

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Напряженно-деформированное состояние конструкций каркаса при варьировании снеговой нагрузки

УДК 69.04

Кравченко Г.М.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: Galina.907@mail.ru

Труфанова Е.В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: El.Trufanova@mail.ru

Сулопаров Д.А.

Магистрант, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: denissusloparov181995@gmail.com

Боженкова Ю.М.

Магистрант, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: bozhenkova-julia@yandex.ru

Статья получена: 12.02.2019. Рассмотрена: 23.02.2019. Одобрена: 28.02.2019. Опубликовано онлайн: 26.06.2019. ©РИОР

Аннотация. Рассмотрено многовариантное нагружение снеговой нагрузкой каркаса большепролетного уникального металлического покрытия стадиона. Пространственная конечно-элементная модель разработана в программном комплексе «Лира-САПР». Выполнен анализ существующих схем приложения снеговой нагрузки приведенных в нормативной документации. Принято четыре варианта учета снегового воздействия на покрытие стадиона. По результатам расчета проведен анализ напряженно-деформированного состояния кон-

струкций стадиона, подбор и проверка сечений металлических конструкций покрытия. Показана необходимость учета многовариантного нагружения при моделировании работы конструкций для принятия правильных проектных решений, обеспечивающих надежность исследуемого объекта.

Ключевые слова: уникальное здание, многовариантное нагружение, метод конечных элементов, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние.

STRESS-STRAIN STATE OF FRAME STRUCTURES UNDER THE DIFFERENT SNOW LOAD COMBINATIONS

Galina Kravchenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: galina.907@mail.ru

Elena Trufanova

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: el.trufanova@mail.ru

Denis Susloparov

Master's Degree Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: denissusloparov181995@gmail.com

Julia Bozhenkova

Master's Degree Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: bozhenkova-julia@yandex.ru

Manuscript received: 12.02.2019. **Revised:** 23.02.2019. **Accepted:** 28.02.2019. **Published online:** 26.06.2019. ©RIOR

Abstract. The multi-variant loading of the large-span unique steel covering of the stadium under snow load is considered. The spatial finite element model is developed using LIRA software. The analysis of the existing schemes application of snow loading is carried out according to the codes. Four snow load cases on the stadium's covering are assumed for analysis. The analysis of the stress-strain state of the stadium structures, the selection and verification of sections of the steel covering are performed. The results show that it is necessary to simulate behavior of a structure under all possible load cases.

Keywords: unique building, multivariate loading, finite element method, finite element model, stress-strain state.

В период подготовки к чемпионату мира по футболу 2018 г. в России построено и реконструировано двенадцать стадионов. Все эти спортивные сооружения являются уникальными большепролетными зданиями с выразительной архитектурой [1]. Сбор и распределение нагрузок по расчетным моделям таких сооружений выполняют согласно нормативной документации, однако предложенные схемы приложения кратковременных воздействий не всегда учитывают геометрию уникального большепролетного здания.

В качестве объекта исследования выбрано большепролетное уникальное здание стадиона. Конструктивная схема — железобетонный каркас, выполненный по плитно-стержневой схеме с металлическим покрытием.

Конструкция покрытия — уникальная большепролетная система, состоящая из четырех пространственных стальных ферм пролетами 168 и 192 м. Фермы проектируются из круглых труб, опираются шарнирно на восемь опор. По контуру здания выполнено опорное кольцо, шарнирно опертое на колонны. На фермы опирается структурная балочная конструкция, состоящая из главных и второстепенных балок.

Геометрическое моделирование несущих конструкций выполнено в программном комплексе *AutoCAD 2017*. Такое решение позволяет снизить количество субъективных ошибок по сравнению с заданием геометрии посредством введения узлов внутри расчетного комплекса [2; 3]. Выполнен импорт геометрии здания в ПК «Лира-САПР» с последующим назначением жесткостей, раскреплений, конструктивных групп и типов конечных элементов. Общий вид пространственной конечно-элементной модели приведен на рис. 1.

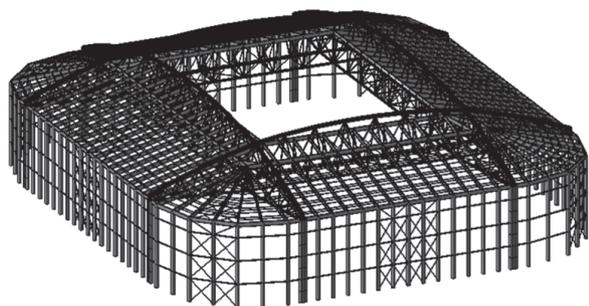


Рис. 1. Конечно-элементная модель

Распределение снегового покрова на покрытии здания зависит от двух основных факторов: геометрии здания и ветра, перемещающего снег по покрытию [4]. Рассмотрена ситуация при боковом обдуве ветром перпендикулярно-продольной поверхности. Условная схема распределения снегового покрова представлена на рис. 2. Под действием бокового ветра снежный покров перемещается вдоль скатов покрытия.

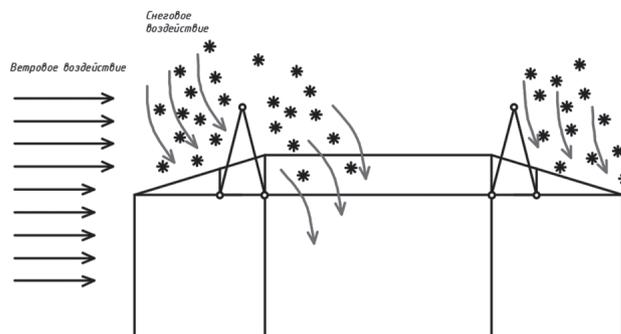


Рис. 2. Схема внешних воздействий

С наветренной стороны в нижней области ската часть снега перемещается к центру, при этом в верхней области ската снег сносит с покрытия. С подветренной стороны снеговые массы перемещаются от верхней точки ската к нижней. На боковых скатах снег перемещается по направлению ветра и от верхней точки к основанию.

Снеговые мешки образуются: с наветренной стороны — в середине ската; с подветренной — у основания.

При моделировании такого снегового воздействия принято несколько схем, приведенных в нормативной документации, для различных по геометрии участков покрытия с учетом принятых расчетных ситуаций (рис. 3).

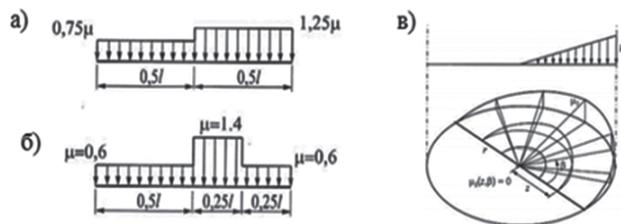


Рис. 3. Схемы распределения снеговой нагрузки: а) подветренный скат; б) наветренный скат; в) угловые участки покрытия

Дополнительно исследовано влияние снеговой нагрузки при частичном загрузении покрытия: действие снега на половине пролета в продольном и поперечном направлениях согласно схеме на рис. 3, в [5]. Распределение нагрузок по расчетной модели показано на рис. 4.

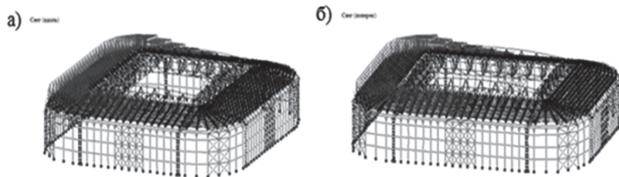


Рис. 4. Распределение снеговой нагрузки на половине пролета:
а) в продольном направлении; б) в поперечном

Исследование напряженно-деформированного состояния конструкций выполнено по четырем основным сочетаниям [6]. При составлении расчетных сочетаний нагрузок варьируются схемы снегового воздействия при прочих равных условиях:

- первое сочетание нагрузок: снеговая нагрузка учтена как равномерно распределенная согласно схеме, приведенной в нормативной документации;
- второе сочетание нагрузок: снеговая нагрузка на половине пролета в продольном направлении;
- третье сочетание нагрузок: снеговая нагрузка на половине пролета в поперечном направлении;
- четвертое сочетание нагрузок: комбинированная схема загрузки.

Горизонтальные перемещения конструкций стадиона показаны на рис. 5–6.

При частичном загрузении покрытия в продольном направлении горизонтальные перемещения вдоль оси X на 3,3% превышают значения, полученные при равномерной схеме.

Максимальные горизонтальные перемещения вдоль оси Y получены при комбинированном загрузении покрытия снеговой нагрузкой (разница с равномерно распределенной схемой составляет 5%).

Вертикальные перемещения конструкций стадиона от сочетаний нагрузок приведены на рис. 7. Разность вертикальных перемещений узлов составляет менее 3%.

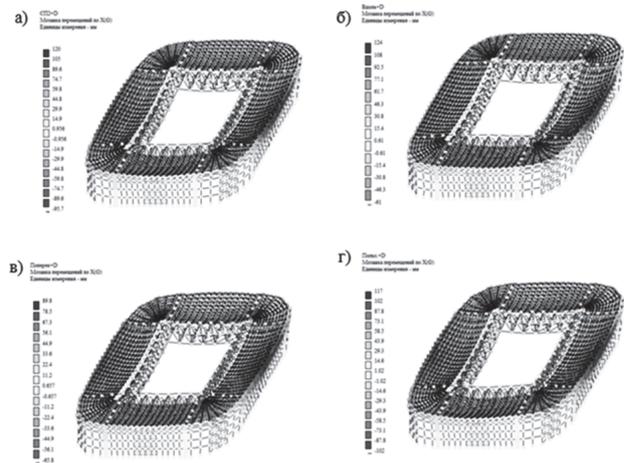


Рис. 5. Узловые перемещения вдоль оси X :
а) 1-е сочетание нагрузок; б) 2-е сочетание нагрузок;
в) 3-е сочетание нагрузок; г) 4-е сочетание нагрузок

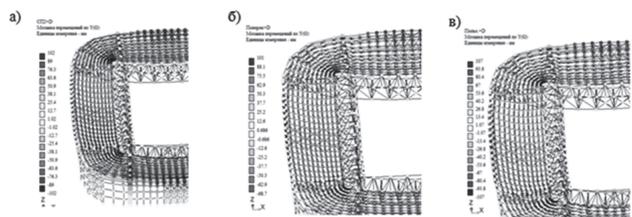


Рис. 6. Узловые перемещения вдоль оси Y :
а) 1-е сочетание нагрузок; б) 3-е сочетание нагрузок;
в) 4-е сочетание нагрузок

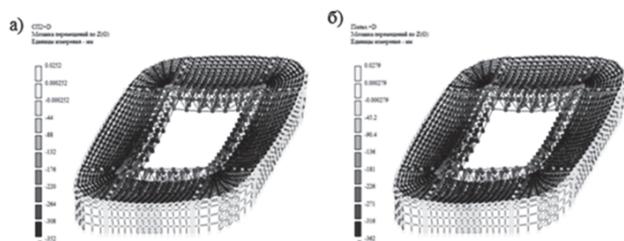


Рис. 7. Узловые перемещения вдоль оси Z в соответствии с:
а) 1-е сочетание; б) 4-е сочетание

Выполнен анализ усилий в несущих элементах покрытия (рис. 8–9).

Учет многовариантности загрузений снеговой нагрузкой позволил получить значения изгибающего момента в стержнях конструкции покрытия, на 15% превышающий изгибающий момент без учета многовариантности нагрузки.

Исследование продольных усилий в элементах несущих ферм показало отличие максимального значения на 3–5% от усилий по первому сочетанию нагрузок.

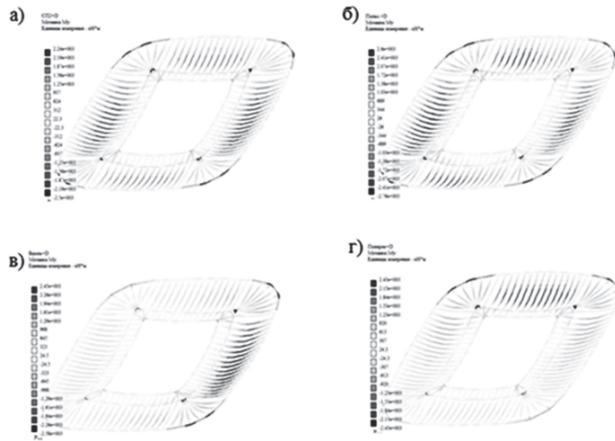


Рис. 8. Распределение M_u в соответствии с:
а) 1-е сочетание; б) 2-е сочетание; в) 3-е сочетание;
г) 4-е сочетание

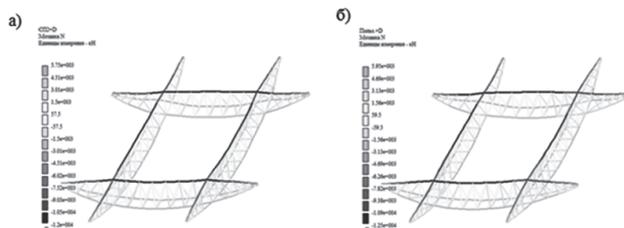


Рис. 9. Распределение N в соответствии с:
а) 1-е сочетание нагрузок; б) 4-е сочетание нагрузок

Выполнен подбор и проверка сечений металлических элементов покрытия [7]. Сечения, полученные при подборе с учетом равномерно распределенной схемы снегового воздействия, перестают удовлетворять условиям прочности и деформативности при учете многовариант-

ного нагружения. Различия в подборе сечений элементов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Сечения элементов покрытия

№ п/п	Наименование	Сечения элементов без учета многовариантного нагружения	Сечения элементов с учетом многовариантного нагружения
1	Главные балки	Составной двутавр 500 × 22 — 1500 × 16	Составной двутавр 500 × 24 — 1550 × 16
2	Сжатые связи по нижним поясам несущих ферм	Труба 180 × 8	Труба 203 × 12
3	Сжатые раскосы несущих ферм	Труба 377 × 10	Труба 377 × 12

Анализ результатов расчета показал, что для обеспечения необходимого уровня безопасности здания необходимо учесть максимальное количество факторов, оказывающих влияние на напряженно-деформированное состояние конструкций большепролетных и уникальных зданий и сооружений. Незначительные отличия в перемещениях и усилиях в конструкциях здания, полученные при учете нескольких схем приложения снеговой нагрузки, привели к увеличению сечений несущих конструкций. Учет многовариантного нагружения при моделировании работы конструкций позволил принять правильные проектные решения, обеспечив надежность исследуемого объекта.

Литература

1. Серпик И.Н. Оптимизация железобетонных рам с учетом многовариантности нагружения [Текст] / И.Н. Серпик, И.В. Мироненко // Строительство и реконструкция. — 2012. — № 1. — С. 33–39.
2. Порываев И.А. Вариантное проектирование покрытия стадиона «Фишт» в городе Сочи [Текст] / И.А. Порываев [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2016. — № 6. — С. 7–33.
3. Агаханов Э.К. О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела [Текст] / Э.К. Агаханов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2013. — № 2. — С. 39–45.
4. Агаханов Э.К. Расчет зданий сложной геометрической формы на ветровые воздействия [Текст] / Э.К. Агаханов [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2017. — № 2. — С. 8–17.
5. Агаханов Э.К., Агаханов М.К., Батманов Э.З. The stress-strain state from its own weight in ground base with trapezoidal cutout (Напряженно-деформированное состояние от собственного веса в грунтовом основании с трапециевидным вырезом). MATEC Web of Conferences. 193, 03047 (2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819303047/>
6. Кравченко Г.М. Динамический расчет и анализ полусферической оболочки покрытия объекта «Зимний сад» технопарка Ростовского государственного строительного университета (РГСУ) [Текст] / Г.М. Кравченко [и др.] // Инженерный вестник Дона. — 2016. — № 1. — URL: ivdon.ru/
7. Агаханов Э.К. Регулирование параметров собственных колебаний пространственного каркаса здания [Текст] / Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2016. — № 3. — С. 8–15.

References

1. Serpik I.N., Mironenko I.V. Optimizaciya zhelezobetonnyh ram s uchetom mnogovariantnosti nagruzheniya [Optimization of reinforced concrete frames taking into account the multivariate of loading]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya* [Construction and reconstruction]. 2012, I. 1, pp. 33–39.
2. Poryvaev I.A., Semenov A.A., Shigapov R.R., Belyaeva S.V., Kokoreva A.A. *VARIANTNOE PROEKTIROVANIE POKRYTIYA STADIONA «FISH» V GORODE SOCHI. STROITEL'STVO UNIKAL'NYH ZDANIJ I SOORUZHENIJ* [Variant design of the “Fish” stadium in the city of Sochi. Construction of unique buildings and structures]. 2016, I. 6, pp. 7–33.
3. Agahanov E.K. O razvitii kompleksnyh metodov resheniya zadach mekhaniki deformiruемого tverdogo tela [On the development of complex methods for solving problems of mechanics of a deformable solid]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2013, I. 2, pp. 39–45.
4. Agahanov E.K., Kravchenko G.M., Osadchij E.V., Trufanova E.V. Raschet zdaniy slozhnoj geometricheskoy formy na vetrovye vozdeystviya [Calculation of buildings of complex geometric shape for wind effects]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2017, I. 2, pp. 8–17.
5. Agahanov E.K., Agahanov M.K., Batmanov E.Z. *NAPRYAZHENNO-DEFORMIROVANNOE SOSTOYANIE OT SOBSTVENNOGO VESA V GRUNTOVOM OSNOVANII S TRAPECEIDAL'NYM VYREZOM* [The stress-strain state due to its own weight in a soil base with a trapezoidal cutout]. MATEC Web of Conferences. 193, 03047 (2018) Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819303047>.
6. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Borisov S.V., Kostenko S.S. Dinamicheskij raschyot i analiz polusfericheskoj obolochki pokrytiya ob"ekta «Zimnij sad» Tekhnoparka Rostovskogo Gosudarstvennogo Stroitel'nogo Universiteta (RGSU) [Dynamic calculation and analysis of the hemispherical shell of the Winter Garden object of the Technopark of the Rostov State Construction University (RGSU)]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Don Engineering Bulletin]. 2016, I. 1. Available at: ivdon.ru.
7. Agahanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Regulirovanie parametrov sobstvennyh kolebanij prostranstvennogo karkasa zdaniya [Regulation of parameters of natural oscillations of the spatial frame of the building]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2016, I. 3, pp. 8–15.