



УДК 69.04

Н. Ю. ТРЯНИНА, канд. техн. наук, проф. кафедры теории сооружений и технической механики; **Е. Ю. КОРОЛЕВА**, магистрант кафедры теории сооружений и технической механики

РАБОТА АРОЧНО-ВАНТОВОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ С ВЕРНЫМИ ЗАТЯЖКАМИ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-96; эл. почта: tstm@nngasu.ru

Ключевые слова: арочно-вантовая комбинированная система, верные затяжки, усилия предварительного натяжения, нижняя затяжка, продольная сила и изгибающий момент в арке, геометрическая нелинейность.

В статье рассматривается вопрос снижения металлоемкости сетчатых арочных покрытий с помощью введения предварительно-напряженных верных затяжек. Дана сравнительная оценка напряженно-деформированного состояния элементов конструкции в зависимости от вида опорных шарниров и величины натяжения затяжек. На основе комплексного численного моделирования определены рациональные параметры конструкции, обеспечивающие снижение материалоемкости. Приводятся практические рекомендации, позволяющие оптимизировать процесс проектирования подобных систем.

Введение

В современном архитектурно-строительном проектировании важно разрабатывать экономичные покрытия с минимальной материалоемкостью. Особое внимание уделяется арочно-вантовым комбинированным системам, которые обеспечивают архитектурную выразительность, конструктивную безопасность и высокую прочность. Несмотря на их преимущества, некоторые аспекты их применения остаются недостаточно изученными. Арочно-вантовые системы представляют собой гибридную конструкцию, где арка сплошного сечения работает на сжатие, а предварительно-напряженные вантовые элементы – на растяжение. Используя эти системы, можно получить эстетически привлекательные и экономически эффективные решения для больших пространств. Исследования в этой области помогают оптимизировать проекты и улучшать эксплуатационные характеристики. Комплексный анализ конструкций выявляет их потенциал для различных задач и определяет направления для совершенствования [1, 2].

Предварительное напряжение и регулирование усилий является мощным средством повышения эффективности металлических конструкций, экономии материала и снижения их стоимости. Используя предварительное натяжение в затяжках, можно существенно снизить внутренние усилия в несущих арках, повлиять на распределение изгибающего момента по длине арки и уменьшить значение перемещений [3, 4]. В ряде работ [5–8] сделан вывод о том, что системы с верным расположением затяжек являются более экономичными по сравнению с другими вариантами.



Материалы и методы

В качестве объекта исследования было выбрано арочное покрытие сложной геометрии, напоминающее гиперболический параболоид (рис. 1).

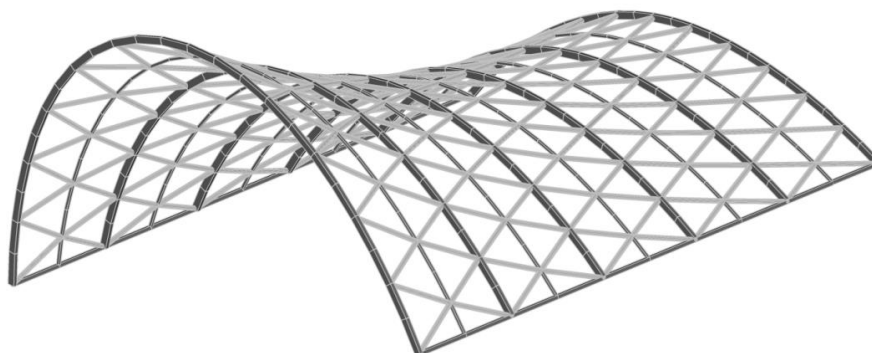


Рис. 1. Вид исследуемого арочного покрытия

Пролет конструкции составляет 30 метров, а стрела подъема арок варьируется от 15,0 до 6,0 м. Шаг арок 3,0 м, арки делятся на основные, опирающиеся на колонны, и второстепенные, которые опираются на балки. В качестве прогонов используются диагональные элементы в виде сетки с треугольной решеткой. В арочную конструкцию вводилась система веерных затяжек, величина предварительного напряжения которых подбиралась в различных вариантах таким образом, чтобы на последнем этапе нагружения при самом неблагоприятном сочетании нагрузок затяжки не выключались из работы (рис. 1 цв. вклейки) и распределение моментов по длине арки было оптимальным.

В статье рассмотрено 5 вариантов расчетных схем (рис. 2):

- простая арка с опорными неподвижными шарнирами;
- арка с жесткой затяжкой и одной шарнирно-подвижной опорой;
- арка с одним опорно-подвижным шарниром и комбинированной системой затяжек – нижние затяжки приняты жесткими, остальные – гибкие с предварительным натяжением;
- арки с системой предварительно-напряженных веерных затяжек и двумя видами опорных шарниров.

Согласно рекомендациям проводимых ранее исследований [4], высота расположения точки схождения для веерных затяжек принималась равной половине стрелы подъема арки.

Статический нелинейный расчет конструкций арочного покрытия выполнен в соответствии с действующими нормативными положениями (СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»; СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции») по первому и второму предельному состоянию на самый неблагоприятный вариант из комбинации расчетных сочетаний нагрузок с помощью программного комплекса «SCAD++». Для расчета была создана пространственная КЭ-модель (рис. 2 цв. вклейки), учитывающая геометрические параметры и характер распределения нагрузок (собственный вес, вес покрытия, снеговая нагрузка по IV снеговому району, ветровая нагрузка по I ветровому району) с учетом геометрической нелинейности, применено 5 этапов нагружения. В конструкции применяются трубы прямоугольного, квадратного и круглого сечения из стали С255, канат двойной свивки из стали С355.

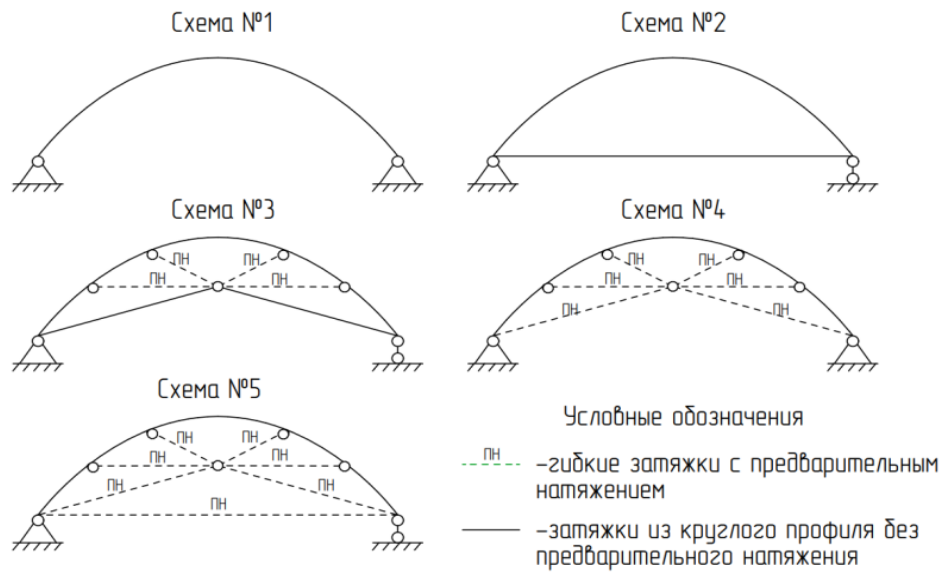


Рис. 2. Варианты расчетных схем с различными комбинациями затяжек и опорных шарниров

Результаты

В работе проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния арочно-вантовой комбинированной системы с веерными предварительно-напряженными затяжками. Проведено сравнение полученных результатов, сделан выбор оптимального варианта по материалоемкости (табл.). Графики изменения изгибающих моментов в сечениях несущих арок (рис. 3, 4) демонстрируют эффект выравнивания усилий по длине арки от введения в конструкцию системы веерных затяжек. На рис. 3 цв. вклейки представлено цветное отображение величин продольных усилий, изгибающих моментов и вертикальных перемещений, возникающих в элементах конструкции наиболее оптимального варианта при самом неблагоприятном сочетании нагрузок (снег на половину покрытия).

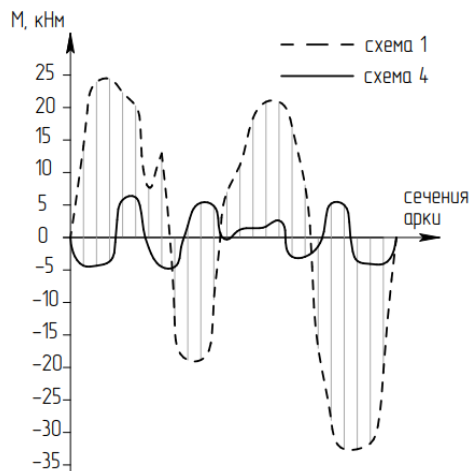


Рис. 3. График распределения изгибающих моментов в сечениях арки для схем с шарнирно-неподвижными опорами

**К СТАТЬЕ Н. Ю. ТРЯНИНОЙ, Е. Ю. КОРОЛЕВОЙ
«РАБОТА АРОЧНО-ВАНТОВОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
С ВЕЕРНЫМИ ЗАТЯЖКАМИ»**

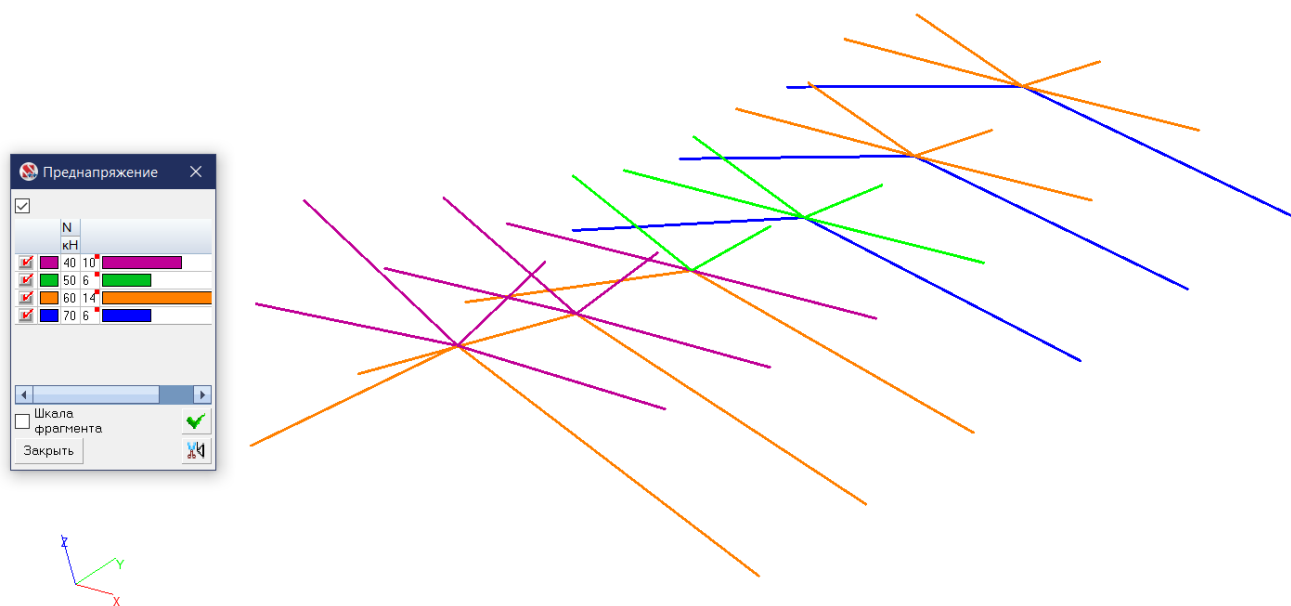


Рис. 1. Схема предварительного напряжения затяжек с цветовым отображением усилий

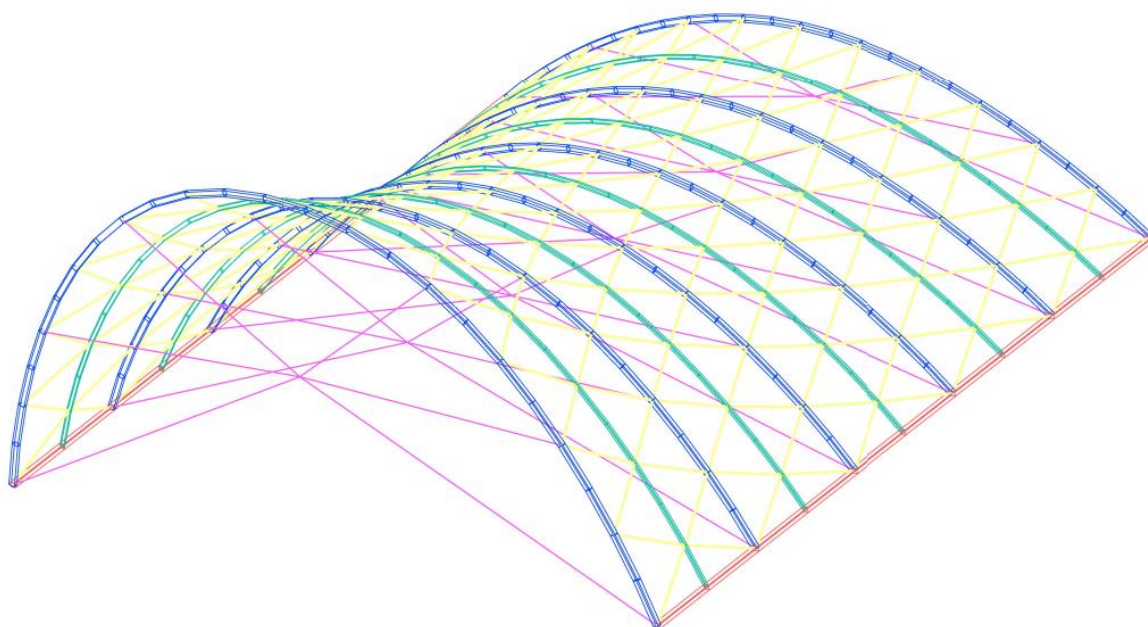
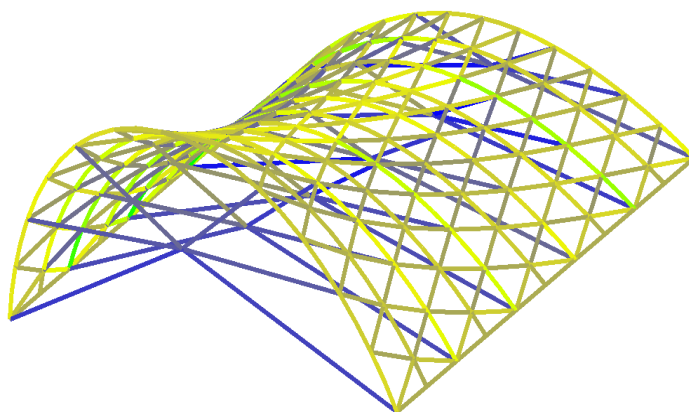
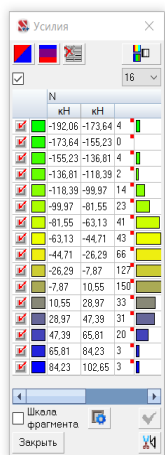
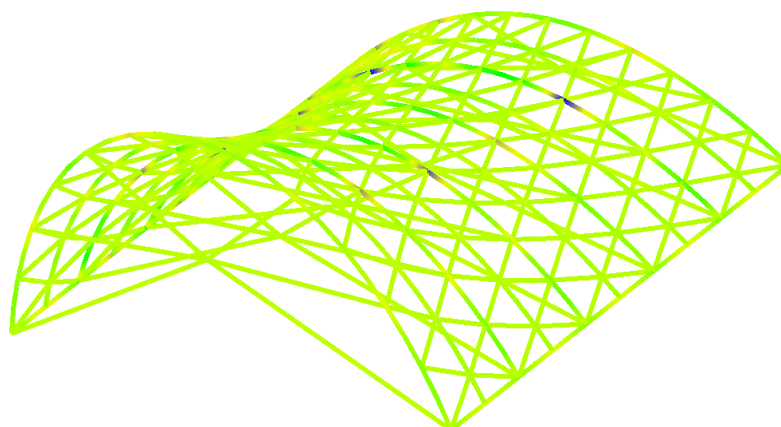
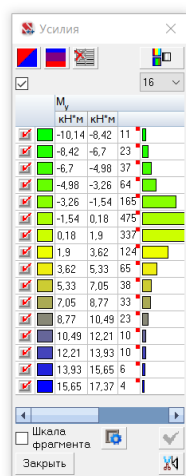


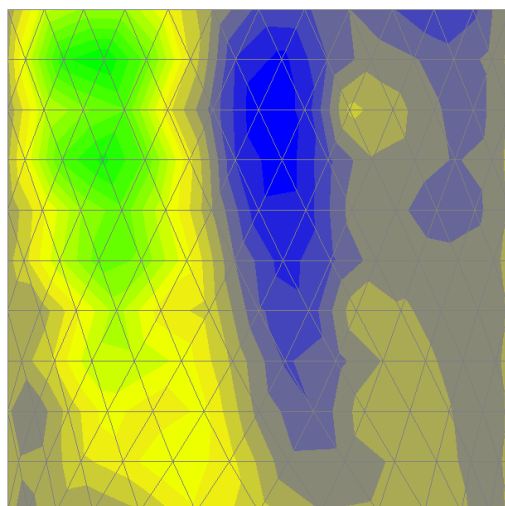
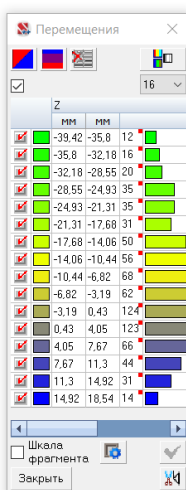
Рис. 2. Пространственная стержневая КЭ-модель арочной вантовой конструкции (система затяжек выделена сиреневым цветом)



a



б



в

Рис. 3. Цветовое отображение для четвертой схемы (снег на половину пролета): *a* – значений продольных сил; *б* – значений изгибающих моментов; *в* – значений перемещений

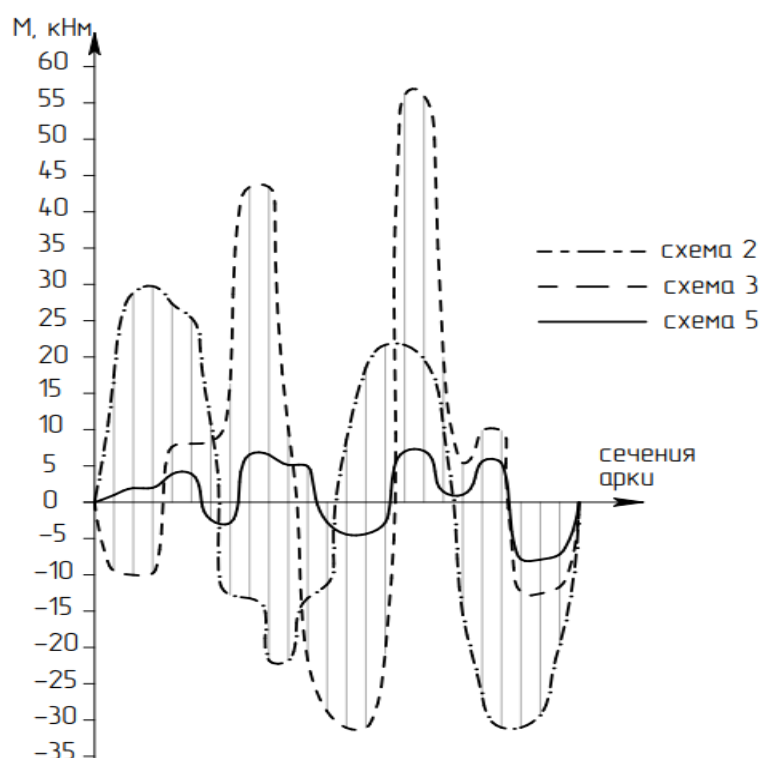


Рис. 4. График распределения изгибающих моментов в сечениях арки для схем с одной шарнирно-подвижной опорой

Таблица

Наименования параметров	Схема № 1	Схема № 2	Схема № 3	Схема № 4	Схема № 5
N_{max} арок, кН	-256	-264	-265	-192	-263
N_{max} затяжек, кН	-	174	243	103	180
M_{max} , кНм	-101	113	87	15,65	35
Z_{max} , мм	-81	-76	-37	-39	-64
Сечение основных арок	□400x200x6,5	□400x200x7,0	□380x220x7,5	□160x140x6,0	□240x160x7,5
Сечение промежуточн. арок	□240x120x4,5	□200x120x4,0	□150x130x5,5	□140x100x4,0	□150x130x5,5
Сечение опорных балок	□200x6,0	□200x7,0	□200x4,0	□200x4,0	□200x4,0
Сечение элементов сетки	○168x3,0	○219x3,2	○127x3,0	○114x3,0	○102x3,0
Сечение затяжек	-	○219x4,0	○127x4,0 ○152x4,5 ○159x4,5 Ø 44,5 Ø 50,5	Ø 13,5 Ø 17,0 Ø 18,0	Ø 14,0 Ø 21,0 Ø 24,0 Ø 26,0
Предварительное натяжение, кН	-	-	40, 50, 60	40, 50, 60, 70	30, 80, 100, 120, 130
Масса конструкции, кг	29637	40976	35374	18029	21865



Выводы:

1. Используя предварительное натяжение в веерных затяжках, можно существенно улучшить напряженно-деформированное состояние несущих арок. При этом значительно уменьшаются изгибающие моменты и выравниваются их значения по абсолютной величине по длине арки. Особенно наглядно это продемонстрировано на схеме с двумя неподвижными опорными шарнирами.

2. Вариант с веерными предварительно-напряженными затяжками и неподвижными опорами оказался самым лучшим по всем ключевым прочностным и деформационным характеристикам: минимальные перемещения (высокая жесткость), наименьшие продольные усилия, изгибающие моменты, самая низкая материалоемкость. Однако он может использоваться только там, где есть возможность для восприятия распора другими конструкциями: пилонами, контрфорсами, плитами перекрытия, мощными фундаментами.

3. В варианте с одним подвижным опорным шарниром (схема 5) распор воспринимается нижней предварительно-напряженной затяжкой. Такая система также оказалась достаточно эффективной, здесь масса снижается на 47 % относительно наиболее невыгодного по материалоемкости варианта конструкции.

4. Если сравнивать арки с неподвижными опорными шарнирами, то вариант с предварительно-напряженными веерными затяжками (схема 4) оказывается лучше на 39 % по материалоемкости по сравнению с традиционным решением (схема 1).

5. Результат сравнения арок с одной подвижной шарнирной опорой показал также преимущество системы с веерными затяжками (схема 5) – выигрыш по массе 47 %, на втором месте 3 вариант – 14 %, по сравнению с традиционным решением (схема 2).

6. В исследуемых системах была подобрана оптимальная величина предварительного натяжения затяжек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ибрагимов, А. М. Проблемы применения и проектирования арочных комбинированных систем / А. М. Ибрагимов, Л. Ю. Гнедина, В. В. Долгушева // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2021. – № 2. – С. 25–35. – ISSN 2542-114X. DOI 10.25686/2542-114X.2021.2.25.

2. Михайлов, В. В. Предварительно напряженные комбинированные стержневые и вантовые конструкции : учебное пособие / В. В. Михайлов. – Москва : АСВ, 2002. – 256 с. – ISBN 5-93093-137-2.

3. Трянина, Н. Ю. Исследование работы арочных конструкций с системой наклонных тяг / Н. Ю. Трянина, М. А. Карзанов // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2011. – № 2. – С. 16–19.

4. Королева, Е. Ю. Исследование работы сетчатого арочного свода с системой сходящихся затяжек / Е. Ю. Королева, Н. Ю. Трянина // Международная конференция Нижегородского Фестиваля науки : сборник тезисов докладов, Нижний Новгород, 24–25 октября 2024 года. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2025. – С. 104–105.

5. Шухов, В. Г. Избранные труды. Строительная механика / В. Г. Шухов ; под редакцией А. Ю. Ишлинского. – Москва : Наука, 1977. – 193 с.



6. Суворовцев, Б. А. Особенности проектирования пролетных строений мостов комбинированных систем с гибкими подвесками / Б. А. Суворовцев // Современные технологии. Анализ. Моделирование. – 2017. – № 1. – С. 219–224.

7. Ибрагимов, А. М. Сравнительный анализ вариантов конструктивных решений пологих арочных покрытий зданий / А. М. Ибрагимов, И. С. Кукушкин // Вестник МГСУ. – 2014. – № 3. – С. 59–66.

8. Долгушева, В. В. Сравнение работы арочно-вантовых комбинированных систем двух типов с простыми арками / В. В. Долгушева, А. М. Ибрагимов. – Текст : электронный // Инженерный вестник Дона : электронный журнал. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7739. – Дата публикации: 2022. – ISSN 2073-8633.

TRYANINA Nadezhda Yuryevna, candidate of technical sciences, professor of the chair of theory of structures and technical mechanics; KOROLEVA Elizaveta Yuryevna, master degree student of the chair of theory of structures and technical mechanics

THE OPERATION OF THE ARCH-CABLE-STAY COMBINED SYSTEM WITH FAN-SHAPED TIES

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

Russia, 603952, Nizhny Novgorod, str. Ilyinskaya, d. 65.

Tel.: (831) 430-54-96; e-mail: tstm@nngasu.ru

Key words: the arch-cable-stay combined system, fan-shaped ties, pre-tensioning forces, bottom rope, longitudinal force and bending moment in the arch, geometric nonlinearity.

The article discusses the issue of reducing the metal consumption of mesh arch coverings by introducing pre-stressed fan-shaped ties. A comparative assessment of the stress-strain state of the structural elements is given, depending on the type of support hinges and the tension of the ties. Based on comprehensive numerical modeling, rational design parameters are determined to reduce material consumption. Practical recommendations are provided for optimizing the design process for such systems.

REFERENCES

1. Ibragimov A. M., Gnedina L. Yu., Dolgusheva V. V. Problemy primeneniya i proektirovaniya arochnykh kombinirovannykh system [Problems of application and design of arch combined systems]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii [Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Structures. Technologies], 2021, № 2, P. 25–35. ISSN 2542-114X. DOI 10.25686/2542-114X.2021.2.25.

2. Mikhaylov V. V. Predvaritelno napryazhennyye kombinirovannyye sterzhnevyye i vantovyye konstruktsii [Prestressed combined bar and cable structures]: uchebnoe posobie. Moscow, ASV, 2002, 256 p. ISBN 5-93093-137-2.

3. Tryanina N. Yu., Karzanov M. A. Issledovanie raboty arochnykh konstruktsiy s sistemoy naklonnykh tyag [Investigation of the behavior of arch structures with a system of inclined ties]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhny Novgorod, Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet, 2011, № 2, P. 16–19.

4. Koroleva E. Yu., Tryanina N. Yu. Issledovanie raboty setchatogo arochnogo svoda s sistemoy skhodyashchikhsya zatyazhek [Investigation of the behavior of a latticed arch vault with a system of converging tie-downs]. Mezhdunarodnaya konferentsiya Nizhegorodskogo Festivala nauki [International Conference of the Nizhny Novgorod Science Festival]: sbornik



tezisov dokladov. Nizhny Novgorod, 24–25 oktyabrya 2024 goda. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2025, P. 104–105.

5. Shukhov V. G. Izbrannye trudy. Stroitelnaya mekhanika [Selected works. Structural mechanics]. pod redaktsiyey A. Yu. Ishlinskogo. Moscow, Nauka, 1977, 193 p.

6. Suvorovtsev B. A. Osobennosti proektirovaniya proletnykh stroeniy mostov kombinirovannykh sistem s gibkimi podveskami [Design features of bridge superstructures of combined systems with flexible hangers]. *Sovremennyye tekhnologii. Analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. Analysis. Modeling], 2017, № 1, P. 219–224.

7. Ibragimov A. M., Kukushkin I. S. Sravnitelnyy analiz variantov konstruktivnykh resheniy pologikh arochnykh pokrytiy zdaniy [Comparative analysis of design solutions for shallow arch roof structures]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, № 3, P. 59–66.

8. Dolgusheva V. V., Ibragimov A. M. Sravnenie raboty arochno-vantovykh kombinirovannykh sistem dvukh tipov s prostymi arkami [Comparison of the behavior of arch-cable-stayed combined systems of two types with simple arches]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don]. 2022, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7739. ISSN 2073-8633.

© Н. Ю. Трянина, Е. Ю. Королева, 2026

Получено: 14.11.2025 г.