

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕГЛАМЕНТИРУЕМОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ СТАЛЬНОЙ СТЕРЖНЕВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПОВЫШЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ ПОКРЫТИЯ СК «ИЛЬИЧЕВЕЦ» В Г. МАРИУПОЛЕ

В.Ф. МУЩАНОВ¹, д-р техн. наук
А.Н. ОРЖЕХОВСКИЙ¹, канд. техн. наук
И.М. ГАРАНЖА^{2,✉}, канд. техн. наук
А.В. ТАНАСОГЛО², канд. техн. наук
С.Г. МИСТЮКОВА²

¹ ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (ДонНАСА), ул. Державина, д. 2, г. Макеевка, 286123, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Статья рассматривает проблемы анализа склонности уникальных стержневых конструкций и конструкций повышенной ответственности к прогрессирующему обрушению, а также методику анализа надежности данных конструкций.

Цель. Разработка алгоритма оценки склонности уникальных конструкций повышенной ответственности к лавинообразному обрушению в рамках различных расчетных нагрузок.

Материалы и методы. Рассматривается алгоритм вычисления численных показателей надежности конструкции. В частности, анализируются характеристики безопасности. Определяются верхний численный критерий надежности, характеризующий вероятность отказа всей группы наиболее ответственных элементов, и нижний уровень надежности – минимальное значение, характеризующее надежность стержня из группы наиболее ответственных элементов конструкции. Предложенные методики реализованы на языке программирования MATLAB в виде авторского программного комплекса. Произведена верификация предложенной методики при разработке проекта восстановления СК «Ильичевец» в г. Мариуполе.

Результаты. Разработанная методика позволяет определить группу наиболее ответственных элементов системы, разрушение которых неминуемо вызовет начало прогрессирующего обрушения, а не производить расчеты путем слепого перебора. Предложена численная характеристика склонности конструкции к лавинообразному обрушению – $\Delta\beta$ (резерв живучести системы).

Выводы. Результаты расчетов показали практически полное соответствие полученных теоретических результатов с данными, зафиксированными в ходе обследования конструкций покрытия СК «Ильичевец» в г. Мариуполе, что свидетельствует о корректности предлагаемых авторами алгоритмов вычисления численных показателей надежности конструктивных элементов.

Ключевые слова: вероятность отказа, геометрическая нелинейность, лавинообразное обрушение, конструктивная нелинейность, критерии надежности, прогрессирующее обрушение, уникальные конструкции

Для цитирования: Мушанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Гаранжа И.М., Танасогло А.В., Мистюкова С.Г. Обеспечение регламентируемого уровня надежности стальной стержневой конструкции повышенной ответственности на примере покрытия СК «Ильичевец» в г. Мариуполе. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;46(3):75–89. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3\(46\)-75-89](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3(46)-75-89)

Вклад авторов

Мушанов В.Ф., Оржеховский А.Н. – идея, концепция исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Гаранжа И.М., Танасогло А.В., Мистюкова С.Г. – концепция исследования, написание исходного текста, обработка материала, итоговые выводы.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.07.2025

Поступила после рецензирования 01.08.2025

Принята к публикации 07.08.2025

ENSURING THE REGULATED RELIABILITY LEVEL OF STEEL BAR STRUCTURES WITH INCREASED LEVEL OF RESPONSIBILITY ON THE EXAMPLE OF THE ROOF OF THE ILYICHEVETS SPORTS COMPLEX IN MARIUPOL

V.F. MUSHCHANOV¹, Dr. Sci. (Engineering)
A.N. ORZHEKHOVSKIY ¹, Cand. Sci. (Engineering)
I.M. GARANZHA^{2,✉}, Cand. Sci. (Engineering)
A.V. TANASOGLO², Cand. Sci. (Engineering)
S.G. MISTYUKOVA²

¹ Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Derzhavin str., 2, Makeevka, 286123, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

Abstract

Introduction. The article focuses on the challenges of analyzing the susceptibility of unique bar structures and structures with increased level of responsibility to progressive collapse, as well as the methodology for analyzing the reliability of these structures.

Aim. To develop an algorithm for assessing the susceptibility of unique structures with increased level of responsibility to avalanche collapse under various calculation loads.

Materials and methods. The algorithm for calculating numerical indicators of structural reliability, in particular, safety characteristics, is considered. The upper numerical reliability criterion, which characterizes the failure probability of the entire group of the most responsible elements, is determined, along with the lower reliability level, i.e., the minimum value characterizing the reliability of a rod from the group of the most responsible elements of the structure. The proposed methods are implemented in the MATLAB programming language in the form of an author software. The verification of the proposed method was carried out in the design of the restoration project for the Ilyichevets sports complex in Mariupol.

Results. The methods proposed provide for determining the group of the most responsible elements of the system, the failure of which will inevitably cause the onset of progressive collapse, rather than performing calculations by blind trial and error. A numerical characteristic of the susceptibility of a structure to avalanche collapse, $\Delta\beta$ (system survivability reserve), is proposed.

Conclusions. The calculation results proved that the theoretical results obtained were nearly completely consistent with the data recorded during the inspection of the roof structures of the Ilyichivets sports complex in Mariupol, thus confirming the accuracy of the proposed algorithms for calculating the numerical reliability indicators of structural elements.

Keywords: probability of failure, geometric nonlinearity, avalanche collapse, structural nonlinearity, reliability criteria, progressive collapse, unique structures

For citation: Mushchanov V.F., Orzhekhovskiy A.N., Garanzha I.M., Tanasoglo A.V., Mistyukova S.G. Ensuring the regulated reliability level of steel bar structures with increased level of responsibility on the example of the roof of the Ilychevets sports complex in Mariupol. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;46(3):75–89. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3\(46\)-75-89](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3(46)-75-89)

Authors contribution statement

Mushchanov V.F., Orzhekhovskiy A.N. – idea, research concept, writing of the original text, final conclusions. Garanzha I.M., Tanasoglo A.V., Mistyukova S.G. – research concept, writing of the original text, processing of material, final conclusions.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 10.07.2025

Revised 01.08.2025

Accepted 07.08.2025

Введение

Последние десять лет наблюдается четкая тенденция на все большее ужесточение требований к строительным конструкциям в вопросе обеспечения надежности и устойчивости к лавинообразному обрушению. Это обусловливается увеличивающейся вероятностью террористических актов, использованием новых современных, но при этом не столь хорошо изученных материалов и конструктивных решений. В связи с этим ведутся разработки новых нормативных документов в области обеспечения надежности строительных конструкций. На данный момент результатом, суммирующим наработки по этим вопросам, стали нормативные документы, позволяющие обеспечивать заданный нормативный уровень надежности и предотвращать возможные сценарии развития лавинообразного обрушения строительных систем [1–5]. Приведенная нормативная база, бесспорно, выполняет возложенный на нее функционал при проектировании конструкций массового строительства. Но при обеспечении требуемого уровня надежности уникальных конструкций или определении склонности к лавинообразному разрушению возникает ряд спорных моментов, требующих уточнения и доработки.

Еще не следует забывать об оценке реального уровня надежности уже эксплуатируемых конструкций. Данный вопрос возникает при проведении различного рода обследований и освидетельствований конструкций промышленного и гражданского назначений. Как правило, после проведения обследования разрабатываются технические решения на усиление и устранение дефектов, а также повреждений. После проведения ремонтных работ конструкция рассматривается как полностью удовлетворяющая требованиям надежности. При этом уровень надежности усиленной системы не анализируется. В случае уникальных конструкций или конструкций, имеющих повышенный уровень ответственности (разрушение которых приведет к массовым жертвам или повлечет за собой значительные материальные потери), данный подход может не обеспечить минимально требуемого уровня надежности. Также следует отметить, что многие эксплуатируемые здания и сооружения были возведены во время, когда надежности и склонности к прогрессирующему разрушению уделялось значительно меньше внимания. При этом, анализируя данные аварийности, приведенные в различных источниках [6–12], можно с уверенностью сказать о разрушении по лавинообразному сценарию большинства рассмотренных случаев.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о необходимости разработки понятного для инженера алгоритма оценки надежности строительной системы, базирующегося на вычислении численных показателей надежности. Также требует уточнения и конкретизации методика расчета склонности конструкции к лавинообразному обрушению.

Анализ исследования

На данный момент прослеживается явная тенденция к постепенному отказу от соблюдения обязательных нормативных требований в строительной отрасли. Подтверждением выступает постановление Правительства РФ № 914 [13]. В нем вносятся изменения в постановление Правительства РФ № 815 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [14].

Примечательным становится факт исключения из «Обязательного перечня» всех СП, кроме ГОСТ 27751-2014 [1], СП 20.13330.2016 [15], СП 28.13330.2017 [16], СП 131.13330.2020 [17], СП 59.13330.2020 [18].

Целью данного постановления является снижение нагрузки на бизнес. При этом все большей становится статистика обрушений зданий и сооружений. По сути, львиная доля вопросов обеспечения прочности, жесткости, долговечности и тем более надежности ложится на заказчика, выдающего техническое задание, в большинстве случаев некомпетентного в этих вопросах и руководствующегося, как правило, исключительно экономическими критериями, и проектную организацию.

Некоторые исследования, упоминающие надежность, рассматривают в большей мере вопросы прочности и пригодности к нормальной эксплуатации строительных конструкций [6, 19, 20]. По сути, надежность конструкции считается обеспеченной, если все ее элементы исправно функционируют. Количественная оценка запаса надежности системы не производится.

В работах, затрагивающих данный вопрос с позиции теории надежности строительных конструкций, который подразумевает вероятностный подход, в основном рассматриваются

системы, состоящие из одного или небольшого количества элементов [21–23]. Это объясняется сложностью необходимых стохастических расчетов для определения численных характеристик надежности много раз статически неопределимых систем. При этом в некоторых случаях для простых конструкций могут использовать аналитические методы, которые практически невозможно применять для сложных многоэлементных конструкций.

С надежностью строительных конструкций напрямую связана склонность системы к лавинообразному обрушению. Чем выше надежность, тем меньше вероятность развития прогрессирующего обрушения конструкции. Вопрос обеспечения устойчивости к прогрессирующему обрушению стал подниматься строителями относительно недавно, но уже изучался, и результатом этих наработок стал СП 385.1325800.2018 [4]. В рамках этого документа даны рекомендации к определению склонности конструкций к лавинообразному обрушению, но они в большей мере касаются типовых систем массового строительства. К тому же вызывает настороженность применение рекомендуемых коэффициентов динамичности при исключении из работы элементов для получения вторичной расчетной схемы. Как правило, в расчетах подобного рода он принимается равным двум, что не совсем соответствует реальной картине разрушения малоуглеродистой стали. Применение двойки обосновано при хрупком разрушении, например железобетонных конструкций, но не для стальных конструкций, особенно материал которых имеет площадку текучести. Работы с вопросами расчета конструкции на лавинообразное обрушение в основном рассматривают частные случаи применения методики из СП для различного рода конструкций, а также вопросы технического характера при использовании уже готовых программных комплексов [24–27]. Следовательно, в методике расчета присутствует некоторая неоднозначность, требующая уточнения и доработки.

Целью данной работы является апробация предложенного алгоритма вычисления численных показателей надежности на конструкциях покрытия повышенного уровня ответственности СК «Ильичевец», расположенного в г. Мариуполе.

Объектом исследования запаса надежности и анализа склонности системы к лавинообразному обрушению выступает конструкция покрытия СК «Ильичевец», расположенного в г. Мариуполе.

Предмет исследования – методика анализа текущего уровня надежности стальных стержневых конструкций.

Основной материал

Авторы предлагают методику оценки уровня надежности металлических стержневых конструкций. В качестве основного критерия анализа используются численные характеристики надежности. В частности, характеристика безопасности β , она же дальность отказа. Методика позволяет определять верхний (максимальный $\beta_{\max}$) и нижний (минимальный $\beta_{\min}$) уровни надежности сложных многоэлементных стальных стержневых конструкций. Так как определение численных характеристик надежностей довольно сложная задача, то первоначально предлагается определить группу наиболее ответственных элементов системы с целью проведения вероятностных расчетов исключительно для нее. Для остальных элементов системы применяется классический детерминированный подход. С этой целью для наиболее опасного расчетного случая загрузки (если таких несколько, то расчет проводится для каждого из них по отдельности) осуществляется дополнительное пошаговое

догружение конструкции временной нагрузкой с фиксированной величиной шага. На каждом шаге догружения осуществляется геометрически нелинейный расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции. Учитываются напряжения и деформации системы, полученные на предыдущих шагах догружения. Если после этого все элементы удовлетворяют требованиям прочности, то осуществляется следующий шаг. Если напряжения в элементе превышают предел текучести, то он считается вышедшим из работы и исключается из расчетной схемы, а далее опять производится пересчет НДС для анализа перераспределения усилий для скорректированной расчетной схемы. Может получиться, что дополнительные усилия приведут к вылету рядом расположенных стержней, а они – последующих, тогда начнется прогрессирующее разрушение. Не исключены этапы стабилизации конструкции после вылета и перераспределения усилий, когда лавинообразного разрушения не наблюдается и система способна дальше воспринимать эту нагрузку. Таким образом формируется группа наиболее ответственных элементов. Надежность этой группы характеризует надежность всей конструкции. Параллельно с определением наиболее ответственных элементов можно оценить склонность системы к лавинообразному обрушению по количеству этапов стабилизации и шагов догружения системы.

В дальнейшем характеристики надежности вычисляются для группы наиболее ответственных элементов, определенных на предыдущем этапе. В основе вероятностного расчета лежит метод Монте-Карло. При этом конструкция многократно обчисляется. Для каждого расчета генерируются значения стохастических параметров системы для группы наиболее ответственных элементов и производится расчет НДС методом конечных элементов. Параметры элементов, не входящих в эту группу, рассматриваются как детерминированные величины. Таким образом определяются две величины: минимальный уровень надежности конструкции – $\beta_{\min}$ (минимальное значение характеристики безопасности элементов из группы наиболее ответственных), максимальный уровень – $\beta_{\max}$ (характеристика безопасности всей группы наиболее ответственных элементов при условии параллельной работы). Реальная надежность конструкции будет находиться между этими двумя значениями. Используя данный алгоритм, возможно выявить слабые с точки зрения надежности места конструкции и произвести их локальное усиление, а не бездумно давать одинаковый запас несущей способности для всей конструкции. В результате ряда повторных усилений (увеличение поперечного сечения) элементов, неудовлетворяющих требованиям надежности, достигается соответствие минимально требуемому уровню надежности. Также методика позволяет выполнять комплексную оценку надежности всей конструкции.

Авторы предлагают анализировать склонность конструкции к лавинообразному обрушению посредством вычисления $\Delta\beta$ (резерв живучести системы), характеризующего разницу в вероятности наступления двух событий:

- отказ одного из наиболее ответственных элементов;
- отказ всей группы наиболее ответственных элементов, который повлечет за собой развитие прогрессирующего обрушения конструкции.

$$\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min}. \quad (1)$$

Данная величина позволит численно оценить склонность конструкции к лавинообразному обрушению, а также возможно ли ее применение при сравнении различных конструктивных решений усилений и т. д.

Более подробно приведенная методика описана в работах [28–30].

Апробацию предложенной методики провели в рамках обследования и разработки проектных решений восстановления несущих конструкций покрытия СК «Ильичевец» в г. Мариуполе (Донецкая Народная Республика).

Основные несущие конструкции представлены арками сквозного сечения с затяжками (рис. 1). Перекрываемый пролет в осях Г–Х составил 95 метров, а общая протяженность покрытия в осях 4/1–26/1 составила 131,4 метра.

В 2022 году в ходе освободительных боев спортивный комплекс подвергся обстрелу из минометов и получил ряд критических повреждений несущих конструкций. В некоторых местах прямого попадания снарядов остаточная площадь сечения составила менее 20% (рис. 2).

Наряду с классическими расчетами НДС конструкции для выполнения проектно-сметной документации осуществлялся анализ параметров надежности и склонности системы к прогрессирующему обрушению. Следует отметить, что потребность в оценке возможности возникновения лавинообразного разрушения стояла крайне остро, так как повреждения были весьма существенными и могли привести к данному сценарию.

Приведенный выше алгоритм реализован на языке программирования MATLAB. Вычисление характеристик надежности выполнялось в авторском программном комплексе, разработанном на кафедре теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «ДонНАСА».

Верификация предложенной методики проводилась путем расчета трех схем. В качестве первой рассматривалась система с повреждениями, анализировалась склонность конструкции к лавинообразному обрушению и характеристики надежности (рис. 3). В качестве нагрузки выступает снеговая нагрузка, собственный вес конструкции, вес технологических ходовых мостиков, полезная нагрузка на ходовые мостики.

График выхода элементов покрытия приведен на рис. 4. Для определения наиболее ответственных элементов осуществлялось дополнительное поэтапное пригружение конструкции с шагом в 20 кН.

Вторая схема получена для уже усиленной конструкции. Усиление производилось путем устройства стальных накладок. В нескольких случаях потребовалась полная замена узлов или отдельных элементов. Более подробно конструктивные усиления описаны

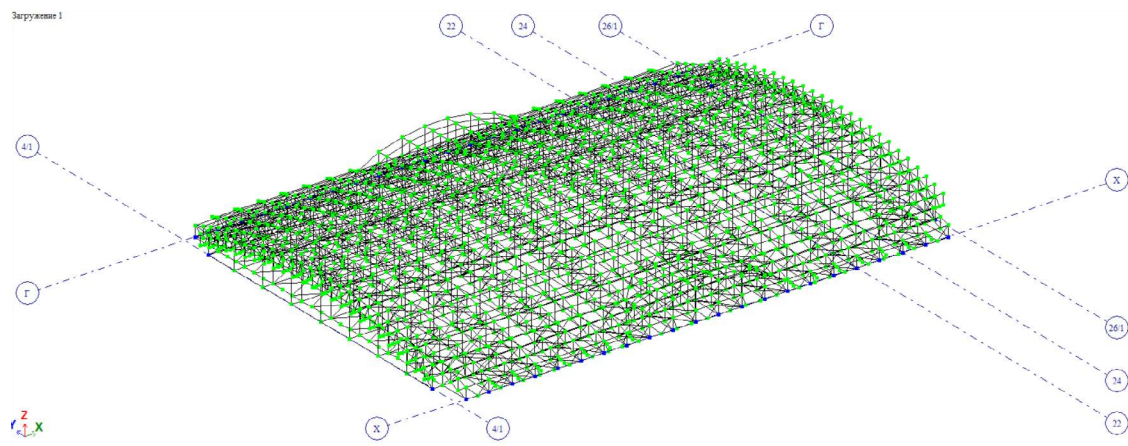


Рис. 1. Расчетная схема конструкций покрытия СК «Ильичевец»
Fig. 1. Calculation scheme of the roof structures of the Ilyichevets sports complex



Рис. 2. Повреждения арок с затяжкой сквозного сечения конструкций покрытия СК «Ильичевец»: *а* – разрушение нижнего пояса арки сквозного сечения по оси 24; *б* – повреждение стойки арки сквозного сечения по оси 24; *в* – повреждение верхнего пояса арки

Fig. 2. Damage to arches with tied-in cross-sections of the roof structure of the Ilyichevets sports complex: *a* – destruction of the lower chord of the arch of cross-section along axis 24; *b* – damage to the arch stand of cross-section along axis 24; *c* – damage to the upper chord of the arch

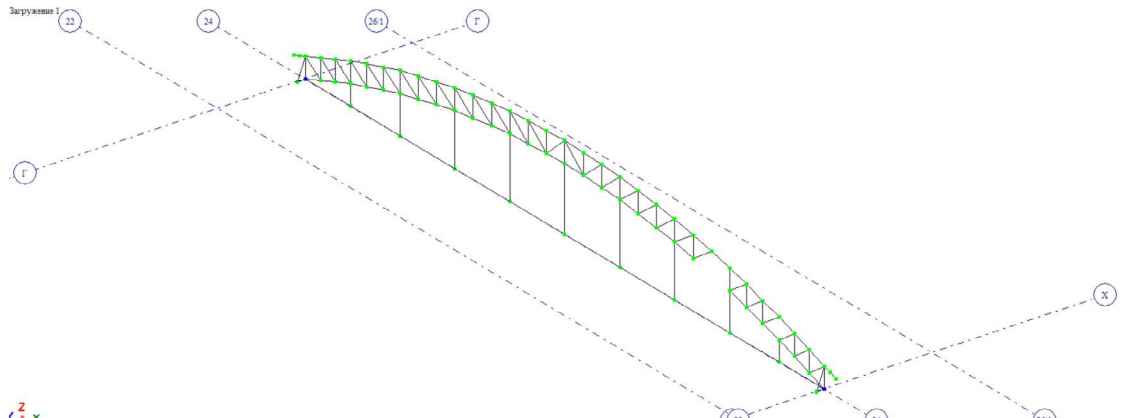


Рис. 3. Повреждения арки по оси 24
Fig. 3. Damage to the arch along the axis 24

в источнике [31]. В третьей расчетной схеме отсутствовали повреждения, действовали расчетные нагрузки совместно с аварийными воздействиями. В качестве таковых рассматривались импульсные взрывные воздействия, моделирующие разрушающее воздействие. Для третьей расчетной схемы анализировалась только картина отказа элементов системы.

Для первых двух расчетных ситуаций (первая и вторая расчетные схемы) результаты характеристик надежности приведены в табл. 1.

При расчете третьей схемы с воздействием аварийных нагрузок полученная картина разрушений приблизительно соответствовала реальному характеру повреждения конструкций покрытия. Это подтверждает корректность работы предложенного алгоритма расчета.

Анализируя полученные данные, можно отметить, что покрытие изначально обладало достаточным запасом надежности и за счет этого не было склонно к развитию прогрессирующего обрушения. Особенно наглядно это представлено на графике выхода элементов из работы (рис. 4).

Таблица 1

Характеристики безопасности рассматриваемых расчетных схем

Table 1

Safety characteristics of the considered calculation schemes

Расчетная схема	$\beta_{\max}$	$\beta_{\min}$
Первая	7,091	2,424
Вторая	10,6	5,9

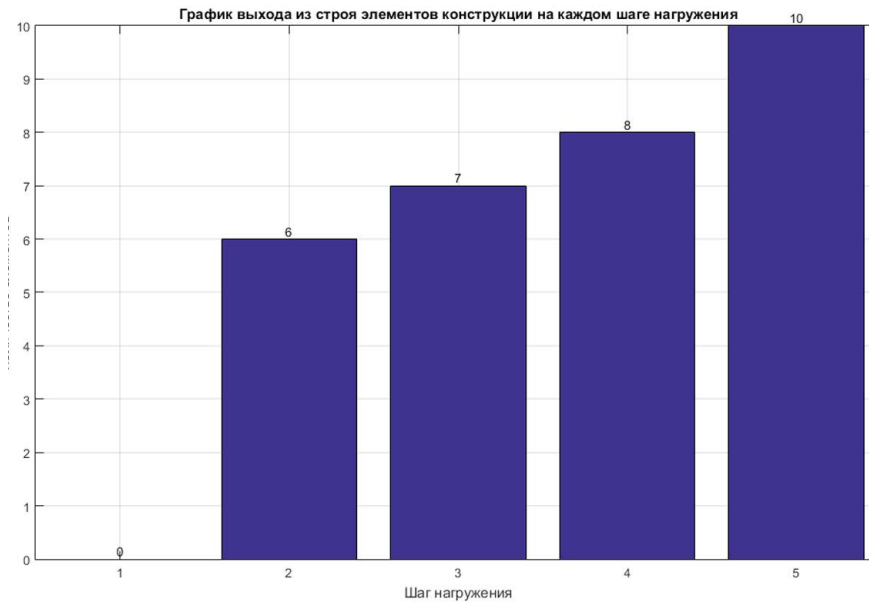


Рис. 4. График выхода из работы элементов покрытия первой расчетной схемы
Fig. 4. Failure schedule for the roof elements used in the first calculation scheme

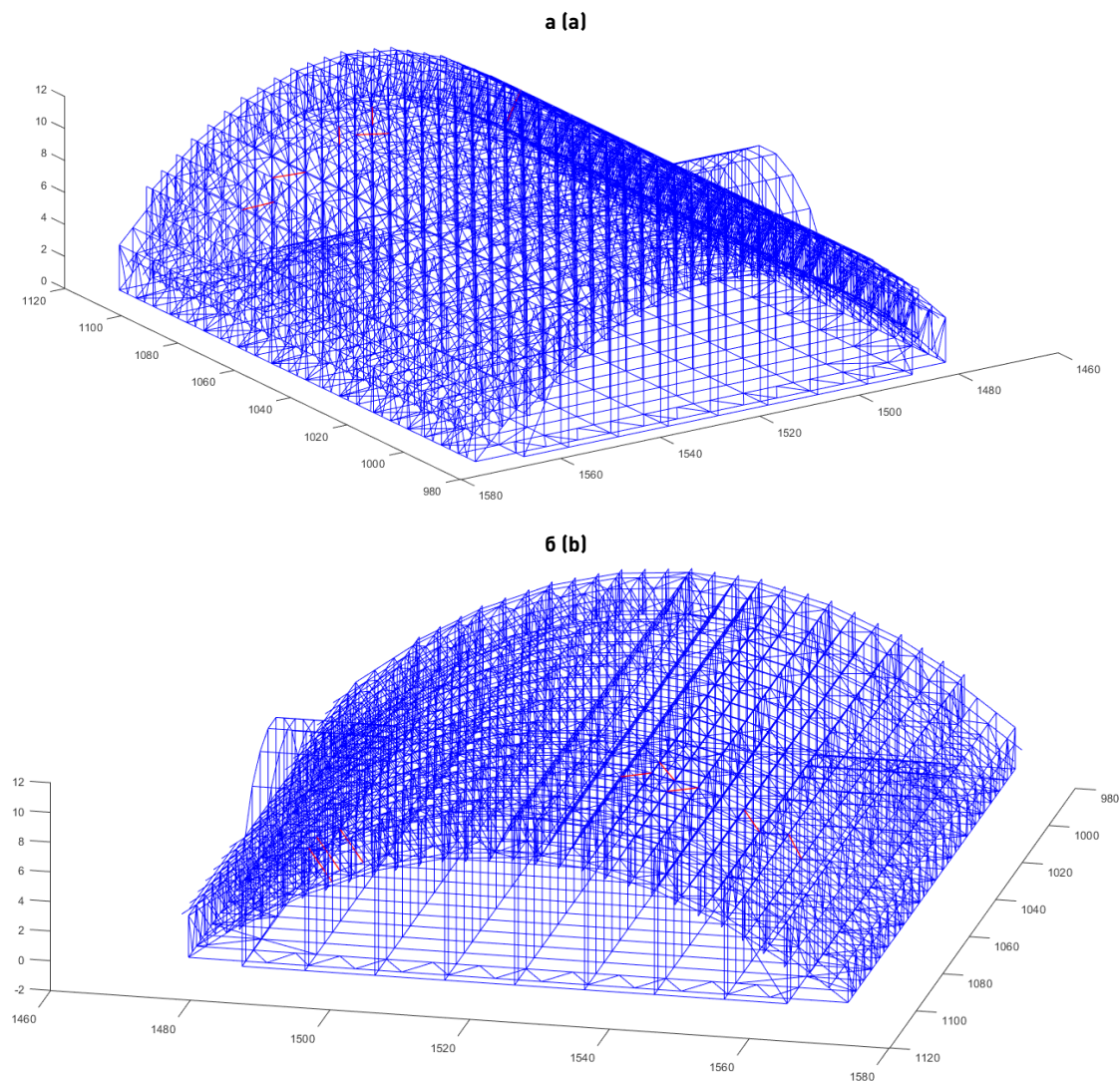


Рис. 5. Элементы, вылетевшие из работы: *а* – второй шаг пригрузки; *б* – пятый шаг пригрузки
Fig. 5. Failed elements: *a* – second step of loading; *b* – fifth step of loading

Начиная со второго шага пригрузки, из работы вылетают небольшие группы стержней (рис. 5*а*), но внутренние усилия перераспределяются, а прогрессирующее обрушение не развивается (рис. 5*б*).

Выводы

1. Предложен алгоритм оценки уникальных конструкций или конструкций повышенной ответственности к лавинообразному обрушению. Алгоритм позволяет в рамках рассматриваемого нагружения обоснованно определять элементы, разрушение которых неминуемо приведет к лавинообразному разрушению всей конструкции.

2. Предложен алгоритм вычисления верхней $\beta_{\max}$ и нижней $\beta_{\min}$ границ надежности уникальных стержневых конструкций или конструкций повышенной ответственности.

3. Предложена величина резерва живучести $\Delta\beta$, численно характеризующая склонность конструкции к прогрессирующему обрушению.

4. Предложенные алгоритмы определения склонности системы к прогрессирующему обрушению и вычисления численных характеристик надежности конструкции апробированы при разработке проекта усиления уникальных конструкциях покрытия СК «Ильичевец» в г. Мариуполе. В ходе разработки и реализации проекта усиления наблюдалось практически полное соответствие полученных теоретических результатов с натурным обследованием, что свидетельствует о корректности предложенных алгоритмов и разработанного расчетного программного комплекса.

Список литературы

1. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2015.
2. ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности. Москва: Стандартинформ; 2016.
3. EN 1990:2002+A1. Eurocode – Basis of structural design [internet]. Brussels : Management Centre; 2002. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf>.
4. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2018.
5. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия (с Изменением № 1) [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/555600219> (дата обращения: 09.03.2025).
6. *Zhi X., Li W., Fan F., [et al.]*. Influence of initial geometric imperfection on static stability of single-layer reticulated shell structure. *Spatial Structures*. 2021;27:7. (In Chinese). <https://doi.org/10.13849/j.issn.1006-6578.2021.01.009>.
7. *Li H., Wang C., Han J.* Research on Effect of Random Initial Imperfections on Bearing Capacity of Single-Layer Spherical Reticulated Shell. *Industrial Construction*. 2018;48:23–27. (In Chinese).
8. *Liu H., Zhang W., Yuan H.* Structural stability analysis of single-layer reticulated shells with stochastic imperfections. *Engineering Structures*. 2016;124:473–479. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.046>.
9. *Xin T., Zhao J., Cui C., Duan Y.* A non probabilistic time_variant method for structural reliability analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2020;234(5):664–675. <https://doi.org/10.1177/1748006X20928196>.
10. *Yang M., Zhang D., Han X.* New efficient and robust method for structural reliability analysis and its application in reliability_based design optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020;366:113018. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113018>.
11. *Fu X., Li H.-N., Li G., Dong Z.-Q., Zhao M.* Failure Analysis of a Transmission Line Considering the Joint Probability Distribution of Wind Speed and Rain Intensity. *Engineering Structures*. 2021;233:111913. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111913>.
12. *Fu X., Wang J., Li H.-N., Li J.-X., Yang L.-D.* Full-scale Test and its Numerical Simulation of a Transmission tower under Extreme Wind Loads. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019;190:119–133. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.04.011>.
13. Постановление Правительства РФ № 914 от 20 мая 2022 года «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2021 г. № 815 [интернет]. Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/141098/>.
14. Постановление Правительства РФ от 28 мая 2021 г. № 815 "Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический

регламент о безопасности зданий и сооружений», и о признании утратившим силу постановления Правительства Российской Федерации от 4 июля 2020 г. № 985» [интернет]. Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/134485/>.

15. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* [с Изменениями № 1–4] [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=470938>.

16. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03-11-85 [с Изменениями № 1–3] [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=479525>.

17. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* [с Изменением № 1] [интернет]. Режим доступа: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&baseC=101&RegNum=54&DocOnPageCount=15&page=5&id=239682>.

18. СП 59.13330.2020. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. Актуализированная редакция СНиП 35-01-2001 [с изменением № 1] [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=491916>.

19. Крупенина Д.С. Надежность строительных конструкций на этапе проектирования. Молодой ученый. 2020; (14):93–94.

20. Бармотин А.А., Дмитренко Е.А., Волков А.С., Машталер С.Н., Недорезов А.В., Казак К.А., Севостьянов Н.А. Информационное моделирование при выполнении обследования зданий. Современное промышленное и гражданское строительство. 2024;20(2):93–109.

21. Долганов А.В. Оптимизация железобетонных сооружений и конструкций по критерию надежности [диссертация]. Москва; 2000.

22. Rui X., Ji K., Li L., McClure G. Dynamic Response of Overhead Transmission Lines with Eccentric Ice Deposits Following Shock Loads. IEEE Transactions on Power Delivery. 2017;32(3):1287–1294. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2501029>.

23. Сенькин Н.А., Филимонов А.С. Взаимодействие конструктивных элементов в линейной цепи воздушной линии электропередачи. Жилищное строительство. 2024;(1-2):101–108. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-1-2-101-108>.

24. Ведяков И.И., Еремеев П.Г., Одесский П.Д., Попов Н.А., Соловьев Д.В. Расчет строительных конструкций на прогрессирующее обрушение: нормативные требования. Промышленное и гражданское строительство. 2019;(4):16–24. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.04.16-24>.

25. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. Engineering Structures. 2018;173:122–149. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.06.082>.

26. Zheng L., Wang W., Li H. Progressive collapse resistance of composite frame with concrete-filled steel tubular column under a penultimate column removal scenario. Journal of Constructional Steel Research. 2022;189:107085. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2021.107085>.

27. Перельмутер А.В., Криксунов Э.З., Мосина Н.В. Реализация расчета монолитных жилых зданий на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение в среде вычислительного комплекса «SCAD Office». Инженерно-строительный журнал. 2009;(2):13–18.

28. Мушанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Цепляев М.Н., Мушанов А.В. Комплексный подход к оценке надежности пространственных металлических конструкций. Строительство: наука и образование. 2024;14(1):6–23. <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.1>.

29. Мушанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Кащенко М.П., Зубенко А.В. Надежность пространственных стержневых конструкций усеченных большепролетных куполов. Металлические конструкции. 2023;29(1):47–61.

30. Мушанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Мушанов А.В., Цепляев М.Н. Надежность пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности. Вестник МГСУ. 2024;19(5):763–777. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.5.763-777>.

31. Миронов А.Н., Смирнова Н.С., Оленич Е.Н., Мушанов А.В. Натурное освидетельствование арочных металлических конструкций покрытия спорткомплекса «Ильичевец», г. Мариуполь. Металлические конструкции. 2023;29(3):153–166.

References

1. State Standard 27751-2014. Reliability for constructions and foundations. General principles. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russian).
2. State Standard R ISO 2394-2016. Building constructions. General principles on reliability. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. (In Russian).
3. EN 1990:2002+A1. Eurocode – Basis of structural design [internet]. Brussels : Management Centre; 2002. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf>.
4. SP 385.1325800.2018. Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
5. SP 296.1325800.2017. Buildings and structures. Accidental actions (with Amendment No. 1) [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/555600219> (accessed 09 March 2025). (In Russian).
6. Zhi X., Li W., Fan F., [et al.]. Influence of initial geometric imperfection on static stability of single-layer reticulated shell structure. *Spatial Structures*. 2021;27:7. (In Chinese). <https://doi.org/10.13849/j.issn.1006-6578.2021.01.009>.
7. Li H., Wang C., Han J. Research on Effect of Random Initial Imperfections on Bearing Capacity of Single-Layer Spherical Reticulated Shell. *Industrial Construction*. 2018;48:23–27. (In Chinese).
8. Liu H., Zhang W., Yuan H. Structural stability analysis of single-layer reticulated shells with stochastic imperfections. *Engineering Structures*. 2016;124:473–479. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.06.046>.
9. Xin T., Zhao J., Cui C., Duan Y. A non probabilistic time variant method for structural reliability analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2020;234(5):664–675. <https://doi.org/10.1177/1748006X20928196>.
10. Yang M., Zhang D., Han X. New efficient and robust method for structural reliability analysis and its application in reliability based design optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020;366:113018. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113018>.
11. Fu X., Li H.-N., Li G., Dong Z.-Q., Zhao M. Failure Analysis of a Transmission Line Considering the Joint Probability Distribution of Wind Speed and Rain Intensity. *Engineering Structures*. 2021;233:111913. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111913>.
12. Fu X., Wang J., Li H.-N., Li J.-X., Yang L.-D. Full-scale Test and its Numerical Simulation of a Transmission tower under Extreme Wind Loads. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019;190:119–133. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.04.011>.
13. RF Government Resolution No. 914 from May 20, 2022 "On Amendments to the Decree of the Government of the Russian Federation of May 28, 2021 No. 815 [internet]. Available at: <http://government.ru/docs/all/141098/>. (In Russian).
14. RF Government Resolution of May 28, 2021 No. 815 "On approval of the list of national standards and codes of practice (parts of such standards and codes of practice), the application of which makes it mandatory to ensure compliance with the requirements of the Federal Law "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures", and on recognizing as invalid RF Government Resolution No. 985 of July 4, 2020" [internet]. Available at: <http://government.ru/docs/all/134485/>. (In Russian).
15. SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated version of SNiP 2.01.07-85* (with Amendments No. 1–4) [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=470938>. (In Russian).
16. SP 28.13330.2017. Protection against corrosion of construction. Updated version of SNiP 2.03.11-85 (with Amendments No. 1–3) [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=479525>. (In Russian).
17. SP 131.13330.2020. Building climatology. Updated version of SNiP 23-01-99* (with Amendment No. 1) [internet]. Available at: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&baseC=101&RegNum=54&DocOn-PageCount=15&page=5&id=239682>. (In Russian).
18. SP 59.13330.2020. Accessibility of buildings and structures for persons with reduced mobility. Updated version of SNiP 35-01-2001 (with Amendment No. 1) [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=491916>. (In Russian).
19. Krupenina D.S. Reliability of building structures at the design stage. *Young scientist*. 2020;(14):93–94. (In Russian).

20. Barmotin A.A., Dmitrenko E.A., Volkov A.S., Mashtaler S.N., Nedorezov A.V., Kazak K.A., Sevost'yanov N.A. Information modeling in the performance of building inspection. Modern Industrial and Civil Construction. 2024;20(2):93–109. [In Russian].
21. Dolganov A.V. Optimization of reinforced concrete structures and constructions by the reliability criterion [dissertation]. Moscow; 2000. [In Russian].
22. Rui X., Ji K., Li L., McClure G. Dynamic Response of Overhead Transmission Lines with Eccentric Ice Deposits Following Shock Loads. IEEE Transactions on Power Delivery. 2017;32(3):1287–1294. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2501029>.
23. Senkin N.A., Filimonov A.S. Interaction of Structural Elements in the Overhead Transmission Power Line. Zhilishchnoe Stroitel'stvo. 2024;[1-2]:101–108. [In Russian]. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-1-2-101-108>.
24. Vedyakov I.I., Ereemeev P.G., Odesskiy P.D., Popov N.A., Soloviev D.V. Regulatory Requirements For The Design Of Building Structures For Progressive Collapse. Industrial and civil engineering. 2019;[4]:16–24. [In Russian]. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.04.16-24>.
25. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robust ness of building structures in the 21st century. Engineering Structures. 2018;173:122–149. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.06.082>.
26. Zheng L., Wang W., Li H. Progressive collapse resistance of composite frame with concrete-filled steel tubular column under a penultimate column removal scenario. Journal of Constructional Steel Research. 2022;189:107085. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2021.107085>.
27. Perelmuter A.V., Kriksunov E.Z., Mosina N.V. Implementation of calculation of monolithic residential buildings for progressive (avalanche) collapse in the environment of the computing complex "SCAD Office". Journal of Civil Engineering. 2009;[2]:13–18. [In Russian].
28. Muschanov V.F., Orzhekhovskiy A.N., Tseplyaev M.N., Muschanov A.V. An integrated approach to reliability assessment of spatial metal structures. Construction: Science and Education. 2024;14(1):6–23. [In Russian]. <https://doi.org/10.22227/2305-5502.2024.1.1>.
29. Muschanov V.F., Orzhekhovskiy A.N., Kashchenko M.P., Zubenko A.V. Reliability of spatial rod structures of truncated large-span domes. Metal Constructions. 2023;29(1):47–61. [In Russian].
30. Mushchanov V.F., Orzhekhovskiy A.N., Mushchanov A.V., Tseplyaev M.N. Reliability of spatial rod metal structures of high level of responsibility. Vestnik MGSU. 2024;19(5):763–777. [In Russian]. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.5.763-777>.
31. Mironov A.N., Smirnova N.S., Olenich E.N., Mushchanov A.V. Full-Scale Inspection of Arched Metal Structures Covering the Ilyichevets Sports Complex, Mariupol. Metal Constructions. 2023;29(3):153–166. [In Russian].

Информация об авторах / Information about the author

Владимир Филиппович Муцанов, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе, ДонНАСА, Макеевка

e-mail: mvf@donnasa.ru

Vladimir F. Mushchanov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Vice-Rector for Research, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka

e-mail: mvf@donnasa.ru

Анатолий Николаевич Оржеховский, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, ДонНАСА, Макеевка

e-mail: aorzhehovskiy@bk.ru

Anatoly N. Orzhekhovskiy, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka

e-mail: aorzhehovskiy@bk.ru

Игорь Михайлович Гаранжа✉, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, НИУ МГСУ, Москва

e-mail: garigo@mail.ru

Igor M. Garanzha✉, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal and Timber Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

e-mail: garigo@mail.ru

Антон Владимирович Танасогло, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, НИУ МГСУ, Москва

e-mail: a.v.tan@mail.ru

Anton V. Tanasoglo, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal and Timber Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

e-mail: a.v.tan@mail.ru

Софья Геннадьевна Мистюкова, студент кафедры металлических и деревянных конструкций, НИУ МГСУ, Москва

e-mail: 20042008mis@gmail.com

Sofya G. Mistyukova, Student, Department of Metal and Timber Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

e-mail: 20042008mis@gmail.com

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author