



ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ  
МЕТАЛІВІ КОНСТРУКЦІЇ  
METAL CONSTRUCTIONS

2023, ТОМ 29, НОМЕР 1, 47–61

EDN: RWWBHA

УДК 624.074.2:624.014 (08)

(23)-0388-1

## НАДЕЖНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ УСЕЧЕННЫХ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ КУПОЛОВ

**В. Ф. Мущанов<sup>1</sup>, А. Н. Оржеховский<sup>2</sup>, М. П. Кащенко<sup>3</sup>, А. В. Зубенко<sup>4</sup>**

*ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, Российской Федерации, 286123.*

*E-mail: <sup>1</sup>mvf@donnasa.ru, <sup>2</sup>a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru, <sup>3</sup>m.p.kashchenko@donnasa.ru,  
<sup>4</sup>a.v.zubenko@donnasa.ru*

*Получена 16 мая 2023; принята 23 мая 2023.*

**Аннотация.** В статье рассматривается критический анализ методов обеспечения надежности и живучести пространственных стержневых металлических конструкций в сочетании с требованиями к предотвращению лавинообразного обрушения. Проведен обзор аварий конструктивной формы в виде купольных конструкций и проанализированы некоторые научные работы по обеспечению их надежности. Рассмотрены основные положения российских и зарубежных норм, в которых указана недостаточная проработка вопроса расчета на прогрессирующее обрушение для данной конструктивной формы. Предложен подход по реализации комплексной оценки надёжности и живучести с использованием авторского программного комплекса, апробированного и положительно зарекомендовавшего себя в ряде научных исследований, проведенных для других конструктивных форм в виде пространственных стержневых металлических конструкций. На основании выполненного критического анализа для исследуемой конструктивной формы выделены значимые варьируемые параметры проектирования, и разработан план проведения численного эксперимента по уточнению их влияния на особенности напряженно-деформированного состояния, оценки склонности исследуемой конструктивной схемы к возможному лавинообразному разрушению и значение интегрального показателя надежности проектного решения.

**Ключевые слова:** большепролетные купола, надежность, живучесть, лавинообразное обрушение, ключевые элементы, вероятность отказа.

## НАДІЙНІСТЬ ПРОСТОРОВИХ СТРИЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ УСІЧЕНИХ ВЕЛИКОПРОГОНОВИХ КУПОЛІВ

**В. П. Мущанов<sup>1</sup>, А. М. Оржеховський<sup>2</sup>, М. П. Кащенко<sup>3</sup>, Г. В. Зубенко<sup>4</sup>**

*ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,  
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, Російська Федерація, 286123.*

*E-mail: <sup>1</sup>mvf@donnasa.ru, <sup>2</sup>a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru, <sup>3</sup>m.p.kashchenko@donnasa.ru,  
<sup>4</sup>a.v.zubenko@donnasa.ru*

*Отримана 16 травня 2023; прийнята 23 травня 2023.*

**Анотація.** У статті розглядається критичний аналіз методів забезпечення надійності і живучості просторових стрижневих металевих конструкцій в поєднанні з вимогами до запобігання лавиноподібного обвалення. Проведено огляд аварій конструктивної форми у вигляді купольних конструкцій, та проаналізовано деякі наукові роботи щодо забезпечення їх надійності. Розглянуто основні положення російських і зарубіжних норм, в яких вказано на недостатнє опрацювання питання розрахунку на прогресуюче обва-



лення для даної конструктивної форми. Запропоновано підхід по реалізації комплексної оцінки надійності і живучості з використанням авторського програмного комплексу, який апробований і позитивно зарекомендував себе в ряді наукових досліджень, проведених для інших конструктивних форм у вигляді просторових стрижневих металевих конструкцій. На підставі виконаного критичного аналізу для досліджуваної конструктивної форми виділені значущі варійовані параметри проектування, і розроблений план проведення чисельного експерименту з уточнення їх впливу на особливості напружено-деформованого стану, оцінки схильності досліджуваної конструктивної схеми до можливого лавиноподібного руйнування і значення інтегрального показника надійності проектного рішення.

**Ключові слова:** великопрогонові куполи, надійність, живучість, лавиноподібне обвалення, ключові елементи, ймовірність відмови.

## RELIABILITY OF SPATIAL CORE STRUCTURES OF TRUNCATED LARGE-SPAN DOMES

Vladimir Mushchanov<sup>1</sup>, Anatoly Orzhehovsky<sup>2</sup>, Margarita Kashchenko<sup>3</sup>, Anna Zubenko<sup>4</sup>

FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture»,

2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, Russian Federation, 286123.

E-mail: <sup>1</sup>mk@donnasa.ru, <sup>2</sup>n.s.mirnova@donnasa.ru, <sup>3</sup>e.v.shelikhova@donnasa.ru

Received 16 May 2023; accepted 23 May 2023.

**Abstract.** The article considers a critical analysis of methods for ensuring the reliability and survivability of spatial rod metal structures in combination with the requirements for preventing avalanche collapse. The review of accidents of constructive form in the form of dome structures is carried out, and some scientific works on ensuring their reliability are analyzed. The main provisions of Russian and foreign norms are considered, which indicate insufficient elaboration of the issue of calculation for progressive collapse for this constructive form. An approach is proposed to implement a comprehensive assessment of reliability and survivability using the author's software package, which has been tested and has proven itself positively in a number of scientific studies conducted for other structural forms in the form of spatial rod metal structures. Based on the performed critical analysis, significant variable design parameters were identified for the studied structural form. A plan was developed for conducting a numerical experiment to clarify their influence on the features of the stress-strain state, assessing the propensity of the studied structural scheme to possible avalanche-like destruction and the value of the integral indicator of the reliability of the design solution.facilities.

**Keywords:** large-span domes, reliability, survivability, avalanche-like collapse, key elements, probability of failure.

### Введение

Современные строительные конструкции должны в полной мере отвечать требованиям надежности и живучести. Анализ существующей отечественной нормативной базы в этом направлении позволяет сделать вывод о недостаточной разработанности четких рекомендаций по составу и алгоритмам расчетов, направленных на предотвращение наступления прогрессирующего обрушения. Некоторые сведения о требованиях или рекомендациях, содержащихся в отечественных нормативных документах, приведены ниже в таблице 1 [6].

В практике исследования прогрессирующего обрушения используются зарубежные нормы. В Еврокоде 1: «Воздействия на конструкции» (BS EN 1991-1-7. Actions on structures. General actions. Accidental actions) приведены классификация методов расчета против прогрессирующего обрушения, стратегии, основанные на учете установленных чрезвычайных нагрузок, а также на ограничении размера локализованного разрушения. В положениях Еврокода 0: «Основы проектирования сооружений» (BS EN 1990. Basis of structural design) указано, что основные несущие конструкции должны быть запроектированы и

Таблица 1. Анализ отечественной нормативной базы

№ п/п	Наименование документа	Основные требования (рекомендации)
1.	ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения	П. 5.2.6: указывается на необходимость выполнения расчета на прогрессирующее обрушение для зданий класса КС-3 и КС-2 при условии большого скопления людей, перечень которых указан в приложении Б.
2	МДС 20-2.2008. Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного обрушения	Материалы носят рекомендательный характер. Оценку проектных решений рассматриваемых в документах объектов предлагается выполнять с помощью кинематического метода теории предельного равновесия. Общими для документов также являются следующие моменты: – анализ отказов элементов выполняется лишь на соответствие требованиям первой группы предельных состояний;
3.	СТО-36554501-024-2010. Обеспечение безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях.	Предусмотрены рекомендации общего вида в части: – учета лавинообразного обрушения конструкций, обусловленного ошибками проектирования, изготовления, монтажа или ошибками эксплуатации (путем корректировки коэффициента условий работы $\gamma$ для «ключевых» узлов и элементов конструкции); – проектирования «ключевых» элементов, способных воспринимать аварийные воздействия в дополнение к стандартным проектным нагрузкам и воздействиям); – основных требований по организации надлежащей эксплуатации большепролетных сооружений
4.	СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения»	Распространяется на проектирование зданий и сооружений нормального и повышенного уровня ответственности классов КС-2 и КС-3 различных конструктивных систем.

построены таким образом, чтобы они не были критично повреждены при наступлении таких событий, как: взрыв, удар, последовательность человеческих ошибок и т.д.

В связи с вышеизложенным **целью данного исследования** является выполнение критического анализа состояния вопроса обеспечения надежности и устойчивости к развитию лавинообразного обрушения конструкций большепролетных куполов (в том числе усеченных) и разработка на основе результатов анализа методики и плана проведения численного эксперимента по определению функциональных зависимостей между значениями показателей надежности и живучести и геометрическими параметрами анализируемых конструктивных форм.

Примечание: данное исследование выполняется в рамках НИР «Научное обоснование

новых подходов к проектированию оптимальных пространственных строительных металлоконструкций высокого уровня ответственности» на основе Соглашения № 22-29-00139 между Российской научным фондом и ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

## Основная часть

### 1. Анализ научных исследований в направлении обеспечения надежности и аварий купольных конструкций

В направлении обеспечения надежности строительных конструкций одним из первых выступил Н. С. Стрелецкий [1]. В своих работах он впервые ввел понятие статистического учета надежности сооружений по средствам ввода в рас-

чет коэффициента запаса надежности. Большой вклад в развитие вероятностных методов расчета сделали такие известные ученые, как: В. А. Балдин, А. А. Гвоздев, А. Р. Ржаницын, В. Б. Болотин и др. [2–5].

Утрата отдельными несущими элементами каркаса своих прочностных свойств может привлечь за собой последовательное включение в зону обрушения все большего числа несущих конструкций – возникнет эффект «домино». Многие современные ученые (В. Ю. Грачев, В. О. Алмазов, А. В. Перельмутер и др.) занимались изучением российской и зарубежной законодательной базы.

В нормативной документации обычно используется термин «защита от прогрессирующего обрушения». При этом методики к обеспечению надежности зданий и сооружений раскрыты недостаточно подробно. Большая часть современных зарубежных нормативов ориентирована не на предотвращение существенных разрушений, а на обеспечение безопасности людей и возможности их свое-временной эвакуации. Вследствие недостаточности проработанности норм происходят аварии, причинами которых могут быть как системные ошибки при проектировании, строительстве или эксплуатации здания, так и аварийные воздействия природного или техногенного характера. В связи с отсутствием конкретных требований по оценке надежности с позиций предотвращения лавинообразного обрушения для купольных конструкций по-прежнему актуальными остаются следующие направления исследований:

- разработка методик или рекомендуемых алгоритмов расчета конструкций на прогрессирующее обрушение, конкретных рекомендаций по выбору зоны аварий;
- выбор набора и количества элементов, разрушение которых предшествует началу процесса прогрессирующего (лавинообразного) разрушения, и представление динамики разрушения здания (сооружения) с моделированием развития процессов обрушения и соответствующего изменения нагрузок и воздействий во времени;
- исследования по прогрессирующему разрушению для конструкций со стальным каркасом (к настоящему времени превалируют исследования для конструкций, выполненных в железобетоне);

– отсутствие (по крайней мере, в нормативной литературе) указаний по проведению расчетов напряженно-деформированного состояния анализируемой конструктивной схемы с учетом геометрической, физической и конструктивной нелинейности [6].

Учитывая приведенные ниже работы, рассмотрим некоторые наиболее актуальные по тематике надежности и живучести применительно к пространственным стрелевым металлическим конструкциям.

В работе А. Н. Пащенко [17] предложен и детально рассмотрен алгоритм вычисления характеристик безопасности элементов конструкций промышленных зданий, базирующийся на методе конечных элементов в вариационной постановке. Но совершенно не рассматриваются вопросы живучести и ее оценки. Не учитываются особенности вычисления надежности при ранжировании конструкций по классам и категориям ответственности.

В работе А. В. Долганова [18] рассмотрена методика оценки надежности строительных железобетонных конструкций, но полностью опущен момент обеспечения живучести рассматриваемых конструкций. Детально рассмотрены численные способы вычисления надежности, но связь с инженерной методикой прослеживается слабо.

В работе В. А. Савельева [19] методом статических испытаний получены оценки надежности и долговечности куполов, запроектированных по действующим строительным нормам и правилам. Авария большепролетного купола в г. Истра показала необходимость разработки методов оценки надежности и долговечности куполов.

В работе П. Г Еремеева [20] отражены вопросы изготовления и монтажа, научно-технического сопровождения строительства, мониторинга сооружений, обеспечения их безопасности от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения.

В работах Х. Чжи, У. Ли, Ф. Фан, С. Шен рассматривалось влияние начального геометрического несовершенства на статическую устойчивость и надежность однослойной сетчатой конструкции куполов [11–15].

Вместе с тем, приведенные ниже примеры аварий купольных большепролетных сооружений

ружений говорят об актуальности и важности выбранной темы исследования:

1. Катастрофа «Трансвааль Парка». Падению купола московского «Трансвааль Парка» предшествовало разрушение одной из колонн, поддерживающих бетонную опорную конструкцию. Эксперты полагают, что опора могла переломиться из-за деформации лежащего под ней фундамента или воздействия точечного заряда: за секунду до катастрофы видеокамера наружного наблюдения зарегистрировала появление облака пыли у основания колонны (рис.1) [16].
2. Обрушение конструкций купола строящегося Центра гимнастики в г. Казани (Республика Татарстан). Пространственные металлические конструкции купола рухнули вниз после того, как несущие железобетонные колонны потеряли устойчивость. По предварительной версии, имело место нарушение техники безопасности (рис.2) [16].
3. Обрушение крыши павильона «Юбилейного» рынка в г. Светлогорск (Гомельская область, Беларусь). Металлический каркас с натянутой на него поливинилхлоридной мембраной не выдержал веса скопившегося снега. Общая площадь обрушившейся конструкции 300 кв. метров [16].
4. Обрушение металлоконструкций купольного перекрытия главного корпуса Всесоюзного электротехнического института (ВЭИ) им. В. И. Ленина в г. Истра Московской области. Автор проекта В. А. Савельев предложил конструкцию в виде сетчатой оболочки вращения в форме капли. Купол диаметром 234 м и высотой 112 м (рис. 3), предназначенный для испытаний высоковольтного оборудования, был смонтирован в виде сплюснутого эллипсоида вращения. Экватор расположен на отметке 23 м от пола. Стержни каркаса, образующие пространственную треугольную сеть, запроектированы двухветвевыми с высотой сечения 2.5 м. Расчетная проектная нагрузка на опору составляла 300 т. Комиссией по исследованию аварии было отмечено, что авария произошла в результате действия ряда причин (в том числе нарушение технологии монтажа, низкого качества строительно-монтажных работ, сниженной прочности стали, высокой снеговой нагрузки) [21].

По результатам критического анализа, практики эксплуатации, существующей нормативной базы и проведенных научных исследований в данном направлении можно сделать следующие заключения, по результатам которых наметить план дальнейших исследований:

- анализ надежности и живучести в сочетании с требованиями к предотвращению лавинообразного обрушения является важной и необходимой, в соответствии с требованиями современных нормативных документов, составляющей инженерного расчета конструкций сооружений высокого уровня ответственности в виде большепролетных куполов;
- методики расчета и проектирования, ориентированные на использование в инженерной практике в части обеспечения живучести и надежности таких конструкций, на данный момент не разработаны и нуждаются в научном обосновании, разработке и аprobации;
- отсутствуют рекомендации по установлению «ключевых» элементов конструкций большепролетных куполов, разрушение которых может инициировать начало лавинообразного обрушения.

Исследуемые конструкции в зависимости от конструктивного решения по большей части относятся к классу пространственных стержневых многократно статически неопределеных систем. При этом, если в статически определимой системе отказ одного элемента, как правило, переводит ее в изменяющую систему, то в многократно статически неопределеных системах сложно выделить один, наиболее ответственный элемент конструкции в силу параллельного включения в работу целого ряда элементов и перераспределения после его отказа воспринимаемых им усилий на другие элементы системы. Эта особенность резко усложняет задачу определения численного значения показателя надежности многократно статически неопределенной системы и связанную с ним оценку живучести, особенно если речь идет о надежности конструкции в период экстремальной ситуаций.

## 2. Обоснование методики проводимого исследования

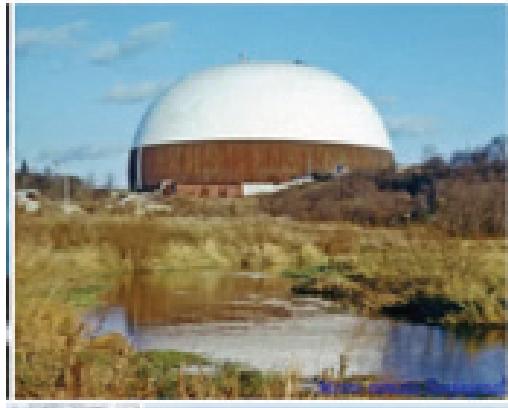
При создании новых систем, для которых сведения о надежности аналогов отсутствуют, а также для систем, функционирование которых



**Рисунок 1.** Падение купола «Трансвааль Парка» (г. Москва).



**Рисунок 2.** Обрушение купола строящегося Центра гимнастики (г. Казань)



**Рисунок 3.** Обрушение купольного перекрытия в г. Истра Московской области.

может быть связано с реализацией весьма интенсивных редких воздействий аварийного характера, перед инженером-проектировщиком стоит задача, в общем-то, не имеющая вероятностного описания – как создать систему, которая могла бы функционировать (возможно, с резко ухудшившимся качеством) в условиях возможного отказа какой-то её части. Эта задача может быть решена с помощью увеличения надёжности наиболее ответственных несущих конструкций, безотказность которых обеспечивает здание или сооружение от полного разрушения при аварийных воздействиях, даже если его дальнейшее использование по назначению окажется при этом невозможным без капитального ремонта. В связи с этими трудностями предлагается проводить комплексную оценку надёжности и живучести посредством оценки разброса величины характеристики безопасности ( дальности отказа) в верхней и нижней границ надёжности системы.

С этой целью производится итерационный геометрически и конструктивно нелинейный расчёт конструкции, по результатам которого устанавливается группа поочерёдно вышедших из работы элементов конструкции, определяющих надёжность конструкции в целом. Универсального программного продукта для решения поставленной задачи на данный момент авторами не найдено. Поэтому предлагается использовать авторский программный комплекс, апробированный и положительно зарекомендовавший себя в ряде научных исследований [7, 8], написанных на высоком уровне интерпретируемом языке программирования MATLAB.

Весь разработанный программный комплекс реализуется в виде двух этапов расчета:

1. Определение наиболее ответственных элементов в конструкции, которые будут определять её надёжность в целом.
2. Формирование выборки случайных величин

напряжений для группы наиболее ответственных элементов системы и вычисление показателей надёжности на основе выполняемой обработки сформированных выборок напряжений и расчётных сопротивлений методами математической статистики.

Реализация 1-го этапа расчета выполняется в форме нелинейного анализа посредством применения метода конечных элементов в пространственной постановке с учетом геометрической и конструктивной нелинейности (рис. 4). Получаемая в результате расчета картина последовательности отказа элементов позволяет, с одной стороны, сделать вывод о склонности конструкции к прогрессирующему обрушению, с другой – установить совокупность ключевых элементов, разрушение которых инициирует процесс лавинообразного обрушения (рис. 4).

На втором этапе расчёта следует определение численного значения показателя надёжности анализируемой системы на основе установленной склонности системы к лавинообразному разрушению. С этой целью методами статистического моделирования определяется вероятность отказа одного, наиболее ответственного элемента, и вероятность отказа группы элементов, инициирующих начало лавинообразного разрушения, определённых по результатам 1-го этапа расчёта.

В качестве рассматриваемых случайных величин в расчете выступают случайный уровень напряжений в стержнях конструкции и предел текучести стали [9]. Напряжение в элементах конструкции является комплексной случайной величиной, которая может зависеть от таких стохастических факторов, как: атмосферные нагрузки, геометрические характеристики сечений, осадки основания, несовершенства формы конструкции, полученные на монтаже и при эксплуатации и т. д. При такой постановке задачи наиболее целесообразным методом определения вероятности отказа выступает метод Монте-Карло [10]. Тогда реализация 2-го этапа разрабатываемого алгоритма расчёта определения характеристик надёжности элемента или группы элементов может иметь вид, приведённый на рисунке 5.

Таким образом, применение данного подхода в инженерной практике проектирования многократно статически неопределеных стерж-

невых систем высокого уровня ответственности позволяет установить верхнюю и нижнюю границы показателя надёжности проектируемой системы, где под «нижней границей» будем понимать уровень надёжности одного ключевого элемента, выход которого из строя не допускается в соответствии с требованиями большинства действующих нормативных документов, хотя несущая способность системы в целом при этом не исчерпывается. Под «верхней границей» понимается уровень надёжности всей группы ключевых элементов, определённых по результатам 1-го этапа анализа, выход из строя которых инициирует процесс прогрессирующего обрушения. Особенностью такого определения является использование при вычислении показателя надёжности модели параллельного соединения элементов, а также учёт степени взаимозависимости рассматриваемой группы элементов в процессе вычисления.

#### ***Планирования численного эксперимента по анализу надёжности и оценке склонности исследуемых систем к лавинообразному разрушению***

В исследовании рассматриваются ребристые, ребристо-кольцевые и сетчатые конструкции куполов (рис. 6).

При помощи численных и экспериментальных исследований можно выяснить значимость основных факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние. В качестве основных варьируемых параметров предлагается: размер площади выреза к общей площади купола; отношение стрелы подъёма  $f$  к пролету  $l$ ; соотношение сторон в плане (рис. 7).

В таблице 2 приведены уровни рассматриваемых параметров. Соответственно будет проводиться трехуровневый численный эксперимент.

Матрица планирования численного эксперимента приведена на таблице 3.

Данная матрица применима к каждой конструктивной схеме куполов.

Таким образом, проведение исследований в соответствии с представленным планом проведения численного эксперимента позволит впервые установить для конструкций усечённых куполов следующие характеристики и зависимости:

- установить для анализируемых расчетных



Рисунок 4. Блок схема определения наиболее ответственных элементов конструкции.

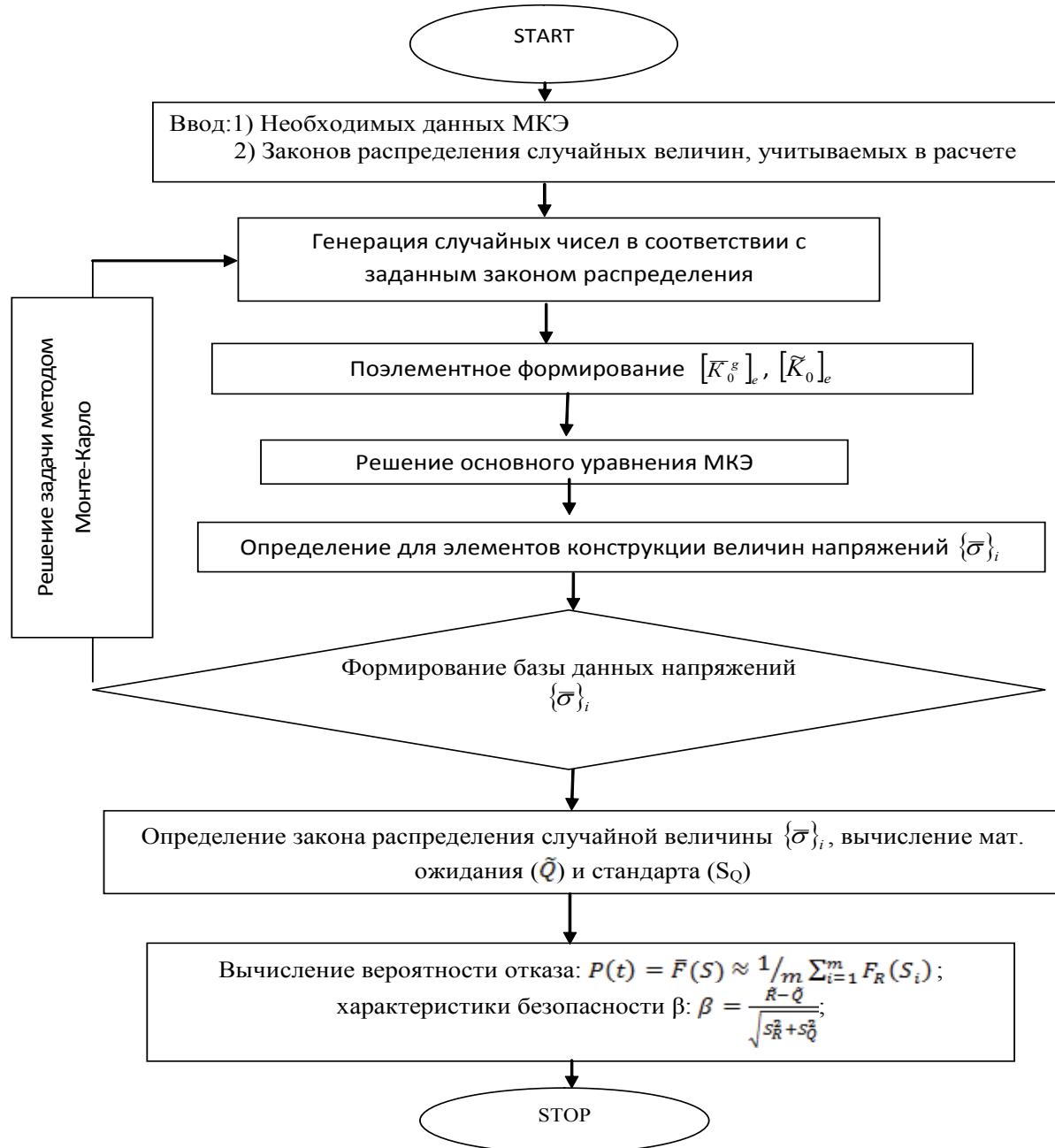


Рисунок 5. Блок-схема алгоритма определения критериев надежности стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов.

- ситуаций совокупность ключевых элементов, надежность которых обеспечивает предотвращение лавинообразного обрушения;
- установить зависимости между пространственно-жесткостными параметрами исследуемых конструктивных форм и значениями их показателей надежности в форме вероятности отказа и характеристик надежности;

– выполнить оценку склонности проектного решения на основе нового критерия оценки  $\Delta\beta$ .

### Заключение

1. Выполнен критический анализ, на основании которого установлена необходимость определения для пространственных стержневых

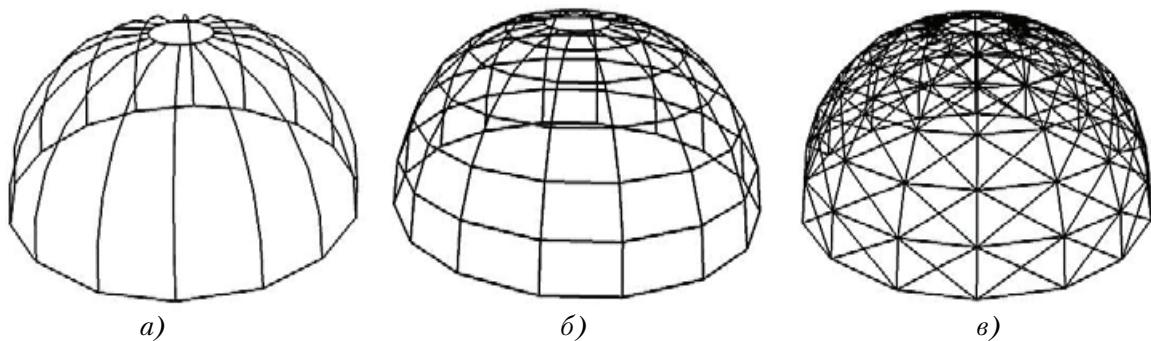


Рисунок 6. Конструктивные схемы куполов: а) ребристые; б) ребристо-кольцевые; в) сетчатые.

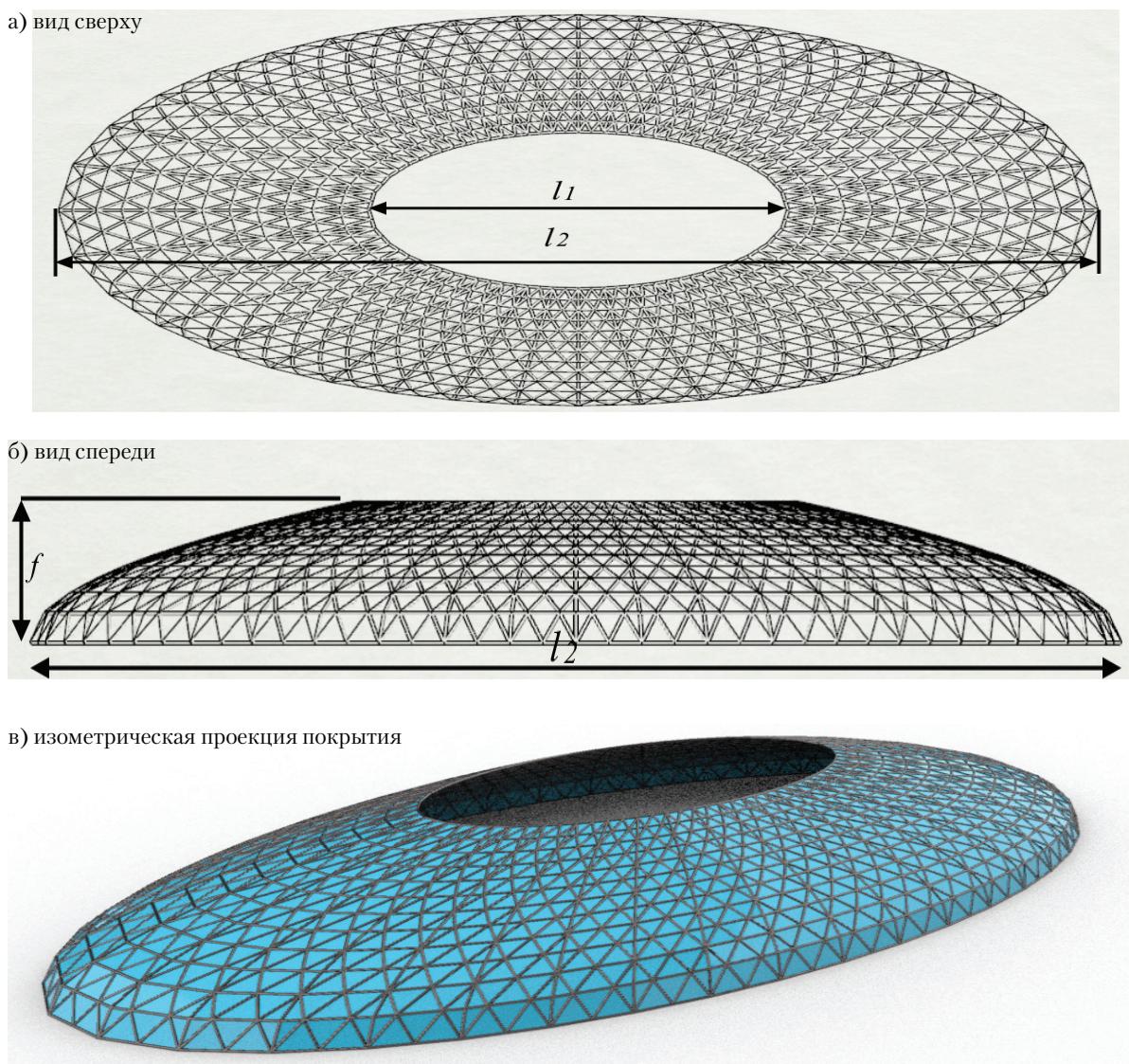


Рисунок 7. Конструктивная схема исследуемого купола: а) – вид сверху; б) – вид спереди; в) – изометрическая проекция покрытия.  $l_1$  – размер внутреннего опорного контура;  $l_2$  – размер внешнего опорного контура;  $f$  – стрела подъема.

Таблица 2. Значения варьируемых параметров

Флаг	Размер площади выреза к общей площади купола, %	Отношение стрелы подъема $f$ к пролету $l$	Соотношение сторон в плане
1	25	1/10	1/1
2	50	1/15	1/1,25
3	70	1/20	1/1,5

Таблица 3. Матрица планирования численного эксперимента

№ эксперимента	Размер площади выреза к общей площади купола	Отношение стрелы подъема $f$ к пролету $l$	Соотношение сторон в плане
1	1	1	1
2	2	1	1
3	3	1	1
4	1	2	1
5	2	2	1
6	3	2	1
7	1	3	2
8	2	3	2
9	3	3	2
10	1	1	2
11	2	1	2
12	3	1	2
13	1	2	3
14	2	2	3
15	3	2	3
16	1	3	3
17	2	3	3
18	3	3	3
19	1	1	3
20	2	1	3
21	3	1	3
22	1	2	2
23	2	2	2
24	3	2	2
25	1	3	1
26	2	3	1
27	3	3	1

конструкций высокого уровня ответственности в форме усеченных большепролетных куполов:

- определения для рассматриваемых расчетных ситуаций наиболее ответственных (ключевых) элементов рассматриваемых конструкций, ответственных за развитие лавинообразного обрушения;
- установления численных значений вероятности отказа ключевых элементов для совер-

шествования их конструктивных решений с целью обеспечения требуемого уровня надежности конструкций высокого уровня ответственности;

- определения функции нормирования коэффициента условий работы  $\gamma_c$  для ключевых конструктивных элементов большепролетных усечённых куполов при использовании метода предельных состояний;

2. Предложена методика вычисления характеристик надёжности усечённых купольных конструкций, реализуемая в вероятностно-статистической форме, и позволяющая на основе установленных значений показателей надёжности выполнить анализ склонности проектных решений исследуемых конструкций к лавино-образному разрушению.

3. Разработан план проведения численного эксперимента по уточнению влияния значимых параметров на особенности напряженно-деформированного состояния и оценки склонности исследуемой конструктивной схемы к возможному лавинообразному разрушению.

## Литература

- Стрелецкий, Н. С. Избранные труды / под редакцией Е. И. Беленя : составители: Е. И. Беленя, Н. Н. Стрелецкий, Н. П. Мельников [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1975. – 422 с. – Текст : непосредственный
- Гвоздев, А. А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия / А. А. Гвоздев. – Москва : Государственное издание строительной литературы, 1949. – 280 с. – Текст : непосредственный.
- Металлические конструкции. Общий курс : учебник для вузов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Веденников [и др.] ; под общей редакцией Е. И. Беленя. – Москва : Стройиздат, 1986. – 560 – с. – Текст : непосредственный.
- Ржаницын, А. Р. Теория расчёта строительных конструкций на надёжность / А. Р. Ржаницын. – Москва : Стройиздат, 1978. – 239 с. – Текст : непосредственный.
- Болотин, В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. – Москва : Стройиздат, 1982. – 351 с. – Текст : непосредственный.
- Мущанов, В. Ф. К анализу основных положений нормативных документов по предотвращению лавинообразного обрушения конструкций зданий (часть 1) / В. Ф. Мущанов. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2022. – Том 28, № 2. – С. 63–78. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49574278> (дата обращения: 11.03.2023). – EDN: ZGEIZU.
- Refined methods for calculating and designing engineering structures / V. P. Mushchanov, A. N. Orzhekhovskii, A. V. Zubenko [et al.]. – Текст : непосредственный // Magazine of Civil Engineering – 2018. – No. 2. – P. 101-115. – DOI: 10.18720/MCE.78.8.
- Роменский, Д. И. Подбор сечения элементов стальных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов с учетом требований надежности / Д. И. Роменский, А. Н. Оржеховский. – Текст : непосредственный // Научно-теоретический журнал Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 8. – С. 35–46.
- Мущанов, В. Ф. Экспериментальное исследование прочностных и геометрических характеристик
- Streletsky, N. S. Selected works / edited by E. I. Belenya : compilers: E. I. Belenya, N. N. Streletsky, N. P. Melnikov [et al.]. – Moscow : Stroyizdat, 1975. – 422 p. – Text : direct. (in Russian)
- Gvozdev, A. A. Calculation of the bearing capacity of structures by the method of limit equilibrium. – Moscow : State edition of construction literature, 1949. – 280 p. – Text : direct. (in Russian)
- Metal structures. General course : a textbook for universities / E. I. Belenya, V. A. Baldin, G. S. Vedenikov [et al.] ; under the general editorship of E. I. Belen. – Moscow : Stroyizdat, 1986. – 560 p. – Text : direct. (in Russian)
- Rzhanitsyn, A. R. Theory of calculation of building structures for reliability. – Moscow : Stroyizdat, 1978. – 239 p. – Text : direct. (in Russian)
- Bolotin, V. V. Methods of probability theory and reliability theory in the calculations of structures. – Moscow : Stroyizdat, 1982. – 351 p. – Text : direct. (in Russian)
- Mushchanov, V. F. To the analysis of the main provisions of regulatory documents for the prevention of progressive collapse of building structures (part 1). – Text : electronic. – In: Metal structures. – 2022. – Volume 28, No. 2. – P. 63–78. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49574278> (date of access: 11.03.2023). – EDN: ZGEIZU. (in Russian)
- Mushchanov, V. P.; Orzhekhovskii, A. N.; Zubenko A. V. [et al.] Refined methods for calculating and designing engineering structures. – Text : direct. – In: Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 2. – P. 101-115. – DOI: 10.18720/MCE.78.8. (in English)
- Romensky, D. I.; Orzhehovsky A. N. Selection of the section of elements of steel frame-cantilever coverings over the stands of stadiums taking into account the reliability requirements. – Text : direct // Scientific and theoretical journal Vestnik BSTU named after V. G. Shukhov. – 2017. – No. 8. – P. 35–46. (in Russian)
- Mushchanov, V. F.; Orzhehovsky A. N. Experimental study of the strength and geometric characteristics of the bent-welded pipes of rectangular cross-section of the Ukrainian producers. – Text : direct. – In: Proceeding of the Donbas National Academy of Civil

## References

- тик гнуто-сварных труб прямоугольного сечения українських производителей / В. Ф. Мущанов, А. Н. Оржеховський. – Текст : непосредственный / Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – Випуск 2013-3(101) Будівлі та конструкції із застосуванням нових матеріалів та технологій. – С. 9–12.
10. Мущанов, В. Ф. Численное определение возможности отказа от изгибающего стального стержня / В. Ф. Мущанов, И. М. Гаранжа, А. Н. Оржеховский. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2017. – Том 23, № 1. – С. 15–23. – URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2017-1/02\\_mushchanov\\_garanzha\\_orzhekovskiy.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2017-1/02_mushchanov_garanzha_orzhekovskiy.pdf) (дата публикации: 30.05.2017).
11. Influence of initial geometric imperfection on static stability of single-layer reticulated shell structure / X. Zhi, W. Li, F. Fan [et al.]. – Текст : непосредственный // Spatial Structures. – 2021. – Volume 27. – P. 7. – DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2021.01.009. (in English)
12. Li, H. Research on Effect of Random Initial Imperfections on Bearing Capacity of Single-Layer Spherical Reticulated Shell / H. Li, C. Wang, J. Han. – Текст : непосредственный // Industrial Construction. – 2018. – Volume 48. – P. 23–27.
13. Liu, H. Structural stability analysis of single-layer reticulated shells with stochastic imperfections / H. Liu, W. Zhang, H. Yuan. – Текст : непосредственный // Engineering Structures. – 2016. – Volume 124. – P. 473–479. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.06.046. (in English)
14. A non probabilistic time-variant method for structural reliability analysis / T. Xin, J. Zhao, C. Cui [et al.]. – Текст : непосредственный // In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part O: Journal of Risk and Reliability*. – 2020. – Volume 234 (5). – P. 664–675. – DOI: 10.1177/1748006X20928196. (in English)
15. Yang, M. New efficient and robust method for structural reliability analysis and its application in reliability-based design optimization / M. Yang, D. Zhang, X. Han. – Текст : непосредственный // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2020. – Volume 366. – P. 113018. – DOI: 10.1016/j.cma.2020.113018. (in English)
16. Самохвалов, И. А. Сравнительный анализ работы сетчатых куполов среднего диаметра в зависимости от их формы / И. А. Самохвалов, Н. Ю. Трянина. – Текст : непосредственный // Современные тенденции развития науки и технологий : сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции, Белгород, 30 сентября 2015 г.: в 10 частях. – Часть VI. – Белгород: ИП Ткачева Е. П., 2015. – С. 101–104.
17. Пащенко А. Н. Вероятностный расчет сжатых элементов строительных конструкций : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, *Engineering and Architecture*. – 2013. – Issue 2013-3(101) Buildings and structures using new materials and technologies. – P. 9–12. (in Russian)
10. Mushchanov, V. F.; Garanzha, I. M.; Orzhekhevskiy, A. N. Numerical determination of the possibility of rejection of a bent steel rod. – Text : electronic. – In: *Metal structures*. – 2017. – Volume 23, No. 1. – P. 15–23. – URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/mk/2017-1/02\\_mushchanov\\_garanzha\\_orzhekovskiy.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2017-1/02_mushchanov_garanzha_orzhekovskiy.pdf) (publication date: 30.05.2017).
11. Zhi, X.; Li, W.; Fan, F. [et al.]. Influence of initial geometric imperfection on static stability of single-layer reticulated shell structure. – Text : direct. – In: *Spatial Structures*. – 2021. – Volume 27. – P. 7. – DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2021.01.009. (in English)
12. Li, H.; Wang, C.; Han, J. Research on Effect of Random Initial Imperfections on Bearing Capacity of Single-Layer Spherical Reticulated Shell. – Text : direct. – In: *Industrial Construction*. – 2018. – Volume 48. – P. 23–27. (in English)
13. Liu, H.; Zhang, W.; Yuan, H. Structural stability analysis of single-layer reticulated shells with stochastic imperfections. – Text : direct. – In: *Engineering Structures*. – 2016. – Volume 124. – P. 473–479. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.06.046. (in English)
14. Xin T.; Zhao, J.; Cui, C. [et al.]. A non probabilistic time-variant method for structural reliability analysis. – Text : direct. – In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part O: Journal of Risk and Reliability*. – 2020. – Volume 234 (5). – P. 664–675. – DOI: 10.1177/1748006X20928196. (in English)
15. Yang, M.; Zhang, D.; Han, X. New efficient and robust method for structural reliability analysis and its application in reliability-based design optimization. – Text : direct. – In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2020. – Volume 366. – P. 113018. – DOI: 10.1016/j.cma.2020.113018. (in English)
16. Samokhvalov, I. A.; Tryanina, N. Yu. Comparative analysis of the operation of mesh domes of medium diameter depending on their shape. – Text : direct. – In: *Modern trends in the development of science and technology* : a collection of scientific papers based on the materials of the III International Scientific and Practical Conference, Belgorod, September 30, 2015 : in 10 parts. – Part VI. – Belgorod : IP Tkacheva E. P., 2015. – P. 101–104. (in Russian)
17. Pashchenko, A. N. Probabilistic calculation of compressed elements of building structures : specialty 05.23.01 «Building structures, buildings and structures» : abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Pashchenko Andrey Nikolaevich ; Poltava National Technical University named after Yuriy Kondratyuk. – Poltava, 2004. – 22 p. – Text : direct. (in Russian)

- здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пашенко Андрей Николаевич ; Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка. – Полтава, 2004. – 22 с. – Текст : непосредственный.
18. Долганов, А. В. Оптимизация железобетонных сооружений и конструкций по критерию надежности : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Долганов Андрей Иванович ; Северный международный ун-т г. Магадана. – Москва, 2000. – 47 с. – Текст : непосредственный.
19. Савельев, В. А. Теоретические основы проектирования металлических куполов : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Савельев Виталий Алексеевич. – Москва, 1995. – 37 с. – Текст : непосредственный.
20. Еремеев, П. Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений = P. G. Yeremeyev. Modern large-span steel structures for one of a kind buildings : монография. – Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. – 336 с. – Текст : непосредственный.
21. Тур, В. И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности / В. И. Тур. – Москва : Изд-во АСВ, 2004. – 96 с. – Текст : непосредственный.
18. Dolganov, A. V. Optimization of reinforced concrete structures and structures according to the criterion of reliability : specialty 05.23.01 «Building structures, buildings and structures» : abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Dolganov Andrey Ivanovich ; Northern International University of Magadan. – Moscow, 2000. – 47 p. – Text : direct. (in Russian)
19. Savelyev, V. A. Theoretical foundations for the design of metal domes : specialty 05.23.01 «Building structures, buildings and structures»: abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Savelyev Vitaly Alekseevich. – Moscow, 1995. – 37 p. – Text : direct. (in Russian)
20. Yeremeyev, P. G. Modern large-span steel structures for one of a kind buildings : monograph. – Moscow : Publishing House of the Association of Construction Universities, 2009 – 336 p. – Text : direct. (in Russian)
21. Tur, V. I. Dome structures: shaping, calculation, design, efficiency improvement. – Moscow : ASV Publishing House, 2004. – 96 p. – Text : direct. (in Russian)

**Мущанов Владимир Филиппович** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики; проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Заслуженный строитель ДНР. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Оржеховский Анатолий Николаевич** – кандидат технических наук; доцент кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: надёжность и живучесть пространственных стержневых конструкций повышенной ответственности, оптимальное проектирование шарнирно-стержневых конструкций покрытий.

**Кащенко Маргарита Павловна** – старший преподаватель кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: прочность, надежность пространственных стержневых систем; купольные конструкции.

**Зубенко Анна Васильевна** – кандидат технических наук; доцент кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование воздействия ветровой нагрузки на сооружения, имеющие круговую цилиндрическую поверхность, численные методы расчета тонких оболочек положительной гауссовой кривизны.

**Мущанов Володимир Пилипович** – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри теоретичної і прикладної механіки; проректор з наукової роботи ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Заслужений будівельник ДНР. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

**Оржеховський Анатолій Миколайович** – кандидат технічних наук; доцент кафедри теоретичної і прикладної механіки ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: надійність і живучість просторових стрижневих конструкцій підвищеної відповідальності, оптимальне проектування шар-нірно-стрижневих конструкцій покриттів.

**Кащенко Маргарита Павлівна** – старший викладач кафедри теоретичної і прикладної механіки ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: міцність, надійність просторових стрижневих систем; купольні конструкції.

**Зубенко Ганна Василівна** – кандидат технічних наук; доцент кафедри теоретичної і прикладної механіки ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження впливу вітрового навантаження на споруди, що мають кругову циліндричну поверхню, чисельні методи розрахунку тонких оболонок позитивної гауссової кривизни.

**Mushchanov Vladimir** – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vicerector on the scientific activity, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Honored Builder of the DPR. Scientific interests: the reliability theory, analyses, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.

**Orzhehovsky Anatoly** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Theoretical and Applied Mechanics Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: reliability and survivability of spatial rod structures of increased responsibility, optimal design of hinge-rod structures of coatings.

**Kashchenko Margarita** – Senior Lecture, Theoretical and Applied Mechanics Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: strength, reliability of spatial rod systems; dome structures.

**Zubenko Anna** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Theoretical and Applied Mechanics Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: study of the effect of wind load on structures with a circular cylindrical surface, numerical methods for calculating thin shells of positive Gaussian curvature.