

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ/CONSTRUCTION STRUCTURES, BUILDINGS AND STRUCTURES

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.2>

ВЛИЯНИЕ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКИ НА ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В АРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Научная статья

Кузнецов Д.Н.^{1,*}, Беляева С.Ю.², Сазыкин В.Г.³, Ковалева А.Ю.⁴¹ORCID : 0000-0001-6648-1511;^{1, 2, 3, 4} Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kuznecov82[at]bk.ru)

Аннотация

В статье рассматриваются варианты снеговой нагрузки для арочных и близких к ним по очертанию покрытий. Целью исследования является поиск наиболее неблагоприятных вариантов снеговой нагрузки на покрытия арочного вида.

На примере тестовой бесшарнирной стальной арки пролетом 18 м выполнено исследование характера распределения изгибающих моментов от действия шести различных вариантов снеговой нагрузки. Рассмотрено шесть расчетных ситуаций: две нормативные схемы, один вариант с равномерным распределением снеговой нагрузки и три варианта загружений половины пролета арки. Асимметричные варианты загружений рассмотрены в связи с известными случаями сползания части снеговых отложений с покрытий арочного очертания, что приводит к нерасчетным ситуациям и, как следствие, увеличивает аварийность покрытий данного вида.

Построена объемлющая эпюра изгибающих моментов, выявлено наиболее неблагоприятное асимметричное загружение половины пролета от второго нормативного варианта снеговой нагрузки, которое увеличивает изгибающий момент. Указанное загружение может приводить к потере несущей способности арочных конструкций, если его не учитывать при расчете. Материалы данной статьи могут быть полезны при проектировании несущих конструкций арочного вида.

Ключевые слова: снеговая нагрузка, асимметричное загружение, арочные конструкции, расчет стальных арок.

THE INFLUENCE OF SNOW LOAD ON THE DISTRIBUTION OF FORCES IN ARCH STRUCTURES

Research article

Kuznetsov D.N.^{1,*}, Belyaeva S.Y.², Sazykin V.G.³, Kovaleva A.Y.⁴¹ORCID : 0000-0001-6648-1511;^{1, 2, 3, 4} Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

* Corresponding author (kuznecov82[at]bk.ru)

Abstract

The article examines snow load options for arched and similar type coatings. The aim of the study is to identify the most unfavourable snow load options for arched coatings.

On the example of a test hingeless steel arch spanned 18 m, a study was conducted on the distribution of bending moments from the action of six different snow load options. Six design situations were reviewed: two standard schemes, one option with an even distribution of snow load, and three options with half of the arch span loaded. Asymmetric load options were examined in view of known cases of snow sliding off arched coatings, which leads to uncalculated situations and, as a result, increases the accident rate for this type of pavement.

A comprehensive distribution diagram of bending moments was constructed, and the most unfavourable asymmetrical loading of half of the span from the second standard snow load variant, which increases the bending moment, was identified. This loading can lead to a loss of load-bearing capacity of arch structures if it is not taken into account in the calculation. The materials in this paper may be useful in the design of arch-type load-bearing structures.

Keywords: snow load, asymmetrical loadcase, arch structures, calculation of steel arches.

Введение

Объектом исследования являются стальные арочные конструкции, которые служат каркасом для зданий различного назначения. Стальные арки — эффективные конструкции, так как величина изгибающего момента в них значительно меньше, чем в рамах или балках аналогичного пролета. Эпюры изгибающих моментов, особенно в бесшарнирных арках, распределены без скачкообразных экстремумов. Особенности распределения снеговой нагрузки на покрытиях зданий и сооружений исследуются в ряде научных публикаций [1], [2], [3], [4]. Актуальной задачей при расчете стальных арок является учет неблагоприятных вариантов снеговых отложений на покрытиях конструкций арочного вида, так как нормативная методика определения снеговой нагрузки нуждается в дальнейшем развитии [5], а практика физического моделирования процессов переноса снега не всегда обладает высокой точностью [6, С. 31]. Кроме участков с повышенным отложением снеговой нагрузки, которые определяются по нормативным схемам, необходимо рассмотреть возможные варианты загружений с действием снеговой нагрузки на половине пролета арки. Указанные загружения могут иметь место при эксплуатации арочных зданий, а именно при сползании снега с одной половины пролета, они не приведены в СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» (далее по

тексту СП 20.13330.2016). Ввиду особенностей геометрии арочного покрытия достаточно часто происходит сползание снеговых отложений, например, при таянии снега или от воздействия ветра. Сход снега может происходить несимметрично, для разных сторон здания в разное время, что приводит к асимметричному нагружению арочной конструкции. Данные явления не всегда приводят к аварийным случаям, но зачастую являются не расчетной ситуацией, то есть ситуацией, которая не учитывается при проектировании [7]. Вследствие аварий [8], особенно в бескаркасных арочных зданиях [9], [10, С. 46], актуальным является расчетный анализ различных вариантов действия снеговой нагрузки.

Методы и принципы исследования

В качестве тестовой конструкции рассматривается стальная арка пролетом 18 м, которая служит основной несущей конструкцией каркаса здания длиной 60 м. Шаг арок в продольном направлении здания составляет 6 м. Предполагается, что здание расположено в Воронежской области, тип местности «В». Плоская расчетная схема стальной бесшарнирной арки рассчитана на действие шести нагружений: три нагружения от снеговой нагрузки на полном пролете арки и три нагружения от асимметричной нагрузки, с отсутствием снега на правой половине арочной конструкции (рис. 1). Поперечное сечение для арочной конструкции назначено конструктивно в виде стального двутавра 50Ш1 по ГОСТ 35087-2024. Учет собственного веса несущих и ограждающих конструкций в расчетной схеме не выполнялся. Ветровая нагрузка в исследовании не рассматривалась, но так как, согласно подразделу В.1.3 СП 20.13330.2016, она приложена нормально к арочной поверхности или от нее, то на участке арки, где действие ветра направлено от поверхности покрытия, ветровая нагрузка частично компенсирует снеговую.

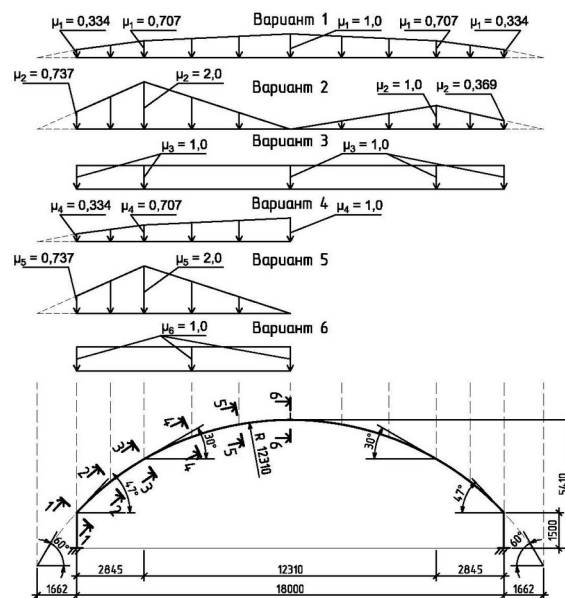


Рисунок 1 - Расчетная схема стальной арки
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.2.1>

Геометрия расчетной схемы построена в виде стержневой конечноэлементной (КЭ) системы в вычислительном комплексе SCAD Office. Нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия определено по формуле (41) СП 20.13330.2016 для III снегового района:

$$S_0 = c_e c_t \mu S_g, \quad (1)$$

где c_e , c_t , μ , S_g — по формуле (41) СП 20.13330.2016.

Расчетное значение интенсивности снеговой нагрузки на определенном участке арки q_i получено для шага арок 6 м с учетом коэффициента надежности по нагрузке:

$$q_i = S_0 \gamma_f B_f, \quad (2)$$

где S_0 — нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию по формуле (41) СП 20.13330.2016, $\gamma_f = 1,4$ — коэффициент надежности, $B_f = 6$ м — шаг арок.

Дополнительно к двум нормативным схемам распределения снеговой нагрузки (варианты 1 и 2 на рис. 1) рассмотрены варианты с равномерным распределением снега по всему пролету (вариант 3 на рис. 1) и со снегом только на левой половине арки (варианты 4–6 на рис. 1). Для первых трех вариантов параметры нагрузки μ , и q_i указаны в таблице 1 для шести характерных сечений арки. Такие же параметры нагрузки приняты и для вариантов с нагрузкой только на левой половине арки.

Таблица 1 - Расчетные параметры вариантов снеговой нагрузки в характерных сечениях

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.2.2>

Вариант		Сечение №					
№	Параметр	1 – 1	2 – 2	3 – 3	4 – 4	5 – 5	6 – 6
1	μ	0,334	0,520	0,707	0,802	0,897	1,000
	q_i , кН/м	4,05	6,30	8,57	9,72	10,87	12,12
2	μ	0,737 (0,350)	1,370 (0,675)	2,000 (1,000)	1,350 (0,864)	0,700 (0,369)	0,000 (0,000)
	q_i , кН/м	8,93 (4,24)	16,61 (8,18)	24,24 (12,12)	16,36 (8,29)	8,49 (4,47)	0,00 (0,00)
3	μ	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	q_i , кН/м	12,12	12,12	12,12	12,12	12,12	12,12

Примечание: в скобках указаны расчетные параметры в соответствующих сечениях правой полуарки для варианта 2 (рис.1) с несимметричной схемой распределения снеговой нагрузки

Далее на основании сравнительного анализа напряженно-деформированного состояния (далее НДС) арки от шести рассмотренных загрузок выявлен наиболее неблагоприятный вариант распределения снеговой нагрузки.

Основные результаты

По результатам статического расчета выполненного МКЭ в вычислительном комплексе SCAD Office получены внутренние усилия в шести характерных сечениях (табл. 2) от действия шести вариантов снеговой нагрузки.

Таблица 2 - Внутренние усилия в характерных сечениях полуарки

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.2.3>

Вариант		Сечение №					
№	Пар-р	1 – 1	2 – 2	3 – 3	4 – 4	5 – 5	6 – 6
1	N, кН	-130,92	-130,92	-123,79	-114,97	-104,66	-97,82
	M_y , кНм	-32,67	-37,70	-26,06	-2,16	+18,06	+30,07
2	N, кН	-148,65	-148,65	-127,49	-104,74	-86,82	-82,82
	M_y , кНм	-77,69	-17,99	+27,63	+42,17	+19,18	-11,13
3	N, кН	-167,17	-167,17	-150,42	-136,93	-124,12	-116,63
	M_y , кНм	-46,10	-38,40	-22,78	+0,27	+17,36	+27,34
4	N, кН	-81,66	-81,66	-72,52	-62,78	-52,99	-48,20
	M_y , кНм	-49,40	-21,08	+7,35	+34,81	+42,82	+13,98
5	N, кН	-121,46	-121,46	-98,92	-75,38	-57,45	-54,32
	M_y , кНм	-92,61	-10,97	+47,09	+70,40	+39,23	-7,18
6	N, кН	-108,80	-108,80	-89,56	-74,88	-62,55	-57,38
	M_y , кНм	-68,27	-19,64	+17,12	+45,96	+51,94	+11,59

По вычисленным значениям ординат эпюр изгибающих моментов построены объемлющие эпюры для левой полуарки (рис. 2). На объемлющей эпюре красным цветом показано приращение ординат эпюр изгибающих моментов от дополнительных вариантов снеговой нагрузки (рис. 2).

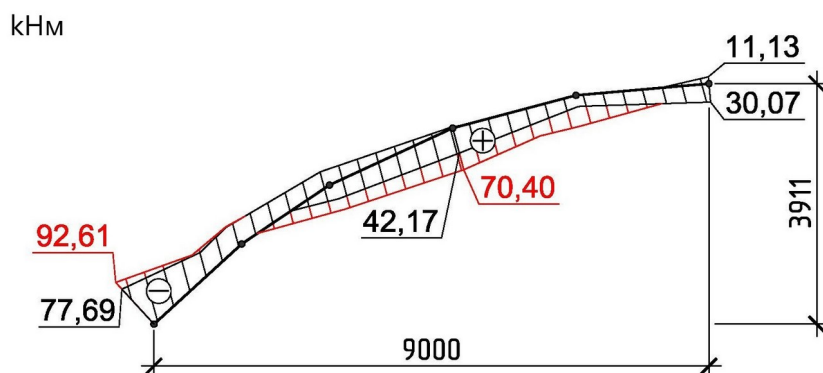


Рисунок 2 - Объемлющая эпюра изгибающих моментов в полуарке M_y
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.2.4>

Примечание: красным цветом показана часть объемлющей эпюры полуарки, которая получена при рассмотрении дополнительных вариантов снеговой нагрузки № 3-6 (рис. 1)

Обсуждение

Для поиска наиболее неблагоприятных загрузжений и характерных сечений арки определим максимальные продольные силы и изгибающие моменты, а также найдем их относительный прирост в процентах.

Наибольшая разница максимальных значений продольных сил выявлена при рассмотрении варианта нагрузки № 3 с равномерным распределением снега, в сечении 1 - 1:

$$\frac{N_3 - N_2}{N_3} \cdot 100\% = \frac{165,17 \text{ кН} - 148,65 \text{ кН}}{165,17 \text{ кН}} \cdot 100\% = 10\%, \quad (3)$$

где N_2 и N_3 — наибольшая продольная сила для соответствующего варианта снеговой нагрузки в рассматриваемом сечении левой полуарки.

Разница максимальных ординат эпюр изгибающих моментов при рассмотрении дополнительного варианта снеговой нагрузки № 5 также выявлена в сечении 1 - 1:

$$\frac{M_{y,5} - M_{y,2}}{M_{y,5}} \cdot 100\% = \frac{92,61 \text{ кНм} - 77,69 \text{ кНм}}{92,61 \text{ кНм}} \cdot 100\% = 16\%, \quad (4)$$

где $M_{y,2}$ и $M_{y,5}$ — изгибающий момент для соответствующего варианта снеговой нагрузки в рассматриваемом сечении левой полуарки.

Максимальная разница в ординатах эпюр изгибающих моментов при рассмотрении дополнительного варианта снеговой нагрузки № 5 выявлена в сечении 4 - 4:

$$\frac{M_{y,5} - M_{y,2}}{M_{y,5}} \cdot 100\% = \frac{70,40 \text{ кНм} - 42,17 \text{ кНм}}{70,40 \text{ кНм}} \cdot 100\% = 40\%, \quad (5)$$

где $M_{y,2}$ и $M_{y,5}$ — изгибающий момент для соответствующего варианта снеговой нагрузки в рассматриваемом сечении левой полуарки.

Относительный прирост продольных сил и изгибающих моментов уменьшится при учете собственного веса в сочетаниях нагрузки, но останется значимым при подборе поперечных сечений элементов арочных конструкций. Принцип независимости действия сил позволяет распространить полученные результаты на арки с различным конструктивным решением ограждающих конструкций.

Заключение

На основании выполненного расчетного анализа можно сделать следующие общие выводы:

1. От действия дополнительных вариантов снеговой нагрузки для рассмотренной тестовой арки выявлено увеличение максимальной продольной силы на 10%, а изгибающего момента на 16%.
2. При расчете арок на действие второго нормативного варианта снеговой нагрузки рекомендуется дополнительно выполнять расчет на загрузку только половины левого пролета арки, что позволит учесть возможный сход снега.
3. Характер очертания построенной объемлющей эпюры изгибающих моментов указывает на важность учета дополнительных загрузжений для арок с переменным поперечным сечением.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Вержбовский Г.Б., Ростовский государственный
строительный университет, Ростов-на-Дону Российская
Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.2.5>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Verzhbovskiy G.B., Rostov State Construction University,
Rostov-on-Don Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.66.2.5>

Список литературы / References

1. Бритиков Н.А. Численное моделирование снеговых нагрузок. / Н.А. Бритиков, А.М. Белостоцкий // Academia. Архитектура и строительство. — 2023. — № 3. — С. 149–153. — DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-149-153
2. Кузнецов А.Ю. Дополнительный подход в определении неравномерной снеговой нагрузки на покрытия большепролетных зданий / А.Ю. Кузнецов // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 1–9.
3. Катюшин В.В. Статическое и динамическое действие подвижной снеговой нагрузки. / В.В. Катюшин // Строительная механика и расчет сооружений. — 2010. — № 1 (228). — С. 63–68.
4. Лебедева И.В. Экспериментальные исследования для установления расчетных параметров снеговых нагрузок. / И.В. Лебедева, А.В. Маслов, М.М. Березин // Вестник НИЦ Строительство. — 2020. — № 2 (25). — С. 66–76. — DOI: 10.37538/2224-9494-2020-2(25)-66-76
5. Лебедева И.В. История развития отечественных норм снеговых нагрузок. / И.В. Лебедева // Вестник НИЦ Строительство. — 2017. — № 3 (14). — С. 144–154.
6. Belostotsky A.M. Critical review of physical modelling of snow accumulation on roofs with arbitrary geometry. / A.M. Belostotsky, A.S. Goryachevsky, N.A. Britikov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — 2021. — № 17 (4). — P. 22–39. — DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-4-22-39
7. Кузнецов Д.Н. Анализ развития метода предельных состояний для расчета строительных конструкций. / Д.Н. Кузнецов, Л.А. Федосова // Строительная механика и конструкции. — 2020. — № 4 (27). — С. 74–81.
8. Назаров Ю.П. Басманный рынок: анализ конструктивных решений и возможных механизмов разрушения здания. / Ю.П. Назаров, Ю.Н. Жук, В.Н. Симбиркин и др. // Строительная механика и расчет сооружений. — 2007. — № 2 (211). — С. 49–55.
9. Коргин А.В. Обеспечение несущей способности арочных покрытий из холодногнутых тонкостенных профилей / А.В. Коргин, В.А. Ермаков, Л.З. Зейд Килани // Вестник МГСУ. — 2022. — Т. 17. — № 8. — С. 1008–1016. — DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1008-1016
10. Зверев В.В. К вопросу обеспечения надежности бескаркасных арочных зданий. / В.В. Зверев, К.Е. Жидков, Н.В. Капырин и др. // Строитель Донбасса. — 2019. — № 2 (7). — С. 45–48.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Britikov N.A. Chislennoe modelirovaniye snegovy'x nagruzok [Numerical Modelling of Snow Loads]. / N.A. Britikov, A.M. Belostotskiy // Academia. Architecture and construction. — 2023. — № 3. — P. 149–153. — DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-149-153 [in Russian]
2. Kuznetsov A.Yu. Dopolnitel'nyy podkhod v opredelenii neravnomernoi snegovoi nagruzki na pokrytiya bolsheproletnykh zdaniy [An additional approach to determining the non-uniform snow load on the large-span buildings] / A.Yu. Kuznetsov // Vestnik yevraziyskoi nauki [Bulletin of Eurasian Science]. — 2024. — Vol. 16. — № 3. — P. 1–9. [in Russian]
3. Katyushin V.V. Staticheskoye i dinamicheskoye dejstvie podvizhnoy snegovoy nagruzki [Quiescent and dynamic impact of moving snow load]. / V.V. Katyushin // Structural Mechanics and Analysis of Constructions. — 2010. — № 1 (228). — P. 63–68. [in Russian]
4. Lebedeva I.V. E'ksperimental'ny'e issledovaniya dlya ustanovleniya raschetny'x parametrov snegovy'x nagruzok [Experimental researches for assignment of snow loads design parameters]. / I.V. Lebedeva, A.V. Maslov, M.M. Berezin // Bulletin of the Scientific Research Center Construction. — 2020. — № 2 (25). — P. 66–76. — DOI: 10.37538/2224-9494-2020-2(25)-66-76 [in Russian]
5. Lebedeva I.V. Istoriya razvitiya otechestvenny'x norm snegovy'x nagruzok [History of the development of national snow-loads standards]. / I.V. Lebedeva // Bulletin of the Scientific Research Center Construction. — 2017. — № 3 (14). — P. 144–154. [in Russian]
6. Belostotsky A.M. Critical review of physical modelling of snow accumulation on roofs with arbitrary geometry. / A.M. Belostotsky, A.S. Goryachevsky, N.A. Britikov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — 2021. — № 17 (4). — P. 22–39. — DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-4-22-39
7. Kuznetsov D.N. Analiz razvitiya metoda predel'ny'x sostoyaniy dlya rascheta stroitel'ny'x konstrukcij [Development analysis of the method of limit states for calculation of construction structures]. / D.N. Kuznetsov, L.A. Fedosova // Structural mechanics and structures. — 2020. — № 4 (27). — P. 74–81. [in Russian]
8. Nazarov Yu.P. Basmanny'y ry'nok: analiz konstruktivny'x reshenij i vozmozhny'x mexanizmov razrusheniya zdaniya [Basmanny market: analysis of design solutions and possible mechanisms of building destruction]. / Yu.P. Nazarov, Yu.N. Zhuk, V.N. Simbirkin et al. // Structural Mechanics and Analysis of Constructions. — 2007. — № 2 (211). — P. 49–55. [in Russian]
9. Korgin A.V. Obespechenie nesushchei sposobnosti arochnykh pokritii iz kholodnognutikh tonkostennikh profilei [The bearing capacity of arch cover structures made of thin-walled cold-formed profiles] / A.V. Korgin, V.A. Yermakov, L.Z. Zeid

Kilani // Vestnik MGSU [Bulletin of MSSU]. — 2022. — Vol. 17. — № 8. — P. 1008–1016. — DOI: 10.22227/1997-0935.2022.8.1008-1016 [in Russian]

10. Zverev V.V. K voprosu obespecheniya nadezhnosti beskarkasny'x arochny'x zdaniy [Revisiting the ensuring of reliability of frameless arched buildings]. / V.V. Zverev, K.E. Zhidkov, N.V. Kapy'rin et al. // The Builder of Donbass. — 2019. — № 2 (7). — P. 45–48. [in Russian]