

Особенности проектирования пролетных строений мостов комбинированных систем с гибкими наклонными подвесками

Features of 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 рассмотрены аспекты проектирования пролетных строений комбинированных систем с полигональным верхним поясом и гибкими наклонными подвесками типа «жесткая арка – жесткая затяжка». Описаны теории П. Твейта, Б. Брунна, Ф. Шеннака. Представлена работа автора по обобщению и систематизации зарубежного опыта и рекомендаций к проектированию указанных систем. 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. Furthermore, the article contains the author's recommendations to design network arches. Also author represents the results of his own researches of the Network arches. This article will be useful for the civil design engineers, working in the transport infrastructure.

Современные тенденции проектирования искусственных сооружений в значительной степени диктуются возрастающими требованиями к их надежности, грузоподъемности, долговечности, экономичности и эстетичности. Проектируемые конструкции одновременно с этим должны быть достаточно технологичны в практической реализации при строительстве, эксплуатации, необходимом ремонте. Вышеперечисленные требования создают условия необходимости применения и разработки новых, инновационных решений, как при проектировании, так и при строительстве искусственных сооружений.

Применяемые на сегодняшний день схемы мостов больших пролетов достаточно разнообразны, среди них преобладают вантовые, висячие моста, но находится применение и иным конструктивным решениям, таким как различные пролетные строения со сквозными главными фермами, арочные мосты различных схем и комбинированные системы типа «арка с затяжкой». В настоящее время в мировой практике в качестве элементов связей таких конструкций в некоторых случаях успешно используются гибкие элементы - ванты.

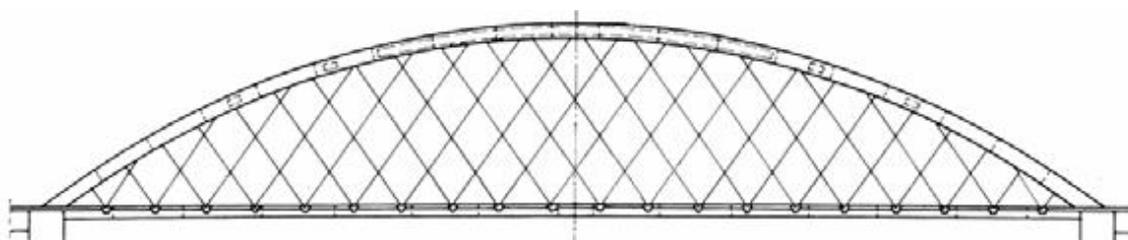


Рисунок 1. Комбинированная схема с наклонными пересекающимися подвесками

Конструкции подобного типа отличаются сравнительно небольшими размерами несущих сечений, что благоприятно сказывается на их внешнем силуэте, в связи с чем, эти архитектурно привлекательные пролетные строения зачастую используют при проектировании и строительстве мостовых переходов в городах, где архитектурный облик сооружения часто играет ведущую роль в выборе варианта проекта. Данные пролетные строения достаточно экономичны (до 40-70% экономии металлоконструкций, по утверждению зарубежных авторов [1-4]), технологичны, обладают определенными эксплуатационными достоинствами и в значительной степени инновационные на фоне общего спектра более традиционных систем мостов [13-16, 20-21].

Основная проблема применения конструкций пролетных строений комбинированных систем с наклонными подвесками по схеме «жесткая арка – жесткая затяжка» заключается в чрезвычайно малой степени распространенности их применительно к практике мостостроения СССР и РФ. Данный фактор связан с высокой степенью сложности проведения расчетов данных пролетных строений. Данные схемы представляют собой многократно статически-неопределимые системы, в общем случае обладающие определенной геометрической нелинейностью (гибкие элементы подвесок, работающие только на растяжение) с криволинейным очертанием верхнего пояса [17-18].

С точки зрения комбинированных систем мостов по схеме «арка с затяжкой» с гибкими подвесками наиболее распространенная схема пролетного строения – комбинированная с полигональным верхним поясом с системой вертикальных подвесок. Особенностью пролетов данного типа является высокая степень чувствительности к различным неравномерным загрузкам временной нагрузкой, особенно при малой изгибной жесткости несущих элементов. На рисунке 2 представлена диаграмма распределения изгибающих моментов по элементам пролетного строения от действия временной нагрузки. Результаты, представленные на рисунке, получены автором путем математического моделирования пролетного строения, с заданием всех действительных параметров материалов, конструкций и нагрузок [4].

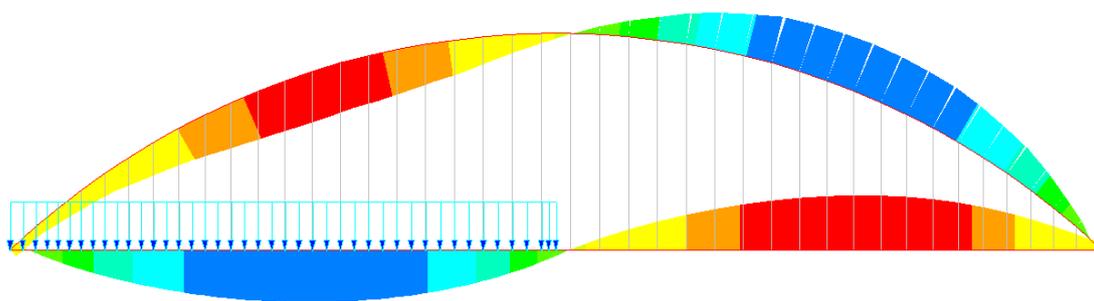


Рисунок 2. Диаграмма распределения изгибающих моментов по элементам пролетного строения от действия временной нагрузки

Как видно из приведенных эпюр, элементы верхнего пояса и затяжки в достаточной степени подвержены воздействиям изгибающего момента, значение которого увеличивается с увеличением длины пролетного строения, что приводит к необходимости увеличения размеров сечений элементов.

Чувствительность системы к неравномерным загрузкам временной нагрузкой, появление несимметричных деформаций пролета получило в мостостроении название S-образного прогиба пролетного строения.

Основные негативные последствия этого явления:

- Наблюдается смена знака действующих изгибающих моментов в сечениях элементов, что приводит к необходимости усиления как верхней, так и нижней части сечения;
- 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.

Наиболее эффективным путем решения проблемы неравномерных загрузок в пролетных строениях данного типа является устройство наклонных пересекающихся подвесок. На рисунке 3 представлена диаграмма распределения изгибающих моментов в элементах конструкции пролетного строения с наклонными подвесками от действия временной нагрузки

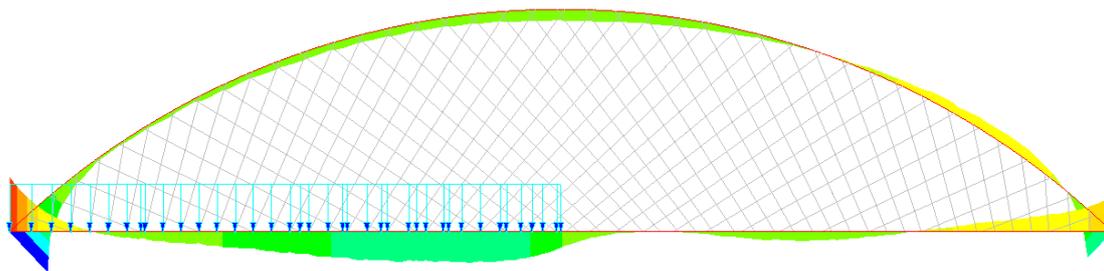


Рисунок 3. Диаграмма распределения изгибающих моментов по элементам пролетного строения от действия временной нагрузки в пролетных строениях с наклонными подвесками

На приведенной схеме наблюдается значительный эффект «сглаживания» эпюр моментов в элементах пролетного строения. Фактически все доминирующие усилия в элементах пролетного строения – осевые усилия сжатия и растяжения. Следовательно, при проектировании можно руководствоваться необходимыми площадями поперечных сечений несущих элементов, без наращивания сечений с целью увеличения момента инерции для восприятия изгибающих моментов.

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

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

В данной статье представлена выборка материалов как из опыта зарубежного проектирования и строительства данных мостов, так и из собственных исследований автора. Обозначены и сформулированы основные положения проектирования пролетных строений с наклонными подвесками, озвучены общие рекомендации к практическому проектированию данных пролетов.

Верхний пояс. Критерии построения

Форма очертания верхнего пояса должна соответствовать окружности. Это связано со спецификой работы пролетных строений такого типа, в которых распределение вертикальных нагрузок происходит в практически радиальном направлении. При этом допускаются некоторые отклонения ближе к торцам пролетного строения с целью оптимизации действующих усилий в верхнем поясе и по архитектурным соображениям. На основании проведенных автором расчетов высоту стрелы верхнего пояса, рекомендуется принять равной 16%-18% от длины пролета. Схема к построению очертания верхнего пояса приведена на рисунке 4.

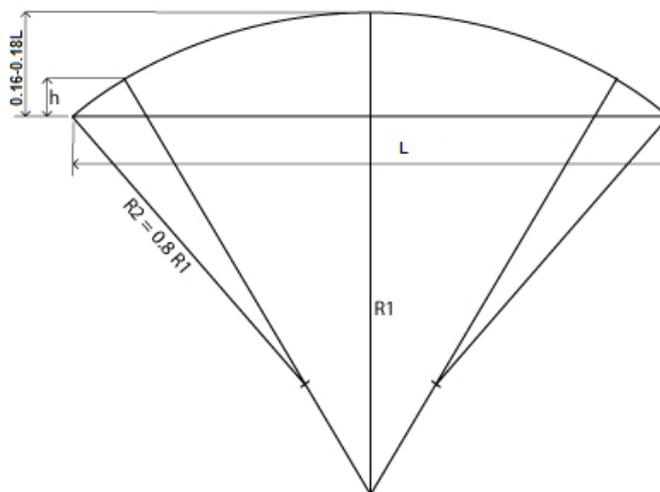


Рисунок 4. Схема к построению очертания верхнего пояса

Схемы построения наклонных подвесок. Гипотезы систем

Следует сказать, что оптимальное соотношение параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции и угла наклона подвесок достигается путем подбора индивидуального угла падения каждой подвески. Однако данный подход, во-первых, существенно осложняет расчеты, во-вторых, приводит к неэстетичному внешнему виду конструкции.

Следует различать две основные гипотезы построения схем наклонных подвесок:

- **Теория П. Твейта** [2, 5-12] о переменном угле падения подвески на затяжку. В качестве исходного параметра принимается угол падения первой подвески, определяется величина приращения угла каждой последующей подвески и осуществляется построение сетки. На рисунке 5 представлена схема к построению сетки Твейта.

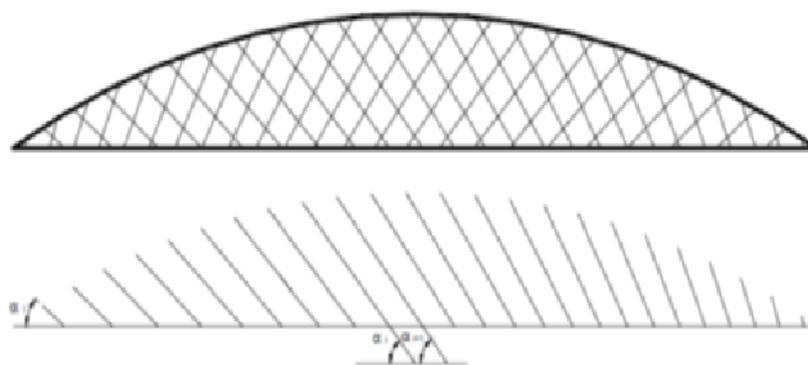


Рисунок 5. Схема к построению сеток Твейта

При этом на приведенной схеме:

α_1 - начальный угол падения подвески;

$\Delta\alpha$ – значение приращения угла, при этом

$\Delta\alpha = \alpha_{i+1} - \alpha_i = \text{const}$;

Соответственно, угол падения i -й подвески равен

$\alpha_i = \alpha_1 + (i-1) \cdot \Delta\alpha$, где i - порядковый номер подвески;

Построение обратных подвесок осуществляется зеркально. При этом изменение угла наклона подвесок влево считается положительным, угол падения подвесок на приведенной схеме становится круче слева направо.

- **Теория 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.

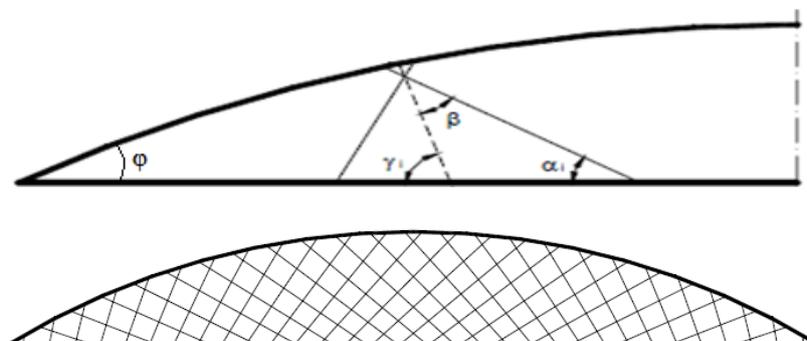


Рисунок 6. Схема к построению сеток Брунна-Шеннака

При этом на приведенной схеме:

α - угол падения подвески;

$\alpha_i = \gamma - \beta$;

β – угол между подвеской и линией радиуса арки;

γ – угол между линией радиуса арки и линией оси нижнего пояса;

При этом значение угла γ следующее:

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

φ – 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;

Проведенные автором исследования показывают, что обе сетки могут быть рекомендованы к практической реализации, разница между значениями прочностных критериев элементов пролетного строения составляет около 5%. Можно сказать, что сетка Брунна-Шеннака позволяет получить несколько меньшее значение напряжений по верхнему поясу (поскольку в общем случае обладает более крутым углом падения подвесок), тогда как сетка Твейта позволяет снизить максимальные напряжения, действующие в подвесках и нижнем поясе пролета.

Угол падения подвесок

Следующим важнейшим 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.

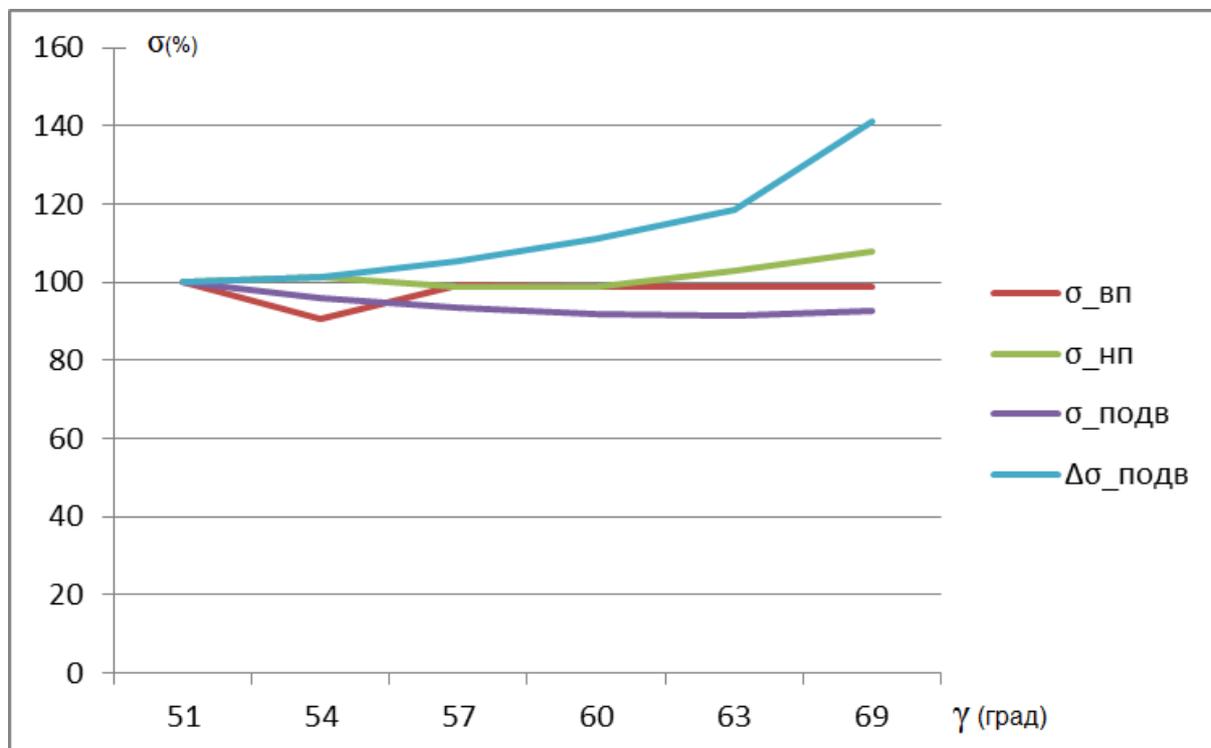


Рисунок 7. График зависимости параметров НДС конструкции от угла падения подвесок.

Слишком малые углы ($<45-50^\circ$) 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. γ

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

Важным критерием оценки эффективности системы наклонных связей является определение количества подвесок, шага панели по верхнему поясу. На рисунке 8 приведен график зависимости коэффициентов действующих напряжений в элементах пролетного строения от количества подвесок.

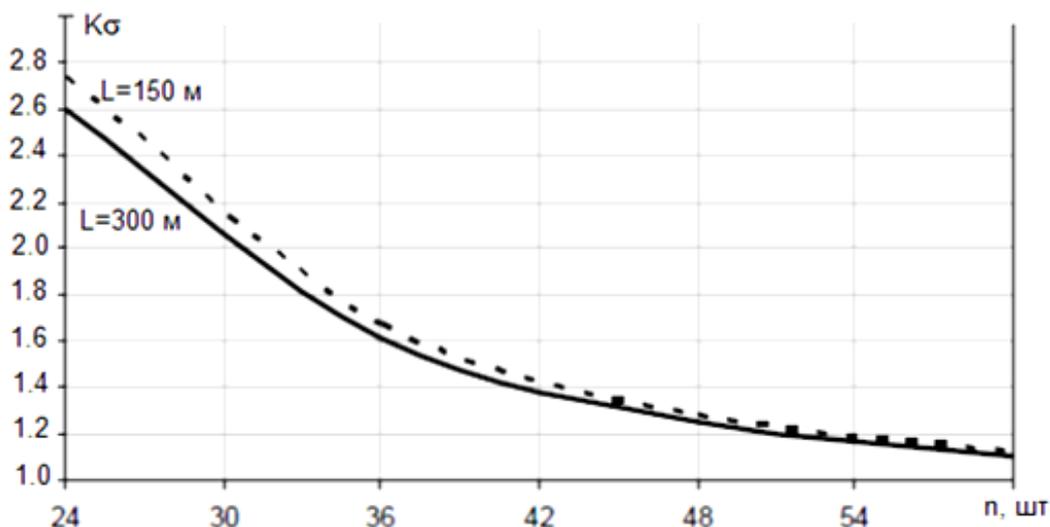


Рисунок 8. График зависимости показателей НДС пролета от количества подвесок

Зависимость между количеством подвесок и критериями НДС пролетного строения не является линейной, а носит скорее гиперболический характер с выраженной асимптотой. При дальнейшем уменьшении количества подвесок скорость изменения критериев НДС пролетного строения возрастает. Кривая функции зависимости выравнивается к количеству подвесок, равному 54-62. При этом закон сохраняется для пролетных строений различных диапазонов пролетов. Рекомендации автора по количеству оптимального числа подвесок пролетных строений в зависимости от длины пролета сведены в таблицу 1:

Таблица 1. Рекомендации автора по количеству оптимального числа подвесок пролетных строений в зависимости от длины пролета

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

Необходимо сказать, что приведенные рекомендации носят достаточно общий характер и лишь обозначают диапазоны рекомендуемых оптимальных значений параметров проектирования, позволяя изначально задаться определенными данными к построению схем пролетных строений с наклонными подвесками. После построения следует провести детальные расчеты конструкций с целью оптимизации принятых показателей и проверки показателей НДС пролетных строений.

В целом конструкции пролетов комбинированных систем с наклонными подвесками являются весьма эффективными системами и в большинстве случаев могут успешно конкурировать с другими схемами пролетных строений даже под сравнительно большие (400 - 600 м) длины пролетов.

Литература

1. Nielsen O.F. Discontinuous systems applied at arches with inclined hangers // G.E.C. Gad, Copenhagen 1930, 125 p.
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. 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. С. 4-20.
5. Tveit P. Graduation thesis on arch bridges with inclined hangers // Technical University of Norway, Trondheim. 1955. 76 p.
6. Tveit P. Design of Network Arches // Struct. Eng. 1966. №44. 76 p.
7. 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.
8. Tveit P. Network arches // 1st ed., Civil Engineering. Department. Univ. of Houston June 1978. 93 p. 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.
9. 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.
10. Tveit P. Network Arches // 11th IABSE Congress, held in Vienna, Austria, Final Report, IABSE, ETH-Hönggerberg, CH-8039, Zürich, Switzerland. 1980.
11. Tveit P. Economic design of network arches // Rep. No. 8304, Inst. of Bldg. Tech. Struct. Enter. Aalborg Univ. Centre, Aalborg, Denmark, 22 p. ISSN 0105-7421 Report no, 8304. 1983.
12. Tveit P. Economic design of network arches // Handout for the poster session of IABSE's 12th congress, Vancouver, September 1984. Published by Inst. Bldg. Tech. Struct. Engineering., Aalborg Univ. Centre, Aalborg. 32 p. ISSN 0105-7321 R8405. 1984.
13. Šašek. L. Getting on the Network. Innovation in arch design // BRIDGE Design & Engineering. 2005. v. 11, № 40. Pp. 39-40.
14. Teich S. Fatigue Optimization in Network Arches Arch Bridges IV // Advances in Assessment, Structural Design and Construction. Barcelona, Nov. 2004. Pp. 691-700.
15. Владимирский С.Р. Современные методы проектирования мостов. – СПб.: Папирус, 1998. – 493 с.
16. Гибшман М.Е., Попов В.И. Проектирования транспортных сооружений. – М.: Транспорт, 1988. – 447 с.
17. Ильясевич С.А. Металлические коробчатые мосты. – М.: Транспорт, 1970. – 280 с.
18. Мамлин Г.А. Производство конструкций стальных мостов. – М.: Транспорт, 1994. – 391 с.
19. Металлические мосты / Протасов К.Г., Теплицкий А.В., Крамарев.С.Я., Никитин М.К. – М.: Транспорт, 1973. – 352 с.
20. Рокки К.С., Эванс Х.Р. Проектирование стальных мостов. Пер. с англ.; Под ред. А.А. Потапкина. – М.:Транспорт, 1986. – 245 с.
21. Суровцев Б.А. Проектирование пролетных строений мостов комбинированных систем с гибкими наклонными подвесками // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №2. С. 31-38.