



УДК 624.04

doi: 10.48612/dnitii/2023_49_17-24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО УНИКАЛЬНОГО СООРУЖЕНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Э. К. Агаханов *

М. К. Агаханов **

Е. В. Труфанова ***

* Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала

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

*** Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

Аннотация

Целью работы является моделирование поведения большепролетного сооружения при динамическом воздействии и исследование влияния жесткости системы на частоты и формы собственных колебаний конструкции. Применен численный метод исследования — метод конечных элементов. С использованием программных комплексов «Ли́ра-САПР» и «САПФИР» разработана конечно-элементная модель стержневой расчетной схемы методом конечных элементов для проведения исследования комплекса на динамическое воздействие и определение частот и форм собственных колебаний конструкции большепролетного сооружения. Проведен модальный анализ. Для получения суммы модальных масс более 90% учитывается более 300 форм собственных колебаний. Первая и вторая формы колебаний являются поступательными, а третья — крутильной. Разработана новая система связи, которая отличается от первой наличием пространственных ферм между основными несущими конструкциями и увеличенным числом опоясывающих ферм. Проведен модальный анализ для второго варианта расчетной схемы. Для сбора 90% модальных масс учитывается более 195 форм. Первая и вторая формы являются поступательными, как и для первого варианта, а третья представляет собой вертикальное движение опорного кольца. На основании частот колебаний и модальных масс, в качестве основной расчетной схемы выбран второй вариант конструирования и проведен его расчет на динамическое воздействие от пульсационной составляющей ветровой нагрузки.

Ключевые слова

численное моделирование, параметрическая архитектура, формообразование, большепролетное сооружение, конструирование, метод конечных элементов, динамический расчет, ветровая нагрузка, пульсационная составляющая, модальный анализ

Дата поступления в редакцию
07.11.2023

Дата принятия к печати
17.11.2023

Введение

Тенденция увеличения пролетов между опорами открывает новые возможности в объемно-планировочных решениях, в наибольшей мере отвечает функциональным технологическим требованиям, позволяет получить яркие архитектурные образы современных сооружений [1–2].

В основу конструирования поверхности покрытия рассматриваемого большепролетного здания был положен бионический подход в параметрической архитектуре. Прообразом использованной волнистой поверхности с псевдоверширами на круглом плане служат двустворчатые моллюски.

Постановка задачи. Поверхность образовывается вращением непрерывно изменяющейся псевдоверширы, лежащей в плоскостях пучка с фиксированной прямой, совпадающей с осью Oz. Покрытие имеет следующую параметрическую форму задания:

$$\begin{aligned}x &= x(u, v) = u \sin(v), & y &= y(u, v) = u \cos(v), \\z &= z(u, v) = -\frac{2du^2[A + B\cos(pv)]}{d(u^2 - c^2) + 2c^2[A + B\cos(pv)]}\end{aligned}$$

где d — максимальная стрела подъема поверхности над плоскостью,

c — радиус круглого плана поверхности на плоскости;

A, B, p — константы;

u, v — цилиндрические координаты волнистой поверхности.

При этом: $0 \leq u \leq c$; $0 \leq v \leq 2\pi$; $-d \leq z \leq 0$;

Если $A > 0$: $A > \frac{d}{2} + |B|$; если $A < 0$: $A < |B|$

Форма псевдоверширы задана функцией управления $R = A + B\cos(pv)$, что придает поверхности волнистость. Рассматриваемая волнистая поверхность может быть причислена к классу поверхностей зонтичного типа.

Исследование принципов формообразования выполнено в программном комплексе САПФИР. Моделирование покрытия производится с помощью функции «линии и поверхности»

Изначально приняты следующие параметры: $0 \leq u \leq c$; $0 \leq v \leq 2\pi$; $c = 2$; $d = 1,5$; $B = 1$; $A = 2$; $p = 4$.

В результате получена поверхность, представленная на **рис. 1**.

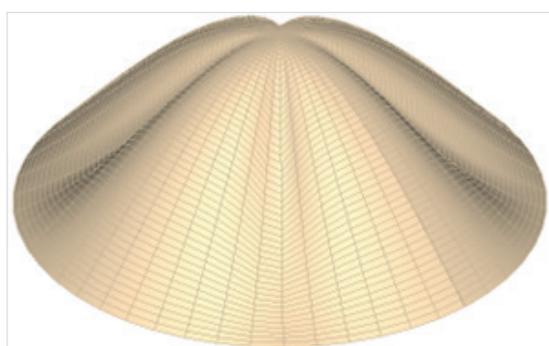


Рис. 1. Начальная модель поверхности

На первом этапе варьируется параметр A . С учетом стрелы подъема $d = 1,5$; $B = 1$ константа A может принимать значения: $A > 1,75$ и $A < -1$ (**рис. 2а**). В зависимости от этого, видоизменяется глубина волнистости поверхности. В случаях, когда рассматриваемый параметр принимает значения

от минус 1 до минус 1,75, знаменатель обращается в 0. Параметр c определяет радиус кругового плана поверхности на плоскости (рис. 2б). Значение параметра p влияет на количество «ушек» поверхности (рис. 2в).



Рис. 2. Варьирование параметров: а) $A = -1,01$; б) $c = 2,14$; в) $p = 4$

Параметры u и v — цилиндрические координаты волнистой поверхности. Для проектируемого покрытия принимаются: $0 \leq u \leq c$ и $-\pi \leq v \leq 2\pi$. Параметр d влияет на стрелу подъема и определяется в зависимости от требуемой высотной отметки.

Константа 2 в числителе и знаменателе влияет на округлость «ушек». При ее увеличении контуры становятся более обтекаемыми (рис. 3).

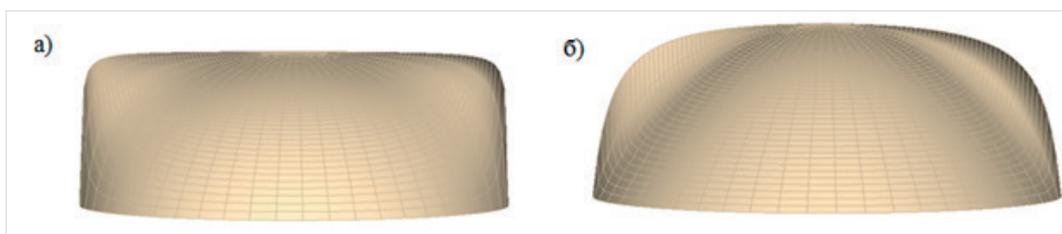


Рис. 3. Константа: а) равна 2; б) равна 25

Окончательно поверхность задана следующими параметрами (рис. 4):

$$0 \leq u \leq c; \quad -\pi \leq v \leq 2\pi; \quad c = 2; \quad d = 1,5; \quad B = 1; \quad A = -1,01; \quad p = 5.$$

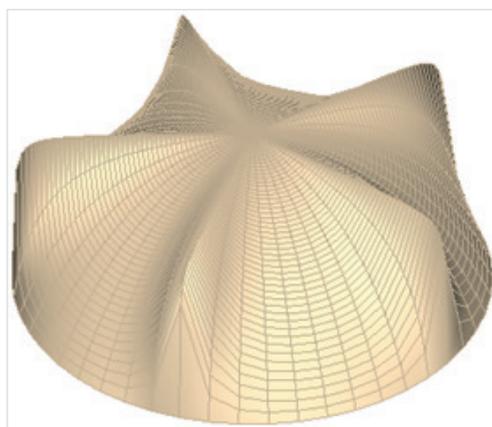


Рис. 4. Окончательная вариация поверхности

Полученная форма поверхности может быть использована при проектировании покрытия большепролетного здания. Диаметр здания составляет 100 м, высота — 37,5 м. В качестве основы приняты металлические фермы

Методы исследования

Для создания расчетной схемы в ПК «ЛИРА-САПР» разработана конечно-элементная модель, представляющая собой пространственную стержневую систему [3–6].

Конструктивное решение каркаса принято в виде плоских стальных ферм, расположение которых определяется заданной формой здания. Для обеспечения данной формы, необходимо использовать как минимум 3 типа стальных ферм с различными очертаниями поясов и решеток.

Изначально были приняты конструктивные схемы типа А, Б и В (рис. 5 а-в).

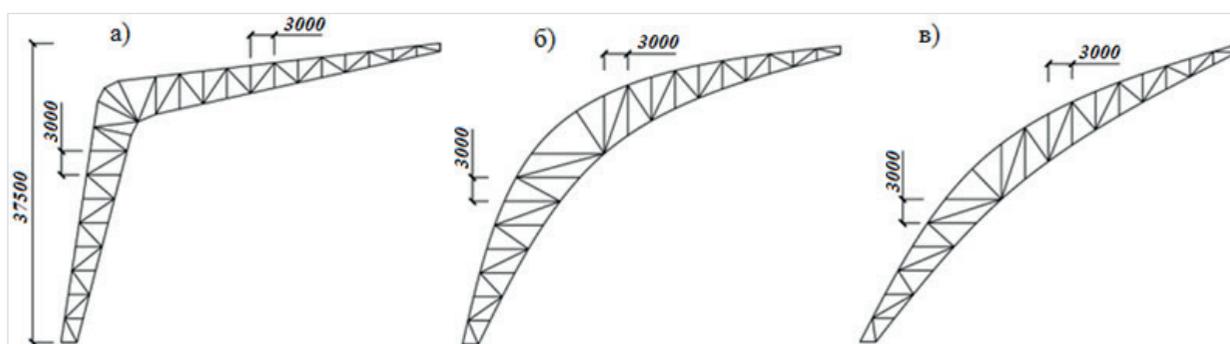


Рис. 5. Конструктивные схемы ферм: а) тип А; б) тип Б; в) тип В

Конструкции покрытия рассчитаны на 4 статических нагружения, включающие в себя собственный вес элементов и нагрузки от покрытия; две взаимоисключающих схемы нагрузок от снега, ветровая нагрузка (с учетом пульсации). Расчет производится по расчетным сочетаниям усилий и расчетным сочетаниям нагрузок (РСН). Принято, что конструкция раскреплена из плоскости горизонтальными связями.

В результате расчета с учетом пульсационной составляющей ветровой нагрузки получены перемещения узлов фермы по осям X и Z , а также усилия в ее элементах. При этом максимальный прогиб составляет 35; 22,2 и 32,4 мм для каждого типа фермы соответственно, что не превышает допустимый по действующей нормативной документации.

Исходя из полученных результатов конструирования, окончательно приняты бесшовные горячекатаные трубы следующих сечений:

1. Для фермы типа А: элементы поясов — 273×8 мм, элементы решетки: вертикальные и горизонтальные стойки — 83×4 мм, раскосы — 152×4,5 мм.
2. Для фермы типа Б: элементы поясов — 325×7,5 мм, элементы решетки: вертикальные и горизонтальные стойки — 146×4,5 мм, раскосы — 180×5 мм.
3. Для фермы типа В: элементы поясов — 325×7,5 мм, элементы решетки: вертикальные и горизонтальные стойки — 114×4 мм, раскосы — 194×5 мм.

На основании проведенного выбора конструктивных схем и подбора сечений производится моделирование покрытия большепролетного здания [7–9]. Для исключения геометрической неизменяемости и увеличения жесткости конструкции разработана система связей, представляющая

собой 3 опоясывающие пространственные фермы. Между ними запроектированы плоские фермы, связывающие узлы верхний поясов основных несущих конструкций (рис. 6).

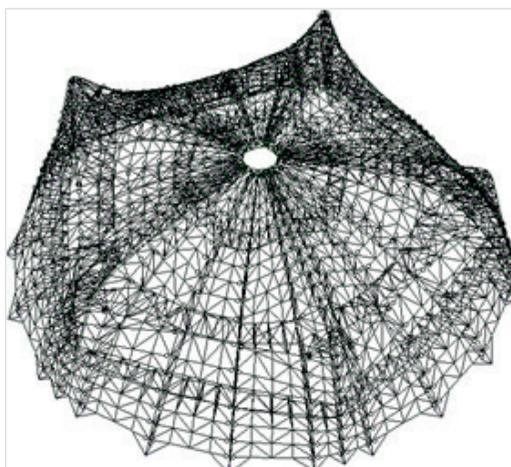


Рис. 6. КЭ модель покрытия

Обсуждение результатов

Выполнен динамический расчет конечно-элементной модели покрытия [10–11]. В результате расчета был получен спектр частот и формы собственных колебаний (рис. 7). Первая и вторая формы собственных колебаний — поступательные, третья форма является крутильной.

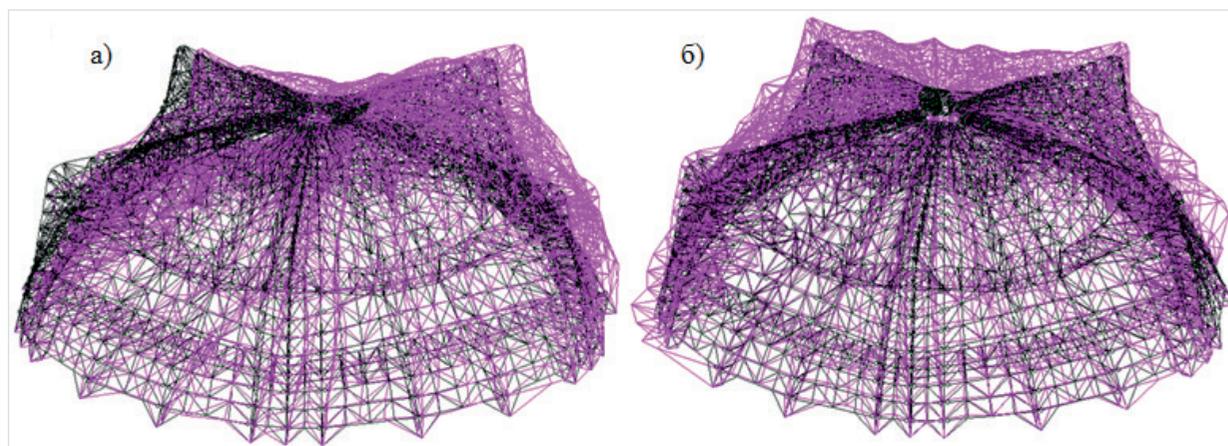


Рис. 7. Формы колебаний: а) 1-я форма; б) 2-я форма

По результатам анализа форм и частот собственных колебаний принято решение связать фермы типа А и типа В пространственной фермой (второй вариант конструктивного решения). В результате это позволило уменьшить расчетные длины поясов и соответственно уменьшить сечения элементов. Для раскрепления ферм типа В было изменено расположение опоясывающих пространственных ферм и увеличено их количество.

Выполнен динамический расчет второго варианта конструктивного решения. Изменился характер третьей формы колебаний: форма представляет собой вертикальное движение опорного кольца (рис. 8).

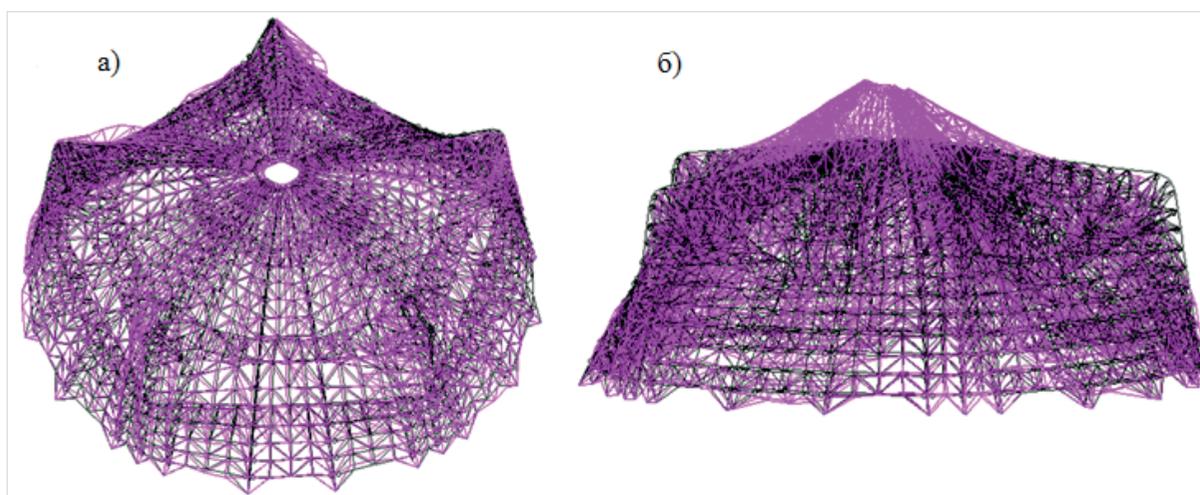


Рис. 8. Третья форма колебаний: а) 1 вариант конструирования; б) 2 вариант конструирования

Выполнено сравнение частот собственных колебаний по двум вариантам конструирования (рис. 9). Анализ показал, что при практически одинаковой частоте собственных колебаний на первых формах колебаний, разница в частотах на третьей форме и выше составляет более 30%.

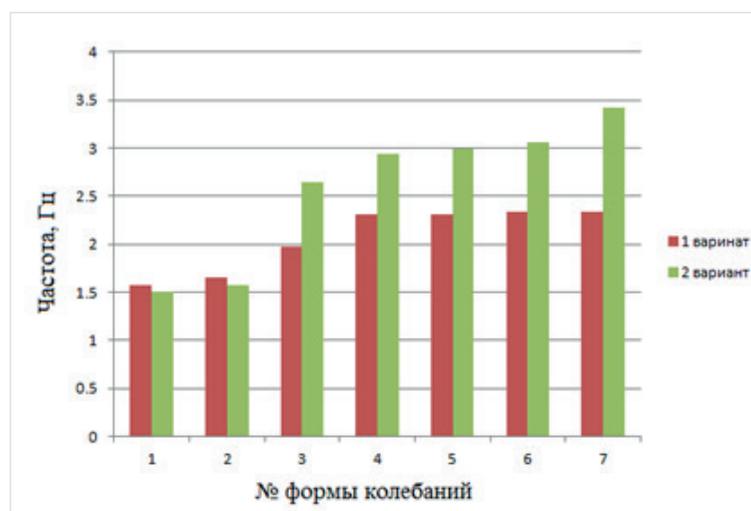


Рис. 9. График сравнения частот собственных колебаний по двум вариантам конструирования

Вывод

Разработаны 2 варианта расчетной схемы для покрытия большепролетного здания. Произведен модальный анализ на более чем 300 форм колебаний. При этом модальные массы в сумме дают более 90% при учете не менее 317 форм для первого конструктивного решения и не менее 195 форм для второго. При втором варианте конструктивной схемы наблюдается больший прирост в частотах колебаний и сумме модальных масс.

В результате во внимание принимается только первые 25 форм собственных колебаний, так как дальнейший расчет дает незначительный прирост, и вклад каждой последующей формы составляет менее 1%.

Выбранная конструктивная схема рассчитана на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки, а также определены перемещения ее узлов при двух расчетных сочетаниях нагрузок. Полученные перемещения не превышают допустимых значений.

Библиографический список

1. *Вентцели А. В.* Надежность конструкций большепролетных строений // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 5. С. 579 – 583.
2. *Еремеев П. Г.* Особенности проектирования уникальных большепролетных зданий и сооружений. // Строительная механика и расчет сооружений. 2005. № 1.
3. *Агаханов Г. Э.* Решение задач механики деформируемого твердого тела с использованием фиктивных расчетных схем // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — № 3. — 2015.
4. *Агаханов Э. К.* О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, 2013. с. 14 – 19.
5. *Сысоева Е. В.* Научные подходы к расчету и проектированию большепролетных конструкций // ВЕСТНИК МГСУ. 2017. № 2. С. 131 – 141.
6. *Агаханов Э. К., Кравченко Г. М., Труфанова Е. В., Агаханов М. К.* Применение информационных технологий при моделировании объекта параметрической архитектуры. — Системные технологии. — 2023. — № 2 (47). — С. 51 – 58.
7. *Агаханов Э. К.* Развитие комплексных методов в механике деформируемого твердого тела, Материалы Международной научно-практической конференции, ФГБОУ ВПО «ГГНТУ», г. Грозный, 2015. с. 99 – 105.
8. *Batht K.-J.* Finite Element Procedures. New Jersey: Prentice Hall, 1996. с. 95 – 97.
9. *Сагдатуллин М. К.* Постановка задачи численного моделирования конечных деформаций МКЭ // Вестник Казанского технологического университета. 2013. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/postanovka-zadachi-chislennogo-modelirovaniya-konechnyh-deformatsiy-mke>
10. *Кравченко Г. М., Труфанова Е. В., Ладная Е. В.* Рациональное проектирование элементов пространственного каркаса здания // Инженерный вестник Дона, 2017, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/3989
11. *Кравченко Г. М., Труфанова Е. В., Долженко А. В.* Динамический расчет зданий на ветровые нагрузки с учетом пульсационной составляющей: Электронный научный журнал APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. Краснодар, 2013. с. 2.

MODELING THE BEHAVIOR OF A LONG-SPAN
UNIQUE STRUCTURE UNDER DYNAMIC IMPACT

E. K. Agahanov*
M. K. Agahanov**
E. V. Trufanova***

* Dagestan State Technical University, Makhachkala

** Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow

*** Don State Technical University, Rostov-on-Don

Abstract

The purpose of the work is to simulate the behavior of a long-span structure under dynamic influence and studying the influence of system rigidity on the frequencies and modes of natural vibrations of the structure. A numerical research method was used - the finite element method. Using the Lyra-CAD and SAPPFIR software packages, a finite element model of a beam design scheme using the finite element method was developed to conduct a study of the complex on the dynamic impact and determine the frequencies and modes of natural vibrations of a long-span structure. Modal analysis was carried out. To obtain a sum of modal masses of more than 90%, more than 300 natural vibration modes are taken into account. The first and second modes of vibration are translational, and the third is torsional. A new communication system has been developed, which differs from the first in the presence of spatial trusses between the main supporting structures and an increased number of encircling trusses. A modal analysis was carried out for the second version of the design scheme. To collect 90% of the modal masses, more than 195 forms are taken into account. The first and second forms are translational, as for the first option, and the third represents the vertical movement of the support ring. Based on the oscillation frequencies and modal masses, the second design option was selected as the main design scheme and its calculation for the dynamic effect from the pulsating component of the wind load was carried out.

The Keywords

numerical modeling, parametric architecture, shaping, long-span structure, design, finite element method, dynamic calculation, wind load, pulsation component, modal analysis

Date of receipt in edition

07.11.2023

Date of acceptance for printing

17.11.2023

Ссылка для цитирования:

Э. К. Агаханов, М. К. Агаханов, Е. В. Труфанова. Моделирование поведения большепролетного уникального сооружения при динамическом воздействии. — Системные технологии. — 2023. — № 4 (49). — С. 17 – 24.