



(24)-0407-1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ И АНАЛИЗ СКЛОННОСТИ К ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ ОБРУШЕНИЮ КОНСТРУКЦИЙ УСЕЧЕННЫХ СЕТЧАТЫХ КУПОЛОВ

Владимир Филиппович Мущанов¹, Анатолий Николаевич Оржеховский²,
Маргарита Павловна Кащенко³, Анна Васильевна Зубенко⁴

^{1, 2, 3, 4} Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия

¹ mvf@donnasa.ru, ² a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru, ³ m.p.kashchenko@donnasa.ru, ⁴ a.v.zubenko@donnasa.ru

Аннотация. В статье проводится анализ современных тенденций в области обеспечения устойчивости несущих строительных конструкций к лавинообразному разрушению. Рассматриваются основные подходы и методы, применяемые для повышения надежности конструкций в условиях возможных чрезвычайных ситуаций. Отмечаются спорные моменты в существующей методике назначения элемента, удаление которого может привести к лавинообразному разрушению всей конструкции. Для решения этой проблемы предложена методика, позволяющая определить наиболее ответственный элемент или группу элементов, надежность которых будет определять надежность системы. Этот алгоритм реализован с использованием метода конечных элементов в геометрически и конструктивно нелинейной постановке, что позволяет учесть сложные взаимодействия внутри конструкции под воздействием различных нагрузок. Для более точного моделирования поведения конструкции приведены поправочные функции, которые корректируют локальную матрицу жесткости стержневого элемента, применяемую в геометрически нелинейных расчетах. Алгоритм реализован в программном языке MATLAB. В статье приводится пример использования предложенной методики на конструкции сетчатого усеченного купола с пролетом по большей оси 50 метра.

Ключевые слова: геометрическая и конструктивная нелинейность, метод конечных элементов, лавинообразное обрушение, сетчатые усеченные купола, надежность, живучесть, вероятность отказа

Для цитирования: Определение численных характеристик надежности и анализ склонности к прогрессирующему обрушению конструкций усеченных сетчатых куполов / В. Ф. Мущанов [и др.]. // *Металлические конструкции*. 2024. Том 30, № 2. С. 75–92. doi: 10.71536/mc.2024.v30n2.3. edn: amzihf.

Original article

DETERMINATION OF NUMERICAL CHARACTERISTICS OF RELIABILITY AND TENDENCY TO PROGRESSIVE COLLAPSE OF STRUCTURES OF MESH TRUNCATED DOMES OF INCREASED RESPONSIBILITY

Vladimir F. Mushchanov¹, Anatoly N. Orzhehovskiy², Margarita P. Kashchenko³,
Anna V. Zubenko⁴

^{1, 2, 3, 4} Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia

¹ mvf@donnasa.ru, ² a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru, ³ m.p.kashchenko@donnasa.ru, ⁴ a.v.zubenko@donnasa.ru



Abstract. The article analyzes current trends in the field of ensuring the stability of load-bearing building structures to avalanche destruction. The main approaches and methods used to improve the reliability of structures in possible emergency situations are considered. Controversial points are noted in the existing method of assigning an element, the removal of which can lead to an avalanche-like destruction of the entire structure. This algorithm is implemented using the finite element method in a geometrically and structurally nonlinear formulation, which makes it possible to take into account complex interactions within the structure under the influence of various loads. To more accurately simulate the behavior of the structure, correction functions are given that correct the local stiffness matrix of the core element used in geometrically nonlinear calculations. The algorithm is implemented in the MATLAB programming language. The article provides an example of using the proposed technique on the construction of a mesh truncated dome with a span of 50 meters along the larger axis.

Keywords: geometric and structural nonlinearity, finite element method, avalanche collapse, mesh truncated domes, reliability, survivability, probability of failure

For citation: Factors affecting the effectiveness of the use of building structures made of various materials / V. F. Mushchanov [et al.]. *Metal Constructions*. 2024;30(2):75–92. (in Russ.). doi: 10.71536/mc.2024.v30n2.3. edn: amzihf.

Введение

В связи с обострившейся террористической угрозой и ряда печальных случаев в практике возведения-эксплуатации уникальных конструкций и конструкций повышенной ответственности, все большую популярность среди инженеров и ученых в области строительства набирают вопросы, связанные с обеспечением нормативного уровня надежности и предотвращения склонности систем к лавинообразному обрушению. Это подтверждается разработкой и обновлением нормативных документов, которые направлены на повышение стандартов безопасности и долговечности строительных объектов [1, 2, 3, 4]. Однако, несмотря на эти усилия, в строительной практике всё ещё случаются отказы конструкций, в том числе объектов с высоким уровнем ответственности [5–9]. Анализ подобных случаев показывает, что многие из них развиваются по типу прогрессирующего или лавинообразного разрушения, что делает их особенно опасными [10, 11]. Для предотвращения таких аварий научные организации активно ведут работы, направленные на улучшение методов проектирования, строительства и мониторинга конструкций, чтобы минимизировать риски и обеспечить безопасность.

В связи с чем, необходима четкая инженерная методика для обеспечения требуемого уровня надежности конструкций повышенной ответственности, аварии на которых могут привести к значительным человеческим жертвам или существенным материальным потерям. При этом

остаётся открытым вопрос количественной оценки показателей надежности, а также склонности к лавинообразному обрушению конструкции. Как параметров, имеющих между собой вполне очевидную связь.

Анализ исследований и публикаций

На сегодняшний день результатом проведённой работы стал нормативный документ СП 385.1325800.2018 [4], который посвящён вопросам расчёта конструкций на склонность к лавинообразному разрушению. В этом документе разъясняется, как правильно производить такие расчёты, конкретизируются типы конструкций, для которых они обязательны. Перечисляются требования, при которых данные расчёты необязательны. А также приведены пояснения условий, при выполнении которых можно избежать этих расчётов. В данном документе приводятся рекомендуемые конструктивные решения, используемые для общего усиления конструкции. Даны рекомендации, направленные на предотвращение прогрессирующего обрушения на стадии проектирования.

Необходимость разработки документа, регламентирующего обеспечение надежности всех строительных конструкций, а не только объектов массового строительства, основывающейся на применении коэффициентов запаса, назрела уже давно. Следует отметить, что подобные нормы за рубежом существуют с начала девяностых годов

прошлого века. Однако, при всей монументальности СП 385.1325800.2018 [4] для строительства в целом, он содержит ряд спорных моментов.

Одним из данных спорных требований выступает необходимость проведения расчетов на склонность к лавинообразному обрушению конструкций, имеющих классы надежности КС-2 и КС-3. Целесообразность проведения данных расчетов для конструкций класса КС-2 может быть крайне незначительной. В первую очередь по причине экономической нецелесообразности. Так как для решения данной проблемы вполне достаточно детерминированных методов обеспечения надежности по средствам коэффициентов запаса. В нормах хоть и присутствуют рекомендации по выявлению таких элементов, они в основном ориентируются на одно и многоэтажные рамные конструкции. При проектировании сложных систем, таких как пространственные стержневые плиты, решетчатые арки или купольные конструкции, задача становится значительно более сложной и может даже стать неразрешимой.

Определенную настороженность вызывает методика определения элемента системы, отказ которого способно вызвать начало развития прогрессирующего разрушения, а также методика моделирования выхода из строя данного элемента [12]. Хотя в документе присутствуют рекомендации по выбору таких элементов, они в основном ориентированы на классические рамные системы. В случае сложных конструкций, например, пространственных каркасов ангаров из решетчатых арок, задача значительно усложняется и может стать практически неразрешимой.

При всем вышеупомянутом, следует помнить, что в статически определимых системах удаление любого звена неминуемо ведет к разрушению конструкции в целом. Получается, что выбор наиболее ответственного элемента, разрушение которого повлечет начало лавинообразного обрушения, полностью «ложится на плечи» инженера, так как в [4] не приводится однозначный алгоритм его определения. Следовательно, остается некая неоговоренная область для неоднозначной оценки и, как следствие, возможное накопление ошибок проектирования. Данный вопрос имеет значительную практическую важность, требует дальнейших изысканий и доработки [13–18].

Описание объекта исследований

Объектом исследования являются сетчатые усеченные купола, используемые в строительстве, а также основные подходы и методы, применяемые для повышения надежности конструкций в условиях возможных чрезвычайных ситуаций.

Цель работы

С помощью предложенной методики вычислить характеристики надежности и провести анализ склонности к прогрессирующему обрушению конструкций сетчатых усеченных куполов.

Основной материал

Методика вычисления характеристик надежности конструкции.

В статье предлагается последовательный алгоритм определения наиболее ответственных звеньев системы, вылет которых может спровоцировать лавинообразное разрушение конструкции. В рамках работы с данной методикой рассматривается расчетная ситуация с воздействием на систему исключительно одного вида нагрузки (загружения). При действии на конструкцию нескольких видов нагрузок приведенная ниже методика реализуется для каждой из них.

В основе предлагаемой методики лежит геометрически и конструктивно нелинейный расчет напряженно-деформируемого состояния (НДС) системы. Геометрическая нелинейность осуществляется путем пошагового приложения нагрузки. При этом, модуль приращения нагрузки на каждом этапе является постоянной величиной и находится в пределах $1/20 - 1/100$ значения общего воздействия в рамках загрузки. На каждом шаге догрузки производится линейный расчет НДС, но учитываются напряжения и деформации, полученные конструкцией на предыдущих этапах.

Вычисление НДС системы осуществляется на основе метода конечных элементов. Учет накапливаемых напряжений и деформаций элементов осуществляется путем корректировки локальных матриц жесткости на каждом этапе расчета (рис. 1). Корректирование локальных матриц осуществляется по средствам ввода в расчет поправочных функций [19, 20] (рис. 2). В основе теоретической обоснованности данных

$\frac{EA}{L}$	0	0	0	0	0	$-\frac{EA}{L}$	0	0	0	0	0
0	$\frac{12EI_z}{L^3}$	0	0	0	$-\frac{6EI_z}{L^2}$	0	$-\frac{12EI_z}{L^3}$	0	0	0	$\frac{6EI_z}{L^2}$
0	0	$\frac{12EI_y}{L^3}$	0	$\frac{6EI_y}{L^2}$	0	0	0	$-\frac{12EI_y}{L^3}$	0	$-\frac{6EI_y}{L^2}$	0
0	0	0	$\frac{GI_{кр}}{L}$	0	0	0	0	0	$-\frac{GI_{кр}}{L}$	0	0
0	0	$\frac{6EI_y}{L^2}$	0	$\frac{4EI_y}{L}$	0	0	0	$-\frac{6EI_y}{L^2}$	0	$\frac{2EI_y}{L}$	0
0	$-\frac{6EI_z}{L^2}$	0	0	0	$\frac{4EI_z}{L^3}$	0	$-\frac{6EI_z}{L^2}$	0	0	0	$\frac{2EI_z}{L}$
$-\frac{EA}{L}$	0	0	0	0	0	$\frac{EA}{L}$	0	0	0	0	0
0	$-\frac{12EI_z}{L^3}$	0	0	0	$\frac{6EI_z}{L^2}$	0	$\frac{12EI_z}{L^3}$	0	0	0	$\frac{6EI_z}{L^2}$
0	0	$-\frac{12EI_y}{L^3}$	0	$-\frac{6EI_y}{L^2}$	0	0	0	$\frac{12EI_y}{L^3}$	0	$\frac{6EI_y}{L^2}$	0
0	0	0	$-\frac{GI_{кр}}{L}$	0	0	0	0	0	$\frac{GI_{кр}}{L}$	0	0
0	0	$\frac{6EI_y}{L^2}$	0	$\frac{2EI_y}{L}$	0	0	0	$\frac{6EI_y}{L^2}$	0	$\frac{4EI_y}{L}$	0
0	$\frac{6EI_z}{L^2}$	0	0	0	$\frac{2EI_z}{L}$	0	$-\frac{6EI_z}{L^2}$	0	0	0	$\frac{4EI_z}{L}$

Рисунок 1. Пространственная матрица жёсткости стержня в локальной системе координат (EI_z, EI_y – изгибные жёсткости относительно осей z и y , $GI_{кр}$ – крутильная жесткость стержня, EA – продольная жёсткость стержня, L – длина стержня).

s5e	0	0	0	0	0	s5e	0	0	0	0	0
0	s1e	0	0	0	s2e	0	s1e	0	0	0	s2e
0	0	sz1e	0	sz2e	0	0	0	sz1e	0	sz2e	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	sz2e	0	sz3e	0	0	0	sz2e	0	sz4e	0
0	s2e	0	0	0	s3e	0	s2e	0	0	0	s4e
s5e	0	0	0	0	0	s5e	0	0	0	0	0
0	s1e	0	0	0	s2e	0	s1e	0	0	0	s2e
0	0	sz1e	0	sz2e	0	0	0	sz1e	0	sz2e	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	sz2e	0	sz4e	0	0	0	sz2e	0	sz3e	0
0	s2e	0	0	0	s4e	0	s2e	0	0	0	s3e

Рисунок 2. Матрица корректирующих функций.

выражений лежат работы В. В. Новожилова и Н. В. Корноухова.

В описании также указано, что эти поправочные функции играют роль геометрической матрицы жесткости элементов конструкции. Операция корректировки матриц жесткости, благодаря предложенным функциям, позволяет более точно учесть геометрические нелинейности, что критически важно для оценки поведения конструкции при лавинообразном разрушении.

В предложенной методике акцент делается на анализе конструктивной нелинейности и определении наиболее ответственных элементов конструкции, подверженной лавинообразному разрушению.

Выражения, используемые в качестве поправочных функций (таблица 1), зависят от ориентированности продольного усилия в стержне. Для сжатых элементов – правый столбец таблицы, для растянутых – левый. Конструктивная нелинейность учитывается путем удаления из расчетной схемы элементов, которые исчерпали свою несущую способность на определенном этапе нагружения. После этого для новой, вторичной расчетной схемы проводится анализ напряженно-деформированного состояния и оценивается несущая способность оставшихся элементов.

Если перераспределение усилий приводит к отказу ещё каких-либо элементов системы, что, в свою очередь, вызывает последующие отказы, то это свидетельствует о начале прогрессирующего разрушения конструкции. При этом, элемент, вышедший из строя первым, считается наиболее ответственным, а последующие элементы – менее ответственными.

В некоторых ситуациях может наступить стабилизация процесса, когда оставшиеся элементы конструкции принимают на себя внешнюю нагрузку и перераспределившиеся усилия. Если стабилизация продолжается в ходе пошагового догружения, то это указывает на высокую устойчивость системы к прогрессирующему разрушению.

Особое внимание уделяется элементам, работающим в зоне пластических деформаций. В соответствии с работами Н. С. Стрелецкого [21], растянутый стержень сохраняет порядка 30–50 % своей несущей способности даже после достижения предела текучести. Поэтому удалять такие

элементы из расчетной схемы нельзя – их внутренняя работа продолжается, и они ограничивают перемещения узлов. В связи с чем, при исключении из системы таких стержней в крайние узловые точки крепления элемента прикладываются сосредоточенные силы. Они численно равны усилиям, действующим в исключаемых стержнях, но противоположны по знаку (направлению). Таким образом учитывается остаточная несущая способность. В сжатых элементах остаточная несущая способность составляет приблизительно 3 % от критического усилия, при превышении которого происходит потеря устойчивости. Сжатые стержни целесообразно исключать из расчетной схемы без ввода дополнительных внешних силовых.

Предложенная методика определения совокупности наиболее ответственных элементов системы изображена на рисунке 3 и представлена в виде блок-схемы. Группа стержней первыми вышедших из работы при поэтапном пригружении будет иметь наименьшие численные значения характеристик надежности во всей системе. Элемент с минимальными показателями задаст нижнюю границу, а надежность всей группы (стержни рассматриваются как параллельно работающие) – верхнюю границу надежности конструкции. Следовательно, реальная надежность системы будет располагаться между этими двумя показателями [22].

В качестве случайных величин могут выступать:

- атмосферные нагрузки и воздействия (снеговая нагрузка);
- деформация основания;
- геометрические характеристики сечений;
- дефекты конструкции, полученные на монтаже;
- отклонения элементов от проектной геометрии;
- предел текучести материала конструкции или альтернативные показатели.

В многообразии нормативных документов строительной отрасли понятие надежности конструкции имеет несколько определений, но обобщая, допустимо применение следующего определения: «*способность сооружения выполнять заданные функции, сохраняя свои основные характеристики, при определенных условиях эксплуатации, в установленный период*». Численными

Таблица 1. Корректирующие функции

<i>Растянутые стержни</i>	<i>Сжатые стержни</i>
$s1e = \frac{\phi^3 \times \sinh}{12 \times rt};$	$s1e = \frac{\phi^3 \times \sin(\phi)}{12 \times rc};$
$s2e = \frac{\phi^2 \times (\cosh - 1)}{6 \times rt};$	$s2e = \frac{\phi^2 \times (1 - \cos(\phi))}{6 \times rc};$
$s3e = \frac{\phi \times (\phi \times \cosh - \sinh)}{4 \times rt};$	$s3e = \frac{\phi \times (\sin(\phi) - \phi \times \cos(\phi))}{4 \times rc};$
$s4e = \frac{\phi \times (\sinh - \phi)}{2 \times rt};$	$s4e = \frac{\phi \times (\phi - \sin(\phi))}{2 \times rc};$
$s5e = \frac{1}{1 - \frac{EF \times rtm}{4 \times paxl^3 \times l^2}};$	$s5e = \frac{1}{1 + \frac{EF \times rcm}{4 \times (-paxl)^3 \times l^2}};$
$sz1e = \frac{z\phi^3 \times zsinh}{12 \times zrt};$	$sz1e = \frac{z\phi^3 \times \sin(z\phi)}{12 \times zrc};$
$sz2e = \frac{z\phi^2 \times (zcosh - 1)}{6 \times zrt};$	$sz2e = \frac{z\phi^2 \times (1 - \cos(z\phi))}{6 \times zrc};$
$sz3e = \frac{z\phi \times (z\phi \times zcosh - zsinh)}{4 \times zrt};$	$sz3e = \frac{z\phi \times (\sin(z\phi) - z\phi \times \cos(z\phi))}{4 \times zrc};$
$sz4e = \frac{z\phi \times (zsinh - z\phi)}{2 \times zrt};$	$sz4e = \frac{z\phi \times (z\phi - \sin(z\phi))}{2 \times zrc};$
$rt = 2 - 2 \times \cosh + \phi \times \sinh;$	$rc = 2 - 2 \times \cos(\phi) - \phi \times \sin(\phi);$
$zrt = 2 - 2 \times zcosh + z\phi \times zsinh;$	$zrc = 2 - 2 \times \cos(z\phi) - z\phi \times \sin(z\phi);$
$rtm = \phi \times em1 \times \left(\frac{1}{\tanh} + \phi \times \left(\frac{1}{\sinh} \right)^2 \right) - 2 \times$ $\times em2 + 2 \times \phi \times \frac{1}{\sinh} \times em3 \times \left(1 + \phi \times \frac{1}{\tanh} \right);$	$rcm = \phi \times em1 \times \left(\frac{1/\sin(\phi)}{\cos(\phi)} + \phi \times \left(\frac{1}{\sin(\phi)} \right)^2 \right) - 2 \times$ $\times em2 + 2 \times \phi \times \frac{1}{\sin(\phi)} \times em3 \times \left(1 + \phi \times \frac{1/\sin(\phi)}{\cos(\phi)} \right);$
$zrtm = z\phi \times zem1 \times \left(\frac{1}{z\tanh} + z\phi \times \left(\frac{1}{zsinh} \right)^2 \right) - 2 \times$ $\times zem2 + 2 \times z\phi \times \frac{1}{zsinh} \times zem3 \times \left(1 + z\phi \times \frac{1}{z\tanh} \right);$	$zrcm = z\phi \times zem1 \times \left(\frac{1/\sin(z\phi)}{\cos(z\phi)} + z\phi \times \left(\frac{1}{\sin(z\phi)} \right)^2 \right) - 2 \times$ $\times zem2 + 2 \times z\phi \times \frac{1}{\sin(z\phi)} \times zem3 \times \left(1 + z\phi \times \frac{1/\sin(z\phi)}{\cos(z\phi)} \right);$
$\sinh = \frac{e^{\phi} - e^{-\phi}}{2};$	—

окончание таблицы 1

$\cosh = \frac{e^{phi} + e^{(-phi)}}{2};$	–
$\tanh = \frac{e^{phi} - e^{(-phi)}}{e^{phi} + e^{(-phi)}};$	–
$zsinh = \frac{e^{zphi} - e^{(-zphi)}}{2};$	–
$zcosh = \frac{e^{zphi} + e^{(-zphi)}}{2};$	–
$ztanh = \frac{e^{zphi} - e^{(-zphi)}}{e^{zphi} + e^{(-zphi)}};$	–
$paxl = \frac{N_{fin} - N_{in}}{2}; \quad phi = \sqrt{\frac{ paxl }{EI_2}} \times l; \quad zphi = \sqrt{\frac{ paxl }{EI_3}} \times l;$ $em1 = M_{3in}^2 + M_{3fin}^2; \quad em2 = (M_{3in} + M_{3fin})^2; \quad em3 = M_{3in} \times M_{3fin};$ $zem1 = M_{2in}^2 + M_{2fin}^2; \quad zem2 = (M_{2in} + M_{2fin})^2; \quad zem3 = M_{2in} \times M_{2fin};$ <p>N_{fin} – продольное усилие в конце стержня; N_{in} – продольное усилие в начале стержня; EI_2, EI_3 – жесткость при изгибе относительно указанной оси 2 или 3; EI – жесткость при растяжении-сжатии; l – длина стержня; M_{2fin} – изгибающий момент относительно оси 2 на конце стержня; M_{2in} – изгибающий момент относительно оси 2 в начале стержня; M_{3fin} – изгибающий момент относительно оси 3 на конце стержня; M_{3in} – изгибающий момент относительно оси 3 в начале стержня.</p>	

характеристиками надежности, как правило, выступают:

- P_s – вероятность безотказной работы,
- P_f – вероятность отказа,
- β – характеристика безопасности или дальность отказа в отечественной терминологии и индекс надежности в зарубежной практике.

На корректность использования этих величин указывают значительное многообразие нормативных документов, действующих в различных странах. В качестве основной характеристики при оценке надежности конструкции авторы использовали β_{min} . Этот показатель определяется для каждого из наиболее ответственных элементов, что идет вразрез с требованиями вышеупомянутых документов.

Отличительной особенностью предложенного в статье алгоритма выступает возможность

оценки склонности рассматриваемой конструкции к развитию прогрессирующего обрушения (под этим термином понимается *последовательное обрушение конструкций здания (или его части в виде двух или более пролетов, двух и более этажей), потерявших опору в результате локального разрушения отдельных несущих конструктивных элементов*) посредством численной оценки возможности наступления такого события. С этой целью авторы предлагают использовать величину β_{max} , характеризующий вероятность отказа всей группы наиболее ответственных элементов, выход из строя которых предшествует развитию прогрессирующего обрушения всей конструкции.

Как известно, по общепринятой терминологии «живучесть – это свойство в течение некоторого времени сохранять несущую способность при локальных разрушениях (при аварийных

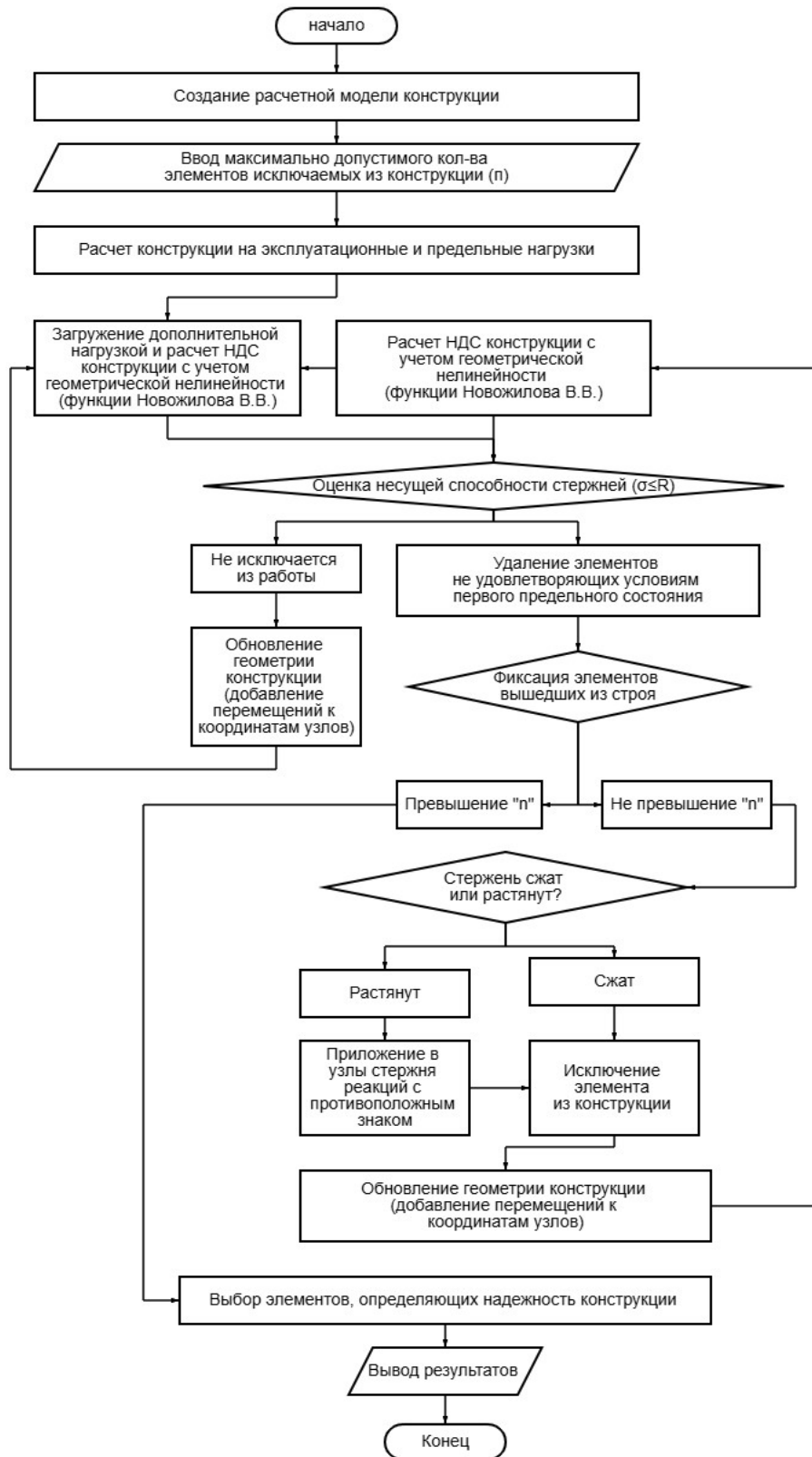


Рисунок 3. Блок-схема определения наиболее ответственных элементов конструкции.

ситуациях), вызванных природными и технологическими воздействиями. А именно стойкость конструкции (здания и сооружения) к прогрессирующему разрушению при запроектированных аварийных повреждениях и локальных разрушениях». Рассматривая и эту часть исследования с единых методических позиций, в разрабатываемом подходе предложен новый параметр $\Delta\beta$ (резерв живучести системы), характеризующий разницу в вероятности наступления 2-х событий:

β_{min} – отказа одного, наиболее напряженного элемента, характеризующего первичное нарушение требований надежности;

β_{max} – отказа совокупности ключевых элементов, характеризующего полное исчерпание их несущей способности с последующим развитием лавинообразного обрушения.

Таким образом, предложенная методика позволяет численно анализировать склонность конструкции к прогрессирующему обрушению путем ввода параметра резерва живучести. Обеспечивает обоснованный выбор наиболее ответственных элементов системы, выход из строя которых, с большой степенью вероятности, повлечет за собой такое обрушение. Это является одной из ключевых особенностей методики. Так в нормах [4], на основе которых реализованы такие распространенные программные продукты как ЛИРА САПР и SCAD, рекомендации по выбору исключаются из работы элементов системы, особенно многоэлементных статически неопределимых, имеют довольно большую вариабельность. Авторы надеются, что предложенная методика поможет в значительной мере снять данную проблему или хотя бы сузить область поиска. Второй ключевой особенностью является то, что в отличие от создания запаса прочности на основе опыта проектирования инженера, осуществляется рациональное и обоснованное увеличение сечений элементов для обеспечения требуемого уровня надежности конструкции. Что приводит к минимальным, из возможных в рамках конструктивного решения, материальным затратам.

Численные исследования.

Рассмотрим использование предложенной методики на примере конструкции сетчатого купола [23]. Изначально исходная схема конструкции сетчатого усеченного купола (рис. 4) была запроектирована в программном комплексе

ЛИРА-САПР в соответствии со всеми требованиями метода предельных состояний. Затем, для сформированной схемы на основе реализации 1-го этапа разработанного алгоритма была выбрана группа ключевых элементов и просчитывались характеристики надежности системы ($\Delta\beta, \beta_{min}, \beta_{max}$).

В численном эксперименте рассматривались два варианта загрузки (100 и 150 кг/м²) конструкции сетчатого усеченного купола с пролетом по большей оси 50 м. Принимались следующие конструктивные параметры:

- а) размер площади выреза по отношению к общей площади купола – 25 %;
- б) отношение стрелы подъема f к пролету l – 1/10;
- в) соотношение сторон в плане – 1/1,25;

Основные элементы купола выполнялись из круглых труб с максимальным сечением 159×12 мм (рис. 5) [24].

На рис. 6 представлена гистограмма выхода элементов (шаг пригрузки 0,2 кН) купола при нагрузке в 100 кг/м².

Элементы, вышедшие из строя, представлены на рис. 7.

Исходя из графических данных, очевидно, что на восьмом шаге догрузки, после выхода из строя 106 элементов, начало развиваться лавинообразное обрушение конструкции. При нагрузке в 150 кг/м² гистограмма выхода элементов приведена на рис. 8. Очевидно, что и в этом случае лавинообразное разрушение начинается на восьмом шаге догрузки. При этом характер зон расположения разрушаемых элементов сходен с расчетом при нагрузке в 100 кг/м².

В качестве группы наиболее ответственных элементов принимаем 6 элементов выходящие из работы первыми (шаг 2 и 3 на рис. 6 и 8 соответственно). Результаты вычислений характеристик надежности приведены в таблицах 2 и 3.

Анализируя полученные результаты, можно судить об эффективности предложенной методики обеспечения требуемого уровня надежности конструкций повышенной ответственности, к которым можно отнести усеченные купола рассматриваемых размеров. При общем количестве элементов в системе 1 776 штук, требуемый уровень надежности системы ($\beta_{min}=4,76$ [3, 25–27]) достигается уже на третьей итерации в обоих случаях нагружения. При этом масса конструкции

увеличивается незначительно – 1,8 и 2,05 %. Такой эффект достигается путем адресного увеличения сечений отдельных стержней. При этом, увеличение жесткости выполняется для наиболее ответственных и важных элементов, а не осуществляется «вслепую».

Следует отметить, что увеличение $\Delta\beta$ до 10 и более, позволило обоснованно увеличить степень устойчивости системы к лавинообразному обрушению. Данная характеристика дает возможность численно оценивать степень устойчивости конструкции к прогрессирующему обрушению.

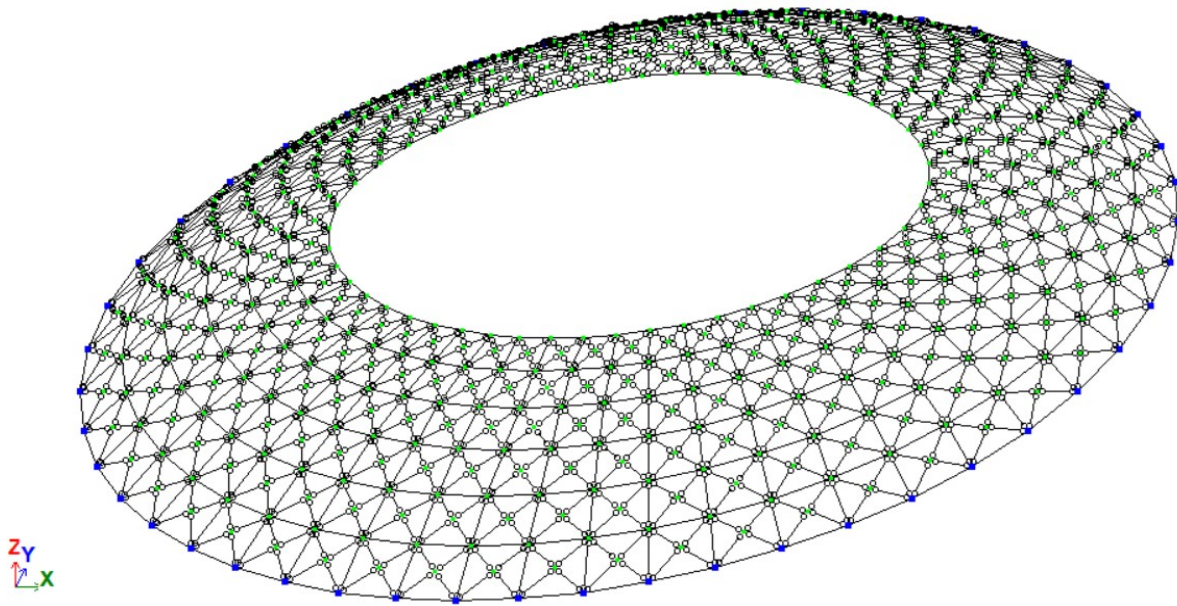


Рисунок 4. Расчетная схема конструкции сетчатого усеченного купола.

Наименование	H, мм	Tw, мм	A, см ²	Wt, кг/м	I, см ⁴	J, см ⁴	S, см ³	Z, см ³
50 x 3	50	3	4,43	3,476	12,28	24,56	3,318	6,636
60 x 3	60	3	5,372	4,215	21,88	43,76	4,878	9,756
76 x 3	76	3	6,88	5,399	45,91	91,81	7,998	16
89 x 3.5	89	3,5	9,401	7,377	86,05	172,1	12,8	25,6
102 x 3.5	102	3,5	10,83	8,499	131,5	263	16,99	33,97
114 x 4	114	4	13,82	10,85	209,3	418,7	24,21	48,42
127 x 4.5	127	4,5	17,32	13,59	325,3	650,6	33,78	67,56
127 x 6	127	6	22,81	17,9	418,4	836,9	43,96	87,92
133 x 8	133	8	31,42	24,65	616,1	1232	62,59	125,2
146 x 10	146	10	42,73	33,53	993,2	1986	92,65	185,3
159 x 12	159	12	55,42	43,49	1507	3014	129,9	259,9

Рисунок 5. Сортамент круглых труб, использованных при проектировании.

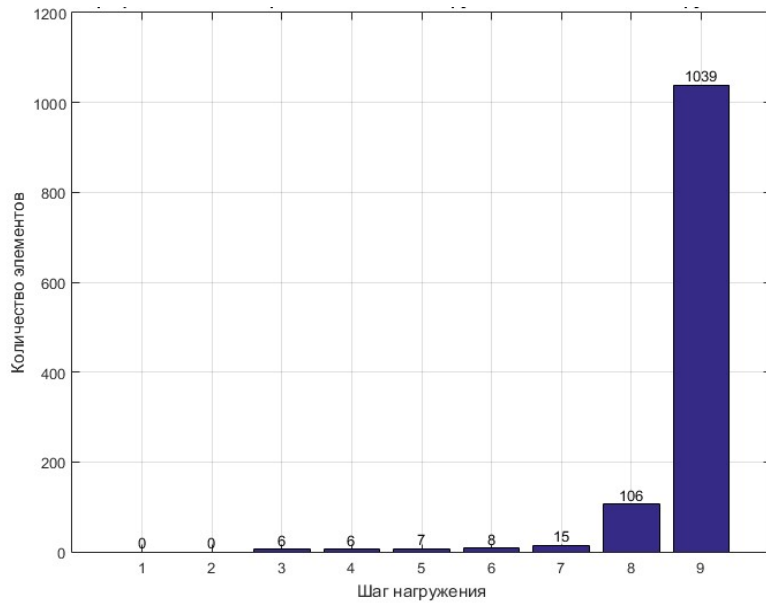


Рисунок 6. Гистограмма выхода из работы элементов конструкции купола при нагрузке 100 кг/м².

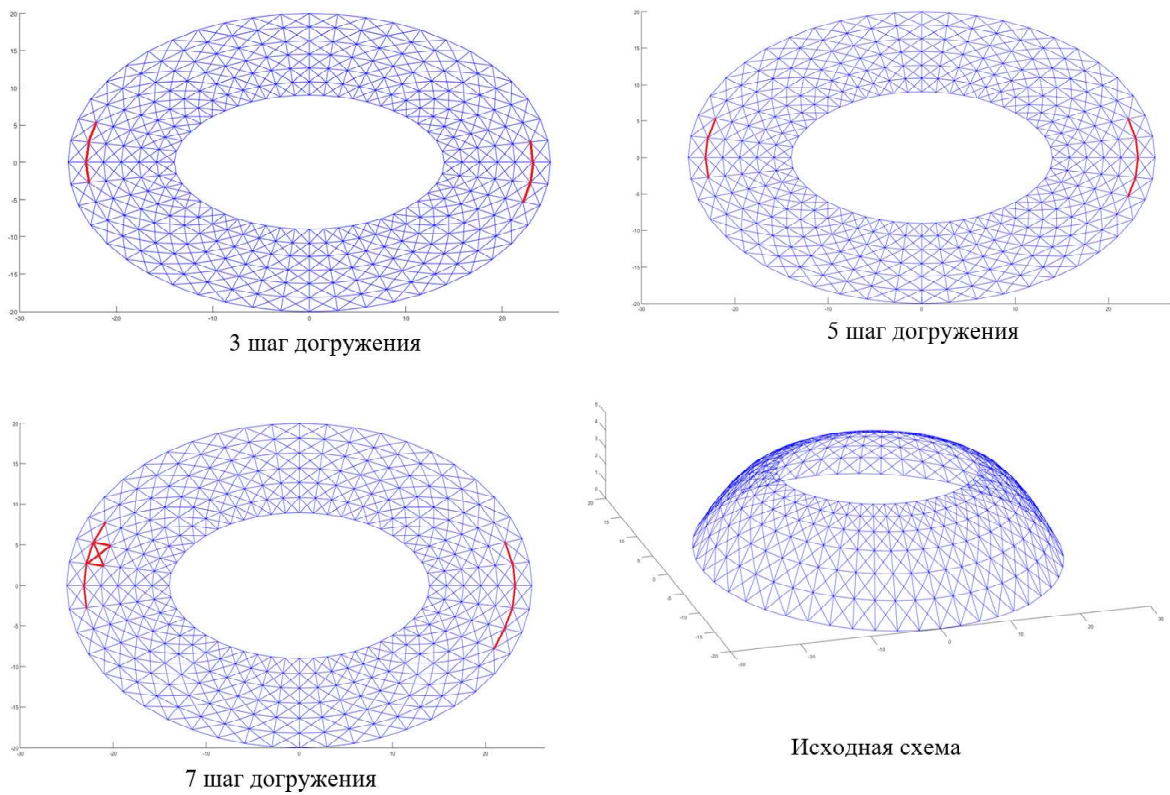


Рисунок 7. Стержни, вышедшие из строя при пошаговом нагружении усеченного купола.

Для конструкций усеченных куполов это имеет критическое значение, так как проблематично определить наиболее важные, с точки зрения развития лавинообразного обрушения, элементы системы. Авторы выдвигают гипотезу, что уве-

личение $\Delta\beta$ выше 8–10 единиц позволит обеспечить степень устойчивости рассматриваемых конструкций к лавинообразному обрушению выше требуемого уровня.

Таблица 2. Результаты расчета характеристик надёжности усеченного купола с нагрузкой 100 кг/м²

Итерация №	Масса (т)	β_{\min}	β_{\max}	$\Delta\beta$
1	15,582	4,285	10,893	6,608
2	15,595	3,613	7,839	4,226
3	15,614	5,17	15,979	10,809

Таблица 3. Результаты расчета характеристик надёжности усеченного купола с нагрузкой 150 кг/м²

Итерация	Масса (т)	β_{\min}	β_{\max}	$\Delta\beta$
1	15,677	2,173	6,919	4,746
2	15,929	3,714	8,116	4,402
3	15,963	5,234	16,037	10,803

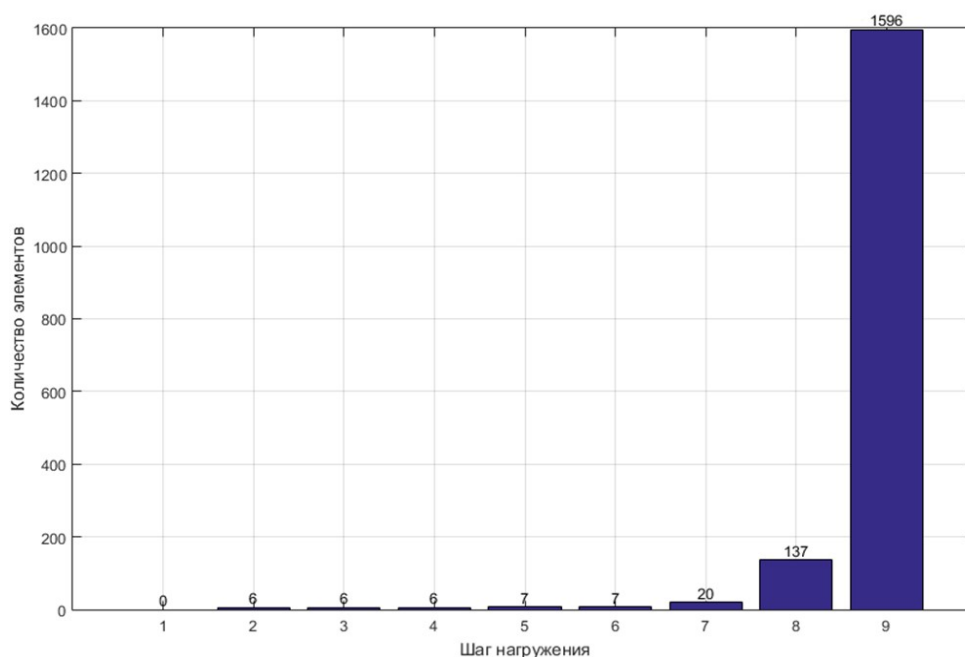


Рисунок 8. Гистограмма выхода из работы элементов конструкции купола при нагрузке 150 кг/м².

Выводы

1. Авторами проведён анализ нормативной литературы, касающейся защиты конструкций от лавинообразного обрушения. В ходе исследования были выявлены отдельные вопросы, которые требуют дальнейшего уточнения и проведения дополнительных исследований для повышения надёжности конструкций.
2. Предложенная методика, базирующаяся на конструктивно и геометрически нелинейном расчётах напряженно-деформируемого состояния конструкции, позволяет определять наиболее ответственные элементы системы, возможное разрушение которых может спровоцировать развитие прогрессирующего разрушения конструкции. Показатели надёжности этих ключевых элементов напрямую влияют на надёжность всей системы в целом.
3. Предложенная методика (в соответствии с матрицей планирования эксперимента [23]) апробирована на примере конструкции сетчатого усеченного купола. Получены следующие результаты:
 - 3.1. Для конструкции с пролетом по большей оси 50 метра, при общем количестве элементов в системе 1 776 штук, требуемый уровень надёжности системы достигается уже на третьей итерации в обоих случаях нагружения.

При этом масса системы увеличивается незначительно – 1,8 % и 2,05 %. Такой эффект достигается путем адресного увеличения сечений отдельных стержней. При этом, увеличение жесткости выполняется для элементов, определенных по четкой аргументированной методике, а не выбранных «в слепую».

- 3.2. В результате расчетов численно выявлено, что базовая конструкция, запроектированная исходя из условий прочности, оказалась подверженной риску лавинообразного разрушения. Однако применение предложенной методики существенно снизило вероятность развития прогрессирующего обрушения. Увеличение $\Delta\beta$ до 10 и более, позволило обоснованно увеличить степень устойчивости системы к лавинообразному обрушению.
- 3.3. Авторы выдвигают гипотезу, что увеличение резерва живучести системы $\Delta\beta$ выше 8–10 единиц обеспечит степень устойчивости рассматриваемых конструкций повышенной ответственности усеченных куполов к лавинообразному обрушению выше требуемого нормативного уровня.
4. В перспективе, используя апробированные алгоритмы, планируется провести численные исследования ребристых и ребристо-кольцевых усеченных куполов.

Список источников

1. ГОСТ 27751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. Основные положения = Reliability for constructions and foundations. General principles : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. № 1974-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 27751-2014 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июля 2015 г. : введен впервые : дата введения 2015-07-01 / разработан Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр «Строительство» (ОАО «НИЦ «Строительство») – Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В. А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко). – Москва : Стандартинформ, 2015. – 14 с. – Текст : непосредственный.

References

1. GOST 27751-2014. Reliability for constructions and foundations : General principles : interstate standard : official publication : approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1974/pr of December 11, 2014 : introduced for the first time : date of introduction 2015-07-01 / developed by Open Joint Stock Company «Scientific Research Center «Stroitelstvo» (JSC «SIC «Stroitelstvo») – Central Research Institute of Building Structures named after V. A. Kucherenko (TSNIISK named after V. A. Kucherenko). – Moscow : Standartinform, 2015. – 14 p. – Text : direct. (in Russian)
2. GOST R ISO 2394-2016. Building constructions : General principles on reliability : national standard of the Russian Federation : official publication : approved by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1814/pr of November 28, 2016 : introduced for the first time :

2. ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надёжности = Building constructions. General principles on reliability : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 ноября 2016 г. № 1814-ст : введен впервые : дата введения 2017-05-01 / подготовлен Акционерным обществом «Научно-исследовательский центр «Строительство» (АО «НИЦ «Строительство»), Центральным научно-исследовательским институтом строительных конструкций им. В. А. Кучеренко (ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко). – Москва : Стандартинформ, 2016. – 62 с. – Текст : непосредственный.
3. EN 1990:2002+A1. Eurocode – Basis of structural design : European Standard : Supersedes ENV 1991-1:1994 : This European Standard was approved by CEN on 29 November 2001. – Brussels : Management Centre, 2002. – 116 с. – Текст : непосредственный.
4. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения : издание официальное : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 5 июля 2018 г. № 393/пр и введен в действие с 6 января 2019 г. : введен впервые : дата введения 2019-01-06 / исполнители Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ФГБОУ ВО «ЮЗГУ»), Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений - ЦНИИПромзданий» (АО «ЦНИИПромзданий»), Закрытое акционерное общество «Городской проектный институт жилых и общественных зданий» (ЗАО «ГОРПРОЕКТ») [и др.]. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 24 с. – Текст : непосредственный.
5. Influence of initial geometric imperfection on static stability of single-layer reticulated shell structure / X. Zhi, W. Li, F. Fan, S. Shen. – Текст : непосредственный // *Spatial Structures*. – 2021. – Volume 27. – P. 7. – DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2021.01.009.
6. 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.
7. 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.
8. A non probabilistic time-variant method for structural reliability analysis / T. Xin, J. Zhao, C. Cui, Y. Duan. – Текст : непосредственный // *Proceedings of introduction 2017-05-01 / prepared by Joint Stock Company Scientific Research Center Stroitelstvo (JSC SIC Stroitelstvo) – Central Scientific Research Institute of Building Structures named after V. A. Kucherenko (TSNIISK named after V. A. Kucherenko).* – Moscow : Standartinform, 2016. – 62 p. – Text : direct. (in Russian)
9. EN 1990:2002+A1. Eurocode – Basis of structural design : European Standard : Supersedes ENV 1991-1:1994 : This European Standard was approved by CEN on 29 November 2001. – Brussels : Management Centre, 2002. – 116 с. – Text : direct.
10. SP 385.13258.2018. Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. Main provisions : official publication : approved by Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation № 393/pr of July 5, 2018 : introduced for the first time : date of introduction 2019-01-06 / executors Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Southwestern State University» (FGBOU VO «South State University»), Joint Stock Company «Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – Tsniipromzdaniy» (JSC «Tsniipromzdaniy»), Closed Joint Stock Company «City Design Institute of Residential and Public Buildings» (CJSC GORPROEKT) [and others]. – Moscow : Standartinform, 2018. – 24 p. – Text : direct. (in Russian)
5. Zhi, X.; Li, W.; Fan, F.; Shen, S. 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.
6. Li, H.; Wang, C.; Han, J. Research on the 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.
7. 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.
8. Xin, T.; Zhao, J.; Cui, C.; Duan, Y. 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.
9. 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.
10. Mushchanov, V. F. To the Analysis of the Main Provisions of Regulatory Documents for the Prevention of Progressive Collapse of Building Structures (part 2). – Text : electronic. – In: *Metal Constructions*. –

- of the Institution of Mechanical Engineers. Part O: Journal of Risk and Reliability. – 2020. – Volume 234 (5). – P. 664–675. – DOI: 10.1177/1748-006X20928196.
9. 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.
 10. Мущанов, В. Ф. К анализу основных положений нормативных документов по предотвращению лавинообразного обрушения конструкций зданий (часть 2) / В. Ф. Мущанов. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2022. – Том 28, № 3. – С. 107–129. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2022-3/st_01_mushchanov.pdf (дата обращения: 08.04.2024). – ISSN 1993-3517.
 11. 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://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2022-2/01_mushchanov.pdf (дата обращения: 07.04.2024). – ISSN 1993-3517.
 12. Городецкий, А. Е. Комбинированное логико-вероятностное и лингвистическое моделирование отказов сложных систем / А. Е. Городецкий, И. Л. Тарасова, В. Ю. Зиняков. – Текст : непосредственный // Информационно-управляющие системы – 2015. – № 1. – С. 35–42. – DOI: <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.1.35>.
 13. 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.
 14. Пашенко, А. Н. Вероятностный расчет сжатых элементов строительных конструкций : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, 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.
 15. 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 университет г. Магадана. – 2022. – Volume 28, № 3. – P. 107–129. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2022-3/st_01_mushchanov.pdf (date of access: 08.04.2024). – ISSN 1993-3517. (in Russian)
 11. 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 Constructions*. – 2022. – Volume 28, № 2. – P. 63–78. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2022-2/01_mushchanov.pdf (date of access: 07.04.2024). – ISSN 1993-3517. (in Russian)
 12. Gorodetsky, A. E.; Tarasova, I. L.; Zinyakov, V. Y. Combined logical-probabilistic and linguistic modeling of failures of complex systems. – Text : direct. – In: *Information and control systems*. – 2015. – № 1. – P. 35–42. – DOI: <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2015.1.35>. (in Russian)
 13. Samokhvalov, I. A.; Tryanina, N. Y. Comparative analysis of the work 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, 2015. – Belgorod : [s. n.], 2015. – P. 101–104. (in Russian)
 14. 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 ; Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. – Poltava, 2004. – 22 p. – Text : direct. (in Russian)
 15. Dolganov, A. V. Optimization of reinforced concrete structures and structures according to the reliability criterion : specialty 05.23.01 «Building structures, buildings and structures» : abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Dolganov Andrey ; Northern International University of Magadan. – Moscow, 2000. – 47 p. – Text : direct. (in Russian)
 16. Saveliev, V. A. Theoretical foundations of 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 / Saveliev Vitaly. – Moscow, 1995. – 37 p. – Text : direct. (in Russian)
 17. Yeremeyev, P. G. Modern steel structures of large-span coatings of unique buildings and structures : monograph. – Moscow : Publishing House of the Association of Construction Universities, 2009. – 336 p. – Text : direct. (in Russian)
 18. Tur, V. I. Domed structures: shaping, calculation, design, efficiency improvement. – Moscow : DIA Publishing House, 2004. – 96 p. – Text : direct. (in Russian)
 19. Novozhilov, V. V. Fundamentals of the nonlinear theory of elasticity. Modern problems of mechanics ; under the general editorship of A. I. Lurie and L. G. Loitsyansky. – Leningrad, Moscow : OGIZ

- Москва, 2000. – 47 с. – Текст : непосредственный.
16. 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.
 17. 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.
 18. Тур, В. И. Купольные конструкции: формообразование, расчет, конструирование, повышение эффективности / В. И. Тур. – Москва : Издательство АСВ, 2004. – 96 с. – Текст : непосредственный.
 19. Новожилов, В. В. Основы нелинейной теории упругости. Современные проблемы механики / В. В. Новожилов ; под общей редакцией А. И. Лурье и Л. Г. Лойцянского. – Ленинград, Москва : ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы. – 1948. – 214 с. – Текст : непосредственный.
 20. Корноухов, Н. В. Прочность и устойчивость стержневых систем. Упругие рамы, фермы и комбинированные системы / Н. В. Корноухов. – Москва : Стройиздат, 1949. – 376 с. – Текст : непосредственный.
 21. 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.
 22. Комплексный подход к оценке надежности пространственных металлических конструкций / В. Ф. Муцанов, А. Н. Оржеховский, М. Н. Цепляев, А. В. Муцанов. – Текст : непосредственный // Строительство: наука и образование. – 2024. – Выпуск 14, № 1. – С. 6–23. – <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.1>.
 23. Надежность пространственных стержневых конструкций усеченных большепролетных куполов / В. Ф. Муцанов, А. Н. Оржеховский, М. П. Кащенко, А. В. Зубенко. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2023. – Том 29, № 1. – С. 47–61. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2023-1/st_04_mushchanov_orzhehovskiy_kashchenko_zubenko.pdf (дата обращения: 28.04.2024). – ISSN 1993-3517.
 24. Оптимизация типовых структурных конструкций покрытий на прямоугольном плане / В. Ф. Муцанов, А. Н. Оржеховский, И. В. Роменский [и др.]. – Текст : электронный // Металлические конструкции. – 2023. – Том 29, № 3. – С. 117–127. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/
 - State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1948. – 214 p. – Text : direct. (in Russian)
 20. Kornoukhov, N. V. Strength and stability of core systems. Elastic frames, trusses and combined systems. – Moscow : Stroyizdat, 1949. – 376 p. – Text : direct. (in Russian)
 21. Streletsky, N.; Belenya, E.; Melnikov, N. [et. al.]. Selected works – Moscow : Stroyizdat, 1975. – 422 p. – Text : direct. (in Russian)
 22. Muschanov, V. F.; Orzhekhovskiy, A. N.; Tseplyaev, M. N.; Muschanov, A. V. [et. al.]. An integrated approach to assessing the reliability of spatial metal structures. – Text : direct. – In: *Construction: science and education*. – 2024. – Issue 14, № 1. – P. 6–23. – <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.1>. (in Russian)
 23. Mushchanov, V. F.; Orzhehovskiy, A. N.; Kashchenko, M. P.; Zubenko, A. V. Reliability of Spatial Core Structures of Truncated Large-Span Domes. – Text : electronic. – In: *Metal Constructions*. – 2023. – Volume 29, № 1. – P. 47–61. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2023-1/st_04_mushchanov_orzhehovskiy_kashchenko_zubenko.pdf (date of access: 28.04.2024). – ISSN 1993-3517. (in Russian)
 24. Mushchanov, V. F.; Orzhekhovskiy, A. N.; Romenskiy, I. V. [et al.]. Optimization of Typical Structural Structures of Coatings on a Rectangular Plan. – Text : electronic. – In: *Metal Constructions*. – 2023. – Volume 29, № 3. – P. 117–127. – URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2023-3/st_01_mushchanov_orzhehovskiy_romenskiy_demidov_podlepich.pdf (date of access: 28.08.2024).ISSN 1993-3517. (in Russian)
 25. Mushchanov, V. F.; Orzhekhovskiy, A. N.; Zubenko, A. V. [et al.]. Refined methods for calculating and designing engineering structures. – Text : direct. – In: *Magazine of Civil Engineering*. – 2018. – № 2. – P. 101–115. – DOI: 10.18720/MCE.78.8.
 26. Romenskiy, D. I.; Orzhekhovskiy, A. N. Selection of cross-section elements of steel frame-cantilever coverings over stadium stands, taking into account reliability requirements. – Text : direct. – In: *Scientific and theoretical Journal Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. – 2017. – № 8. – P. 35–46. (in Russian)
 27. Mushchanov, V. F.; Garanzha, I. M.; Orzhekhovskiy, A. N. Numerical Determination of The Probability of Failure of a Bent Steel Rod. – Text : electronic. – In: *Metal Constructions*. – 2017. – Volume 23, № 1. – P. 15–23. – URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2017-1/02_mushchanov_garanzha_orzhehovskiy.pdf (date of access: 01.09.2024). – ISSN 1993-3517. (in Russian)

- 2023-3/st_01_mushchanov_orzhhevovsky_romenskiy_demidov_podlepich.pdf (дата обращения: 28.08.2024). – ISSN 1993-3517.
25. Refined methods for calculating and designing engineering structures / V. P. Mushchanov, A. N. Orzhikhovskii, A. V. Zubenko, S. A. Fomenko. – Текст : непосредственный // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – № 2. – P. 101–115. – DOI: 10.18720/MCE.78.8.
26. 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 Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 8. – С. 35–46.
27. Мущанов, В. Ф. Численное определение возможности отказа от изгибаемого 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_orzhhevovskiy.pdf (дата обращения: 02.05.2024). – ISSN 1993-3517.

Информация об авторах

Мущанов Владимир Филиппович – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры теоретической и прикладной механики; проректор Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. 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 Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: надёжность и живучесть пространственных стержневых конструкций повышенной ответственности, оптимальное проектирование шарнирно-стержневых конструкций покрытий.

Кашенко Маргарита Павловна – старший преподаватель кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: прочность, надежность пространственных стержневых систем; купольные конструкции.

Зубенко Анна Васильевна – кандидат технических наук; доцент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: исследование воздействия ветровой нагрузки на сооружения, имеющие круговую цилиндрическую поверхность, численные методы расчета тонких оболочек положительной гауссовой кривизны.

Information about the authors

Mushchanov Vladimir F. – D. Sc. (Eng.), Professor; Professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vicerector of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Honored Builder of the DPR. Scientific interests: the reliability theory, analyses, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.

Orzhhevovsky Anatoly N. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Department of the Theoretical and Applied Mechanics, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: reliability and survivability of spatial rod structures of increased responsibility, optimal design of hinge-rod structures of coatings.

Kashchenko Margarita P. – Senior Lecture of the Department of the Theoretical and Applied Mechanics Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: strength, reliability of spatial rod systems; dome structures

Zubenko Anna V. – Ph. D. (Eng.) candidate of technical sciences; Associate Professor of the Department of the Theoretical and Applied Mechanics, Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. 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.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена после рецензирования 17.06.2024; принята к публикации 21.06.2024.

The article was submitted 03.06.2024; approved after reviewing 17.06.2024; accepted for publication 21.06.2024.