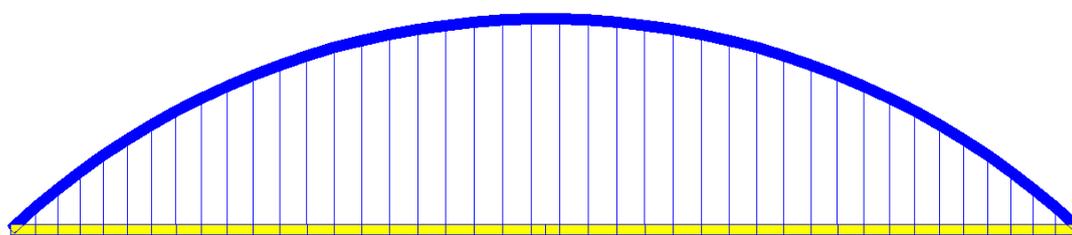


Рисунок 2. Комбинированное внешне безраспорное арочное пролетное строение с вертикальными подвесками.

Данный тип пролетов обладает основным недостатком, в значительной степени затрудняющим проектирование конструкций подобного типа под большие длины пролетов - высокая степень чувствительности к S-образному прогибу. Указанный эффект возникает в различных случаях несимметричных загружений пролетного строения временной вертикальной нагрузкой.

Основные негативные последствия появления S-образного прогиба пролетного строения следующие:

1. Наблюдается смена знака действующих изгибающих моментов в сечениях элементов, что приводит к необходимости усиления как верхней, так и нижней части сечения;
2. Происходит смена знака относительных деформаций элемента пролетного строения;

Усилия в подвесках комбинированных пролетов существенно изменяются относительно действующих от постоянных нагрузок, что приводит к дополнительным усилениям, полученным на основе проведенных расчетов усталости элементов. При этом в некоторых случаях усилие в элементе может становиться знакопеременным, что недопустимо для подвесок гибкого типа, а для условно жесткого требует проведение проверки по общей устойчивости элемента.

Все вышеперечисленные факторы в той или иной степени приводят к необходимости увеличения геометрических размеров несущих элементов, что в свою очередь негативно сказывается на весе монтируемых элементов и общем расходе материалов, увеличивая, в конечном счете, общую стоимость сооружения.

Эффективным решением описанной проблемы является применение комбинированных систем с гибкими наклонными подвесками, образующими сложную систему связей – «Сетку».

В отличие от арочных мостов с вертикальными подвесками, в данных конструкциях решающим фактором для определения основных геометрических параметров пролетного строения является равномерно-распределенная нагрузка. Благодаря эффективной упругой опоре арки и ее равномерной реакции на различные варианты несимметричных загружений значения действующих изгибающих моментов в сечениях арок и затяжки существенно снижаются. Основное усилие, действующее в арках и затяжке – продольная осевая сила (сжимающая в арках и растягивающая в затяжке). Величина усилия играет основную роль в определении геометрических параметров сечений несущих элементов.

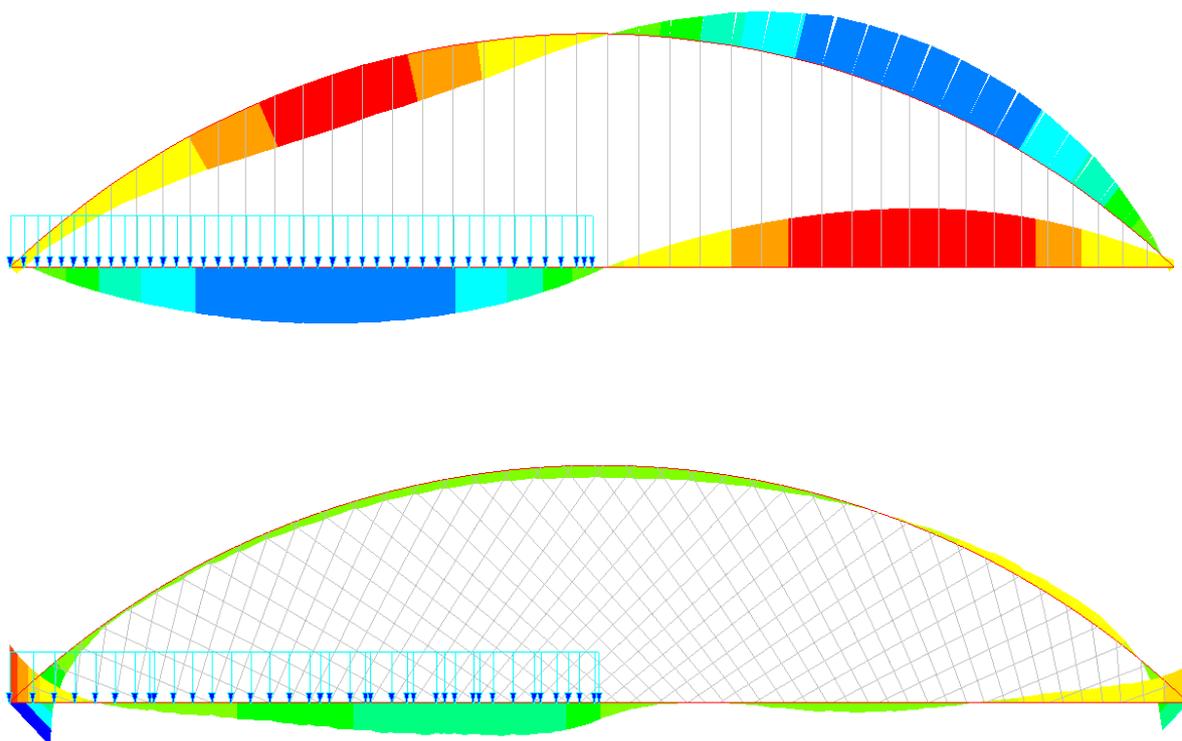


Рисунок 3. Диаграммы распределения изгибающих моментов в комбинированных схемах от несимметричных загрузок временной нагрузкой [5].

Для наиболее эффективного использования преимуществ сетчатой арки моста, основной задачей, встающей перед инженером, является правильно расположить подвески. Для решения этой задачи необходимо обозначить компромисс между следующими критериями:

- Снижение коэффициента использования напряжения в арке и нижнем поясе за счет снижения действующих изгибающих моментов в элементах;
- Снижение эффекта ослабления усилия натяжения в подвесках;
- Выравнивание коэффициента использования максимальных усилий в подвесках, оптимизация поперечных сечений;
- Минимизация максимальных усилий в подвесках и максимальных поперечных сечений подвесок;
- Минимизация амплитуд напряжений и снижение опасности разрушения от усталости;
- Эстетический вид;

В практическом проектировании конструкций подобных типов перед инженером встает необходимость решения следующих задач:

1. Назначение оптимальных параметров проектирования верхнего пояса арки, а именно - форма очертания, высота стрелы, конструкция;
2. Выбор схемы построения сетки подвесок;
3. Определение рационального угла падения подвесок;
4. Расчет наиболее рационального количества подвесок;
5. Оценка экономической эффективности решения по сравнению с пролетными строениями с вертикальными подвесками;

## Верхний и нижний пояса пролетного строения. Основные положения проектирования

Форма очертания верхнего пояса должна соответствовать окружности.

При этом допускаются некоторые отклонения ближе к торцам пролетного строения с целью оптимизации действующих усилий в верхнем поясе и по архитектурным соображениям. Круг наилучшим образом отвечает радиальному закону распределения вертикальных нагрузок на пролетное строение. При этом высоту стрелы верхнего пояса рекомендуется назначать  $0.16-0.18L$ , где  $L$  – длина пролетного строения.

Нижний пояс (затяжку) рекомендуется предусматривать цельнометаллическим, с учетом значительных осевых растягивающих усилий, действующих в элементе.

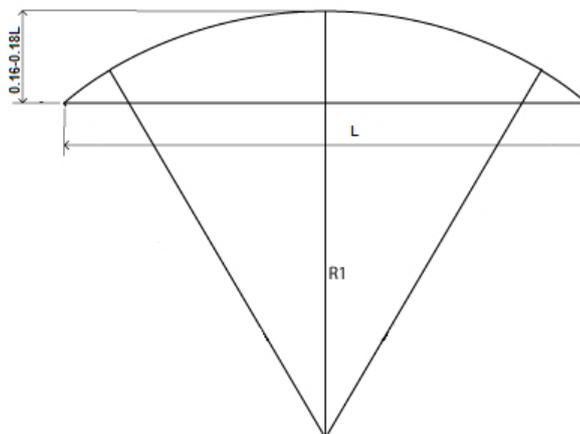


Рисунок 4. Высота стрелы верхнего пояса

## Схемы построения наклонных подвесок

Анализируя опыт проектирования пролетных систем данного типа, а также собственные исследования автора в качестве оптимальной и рекомендуемой гипотезы построения стеки следует обозначить идею Б. Брунна и Ф. Шеннака [3].

Идея основана на линии давления арки и предполагает постоянное значение угла падения подвесок. Схема к построению представлена на рисунке 6.

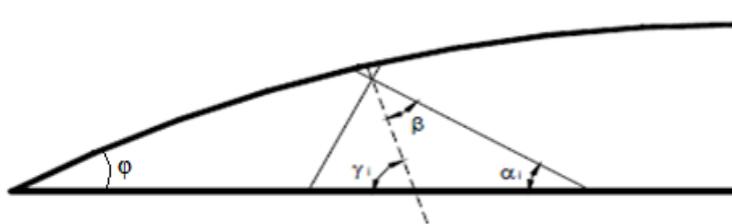


Рисунок 5. Схема к построению сеток Брунна-Шеннака

При этом на приведенной схеме:

$\alpha$  – угол падения подвески;

$\alpha_i = \gamma - \beta$ ;

$\beta$  – угол между подвеской и линией радиуса арки;

$\gamma$  – угол между линией радиуса арки и линией оси нижнего пояса;

При этом значение угла  $\gamma$  следующее:

$$\gamma_i = (180 - \varphi / 2 + (j + 0.5) \times \varphi / (n + 1));$$

$\varphi$  – начальный угол арки (угол между осью нижнего пояса и касательной к верхнему поясу в точке опирания);

$i$  – Порядковый номер подвески в составе положительного направления (наклон влево на рисунке);

$j$  – Порядковый номер подвески применительно ко всем подвескам системы;

$n$  – Количество подвесок в системе;

Гипотеза наиболее проста с точки зрения построения сетки и оптимальна с позиции распределения внутренних усилий в элементах конструкции.

## Угол падения подвесок

Чрезвычайно важным параметром при проектировании пролетных строений является значение угла падения подвесок на верхний пояс. Результаты проведенных автором исследований показывают, что наиболее оптимальный рекомендуемый диапазон значений угла падения подвесок на верхний пояс составляет 53-57 градусов.

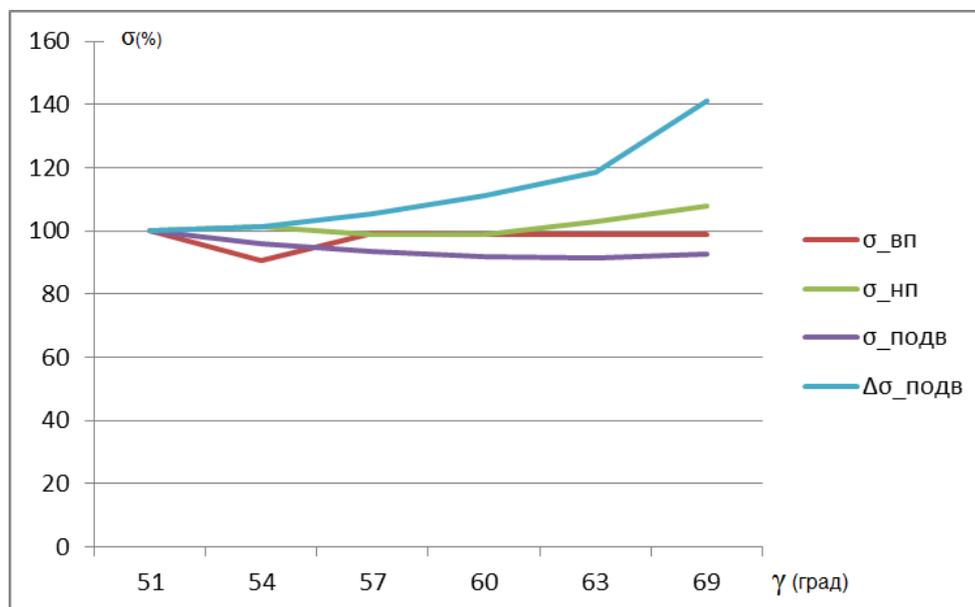


Рисунок 7. График зависимости параметров НДС конструкции от угла падения подвесок

Слишком малые углы (<45-50°) приводят к возрастанию усилий в подвесках, кроме того, при чрезмерно пологих углах падения сетка слишком сильно сгущается к середине пролетного строения, что в свою очередь нарушает его эффективную статическую работу.

При значениях углов, стремящихся к 90°, в системе наблюдается рост показателей НДС элементов пролета (что объясняется стремлением системы работать как схема с вертикальными подвесками).

## Количество подвесок

При проектировании пролетных строений с наклонными подвесками важной задачей является определение количества связей. С расчетной точки зрения, очевидно, что чем больше подвесок в системе, тем лучше все расчетные показатели пролетного строения. Необходимо учитывать определенные технологические факторы (значительное количество подвесок означает большое количество узлов прикрепления в нижнем и верхнем поясах пролета, что в свою очередь значительно затрудняет проектирование и изготовление металлоконструкций), а также внешний вид моста.

Автором проведено значительное количество статистических расчетов с целью установления оптимального количества подвесок в данных пролетных строениях в зависимости от длины пролета. Рекомендации сведены в таблицу:

Таблица 1.

Диапазон длин пролета, м	Рекомендуемое количество подвесок на плоскость, шт
<150	36
150-250	36-48
250-400	48-56
>400	≥56

## Сравнение с пролетными строениями с вертикальными подвесками

В рамках исследовательской работы автором проведено сравнение относительных расходов основных металлоконструкций комбинированных пролетных строений с наклонными и вертикальными подвесками. Сравнение проводилось для различных диапазонов пролетов от 150 до 300 м.

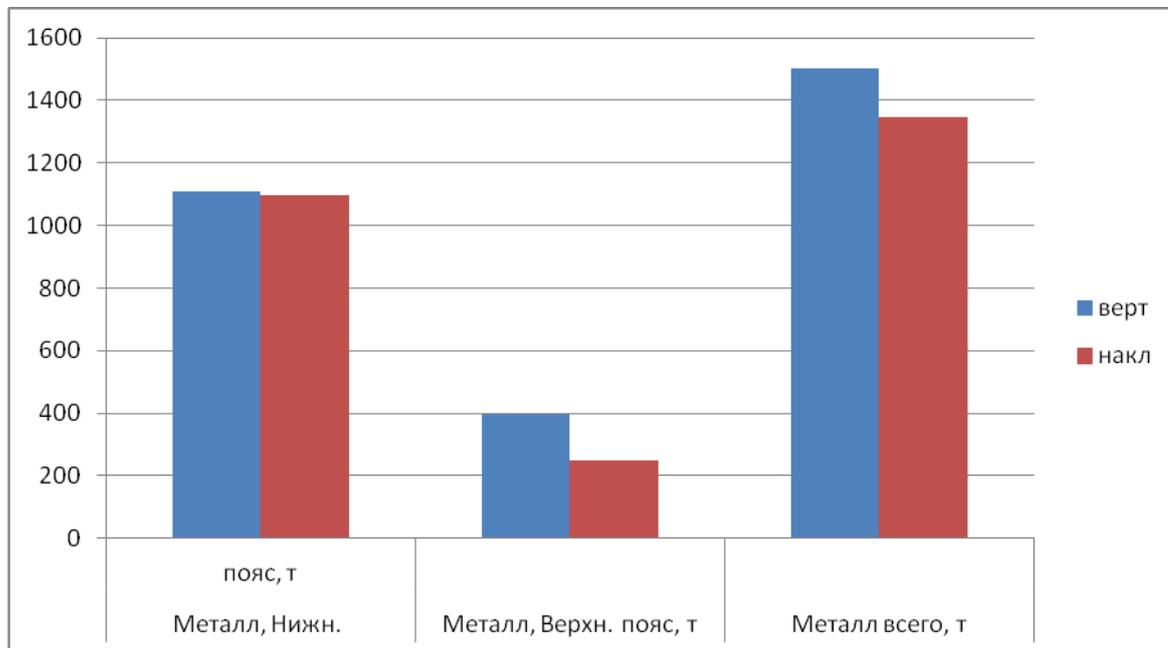


Рисунок 8. Гистограмма сравнительных расходов металлоконструкций пролетных строений длиной 150 м

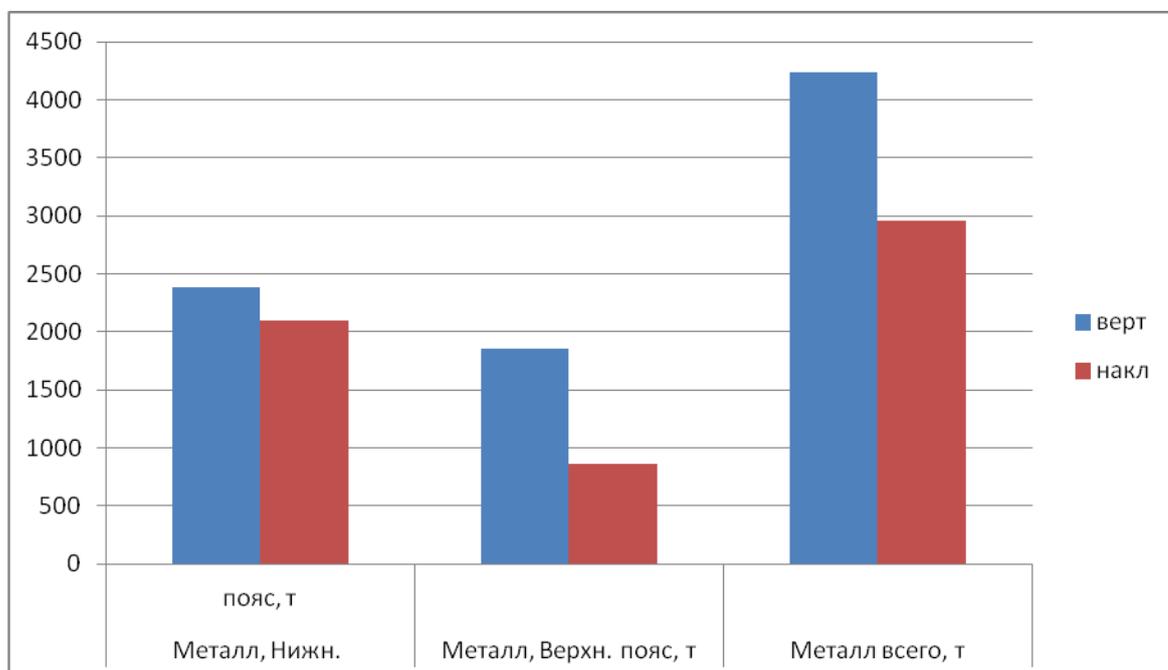


Рисунок 9. Гистограмма сравнительных расходов металлоконструкций пролетных строений длиной 300 м

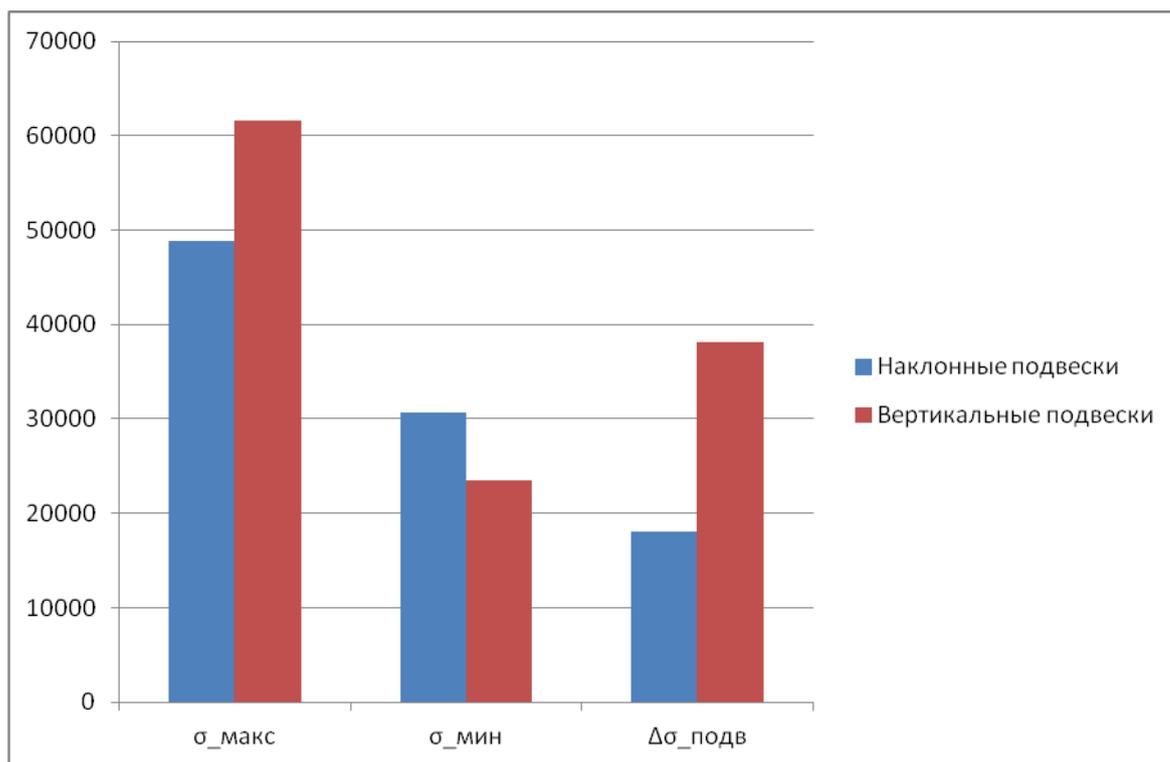


Рисунок 10. Гистограмма действующих напряжений в подвесках комбинированных систем

Гистограммы наглядно демонстрируют преимущества комбинированных пролетов с наклонными подвесками. Средние действующие максимальные напряжения в подвесках в таких схемах ниже, как видно из графика. Одновременно с этим применение систем с наклонными подвесками позволяет говорить о возможности экономии металлоконструкций элементов пролетов до 25% по сравнению с системами с вертикальными связями. Данные факторы подтверждают высокую эффективность применения конструкций такого типа, опираясь на полученные результаты можно говорить о высокой перспективности применения пролетных строений комбинированных систем в практическом проектировании и строительстве искусственных сооружений.

#### Литература

1. Nielsen O.F. Discontinuous systems applied at arches with inclined hangers // G.E.C. Gad, Copenhagen 1930, 125 pp.
2. Tveit P. Optimal design of network arches // Contribution to the IABSE Symposium in Melbourne. 2002. 13 p. ISBN 3-85748-107-2
3. Brunn B., Schanack F., Steimann U. Network arches for railway bridges // Arch Bridges IV, Barcelona. 2004. Advances in Assessment, Structural Design and Construction. P. Roca and C. Molins (Eds.). pp. 671-680. ISBN: 84-95999-63-3
4. В.В. Лалин, А.В. Яваров. Современные технологии расчета магистральных трубопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2010. №3. С. 43-47.
5. Теплых А.В. Применение оболочечных и объемных элементов при расчетах строительных стальных конструкций в программах SCAD и Nastran с учетом геометрической и физической нелинейности // Инженерно-строительный журнал. 2011. №3(21). С. 4-20.
6. Tveit P. Graduation thesis on arch bridges with inclined hangers // Technical University of Norway, Trondheim. 1955. 76 p.
7. Tveit P. Design of Network Arches // Struct. Eng. 1966. №44. 76 p.
8. Tveit P. Network arch in double track Railway Bridge. // Presented at Nordic Research. Days for Steel Struct., held in Oslo, Norway. 1973. Pre-print V713.
9. Tveit P. Network arches // 1st ed., Civil Engineering. Department. Univ. of Houston June 1978. 93 pages. Revised edition reprinted at inst. of Bldg. Techn. Struct. Engrg., Aalborg Univ. Centre Aalborg, Denmark,

1980. ISSN 0105-8185 NOTE NO. 8007. Including handout for the Poster Session of IABSE's 11. Congress, Vienna, September 1980.
10. Tveit, P. Network arches // Handout for poster session of IABSE's 11th Congress, held at Vienna, Publ. by inst. Tech. Struct. Engineering., Aalborg Univ. Centre, Aalborg, Denmark. 1980. 45 p.
  11. Tveit P. Network Arches // 11th IABSE Congress, held in Vienna, Austria, Final Report, IABSE, ETH-Hönggerberg, CH-8039, Zürich, Switzerland. 1980.
  12. Tveit P. Economic design of network arches // Rep. No. 8304, Inst. of Bldg. Tech. Struct. Enter. Aalborg Univ. Centre, Aalborg, Denmark, 22 pages. ISSN 0105-7421 Report no, 8304. 1983.
  13. Tveit P. Economic design of network arches // Handout for the poster session of IABSE's 12<sup>th</sup> congress, Vancouver, September 1984. Published by Inst. Bldg. Tech. Struct. Engineering., Aalborg Univ. Centre, Aalborg. 32 pages. ISSN 0105-7321 R8405. 1984.
  14. Šašek. L. Getting on the Network. Innovation in arch design // BRIDGE Design § Engineering. 2005. v. 11, № 40
  15. Teich S. Fatigue Optimization in Network Arches Arch Bridges IV // Advances in Assessment, Structural Design and Construction. Barcelona, Nov. 2004. pp. 691-700.
  16. Владимирский С.Р. Современные методы проектирования мостов. – СПб.: Папирус, 1998. – 493 с.
  17. Гибшман М.Е., Попов В.И. Проектирования транспортных сооружений. – М.: Транспорт, 1988 – 447 с.
  18. Ильясевич С.А. Металлические коробчатые мосты. – М.: Транспорт, 1970. – 280 с.
  19. Мамлин Г.А. Производство конструкций стальных мостов. – М.: Транспорт, 1994. – 391 с.
  20. Протасов К.Г., Теплицкий А.В., Крамарев.С.Я., Никитин М.К. Металлические мосты. – М.: Транспорт, 1973 – 352 с.
  21. Рокки К.С., Эванс Х.Р. Проектирование стальных мостов. Пер. с англ.; Под ред. А.А. Потапкина. – М.:Транспорт, 1986. – 245 с.