

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.048

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.24-34

Моделирование сейсмического воздействия на двухконтурный геодезический купол с учетом податливости узловых соединений

Пётр Павлович Гайджуров¹, Надежда Геннадьевна Царитова²

¹ Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия;

² Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ)); г. Новочеркасск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время актуальна проблема разработки легковозводимых самонесущих объектов, обеспечивающих надежную и универсальную защиту при любых экстремальных природных явлениях. К объектам такого класса можно отнести двухконтурные геодезические купольные системы, дизайн которых в полной мере отвечает современным направлениям геоклиматической или климатоустойчивой архитектуры. Несущий каркас двухконтурного геодезического купола формируется системой повторяющихся стержневых фрагментов, соединяемых с помощью специальных сборно-разборных узловых соединений. В литературе отсутствуют сведения о конечно-элементном моделировании динамического отклика двухконтурного геодезического купола на сейсмическое воздействие с учетом податливости узловых соединений стержней несущего каркаса.

Материалы и методы. Для численного анализа переходного процесса использовались макросы, написанные на языке APDL, встроенного в программный комплекс ANSYS Mechanical. Учет линейных и угловых податливостей узловых соединений стержней каркаса купола реализован с применением комбинированных конечных элементов COMBIN14. Процесс построения конечно-элементного ансамбля, состоящего из балочных и комбинированных элементов, автоматизирован.

Результаты. В итоге модального анализа установлено, что вид геометрии стержневого каркаса геодезического купола в сочетании с параметрами податливостей поворотных шарниров существенно влияет на собственные пары. Выполнены вычислительные эксперименты для двух вариантов каркасов геодезических куполов при сейсмическом воздействии интенсивностью восемь баллов.

Выводы. Предлагаемая концепция моделирования узловых соединений стержневого каркаса купола с помощью комбинированных конечных элементов позволяет опосредованно учесть эффект демпфирования при динамическом воздействии. Разработанная методика построения конечно-элементной модели каркаса геодезического купола с учетом шарнирно-стержневых связей может быть использована при проектировании дизайна реального арт-объекта подобного типа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: двухконтурный геодезический купол, метод конечных элементов, модальный анализ, акселерограмма, переходной процесс, программные комплексы, узловое соединение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гайджуров П.П., Царитова Н.Г. Моделирование сейсмического воздействия на двухконтурный геодезический купол с учетом податливости узловых соединений // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 1. С. 24–34. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.24-34

Автор, ответственный за переписку: Надежда Геннадьевна Царитова, ncaritova@yandex.ru.

Modelling of seismic impact on a double-contour geodesic dome taking into account the flexibility of nodal connections

Peter P. Gaydzhurov¹, Nadezhda G. Tsaritova²

¹ Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation;

² M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI); Novocherkassk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Currently, an urgent problem is the development of self-supporting lightweight structures that provide reliable and universal protection in any extreme natural phenomena. Objects of this class include double-contour geodesic dome systems, the design of which fully meets modern trends in geoclimatic or climate-resistant architecture. The supporting frame of a double-contour geodesic dome is formed by a system of repeating rod fragments connected using special collapsible

nodal connections. There is no information in the literature on finite element modelling of the dynamic response of a double-contour geodesic dome to a seismic impact, taking into account the accuracy of the nodal joints of the supporting frame rods.

Materials and methods. Macros written in the APDL language embedded in the ANSYS Mechanical software package were used for numerical analysis of the transient process. Accounting for the linear and angular ductility of the nodal joints of the dome frame rods is implemented using combined finite elements COMBIN14. The process of building a finite element ensemble consisting of beams and combined elements is automated.

Results. As a result of the modal analysis, it was found that the type of geometry of the core frame of the geodesic dome in combination with the parameters of the ductility of the rotary balls significantly affects its own pairs. Computational experiments have been performed for two variants of geodesic dome frames under seismic impact with an intensity of eight points.

Conclusions. The proposed concept of modelling nodal joints of the dome core frame using combined finite elements allows us to indirectly take into account the effect of damping under dynamic influence. The developed technique of constructing a finite element model of the geodesic dome frame, taking into account hinge-rod connections, can be used in designing the design of a real art object of this type.

KEYWORDS: double-contour geodesic dome, finite element method, modal analysis, accelerogram, transition process, software packages, nodal connection

FOR CITATION: Gaydzhurov P.P., Tsaritova N.G. Modelling of seismic impact on a double-contour geodesic dome taking into account the flexibility of nodal connections. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(1):24-34. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.1.24-34 (rus.).

Corresponding author: Nadezhda G. Tsaritova, ncaritova@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Вид куполов, основанный на геодезической параметризации геометрии, широко применяется в строительстве [1–6]. Двухконтурный геодезический купол, помимо первого самонесущего стрелчатого контура, имеет второй пластинчатый контур. В качестве формирующих элементов геодезического купола применяются равнобедренные трехгранные, пятигранные и шестигранные поверхностно-стержневые структуры [7–10].

Геодезические купола обладают рядом преимуществ перед обычными сводами с положительной гауссовой кривизной — это архитектурная совместимость практически со всеми строительными объектами, оптимальная материалоемкость, равнопрочность, унификация конструктивных элементов [4, 11–13].

Цель исследования — анализ зависимости деформационных свойств двухконтурного геодезического купола от геометрических параметров при заданном динамическом воздействии. Для вычислительных экспериментов использовалось сочетание программных комплексов SolidWorks [14] и ANSYS Mechanical¹, позволяющих моделировать геометрию

¹ ANSYS Mechanical APDL Programmers Reference. Reference. Release 15.0 ANSYS, Inc. URL: <http://www.ansys.com>

и динамический отклик пространственной стрелчатой конструкции [15–17]. Настоящее исследование базируется на концепции шарнирного шестилучевого узлового соединения стержней несущего каркаса купола. Компонировочный эскиз узлового соединения показан на рис. 1. Подробное описание данной конструкции приведено в работе [18].

Предлагаемое узловое соединение отвечает требованиям унификации и компактности, что придает ему свойства мобильности, вариативности пространственных форм, быстрого монтажа и демонтажа конструкции без использования специальных инструментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В общем случае уравнение движения механической системы в конечно-элементной формулировке имеет следующий вид:

$$[M]\{W''(t)\} + [C]\{W'(t)\} + [K]\{W(t)\} = \{F_0\} + \{F(t)\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$, $[K]$ — матрицы масс, демпфирования и жесткости ансамбля конечных элементов размерностью $ng \times ng$; $\{W''(t)\}$, $\{W'(t)\}$, $\{W(t)\}$ — векторы-столбцы соответственно узловых ускорений, скоростей, перемещений; $\{F_0\}$, $\{F(t)\}$ — векторы-столбцы

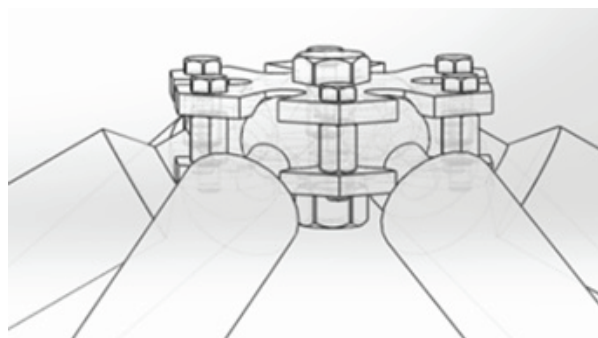


Рис. 1. Эскиз шестилучевого шарнирного узлового соединения

Fig. 1. Sketch of a six-beam articulated joint

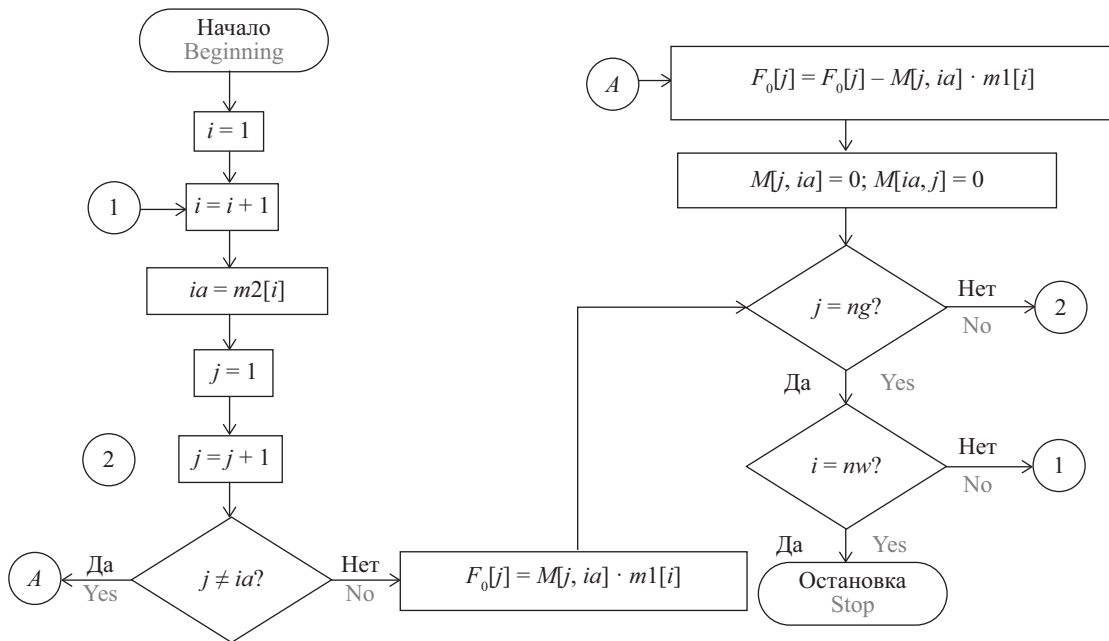


Рис. 2. Блок-схема алгоритма корректировки матрицы $[M]$ и $\{F_0\}$
 Fig. 2. Block diagram of the matrix correction algorithm $[M]$ and $\{F_0\}$

заданных статических и динамических нагрузок в момент времени t .

В дальнейшем полагаем, что матрицы $[M]$ и $[K]$ согласованные. Кинематическое воздействие задаем с помощью акселерограммы $\{\bar{W}''(t)\}$. При таком способе задания динамического воздействия второе слагаемое правой части уравнения (1) $\{F(t)\} = 0$.

Для учета заданных узловых ускорений $\{\bar{W}''(t)\}$ выполняем корректировку матрицы $[M]$ и вектора-столбца $\{F_0\}$ на каждом временном шаге. Для этого введем одномерные массивы $[m1]$ и $[m2]$ размерностью $1 \times nw$, где nw — число заданных узловых ускорений на t_k временном шаге. Массив $[m2]$ предназначен для хранения в порядке возрастания номеров степеней свободы, в направлении которых заданы ускорения. Таким образом, элемент $m1[i]$ является заданным узловым ускорением $\bar{W}_j''(t)$ в направлении $m2[i]$ -й степени свободы на j -м временном шаге. Блок-схема алгоритма корректировки матрицы $[M]$ и вектора-столбца $\{F_0\}$ с учетом кинематических граничных условий приведена на рис. 2.

На рис. 3 квадратные и фигурные скобки в обозначениях матрицы $[M]$ и \bar{W}_i'' вектора-столбца $\{F_0\}$ опущены. В результате корректировки $[M]$ с учетом $\{\bar{W}''(t)\}$ внедиагональные строки и столбцы данной матрицы, соответствующие заданному ускорению \bar{W}_i'' , ($i = 1, nw$), обнуляются, а элементы на главной диагонали (M_{ij}) остаются без изменений. При этом элементы вектора-столбца $\{F_0\}$ при $j \neq i$ ($j = 1, ng$) преобразуем вычитанием произведения $-M_{ji}\bar{W}_i''$, а элемент F_{0i} заменяем на произведение M_{ii} . Знак минус в произведении $M_{ji}\bar{W}_i''$ указывает на то, что узловые силы инерции направлены противоположно соответствующим ускорениям.

Выполним численный анализ динамического отклика двухконтурного геодезического купола на сейсмическое воздействие с учетом податливости узловых соединений. Рассмотрим два варианта стержневых каркасов (рис. 3). Расчетная схема купола для первого варианта стержневого каркаса показана на рис. 4. Для второго варианта каркаса расчетная схема аналогична. Габариты стержневых

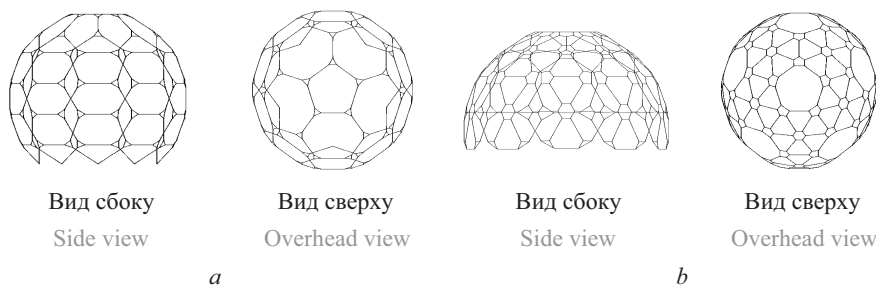


Рис. 3. Стержневые каркасы: a — первый вариант; b — второй вариант
 Fig. 3. The rod grid: a — is the first option; b — is the second option

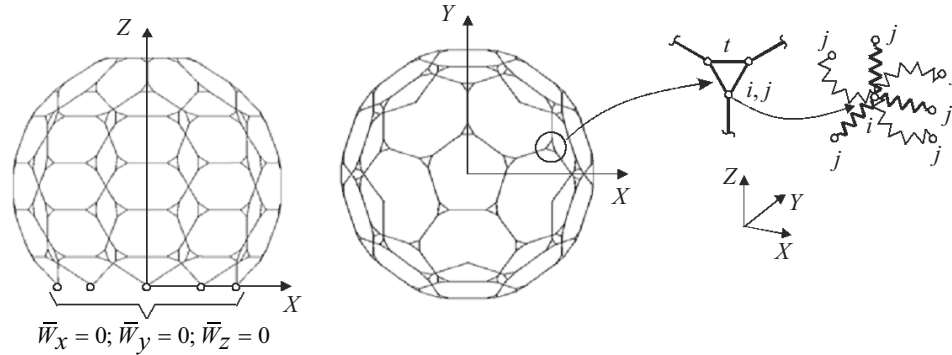


Рис. 4. Расчетная схема стержневого каркаса геодезического купола (первый вариант)

Fig. 4. The analytical model of the rod grid of the geodesic dome (the first option)

каркасов: для первого варианта — высота 2,45 м; размеры в плане 2,80 × 2,86 м; для второго варианта — высота 1,605 м; размеры в плане 1,429 × 1,404 м. Размеры представленных вариантов каркасов назначены на основании планируемых натурных испытаний данных моделей на динамическое воздействие.

Механические константы стержней каркасов (алюминиевый сплав): модуль упругости $E = 6,8 \times 10^4$ МПа; плотность $\rho = 2885$ кг/м³. Длины стержней каркасов и узловых платформ: первый вариант 0,42 и 0,15 м; второй вариант 0,35 и 0,12 м. Все стержни имеют трубчатую форму с наружным диаметром 0,018 м. Толщина стенки трубы 0,0015 м.

Как показано на рис. 4, расчетная схема включает платформу t , образованную из трех стержневых элементов. В каждой вершине равностороннего треугольника t между парными узлами i, j расположены упругие шарниры. Причем каждый упругий шарнир включает три линейных и три поворотных пружины. Для обозначения элементов упругого шарнира приняты следующие символы: k_x, k_y, k_z — коэффициенты жесткостей линейных пружин, Н/м, ориентированных вдоль осей X, Y, Z ; $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$ — соответствующие жесткости поворотных пружин, Н·м/рад. Каждый стержень каркаса и узловой платформы моделируем одним балочным КЭ. Значения коэффициентов жесткости k_x, k_y, k_z принимаем численно равными величине E . Модуль упругости стержней узловой платформы принимаем равным $E_t = 10^{15}$ МПа, т.е. платформа практически недеформируемая.

Первые шесть собственных частот

The first six natural frequencies

$\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z,$ Н·м/рад N·m/rad	$\lambda_{1,2},$ Гц Hz	$\lambda_3,$ Гц Hz	$\lambda_4,$ Гц Hz	$\lambda_{5,6},$ Гц Hz
10^3	4,41	9,26	10,6	14,5
10^4	6,38	13,5	16,9	21,8
10^5	6,84 (6,90)	14,4 (14,5)	18,4 (18,6)	23,4 (23,6)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты модального анализа для первого варианта каркаса купола при различных значениях поворотных жесткостей представлены в таблице и на рис. 5. В таблице значения собственных частот λ_i приведены в Гц, в скобках представлены величины λ_i , соответствующие каркасу без упругих шарниров. Отметим, что значения поворотных жесткостей меньше 10^3 Н·м/рад превращают купол в геометрически изменяемую конструкцию. Здесь и далее линейные жесткости k_x, k_y, k_z принимались равными E . Связи, накладываемые на опорные узлы каркаса: $\bar{W}_x = 0; \bar{W}_y = 0; \bar{W}_z = 0$.

Аналогичные результаты для второго варианта каркаса при $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3$ Н·м/рад приведены на рис. 6. Как и следовало ожидать, ввиду симметрии рассматриваемых вариантов каркасов куполов получены кратные собственные пары, в частности пары 1 и 2.

При значениях $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3$ Н·м/рад для второго варианта каркаса получаем следующие значения собственных частот: $\lambda_{1,2} = 17,13$ Гц; $\lambda_3 = 30,43$ Гц; $\lambda_4 = 40,36$ Гц; $\lambda_6 = 45,13$ Гц. При этом формы собственных колебаний совпадают с показанными на рис. 6.

Как видно из приведенных в таблице и на рис. 6 данных, с увеличением жесткостей поворотных пружин на два порядка значения первых собственных частот возрастают для первого варианта каркаса в 1,5 раза, для второго варианта — в 1,8 раза.

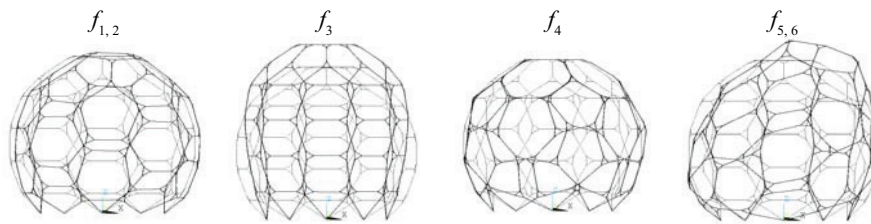


Рис. 5. Первые шесть собственных форм f_i (первый вариант каркаса)

Fig. 5. The first six own forms f_i (the first version of the of the rod grid)

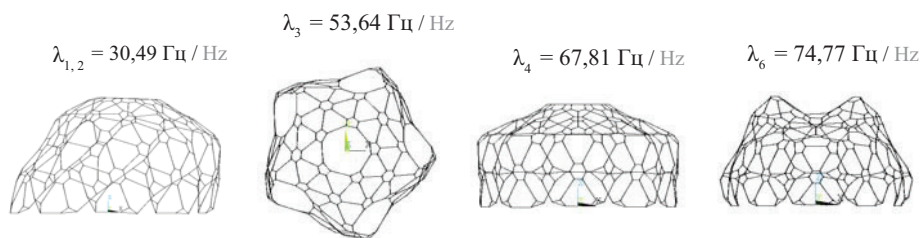


Рис. 6. Первые шесть собственных пар для второго варианта каркаса

Fig. 6. The first six own forms for the second version of the rod grid

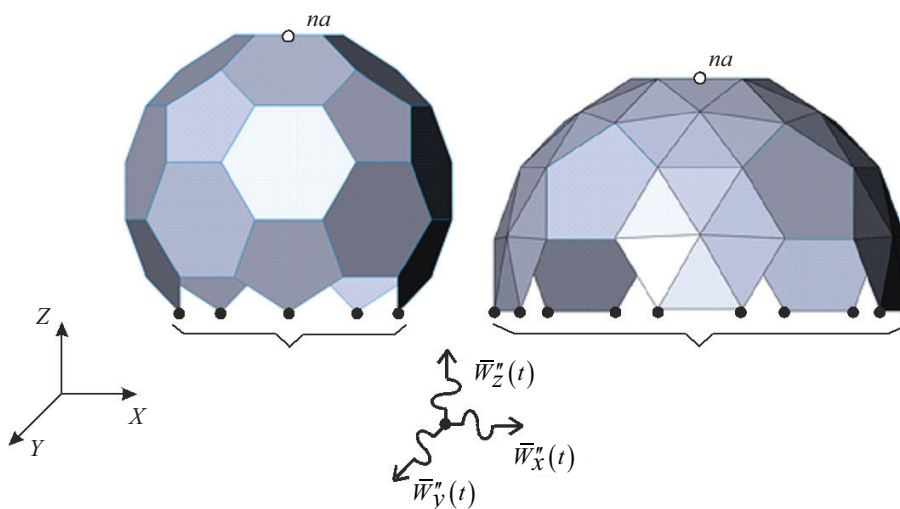
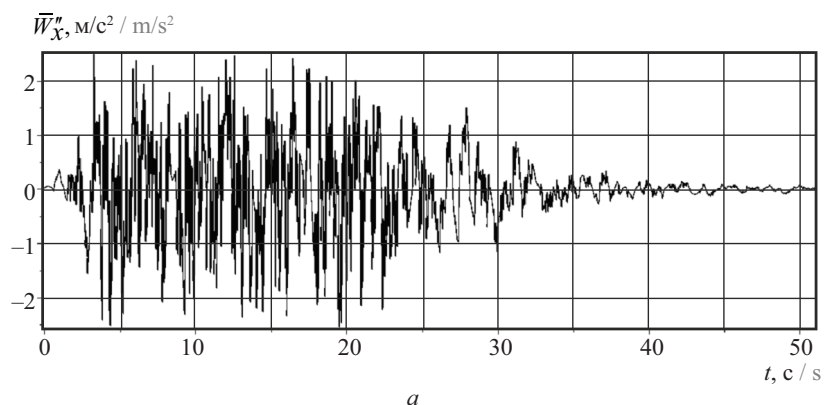


Рис. 7. Схема моделирования сейсмического воздействия на купола

Fig. 7. Simulation scheme of seismic impact on domes



a

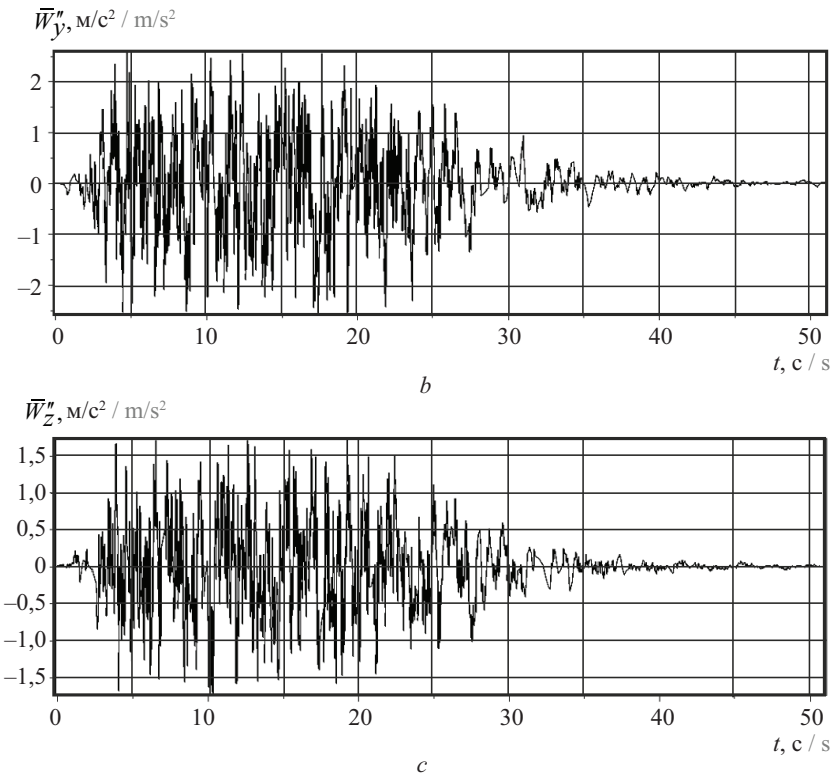


Рис. 8. Компонента акселерограммы по оси: а — X; б — Y; с — Z

Fig. 8. The X-axis component of the accelerogram (a); the Y-axis component of the accelerogram (b); the Z-axis component of the accelerogram (c)

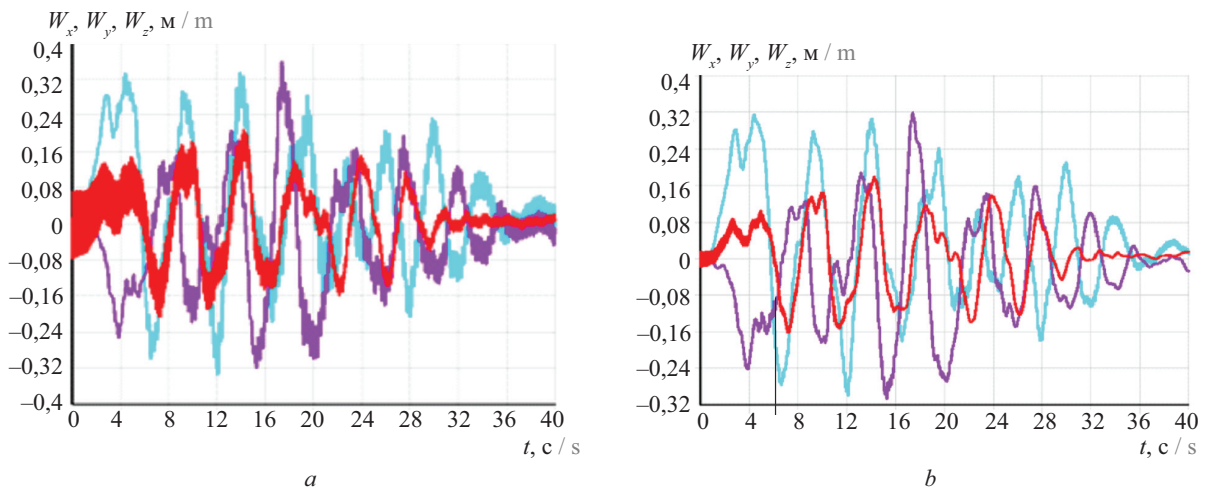


Рис. 9. Графики $W_x \sim t, W_y \sim t, W_z \sim t$ в точке na (рис. 5): — W_x ; — W_y ; — W_z ; а — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3$ Н·м/рад; б — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5$ Н·м/рад

Fig. 9. The schedule $W_x \sim t, W_y \sim t, W_z \sim t$ at the point na (Fig. 5): — W_x ; — W_y ; — W_z ; а — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3$ N·m/rad; б — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5$ N·m/rad

Сейсмическое воздействие на рассматриваемые варианты куполов задаем в форме трехкомпонентной акселерограммы $\bar{W}_x''(t), \bar{W}_y''(t), \bar{W}_z''(t)$ (рис. 7).

На рис. 8 показаны графики функций $\bar{W}_x''(t), \bar{W}_y''(t), \bar{W}_z''(t)$, соответствующие сейсмическому воздействию интенсивностью 8 баллов. Из приведенных графиков

видно, что основное кинематическое воздействие сосредоточено на временном интервале от 3 до 30 с.

При реализации расчетов на сейсмическое воздействие демпфирование по Релю не учитываем.

Результаты конечно-элементного моделирования динамического отклика в виде графиков колеба-

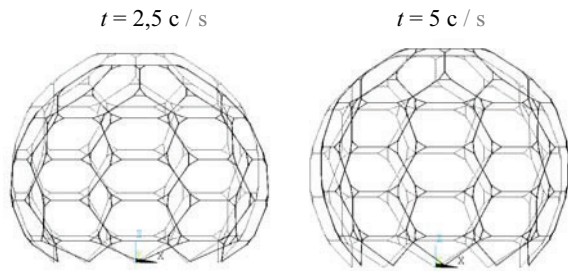


Рис. 10. Визуализация каркаса купола в процессе вынужденных колебаний ($\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$)

Fig. 10. Visualization of the dome frame in the process of forced vibrations ($\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$)

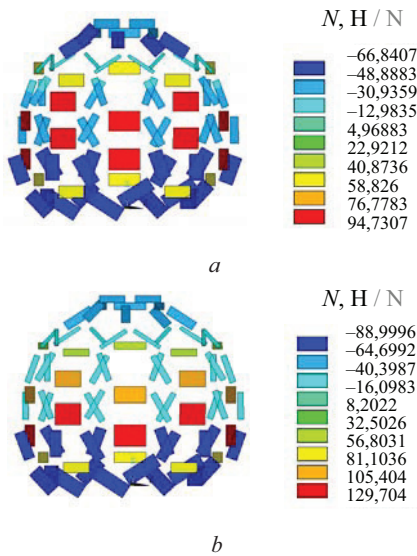


Рис. 11. Визуализация распределения N в стержнях купола ($t = 2,5 \text{ с}$): a — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$; b — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$

Fig. 11. Visualization of the N distribution in the dome rods a — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$; b — $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$

ний вершины геодезического купола $W_x \sim t, W_y \sim t, W_z \sim t$ для первого варианта каркаса в точке na представлены соответственно на рис. 9. Здесь и далее шаг по временной координате принимался равным 0,01 с; число шагов — 4000.

Визуализация деформации купола для моментов времени $t = 2,5 \text{ с}$ и $t = 5 \text{ с}$ показана на рис. 10 (тонкий

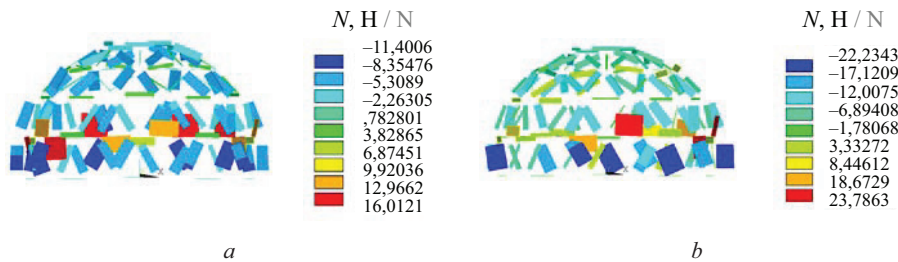


Рис. 14. Визуализация распределения N в стержнях купола: a — 2,5 с; b — 8 с

Fig. 14. Visualization of the N distribution in the dome rods: a — 2.5 s; b — 8 s

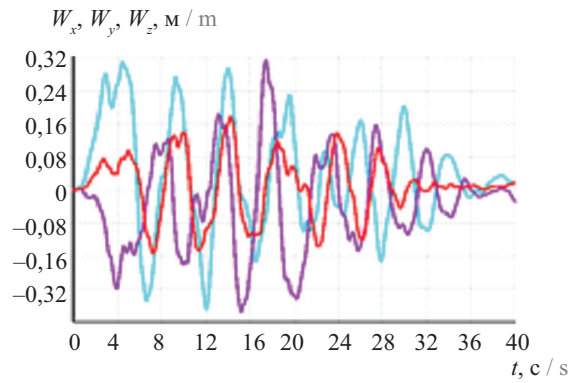


Рис. 12. Графики $W_x \sim t, W_y \sim t, W_z \sim t$ в точке na (рис. 5, второй вариант): — W_x ; — W_y ; — W_z

Fig. 12. The schedule $W_x \sim t, W_y \sim t, W_z \sim t$ at the point na (Fig. 5, the second option): — W_x ; — W_y ; — W_z

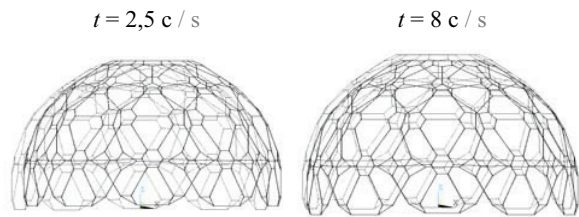


Рис. 13. Визуализация второго варианта каркаса купола в процессе вынужденных колебаний

Fig. 13. Visualization of the second version of the dome frame in the process of forced vibrations

контур — это положение купола в недеформированном состоянии).

Из графиков вынужденных колебаний на рис. 9 видно, что амплитудные значения перемещений $W_{x \max}$ и $W_{y \max}$ на верхней отметке достигают величины 0,32 м. При этом колебания купола носят затухающий характер. Причем при $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ в начальный момент ($t \leq 5 \text{ с}$) наблюдается заметное биение в направлении оси Z .

Визуализация полей экстремальных значений продольных сил N , соответствующих моменту времени $t = 2,5 \text{ с}$, в стержнях каркаса купола (первый вариант) представлена на рис. 11.

Как видно из рис. 9, увеличение поворотных жесткостей в узловых соединениях приводит к росту

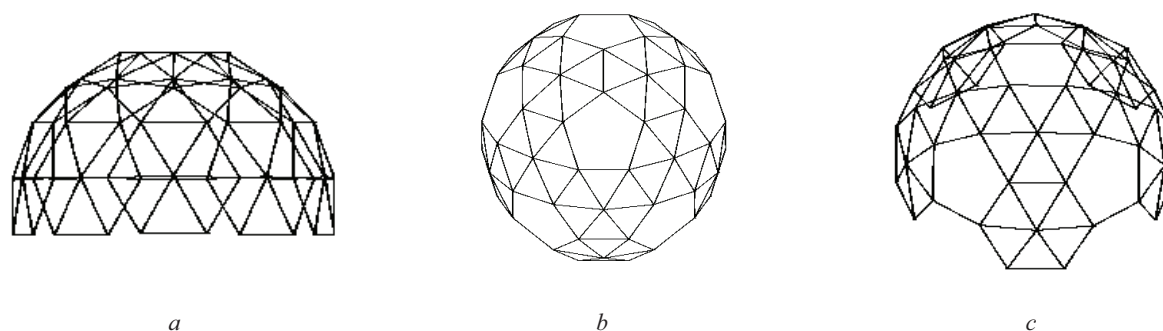


Рис. 15. Модель второго варианта каркаса купола без узловых шарнирных соединений: *a* — вид сбоку; *b* — вид в плане; *c* — аксонометрия

Fig. 15. The model of the second version of the dome frame without nodal hinge joints: *a* — side view; *b* — view in the plan; *c* — axonometry

максимальных растягивающих усилий в стержнях на 36 %. При этом в момент времени $t = 2,5$ с сжимающее продольное усилие увеличивается в 1,3 раза, а растягивающее — в 1,4 раза (рис. 11).

Результаты аналогичного динамического расчета для второго варианта стержневого каркаса представлены на рис. 12–14.

Расчетным путем установлено, что для второго варианта каркаса купола значения жесткостей поворотных пружин не влияют на конечный результат. Сравнивая графики колебаний на рис. 9, *b* и рис. 12, находим, что они практически идентичны. Это свидетельствует о том, что второй вариант каркаса купола по жесткости узловых соединений стержней эквивалентен модели без узловых шарнирных соединений, показанной на рис. 15.

Следует также отметить, что для второго варианта каркаса купола при заданном сейсмическом воздействии характерны более низкие экстремальные значения продольных усилий в стержнях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с предлагаемой концепцией исходная геометрия геодезического купола формируется с помощью системы твердотельного моделирования SolidWorks. На этом этапе из повторяющихся равносторонних пяти и шести узловых поверхностей собирается многогранник купола заданной конфигурации. Далее сформированная твердотельная модель импортируется в программный комплекс ANSYS Mechanical, где формируется базовая геометрия модели стержневого каркаса купола. С применением булевых операций все стержни укорачиваются на величину характерного размера площадки узлового соединения. Таким образом отдельно формируется геомет-

рия стержней каркаса и соответствующих площадок узловых соединений. Для построения конечно-элементного ансамбля несущего каркаса геодезического купола, состоящего из стержневых и комбинированных элементов, использована схема фрагментарной сборки заархивированных файлов в программном комплексе ANSYS.

С помощью модального анализа, выполненного для рассматриваемых моделей каркасов геодезических куполов, было выявлено влияние жесткостей поворотных пружин на собственные пары данных конструкций. В частности, установлено, что жесткостные характеристики купола, образованного из правильных пяти- и шестигранников, наиболее существенно зависят от параметров поворотных пружин.

Для динамического расчета каркаса купола использованы кинематические граничные условия, в соответствии с которыми в узлах основания конечно-элементной модели задавались ускорения в направлении глобальных осей X , Y , Z . С целью методологического анализа реализуемого подхода к моделированию динамического отклика на сейсмическое воздействие приведен подробный алгоритм реструктуризации глобальной матрицы масс и соответствующего вектора правых частей уравнения движения с учетом заданных узловых ускорений. В расчетах применены оцифрованные акселерограммы землетрясения интенсивностью восемь баллов. Установлено, что графики вынужденных колебаний для рассматриваемых моделей каркасов практически идентичны. Вместе с тем динамические реакции, возникающие в опорных стержнях каркаса, принимают наименьшее значение для варианта каркаса, образованного из усиленных шестигранников (второй вариант).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Травуш В.И., Антошкин В.Д., Ерофеева И.В., Гудожников С.С.* Исследование конструктивно-технологических возможностей сборных сферических оболочек // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 89–101. EDN SFOZYN.
2. *Есипова А.А.* Применение геодезических куполов в строительстве: преимущество и недостатки // Наука и современность. 2015. № 38. С. 8–11. EDN UAWBBF.
3. *Zhivotov D.A., Pastukh O.A., Tilin Yu.I.* Architectural and spatial planning solutions of spherical shape buildings // Contemporary Problems of Architecture and Construction. 2021. Pp. 91–96. DOI: 10.1201/9781003176428-20
4. *González-Avilés A.B., Pérez-Carramiñana C., Galiano-Garrigós A., Pérez-Millán M.I.* Energy Benefits of Tourist Accommodation Using Geodesic Domes // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 2. P. 505. DOI: 10.3390/buildings14020505
5. *Rapp M., Cabrera D., Lu S.* A polytrihedral dome for acoustic retroreflection, and its application to creative-arts practice-led research // Applied Acoustics. 2022. Vol. 195. P. 108860. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108860
6. *Bysiec D., Maleska T.* Numerical Analysis of Steel Geodesic Dome under Seismic Excitations // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 16. P. 4493. DOI: 10.3390/ma14164493
7. *Da Silva L.S., Oliveira S., Costa R., Gentili F.* Design and Analysis of Steel Structures Considering the 3D Behaviour of the Joints // Advanced Steel Construction. 2020. Vol. 16. Issue 2. Pp. 137–145. DOI: 10.18057/IJASC.2020.16.2.5
8. *Павлов Г.Н.* Основные концепции автоматизации архитектурного проектирования геодезических куполов и оболочек // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2005. № 10 (562). С. 104–108. EDN PFAKVD.
9. *Kolpakov A., Dolgov O., Korolskiy V., Popov S., Anchutin V., Zykov V.* Analysis of Structural Layouts of Geodesic Dome Structures with Bar Filler Considering Air Transportation // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 2. P. 242. DOI: 10.3390/buildings12020242
10. *Лахов А.Я.* Приближенный способ определения максимальных растягивающих напряжений в стержнях двухконтурных геодезических куполов системы «Р» от воздействия собственного веса // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 58–65. EDN RTUKHL.
11. *Rossot D., Machado R.D., Barbieri N., de Lima K.F.* Experimental and Numerical Study of a Geodesic Dome Under Static and Dynamic Loads and the Influence of Nodal Connections // Experimental Techniques. 2022. Vol. 46. Issue 5. Pp. 823–834. DOI: 10.1007/s40799-021-00509-6
12. *Grunbaum B., Shephard G.C.* Duality of Polyhedra // Shaping Space. 2013. Pp. 211–216. DOI: 10.1007/978-0-387-92714-5_15
13. *Tarnai T.* Geodesic Domes: Natural and Man-Made // International Journal of Space Structures. 2011. Vol. 26. Issue 3. Pp. 215–227. DOI: 10.1260/0266-3511.26.3.215
14. *Дударева Н., Загайко С.* SolidWorks 2011 на примерах. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 496 с. EDN SDQLTR.
15. *Gaydzhurov P., Tsaritova N.* Deformation modeling of rod structures under kinematic controlled action // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20. Issue 3. Pp. 14–23. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-3-14-23
16. *Царитова Н.Г., Курбанов А.И., Курбанова А.А.* Энергоэффективные здания на основе трансформируемых каркасов // Строительство и реконструкция. 2022. № 6 (104). С. 91–103. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-91-103. EDN WRCQIB.
17. *Царитова Н.Г., Тумасов А.А., Курбанова А.А., Штанкевич А.В.* Формообразование зданий на основе стержневых арок с изменяемой геометрией // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. № 2. С. 6–19. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.1. EDN ORSBSV.
18. Патент RU № 2586351 С1, МПК E04B 1/58. Шарнирный узел пространственной стержневой конструкции регулярной структуры / Царитова Н.Г., Бузало Н.А.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»; заявл. № 2015100939/03 от 12.01.2015. Опубл. 10.06.2016.

Поступила в редакцию 19 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 27 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Пётр Павлович Гайджуров** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительной механики и теории сооружений, советник РААСН; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; РИНЦ ID: 293542, Scopus: 57222067013, ORCID: 0000-0003-3913-9694; gpp-161@yandex.ru;

Надежда Геннадьевна Царитова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений; **Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова (ЮРГПУ (НПИ))**; 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; РИНЦ ID: 621100, Scopus: 59552644800, ResearcherID: M-8648-2016, ORCID: 0000-0002-0923-5848; ncaritova@yandex.ru.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

REFERENCES

1. Travush V.I., Antoshkin V.D., Erofeeva I.V., Gudozhnikov S.S. Study of the design and technological capabilities of prefabricated spherical shells. *Regional Architecture and Engineering*. 2014; 2:89-101. EDN SFOZYN. (rus.).
2. Esipova A.A. Application of geodesic domes in construction: advantages and disadvantages. *Science and Modernity*. 2015; 38:8-11. EDN UAWBBF. (rus.).
3. Zhivotov D.A., Pastukh O.A., Tulinin Yu.I. Architectural and spatial planning solutions of spherical shape buildings. *Contemporary Problems of Architecture and Construction*. 2021; 91-96. DOI: 10.1201/97810-03176428-20
4. González-Avilés A.B., Pérez-Carramiñana C., Galiano-Garrigós A., Pérez-Millán M.I. Energy Benefits of Tourist Accommodation Using Geodesic Domes. *Buildings*. 2024; 14(2):505. DOI: 10.3390/buildings-14020505
5. Rapp M., Cabrera D., Lu S. A polytrihedral dome for acoustic retroreflection, and its application to creative-arts practice-led research. *Applied Acoustics*. 2022; 195:108860. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108860
6. Bysiec D., Maleska T. Numerical Analysis of Steel Geodesic Dome under Seismic Excitations. *Materials*. 2021; 14(16):4493. DOI: 10.3390/ma14164493
7. Da Silva L.S., Oliveira S., Costa R., Gentili F. Design and Analysis of Steel Structures Considering the 3D Behaviour of the Joints. *Advanced Steel Construction*. 2020; 16(2):137-145. DOI: 10.18057/IJASC.2020.16.2.5
8. Pavlov G.N. Basic concepts of automation of architectural design of geodesic domes and shells. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2005; 10(562):104-108. EDN PFAKVD. (rus.).
9. Kolpakov A., Dolgov O., Korolskiy V., Popov S., Anchutin V., Zykov V. Analysis of Structural Layouts of Geodesic Dome Structures with Bar Filler Considering Air Transportation. *Buildings*. 2022; 12(2):242. DOI: 10.3390/buildings12020242
10. Lakhov A.Ya. The Approximate Method of Maximal Tensile Stress Determination in Rods of Double-Contour Geodetic Domes of the System “R” Exposed to Dead Load. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 1:58-65. EDN RTUKHL. (rus.).
11. Rossot D., Machado R.D., Barbieri N., de Lima K.F. Experimental and Numerical Study of a Geodesic Dome Under Static and Dynamic Loads and the Influence of Nodal Connections. *Experimental Techniques*. 2022; 46(5):823-834. DOI: 10.1007/s40799-021-00509-6
12. Grunbaum B., Shephard G.C. Duality of Polyhedra. *Shaping Space*. 2013; 211-216. DOI: 10.1007/978-0-387-92714-5_15
13. Tarnai T. Geodesic Domes: Natural and Man-Made. *International Journal of Space Structures*. 2011; 26(3):215-227. DOI: 10.1260/0266-3511.26.3.215
14. Dudareva N., Zagayko S. *SolidWorks 2011 with Examples*. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2011; 496. EDN SDQLTR. (rus.).
15. Gaydzhurov P., Tsaritova N. Deformation modeling of rod structures under kinematic controlled action. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024; 20(3):14-23. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-3-14-23
16. Tsaritova N.G., Kurbanov A.Ib., Kurbanova A.A.I. Energy-efficient buildings based on transformable frames. *Building and Reconstruction*. 2022; 6(104):91-103. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-91-103. EDN WRCQIB. (rus.).
17. Tsaritova N.G., Tumasov A.A., Kurbanova A.A., Shtankevich A.V. Shaping of buildings based on rod arches with variable geometry. *Construction: Science and Education*. 2023; 13(2):6-19. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.2.1. EDN ORSBSV. (rus.).
18. Patent RU No. 2586351 C1, IPC E04B 1/58. *Hinged joint of a spatial rod structure of regular structure* / Tsaritova N.G., Buzalo N.A.; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov”; application No. 2015100939/03 dated 12.01.2015. Publ. 10.06.2016.

Received April 19, 2025.

Adopted in revised form on April 27, 2025.

Approved for publication on December 1, 2025.

BIODOTES: **Peter P. Gaydzhurov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures, Advisor to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation; ID RSCI: 293542, Scopus: 57222067013, ORCID: 0000-0003-3913-9694; gpp-161@yandex.ru;

Nadezhda G. Tsaritova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urban Planning, Design of Buildings and Structures; **M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)**; 132 Prosveshcheniya st., Novocherkassk, 346428, Russian Federation; ID RSCI: 621100, Scopus: 59552644800, ResearcherID: M-8648-2016, ORCID: 0000-0002-0923-5848; ncaritova@yandex.ru.

*Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare that there is no conflict of interest.*