

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

DOI: 10.22363/1815-5235-2026-22-2-115-128

EDN: KAKRSK

Научная статья / Research article

Численный анализ напряженно-деформированного состояния пространственной стержневой конструкции с учетом податливости узловых соединений

П.П. Гайджуров¹, Н.Г. Царитова², Э.Р. Исакова², Н.А. Корчагин²¹ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация² Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация

✉ gpp-161@yandex.ru

Поступила в редакцию: 4 февраля 2026 г.

Доработана: 2 апреля 2026 г.

Принята к публикации: 10 апреля 2026 г.

Аннотация. Объектом исследования являлась составная пространственная стержневая конструкция цилиндрической формы с покрытием в форме усеченного конуса. Цилиндрическая часть данной конструкции представляла собой регулярно упорядоченную стержневую решетку, образованную из плоских правильных шестиугольников. Для соединения стержней шестиугольников использовались блоки, включающие линейные и поворотные пружины. Коническое покрытие представляло собой обычную рамно-ферменную конструкцию. Цель исследования — численный анализ напряженно-деформированного состояния пространственной стержневой конструкции при динамическом воздействии с учетом податливости узловых связей. В качестве математического аппарата использован метод конечных элементов в форме метода перемещений. Вычислительные эксперименты позволили спроектировать конструкцию блока узлового соединения стержней решетки. С помощью натурной модели, включавшей три секции решетки, выполнено исследование кинематических параметров спроектированного блока узлового соединения стержней.

Ключевые слова: пространственная регулярная стержневая решетка, метод конечных элементов, модальный анализ, сейсмограмма, анализ напряженно-деформированного состояния


Гайджуров Пётр Павлович, советник РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры строительной механики и теории сооружений, Донской государственный технический университет, Российская Федерация, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; eLIBRARY SPIN-код: 6812-9718, ORCID: 0000-0003-3913-9694; e-mail: gpp-161@yandex.ru

Царитова Надежда Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; eLIBRARY SPIN-код: 7374-9225, ORCID: 0000-0002-0923-5848; e-mail: ncaritova@yandex.ru

Исакова Эльвира Рашидовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; eLIBRARY SPIN-код: 3641-8092, ORCID: 0009-0006-3654-6728; e-mail: elvira.ishakova@yandex.ru

Корчагин Никита Аркадьевич, аспирант кафедры градостроительства, проектирования зданий и сооружений, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; ORCID: 0009-0005-0426-5748; e-mail: nik.korchagin@mail.ru

© Гайджуров П.П., Царитова Н.Г., Исакова Э.Р., Корчагин Н.А., 2026

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Вклад авторов: *Гайджуrow П.П.* — научное руководство, формализация математической модели, написание исходного текста статьи, формулировка выводов; *Царитова Н.Г.* — обзор литературы по теме исследования, практические рекомендации по расчетам; *Исхакова Э.Р.* — выполнение вычислительных экспериментов, натурное макетирование решетки, обсуждение результатов; *Корчагин Н.А.* — обзор литературы, подготовка исходных данных, обработка результатов моделирования, проектирование узла, оформление рисунков. Авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: *Гайджуrow П.П., Царитова Н.Г., Исхакова Э.Р., Корчагин Н.А.* Численный анализ напряженно-деформированного состояния пространственной стержневой конструкции с учетом податливости узловых соединений // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2026. Т. 22. № 2. С. 115–128. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-2-115-128> EDN:KAKRSK

Numerical Analysis of the Stress-Strain State of a Spatial Core Structure, Taking into Account the Malleability of Nodal Joints

Peter P. Gaydzhurov¹, Nadezhda G. Tsaritova², Elvira R. Iskhakova², Nikita A. Korchagin²

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Moscow, Russian Federation

² South Russian State Polytechnic University (NPI), named after M. I. Platov, Novochoerkassk, Russian Federation

✉ gpp-161@yandex.ru

Received: February 4, 2026

Revised: April 2, 2026

Accepted: April 10, 2026

Abstract. The object of the study was a composite spatial rod structure of cylindrical shape with a coating in the form of a truncated cone. The cylindrical part of this structure was a regularly ordered rod lattice formed of flat regular hexagons. Blocks including linear and rotary springs were used to connect the rods of the polygons. The conical cover was a conventional frame-truss structure. The purpose of the study was to numerically analyze the stress-strain state of a spatial core structure under dynamic influence, taking into account the malleability of nodal connections. The finite element method in the form of a displacement method is used as a mathematical apparatus. Computational experiments have made it possible to design the design of the block for the nodal connection of the lattice rods. Using a full-scale model that included three sections of the grid, the kinematic parameters of the designed block of the nodal connection of the rods were studied.

Keywords: spatial regular rod lattice, finite element method, modal analysis, seismogram, stress-strain state analysis

Authors' contribution: *Gaydzhurov P.P.* — scientific guidance, formalization of the mathematical model, writing the source text of the article, formulation of conclusions; *Tsaritova N.G.* — review of the literature on the research topic, practical recommendations on calculations; *Iskhakova E.R.* — performing computational experiments; full-scale modeling of the grid; discussion of the results; *Korchagin N.A.* — literature review; preparation of initial data; processing of modeling results; node design; design of drawings. The authors read and approved the final version of the article.

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Gaydzhurov PP, Tsaritova NG, Iskhakova ER, Korchagin NA. Numerical analysis of the stress-strain state of a spatial core structure, taking into account the malleability of nodal joints. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2026;22(2):115–128. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-2-115-128> EDN:KAKRSK

Peter P. Gaydzhurov, Advisor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Structural Mechanics and Theory of Structures, Don State Technical University, 1 Gagarin Sq, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 6812-9718, ORCID: 0000-0003-3913-9694; e-mail: gpp-161@yandex.ru

Nadezhda G. Tsaritova, Candidate of Technical Sciences, 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, Novochoerkassk, 346428, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7374-9225, ORCID: 0000-0002-0923-5848; e-mail: ncaritova@yandex.ru

Elvira R. Iskhakova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Urban Planning, Design of Buildings and Structures, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI); 132 Prosveshcheniya St, Novochoerkassk, 346428, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3641-8092, ORCID: 0009-0006-3654-6728; e-mail: elvira.ishakova@yandex.ru

Nikita A. Korchagin, Postgraduate Student of the Department of Urban Planning, Design of Buildings and Structures, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI); 132 Prosveshcheniya St, Novochoerkassk, 346428, Russian Federation; ORCID: 0009-0005-0426-5748; e-mail: nik.korchagin@mail.ru

1. Введение

В настоящее время трудно представить проектирование большепролетных покрытий спортивных и культурно-массовых сооружений без применения пространственных стержневых конструкций (ПСК). К основным преимуществам конструкций данного типа относятся следующие положительные качества [1–7]:

1) механизм распределения внешней нагрузки, обуславливающий работу стержней исключительно на растяжение/сжатие. Это позволяет снизить массу конструкции за счет использования стержней трубчатого поперечного сечения, в том числе из алюминиевого сплава;

2) универсальность комплектующих деталей, что делает процесс их изготовления высокотехнологичным, обеспечивает простоту хранения и транспортировки заготовок;

3) жесткостные характеристики узловых соединений стержней, обеспечивающие при монтаже и эксплуатации эффект самонесущей конструкции.

Как отмечается в [8], решение проблемы конструктивной безопасности зданий и сооружений в связи с появлением новых видов и ростом интенсивности техногенных, природных и других проектных и так называемых запроектных воздействий требует расширения спектра методов защиты зданий и сооружений от этих воздействий. В этой связи ПСК, предназначенные для эксплуатации в районах с повышенной сейсмической активностью, выполняют с применением болтовых соединений несущих элементов. Исследования [9; 10] показали, что податливость болтовых соединений позволяет стержневой конструкции при знакопеременном квазистатическом воздействии воспринимать остаточные смещения без ущерба общей несущей способности. Наиболее полный обзор и критический анализ конструкторских разработок, выполненных отечественными и зарубежными авторами в направлении сопряжения стержней ПСК, приведен в [11–14].

Узловые блоки для ПСК, как правило, изготавливают с применением довольно материалоемких способов, что увеличивает общий вес конструкции. Развитие технологий аддитивного производства привело к росту интереса к 3D-печати, позволяющей обеспечить снижение материалоемкости и повысить точность изготовления блоков узловых соединений ПСК.

В [15] предложена методика 3D-моделирования узла ПСК в виде полый оболочечной сетки. При этом толщины стенок блока узлового соединения уточняются путем численного прочностного анализа. Полученные в [15] блоки узловых соединений ПСК футуристической формы, ориентированные исключительно на применение 3D-печати, показаны на рис. 1.

В [16; 17] выполнено конечно-элементное моделирование распределения внутренних напряжений в узловом соединении типа МАРХИ [10], позволившее на 10 % снизить материалоемкость изделия. Для численного моделирования использовались объемные конечные элементы (КЭ) (рис. 2). О важности выбора и обоснования расчетной схемы узлового соединения пространственной стержневой системы при анализе сценария отказа металлоконструкции говорится в [18]. На рис. 3. приведена схема разбивки соединения стержневых элементов структурного покрытия на объемные КЭ.

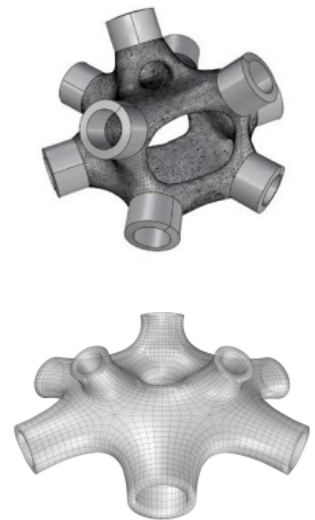


Рис. 1. 3D-блоки узловых соединений ПСК

Источники: выполнено F. Aishc и др. [15].

Figure 1. 3D blocks of UCS nodal junctions

Source: performed by F. Aishc et al. [15].

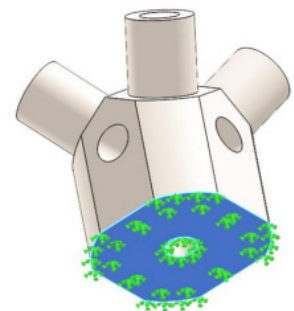


Рис. 2. Твердотельная модель узла типа МАРХИ

Источники: выполнено В.Ю. Алпатовым [17].

Figure 2. Solid-state model of a MIACE type node

Source: performed by V.Yu. Alpatov et al. [17].

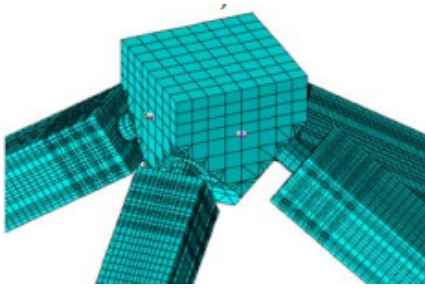


Рис. 3. Конечно-элементная модель узлового соединения стержней
Источник: выполнено В.Ф. Мушанов и др. [18].

Figure 3. Finite element model of the nodal connection of rods

Source: performed by V.F. Muschanov et al. [18].

Особое место в практике применения пространственных стержневых конструкций занимают так называемые строительные леса (Layher Allround), базирующиеся на трех вариантах закрепления ригелей на стойках: шарнирное; упругоподатливое; жесткое [19].

Методология конструктивно-технологического формообразования сферических оболочек на основе радиально-кольцевой сети разработана в [20; 21]. Авторами исследован и реализован метод формирования регулярных топологических групп в виде треугольных сетей на сфере. Аналогичные исследования выполнены в [22], где авторами выполнена разработка математического и программного обеспечения для создания геометрических моделей ПСК с регулярной структурой.

Следует отметить, что одним из перспективных направлений развития вычислительных методов строительной механики является разработка методики численного моделирования поведения ПСК с учетом податливости узловых соединений. Данный подход базируется на комбинированной конечно-элементной модели, образованной стержневыми и пружинными КЭ [23; 24]. Результаты конечно-элементного моделирования ПСК в форме двухконтурного геодезического купола с учетом податливости узловых соединений при сейсмическом воздействии приведены в [25].

В качестве объекта настоящего исследования рассмотрена ПСК цилиндрической формы с покрытием в виде усеченного конуса. Цель исследования — разработка методики численного моделирования динамического отклика ПСК с учетом податливости узловых соединений стержневых КЭ. В задачи исследования входило построение балочно-пружинной механической модели ПСК цилиндрической формы; написание и отладка макроса на языке APDL программного комплекса ANSYS Mechanical¹ для анализа переходного процесса; разработка и изготовление с помощью 3D-печати блока узловых соединений стержней; макетирование гексагональных стержневых секций.

2. Метод исследования

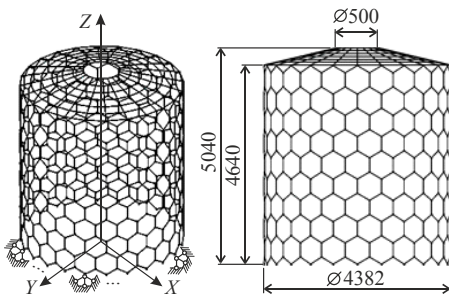


Рис. 4. Стержневая модель
Источник: выполнено Н.А. Корчагиным.

Figure 4. The core model

Source: performed by N.A. Korchagin.

В качестве примера рассмотрена конечно-элементная модель конструкции цилиндрической формы с покрытием в виде усеченного конуса (рис. 4). Цилиндрическая часть данной конструкции представляла собой регулярно упорядоченную стержневую (решетчатую) структуру, образованную из плоских правильных шестиугольников и блоков узловых соединений стержней решетки (БУССР). На рис. 5 показана схема БУССР, состоящая из треугольной площадки s , в углах которой расположено по два узла. Причем узел i принадлежит пластине s , а узел j стержню шестиугольника. В основании цилиндрической решетки введены стержневые элементы, на свободные узлы которых наложены связи, запрещающие линейные перемещения вдоль глобальных осей X , Y , Z (рис. 4).

Совместное перемещение узлов i и j обеспечивалось с помощью комбинированных КЭ пружинного типа. Жесткости данных элементов имели следующие значения: линейные пружины $k_x = k_y = k_z = 10^9$ Н/м; поворотные пружины $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5$ Н·м/рад. Значения жесткостей ли-

¹ ANSYS Mechanical APDL Tutorials. URL: https://ijmer.com/papers/Vol2_Issue5/CK2535173521.pdf (дата обращения: 22.12.2025).

нейных пружин назначались такого же порядка, как и у величины модуля упругости материала БУССР. Значения жесткостей поворотных пружин варьировались в диапазоне $10^3 \dots 10^5$ Н·м/рад. Было установлено, что при значениях $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$ менее 10^3 Н·м/рад модель решетчатой конструкции становится геометрически изменяемой. Величины $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$, равные 10^5 Н·м/рад, априори соответствуют фиксации Т-образного наконечника стержня в БУССР до момента исчезновения способности его относительно свободного поворота в цилиндрической опоре.

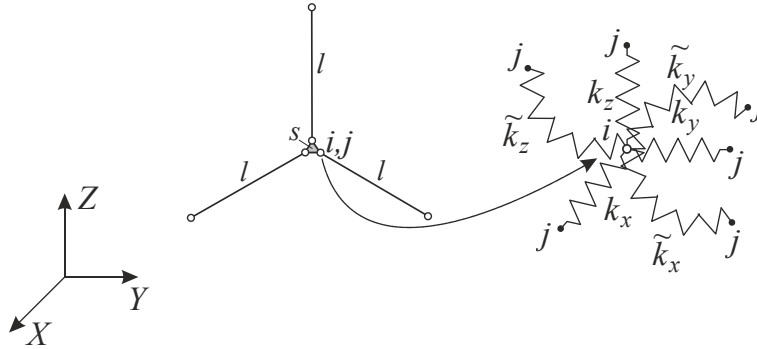


Рис. 5. Схема блока узловых соединений стержней решетки

Источники: выполнено Н.А. Корчагиным.

Figure 5. Diagram of the block of nodal connections of the grid rods

Source: performed by N.A. Korchagin.

Стержни цилиндрической решетки моделировались пространственными балочными КЭ с шестью степенями свободы в узле. Механические константы материала стержней (алюминиевый сплав): модуль упругости $E = 6,8 \cdot 10^{10}$ Н/м²; коэффициент Пуассона $\nu = 0,32$; плотность $\rho = 2885$ кг/м³. Стержни решетки имели трубчатое поперечное сечение с наружным диаметром 18 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Длина стержней $l = 285$ мм.

Покрытие цилиндрической решетки (см. рис. 4) моделировалось регулярной пространственной стержневой сеткой без БУССР. Материал и форма сечения КЭ покрытия принимались такими же, как и для стержней цилиндрической решетки. Площадки s БУССР (рис. 5) моделировались стержневыми КЭ квадратного поперечного сечения 20×20 мм. Материал стержней блока пластик (полиэфирэфиркетон (ПЕЕК)). Упругие константы материала стержней БУССР: $E = 2,2 \cdot 10^9$ Н/м²; $\nu = 0,37$; $\rho = 1250$ кг/м³. Механические константы стержневых КЭ, введенных в основании цилиндрической решетки для моделирования статических граничных условий: $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м²; $\nu = 0,28$. Собственный вес стержней основания не учитывался.

Эскиз нижней пластины БУССР показан на рис. 6. В комплект узла БУССР входило две одинаковые пластины, три Т-образных наконечника с цилиндрическими головками и три болтовых крепления.

Фотографии макета БУССР, выполненного с помощью 3D-печати, показаны на рис. 7, а, б.

Фотографии макета секций гексагональной стержневой решетки с БУССР в исходном и трансформированном состояниях представлены на рис. 8. Как видно, разработанная конструкция БУССР обладает кинематическими степенями свободы, позволяющими создавать стержневые композиции с сопряжениями секций под прямыми углами, а также трансформировать отдельную секцию на такой же угол.

Детализация форм возможной трансформации стержневых секций гексагональной формы показана на рис. 9. Физическое макетирование показало, что в предельном случае секции можно плотно упоковать, сложив в стопку (рис. 9, б).

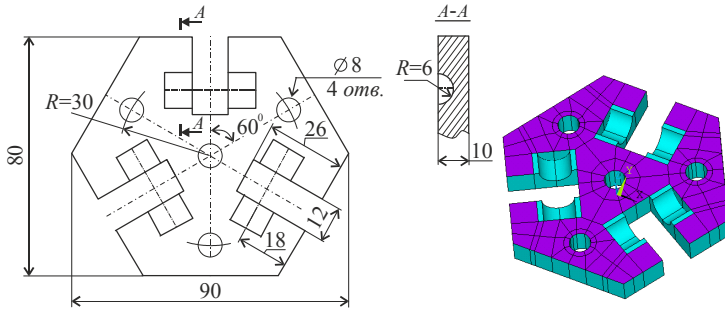
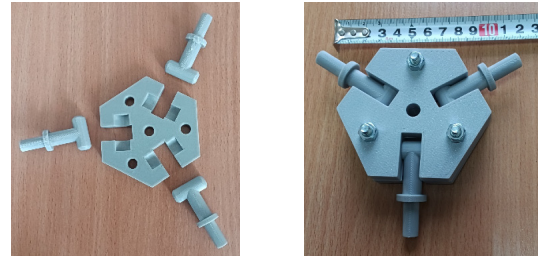


Рис. 6. Эскиз и 3D-модель нижней пластины БУССР

Источник: выполнено Н.А. Корчагиным.

Figure 6. Sketch and 3D model of the bottom plate of the BNCGR

Source: performed by N.A. Korchagin.



a

б

Рис. 7. БУССР выполненный с помощью 3D печати:

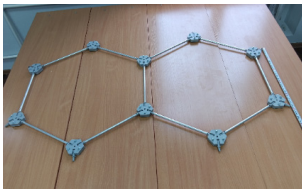
a — детали узла; *б* — соединительный узел

Источник: выполнено Н.Г. Царитовой и Э.Р. Исхаковой.

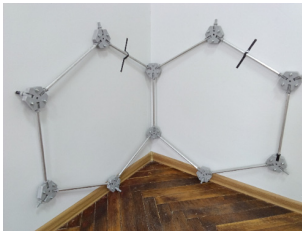
Figure 7. BNCGR made using 3D printing:

a — node details; *б* — connecting node

Source: performed by N.G. Tsaritova and E.R. Iskhakova.



a



б



в

Рис. 8. Фотографии стержневых секций в исходном и трансформированном состояниях:

a — исходное положение двух секций; *б* — трансформация двух секций 90° ; *в* — трансформация трех секций 90°

Источник: выполнено Н.Г. Царитовой и Э.Р. Исхаковой.

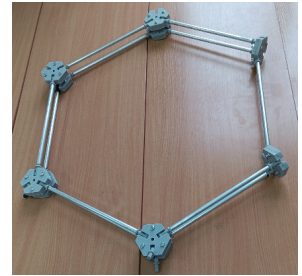
Figure 8. Photographs of the core sections in their original and transformed states:

a — starting position of the two sections; *б* — transformation of two sections 90° ; *в* — transformation of three sections 90°

Source: performed by N.G. Tsaritova and E.R. Iskhakova.



a



б

Рис. 9. Фотографии форм возможной трансформации стержневых секций:

a — трансформация 90° ; *б* — трансформация 180°

Источник: выполнено Н.Г. Царитовой и Э.Р. Исхаковой.

Figure 9. Photographs of forms of possible transformation of the core sections:

a — transformation 90° ; *б* — transformation 180°

Source: performed by N.G. Tsaritova and E.R. Iskhakova.

Таким образом, предлагаемая конструкция БУССР позволяет осуществлять сборку самонесущих регулярных гексагональных стержневых решеток с любыми углами сопряжения секций.

3. Результаты и обсуждение

Результаты модального анализа для конечно-элементной модели с БУССР и аналогичной модели без податливых связей для первых четырех собственных пар представлены на рис. 10, *a*, *б*. Здесь в скобках приведены значения собственных частот для модели без БУССР. Как и следовало ожидать, в силу симметрии геометрии рассматриваемая решетчатая конструкция имеет парные собственные частоты.

На рис. 11 приведены картины распределения перемещений w_z и продольных сил N в стержнях цилиндрической решетки для модели с БУССР, полученные в результате статического расчета от действия только собственного веса. Максимальные по модулю значения прогибов покрытия для моделей с БУССР и без БУССР составили 1,62 и 1,56 мм соответственно. Значения $|N|_{\max}$ для обеих моделей одинаковые.

Анализ динамического отклика рассматриваемой конечно-элементной модели на динамическое воздействие выполнен с помощью синтезированной сейсмограммы, описываемой формулой

$$\tilde{w}(t) = Ate^{-Bt} \sin(\theta t), \quad (1)$$

где t — время в секундах; параметры: $\theta = 5 \text{ с}^{-1}$; $A = 0,01553 \text{ м/с}$; $B = 0,7143 \text{ с}^{-1}$.

График функции $\tilde{w}(t)$ приведен на рис. 12. Как видно из графика (рис. 12) максимальное смещение для принятого закона вынужденных колебаний при $t = 1,6 \text{ с}$ составляет 8 мм.

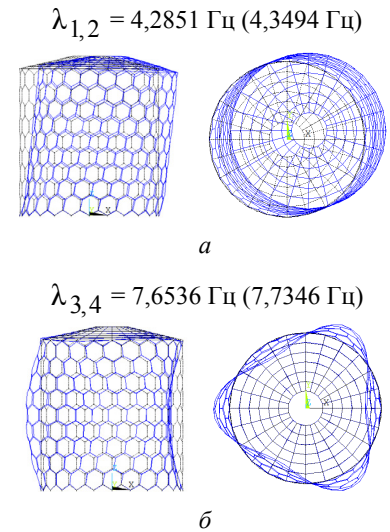


Рис. 10. Результаты модального анализа: a — первая форма; b — вторая форма
Источник: выполнено Н.Г. Царитовой.
Figure 10. The results of the modal analysis: a — the first form; b — the second form
Source: performed by N.G. Tsaritova.

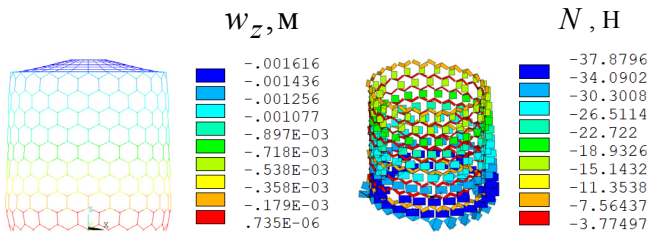


Рис. 11. Визуализация распределения w_z и N в модели с БУССР (статика)
Источник: выполнено Н.Г. Царитовой и Э.Р. Исаковой.

Figure 11. Visualization of the distribution and N in the BNCGR model (static)
Source: performed by N.G. Tsaritova and E.R. Iskhakova.

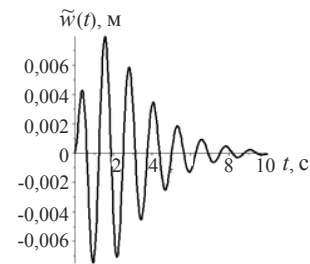


Рис. 12. График синтезированной сейсмограммы $w \sim t$
Источник: выполнено Н.А. Корчагиним.
Figure 12. Graph of the synthesized seismogram $w \sim t$
Source: performed by N.A. Korchagin.

Расчетная схема для динамического анализа приведена на рис. 13. В данном случае нестационарное кинематическое воздействие $\tilde{w}_x(t)$, $\tilde{w}_y(t)$, $\tilde{w}_z(t)$, задаваемое формулой (1), прикладывалось к узлам стержневых КЭ, соединенных с основанием цилиндрической решетки. Для построения графиков колебаний использовались значения перемещений в точках b_1 и b_2 , расположенных на верхней плоскости конического покрытия (рис. 14).

Для прямого интегрирования уравнения движения применялась неявная схема метода Ньюмарка. Коэффициенты демпфирования матриц масс и жесткости принимались соответственно равными 0,1 и 0,01. Шаг по временной координате принимался равным 0,01 с.

Результаты динамического расчета в виде графиков колебаний $w_z(t)$ и $w_x(t)$, $w_y(t)$ для решетчатой конструкции с учетом податливости узловых соединений стержней приведены на рис. 15 и 16. Амплитудные значения перемещений в направлении оси Z в момент времени $t = 0,99 \text{ с}$ в точках b_1 и b_2 составили: $-0,01149 \text{ м}$; $-0,006092 \text{ м}$ (рис. 15). Соответствующие амплитудные значения перемещений $w_x(t) = w_y(t) = -0,02382 \text{ м}$ (рис. 16). Установлено, что графики $w_x(t)$, $w_y(t)$, $w_z(t)$ для моделей с БУССР и без БУССР совпадают.

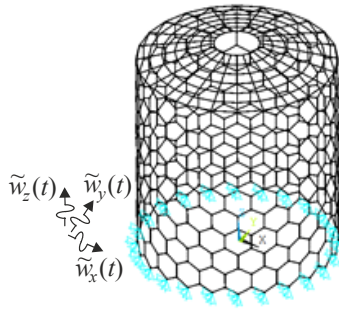


Рис. 13. Схема возбуждения колебаний
Источник: выполнено Н.А. Корчагиным.

Figure 13. Oscillation excitation scheme
Source: performed by N.A. Korchagin.

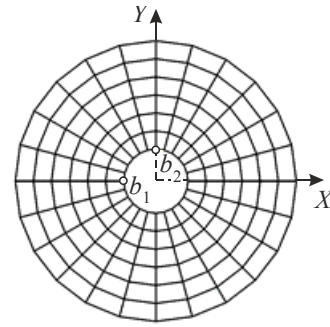


Рис. 14. Расположение точек b_1 и b_2
Источник: выполнено Н.А. Корчагиным.

Figure 14. Location of points b_1 and b_2
Source: performed by N.A. Korchagin.

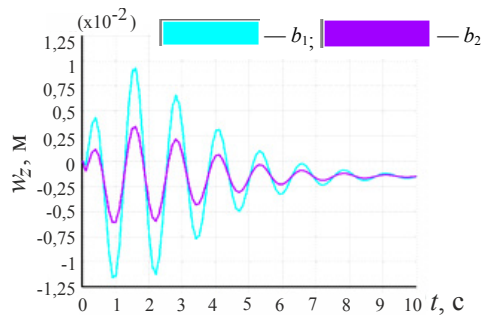


Рис. 15. Графики колебаний $w_x(t)$ в точках b_1 и b_2
Источник: выполнено Н.А. Корчагиным.

Figure 15. Graphs of fluctuations $w_y(t)$ in points b_1 and b_2
Source: performed by N.A. Korchagin.

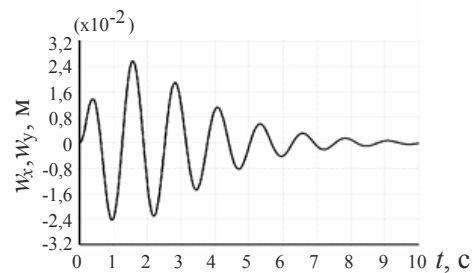


Рис. 16. Графики $w_x(t)$, $w_y(t)$
Источник: выполнено Н.А. Корчагиным.

Figure 16. Graphs $w_x(t)$, $w_y(t)$
Source: performed by N.A. Korchagin.

Графики колебаний $w_z(t)$ и $w_x(t)$, $w_y(t)$ для решетчатой конструкции с учетом податливости узловых соединений при значениях $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3$ Н·м/рад представлены на рис. 17 и 18. В данном случае амплитудные значения перемещений в направлении оси Z в момент времени $t = 0,99$ с в точках b_1 и b_2 составили: $-0,01628$ м; $-0,007902$ м (рис. 17). Соответствующие амплитудные значения перемещений $w_x(t) = w_y(t) = -0,05586$ м (рис. 18).

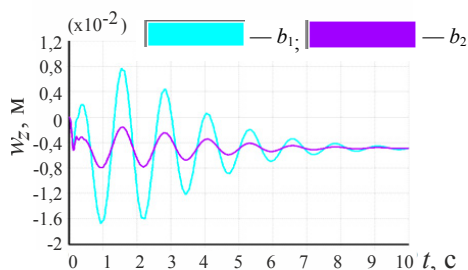


Рис. 17. Графики колебаний $w_z(t)$ в точках b_1 и b_2
Источник: выполнено Н.А. Корчагиным.

Figure 17. Graphs of fluctuations $w_z(t)$ in points b_1 and b_2
Source: performed by N.A. Korchagin.

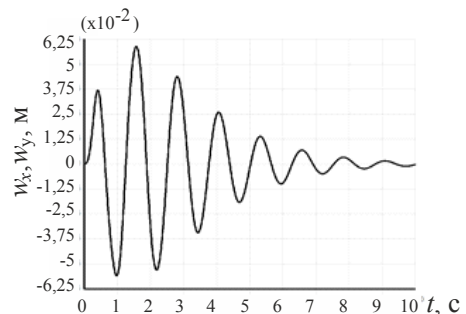


Рис. 18. Графики $w_x(t)$, $w_y(t)$
Источник: выполнено Н.А. Корчагиным.

Figure 18. Graphs $w_x(t)$, $w_y(t)$
Source: performed by N.A. Korchagin.

Сравнивая амплитудные значения перемещений на рис. 15 и 17, приходим к выводу, что уменьшение жесткости поворотных пружин на два порядка приводит к увеличению перемещения W_z в точке b_1 в 1,4 раза и в 1,3 раза в точке b_2 . Соответствующие величины W_x и W_y возрастают в 2,3 раза.

Покадровая визуализация результирующего (суммарного) перемещения w_Σ для моделей решетки со значениями $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$, равными 10^5 и 10^3 Н·м/рад, в моменты времени 0,98 с и 1,6 с показана на рис. 19, 20 и рис. 21, 22 соответственно.

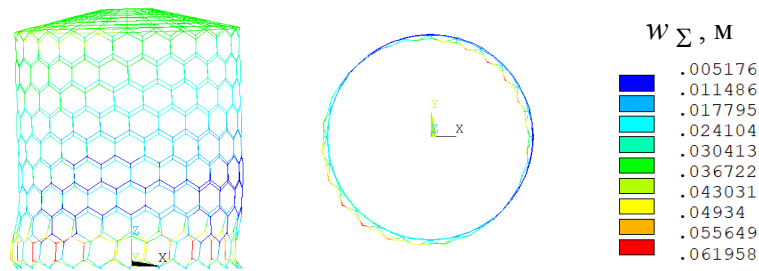


Рис. 19. Картина распределения W_Σ при $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5$ Н·м/рад и $t = 0,98$ с

Источники: выполнено Н.Г. Царитовой, Э.Р. Исаковой.

Figure 19. Distribution pattern W_Σ at $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5$ N·m/rad and $t = 0.98$ s

Source: performed by N.G. Tsaritova, E.R. Iskhakova.

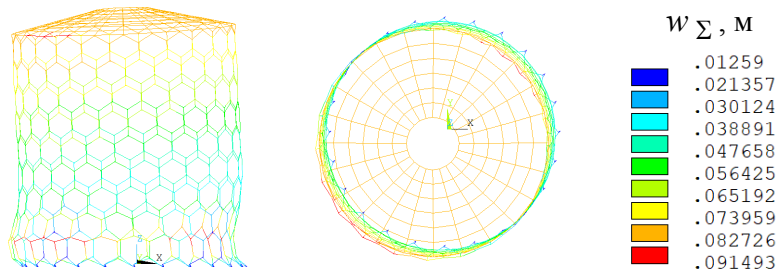


Рис. 20. Картина распределения W_Σ при $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3$ Н·м/рад и $t = 0,98$ с

Источники: выполнено Н.Г. Царитовой, Э.Р. Исаковой.

Figure 20. Distribution pattern W_Σ at $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3$ N·m/rad and $t = 0.98$ s

Source: performed by N.G. Tsaritova, E.R. Iskhakova.

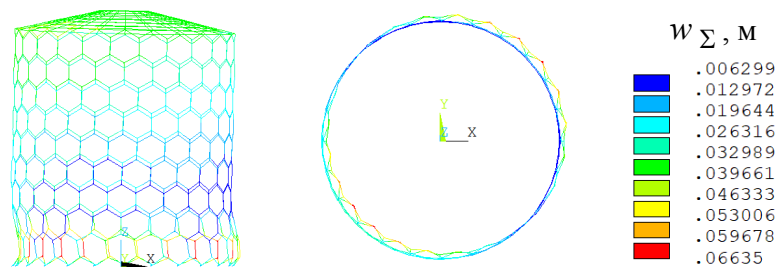


Рис. 21. Картина распределения W_Σ при $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5$ Н·м/рад и $t = 1,6$ с

Источники: выполнено Н.Г. Царитовой, Э.Р. Исаковой.

Figure 21. Distribution pattern W_Σ at $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5$ N·m/rad and $t = 1.6$ s

Source: performed by N.G. Tsaritova, E.R. Iskhakova.

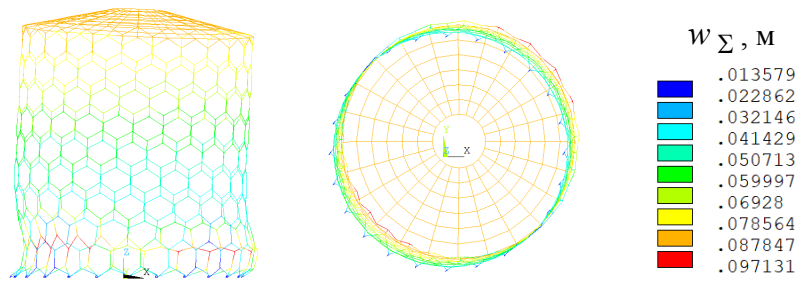


Рис. 22. Картина распределения w_Σ при $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ и $t = 1,6 \text{ с}$
 Источник: выполнено Н.Г. Царитовой и Э.Р. Исхаковой.

Figure 22. Distribution pattern w_Σ at $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ and $t = 1.6 \text{ s}$
 Source: performed by N.G. Tsaritova, E.R. Iskhakova.

Из приведенных данных видно, что деформирование рассматриваемой решетчатой конструкции носит объемный характер. Наибольшие смещения в колебательном процессе наблюдаются в секциях, расположенных в первом ряду от основания цилиндрической решетки. Эпюры продольных сил N в стержнях первой секции для вариантов расчетов с наличием БУССР и без БУССР для момента времени $t = 0,98 \text{ с}$ приведены на рис. 23–25. Наибольшие по модулю значения продольных сил равны:

$$|N|_{\max} = 1385 \text{ Н при } \tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}; |N|_{\max} = 1526 \text{ Н без БУССР};$$

$$|N|_{\max} = 656,8 \text{ Н при } \tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}.$$

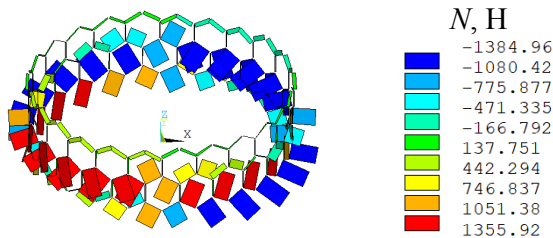


Рис. 23. Эпюра N при $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$
 Источник: выполнено Н.Г. Царитовой и Э.Р. Исхаковой.

Figure 23. Plot N at $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$
 Source: performed by N.G. Tsaritova, E.R. Iskhakova.

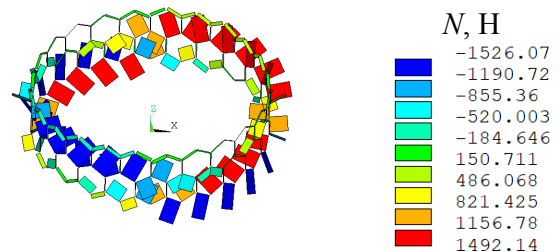


Рис. 24. Эпюра N без БУССР
 Источник: выполнено Н.Г. Царитовой и Э.Р. Исхаковой.

Figure 24. Plot N without BNCGR
 Source: performed by N.G. Tsaritova, E.R. Iskhakova.

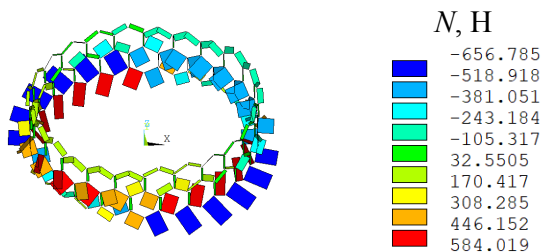


Рис. 25. Эпюра N при $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$
 Источник: выполнено Н.Г. Царитовой и Э.Р. Исхаковой.

Figure 25. Plot N at $\tilde{k}_x = \tilde{k}_y = \tilde{k}_z = 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$
 Source: performed by N.G. Tsaritova, E.R. Iskhakova.

Как следует из рис. 23 и 25, при уменьшении значений $\tilde{k}_x, \tilde{k}_y, \tilde{k}_z$ на два порядка максимальные сжимающие усилия в стержнях цилиндрической решетки снижаются в 2,4 раза. На основании полученных данных для решетки с БУССР была построена схема наиболее нагруженного узлового соединения (рис. 26), в котором на два стержня действуют сжимающее и растягивающие усилия (рис. 23). При этом считалось, что третий стержень данного узлового соединения не нагружен.

Отметим, что при заданном динамическом воздействии максимальное по модулю значение продольного усилия в 36 раз превышает аналогичное значение, полученное при статическом расчете стержневой решетки (рис. 11).

На рис. 27 показана 3D-модель нижней пластины БУССР с указанием направления и значениями прикладываемых сосредоточенных сил. Конечно-элементная модель БУССР представлена на рис. 28. Для построения моделей пластин и болтовых соединений блока были применены восьмиузловые объемные КЭ. Для моделирования контактного взаимодействия между пластинами блока использовались комбинированные КЭ. Материал болтовых соединений — сталь. На узлы нижней пластины ($z = 0$) с координатами: $y = 0, x = \pm 0,004$ м — накладывались связи, запрещающие смещения в направлении глобальных осей Y, Z , а на узлы $x = 0, y = \pm 0,004$ м — связи, запрещающие смещения в направлении глобальных осей X, Z . Схема нагружения БУССР статически эквивалентным давлением p показана на рис. 29.

Результаты моделирования напряженного состояния пластины БУССР в виде картины распределения поля интенсивности напряжений σ_i приведены на рис. 30. Установлено, что зоны концентрации напряжений сосредоточены в крайних узлах областей приложения давления. Механическая прочность полиэфирэфиркетона на растяжение 89 МПа, на сжатие 200 МПа. Как видно из рис. 30, при заданном динамическом воздействии возникающее в пластинах БУССР максимальное значение σ_i не превышает предела прочности полиэфирэфиркетона на растяжение.

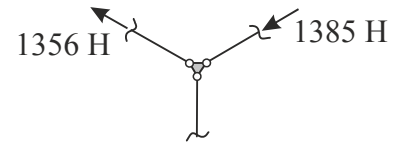


Рис. 26. Схема наиболее нагруженного узлового соединения

Источник: выполнено Н.А. Корчагиным.

Figure 26. Diagram of the most loaded nodal connection

Source: performed by N.A. Korchagin.

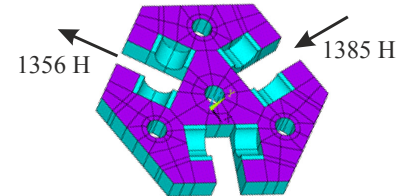


Рис. 27. Схема нагружения 3D-модели БУССР

Источник: выполнено Н.А. Корчагиным.

Figure 27. Loading scheme of the 3D BNCGR model

Source: performed by N.A. Korchagin.

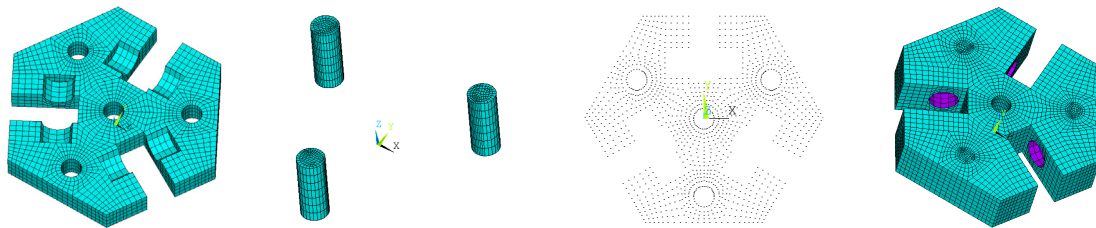


Рис. 28. Конечно-элементная модель БУССР / Figure 28. The finite element model of the BNCGR

Источник: выполнено Н.А. Корчагиным. / Source: performed by N.A. Korchagin.

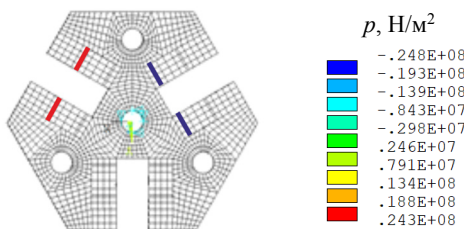


Рис. 29. Визуализация p и граничных условий

Источник: выполнено Н.Г. Царитовой и Э.Р. Исхаковой.

Figure 29. Visualization of p and boundary conditions

Source: performed by N.G. Tsaritova and E.R. Iskhakova.

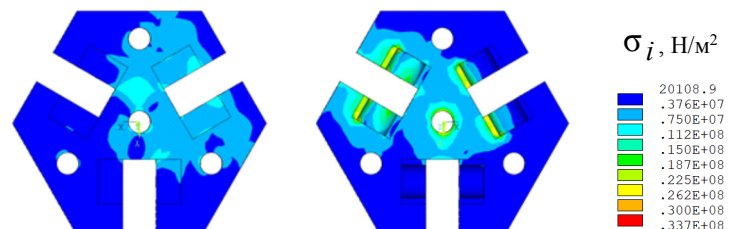


Рис. 30. Визуализация картины распределения поля σ_i в пластине БУССР

Источник: выполнено Н.Г. Царитовой и Э.Р. Исхаковой.

Figure 30. Vaccination of the field distribution pattern σ_i in the BNCGR plate

Source: performed by N.G. Tsaritova and E.R. Iskhakova.

Анализ контактного взаимодействия пластин БУССР выполнен на базе данных о распределении компонент относительных смещений Δ_x , Δ_y , Δ_z в плоскости разъема. При экстремальном нагружении получены следующие величины: $\Delta_{x \max} = 0,22$ мм; $\Delta_{y \max} = 0,16$ мм; $\Delta_{z \max} = 0,14$ мм. Из приведенных данных следует, что при динамическом нагружении на границе разъема БУССР возникают знакопеременные смещения, обуславливающие раскрытие стыка пластин. Поэтому для обеспечения надежности соединений пластин БУССР необходимо обеспечить затяжку болтовых соединений в сочетании с установкой демпфирующих шайб.

4. Заключение

1. Выполнен конечно-элементный анализ динамического поведения стержневой конструкции цилиндрической формы, представляющей собой регулярно упорядоченную решетчатую структуру, образованную из плоских правильных шестиугольников и упруго податливых блоков узловых соединений. Установлено, что амплитудные значения суммарных перемещений конструкции при заданном законе нестационарного кинематического воздействия в зависимости от поворотных жесткостей блока узловых соединений стержней лежат в диапазоне 6,6...9,7 см.

2. На основании данных динамического расчета установлено, что при уменьшении поворотных жесткостей блоков узловых соединений стержней на два порядка амплитудные значения сжимающих усилий в стержнях цилиндрической решетки снижаются в 2,4 раза.

3. Разработана и изготовлена с помощью 3D-печати физическая модель блока узловых соединений стержней решетчатой конструкции. Приведены фотоматериалы, демонстрирующие способность трансформации сопряженных гексагональных стержневых секций.

4. Представлены результаты численного моделирования блока узловых соединений стержней с учетом контактного взаимодействия на стыке пластин. Показано, что при динамическом воздействии на границе разъема возникают знакопеременные смещения, влияющие на раскрытие стыка пластин.

5. Предлагаемая структурная концепция сборно-разборных узловых соединений стержней решетки с гексагональной формой секций позволяет выполнить ремонтно-восстановительные работы даже в случае больших необратимых искажений формы конструкции.

6. Перспективы дальнейших исследований будут направлены на тарировку поворотных жесткостей блока узловых соединений стержней.

Список литературы

1. Гасий Г.М. Особенности конструктивных решений и проектирования пространственных стержневых систем // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 6. С. 475–484. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-6-475-484> EDN: OTKKIN
2. Канчели Н.В. Строительные пространственные конструкции. Москва : АСВ, 2003. 112 с. ISBN 5-93093-206-9 EDN: QNKFNR
3. Ружанский И.Л. Развитие конструктивных форм пространственных и легких конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 5. С. 12–15. EDN: MCIQLZ
4. Zhao X.L., Tong L.W. New development in steel tubular joints // Advances in structural engineering. 2011. Vol. 14. P. 699–716. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.14.4.699>
5. Ramaswamy G.S., Eekhout M., Suresh G.R. Steel Space Frames, Analysis, Design and Construction. London, Thomas Telford Publ.; 2002. 242 p. ISBN-10 0727730142
6. Chilton J. Space grid structures. Woburn, MA : Butterworth-Heinemann Linacre House, 2000. 191 p. ISBN 0 7506 3275 5
7. Ashtul S.A., Patil S.N. Review on study of space frame structure system // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2020. Vol. 7. Issue 4. P. 667–672. URL: www.irjet.net (дата обращения: 16.12.2025).
8. Травуш В.И., Колчунов В.И., Клюева Н.В. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 4–11. EDN: TOBVVD

9. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. P. 122–149. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.06.082>
10. Kulak G.L., Fisher J.W., Struik J.H.A. Guide to design criteria for bolted and riveted joints. Second Edition. Wiley Publ.; 1987. 352 p. ISBN 0471837911, 9780471837916
11. Klimke H. The envelopes of the Arts centre in Singapore // *IABSE Symposium: Towards a Better Built Environment — Innovation, Sustainability, Information Technology*, 11–13 September 2002, Melbourne, Australia, 2002. Vol. 86. No. 15. P. 9–20. <https://doi.org/10.2749/222137802796336036>
12. Afshana S., Theofanousb M., Wangc J., Gkantoud M., Gardner L. Testing, numerical simulation and design of prestressed high strength steel arched trusses // *Engineering Structure*. 2019. Vol. 183. P. 510–522. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.007>
13. Babu S.S., Sreekumar S. A study on the ductility of bolted beam-column connections // *International Journal of Modern Engineering Research*. 2012. Vol. 2. Issue. 5. P. 3517–3521. URL: https://ijmer.com/papers/Vol2_Issue5/CK2535173521.pdf (дата обращения: 17.12.2025).
14. Инжуртов И.С., Дмитриев П.А., Георгиев С.В., Захарюта В.В. Анализ существующих узлов сопряжения пространственных конструкций и разработка сборно-разборного узлового элемента // *Вестник МГСУ*. 2013. № 3. С. 61–71. EDN: PXOISL
15. Aishc F., Andera M., Hryhab E., Olsson J., Tsigkaric M., Williams C.J.K. Form finding nodal connections in grid structures // *Proceedings of the IASS Symposium 2018 Creativity in Structural Design*. July 16-20, MIT, Boston, USA, 2018. p. 1–8. ISSN 2518-6582
16. Алпатов В.Ю., Жученко Д.И., Лукин А.О. Исследование узлового коннектора пространственной конструкции, выполненного из массивной детали // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 2. С. 142–149. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.2.142-149> EDN: YGJDWP
17. Alpatov V. Numerical Studies of the Nodal Connections of Metal Spatial Frames // *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032103> EDN: NDAFRY
18. Муцанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Цепляев М.Н., Муцанов А.В. Особенности формирования уточненных расчетных схем при анализе напряженно-деформированного состояния, оценке устойчивости и надежности элементов пространственных металлических конструкций // *Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: Тезисы VII Международного симпозиума*. 17–21 мая, Россия, Тамбов, 2023. С. 238–239. EDN: WMYIOS
19. Хайдаров Л.И., Шмелев Г.Н., Зиятдин Э.К. Построение расчетных схем мобильных пространственных стержневых конструкций, моделирующих их действительную работу // *Известия КГАСУ*. 2017. № 2 (40). С. 139–145. EDN: YQQQON
20. Трапуш В.И., Антошкин В.Д., Ерофеев В.Т., Гудожников С.С. Современные конструктивно-технологические решения сферических оболочек // *Строительство и реконструкция*. 2012. № 6 (44). С. 45–55. EDN: PVFYOZ
21. Антошкин В.Д. Конструкционно-технологическое формообразование оболочек из сборных плоских шестиугольных и треугольных панелей, размещенных в повторяющихся секторах сфер // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 4 (72). С. 3–8. EDN: ZHHHGH
22. Лебедь Е.В., Аткин А.В. Геометрический расчет пространственных стержневых систем // *Вестник МГСУ*. 2009. № 4. 317–329. EDN: KZHCFP
23. Wang T. A numerical study of elastic using constrained optimization method // *A Thesis Submitted for the Degree of Master of Engineering Department of Civil Engineering National University of Singapore* 2004. URI: <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/14131> (дата обращения: 17.12.2025).
24. Гайджуров П.П., Даник Н.Б., Климух А.В. Численное моделирование формоизменения гибких стержней // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2025. Т. 21. № 5. С. 462–473. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-5-462-473> EDN: DFDCNF
25. Гайджуров П.П., Царитова Н.Г. Моделирование сейсмического воздействия на двухконтурный геодезический купол с учетом податливости узловых соединений // *Вестник МГСУ*. 2026. Т. 21. № 1. С. 24–34. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2026.1.24-34> EDN: XHEL VH

References

1. Gasiy GM. Features of constructive solutions and design of spatial core systems. *Science and Technology*. 2017; 16(6):475–484. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-6-475-484> EDN: OTKKIN
2. Kancheli NV. *Spatial building structures*. Moscow: DIA Publ.; 2003. (In Russ.) ISBN 5-93093-206-9. EDN: QNKFNR
3. Ruzhansky IL. The development of constructive forms of spatial and lightweight structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2010;(5):12–15. (In Russ.) EDN: MCIQLZ

4. Zhao XL, Tong LW. New development in steel tubular joints. *Advances in structural engineering*. 2011;14:699–716. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.14.4.699>
5. Ramaswamy GS, Eekhout M, Suresh GR. *Steel space frames, analysis, design and construction*. London, Thomas Telford Publ.; 2002. ISBN-10 0727730142
6. Chilton J. *Space grid structures*. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann Linacre House, 2000. ISBN 0 7506 3275 5
7. Ashtul SA, Patil SN. Review on study of space frame structure system. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2020;07(04):667–672. Available from: www.irjet.net (accessed: 16.12.2025).
8. Travush VI, Kolchunov VI, Klyueva NV. Some directions in the development of the theory of survivability of structural systems of buildings and structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2015;(3):4–11. (In Russ.) EDN: TOBVVD
9. Adam JM, Parisi F, Sagasetta J, Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018;173:122–149. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.06.082>
10. Kulak GL, Fisher JW, Struik JHA. *Guide to design criteria for bolted and riveted joints*. Second Edition. Wiley Publ.; 1987. ISBN 0471837911, 9780471837916
11. Klimke H. The envelopes of the Arts centre in Singapore. *LABSE Symposium: Towards a Better Built Environment – Innovation, Sustainability, Information Technology*. Melbourne, Australia, 2002. Vol. 86. No. 15. P. 9–20. <https://doi.org/10.2749/222137802796336036>
12. Afshana S, Theofanousb M, Wang J, Gkantoud M, Gardner L. Testing, numerical simulation and design of pre-stressed high strength steel arched trusses. *Engineering Structure*. 2019;183:510–522. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.007>
13. Babu SS, Sreekumar S. A study on the ductility of bolted beam-column connections. *International Journal of Modern Engineering Research*. 2012;2(5):3517–3521. Available from: https://ijmer.com/papers/Vol2_Issue5/CK2535173521.pdf (accessed: 17.12.2025).
14. Injutov IS, Dmitriev PA, Deordiev SV, Zakharyuta VV. Analysis of existing spatial structure coupling links and development of a collapsible nodal element. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2013;3:61–71. (In Russ.) EDN: PXOISL
15. Aishc F, Andera M, Hryhab E, Olsson J, Tsigkaric M, Williams CJK. Form finding nodal connections in grid structures. In: *Proceedings of the IASS Symposium 2018 Creativity in Structural Design*. International Association for Shell and Spatial Structures. 2018. p. 1–8. ISSN 2518-6582
16. Alpatov VYu, Zhuchenko DI, Lukin AO. Investigation of a nodal connector of spatial construction made of a massive part. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2017;12(2):142–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.2.142-149> EDN: YGJDWP
17. Alpatov VYu. Numerical studies of the nodal connections of metal spatial frames. In: *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. Series: Materials Science and Engineering*. Vladivostok, 2018:032103. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032103> EDN: NDAFRY
18. Muschanov VF, Orzhekhovskiy AN, Tseplyaev MN, Muschanov AV. Features of the formation of refined design schemes in the analysis of stress-strain state, assessment of stability and reliability of elements of spatial metal structures. In: *Actual problems of computer modeling of structures and structures: Abstracts of the VII International Symposium*. May 17–21, Russia, Tambov, 2023. p. 238–239. (In Russ.) EDN: WMYIOS
19. Khaidarov LI, Shmelev GN, Ziyatdin EK. Construction of computational schemes of mobile spatial rod structures modeling their actual work. *From the News of KGASU*. 2017;2(40):139–145. (In Russ.) EDN: YQQQON
20. Travush VI, Antoshkin VD, Yerofeev VT, Gudozhnikov SS. Mode constructive and technological solutions of spherical shells. *Construction and Reconstruction*. 2012;(6):45–55. (In Russ.) EDN: PVFYOZ
21. Antoshkin VD. Structural and technological forming of shells on the basis of flats regular hexagon and triangle panels placed in the repeated sphere sectors. *Construction and Reconstruction*. 2017;(4):3–8. (In Russ.) EDN: ZHHHGH
22. Lebed EV, Atkin AV. Geometric calculation of spatial rod systems. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2009;(4):317–329. (In Russ.) EDN: KZHCFP
23. Wang T.A Numerical Study of Elastic Using Constrained Optimization Method [master's thesis]. National University of Singapore; 2004. Available from: <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/14131> (accessed: 17.12.2025).
24. Gaidzhurov PP, Danik NB, Klimukh AV. Numerical modeling of change of shape of flexible bars. *Construction Mechanics of Engineering Structures and Structures*. 2025;21(5):462–473. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-5-462-473> EDN: DFDCNF
25. Gaidzhurov PP, Tsaritova NG. Modeling of seismic effects on a two-contour geodesic dome, taking into account the ductility of nodal connections. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2026;21(1):24–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2026.1.24-34> EDN: XHEL VH