

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

DOI: 10.22363/1815-5235-2026-22-4-399-414

EDN: LOPYUG

Научная статья / Research article

Методы снижения напряжений в ребрах ребристо-кольцевого купола при возникновении аварийной ситуации

А.В. Голиков^{id}, А.М. Коренец^{✉ id}Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация
✉ korieniets@bk.ru

Поступила в редакцию: 7 мая 2026 г.

Доработана: 25 июля 2026 г.

Принята к публикации: 30 июля 2026 г.

Аннотация. Путем анализа отечественных и зарубежных литературных источников исследованы возможные методы управлением распределения напряжений в различных конструкциях и рассмотрена возможность их применимости к стальным ребристо-кольцевым куполам при возникновении аварийной ситуации в опорном узле. Проведен расчет численных моделей ребристо-кольцевого купола в различных постановках задач с учетом прогрессирующего обрушения конструкции при повреждении опорного элемента: линейный статический, нелинейный квазистатический, нелинейный динамический. По данным расчета сделаны выводы о характере перераспределения напряжений в конструктивной системе и последующем сценарии обрушения конструкции купола. Проведен анализ численных моделей ребристо-кольцевого купола с поврежденным опорным узлом и моделей, в которых реализованы различные методы регулирования напряженно-деформированного состояния и дана оценка эффективности их использования для управления напряженно-деформированным состоянием в купольных конструкциях при возникновении аварийной ситуации. По результатам численного анализа путем сравнения напряженно-деформированных состояний разных схем с реализованными системами управления распределением усилий в системе предложен механизм регулируемой работы купольного покрытия с допустимой степенью разрушения, позволяющий сохранить несущий каркас и избежать дальнейшего прогрессирующего обрушения.

Ключевые слова: управляемая конструкция, прогрессирующее обрушение, контролируемое разрушение, предварительное напряжение, разгрузка системы

Вклад авторов. Голиков А.В. — общее научное руководство, рецензирование, редактирование, формулировка направления исследования; Коренец А.М. — подготовка текста статьи, проведение исследования, программное обеспечение. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в публикуемую статью.

Для цитирования: Голиков А.В., Коренец А.М. Методы снижения напряжений в ребрах ребристо-кольцевого купола при возникновении аварийной ситуации // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2026. Т. 22. № 4. С. 399–414. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-4-399-414> EDN: LOPYUG

Голиков Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 1369-7819, ORCID: 0000-0001-6588-6031; e-mail: av.golikoff@yandex.ru

Коренец Александр Михайлович, аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 5970-7718, ORCID: 0009-0005-9503-8822; e-mail: korieniets@bk.ru

© Голиков А.В., Коренец А.М., 2026

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

Methods of Reducing Stress in the Ribs of a Ribbed-Ring Dome in Case of an Accidental Situation

Alexander V. Golikov^{ID}, Alexander M. Korenets^{✉ ID}

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

✉ korienets@bk.ru

Received: May 7, 2026

Revised: July 25, 2026

Accepted: July 30, 2026

Abstract. Through a review of Russian and international scientific literature, this study investigates potential methods for controlling stress distribution in various structural systems and evaluates their applicability to steel ribbed-ring domes in case of accidental situations involving the failure of a support node. Numerical simulations of the ribbed-ring dome were conducted across various problem settings to account for progressive collapse triggered by the localized failure of a supporting element. These simulations encompass linear static, nonlinear quasi-static, and nonlinear dynamic analyses. Based on the computational results, conclusions are drawn regarding the patterns of stress redistribution within the structural system and the subsequent collapse scenarios of the dome. Furthermore, a comparative analysis was performed on numerical models of the ribbed-ring dome with a damaged support node, alongside models incorporating various techniques for stress distribution control. The efficacy of these techniques in controlling the stress distribution in dome structures under accidental situations was rigorously evaluated. Finally, based on the numerical analysis and through a comparative evaluation of the stress distributions across different configurations equipped with force distribution control systems, a mechanism for the adaptive action of the dome roof system is proposed. This mechanism allows for a tolerable degree of localized damage while preserving the integrity of the load-bearing frame and preventing subsequent progressive collapse.

Keywords: controlled structure, progressive collapse, controlled failure, prestressing, system unloading

Authors' contribution: *Golikov A.V.* — supervision, writing — review and editing, conceptualization; *Korenets A.M.* — writing — original draft, investigation, software. All authors are familiar with the final version of the article and approved it.

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

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the article being published.

For citation: Golikov AV, Korenets AM. Methods of reducing stress in the ribs of a ribbed-ring dome in case of an accidental situation. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2026;22(4):399–414. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-4-399-414> EDN: LOPYUG

1. Введение

Обеспечение несущей способности конструкции при возникновении аварийной ситуации является одной из задач при проектировании уникальных конструкций и зданий с постоянным массовым пребыванием людей согласно требованию Российского свода правил СП 385.1325800.2018¹. К данным типам конструкций относятся и купольные покрытия ввиду своей распространенности при строительстве общественных зданий и сооружений с большими пролетами.

Особое внимание к защите от прогрессирующего обрушения уделяется однослойным пространственным оболочкам, так как в данных конструкциях повреждение в одном элементе или узле приводит к выходу из строя всех примыкающих элементов, что, в свою очередь, может спровоцировать прогрессирующее обрушение всей конструкции [1]. К данным системам относятся и ребристо-

¹ СП 385.1325800.2018. Свод правил. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. Москва : Стандартинформ, 2018. 24 с.

Alexander V. Golikov, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Metal and Timber Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 1369-7819, ORCID: 0000-0001-6588-6031; e-mail: av.golikoff@yandex.ru

Alexander M. Korenets, Postgraduate student of the Department of Metal and Timber Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 5970-7718, ORCID: 0009-0005-9503-8822; e-mail: korienets@bk.ru

кольцевые купола, которые, несмотря на достаточно высокую степень резервируемости системы, имеют в своей конструкции элементы, выход из строя которых также может привести к значительным повреждениям всего сооружения.

Первые конкретные действия в области защиты зданий от прогрессирующего обрушения стали предприниматься все чаще в конце XX в. [2]. Как один из вариантов решения проблемы обеспечения живучести сооружения при аварийной ситуации ученым сообществом было предложено создание управляемых конструкций. Изучение возможности управления конструкциями с целью создания саморегулируемой конструктивной системы, способной мгновенно реагировать на внешние воздействия путем перераспределения НДС, стало приоритетным направлением для таких отечественных ученых, как Н.П. Абовский и В.Г. Себешев [3]. Ими были рассмотрены различные способы по перераспределению усилий в элементах конструкции с точки зрения строительной механики, что помимо контроля устойчивости сооружения в аварийном состоянии также позволяло решить задачу по более равномерному распределению усилий по элементам конструкции и последующей экономии на материалах путем уменьшения сечения.

Объект исследования — конструктивная система ребристо-кольцевого купола. **Предмет** — характер изменения напряженно-деформированное состояние несущей системы купола при использовании различных методов изменения НДС системы в аварийной ситуации.

Научная новизна состоит в определении степени защиты конструкции ребристо-кольцевого купола от прогрессирующего обрушения каждого из рассматриваемых методов.

Практическая значимость работы — выявление зависимостей в перераспределении напряжений и усилий в рассматриваемых методах защиты от прогрессирующего обрушения в конструкции ребристо-кольцевого купола на основе численных моделей в ПК ЛИРА САПР 2024 R2.3.

Цель исследования — поиск наиболее эффективных методов управления НДС конструкции ребристо-кольцевого купола для создания саморегулируемой конструктивной системы, способной мгновенно реагировать на внешние воздействия путем разгрузки системы и снятия пиковых напряжений [4].

Для достижения цели решен ряд следующих задач:

- критический анализ работ отечественных и зарубежных ученых в области изучения методов управления конструктивными системами;
- оценка применимости рассмотренных методов для конструкции ребристо-кольцевого купола;
- моделирование расчетных схем купола с применением возможных схем по регулированию НДС системы;
- сопоставление результатов моделирования НДС поврежденной схемы со схемами, имеющими разгрузочный механизм регулирования напряжений;
- анализ результатов моделирования защиты от отказа с определением наиболее эффективного метода управления НДС системы применимо к ребристо-кольцевым куполам.

2. Модели и методы

Анализ методов защиты от прогрессирующего обрушения

Перед рассмотрением конкретных конструктивных решений по управлению распределением усилий по элементам конструкции ребристо-кольцевого купола в аварийном режиме работы [5] было проанализировано влияние этих решений в общем виде, а именно на примере численных моделей (рис. 1) (с точки зрения строительной механики) путем замены механизма распределения усилий на линейный простой элемент либо на реакцию или усилие, которое данный механизм должен вызвать [6].

В основу анализа изменения усилий в конструкции купола легли следующие методы изменения НДС системы:

- 1) применение предварительного напряжения в элементах, способного компенсировать дополнительное усилие, вызванное аварийной ситуацией;

- 2) использование затяжек для передачи усилий на менее загруженные элементы;
- 3) уменьшение напряжений в элементах путем разгрузки системы.

Первый метод получил более широкое распространение в железобетонных конструкциях, но с тем нюансом, что там он применяется для повышения несущей способности элемента без изменения сечений и материалов. Сущность метода состоит в предварительном создании усилия в элементе (на этапе строительства), направленного в противоположную сторону от усилия, возникающего в элементе при приложении к нему нагрузки.

Применительно к купольным системам предварительное напряжение может быть приложено к ребрам конструкции в направлении, противоположном усилиям, возникающим в момент повреждения опорного узла. Гипотеза о возможной работе данной теории основана на том, что усилия, возникающие в ребрах при повреждении узла, имеют то же направление, что и при нормальной работе купола и изменяются лишь по величине, то есть направление предварительного напряжения можно задать заранее [7].

В данном методе необходимо определить величину перегруза в наиболее нагруженном элементе и создать предварительное напряжение на эту же величину. Проблема метода состоит в неравномерности напряжений при аварийной ситуации и невозможности заранее определить, в каком из узлов повредится опора, а напряжение будет во всех ребрах приложено одинаковое, поэтому также необходимо проверить на отрицательный эффект от действия данного метода.

Во втором методе затяжки используются как элементы, передающие усилие с перегруженных элементов на недогруженные, тем самым обеспечивая равномерную передачу усилий по ребрам [8]. При анализе работы купола с поврежденным ребром наблюдалась следующая картина распределения напряжений: имелось два типа групп ребер, перегруженные и разгруженные, которые последовательно чередовались по кругу, начиная с группы перегруженных ребер в зоне аварийного узла. Поэтому возникает необходимость в введении в систему элементов, которые могли бы передавать нагрузку с нагруженного ребра на соседнее разгруженное. Также возникает вопрос о месте установки таких элементов, так как из анализа эпюр видно, что максимальные моменты в арках возникают в средней части полуарки, а максимальные усилия в приопорной зоне [9], поэтому в данном методе определяются места максимальных нормальных напряжений, и исходя из этого рассматривается несколько вариантов постановки элементов передачи усилий.

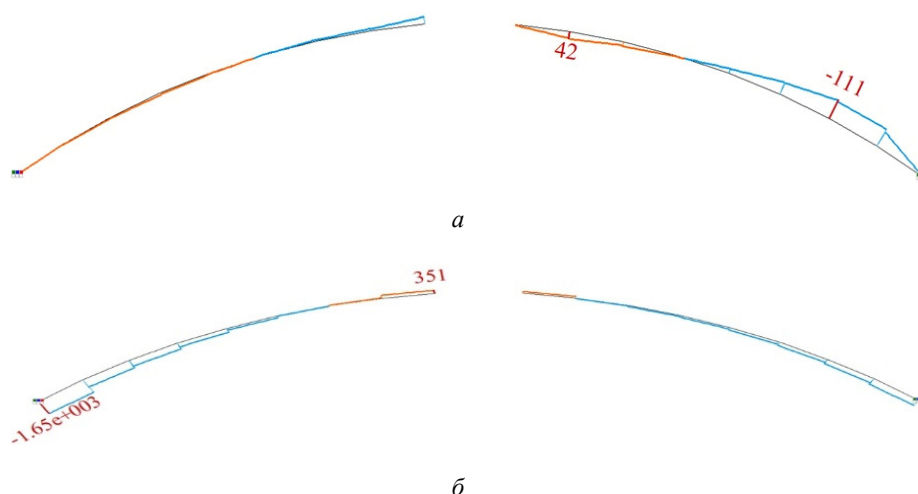


Рис. 1. Эпюры максимальных моментов:

a — и продольных усилий; *б* — в ребрах арки купола

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом.

Figure 1. Diagrams of maximum moments:

a — and longitudinal forces *б* — in the ribs of the dome arch

S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets.

Третий метод с разгрузкой системы подразумевает снятие пиковых напряжений с ребер путем общей разгрузки системы и, как следствие, уменьшение напряжений в целом по системе [10]. В данном случае в разгруженных ребрах напряжения падают до минимума, а в перегруженных ребрах уменьшаются до работоспособного состояния. В купольных конструкциях прикладываются следующие основные типы нагрузок: собственный вес, нагрузка от веса покрытия, снеговая нагрузка, ветровая нагрузка. Три последние нагрузки передаются на купол через кровельные панели покрытия. Сброс данных панелей позволяет оставить в системе напряжения только от собственного веса самой конструкции [11].

Для проверки эффективности различных методов защиты купольного каркаса от прогрессирующего обрушения в программном комплексе ЛИРА САПР 2024 R2.3 разработана модель стального ребристо-кольцевого купола с диаметром основания 42 м, высотой стрелы подъема 7 м, шагом ребер 15° с сечением 35Б2. Для всех элементов применялась сталь С245 по межгосударственному стандарту ГОСТ 27772-2021². При создании модели использовались стержневые конечные элементы типа КЭ10, размеры которых назначались до точек пересечения с соседними элементами, так как данного размера достаточно для анализа по критерию несущей способности элемента, который является основным параметром при оценке эффективности методов. Так как на практике многие типы опорных узлов купольных конструкций имеют жесткое защемление, в схеме на концах ребер были наложены граничные условия в виде ограничения перемещений и углов поворота во всех направлениях [12]. Примыкание колец к ребрам купола выполнено шарнирным с разрешением поворота по осям, перпендикулярным оси стержня. К данной схеме приложены следующие нормативные нагрузки согласно СП 20.13330.2020³:

– нагрузка от кровельного покрытия 0,5 кПа;

– нагрузка от снегового покрова 1,5 кПа,

и третий вариант загрузки для купольной поверхности:

– нагрузка от ветрового воздействия 0,23 кПа.

Расчетное состояние системы предполагает аварийную ситуацию, вызванную дополнительным внешним усилием при наихудшем сочетании проектных нагрузок, поэтому расчет предполагает проверку на два расчетных сочетания нагрузок: основное и особое (рис. 2). Аварийная ситуация предполагает хрупкое разрушение опоры, поэтому в расчетной схеме реализована путем мгновенного удаления узла.

N загруз.	Наименование	Вид	Знакоперен.	Взаимоискл.	Кэф. надежн.	Доля длителн.	1.Основное 1	2.Основное 1	3.Основное 3	4.Особое 1	5.Особое 2	6.Особое 3
Loading ID	Name	Type	Alternating sign	Mutually exclusive	Safety factor	Reduction factor	Basic 1	Basic 2	Basic 3	Special 1	Special 2	Special 3
1	Собственный вес / Self-weight	Постоянное(П) / Permanent	+		1.0	1.0	1.	1.	1.	0.952	0.952	0.952
2	Покровение / Roof	Постоянное(П) / Permanent	+		1.0	1.0	1.	1.	1.	0.833	0.833	0.833
3	Снег 1 / Snow 1	Кратк. прочие (К) / Variable other	+	1	1.2	0.35	1.	0.	0.	0.357	0.	0.
4	Снег 2 / Snow 2	Кратк. прочие (К) / Variable other	+	1	1.2	0.35	0.	1.	0.	0.	0.357	0.
5	Снег 3 / Snow 3	Кратк. прочие (К) / Variable other	+	1	1.2	0.35	0.	0.	1.	0.	0.	0.357
6	Пульсация X / Fluctuation X	Постоянное(П) / Permanent	+		1.0	1.0	1.	1.	1.	1.	1.	1.
7	Ветер X / Wind X	Неактивное (Н/а) / Inactive (N/a)	+		0.0	0.0	0.	0.	0.	0.	0.	0.

Рис. 2. Коэффициенты расчетных сочетаний нагрузок

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом.

Figure 2. Factors of design load combinations

S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets.

Первичным критерием оценки поврежденности элементов купола и эффективности рассматриваемых методов является коэффициент использования сечения по первому предельному состоянию. Анализ конструкции по данному критерию дает представление о степени повреждения элементов,

² ГОСТ 27772-2021. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. Москва : Российский институт стандартизации, 2021. 35 с.

³ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Москва : Стандартинформ, 2018. 95 с.

участках наибольшей концентрации усилий, на которые перераспределилась нагрузка, а также предполагаемом сценарии дальнейшего разрушения конструкции. Данный анализ позволил сделать первоначальные предположения о местах дальнейшего разрушения, которые выступают исходной точкой для применения методов по изменению НДС системы.

Также для уточнения результатов линейного статического расчета выполнен нелинейный геометрический расчет на прогрессирующее обрушение в квазистатической и динамической постановках, по результатам которых проведен сравнительный анализ показателей коэффициентов использования несущей способности сечений элементов, а также значение усилий в наиболее напряженном элементе (табл. 1).

Таблица 1. Расчетные значения усилий в наиболее напряженном элементе при различных постановках задачи

Программный комплекс	ЛИРА САПР 2024 R2.3			
Тип расчета	Линейный статический	Нелинейный квазистатический	Нелинейный динамический	Нелинейный квазистатический с уточненным коэффициентом динамичности
N , кН	1648	1952	1603	1603
M_y , кН×м	87,3	118,7	93,7	93,7
Q_z , кН	34,6	47,1	24,7	24,7
Q_y , кН	0,03	0,1	0,24	0,24
M_z , кН×м	2,1	0,3	1,08	1,08
M_x , кН×м	0,1	0,2	0,11	0,11

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом.

Table 1. Design values of internal forces in the most stressed element for different problem settings

Software	LIRA SAPR 2024 R2.3			
Analysis type	Linear static	Nonlinear quasi-static	Nonlinear dynamic	Nonlinear quasi-static with a refined dynamic amplification factor
N , kN	1648	1952	1603	1603
M_y , kN×m	87,3	118,7	93,7	93,7
Q_z , kN	34,6	47,1	24,7	24,7
Q_y , kN	0,03	0,1	0,24	0,24
M_z , kN×m	2,1	0,3	1,08	1,08
M_x , kN×m	0,1	0,2	0,11	0,11

S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets.

При первичной итерации квазистатического расчета в узле над поврежденной опорой назначался коэффициент динамичности $D_{\text{din}} = 2$ [13].

По результатам данного расчета получено, что обрушение опорного элемента ребра соответствует первой форме колебаний, для которой были приняты частота внутренних колебаний $\nu = 2,43$ рад/с и период колебаний $T = 2,93$ с. Данные параметры были использованы для дальнейшего нелинейного динамического расчета.

При задании динамического расчета были заданы следующие параметры:

- время отказа $dT = 0,1T = 0,1 \times 2,93 = 0,293$ с;
- шаг интегрирования $0,5T = 0,5 \times 2,93 = 1,47$ с;
- время интегрирования 30 с;
- частота для вычисления коэффициентов Рэлея 2,43 рад/с, значение логарифмического декремента колебаний 0,3;
- значение коэффициента Рэлея $\alpha = 0,232$.

По результатам нелинейного динамического расчета получен график кинетической энергии (рис. 3, а) и график вертикальных перемещений надопорного узла (рис 3, б)

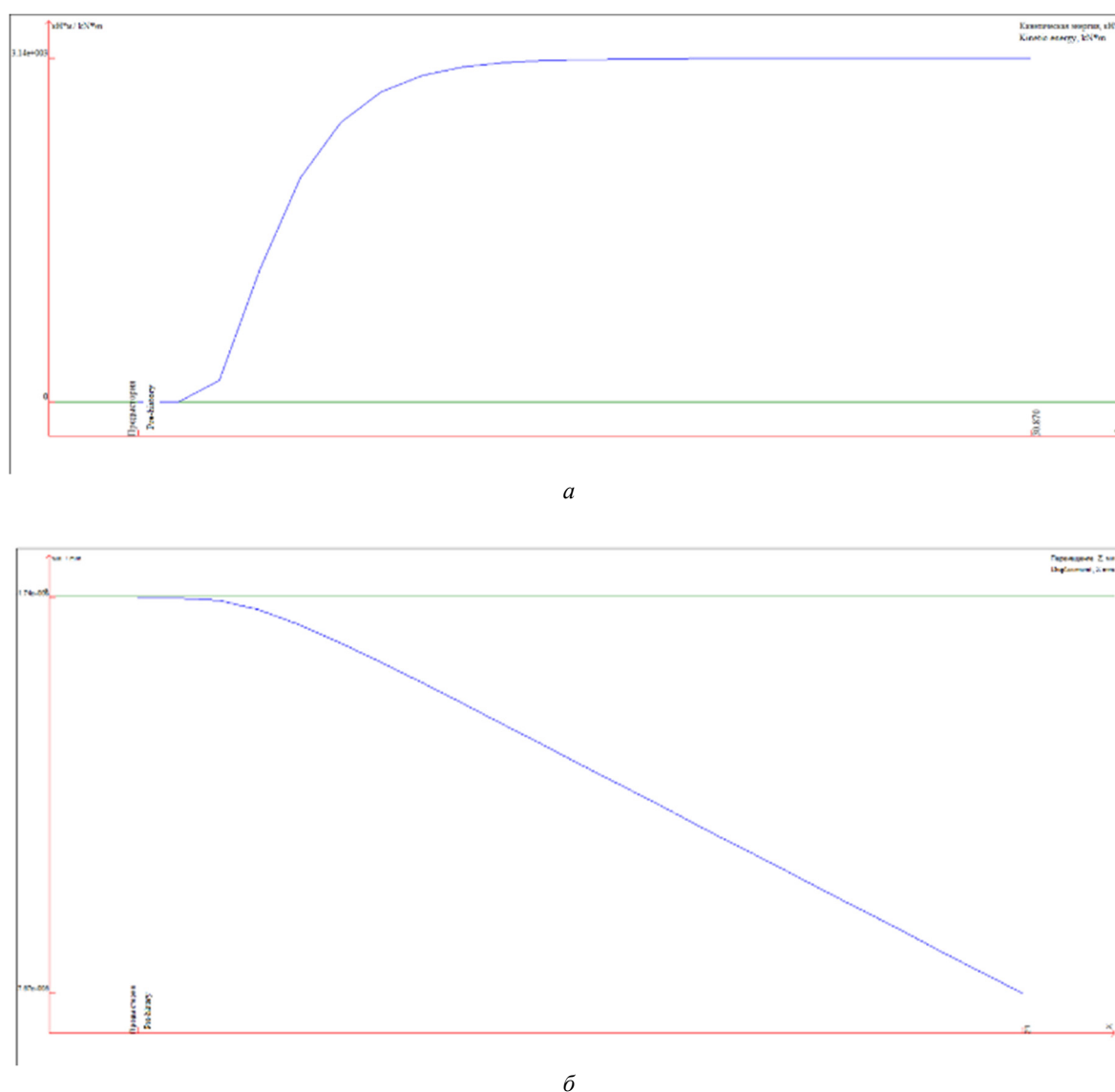


Рис. 3. График кинетической энергии (а), график перемещения надопорного узла по Z, мм (б)

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом.

Figure 3. Kinetic energy graph (а), graph of the displacement of the support node along Z, mm (б)

S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets.

Из анализа графиков получено, что значение максимальных перемещений совпадает с конечной точкой графика, соответствующей равновесному состоянию системы, из чего можно сделать вывод, что коэффициент динамичности для данной конструкции равен $D_{\text{din}} = 1$.

При повторном нелинейном квазистатическом расчете в узле с поврежденным опорным элементом коэффициент динамичности заменен на $D_{\text{din}} = 1$.

В данной схеме рассматривалась аварийная ситуация, при которой опорный узел наиболее нагруженного ребра купола выходит из строя. При такой постановке задачи ребро с поврежденным узлом выключается из работы, и нагрузка от него перераспределяется на соседние ребра, в которых возникают напряжения, значительно превышающие несущую способность ребра. В результате по цепной реакции происходит последовательное разрушение остальных ребер, то есть прогрессирующее обрушение всей конструкции (рис. 4). Данный сценарий перераспределения НДС в системе наблюдался во всех вариантах постановки задачи как при линейном расчете, так и при нелинейном.

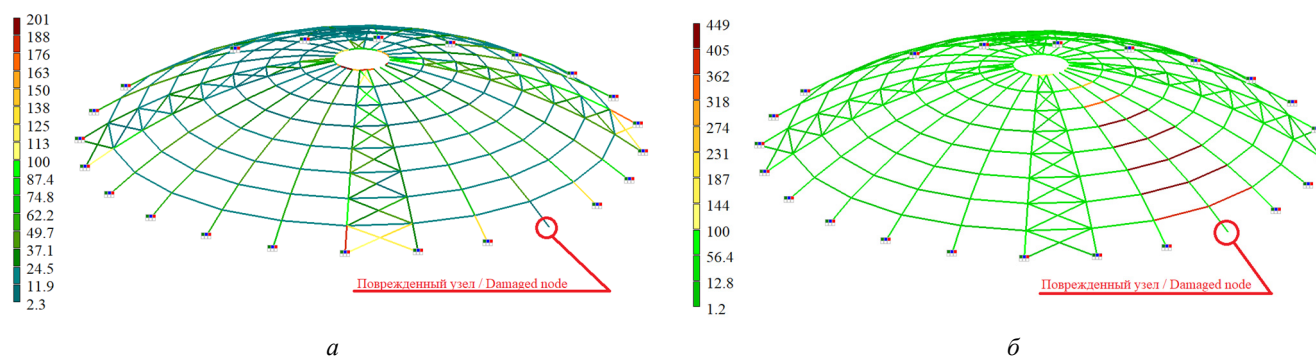


Рис. 4. Мозаика использования сечений по группам предельных состояний:

a — первая группа; *б* — вторая группа

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом.

Figure 4. Mosaic of the utilization of sections by type of limit states:

a — ultimate limit state; *б* — serviceability limit state

S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets.

В поврежденной модели превышение расчетного сопротивления происходило в первую очередь в двух соседних ребрах от места повреждения и ребрах, примыкающих к связям, поэтому первоначально определили величину и точку концентрации максимальных напряжений в данных ребрах. Из анализа продольных усилий и изгибающих моментов выделили четыре наиболее опасных участка:

- участок 1 — в ребре, соседнем с поврежденным с максимальным моментом;
- участок 2 — в ребре, соседнем с поврежденным с максимальным продольным усилием;
- участок 3 — в ребре, примыкающем к связи, с максимальным моментом;
- участок 4 — в ребре, примыкающем к связи, с максимальным продольным усилием.

На основе результатов расчета для особого сочетания нагрузок получены следующие результаты продольных усилий, моментов и нормальных напряжений (табл. 2).

Таблица 2. Расчетные значения N , M_y и σ_x для наиболее опасных участков

Table 2. Design values of N , M_y , and σ_x for the critical regions

№ участка / Region ID	N , кН	M_y , кН×м	σ_x , МПа	1 п.с. / ULS, %	2 п.с. / SLS, %
1	890	123	365	92	52
2	1167	164	408	112	57
3	1019	44	300	107	56
4	1648	87,3	490	168	82

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом / S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets.

Из анализа данных таблицы получили, что место с наибольшей концентрацией напряжений находится в приопорном участке ребра, примыкающего к связи (участок № 4), поэтому дальнейший анализ методов защиты конструкции от прогрессирующего обрушения проводился для этого участка.

Для удобства анализа изменений в моделях все ребра купола пронумерованы (рис. 5). Повреждение, согласно данной нумерации, рассматривалось в ребре 6, наиболее напряженный участок рассматривался в ребре 9.

Численная модель — 1-й метод

Для метода предварительного напряжения в первой итерации (табл. 3) численной модели приложена нагрузка к наиболее напряженному участку ребра, противоположная направлению внутреннего сжимающего усилия, с величиной, компенсирующей разницу между усилием при аварийной и нормальной работе конструкции. Для данного участка эта величина составляет $1580 - 1270 = 310$ кН. Для данного участка эта величина составляет $1580 - 1270 = 310$ кН. В результате первого приближе-

ния процент использования сечения по первому предельному состоянию уменьшился с 169 до 145 %, в соседнем элементе этого же ребра также уменьшился процент использования с 107 до 106 %. Во второй итерации данная нагрузка предварительного напряжения была приложена ко всем ребрам [14], в результате чего по первому предельному состоянию в ребре 9 процент использования не изменился относительно предыдущей итерации (145 %), но во всех остальных ребрах уменьшился до значений меньше 100 %. В третьей итерации значение предварительного напряжения в ребрах, соединенных со связями, было увеличено до 650 кН, а в остальных ребрах уменьшено до 200 кН. В четвертой итерации нагрузка в ребрах со связями была увеличена до 950 кН. При данных значениях процент использования сечения всех ребер стал меньше 100 % (табл. 4).



Рис. 5. Нумерация ребер купола

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом.

Figure 5. Numbering of the dome ribs

S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets.

Таблица 3. Описание итераций первого метода

№ итерации	Описание
1	Усилие предварительного напряжения прикладывается только к ребрам, исчерпавшим запас прочности при аварийной ситуации. Величина усилия 310 кН
2	Усилие предварительного напряжения прикладывается ко всем ребрам. Величина усилия 310 кН
3	Усилие предварительного напряжения прикладывается ко всем ребрам. Величина усилия для ребер исчерпавших запас прочности — 650 кН, для всех остальных — 200 кН
4	Усилие предварительного напряжения прикладывается ко всем ребрам. Величина усилия для ребер исчерпавших запас прочности — 950 кН, для всех остальных — 200 кН

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом.

Table 3. Description of iterations of the first method

Iteration ID	Description
1	The prestressing force is applied only to the ribs that utilized all their strength under the accidental design situation. The prestressing force is 310 kN
2	The prestressing force is applied to all ribs. The prestressing force is 310 kN
3	The prestressing force is applied to all ribs. The prestressing force is 650 kN for the ribs that utilized all their strength and 200 kN for all other ribs
4	The prestressing force is applied to all ribs. The prestressing force is 950 kN for the ribs that utilized all their strength and 200 kN for all other ribs

S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets.

Таблица 4. Процент использования сечения в ребрах для 1-го метода
 Table 4. Percentage of cross-section utilization in the ribs for the first method

№ ребра / Rib ID	Аварийная работа / Accidental situation	Итерации / Iterations			
		1	2	3	4
1	60	60	35	44	44
2	153	153	129	104	81
3	53	53	30	41	57
4	65	65	40	48	48
5	110	110	85	94	94
6	31	31	31	31	31
7	112	112	87	96	96
8	40	40	39	57	73
9	169	145	145	119	97
10	62	62	37	45	45
11	60	60	35	44	44
12	58	58	34	42	42
13	58	58	33	42	42
14	85	85	62	36	24
15	47	47	23	29	45
16	55	55	30	39	39
17	55	55	30	39	39
18	55	55	30	39	39
19	55	55	30	39	39
20	77	77	54	28	36
21	84	84	61	35	19
22	58	58	33	42	42
23	58	58	33	42	42
24	69	69	44	53	53

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом / S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets.

Численная модель — 2-й метод

Во втором методе для передачи усилий с перегруженных ребер на менее нагруженные использовались затяжки, выполненные из круга диаметром 30 мм. В первой итерации расчета (рис. 6, а) затяжки устанавливались в опорных элементах ребер, соединенных со связями, в верхней точке. По результатам расчета значительных изменений в системе нет: в ребре со связью процент использования уменьшился с 169 до 168 %. Во второй итерации (рис. 6, б) при установке затяжек на всех ребрах процент использования сечения уменьшился до 156 %. В третьей итерации (рис. 6, в) затяжки устанавливались в точке максимальных моментов [15], и в результате процент использования сечения уменьшился до 147 %.

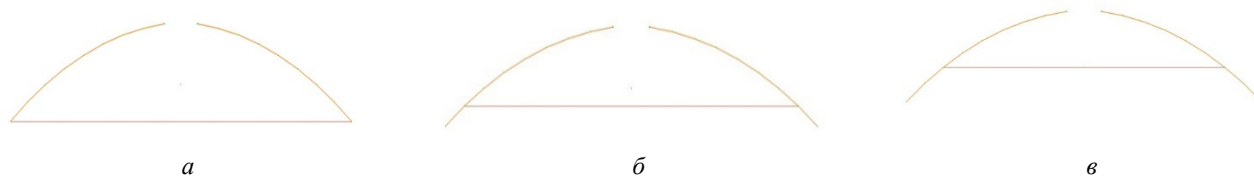


Рис. 6. Схема установки затяжек:

а — первая итерация; б — вторая итерация; в — третья итерация

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом.

Figure 6. Tie installation diagram:

а — first iteration; б — second iteration; в — third iteration

S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets.

При дальнейшей установке затяжек еще на уровень выше по ребру привел к увеличению данного показателя в остальных ребрах, поэтому в четвертой итерации использовались затяжки в уровне точек с максимальным моментом с предварительным напряжением в них. При использовании предварительного напряжения значения уменьшаются в пределах 1–2 %, что не дало значительного результата для предотвращения прогрессирующего обрушения конструкции.

Численная модель — 3-й метод

В данном методе моделировалось два варианта расчетных ситуаций: с полным снятием нагрузки и с частичным снятием нагрузки с верхней половины ребер. Система подразумевает сброс кровельных панелей, в результате чего в расчете не учитываются нагрузки от покрытия, ветрового воздействия и снегового покрова. Принципиальное отличие данного метода от двух предыдущих состоит в том, что в предыдущих моделях сохраняется замкнутость системы и общие усилия по системе перераспределяются внутри нее от более загруженных ребер к разгруженным. В данном методе система становится разомкнутой, так как частично снимается внешнее воздействие с нее, в результате чего и происходит уменьшение напряжений в элементах [16].

В первой итерации (рис. 7, б) (табл. 5) система разгружалась полностью и оставалась только нагрузка от собственного веса. Анализ результатов расчета данной итерации показал, что процент использования сечения в ребрах при первом предельном состоянии не превышает 5 %, что говорит о высокой эффективности метода.

Таблица 5. Описание итераций третьего метода

№ Iteration	Описание
1	С конструкции убираются все кровельные панели и нагрузка, которая через них передается
2	С конструкции убирается верхний ярус кровельных панелей возле центрального кольца купола и нагрузка, которая через них передается
3	С конструкции убирается два верхних яруса кровельных панелей от центрального кольца купола и нагрузка, которая через них передается
4	С конструкции убирается три верхних яруса кровельных панелей от центрального кольца купола и нагрузка, которая через них передается
5	С конструкции убирается четыре верхних яруса кровельных панелей от центрального кольца купола и нагрузка, которая через них передается
6	С конструкции убирается пять верхних яруса кровельных панелей от центрального кольца купола и нагрузка, которая через них передается

И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом.

Table 5. Description of iterations of the third method

№ итерации	Description
1	All roof panels are removed from the structure, along with the loads transferred through them
2	The uppermost tier of roof panels adjacent to the central ring of the dome is removed from the structure, along with the loads transferred through it
3	The two uppermost tiers of roof panels adjacent to the central ring of the dome are removed from the structure, along with the loads transferred through them
4	The three uppermost tiers of roof panels adjacent to the central ring of the dome are removed from the structure, along with the loads transferred through them
5	The four uppermost tiers of roof panels adjacent to the central ring of the dome are removed from the structure, along with the loads transferred through them.
6	The five uppermost tiers of roof panels adjacent to the central ring of the dome are removed from the structure, along with the loads transferred through them.

S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets

В целях экономической эффективности системы при дальнейшем ее восстановлении [17], в следующих итерациях из модели удалялись последовательно ряды кровельных панелей и нагрузка, которая через них передавалась, начиная с верхнего ряда, примыкающего к центральному кольцу. Итерации проводились до момента пока процент использования самого нагруженного ребра не стал меньше 100 % (табл. 6).

Таблица 6. Процент использования сечения в ребрах для 3-го метода
Table 6. Percentage of cross-section utilization in the ribs for the 3rd method

№ ребра / Rib ID	Аварийная ситуация / Accidental situation	Итерации / Iterations					
		1	2	3	4	5	6
1	60	2	55	51	45	38	28
2	153	5	149	143	130	110	81
3	53	3	50	46	43	35	25
4	65	2	61	56	49	40	28
5	110	3	105	100	91	79	61
6	31	1	30	30	29	28	26
7	112	3	107	102	93	80	62
8	40	4	36	33	28	21	14
9	169	5	164	156	141	117	83
10	62	2	56	52	45	37	27
11	60	2	55	50	44	35	24
12	58	2	54	49	43	34	24
13	58	2	54	49	42	34	24
14	85	5	79	72	63	51	41
15	47	3	44	39	32	23	14
16	55	2	50	46	40	32	22
17	55	2	51	46	40	32	22
18	55	2	51	46	40	32	22
19	55	2	51	46	40	32	22
20	77	3	75	70	61	46	24
21	84	5	78	71	62	51	27
22	58	2	54	49	42	34	24
23	58	2	54	50	44	37	27
24	69	2	66	62	56	47	34

Источники: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом / Sources: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets

3. Результаты исследования и их анализ

По результатам расчетов и анализа работы конструкции в сочетании с методами защиты от прогрессирующего обрушения составлена таблица (табл. 7), где отображены результаты эффективности применения каждого из метода относительно аварийной ситуации.

Таблица 7. Процент использования сечения в ребрах для каждого метода, %
Table 7. Percentage of cross-section utilization in the ribs for each method, %

Параметр / Parameter	1-й метод / 1th method	2-й метод / 2nd method	3-й метод / 3rd method
Максимальный процент использования сечения ребер / Maximum percentage of rib cross-section utilization	97	148	83
Среднее значение уменьшения процента использования сечения по ребрам / The average value of the reduction in the percentage of section utilization along the ribs	21,6	0,0	39,3

Источники: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом / Sources: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets

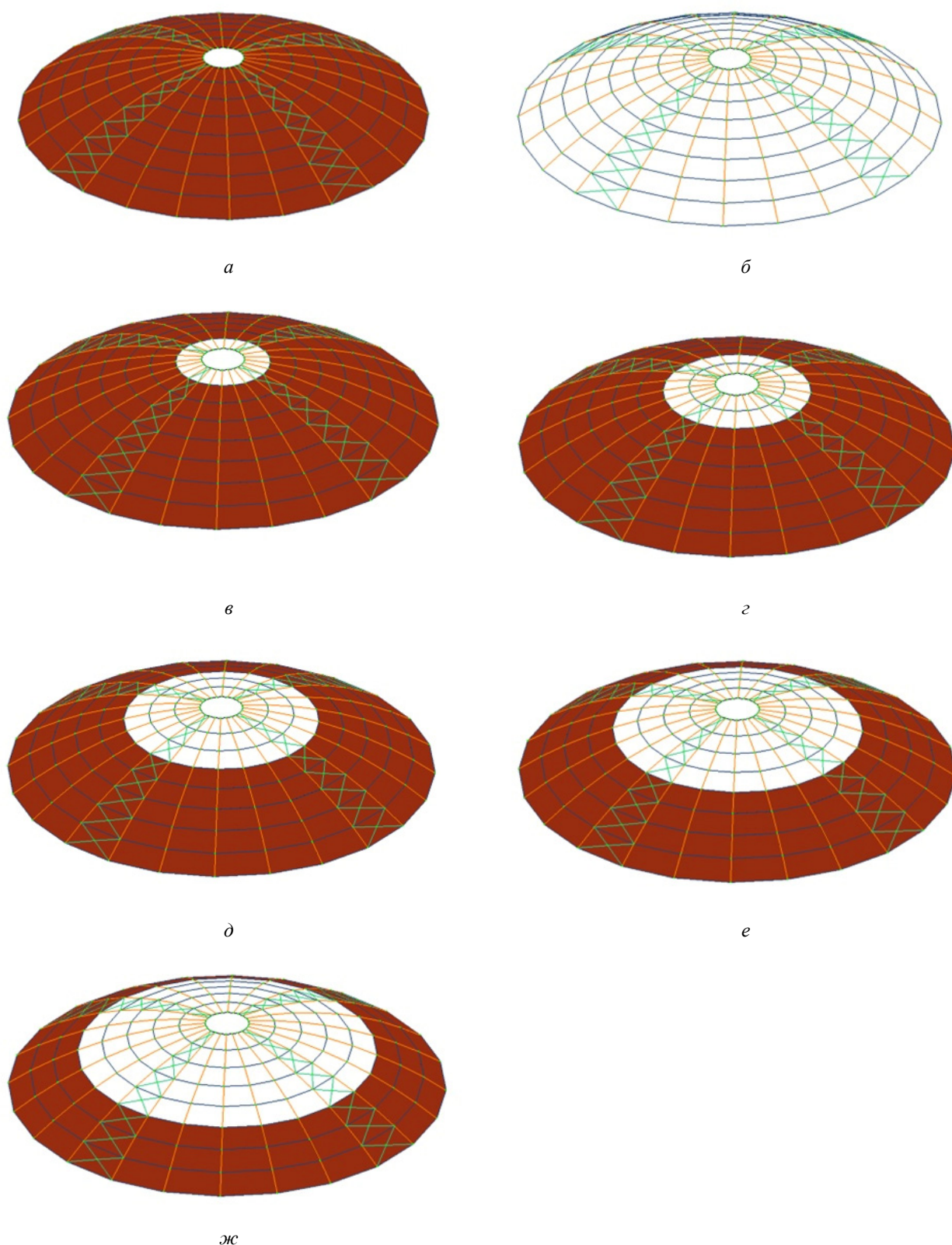


Рис. 7. Расчетная модель:

a — исходное состояние; итерации: № 1 — б, № 2 — в, № 3 — г, № 4 — д, № 5 — е, № 6 — ж
И с т о ч н и к: выполнено А.В. Голиковым, А.М. Коренцом.

Figure 7. Model:

a — initial state; iterations: No. 1 — б, No. 2 — в, No. 3 — г, No. 4 — д, No. 5 — е, No. 6 — ж
S o u r c e: made by A.V. Golikov, A.M. Korenets.

4. Заключение

1. По результатам анализа работы методов защиты стального ребристо-кольцевого купола от прогрессирующего обрушения в случае возникновения аварийной ситуации в опорном узле наибольшую эффективность показал метод № 3 с разгрузкой системы, при котором процент использования сечения в перегруженных ребрах удалось уменьшить до 83 %, а общий средний процент уменьшения составил 39,3 %. Метод № 1 с предварительным напряжением позволил уменьшить процент использования сечений в ребрах до 97 %, а общий средний процент составил 21,6 %. Метод № 2 с использованием затяжек оказался наименее эффективным, не обеспечивая необходимой несущей способности.

2. По результатам анализа 1-го метода можно сказать, что данный метод способен обеспечить работоспособность конструкции и предотвратить ее прогрессирующее обрушение, при этом сохраняется первоначальный эстетический облик конструкции без введения габаритных дополнительных элементов. К недостаткам данного метода можно отнести сложность разработки технологии предварительного натяжения ребер конструкции, а также тот факт, что для разных типов ребер требуется обеспечить разную величину напряжения в пределах одной конструктивной системы.

3. Из результатов работы 2-го метода относительно нулевого значения среднего перераспределения можно сказать, что усилия в конструкции перераспределились, не нарушив замкнутости системы, но, несмотря на снижение усилий в наиболее нагруженном элементе, наличие ребер с процентом использования сечения больше 100 % свидетельствует о недостаточно эффективном и неравномерном перераспределении усилий. Данный факт свидетельствует о невозможности использования данного метода для предотвращения прогрессирующего обрушения. Кроме того, такая конструкция требует внедрения дополнительных элементов с большими габаритами, ограничивающими использование конструкции по эстетическим и технологическим причинам.

4. С точки зрения эффективности третий метод показал наилучшие результаты, так как происходит значительное снижение напряжений и в слабо нагруженных ребрах, а также наблюдается максимальное снижение напряжения в самом нагруженном ребре, что повышает вероятность предотвращения прогрессирующего обрушения. Также данный метод за счет частичного снятия нагрузки имеет дополнительный нереализованный запас для большего снижения нагрузки, что делает его более универсальным для других типоразмеров куполов. К недостаткам данного метода можно отнести значительно большие затраты на восстановление второстепенных конструкций купола.

5. Из анализа всех достоинств и недостатков рассматриваемых методов можно составить следующую градацию приоритетности их применения:

- метод № 3 с разгрузкой системы;
- метод № 1 с предварительным напряжением;
- метод № 2 с использованием затяжек (требует дальнейшей доработки).

6. Исходя из существующей практики анализа работы купольных конструкций, возможно рассмотрение применения данных методов к аналогичным по конструктивной схеме ребристо-кольцевым куполам с другими габаритами.

Список литературы

1. Kolakkattil R., Tsavdaridis K.D., Sanjeevi A.J. A state-of-the-art review of progressive collapse research and guidelines for single-layer lattice shell structures // *Structures*. Vol. 56. 2023. Article no. 104945. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104945>
2. Xu Z., Yan S. Progressive-collapse mechanism of suspended-dome structures subjected to sudden cable rupture // *Buildings*. 2023. Vol. 13. No. 6. Article no. 1533. <http://doi.org/10.3390/buildings13061533> EDN: YPZCJM
3. Зеленецкий С.А., Себешиев В.Г. Регулирование напряженно-деформированного состояния статически неопределимых ферм способом изменения начальных длин элементов // *Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин)*. 2024. Т. 27. № 3. С. 9–23. <http://doi.org/10.32683/1815-5987-2024-27-93-3-9-23> EDN: KQHNNH

4. Тур В.И., Тур А.В. Влияние на напряженно-деформированное состояние металлического сетчатого купола. Отказ одного из узлов купола // Вузовская наука в современных условиях : сборник материалов 58-й научно-технической конференции : в 2 частях, Ульяновск, 22–31 января 2024 года. Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2024. С. 3–5. EDN: TNMJSJ
5. Голиков А.В., Гаранжа И.М., Танасогло А.В. Методика конструкционного формообразования стальных решетчатых башен // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2024 : сборник докладов V Национальной научной конференции, Москва, 16 декабря 2024 года. Москва : МГСУ, 2025. С. 30–39. EDN: EEDOCU
6. Tian Li.M., Li D.Ye., Li W., Kou Yu.F. Progressive collapse resistance of single-layer latticed domes under different failure conditions at the same joint // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 36. Article no. 102132. <https://doi.org/110.1016/j.jobbe.2020.102132> EDN: KLLNZA
7. Cheng X., Zhonghao Wu Z., Zhen C., Li W., Ma Ch. A novel stability analysis method of single-layer ribbed reticulated shells with roof plates // Thin-Walled Structures. 2024. Vol. 200. Article no. 111902. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111902> EDN: MCAAPO
8. Голиков А.В., Гаранжа И.М., Ильченко А.С., Писарева М.М., Федорова А.Р. Расчетно-аналитическое обоснование влияния прогонов на работу сжатых поясов стальных ферм покрытий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2025. № 2. С. 31–46. <https://doi.org/110.37153/2618-9283-2025-2-31-46> EDN: VHEHIO
9. Cai Yu., Zheng Ya., Tang J., Luo Ya., Yang Ch. Progressive collapse analysis of single-layer latticed domes under seismic loading using enhanced fiber-based approach // International Journal of Structural Stability and Dynamics. 2024. Vol. 25. Article no. 5. <https://doi.org/110.1142/S0219455425500385> EDN: XJHINH
10. Zhu M., Hu X., Wang J., Jiamin Guo J. A machine learning-based force-finding method for suspend dome structures and case study // Journal of Constructional Steel Research. 2025. Vol. 226. Article no. 109253. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.109253> EDN: IGVFII
11. Ferraioli M., Lavino A., Mandara A. Progressive collapse assessment and retrofit of a multistory steel braced office building // International Journal of Steel Structures. 2022. Vol. 22. P. 1086–1107. <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00626-x> EDN: PLSTGQ
12. Ye J., Xu L., Yang Y. et al. Comparison of progressive collapse resistance of single-layer latticed domes under different loadings // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 129. P. 204–214. <https://doi.org/110.1016/j.jcsr.2016.11.012>
13. Xiao Z., Li R., Li H., Yan G., Fan R., Jiang S. Effect of joint behaviors on the load-carrying capacity of single-layer reticulated dome // Structures. 2024. Vol. 68. Article no. 107124. <https://doi.org/110.1016/j.istruc.2024.107124> EDN: ZWNHQO
14. Егоров В.В., Егоров В.В., Абу-Хасан М.С., Куправа Л.Р. Определение геометрических размеров купола // Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии : материалы VIII Международной научно-практической интернет-конференции, Санкт-Петербург, 23 июня 2021 года. Москва : Спутник+, 2021. С. 107–111. EDN: LRBRXA
15. Трянина Н.Ю., Глынина Ю.С. Влияние системы затяжек с предварительным натяжением на напряженно-деформированное состояние ребристо-кольцевого купола // Приволжский научный журнал. 2024. № 1(69). С. 118–124. EDN: FUUDPK
16. Abdollahi A., Poursha M., Abedi K. Seismic response modification factors of single-layer diamatic dome structures // Engineering Structures. 2024. Vol. 310. Article no. 118091. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118091> EDN: KDXQGC
17. Chen L.-M., Huang K.-Y., Liu Y.-J. et al. Analysis and evaluation of the progressive collapse of cable dome structures induced by joint damage // Buildings. 2023. Vol. 13. No. 8. Article no. 2072. <https://doi.org/110.3390/buildings13082072> EDN: BCAYRN
18. Ashoub M.M.N.M., Attia W.A.L. Effect of Alternative Load Path Design Method on Preventing Progressive Collapse and Reducing the Rehabilitation Cost Using FEMA-P58 // Journal of Engineering and Applied Science. 2023. Vol. 70. Article no. 84. <http://doi.org/10.1186/s44147-023-00248-y> EDN: GTBWPZ

References

1. Kolakkattil R, Tsavdaridis KD, Sanjeevi AJ. A state-of-the-art review of progressive collapse research and guidelines for single-layer lattice shell structures. *Structures*. 2023;56:104945. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104945>
2. Xu Z, Yan S. Progressive-collapse mechanism of suspended-dome structures subjected to sudden cable rupture. *Buildings*. 2023;13(6):1533. <https://doi.org/10.3390/buildings13061533> EDN: YPZCJM
3. Zelenetskiy SA, Sebeshev VG. Regulation of the stress-strain state of statically indeterminate trusses by changing the initial lengths of the elements. *Proceedings of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*. 2024;27(3):9–23. (In Russ.) <https://doi.org/110.32683/1815-5987-2024-27-93-3-9-23> EDN: KQHHE
4. Tour VI, Tour AV. Influence on the stress state of a metal reticulated dome. Failure of one of the dome nodes. *University science in modern conditions: Collection of materials of the 58th scientific and technical conference*. In 2 parts, Ulyanovsk, January 22–31, 2024. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2024. p. 3–5. (In Russ.) EDN: TNMJSJ

5. Golikov AV, Garanzha IM, Tanasoglo AV. *Methodology of structural shaping of steel lattice towers. Current issues of the construction industry and education — 2024: Collection of reports of the V National scientific conference*, Moscow, December 16, 2024. Moscow: MGSU; 2025. p. 30–39. (In Russ.) EDN: EEDOCU
6. Tian LiM, Li DY, Li W, Kou YuF. Progressive collapse resistance of single-layer latticed domes under different failure conditions at the same joint. *Journal of Building Engineering*. 2021;36:102132. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102132> EDN: KLLNZA
7. Cheng X, Wu Z, Zhen C, Li W, Ma Ch. A novel stability analysis method of single-layer ribbed reticulated shells with roof plates. *Thin-Walled Structures*. 2024;200:111902. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111902> EDN: MCAAPO
8. Golikov AV, Garanzha IM, Ilchenko AS, Pisareva MM, Fedorova AR. Analytical justification of influence of purses on the work of steel roof trusses compressed chain belt. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2025;(2):31–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2025-2-31-46> EDN: VHEHIO
9. Cai Yu, Zheng Ya, Tang J, Luo Ya, Yang Ch. Progressive Collapse Analysis of Single-Layer Latticed Domes Under Seismic Loading Using Enhanced Fiber-Based Approach. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2024;25(5). <https://doi.org/10.1142/S0219455425500385> EDN: XJHINH
10. Zhu M, Hu X, Wang J, Guo J. A machine learning-based force-finding method for suspend dome structures and case study. *Journal of Constructional Steel Research*. 2025;226:109253, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.109253> EDN: IGVFII
11. Ferraioli M, Lavino A, Mandara A. Progressive collapse assessment and retrofit of a multistory steel braced office building. *International Journal of Steel Structures*. 2022;22:1086–1107. <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00626-x> EDN: PLSTGQ
12. Ye J, Xu L, Yang Y. et al. Comparison of progressive collapse resistance of single-layer latticed domes under different loadings. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017;(129):204–214. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.11.012>
13. Xiao Z, Li R, Li H, Yan G, Fan R, Jiang S. Effect of joint behaviors on the load-carrying capacity of single-layer reticulated dome. *Structures*. 2024;68:107124. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107124> EDN: ZWNHQQ
14. Egorov VV, Abu-Khasan MS, Kuprava MS. Determination of the geometric dimensions of the dome. Innovative technologies in construction and geoecology. *Proceedings of the VIII International scientific and practical internet conference*, St. Petersburg, June 23, 2021. Moscow: Sputnik+ Publ.; 2021. p. 107–111. (In Russ.) EDN: LRBRXA
15. Tryanina NYu, Glynina YuS. The effect of a prestressed tightening system on the stress-strain state of a ribbed dome. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2024;(1):118–124. (In Russ.) EDN: FUUDPK
16. Abdollahi A, Poursha M, Abedi K. Seismic response modification factors of single-layer diametric dome structures. *Engineering Structures*. 2024;310:118091. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118091> EDN: KDXQGC
17. Chen L-M, Huang K-Y, Liu Y-J. et al. Analysis and evaluation of the progressive collapse of cable dome structures induced by joint damage. *Buildings*. 2023;13(8):2072. <http://doi.org/10.3390/buildings13082072> EDN: BCAYRN
18. Ashoub MMNM, Attia WAL. Effect of alternative load path design method on preventing progressive collapse and reducing the rehabilitation cost using FEMA-P58. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2023;70:84. <http://doi.org/10.1186/s44147-023-00248-y> EDN: GTBWPZ