



(25)-0420-1

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

Владимир Филиппович Мушанов¹, Анатолий Николаевич Оржеховский²,
Маргарита Павловна Кащенко³, Николай Владимирович Дудов⁴

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

¹ mcf@donnasa.ru, ² a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru, ³ m.p.kashchenko@donnasa.ru,

⁴ dudov.n.v-zpgs-54b@donnasa.ru

Аннотация. Статья рассматривает проблемы анализа склонности уникальных стержневых конструкций и конструкций повышенной ответственности к прогрессирующему обрушению, а также методику анализа надежности данных конструкций. Авторами предложен алгоритм оценки склонности уникальных конструкций повышенной ответственности к лавинообразному обрушению в рамках рассматриваемого нагружения. Методика позволяет определять элементы системы, разрушение которых неминуемо вызовет начало прогрессирующего обрушения (группа наиболее ответственных элементов системы), а не производить расчеты путем слепого перебора. Предложена численная характеристика склонности конструкции к лавинообразному обрушению – $\Delta\beta$ (резерв живучести системы). Рассматривается алгоритм вычисления численных показателей надежности конструкции. В частности – характеристики безопасности. Определяются верхний (численный критерий надежности характеризующий вероятность отказа всей группы наиболее ответственных элементов) и нижний уровни надежности (минимальное значение характеристики надежности 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 «Ильичёвец» в г. Мариуполь. Результаты расчетов показали практически полное соответствие полученных теоретических результатов с данными зафиксированным в ходе обследования конструкций покрытия спортивного комплекса. Что свидетельствует о корректности предлагаемых алгоритмов и программного комплекса.

Ключевые слова: геометрическая и конструктивная нелинейность, метод конечных элементов, вероятность отказа, лавинообразное обрушение, уникальные конструкции, надежность

Для цитирования: Обеспечение регламентируемого уровня надежности стальной стержневой конструкции повышенной ответственности на примере покрытия СК «Ильичёвец» в г. Мариуполь / В. Ф. Мушанов [и др.]. // *Металлические конструкции*. 2025. Том 31, № 1. С. 35–46. doi: 10.71536/mc.2025.v31n1.4. edn: icqfzg.



Original article

ENSURING A REGULATED LEVEL OF RELIABILITY OF A HIGH-RESPONSIBILITY STEEL CORE STRUCTURE USING THE EXAMPLE OF THE COATING OF THE ILYICHEVETS IC IN MARIUPOL

Vladimir F. Mushchanov ¹, Anatoly N. Orzhehovsky ², Margarita P. Kashchenko ³,
Nikolai V. Dudov ⁴

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

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

⁴dudov.n.v-zpgs-54b@donnasa.ru

Abstract. The article examines the problems of analyzing the propensity of unique core structures and structures of increased responsibility to progressive collapse, as well as the methodology for analyzing the reliability of these structures. The authors propose an algorithm for assessing the propensity of unique structures of increased responsibility to avalanche-like collapse within the framework of the considered loading. The technique allows you to identify the elements of the system, the destruction of which will inevitably cause the onset of progressive collapse (a group of the most critical elements of the system), rather than making calculations by blind iteration. A numerical characteristic of the tendency of the structure to avalanche-like collapse is proposed – $\Delta\beta$ (reserve of survivability of the system). An algorithm for calculating numerical indicators of structural reliability is considered. In particular, the safety characteristics. The upper (numerical reliability criterion characterizing the probability of failure of the entire group of the most critical elements) and lower reliability levels (the minimum value of the reliability characteristic of the rod from the group of the most critical elements) of the structure are determined. The proposed methods are implemented in the MATLAB programming language in the form of an author's software package. The verification of the proposed methodology was carried out during the development of the project for the restoration of the Ilyichevets IC in Mariupol. The calculation results showed almost complete agreement of the theoretical results obtained with the data recorded during the survey of the sports complex's surface structures. This indicates the correctness of the proposed algorithms and software package.

Keywords: geometric and constructive nonlinearity, finite element method, probability of failure, avalanche-like collapse, unique structures, reliability

For citation: Ensuring a regulated level of reliability of a high-responsibility steel core structure using the example of the coating of the Ilyichevets IC in Mariupol / V. F. Mushchanov [et al.]. *Metal Constructions*. 2025;31(1): 35–46. (in Russ.). doi: 10.71536/mc.2025.v31n1.4. edn: icqfzg.

Введение

Последние десять лет наблюдается четкая тенденция на все большее ужесточение требования к строительным конструкциям в вопросе обеспечения надежности и устойчивости к лавинообразному обрушению. Это обуславливается 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 докумен-

ты позволяющие обеспечивать заданный нормативный уровень надежности и предотвращать возможные сценарии развития лавинообразного обрушения строительных систем [1–3]. Приведенная нормативная база бесспорно выполняет возложенные 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.

Также не следует забывать о оценке реального уровня надежности уже эксплуатируемых конструкций. Данный вопрос возникает при

проведении различного рода обследований и освидетельствований конструкций промышленного и гражданского назначения. 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 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 вовремя, когда надежности и склонности к прогрессирующему разрушению уделялось значительно меньше внимания. При этом, анализируя данные аварийности, приведенные в различных источниках [4–6] 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. Так же требует уточнения и конкретизации методика расчета склонности конструкции к лавинообразному обрушению.

Анализ исследований и публикаций

На данный момент прослеживается явная тенденция к постепенному отказу от соблюдения обязательных нормативных требований в строительной отрасли. Подтверждением выступает постановление Правительства РФ № 914 [7], которое вступило в силу 01.09.2022. В нем вносятся изменения в постановление Правительства РФ № 815 (Обязательный перечень) [8]. Примечательным становится факт исключение из Обязательного перечня всех СП, кроме ГОСТ 27751-2014 [1], СП 20.13330.2016 [9], СП 28.13330.2017 [10], СП 131.13330.2020 [11], СП 59.13330.2020 [20]. 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 не компетентного в этих вопросах и руководствующимся, 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 [13]. 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 [4–6; 14]. 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 применить 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 работ стал СП 385.1325800.2018 [3]. 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 площадь текучести. Работы в вопросах расчета конструкции к лавинообразному обрушению в основном рассматривают частные случаи применения методики из СП для различного рода конструкций, а также вопросы технического характера при использовании уже готовых программных комплексов [15; 16]. Следовательно, в методике расчета присутствуют некоторая неоднозначность, требующая уточнения и доработки.

Описание объекта исследований

Объектом исследования запаса надежности и анализа склонности системы к лавинообразному обрушению выступает конструкция покрытия СК «Ильичёвец», расположенного в г. Мариуполь. А также методика анализа текущего уровня надежности стальных стержневых конструкций.

Цель работы

Целью работы является апробация предложенного алгоритма вычисления численных показателей надежности на конструкциях покрытия повышенного уровня ответственности СК «Ильичёвец» расположенного в г. Мариуполь.

Основной материал

Авторы предлагают методику оценки уровня надежности металлических стержневых конструкций. Основным критерием анализа используются численные характеристики надежности. В частности, характеристика безопасности β , она же дальность отказа. Методика позволяет определять верхний (максимальный β_{\max}) и нижний (минимальный β_{\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 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 и 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 обсчитывается. 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 – β_{\min} (минимальное значение характеристики безопасности элементов из

группы наиболее ответственных) и максимальный β_{\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 выявлять 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. Так же методика позволяет выполнять комплексную оценку надежности всей конструкции.

Авторы предлагают анализировать склонность конструкции к лавинообразному обрушению по средствам вычисления $\Delta\beta$ (резерв живучести системы), характеризующий разницу в вероятности наступления 2-х событий:

- отказа 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 ее применение при сравнении различных конструктивных решений усиления и т. д.

Более подробно приведенная методика описана в работе [17].

Численные исследования

Апробацию предложенной методики провели в рамках обследования и разработки проектных решений восстановления несущих конструкций покрытия СК «Ильичёвец» в г. Мариуполь Донецкой Народной Республики. 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

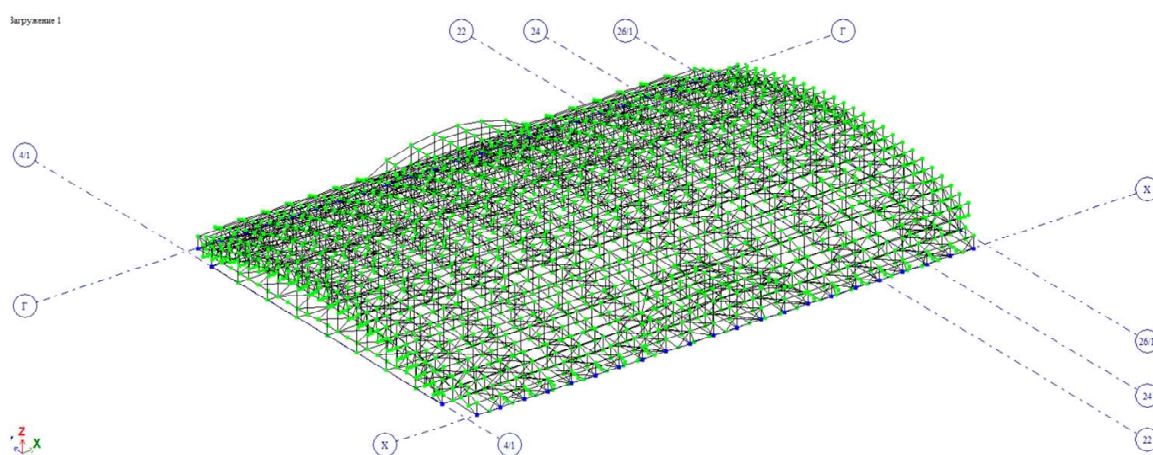


Рисунок 1 – Расчетная схема конструкций покрытия СК «Ильичёвец» в г. Мариуполь.

остро. Так как повреждения были весьма существенными и могли привести к данному сценарию.

Приведенный выше алгоритм реализован на языке программирования MATLAB. Вычисление характеристик надежности выполнялись в авторском программном комплексе, разработанном на кафедре теоретической и прикладной ме-

ханики 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

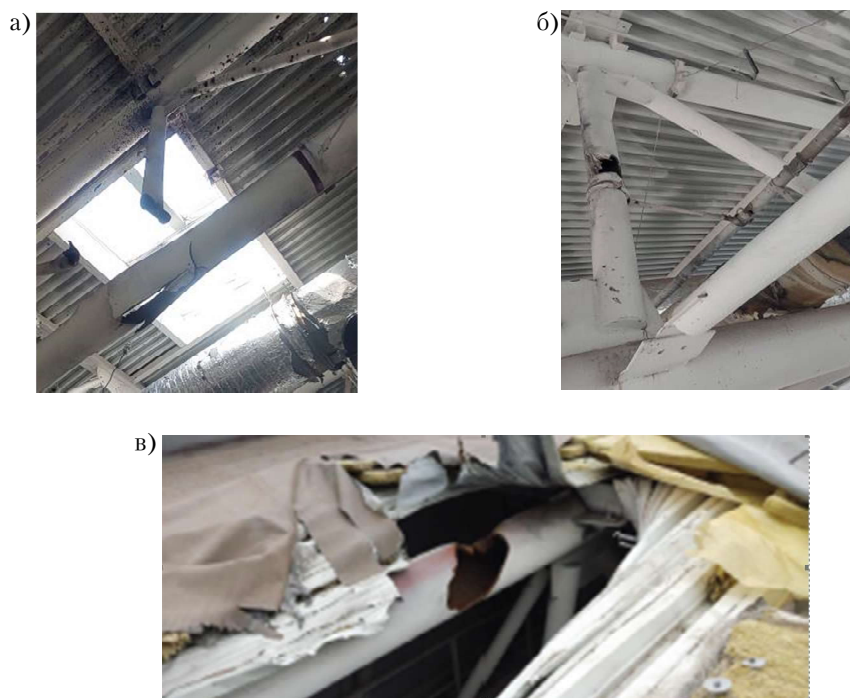


Рисунок 2 – Повреждения арок с затяжкой сквозного сечения конструкций покрытия СК «Ильичёвец»: а) разрушение нижнего пояса арки сквозного сечения по оси «24»; б) повреждение стойки арки сквозного сечения по оси «24»; в) повреждение верхнего пояса арки.

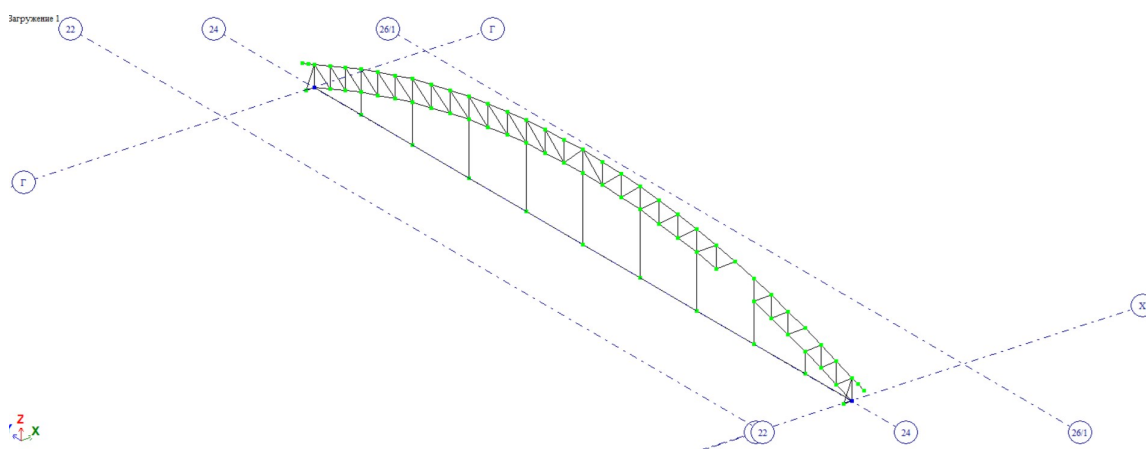


Рисунок 3 – Повреждения арки по оси «24».

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 в источнике [18]. В третьей расчетной схеме отсутствовали повреждения, действовали расчётные 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 таблице.

Анализируя полученные данные, можно отметить, что покрытие изначально обладало дос-

таточным 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). Начиная со второго шага пригружения из работы вылетают небольшие группы стержней, но внутренние усилия перераспределяются и прогрессирующее обрушение не развивается.

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.

Выводы

1. Критический анализ проектной литературы и научных источников в вопросах обеспечения устойчивости конструкции к лавинообразному обрушению позволил выявить ряд спорных моментов требующих уточнения.
2. Предложен алгоритм оценки уникальных конструкций или конструкций повышенной

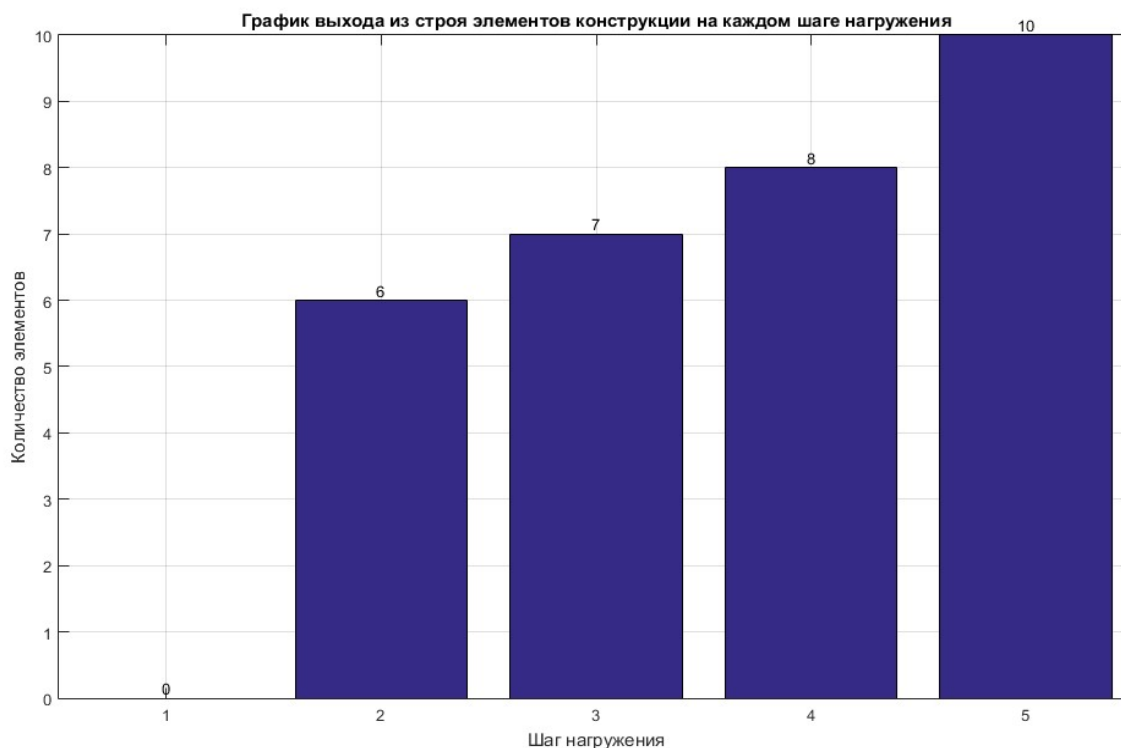


Рисунок 4 – График выхода из работы элементов покрытия первой расчетной схемы.

Таблица. Характеристики безопасности рассматриваемых расчетных схем

Расчетная схема	β_{\max}	β_{\min}
1	7,091	2,424
2	10,6	5,9

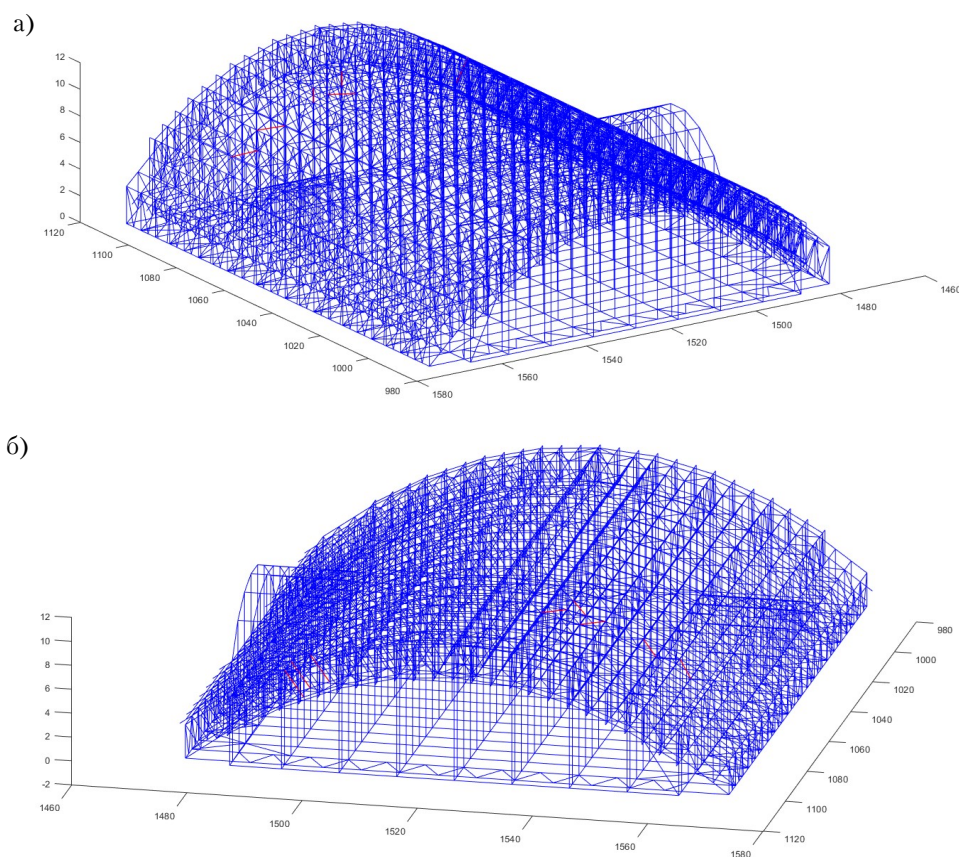


Рисунок 5 – Элементы, вылетевшие из работы: а) второй шаг пригружения; б) пятый шаг пригружения.

ответственности к лавинообразному обрушению. Алгоритм позволяет в рамках рассматриваемого нагружения обоснованно определять элементы разрушения которых неминуемо приведет к лавинообразному разрушению всей конструкции.

- Предложен алгоритм вычисления верхней β_{\max} и нижней β_{\min} границы надежности уникальных стержневых конструкций или конструкций повышенной ответственности.
- Предложена величина резерва живучести $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min}$ численно характеризующая склонность конструкции к прогрессирующему обрушению.

- Предложенные алгоритмы определения склонности системы к прогрессирующему обрушению и вычисления численных характеристик надежности конструкции апробированы при разработке проекта усиления уникальных конструкций покрытия СК «Ильичёвец» 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 источников

1. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2015. 14 с.
2. ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надёжности. М.: Стандартинформ, 2016. 61 с.
3. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2018. 19 с.
4. 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. Vol. 366. P. 113018. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=7846-1060> (дата обращения: 19.02.2025). DOI 10.1016/j.cma.2020.113018. EDN SKNZDI.
5. Failure Analysis of a Transmission Line Considering the Joint Probability Distribution of Wind Speed and Rain Intensity / X. Fu [et al.]. // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 233. P. 111913. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73311833> (дата обращения: 19.02.2025). ISSN 0141-0296. DOI 10.1016/j.engstruct.2021.111913. EDN GFLIYY.
6. Full-Scale Test and its Numerical Simulation of a Transmission Tower under Extreme Wind Loads / X. Fu [et al.]. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2019. Vol. 190. P. 119-133. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38967402> (дата обращения: 19.02.2025). ISSN 0167-6105. DOI 10.1016/j.jweia.2019.04.011. EDN ZBECKH.
7. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2021 г. № 815: постановление Правительства РФ от 20 мая 2022 г. N 914. М., 2022 [Электронный ресурс] // Официальное опубликование правовых актов: [сайт]. 2025. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205240002> (дата обращения: 11.01.2025).
8. 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. N 985. М., 2020 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. 2025. URL: https://exp.mos.ru/upload_local/iblock/015/015e12d74c0b9bcc80b8a2cdfef61b21a/postanovlenie_pravitelstva_rf_ot_28.05.2021_815.pdf (дата обращения: 09.01.2025).
9. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия (с Изменениями № 1, № 2, № 3, № 4). Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. 2025.

References

1. Interstate standard of the Russian Federation (2015), *GOST 27751-2014: Mezhgosudarstvennyj standart. Nadyozhnost' stroitel'ny'x konstrukcij i osnovanij. Osnovny'e polozheniya* [GOST 27751-2014: Reliability for constructions and foundations. General principles], Standartinform, Moscow, Russia.
2. National standard of the Russian Federation (2016), *GOST R ISO 2394-2016: Konstrukcii stroitel'ny'e. Osnovny'e principy nadyozhnosti* [GOST R ISO: Building constructions. General principles on reliability], Standartinform, Moscow, Russia.
3. National Standard Ministry of Construction and Housing and Municipal Services of the Russian Federation (2018), *SP 385.1325800.2018: Zashhita zdaniy i sooruzhenij ot progressiruyushhego obrusheniya. Pravila proektirovaniya. Osnovny'e polozheniya* [SP 385.1325800.2018: Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements], Standartinform, Moscow, Russia.
4. Yang, M., Zhang, D. and Han, X. (2020), "New Efficient and Robust Method for Structural Reliability Analysis and its Application in Reliability-Based Design Optimization", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 366, pp. 113018, available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=7846-1060> (Accessed 19 February 2025). DOI 10.1016/j.cma.2020.113018. EDN SKNZDI.
5. Fu, X., Li, H.N., Li, G., Dong, ZH.Q. and Zhao, M.I. (2021), "Failure Analysis of a Transmission Line Considering the Joint Probability Distribution of Wind Speed and Rain Intensity", *Engineering Structures*, vol. 233, pp. 111913, available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73311833> (Accessed 19 February 2025). ISSN 0167-6105. DOI 10.1016/j.engstruct.2021.111913. EDN GFLIYY.
6. Fu, X., Wang, J., Li, H.N., Li, J.X and Yang, L.D (2019), "Full-Scale Test and its Numerical Simulation of a Transmission Tower under Extreme Wind Loads", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 190, pp. 119-133, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38-967402> (Accessed 19 February 2025). ISSN 0167-6105. DOI 10.1016/j.jweia.2019.04.011. EDN ZBECKH.
7. Government of the Russian Federation (2022), "On Amendments to the Decree of the Government of the Russian Federation dated May 28, 2021 no. 815", available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205240002> (Accessed 11 January 2025).
8. Government of the Russian Federation (2020), "On Approval of the List of National Standards and Sets of Rules (Parts of Such Standards and Sets of Rules), as a Result of Which Compliance with the Requirements of the Federal Law "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures" is ensured on a mandatory basis, and on invalidation of Decree of the Government of the Russian Federation dated July 4, 2020 no. 985", available at: https://exp.mos.ru/upload_local/iblock/015/

- URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения 19.02.2025).
10. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии (с Изменениями № 1, № 2, № 3). Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. 2025. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069587> (дата обращения: 19.02.2025).
 11. СП 131.13330.2020. Строительная климатология (с Изменением № 1, № 2) [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. 2025. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обращения: 19.02.2025).
 12. СП 59.13330.2020. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения (с изменением № 1, № 2, № 3, № 4). Актуализированная редакция СНиП 35-01-2001 [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. 2025. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659328> (дата обращения: 19.02.2025).
 13. Крупенина Д. С. Надежность строительных конструкций на этапе проектирования // Молодой ученый. 2020. N 14 (304). С. 93-94. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42669229> (дата обращения: 19.02.2025). ISSN 2072-0297. EDN EGVUMA.
 14. Dynamic Response of Overhead Transmission Lines with Eccentric Ice Deposits Following Shock Loads / X. Rui [et al.]. // IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. Vol. 32 (99). P. 1287-1294. DOI 10.1109/TPWRD.2015.2501029.
 15. Research and Practice on Progressive Collapse and Robustness of Building Structures in the 21st Century / J. M. Adam [et al.]. // Engineering Structures. 2018. Vol. 173. P. 122-149. URL: <https://iranarze.ir/storage/uploads/2019/01/E10800-IranArze.pdf> (дата обращения: 19.02.2025). DOI 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.06.082.
 16. 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. Vol. 189. P. 107085. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58587799> (дата обращения 19.02.2025). ISSN 0143-974X. DOI 10.1016/j.jcsr.2021.107085. EDN KPXNFC.
 17. Надежность пространственных стержневых конструкций усеченных большепролетных куполов / В. Ф. Мущанов [и др.]. // Металлические конструкции. 2023. Т. 29, N 1. С. 47-61. URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2023-1/st_04_mushchanov_orzhehovsky_kashchenko_zubenko.pdf (дата обращения: 19.02.2025). ISSN 1993-3517.
 18. Натурное освидетельствование арочных металлических конструкций покрытия спорткомплекса "Ильичёвец", г. Мариуполь / А. Н. Миронов [и др.]. // Металлические конструкции. 2023. 015e12d74c0b9bcc80b8a2cdf61b21a/posta-novlenie_pravitelstva_rf_ot_28.05.2021_815.pdf (Accessed 9 January 2025).
 9. Ministry of Construction and Housing and Municipal Services of the Russian Federation (2016), *SP 20.13330.2016: Nagruzki i vozdeystviya* [SP 20.13330.2016: Loads and actions], available at: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (Accessed 19 February 2025).
 10. Ministry of Construction and Housing and Municipal Services of the Russian Federation (2017), *SP 28.13330.2017: Zashhita stroitel'ny'x konstrukcij ot korrozii* [SP 20.13330.2016: Protection against corrosion of construction], available at: <https://docs.cntd.ru/document/456069587> (Accessed 19 February 2025).
 11. Ministry of Construction and Housing and Municipal Services of the Russian Federation (2020), *SP 131.13330.2020: Stroitel'naya klimatologiya* [SP 131.13330.2020: Building climatology], available at: <https://docs.cntd.ru/document/573659358>. (Accessed 19 February 2025).
 12. Ministry of Construction and Housing and Municipal Services of the Russian Federation (2020), *SP 59.13330.2020: Dostupnost' zdaniy i sooruzhenij dlya malomobil'ny'x grupp naseleniya* [SP 59.13330.2020: Accessibility of buildings and structures for persons with reduced mobility], available at: <https://docs.cntd.ru/document/573659328> (Accessed 19 February 2025).
 13. Krupenina, D.S. (2020), "Reliability of Building Structures at the Design Stage", *Young Scientist*, vol. 14 (304), pp. 93-94, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42669229> (Accessed 19 February 2025). ISSN 2072-0297. EDN EGVUMA.
 14. Rui, X., Ji, K., Li, L. and McClure, G. (2015), "Dynamic Response of Overhead Transmission Lines with Eccentric Ice Deposits Following Shock Loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32 (99), pp. 1287-1294. DOI 10.1109/TPWRD.2015.250-1029.
 15. Adam, J.M., Parisi, F., Sagaseta, J., and Lu, X. (2018), "Research and Practice on Progressive Collapse and Robustness of Building Structures in the 21st Century", *Engineering Structures*, vol. 173, pp. 122-149, available at: <https://iranarze.ir/storage/uploads/2019/01/E10800-IranArze.pdf> (Accessed 19 February 2025). DOI 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.06.082.
 16. Zheng, L., Wang, W. and Li, H. (2022), "Progressive Collapse Resistance of Composite Frame with Concrete-Filled Steel Tubular Column under a Penultimate Column Removal Scenario", *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 189, pp. 107085, available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=58587799> (Accessed 19 February 2025). ISSN 0143-974X. DOI 10.1016/j.jcsr.2021.107085. EDN KPXNFC.
 17. Mushchanov, V.F., Orzhehovsky, A.N., Kashchenko, M.P., Zubenko, A.V. "Reliability of Spatial Core Structures of Truncated Large-Span Domes", *Metal Constructions*, vol. 29, no. 1, pp. 47-61, available at: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/

Т. 29, N 3. С. 153-166. URL: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2023-3/st_04_mironov_smirnova_olenich_mushachanov.pdf (дата обращения: 19.02.2025). ISSN 1993-3517.

2023-1/st_04_mushchanov_orzhehovsky_kashchenko_zubenko.pdf (Accessed 19 February 2025). ISSN 1993-3495.

18. Mironov, A.N., Smirnova, N.S., Olenich, Ye.N. and Muschanov, A.N. (2023), "Full-Scale Inspection of Arched Metal Structures Covering the Ilyichevets Sports Complex, Mariupol", *Metal Constructions*, vol. 29, no. 3, pp. 153-166, available at: https://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2023-3/st_04_mironov_smirnova_olenich_mushachanov.pdf (Accessed 19 February 2025). ISSN 1993-3517.

Информация об авторах

Мушчанов Владимир Филиппович – доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Член международной организации «Институт гражданских инженеров» и международной организации «Пространственные конструкции», академик Академии строительства Украины и Украинской академии наук, член-корреспондент академии архитектуры Украины. Заслуженный строитель ДНР. Научные интересы: теория надёжности, расчёт, 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.

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

Дудов Николай Владимирович – магистрант Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, обучающийся по направлению подготовки «Теория и проектирование зданий и сооружений (металлические конструкции)», группа ЗПГС(МК)м-54а, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: прочность, надёжность пространственных стержневых систем.

Information about the authors

Mushchanov Vladimir F. – D. Sc. (Eng.), Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. A member of the international organization «Institute of Civil Engineer» and international organization of «Spatial Structures», the academician of the Civil Engineering Academy in Ukraine and the Academy of Sciences of Ukraine, an associate member of the Academy of Architecture of Ukraine. Scientific interests: the reliability theory, analyze, designing and engineering diagnostics of spatial metallic structures.

Orzhehovsky 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.

Dudov Nikolay V. – Master's student of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, studying in the field of Theory and Design of buildings and structures (metal structures), group ZPGS(MK)m-54a, DNR, Makeyevka, Russia. Scientific interests: strength, reliability of spatial core systems.

Вклад авторов:

Мущанов В. Ф. – научное руководство; разработка общей концепции; участие в сборе исходных данных и обследовании объекта.

Оржеховский А. Н. – сбор исходных данных и обследование объекта; выполнение численных исследований; участие в написании текста основной статьи; формулировка выводов.

Кащенко М. П. – участие в написании текста основной статьи; подготовка исходной информации; разработка издательской документации; перевод текста на английский.

Дудов Н. В. – участие в сборе исходных данных; набор текста; вычитка итогового текста; подготовка графических материалов.

Contribution of the authors:

Mushchanov V. F. – scientific guidance; development of a general concept; participation in the collection of initial data and the survey of the facility.

Orzhehovsky A. N. – collecting initial data and examining the facility; performing numerical studies; participating in writing the text of the main article; and formulating conclusions.

Kashchenko M. P. – participation in writing the text of the main article; preparation of initial information; development of publishing documentation; translation of the text into English.

Dudov N. V. – participation in the collection of source data; typing; proofreading the final text; preparation of graphic materials.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.03.2025; одобрена после рецензирования 21.03.2024; принята к публикации 28.03.2025.

The article was submitted 05.03.2025; approved after reviewing 21.03.2024; accepted for publication 28.03.2025.