

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.07:624.074

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.37-49

Экспериментальное и численное сравнение напряженно-деформированного состояния арки и комбинированной арочной конструкции

Вера Витальевна Долгушева, Александр Майорович Ибрагимов

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Экспериментальные исследования натуральных строительных конструкций покрытий трудоемки, имеют высокую стоимость, не предполагают размещение в лабораториях из-за больших габаритов. В связи с этим часто испытания строительных конструкций проводятся на масштабных моделях. Работа комбинированных арочных систем малоизучена, расчетным моделям таких систем требуется экспериментальное подтверждение. Представленное экспериментальное исследование направлено на получение данных о действительной работе арки и комбинированной арочной конструкции с лучевыми затяжками для последующего сопоставления экспериментальных данных с расчетными моделями.

Материалы и методы. Экспериментальная модель разработана с использованием смешанного подобия в масштабе 1:10. Физико-механические характеристики материалов модели определены по стандартным методикам. Разработаны и описаны способ создания заданного преднапряжения в затяжках арки и методика ее испытания. Расчетные модели реализованы в программном конечно-элементном комплексе ЛИРА-САПР с учетом геометрически нелинейного характера работы конструкции, напряжения в сечениях установлены с помощью процессора «Конструктор сечений».

Результаты. По результатам экспериментальных исследований и численных расчетов получены напряжения и перемещения в сечениях арок. Показаны перемещения схемы, графики соответствия экспериментальных данных и результатов расчета. Проанализированы направления для улучшения экспериментальных моделей подобных комбинированных систем с затяжками.

Выводы. Арочная комбинированная система с лучевыми затяжками позволяет выровнять значения напряжений в поясе арки в сравнении с аркой без затяжек. Максимальные напряжения в сечениях арки и максимальные прогибы в середине пролета арки снижаются в 3 раза при устройстве затяжек.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: комбинированные конструкции, стальная арка с лучевыми затяжками, преднапряжение, арочная экспериментальная модель, масштабный эксперимент, арочно-вантовая система, геометрическая нелинейность, ЛИРА-САПР, моделирование вант

Благодарности. Авторы выражают благодарность директору ИПГС, заведующему кафедрой МДК, доктору технических наук А.Р. Туснину; заведующему кафедрой ЖБК, доктору технических наук А.Г. Тамразяну; заместителю директора НИИ ЭМ О.А. Корневу; заведующему лабораторией испытаний строительных конструкций материалов и изделий В.А. Какуше; старшему преподавателю кафедры МДК Т.В. Долгушеву; преподавателю кафедры ЖБК М.В. Кудрявцеву за консультации и поддержку в подготовке экспериментального исследования; выпускнику кафедры сварки, диагностики и специальной робототехники МГТУ им. Н.Э. Баумана Е.А. Сутягину за помощь в изготовлении экспериментальной модели; сотрудникам лаборатории испытаний строительных конструкций инженерам М.В. Кудрявцеву, Х.Х. Абдул Ахада, М.З. Шарипову, Ф.М. Вардак, Ю.А. Жидкову, аспиранту кафедры МДК П.А. Спасскому за помощь в проведении экспериментального исследования; рецензентам за проявленное внимание к работе и ценные замечания. Экспериментальные исследования проведены в рамках гранта НИУ МГСУ для аспирантов на проведение физических экспериментов в 2023 г. при поддержке сотрудников лаборатории испытаний строительных конструкций материалов и изделий НИИ ЭМ в лаборатории каменных и железобетонных конструкций.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Долгушева В.В., Ибрагимов А.М. Экспериментальное и численное сравнение напряженно-деформированного состояния арки и комбинированной арочной конструкции // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 37–49. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.37-49

Автор, ответственный за переписку: Вера Витальевна Долгушева, DolgushevaVV@yandex.ru.

Experimental and numerical comparison of the stress-strain state of an arch and a combined arch structure

Vera V. Dolgusheva, Alexander M. Ibragimov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Experimental research projects of full-scale building roof constructions are labour-intensive, high-cost, and do not require placement in laboratories due to their large size. In this regard, tests of building constructions are often carried out on scale models. The operation of combined arch systems is poorly studied; calculation models of such systems require experimental confirmation. The presented experimental research project is aimed at obtaining data on the actual operation of the arch and a combined arch structure with radial ties for subsequent comparison of experimental data with calculation models.

Materials and methods. The experimental model is developed using mixed similarity at a scale of 1:10. The physical and mechanical parameters of the model materials were determined using standard methods. A method for creating a given prestress in the arch ties and a method for testing it are developed and described. The calculation models are implemented in the LIRA-SAPR finite element software package, considering the geometrically nonlinear structure operation, the stresses in the arch sections are determined using the "Section Designer" processor.

Results. Based on the results of experimental studies and numerical calculations, stresses and displacements in arch sections were obtained. The movements of the circuit, graphs of correspondence between experimental data and calculation results are shown. Directions for improving experimental models of such combined systems with ties are analyzed.

Conclusions. An arch combined system with radial ties allows to equalize the stress values in the arch belt in comparison with an arch without ties. The maximum stresses in the arch sections and the maximum deflections in the middle of the arch span are reduced by 3 times when tightening is installed.

KEYWORDS: combined structures, steel arch with a tie, prestressing, arch experimental model, scale test, cable roof system supported by arches, geometrical nonlinearity, LIRA-SAPR, prestressing using temperature, cable stay modelling

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the director of the Institute of Industrial and Civil Construction, head of the Department of Metal and Wooden Structures (MWS), Doctor of Technical Sciences. A.R. Tusnin; Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures (RCS), Doctor of Technical Sciences A.G. Tamrazyan; Deputy Director of the Scientific Research Institute of Experimental Mechanics (SRI EM) O.A. Kornev; the head of the laboratory for testing building structures, materials and products, V.A. Kakusha; senior teacher of the MWS department T.V. Dolgushev; teacher of the RCS department, M.V. Kudryavtsev for consultations and support in the preparation of the experimental study; graduate of the Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics at Moscow State Technical University. N.E. Bauman E.A. Sutyagin for assistance in making the experimental model; employees of the laboratory for testing building structures, engineers M.V. Kudryavtsev, H.H. Abdul Ahad, M.Z. Sharipov, F.M. Vardak, Y.A. Zhidkov, postgraduate student of the MWS department P.A. Spassky for assistance in conducting the experimental research; reviewers for their attention to the work and valuable comments. Experimental studies were carried out within the framework of a grant from the National Research University MGSU for graduate students to conduct physical experiments in 2023 with the support of employees of the laboratory for testing building structures of materials and products of the SRI EM in the laboratory of Stone and Reinforced Concrete Structures.

FOR CITATION: Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M. Experimental and numerical comparison of the stress-strain state of an arch and a combined arch structure. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):37-49. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.37-49 (rus.).

Corresponding author: Vera V. Dolgusheva, DolgushevaVV@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Область применения арочных систем имеет широкий диапазон: в составе несущих конструкций арки часто используют в протяженных зданиях, таких как спортивные комплексы (катки, баскетбольные залы, конькобежные центры и др.), крытые рынки, галереи или холлы торговых центров, складские помещения, ангары, промышленные здания. Наибольшее распространение арочные комбинированные системы получили при строительстве мостов [1–7].

В статьях [8, 9] приведены основные виды арочно-вантовых систем и примеры их применения в качестве покрытий общественных зданий, указаны преимущества комбинированных систем в сравнении с простыми арками и ключевые проблемы, которые

возникают при их проектировании. В числе преимуществ отмечается, что комбинированные конструкции обладают высокой несущей способностью при относительно небольшом весе [8, 10, 11]. Среди проблем, связанных с их проектированием, выделена малоизученность различных арочно-вантовых систем из-за недостаточности или отсутствия детальных теоретических и экспериментальных исследований.

В 2021 г. был выпущен СП 494.1325800¹, в котором есть раздел, посвященный проектированию комбинированных систем, в том числе арочных. В разделе представлены варианты арочных комбинированных

¹ СП 494.1325800.2020. Конструкции покрытий пространственные металлические. Правила проектирования. 2021. 77 с.

систем, даны некоторые рекомендации по их конструированию, но не приведены методики подбора натяжения в затяжках для достижения рационального по металлоемкости конструктивного решения. Среди основных арочно-вантовых комбинированных систем наиболее рациональными с точки зрения металлоемкости являются арки с центрально сосредоточенными (радиальными) затяжками с соотношением стрелы подъема к пролету $f:L = 1:3$ и арки с лучевыми затяжками с соотношением $f:L = 1:4$ [12]. В публикации [13] показаны результаты исследования работы арки с лучевыми затяжками с соотношением $f:L = 1:4$. Рациональное по металлоемкости решение арки с лучевыми затяжками пролетом 30 м достигается при выполнении следующих условий: восемь панелей и затяжек, пояс арки из квадратной трубы, определенное распределение преднапряжения в затяжках.

Экспериментальные исследования натуральных строительных конструкций покрытий трудоемки, имеют высокую стоимость, не предполагают размещение в лабораториях из-за больших габаритов, однако такие испытания хорошо согласуются с численными расчетами [14, 15]. Поэтому часто испытания строительных конструкций покрытий проводятся на масштабных моделях [16–25].

Цель настоящего экспериментального исследования — сравнение работы арки без затяжек с арочной комбинированной системой с лучевыми затяж-

ками и сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов. При выполнении экспериментального и численного исследования решены следующие задачи: определены физико-механические характеристики материалов модели (проверка геометрических размеров и веса материалов, испытание образцов материала для арок и прогонов на растяжение, испытание канатов (затяжек) на растяжение), экспериментально исследованы арки с лучевыми затяжками и арки без затяжек, проведена адаптация расчетных моделей по фактическим габаритам и физико-механическим характеристикам экспериментальной модели, осуществлено сравнение и анализ экспериментальных и расчетных данных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент покрытия в виде трех арочных комбинированных систем (рис. 1). Арки объединены в пространственный блок с помощью прогонов и связей. Габариты физической модели были подобраны по исходной расчетной модели арки с лучевыми затяжками, в которой пролет арки составлял 30 м, шаг арок — 6 м, стрела подъема — четверть пролета, т.е. 7,5 м [13, 26]. В исходной расчетной модели принято 8 панелей, 8 затяжек, пояс арки жесткий полигональный кругового очертания. Опоры шарнирно-непод-

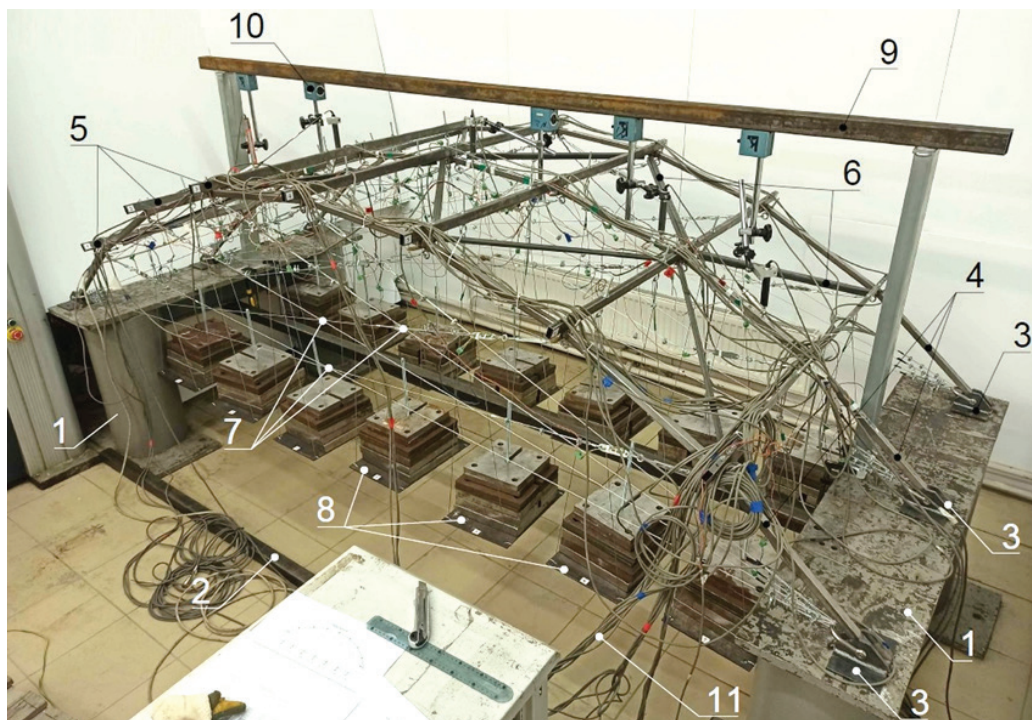


Рис. 1. Экспериментальная модель: 1 — металлические опоры; 2 — вспомогательные балки; 3 — опорный узел; 4 — арки; 5 — прогоны; 6 — связи; 7 — затяжки; 8 — грузовые площадки с грузами; 9 — вспомогательная балка для фиксации прогибомеров; 10 — прогибомеры; 11 — провода для подключения тензорезисторов к тензостанции

Fig. 1. Experimental model: 1 — metal pole; 2 — auxiliary beam; 3 — bearing joint; 4 — arches; 5 — girders; 6 — lacing; 7 — ties; 8 — load boards with loads; 9 — auxiliary beam for fixing deflection meters; 10 — deflectometer; 11 — wires for connecting strain gauges to the strain gauge station

Табл. 1. Усилия преднапряжения в затяжках центральной арки

Table 1. Prestressing forces in the central arch ties

Номер затяжки Tie number	1	2	3	4	5	6	7	8
Требуемое преднапряжение, кН Required prestress, kN	0,45	0,30	0,45	0,55	0,55	0,45	0,30	0,45
Заданное преднапряжение, кН Set prestress, kN	0,40	0,31	0,47	0,58	0,53	0,43	0,28	0,38

вижные, нумерация затяжек представлена на рис. 2, а исходное преднапряжение затяжек — в табл. 1. Пояс арки выполнен из квадратной трубы 200 × 6 мм по ГОСТ 30245², к нему закреплены восемь затяжек из стального троса диаметром Ø14 мм по ГОСТ 3064³, сечение однопролетных разрезных прогонов и крестовых связей выполнено из квадратной трубы 250 × 8 мм и 120 × 4 мм согласно ГОСТ 30245².

В соответствии с основными типами подобия экспериментальных моделей строительных конструкций и с учетом габаритов помещений лаборатории было принято смешанное подобие физической модели [27] с геометрическим масштабом 10:1. Для выбранного вида подобия характерно следующее: габаритные размеры и сечения элементов физической и численной модели геометрически подобны, подобные граничные условия, качественно и количественно подобны воздействия, материалы одинаковы, все безразмерные величины (относительные деформации, коэффициент Пуассона и т.п.) и масштабные коэффициенты величин с одинаковой размерностью равны. При заданном критерии подобия для физической модели требовались сечения пояса арок 20 × 20 × 0,6 мм, Ø затяжек — 1,4 мм, прогонов 25 × 25 × 0,8 мм и связей 12 × 12 × 0,4 мм. Однако из-за ограниченных типоразмеров в соответствующих аналогичных ГОСТах и отсутствия наличия у поставщиков требуемых типоразмеров элементов модели потребовалась корректировка физической модели по существующему размеру металлопроката и тросов. При изготовлении поясов арок необходима точность при нарезании панелей до десятых долей миллиметра и сварка поясов с использованием шаблона, но доступна была точность изготовления до 1 мм и сварка на сварочном столе. Поэтому пролет физической модели составил 3,113 м вместо 3 м (относительная погрешность 3,8 %), стрела подъема получилась равной 0,653 м вместо 0,6 м (относительная погрешность 7,2 %). Требовалась корректировка численной модели из-за полученной разницы фактических размеров с теоретическими. Пояс арки физической модели выполнен из квадратной трубы 20 × 1 мм

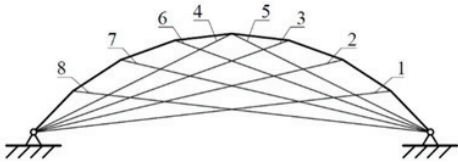


Рис. 2. Нумерация затяжек

Fig. 2. Numbering of ties

(ГОСТ 8639–82⁴), затяжки — из стального троса диаметром Ø2 мм (DIN 3055⁵), сечение однопролетных разрезных прогонов — из прямоугольной трубы 20 × 15 × 1 (ГОСТ 8645⁶), связи — из равнополочного уголка 20 × 2 мм (ГОСТ 8509⁷).

Предварительное натяжение в затяжках было задано с помощью талрепов, а измерение заданного преднапряжения выполнено с помощью заранее оттарированных металлических пластин с размещенными на них тензорезисторами. Посредством карабинов пластина закреплялась к затяжке и талрепу, который соединял затяжку с поясом арки через рым-болт (рис. 3). Тарирование пластин заключалось в нагружении и разгрузке каждой пластины до 2000 Н по 3 раза на универсальной электромеханической машине (Instron 3382, производитель Instron Corporation, Норвуд, Массачусетс, США). По результатам тарирования для каждой пластины по линии тренда были получены коэффициенты линейного графика зависимости усилий от относительных деформаций (рис. 4). Полученные коэффициенты для преобразования измеренных относительных деформаций в металлические пластинах в усилия введены в программное обеспечение для тензостанций. При проведении эксперимента оператор мог в режиме реального времени наблюдать величины заданных усилий преднапряжения в затяжках.

Для загрузки физической модели были изготовлены площадки для опирания грузов (рис. 1). Площадки подвешены к прогонам в двух точках.

⁴ ГОСТ 8639–82. Трубы стальные квадратные. Сортамент (с Изменениями № 14). 2006. 8 с.

⁵ DIN 3055. Drahtseile aus Stahldrehen. Rundlitzenseil 6 × 7. 1972.

⁶ ГОСТ 8645–68. Трубы стальные прямоугольные. Сортамент. 2004. 18 с.

⁷ ГОСТ 8509–93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент. 2005. 10 с.

² ГОСТ 30245–2012. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия. 2014. 42 с.

³ ГОСТ 3064–80. Канат одинарной свивки типа ТК конструкции 1 × 37 (1 + 6 + 12 + 18). 2014. 11 с.

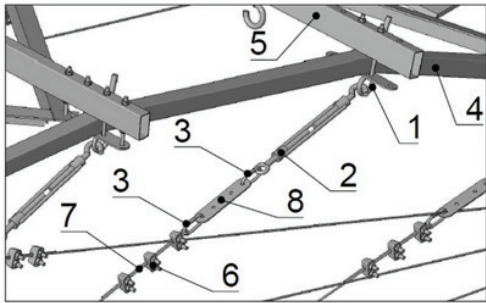


Рис. 3. Узел примыкания затяжек к поясу арок: 1 — рым-болт Ø6 мм; 2 — талреп Ø6 мм; 3 — карабин с муфтой Ø3 мм; 4 — пояс арки; 5 — прогон; 6 — зажим для каната Ø3 мм; 7 — затяжка Ø2 мм; 8 — металлическая пластина 80 × 17 × 1,5 мм

Fig. 3. The junction of the ties to the arch belt: 1 — ring-bolt Ø6 mm; 2 — strut Ø6 mm; 3 — carabiner with coupling Ø3 mm; 4 — arch belt; 5 — girder; 6 — rope clamp Ø3 mm; 7 — tie Ø2 mm; 8 — metal plate 80 × 17 × 1.5 mm

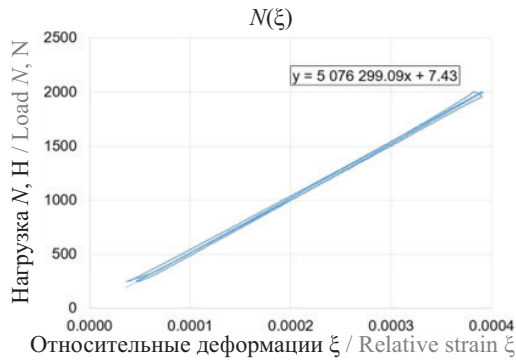


Рис. 4. График зависимости нагрузки от относительных деформаций на примере одной из 24 пластин

Fig. 4. Graph of load versus relative deformation using the example of one of 24 plates

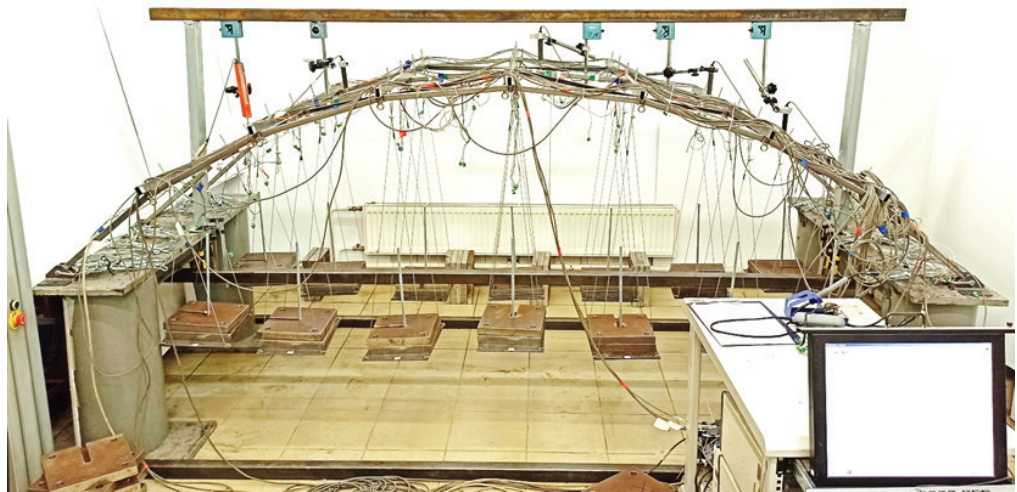


Рис. 5. Экспериментальная модель без затяжек

Fig. 5. Experimental model without ties

Таким образом, суммарная распределенная по длине прогона нагрузка от веса покрытия и снеговой загрузки преобразована в две сосредоточенные нагрузки с учетом масштабных коэффициентов. В качестве грузов использованы металлические пластины 24 × 24 × 3 см весом 12,556 кг. Арка с затяжками и арка без затяжек испытаны при равномерно распределенной нагрузке. На каждую грузовую площадку поэтапно были размещены по две пластины (рис. 5), суммарная нагрузка на экспериментальную модель составила 4,015 кН (401,5 кг). На каждом этапе выполнялась фиксация показаний тензорезисторов и прогибомеров в течение 5 мин с частотой 1 Гц. Информация передавалась на компьютерную станцию обработки данных, а далее экспортировалась в виде таблиц MS Excel.

Для последующего сравнения экспериментальных данных с результатами расчетов принята разница показаний тензорезисторов между последним этапом загрузки (совместное действие собственного веса, преднапряжения, веса грузовых площадок и всех грузов) и нулевым (совместное действие собственного веса и преднапряжения). Относительные деформации, полученные с применением тензорезисторов, преобразованы в нормальные напряжения с помощью модуля упругости.

При численном и экспериментальном исследовании акцент сделан на изучение работы комбинированной арочной конструкции в своей плоскости. На рис. 6 изображена схема размещения тензорезисторов для металла с базой 5 мм (марка FLA-5-11, производитель Tokyo Measuring Instruments Lab, Токио, Япония) и прогибомеров (тензометрические датчики линейных перемещений CDP-25, 89248-23, производитель Tokyo Measuring Instruments Lab, Токио, Япония) на поясе арки. Фиксация показаний 28 тензорезисторов на поясе арке, 24 тензорезисторов на металлических пластинах затяжек и 5 прогибомеров выполнена с по-

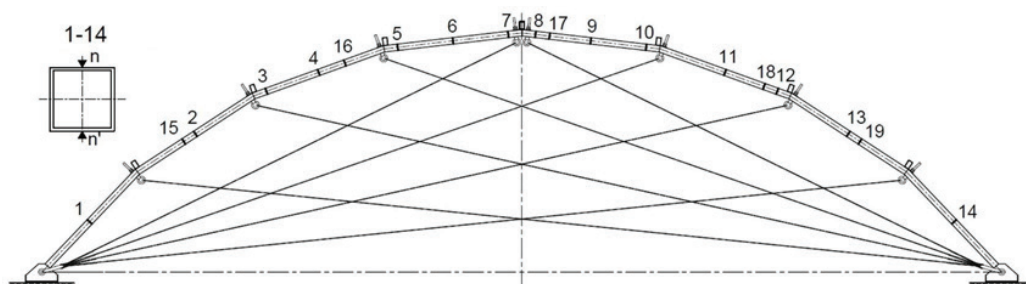


Рис. 6. Схема размещения тензорезисторов (сечения 1–14) и прогибомеров (15–19) на поясе центральной арки
Fig. 6. Layout of strain gauges (sections 1–14) and deflectometers (15–19) on the belt of the central arch

мощью двух тензостанций (модель SCXI-1001, производитель National Instruments, Будапешт, Венгрия). После подключения всех резисторов и прогибомеров к тензостанциям было задано преднапряжение всем затяжкам в последовательности: 4 и 5, 1 и 8, 3 и 6, 7 и 2 (рис. 2). Сначала задавалось преднапряжение всем затяжкам в центральной арке, после чего задано преднапряжение всем затяжкам крайних арок. Далее проводилась корректировка заданного преднапряжения сначала в центральной арке, а потом корректировалось преднапряжение в крайних арках до получения значений преднапряжения, близких к требуемым (табл. 1). При установке тензорезисторов на пояс арки на конструкцию уже оказывает влияние собственный вес. При задании или корректировке преднапряжения затяжек заданные значения в каждом нагружении незначительно отличались (табл. 1).

Физико-механические характеристики материалов модели определены по стандартным методикам. Проверка размеров образцов выполнена по требованиям ГОСТ 8639⁴ и ГОСТ 13663⁸, проверка веса образцов осуществлена взвешиванием на электронных весах (модель M-ER 326AFV LED, производитель Mercury WP Tech Group Co. LTD, Инчон, Южная Корея). Определение пределов пропорциональности и текучести, временного сопротивления, модуля упругости металла труб произведено по требованиям и методикам ГОСТ 535⁹, ГОСТ 7564¹⁰, ГОСТ 10006–80¹¹, ГОСТ 1497¹², ГОСТ 13663⁸. Установление модуля упругости и разрывного усилия проведено по тре-

бованиям и методикам ГОСТ 3241¹³ и руководства по применению стальных канатов¹⁴. Испытания образцов из труб и канатов выполнены на универсальной электромеханической машине Instron 3382.

Адаптированные численные модели построены по фактическим габаритам физической модели. В моделях задача решена в пространственной постановке с учетом геометрически нелинейного характера работы. Арки, связи, прогоны и затяжки изготовлены в виде стержневых конечных элементов № 310 (универсальный геометрически нелинейный стержень), размеры конечных элементов $\approx 0,05$ м. Пояс арки жесткий, сопряжение связей с прогонами шарнирное, сопряжение прогонов с арками жесткое. Физико-механические характеристики материалов модели приняты по результатам экспериментальных исследований. Схемы нагружений, точки приложения нагрузки, их значения соответствуют экспериментальной модели. Заданное перед испытаниями преднапряжение в расчетных моделях реализовано с помощью задания температурных нагрузок на затяжки по формуле:

$$T = \frac{N}{A \cdot \alpha \cdot E},$$

где T — требуемая температура; N — заданное усилие преднапряжения; A — расчетная площадь сечения всех проволок; α — коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости стального каната.

В качестве значений для сравнения с экспериментальными данными принята разница значений нормальных напряжений и перемещений, полученных в первом (совместное действие собственного веса, преднапряжения, веса грузовых площадок и грузов) и втором сочетаниях нагрузок (совместное действие собственного веса и преднапряжения). Нормальные напряжения в сечениях расчетных моделей получены в системе «Конструктор сечений» с помощью импорта полученных в ПК ЛИРА-САПР усилий (рис. 7).

⁸ ГОСТ 13663–86. Трубы стальные профильные. Технические требования. 2001. 8 с.

⁹ ГОСТ 535–2005. Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия. 2009. 19 с.

¹⁰ ГОСТ 7564–97. Прокат. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний. 2009. 19 с.

¹¹ ГОСТ 10006–80 (ИСО 6892–84). Трубы металлические. Метод испытания на растяжение (с Изменениями № 3, 4). 2010. 12 с.

¹² ГОСТ 1497–84 (ИСО 6892–84, СТ СЭВ 471–88). Металлы. Методы испытаний на растяжение (с Поправками и Изменениями № 1, 2, 3). 2008. 20 с.

¹³ ГОСТ 3241–91. Канаты стальные. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3). 2008. 17 с.

¹⁴ Руководство по применению стальных канатов и анкерных устройств в конструкциях зданий и сооружений. М. : Стройиздат, 1978. 96 с.

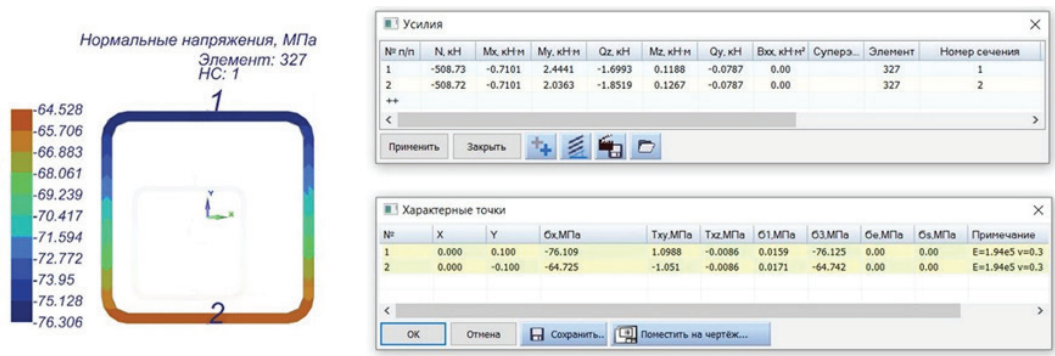


Рис. 7. Расчет нормальных напряжений в сечениях модели в системе «Конструктор сечений»

Fig. 7. Calculation of normal stresses in model sections in the “Section Designer” system

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам проверки размеров образцов профилей и определения физико-механических характеристик модели установлено следующее: размеры образцов не превышают предельные отклонения, однако вес профилей для пояса арки меньше на 9,8 %, чем в ГОСТ 8639⁴, а для прогонов на 8,9 % меньше, чем в ГОСТ 8645⁶; среднеарифметическое значение предела текучести σ_m для образцов материала пояса арки и прогонов составляет 355 и 279 Н/мм², а временное сопротивление σ_{max} 371 и 330 Н/мм²; среднеарифметическое значение модуля упругости каната $E = 144\,393$ Н/мм²; среднеарифметическое максимальное усилие разрыва образцов каната 3137 Н. Материал пояса арок соответствует марке стали Ст3 (ГОСТ 13663⁸), для которой $\sigma_m \geq 216$ Н/мм², $\sigma_{max} \geq 353$ Н/мм², а материал прогонов соответствует марке стали Ст2, для которой $\sigma_m \geq 206$ Н/мм², $\sigma_{max} \geq 333$ Н/мм². Модуль упругости для материала пояса арок принят $E = 194\,000$ Н/мм², для материала прогонов — $E = 198\,000$ Н/мм² [28]. Фактическое усилие разрыва каната больше, чем минимальное (2350 Н) и расчетное усилие разрыва (2610 Н) (DIN 3055⁵). Используемый трос соответствует стандарту DIN 3055⁵.

Вес модели покрытия без затяжек и с затяжками без учета метизов составляет 15,246 и 16,055 кг соответственно, с учетом метизов — 17,483 и 20,836 кг соответственно (в приведенные массы моделей не входит вес опорных плит с траверсами и такелажных скоб). Таким образом, в расчетных моделях при задании собственного веса был задан коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,15$ для модели без затяжек и $\gamma_f = 1,3$ для модели с затяжками.

На рис. 8, 9 показаны расчетные (синим цветом) и экспериментальные (красным цветом) значения нормальных напряжений и вертикальных перемещений, полученных на последнем этапе загрузки. Анализ данных позволяет заключить, что максимальные значения напряжений в арке с лучевыми затяжками уменьшаются в 2–3 раза в сравнении с аркой без затяжек, также в арке с лучевыми затяжками распределены равномернее (рис. 10). Деформа-

ции арки с лучевыми затяжками в середине пролета в 3 раза меньше в сравнении с аркой без затяжек.

В арке с затяжками меньше точек, попадающих в диапазон отклонения не более 20 % и выходящих за диапазон отклонения более 40 % (рис. 11, табл. 2). Расчетная модель арки без затяжек адекватно описывает поведение экспериментальной модели, однако в точках, где напряжения по модулю менее 10 Н/мм², наблюдается большое расхождение расчетов с экспериментом. В расчетной модели арки с лучевыми затяжками в сравнении с экспериментальными значениями отмечается больший разброс значений, но почти все точки находятся в пределах выделенных отклонений. При попытке нагружения арки без затяжек третьей грузовой пластиной наблюдалось визуально заметное деформирование арки (более 20 мм) в момент возникновения асимметричности нагрузки, в связи с этим нагружение третьей пластиной не использовалось. Данная попытка показала, что для арки без затяжек суммарная нагрузка более 4,015 кН может привести к наступлению второго предельного состояния (прогиб более 20,5 мм для арки пролетом 3,113 м), в то время как в арке с лучевыми затяжками при суммарной нагрузке 9,043 кН (рис. 1) максимальный прогиб составил 5,6 мм.

Разница в значениях расчетных и экспериментальных напряжений и деформаций могла возникнуть вследствие следующих факторов: каждая арка физической модели имеет небольшую разницу в геометрических размерах, а для расчетной модели были приняты одинаковые усредненные значения геометрических размеров для всех трех арок; в расчетных моделях не учитываются отверстия в арках и податливость в соединениях, которая возникает из-за использования талрепов, карабинов, зажимов, рым-болтов в затяжках и хомутов для закрепления прогонов к поясам арок; в расчетных моделях не учтен вес проводов, которые соединяют тензорезисторы с тензостанцией и закреплены на прогонах и центральной арке; в расчетных моделях применяется среднеарифметический вес металлических грузовых пластин, но их вес имеет разброс 0,144 кг, что составляет 1,2 %; косвенный тензометрический метод измерения заданного затяжкам

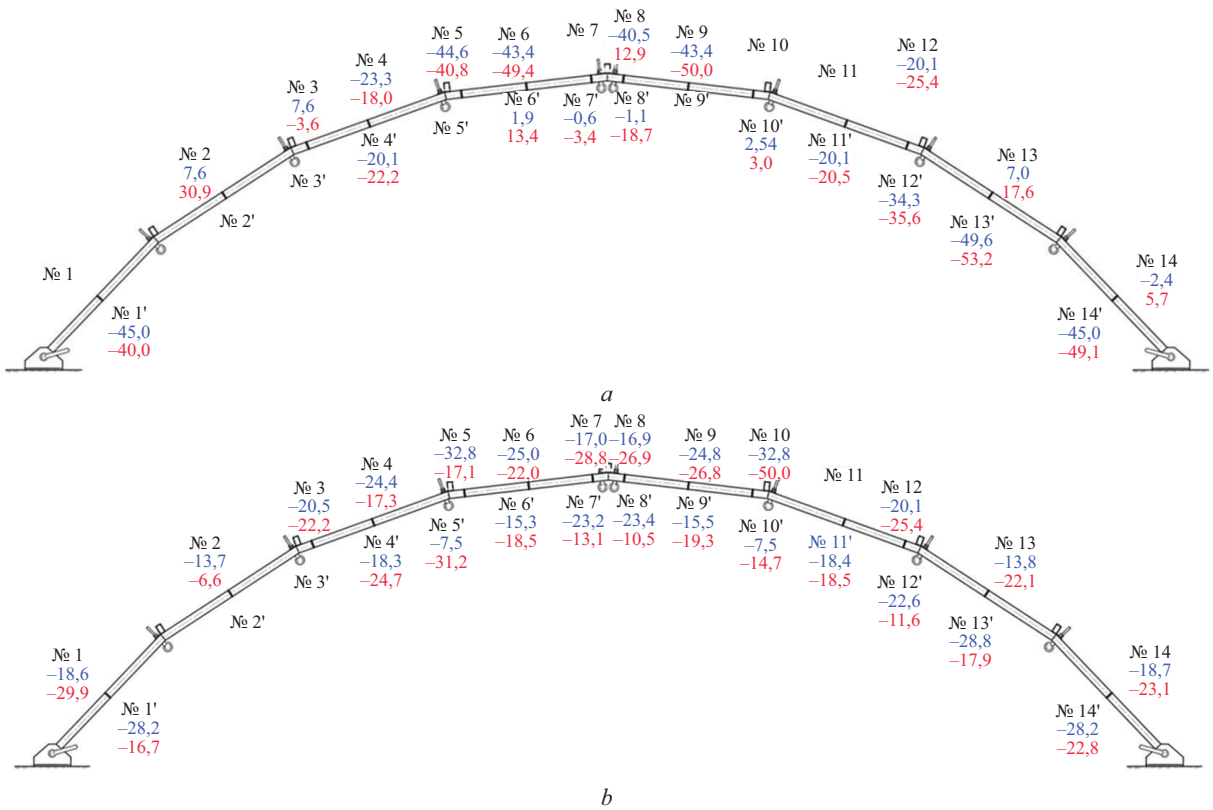


Рис. 8. Нормальные напряжения в сечениях арки, Н/мм²: *a* — арка без затяжек; *b* — арка с затяжками (затяжки условно не показаны)

Fig. 8. Normal stresses in arch sections, N/mm²: *a* — arch without a tie; *b* — arch with a tie

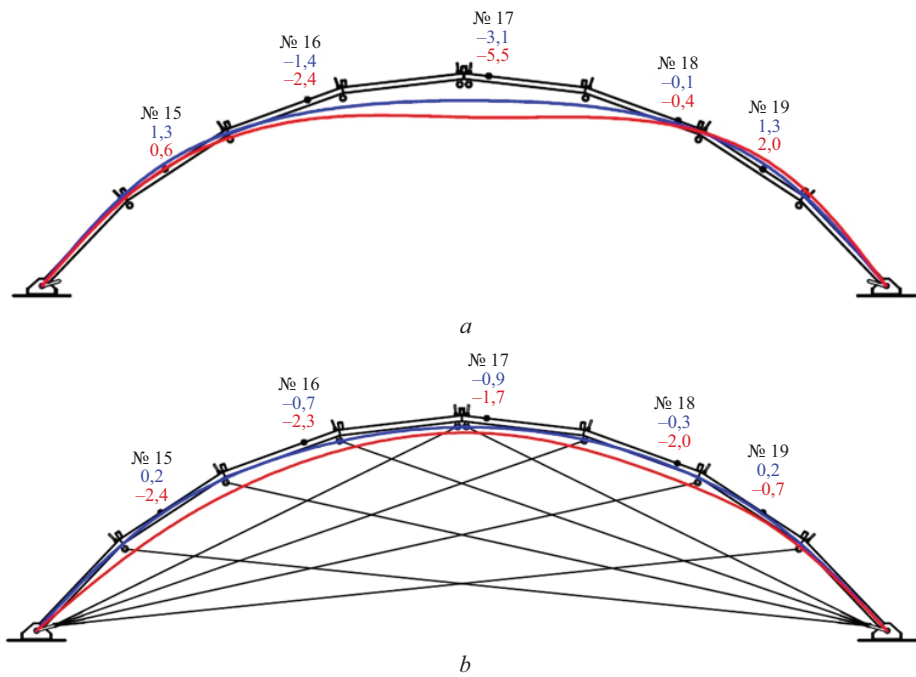


Рис. 9. Деформированная схема и вертикальные перемещения, мм: *a* — арка без затяжек; *b* — арка с затяжками

Fig. 9. Deformed pattern and vertical movements, mm: *a* — arch without ties; *b* — arch with ties

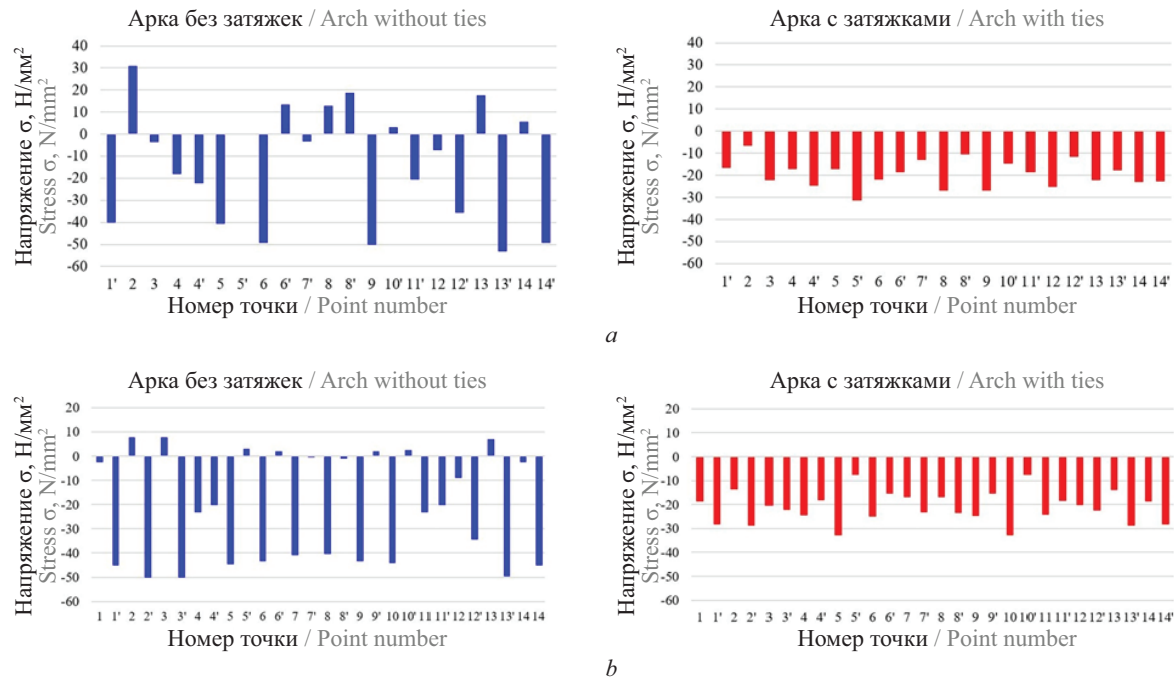


Рис. 10. Нормальные напряжения, Н/мм², в сечениях арки без затяжек (синим цветом) и арки с затяжками (красным цветом): *a* — экспериментальные значения; *b* — расчетные значения

Fig. 10. Normal stresses, N/mm², in the sections of the arch without ties (blue values) and the arch with ties (red values): *a* — experimental values; *b* — calculated values

преднапряжения. В целом поведение модели под нагрузкой соответствует физике процесса.

Полученные результаты подтверждают преимущества комбинированных систем, перечисленных в статьях [8, 10, 11], а именно то, что комбинирован-

ные арочно-вантовые конструкции имеют большую несущую способность, меньшую деформативность, меньшие напряжения при равных нагрузках в сравнении с простыми арками. Равномерное распределение напряжения и малая деформативность позво-

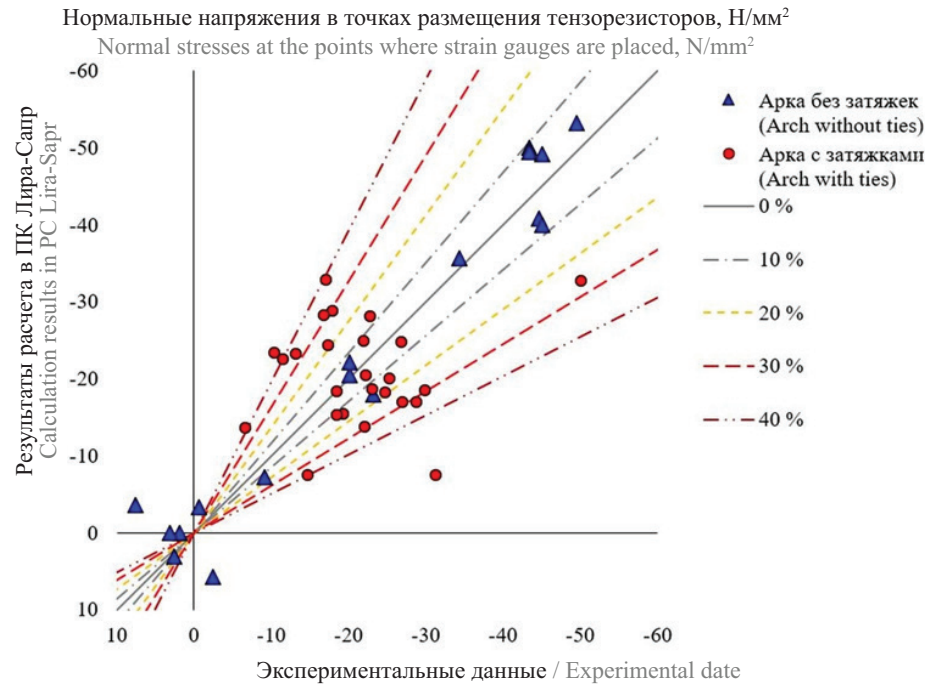


Рис. 11. График соответствия экспериментальных данных и результатов расчета

Fig. 11. Graph of correspondence between experimental data and calculation results

Табл. 2. Количество значений нормальных напряжений в арке (в процентах), попадающих в соответствующий диапазон отклонений

Table 2. The number of normal stress values in the arch (in percent) falling within the corresponding deviation range

Отклонение, % Deviation, %	Процент точек, имеющих отклонение Percentage of points having deviation	
	Арка без затяжек Arch without ties	Арка с затяжками Arch with ties
≤10	43	16
≤20	57	40
≤30	–	64
≤40	–	88
>40	43	12

ляют реализовать рациональное по металлоемкости конструктивное решение [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При выборе и задании критериев подобия расчетных и физических моделей важно отталкиваться не только от основных габаритов расчетной модели, но и от размеров профилей, доступных для изготовления физической модели. Для минимизации погрешностей в размерах конструкции предпочтительнее заводское изготовление экспериментальных моделей. Описанный способ нагружения схемы путем подвешивания грузовых площадок к прогонам удобен в использовании, но увеличивает время проведения каждого этапа загрузки в связи с необходимостью останавливать колебательные движения грузовых площадок.

Для точного определения преднапряжения в затяжках желательно использовать S-образные датчики измерения растяжения. Тензометрический метод через растяжение металлической пластины также позволяет выполнить преднапряжение до требуемых значений, однако необходимо принимать металлическую пластину, близкую по площади поперечного сечения к площади натягиваемого троса, для повышения точности измерений тензометрическим методом. При измерении преднапряжения в лучевых затяжках тензометрическим методом следует располагать металлические пластины в экспериментальной схеме так, чтобы они не попадали в точки пересечения затяжек.

При задании собственного веса конструкций каркаса в виде комбинированных арочных систем с затяжками требуется уточнять коэффициент надежности по нагрузке, так как вес метизов может превы-

шать запас в 5 % (СП 20.13330¹⁵) от веса основного каркаса. Для рассмотренных в статье экспериментальных моделей вес метизов составил 15 % от веса основного каркаса для покрытия с арками без затяжек и 30 % для арки с затяжками.

Арка с лучевым затяжками дает возможность выравнивать значения напряжений в поясе арки в сравнении с аркой без затяжек, а также снизить максимальные значения напряжений в 2–3 раза и деформации в середине пролета арки в 3 раза. Расчетная модель арки без затяжек лучше описывает поведение экспериментальной модели в сравнении с аркой с затяжками, причины возникших отклонений в арке с затяжками описаны выше. Арка с лучевыми затяжками имеет большую несущую способность и малую деформативность в сравнении с аркой без затяжек.

Разница в значениях напряжений и перемещений может возникать вследствие следующих факторов: разница в геометрических размерах трех арок, отсутствие учета отверстий и податливости в соединениях (идеализация расчетной модели), отсутствие учета веса проводов, использование усредненного веса грузовых пластин, использование косвенного (тензометрического метода) для задания преднапряжения затяжкам.

Для экспериментального исследования была разработана, изготовлена и испытана масштабная модель фрагмента покрытия в виде арок без затяжек и с лучевыми затяжками. Проведено сопоставление экспериментальных данных с результатами численных расчетов. Масштабная модель качественно и адекватно отражает физику рассмотренных процессов.

¹⁵ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. М., 2018. 78 с.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Суворовцев Б.А. Особенности проектирования пролетных строений мостов комбинированных систем с гибкими наклонными подвесками // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1 (53). С. 219–224. EDN YKRLYD.
2. Юнусов А.С. Арочные конструкции, востребованные временем, в строительной науке и архитекту-

ре // Инженерный вестник Дона. 2016. № 1 (40). С. 44. EDN WCNSXV.
3. Arslan A. Bridges as City Landmarks: A Critical Review on Iconic Structures // Journal of Design Studio. 2020. Pp. 85–99. DOI: 10.46474/798072
4. Danciu A.D., Guțiu Ș.I., Moga C., Dragomir M.L., Ciotlăuș M., Marusceac V. A Review of the Net-

work Arch Bridge // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue 19. P. 10966. DOI: 10.3390/AP131910966

5. Lai Y., Wu Y., Wang G. Novel long-span cable-stayed deck arch bridge: Concept and structural characteristics // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 308. P. 118026. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118026

6. Li Y., Lai Y., Lu G., Yan F., Wei P., Xie Y.M. Innovative design of long-span steel–concrete composite bridge using multi-material topology optimization // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 269. P. 114838. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114838

7. Xie X.L., Huang Y., Qin X. Conceptual design of a new type of single-tower cable-stayed arch bridge and study of its mechanical properties // *Advances in Structural Engineering*. 2021. Vol. 24. Issue 11. Pp. 2500–2511. DOI: 10.1177/13694332211001506

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

9. Burford N.K., Smith F.W., Gengnagel C. The Evolution of Arches as Lightweight Structures: A History of Empiricism and Science // *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*. Cottbus, 2009. P. 267274.

10. Трянина Н.Ю., Тестоедов П.С. Исследование вопроса живучести стальных сетчатых покрытий // *Приволжский научный журнал*. 2015. № 1 (33). С. 9–14. EDN TMJZXV.

11. Трянина Н.Ю., Карзанов М.А. Исследование работы арочных конструкций с системой наклонных тяг // *Приволжский научный журнал*. 2011. № 2 (18). С. 16–19. EDN NURPZJ.

12. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M. Operation Analysis of the Main Arch-Cable-Stayed Systems When Operating Under Unevenly Distributed and Asymmetrically Working Loads // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Pp. 44–54. DOI: 10.1007/978-3-030-91145-4_5

13. Долгушева В.В., Ибрагимов А.М., Долгушев Т.В. Рациональное конструктивное решение комбинированной арочной системы с наклонными тягами // *Academia. Архитектура и строительство*. 2023. № 2. С. 168–174. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-2-168-174. EDN GCKCKR.

14. Guo X., Li Q., Zhang D., Gong J. Structural Behavior of an Air-Inflated Fabric Arch Frame // *Journal of Structural Engineering*. 2016. Vol. 142. Issue 2. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001374

15. Alegria Mira L., Thrall A.P., De Temmerman N. Deployable scissor arch for transitional shelters // *Automation in Construction*. 2014. Vol. 43. Pp. 123–131. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.03.014

16. Trenz J., Zlatuška K., Necas R. Experimental model of plan curved footbridge supported by arch // *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 960. Issue 4. P. 042070. DOI: 10.1088/1757-899x/960/4/042070

17. Han Q.H., Xu Y., Lu Y., Xu J., Zhao Q.H. Failure mechanism of steel arch trusses: Shaking table testing and FEM analysis // *Engineering Structures*. 2015. Vol. 82. Pp. 186–198. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.013

18. Clarke M.J., Hancock G.J. Tests and Nonlinear Analyses of Small-Scale Stressed-Arch Frames // *Journal of Structural Engineering*. 1995. Vol. 121. Issue 2. Pp. 187–200. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:2(187)

19. Misseri G., Rovero L., Stipo G., Barducci S., Alecci V., De Stefano M. Experimental and analytical investigations on sustainable and innovative strengthening systems for masonry arches // *Composite Structures*. 2019. Vol. 210. Pp. 526–537. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.11.054

20. Lu P., Zhang J., Li D., Zhou Y., Shi Q. Conceptual design and experimental verification study of a special-shaped composite arch bridge // *Structures*. 2021. Vol. 29. Pp. 1380–1389. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.018

21. Ferrero C., Calderini C., Roca P. Experimental response of a scaled dry-joint masonry arch subject to inclined support displacements // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 253. P. 113804. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113804

22. Mentese V.G., Gunes O., Celik O.C., Gunes B., Avsin A., Yaz M. Experimental collapse investigation and nonlinear modeling of a single-span stone masonry arch bridge // *Engineering Failure Analysis*. 2023. Vol. 152. P. 107520. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107520

23. Liu A.R., Huang Y.H., Fu J.Y., Yu Q.C., Rao R. Experimental research on stable ultimate bearing capacity of leaning-type arch rib systems // *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 114. Pp. 281–292. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.08.011

24. Mora-Gómez J. Historical iron tie-rods in vaulted structures: parametrical study through a scaled model // *WIT Transactions on The Built Environment*. 2015. Vol. 1. Pp. 669–680. DOI: 10.2495/STR150561

25. Киселёв Д.Б. Работа комбинированной арочной системы с учетом геометрической нелинейности и последовательности монтажа : дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 120 с.

26. Dolgusheva V., Ibragimov A., Dolgushev T. Robustness of the combined arch system with radial ties // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 389. P. 01053. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901053

27. Еремеев П.Г. Справочник по проектированию современных металлических конструкций больших пролетных покрытий. М. : Ассоциация строительных вузов, 2011. 256 с. EDN QNPJIX.

28. Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., Каширский Ю.В. Марочник сталей и сплавов. М., 2014. 1215 с.

Поступила в редакцию 18 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 18 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 28 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Вера Витальевна Долгушева** — преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1061655, Scopus: 57212309767, ORCID: 0000-0002-8530-9546; DolgushevaVV@yandex.ru;

Александр Майорович Ибрагимов — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 704948, Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022; igasu_alex@mail.ru.

Вклад авторов:

Долгушева В.В. — разработка программы и методики экспериментального исследования, подготовка и проведение экспериментального исследования, выполнение и анализ расчетов, написание исходного текста, итоговые выводы.

Ибрагимов А.М. — научное руководство, участие в разработке и реализации эксперимента, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Surovtcev B.A. Designing specialities of the combined bridge arch superstructures with inclined hangers — “Network arches”. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2017; 1(53):219-224. EDN YKRLYD. (rus.).
2. Yunusov A.S. Arch designs demanded by the time in building sciences and architecture. *Engineering Journal of Don*. 2016; 1(40):44. EDN WCNSXV. (rus.).
3. Arslan A. Bridges as City Landmarks: A Critical Review on Iconic Structures. *Journal of Design Studio*. 2020; 85-99. DOI: 10.46474/798072
4. Danciu A.D., Guțiu Ș.I., Moga C., Dragomir M.L., Ciotlăuș M., Marusceac V. A Review of the Network Arch Bridge. *Applied Sciences*. 2023; 13(19):10966. DOI: 10.3390/AP131910966
5. Lai Y., Wu Y., Wang G. Novel long-span cable-stayed deck arch bridge: Concept and structural characteristics. *Engineering Structures*. 2024; 308:118026. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118026
6. Li Y., Lai Y., Lu G., Yan F., Wei P., Xie Y.M. Innovative design of long-span steel-concrete composite bridge using multi-material topology optimization. *Engineering Structures*. 2022; 269:114838. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114838
7. Xie X.L., Huang Y., Qin X. Conceptual design of a new type of single-tower cable-stayed arch bridge and study of its mechanical properties. *Advances in Structural Engineering*. 2021; 24(11):2500-2511. DOI: 10.1177/13694332211001506
8. Ibragimov A.M., Gnedina L.Iu., Dolgusheva V.V. Problems of application and design of combined arc systems. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2021; 2:25-35. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.2.25. EDN PKRRXZ. (rus.).
9. Burford N.K., Smith F.W., Gengnagel C. The Evolution of Arches as Lightweight Structures: A History of Empiricism and Science. *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*. Cottbus, 2009; 267274.
10. Tryanina N.E., Testodov P.S. The investigation of the survivability problems of steel mesh enclosures. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2015; 1(33):9-14. EDN TMJZXV. (rus.).
11. Tryanina N.Yu., Karzanov M.A. Study of the work of arched structures with a system of inclined rods. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2011; 2(18):16-19. EDN NURPZJ. (rus.).
12. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M. Operation Analysis of the Main Arch-Cable-Stayed Systems When Operating Under Unevenly Distributed and Asymmetrically Working Loads. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022; 44-54. DOI: 10.1007/978-3-030-91145-4_5
13. Dolgusheva V.V., Ibragimov A.M., Dolgushev T.V. Rational design concept of the combined arch system with inclined rods. *Academia. Architecture and Construction*. 2023; 2:168-174. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-2-168-174. EDN GCKCKR. (rus.).
14. Guo X., Li Q., Zhang D., Gong J. Structural Behavior of an Air-Inflated Fabric Arch Frame. *Journal of Structural Engineering*. 2015; 142(2). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001374
15. Alegria Mira L., Thrall A.P., De Temmerman N. Deployable scissor arch for transitional shelters. *Automa-*

tion in Construction. 2014; 43:123-131. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.03.014

16. Trenz J., Zlatuška K., Necas R. Experimental model of plan curved footbridge supported by arch. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2020; 960(4):042070. DOI: 10.1088/1757-899x/960/4/042070

17. Han Q.H., Xu Y., Lu Y., Xu J., Zhao Q.H. Failure mechanism of steel arch trusses: Shaking table testing and FEM analysis. *Engineering Structures*. 2015; 82:186-198. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.013

18. Clarke M.J., Hancock G.J. Tests and Nonlinear Analyses of Small-Scale Stressed-Arch Frames. *Journal of Structural Engineering*. 1995; 121(2):187-200. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:2(187)

19. Misseri G., Rovero L., Stipo G., Barducci S., Alecci V., De Stefano M. Experimental and analytical investigations on sustainable and innovative strengthening systems for masonry arches. *Composite Structures*. 2019; 210:526-537. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.11.054

20. Lu P., Zhang J., Li D., Zhou Y., Shi Q. Conceptual design and experimental verification study of a special-shaped composite arch bridge. *Structures*. 2021; 29:1380-1389. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.018

21. Ferrero C., Calderini C., Roca P. Experimental response of a scaled dry-joint masonry arch subject to inclined support displacements. *Engineering Structures*. 2022; 253:113804. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113804

22. Mentese V.G., Gunes O., Celik O.C., Gunes B., Avsin A., Yaz M. Experimental collapse investigation and nonlinear modeling of a single-span stone masonry arch bridge. *Engineering Failure Analysis*. 2023; 152:107520. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107520

23. Liu A.R., Huang Y.H., Fu J.Y., Yu Q.C., Rao R. Experimental research on stable ultimate bearing capacity of leaning-type arch rib systems. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015; 114:281-292. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.08.011

24. Mora-Gómez J. Historical iron tie-rods in vaulted structures: parametrical study through a scaled model. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2015; 1:669-680. DOI: 10.2495/STR150561

25. Kiselev D.B. *Operation of a combined arched system taking into account geometric nonlinearity and installation sequence : dis. ... cand. tech. sci.* Moscow, 2009; 120. (rus.).

26. Dolgusheva V., Ibragimov A., Dolgushev T. Robustness of the combined arch system with radial ties. *E3S Web of Conferences*. 2023; 389:01053. DOI: 10.1051/e3sconf/202338901053

27. Eremeev P.G. *The manual on designing of wide-span roofs modern metal structures*. Moscow, Association of construction universities, 2011; 256. EDN QNPJIX. (rus.).

28. Dragunov Yu.G., Zubchenko A.S., Kashirskiy Yu.V. *Brand of steels and alloys*. Moscow, 2014; 1215. (rus.).

Received June 18, 2024.

Adopted in revised form on June 18, 2024.

Approved for publication on October 28, 2024.

BIONOTES: Vera V. Dolgusheva — lecturer of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1061655, Scopus: 57212309767, ORCID: 0000-0002-8530-9546; DolgushevaVV@yandex.ru;

Alexander M. Ibragimov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 704948, Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022; igasu_alex@mail.ru.

Contribution of the authors:

Vera V. Dolgusheva — development of a program and methodology for experimental research, preparation and conduct of experimental research, execution and analysis of calculations, writing the source text, final conclusions.

Alexander M. Ibragimov — scientific supervision, participation in the development and implementation of the experiment, revision of the text, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.