

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777

Надежность пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности

Владимир Филиппович Мущанов, Анатолий Николаевич Оржиховский,
Александр Владимирович Мущанов, Максим Николаевич Цепляев
*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА);
г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Пространственные стержневые металлические конструкции высокого уровня ответственности являются одними из наиболее часто используемых в качестве конструктивных систем для перекрытия больших пролетов зданий и сооружений. Однако в данных системах при неблагоприятном сочетании факторов может активно развиваться прогрессирующее разрушение. Цель исследования — разработка научного обоснования новых подходов к проектированию устойчивых к развитию прогрессирующего обрушения оптимальных пространственных строительных металлоконструкций высокого уровня ответственности с гарантированными уровнями надежности ключевых и второстепенных элементов.

Материалы и методы. Применялись методы строительной механики в форме метода конечных элементов, методы теории подобия, методы теории надежности строительных конструкций.

Результаты. Разработан двухэтапный алгоритм оценки надежности, отличающийся от ранее разработанных возможностью оценки развития прогрессирующего обрушения. Приведены результаты его апробации для рамно-консольных конструкций покрытий над трибунами стадионов в виде установленных значений показателей надежности для набора ключевых элементов. Аналогичная оценка выполнена для реализованного проекта реконструкции большепролетного покрытия спорткомплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь).

Выводы. Для оценки надежности исследуемых конструкций с учетом склонности к развитию прогрессирующего обрушения предложен и апробирован в практическом проектировании универсальный алгоритм, ключевыми составляющими которого являются компьютерное моделирование процесса последовательных отказов элементов конструкции и установление для выделенной совокупности ключевых элементов значений вероятности отказа. Выполненные на его основе исследования позволили для рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов выделить набор ключевых элементов консольной части, отказ которых инициирует начало лавинообразного обрушения, и установить для них пределы изменения величин характеристик безопасности и резерва живучести. Дополнительно основные положения разработанного подхода прошли опытную апробацию при разработке и реализации проекта усиления большепролетных несущих конструкций покрытия спорткомплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлические конструкции, численные методы, лавинообразное разрушение, надежность, живучесть

Благодарности. Авторы выражают благодарность организаторам конференции «Расчет и проектирование металлических и деревянных конструкций», посвященной 110-летию со дня рождения Е.И. Белени и 130-летию со дня рождения Г.Г. Карлсена, за возможность представить на ее площадках основные результаты данного исследования, услышать мнение коллег по рассматриваемым вопросам, что было весьма ценно и учтено при подготовке статьи к печати.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мущанов В.Ф., Оржиховский А.Н., Мущанов А.В., Цепляев М.Н. Надежность пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 763–777. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777

Автор, ответственный за переписку: Владимир Филиппович Мущанов, mvf@donnasa.ru.

Reliability of spatial rod metal structures of high level of responsibility

Vladimir F. Mushchanov, Anatoly N. Orzhekhovskiy,
Alexander V. Mushchanov, Maxim N. Tseplyaev
*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA);
Makeevka, Donetsk People's Republic, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Spatial rod metal structures of high level of responsibility are the most frequently used as structural systems for covering large spans of buildings and structures. However, progressive destruction can actively develop in these systems

under unfavorable combination of factors. The aim of the research is to develop scientific justification of new approaches to the design of optimal spatial metal structures resistant to the development of progressive collapse of high level of responsibility with guaranteed levels of reliability of key and secondary elements.

Materials and methods. The main research methods in the work are methods of structural mechanics in the form of the finite element method, methods of similarity theory, and methods of the theory of reliability of building structures.

Results. As a result of the research work for the considered structures, a 2-stage algorithm for assessing reliability was developed, which differs from the previously developed ones by the possibility of assessing the development of progressive collapse. The results of its testing for frame-cantilever structures of coverings over stadium stands are presented in the form of established values of reliability indicators for a set of key elements. A similar assessment was made for the implemented reconstruction project of the long-span covering of the "Ilyichevets" sports complex (Mariupol).

Conclusions. To assess the reliability of the studied structures, taking into account the tendency to the development of progressive collapse, a universal algorithm is proposed and tested in practical design, the main components of which are computer modelling of the process of successive failures of structural elements, and the establishment of failure probability values for the selected set of key elements. The studies carried out on the basis of its algorithm made it possible to identify a set of key elements of the cantilever part for the frame-cantilever coverings above the stadium stands, the failure of which initiates the beginning of an avalanche-like collapse, and to set limits for them to change the values of safety characteristics and survivability reserve. Additionally, the main provisions of the developed approach were experimentally tested during the development and implementation of the project of reinforcement of large-span bearing structures of the covering of the "Ilyichevets" sports complex (Mariupol).

KEYWORDS: metal structures, numerical methods, progressive collapse, reliability, survivability

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the organizers of the conference "Calculation and design of metal and wooden structures", dedicated to the 110th anniversary of the birth of E.I. Belenya and the 130th anniversary of the birth of G.G. Carlsen, for the opportunity to present the main results of this study, to hear the opinion of colleagues on the issues under consideration, which was very valuable and taken into account when preparing the paper for publication.

FOR CITATION: Mushchanov V.F., Orzhehovskiy A.N., Mushchanov A.V., Tseplyaev M.N. Reliability of spatial rod metal structures of high level of responsibility. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):763-777. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777 (rus.).

Corresponding author: Vladimir F. Mushchanov, mvf@donnasa.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современная нормативная база Российской Федерации в области обеспечения надежности, живучести, предотвращения развития лавинообразного обрушения несущих строительных металлических конструкций представлена рядом документов различного уровня:

1. Федеральные законы:
 - Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ.
2. Своды правил, ГОСТы, СНИПы:
 - ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения»;
 - СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения»;
 - СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования»;
 - проект СНИП «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения». М., 2006.
3. Основные рекомендации, содержащие как общие, так и конкретные положения по обеспечению необходимого уровня надежности конструкций, закладываемого на стадии проектирования, в том числе включающие мероприятия по предотвращению развития лавинообразного (прогрессирующего) разрушения:
 - методическое пособие «Проектирование мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения». 2018;

- СТО 36554501-024–2010 «Обеспечение безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях». 2010;

- МДС 20-2.2008 «Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях». 2008;

- Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения. 2006;

- Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. 2002.

Отметив зарубежный опыт в этом направлении, стоит упомянуть:

- EN 1990:2002+A1. Eurocode — Basis of structural design. Supersedes ENV 1991:1994;

- UFC 4-023–03. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Change 3. Series 4: Multidisciplinary and facility specific design. U.S. Army corps of engineers, 2016;

- GSA. Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. Office of Design and Construction, 2016;

- ДБН В.2.2-24–2009. Проектирование высотных жилых и общественных зданий. Здания и сооружения. Приложение Е «Методика расчета высотного здания на сопротивление к прогрессирующему обрушению: государственные строительные нормы Украины». 2009;

- Rules and Regulations of the Building Code of the City of New York. Chapter 18 Resistance to Pro-

gressive Collapse under Extreme Local Loads. New York State Department of State, 2001;

- BS 5950.1:2000. Structural use of steelwork in building (Incorporating Corrigenda Nos. 1 and 2 and Amendment No. 1): 2.4.5 Structural integrity. British Constructional Steelwork Association, Building Research Establishment Ltd, Cold Rolled Sections Association et. al., 2009;

- Review of international research on structural robustness and disproportionate collapse. Department for Communities and Local Government, 2011;

- NISTIR 7396. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. USA : National Institute of Standards and Technology (NIST), 2007;

- ASCE/SEI 7-05. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Structural Engineering Institute. Washington : American Society of Civil Engineers, 2005.

Хорошо известные всем специалистам ключевые положения указанных нормативных документов можно свести к трем типам рекомендаций:

- рекомендации общего характера, использование которых в прямом виде в практике проектирования сооружений высокого уровня ответственности, выполненных в форме пространственных стержневых металлических конструкций, зачастую невозможно (на это указывают авторы работы [1]);

- конкретные рекомендации, разработанные для узкого круга конструктивных схем (например, конструкции многоэтажных зданий [2]), ориентированные на разработку соответствующих конструктивных мероприятий;

- рекомендации по определению показателей надежности проектируемой системы здания (сооружения).

Отметим результаты критического анализа научных публикаций, составляющих научную основу этой нормативной базы. Учитывая их значительное количество, в первую очередь сфокусируем внимание на материалах, содержащих данные о подходах к определению показателей надежности конструкции с позиций опасности развития лавинообразного обрушения. В этом случае в подавляющей части рассмотренных работ решение сформулированной проблемы достигается путем решения одной или одновременно нескольких перечисленных ниже задач:

- детализации расчетных схем конструкций (прежде всего путем отображения конструктивных особенностей решения узлового соединения с последующей оценкой влияния такого учета на общее и локальное напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции и ее элементов) [3–8];

- целенаправленного изменения конструктивной схемы здания (сооружения) в целом и/или конструкции узловых соединений, ориентированного на предотвращение развития прогрессирующего

разрушения [9–11], а также посредством управления НДС объекта за счет изменения его основных геометрических и жесткостных параметров [12–15];

- установления численных значений показателей надежности анализируемой расчетной схемы конструкции [16–21].

Однако некоторые важные для рассматриваемой проблемы моменты до настоящего времени остаются исследованными в недостаточной степени, а именно отсутствуют:

- универсальный алгоритм действий при вычислении численных значений характеристик надежности изучаемой системы с позиций оценки склонности анализируемой расчетной схемы конструкции к развитию лавинообразного обрушения, что значительно усложняет работу инженера-проектировщика;

- практические рекомендации по установлению показателей надежности многоэлементных статически неопределимых стержневых металлических конструкций с позиций оценки их склонности к прогрессирующему (лавинообразному) обрушению (за исключением некоторых попыток [22, 23]);

- алгоритм оптимизации начального проектного решения для сформулированного вида целевой функции на основе заданных уровней надежности ключевых и второстепенных элементов (некоторые попытки в этом направлении сделаны в работах [22–24]).

Проведенный критический анализ состояния вопроса, кратко отраженный в данном разделе настоящей работы, позволяет сформулировать цель и задачи проводимых авторами исследований, выполняемых в рамках НИР «Научное обоснование новых подходов к проектированию оптимальных пространственных строительных металлоконструкций высокого уровня ответственности» на основе Соглашения № 22-29-00139 между Российским научным фондом и ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (с 05.10.2023 соглашение к исполнению переведено в ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»).

Цель исследования — разработка научного обоснования новых подходов к проектированию устойчивых к развитию прогрессирующего обрушения оптимальных пространственных строительных металлоконструкций высокого уровня ответственности с гарантированными уровнями надежности ключевых и второстепенных элементов.

Задачи исследования:

- разработать принципы формирования и оценки влияния детализации расчетных схем конструктивных элементов пространственных стержневых металлических конструкций на базе детального конечно-элементного моделирования;

- обосновать установившиеся и аварийные расчетные ситуации для оценки склонности анализируемых систем к лавинообразному обрушению;

- обосновать для систем повышенного уровня ответственности новый критерий склонности к прогрессирующему (лавинообразному) обрушению, базирующемуся на изменении индекса надежности $\Delta\beta$;
- разработать общий алгоритм оптимального проектирования конструкций повышенного уровня ответственности с соблюдением ранжированных уровней надежности для ключевых и второстепенных элементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках разрабатываемого подхода основные этапы проводимой оценки качества проектного решения пространственной металлической конструкции высокого уровня ответственности коррелируют с основными задачами исследования и в общем виде представлены на рис. 1.

На указанных этапах исследования авторами использовались методы:

- *конечных элементов* в геометрически и конструктивно нелинейной постановке (как универсальный метод строительной механики для анализа НДС при оценке склонности систем к лавинообразному обрушению);
- *теории подобия* при физическом моделировании действительной работы элементов пространственных стержневых металлических конструкций (для верификации результатов численных исследований НДС на моделях конструкций);
- *теории надежности строительных конструкций* (при определении значений вероятности отказа системы и формировании критерия склонности системы к лавинообразному обрушению);
- *оптимального проектирования* (при совершенствовании исходного проектного решения на основе заданных ограничений по вероятности отказа ключевых и второстепенных элементов).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Обоснование анализируемых расчетных ситуаций, положенных в основу дальнейших расчетов

В настоящее время большая часть компьютерных расчетов, выполняемых для проверки склонности конструкций к развитию лавинообразного обрушения, использует положения нормативного

документа, разработанного МНИИТЭП и НИИЖБ «Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения» (2005), а именно:

- в качестве главного способа, предупреждающего развитие лавинообразного обрушения, принимается общее упрочнение всего здания, при котором разрушение одного из элементов не приводит к разрушению всего сооружения;
- оценка склонности к прогрессирующему обрушению проверяется нелинейным расчетом на особое сочетание нагрузок и воздействий, включающее постоянные и временные длительные нагрузки, а также воздействие локальных разрушений элементов несущих конструкций;
- расчетные прочностные и деформационные характеристики материалов принимаются равными их нормативным значениям.

В качестве основных неопределенностей, заложенных в этих расчетах, можно отметить (на это указывают и другие исследователи):

- невозможность получения достоверной информации о фактических местах, причинах возникновения и характере протекания процесса разрушения;
- статистическую изменчивость значений прочностных параметров, приводящую к тому, что фактические значения параметров разрушения могут значительно отличаться от нормативных значений;
- как невозможно запроектировать абсолютно надежное сооружение (в силу изменчивости значимых параметров проектирования, влияющих на надежность системы; неопределенности требований к анализируемым расчетным ситуациям и т.д.), так и невозможно существенно повысить его надежность без дополнительных затрат, ориентированных на предотвращение аварийных ситуаций.

Анализируя вышеприведенные основные положения как нормативных документов, так и результатов научных исследований, можно констатировать.

1. Суммарное действие постоянной нагрузки и длительной части временных нагрузок, действующих на сооружение, для анализируемой расчетной ситуации является загрузением первого расчетного этапа.

2. Рекомендации действующих нормативных документов в части назначения элемента конструк-

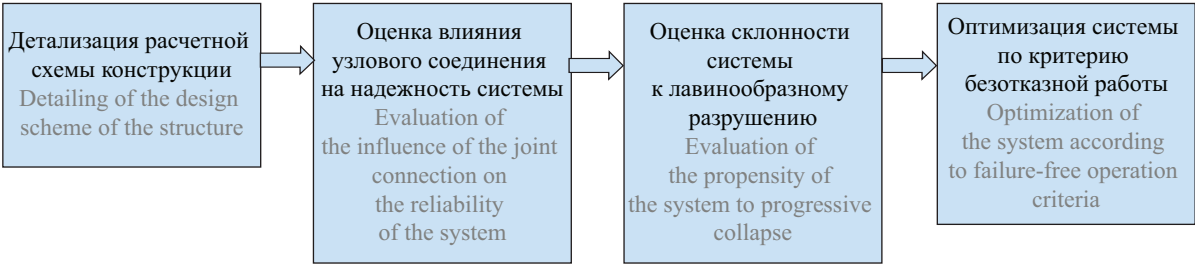


Рис. 1. Ключевые этапы совершенствования методики расчета и проектирования конструкций повышенного уровня ответственности

Fig. 1. Key points for improving the methodology of calculation and design of structures of a high level of responsibility

ции (или некоторой совокупности элементов), удаляемых на втором этапе расчета, отличаются невозможностью прямого применения для рассматриваемых в данной работе систем. При этом остаются бесспорными факты, что:

- в рамках анализируемой расчетной ситуации для рассматриваемой схемы загрузки при увеличении временных длительных нагрузок (как правило, атмосферных) за пределы расчетных значений, установленных нормами, первыми будут выходить из строя наиболее нагруженные элементы;

- даже в случае преднамеренного вывода из строя элементов конструкции (например, при проведении террористических актов) воздействию, в первую очередь, подвергаются наиболее нагруженные элементы конструкции, которые легче разрушить. Для обоснованного назначения удаляемого на втором этапе расчета ключевого элемента конструкции (или некоторой совокупности таковых), разрушение которого провоцирует развитие лавинообразного разрушения, возможен подход, при котором поэтапное удаление элементов, формирующих в конечном итоге упомянутый ключевой набор, будет следствием пошагового увеличения значений временных длительных нагрузок первого этапа за пределы расчетных значений.

3. Учитывая, что материалом для подавляющего большинства несущих элементов пространственных стержневых металлических конструкций служат малоуглеродистые и низколегированные стали с ярко выраженной площадкой текучести, то отказ элементов системы (как сжатых, так и растянутых), выполненных из этих материалов, сопровождается значительным развитием пластических деформаций, что кардинально отличается от хрупкого разрушения, характерного для элементов железобетонных конструкций, и «сглаживает» возможные инерционные эффекты, сопровождающие такой отказ. Поэтому при установлении набора ключевых элементов в рамках первичной оценки склонности конструкции к прогрессирующему обрушению возможно отказаться от значения коэффициента динамичности $\mu = 2$, принятого, например, для расчета железобетонных каркасов зданий в универсальном расчетном комплексе SCAD Office.

Отмеченные положения использованы при составлении и реализации алгоритма, информация по которым представлена в следующих разделах.

2. Описание алгоритма оценки склонности конструкции к лавинообразному обрушению

В основу разрабатываемого алгоритма оценки надежности рассматриваемых пространственных стержневых конструкций высокого уровня ответственности с учетом склонности к развитию прогрессирующего обрушения положен двухэтапный подход, составляющими которого служат:

- компьютерное моделирование процесса последовательных отказов элементов конструкции

с выделением набора ключевых элементов системы, отказ которых инициирует начало процесса прогрессирующего разрушения;

- установление для выделенной совокупности ключевых элементов двух значений характеристики безопасности β , соответствующих отказу первого ключевого элемента и их совокупности.

Несмотря на некоторые нюансы формулировок понятия надежности различными нормативными документами в целом его можно сформулировать как «способность сооружения выполнять заданные функции, сохраняя свои основные характеристики, при определенных условиях эксплуатации, в установленный период». Численным выражением показателей надежности, как правило, являются:

- P_s — вероятность безотказной работы;
- P_f — вероятность отказа;
- β — характеристика безопасности в отечественной терминологии или индекс надежности в зарубежной практике.

На правомочность их использования указывают большинство нормативных документов, действующих в различных странах. В данной работе использован показатель $\beta_{\min}$, определяемый для каждого из наиболее ответственных элементов, что не противоречит требованиям вышеперечисленных документов.

Другая отличительная особенность описываемого в статье подхода — возможность оценки склонности анализируемой схемы конструкции к развитию лавинообразного разрушения, под этим 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 вероятности наступления такого события. Для этой цели предложен показатель $\beta_{\max}$, характеризующий вероятность отказа всей совокупности ключевых элементов, выход из строя которых предшествует последующему развитию лавинообразного разрушения конструкции.

Как известно, по общепринятой терминологии «*живучесть* — это свойство в течение некоторого времени сохранять несущую способность при локальных разрушениях (при аварийных ситуациях), вызванных природными и технологическими воздействиями. А именно стойкость конструкции (здания и сооружения) к прогрессирующему разрушению при зафиксированных 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 двух событий:

$\beta_{\min}$ — отказа одного, наиболее напряженного элемента, характеризующего первичное нарушение требований надежности;

$\beta_{\max}$ — отказа совокупности ключевых элементов, характеризующего полное исчерпание их несущей способности с последующим развитием лавинообразного обрушения.

Установление набора ключевых элементов анализируемой системы

На этом этапе в форме конечно-элементного расчета, реализуемого в детерминированной геометрически и конструктивно нелинейной постановке, на базе пошагового увеличения расчетных нагрузок основного сочетания анализируется последовательность отказа элементов и устанавливается такая их совокупность (набор ключевых элементов), которая предшествует началу лавинообразного разрушения. Учет геометрической нелинейности осуществляется с использованием корректирующих коэффициентов к соответствующим компонентам матрицы жесткости элемента, насчитываемых с учетом влияния напряжений в элементах, накопленных на предыдущих этапах расчета в форме [25]. Учет конструктивной нелинейности, учитывающий изменение расчетной схемы под действием нагрузки, осуществляется в упрощенной форме, когда сжатые стержни просто удаляются из конструкции, а взамен удаленных растянутых стержней в узлы их крепления прикладываются внутренние усилия, действовавшие в элементе, но с противоположным знаком (обоснованность данной методики рассматривается в работе Н.С. Стрелецкого [26]). Алгоритм предложенной методики представлен в виде блок-схемы на рис. 2 и более подробно описан в трудах [27–29].

Определение численных значений показателей надежности проектируемой конструкции с учетом склонности к лавинообразному разрушению

В рамках этого этапа расчета выполняется установление показателей надежности проектируемой системы в виде значений вероятности отказа и характеристики безопасности. При этом данные показатели надежности системы увязываются с анализом склонности системы к лавинообразному разрушению и представляются в виде двух показателей:

$\beta_{\min}$ — соответствующего вероятности отказа одного, наиболее напряженного элемента;

$\beta_{\max}$ — соответствующего вероятности отказа совокупности ключевых элементов, отказ которых инициирует начало процесса лавинообразного разрушения, определенных в результате расчетов, выполненных с использованием алгоритма, представленного на рис. 2. Вероятность отказа отмеченной совокупности анализируется с позиций модели параллельного соединения элементов и с учетом степени взаимозависимости рассматриваемой пары элементов в процессе вычисления [30].

В разделе 3 данного исследования в качестве случайных величин выступают:

- предел текучести стали;

- нормальные напряжения в стержневых элементах конструкции;

- атмосферные (как правило, снеговые) нагрузки;

- геометрические характеристики сечений;

- осадки основания;

- геометрические несовершенства формы конструкции, полученные на монтаже и при эксплуатации.

Задача определения вероятности отказа решается общепринятым численным методом статистического моделирования — Монте-Карло. С его использованием формируется выборка напряжений для рассматриваемой группы ключевых элементов на основе 10^6 – 10^8 реализаций случайных величин по заданным законам распределения. Для сформированных выборок реализаций случайных величин напряжений и прочностных характеристик материала элементов конструкции определяются их законы и плотности распределения и на их основе другие необходимые статистические характеристики с последующим определением $\beta_{\min}$ для каждого из элементов. Полученная база данных служит основой для последующего определения величины $\beta_{\max}$, характеризующей вероятность отказа совокупности ключевых элементов с использованием для этой цели модели параллельного соединения элементов¹ и $\Delta\beta$ — резерва живучести системы. Более подробно данный алгоритм описан в работе [30], а его принципиальная блок-схема приведена на рис. 3.

3. Примеры реализации разработанного подхода

Апробация представленных в разделе 2 алгоритмов вычисления показателей надежности с учетом оценки склонности исходных проектных решений к развитию прогрессирующего (лавинообразного) обрушения выполнена при проектировании разнообразных пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности. Ниже приведены результаты проведенных исследований.

Рамно-консольные покрытия над трибунами стадионов

Рассматриваемый тип покрытия, как правило, ориентирован на устройство покрытий над трибунами стадионов малой и средней вместимости и довольно широко применяется при реконструкции стадионов в процессе приведения их технического состояния к современным требованиям. Исследованию подлежала конструкция в виде блока консольных рам с параметрами (рис. 4, а): $L = 4$ – 22 м — вылет консольной фермы покрытия; $\alpha = 0$ – 30° — угол наклона покрытия к горизонту; $H = 4$ – 12 м — шаг несущих рам. В исследуемый диапазон попадали параметры покрытия над трибунами запасных полей ФК «Олимпик» (г. Донецк) (рис. 4, б, в), проектируемого с использованием описываемого подхода.

¹ Ржаницын А.П. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. С. 136–138. URL: <https://dwg.ru/lib/1942?ysclid=lq9iz905g223783815>

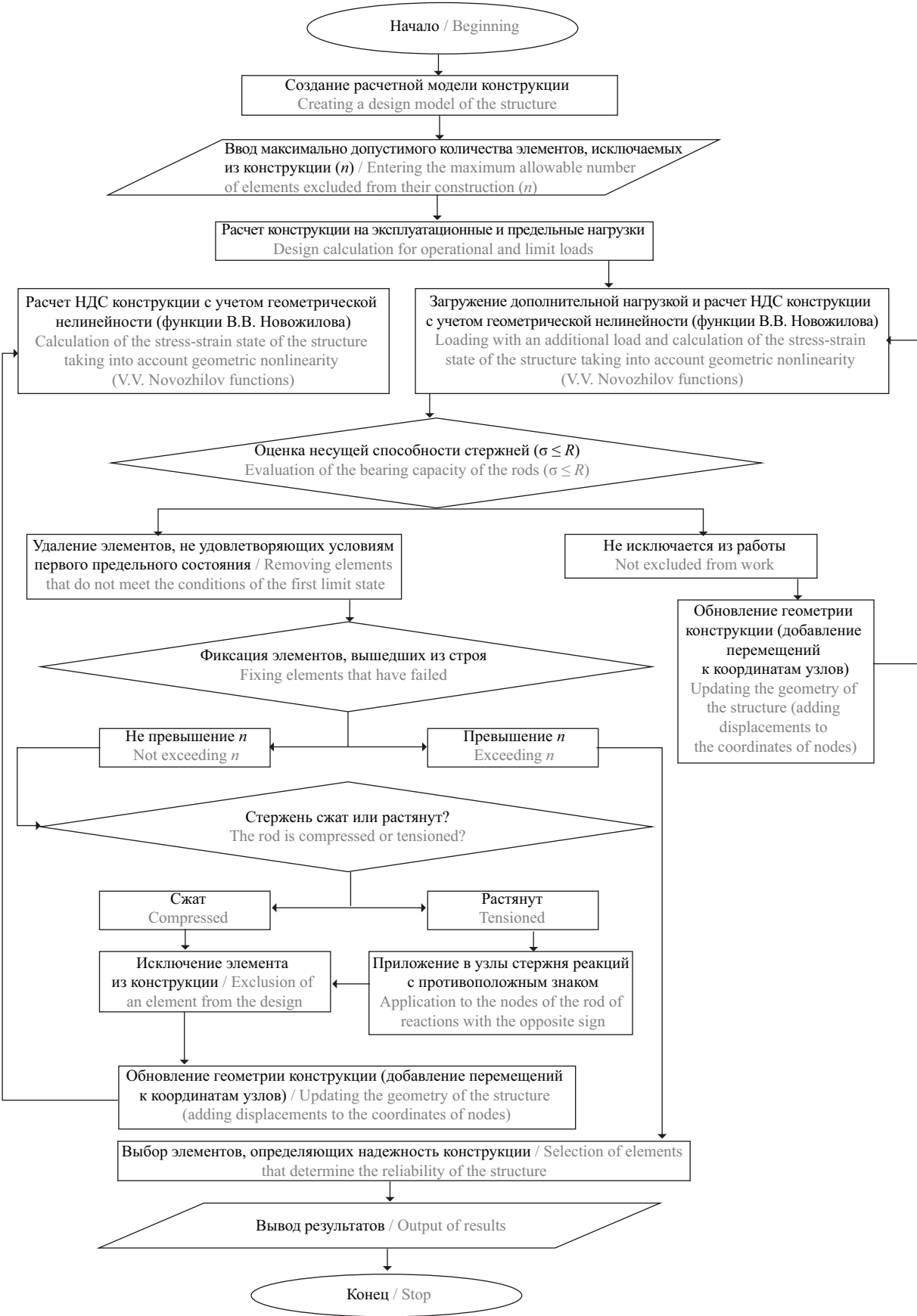


Рис. 2. Блок-схема алгоритма установления набора ключевых элементов, инициирующих начало прогрессирующего разрушения конструкции

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for setting key elements that initiate the onset of a progressive collapse of the structure

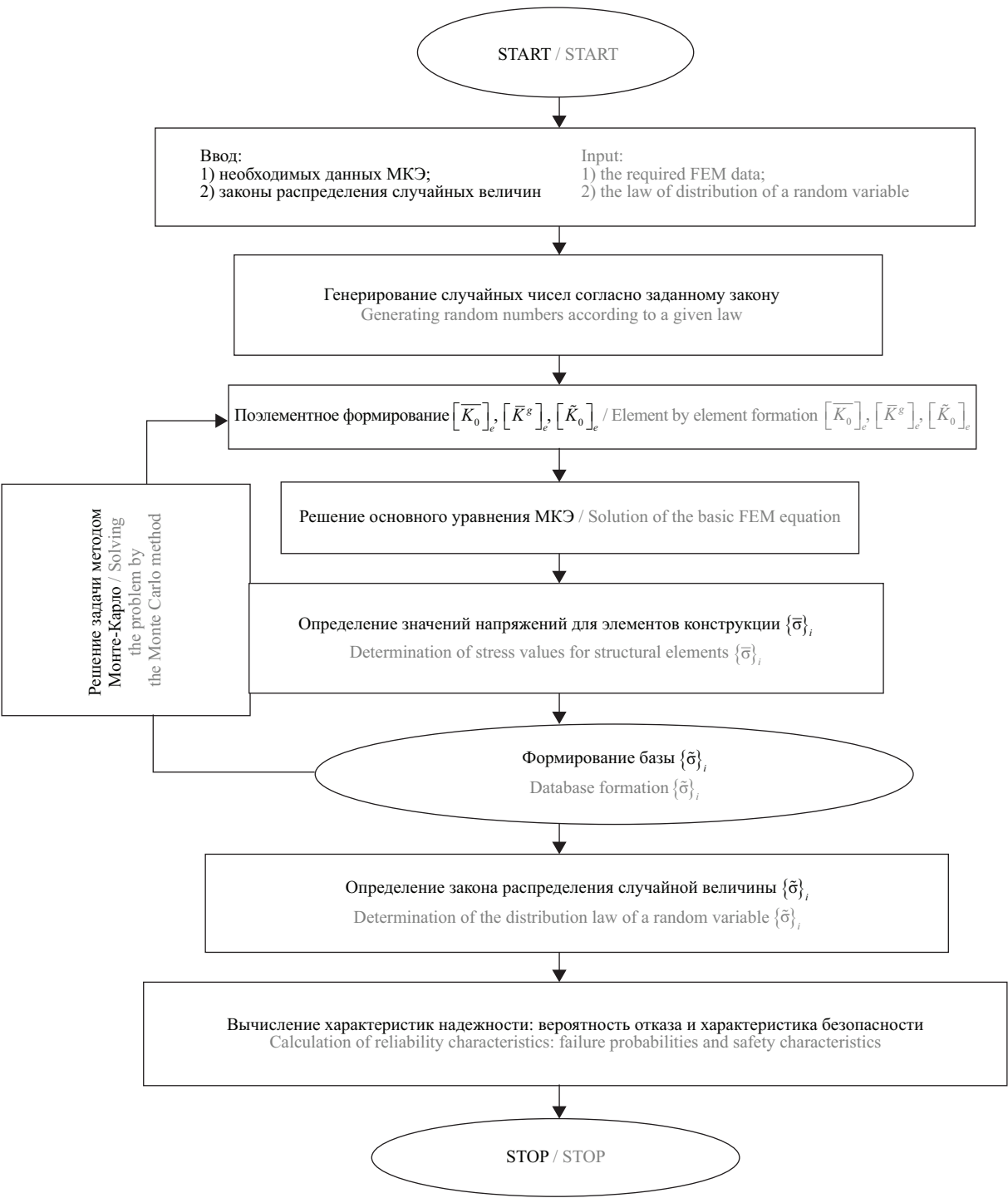


Рис. 3. Блок-схема определения показателей надежности конструкции с учетом склонности к лавинообразному обрушению

Fig. 3. Block diagram of determining the reliability indicators of the structure, taking into account the tendency to avalanche collapse

Исследования по оценке склонности к лавинообразному обрушению позволили выделить набор из 4–10 элементов консольной части, отказ которых в виде цепочки вышедших из строя элементов (например, «0 – 4 – 24 – 334») инициировал начало лавинообразного обрушения (см. гистограмму рис. 4, d). Проведенные исследования дали возможность зафиксировать, что для анализируемых исходных

расчетных схем, запроектированных в полном соответствии с требованиями метода предельных состояний, диапазон изменения величин характеристик безопасности для их ключевых элементов составил: $\beta_{\min} = 3,08–5,01$; $\beta_{\max} = 5,01–7,81$. При этом явно отмечалось, что величина резерва живучести характеризует разницу в величине характеристики безопасности, вычисленной для одного, наиболее напряженного

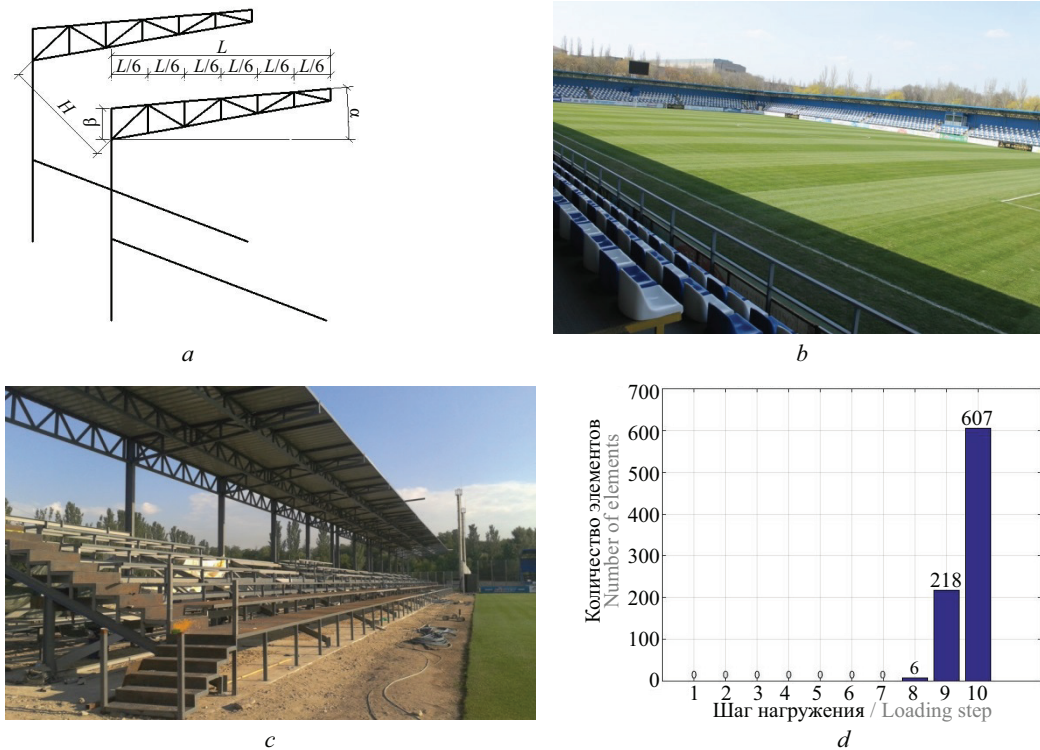


Рис. 4. Исследование консольно-рамных покрытий над трибунами стадионов: *a* — конструктивная схема покрытия; *b* — общий вид стадиона «Олимпик» (Донецк); *c* — вид на проектируемое покрытие над трибунами; *d* — гистограмма накопления отказов элементами конструкции по шагам нагружения

Fig. 4. Study of cantilever-frame coverings over stadium stands: *a* — structural scheme of the covering; *b* — a general view of the “Olympic” stadium (Donetsk); *c* — a view of the designed covering over the stands; *d* — a histogram of the accumulation of failures by elements of the structure by steps of loading

ключевого элемента и всей их совокупности $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min} < 2$, и склонность к развитию прогрессирующего обрушения, которая резко увеличивается. *Пространственное стержневое покрытие спорткомплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь)»*

На основе данных проведенного обследования и оценки технического состояния с участием авторов данного исследования выполнен и успешно реализован в июле 2023 г. проект восстановления несущих металлоконструкций уникального покрытия спорткомплекса «Ильичевец» в г. Мариуполе. Уникальное покрытие, основным несущим конструктивом которого являются большепролетные арки сквозного сечения с затяжками ($L = 95$ м), получило в ходе боев за освобождение г. Мариуполя не менее десяти прямых попаданий, в результате которых возникли недопустимые повреждения (рис. 5, *a, b*). Проектные работы по восстановлению комплекса проводились специалистами ФГБОУ ВО «ДОННАСА» совместно с ГУП «Донецкпроект», а строительно-монтажные работы выполнены компанией «Р-Строй». Следует отметить, что наряду со сравнительно простыми случаями, когда усиление поврежденных элементов выполнялось при помощи накладок, компенсирующих потерю сечения, наиболее сложным случаем стала необходимость усиления пяти ферм на проектной отметке, когда

в результате прямых попаданий снарядов в верхние пояса сквозных арок наблюдались отрывы от узлов и недопустимые деформации всех элементов панели, что требовало их полной замены (рис. 6, *a*). С этой целью была разработана специальная технологическая оснастка, позволяющая выполнить работы по устранению полученных повреждений без трудоемких работ, связанных с устройством лесов. На рис. 6, *d* представлены ее основные элементы: 1 — монтажные балки со 100-тонными гидродомкратами для исправления геометрии и фиксации полуарок в проектном положении; 2 — поперечные короткие балки с оттяжками; 3 — восстановленный элемент верхнего пояса в проектном положении. Также для уменьшения вертикальных перемещений концов полуарок вследствие демонтажа поврежденных панелей перед началом работ в систему были введены дополнительные вертикальные связи.

Наряду с традиционными расчетами, выполненными при разработке проектной документации в части оценки остаточной несущей способности и контроле НДС конструкции на всех этапах усиления, проведены дополнительные исследования уникального большепролетного покрытия в рамках разработанного подхода в части оценки склонности к прогрессирующему (лавинообразному) обру-

шению и оценки надежности проектного решения с учетом данного фактора.

Анализ характеристик надежности проекта, выполненный для усиливаемой расчетной схемы на обоих этапах, подтвердил адекватность расчетной модели картине, полученной в ходе обследования. На это указывает как качественное совпадение картины повреждения арки покрытия (рис. 6, а) с имитационной картиной отказа стержней, представленной по результатам расчета с использованием разработанных алгоритмов, так и установленные $\Delta\beta$.

Верификация разработанного подхода осуществлялась в виде анализа трех расчетных ситуаций:

- исходной (восстановленной) расчетной схемы (схема А), загруженной расчетным сочетанием проектных нагрузок;
- поврежденной конструкции (по данным обследования) (схема Б), загруженной расчетным сочетанием проектных нагрузок;
- исходной конструкции, загруженной аварийной нагрузкой (импульсное взрывное воздействие) (схема В, анализировалась лишь картина отказа стержней).

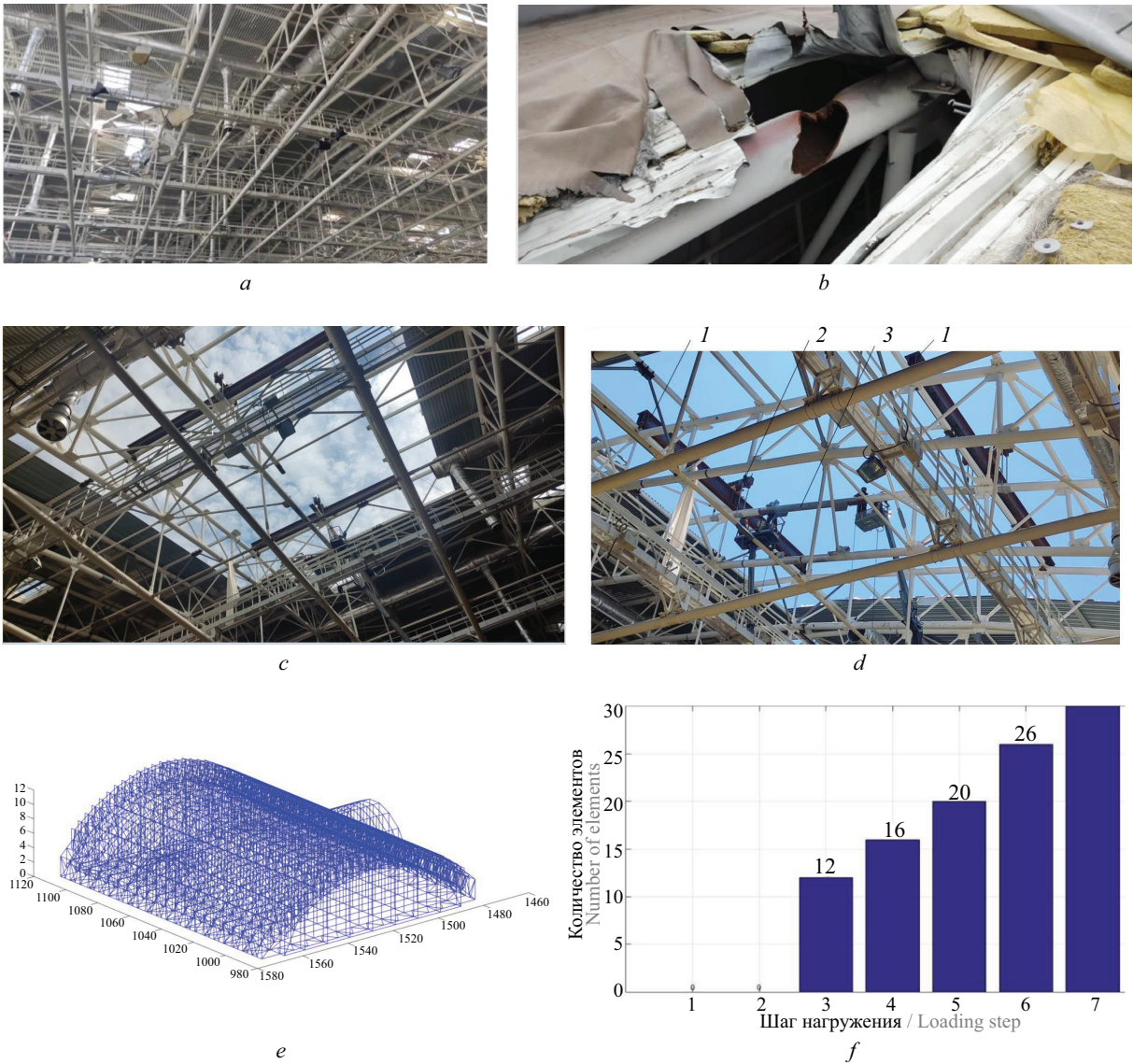


Рис. 5. Усиление несущих конструкций большепролетного покрытия спорткомплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь): *a* — общий вид конструкции покрытия с повреждениями; *b* — повреждение верхнего пояса арки покрытия; *c* — усиливаемая арка с демонтированным поврежденным элементом; *d* — усиление конструкции по разработанному проекту: *1* — монтажные балки с гидродомкратами; *2* — поперечины с оттяжками; *3* — восстановленный элемент; *e* — расчетная схема конструкции покрытия; *f* — гистограмма выхода из строя элементов при анализе на лавинообразное обрушение

Fig. 5. Reinforcement of load-bearing structures of the large-span covering of the "Ilyichevets" sports complex (Mariupol): *a* — a general view of the structure of the covering with damage; *b* — damage to the upper chord of the covering arch; *c* — reinforced arch with dismantled damaged element; *d* — reinforcement of the structure according to the developed project: *1* — mounting beams with hydraulic jacks; *2* — crossbars with guy ropes; *3* — restored element; *e* — design scheme of the covering structure; *f* — histogram of elements failure in the analysis of avalanche collapse

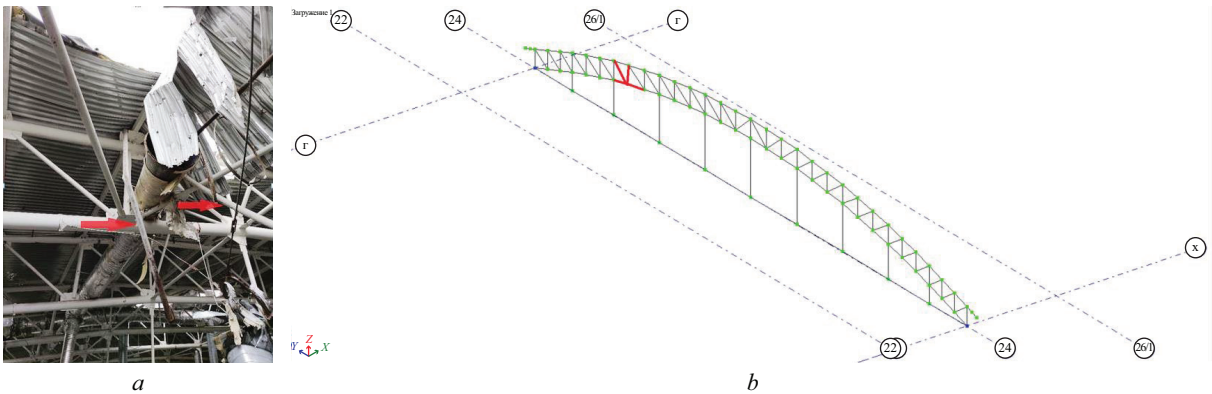


Рис. 6. Анализ характеристик надежности проекта усиления несущих конструкций большепролетного покрытия спорт-комплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь): *a* — картина повреждения арки покрытия; *b* — имитационная картина отказа стержней в расчетной схеме

Fig. 6. Analysis of the reliability characteristics of the project of reinforcement of load-bearing structures of the large-span covering of the “Ilyichevets” sports complex (Mariupol): *a* — a picture of damage to the arch of the covering; *b* — a simulation picture of the failure of rods in the design scheme

Значения характеристики безопасности для анализируемых расчетных ситуаций

Values of the safety characteristic for the analyzed calculation situations

Значения характеристики безопасности Values of the safety characteristic	Схема А Scheme A	Схема Б Scheme B
$\beta_{\min}$	7,091	2,424
$\beta_{\max}$	10,6	5,9

Для двух анализируемых расчетных ситуаций определены значения $\beta_{\min}$ и $\beta_{\max}$, приведенные в таблице.

Анализируя приведенные в таблице данные, следует отметить, что изначально элементы системы обладали большими запасами несущей способности (показатели для схемы А), что позволило системе сравнительно безболезненно воспринять полученные повреждения перераспределением нагрузки на уцелевшие элементы (сравнение данных для схем А и Б). Дополнительный анализ аварийной ситуации показывает, что при импульсном воздействии на незагруженную временными нагрузками систему упруго-пластические деформации элементов в зоне поражения локализуют зону разрушения одной панелью и склонность к развитию лавинообразного разрушения не проявляется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Критический анализ результатов, полученных в ходе проведенного исследования, предоставляет исходную информацию для возможной дискуссии, позволяет зафиксировать положительные достижения и наметить пути дальнейшего совершенствования разрабатываемого подхода:

1) предложенный в данном исследовании подход дает возможность с приемлемой практической точностью определить показатели надежности многократно статически неопределимой стержневой

системы, характеризующие ее склонность к развитию прогрессирующего разрушения. Вычисляемые показатели особенно важны для уникальных большепролетных конструкций, представляющих собой сооружения с высоким уровнем ответственности, для которых важно расчетным путем обеспечить требуемый уровень надежности и живучести;

2) дальнейшие исследования, осуществляемые авторами в части совершенствования разрабатываемого подхода, планируется направить на более строгое теоретическое обоснование реализованных в алгоритмах положений, а именно:

- гипотезы об установлении верхней границы надежности, определяемой на основе вероятности отказа группы элементов, инициирующих начало лавинообразного обрушения;
- обоснование расчетных ситуаций, на основании анализа которых устанавливается набор ключевых элементов, надежность которых определяет устойчивость системы к развитию прогрессирующего разрушения;
- установление рекомендуемых значений динамических коэффициентов для элементов основных конструктивных форм пространственных стержневых металлических пространственных, выполняемых из различных классов стали;
- учета конструктивного исполнения узловых соединений в моделях надежности.

В качестве основных выводов по данному исследованию можно отметить следующее:

1) для оценки надежности пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности с учетом склонности к развитию прогрессирующего обрушения предложен и апробирован в практическом проектировании универсальный алгоритм, основными составляющими которого являются:

- компьютерное моделирование процесса последовательных отказов элементов конструкции с выделением набора ключевых элементов системы, отказ которых инициирует начало процесса прогрессирующего разрушения;

- установление для выделенной совокупности ключевых элементов двух значений характеристики безопасности β , соответствующих отказу первого ключевого элемента и их совокупности.

Анализ НДС осуществляется с использованием уточненных расчетных схем, отображающих основные конструктивные особенности узловых соединений, дефектов и повреждений.

Выполненные на основании предложенного подхода и разработанного алгоритма исследования по оценке склонности рассматриваемых конструктивных систем к лавинообразному обрушению позволили для рамно-консольных покрытий над три-

бунами стадионов зафиксировать следующие результаты:

- выделить в зависимости от геометрических параметров исследуемой схемы набор из 4–10 ключевых элементов консольной части, отказ которых инициирует начало лавинообразного обрушения;

- диапазон изменения величин характеристик безопасности ключевых элементов конструкций, запроектированных в полном соответствии с требованиями метода предельных состояний, составил: $\beta_{\min} = 3,08\text{--}5,01$; $\beta_{\max} = 5,01\text{--}7,81$;

- величина резерва живучести, составляющая разность величин характеристики безопасности, вычисленной для одного, наиболее напряженного ключевого элемента и всей их совокупности $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min} < 2$, характеризует склонность исследуемой схемы к развитию прогрессирующего обрушения.

Основные положения разработанного подхода к оценке надежности проектных решений пространственных металлических конструкций высокого уровня ответственности прошли опытную апробацию при разработке и реализации проекта усиления большепролетных несущих конструкций покрытия спорткомплекса «Ильичевец» (г. Мариуполь). В ходе выполнения работ зафиксировано хорошее соответствие результатов теоретических исследований с данными натурного освидетельствования на всех этапах усиления конструкций.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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. С. 16–24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24. EDN ZIJLAD.

2. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Kovalev V.V., Iliushchenko T.A. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders // Magazine of Civil Engineering. 2019. No. 8 (92). Pp. 155–162. DOI: 10.18720/MCE.92.13. EDN ZZORLS.

3. 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. Vol. 173. Pp. 122–149. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.06.082

4. Savin S.Y., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modeling of resistance to destruction of multi-storey frame-connected buildings at sudden loss of bearing elements stability // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. P. 012089. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012089

5. Guo Z., Li Z., Xing Z., Chen Y., Zheng Z., Lin G. Numerical analyses of post-fire beam-column assemblies with WUF-B connections against progressive collapse //

Engineering Failure Analysis. 2022. Vol. 140. P. 106502. DOI: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2022.106502

6. 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. Vol. 48. Pp. 23–27. DOI: 10.13204/j.gyjz20180402

7. Zhi X., Li W., Fan F., Shen S. Influence of initial geometric imperfection on static stability of single-layer reticulated shell structure // Spatial Structures. 2021. Vol. 27. P. 7. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2021.01.009

8. Liu H., Zhang W., Yuan H. Structural stability analysis of single-layer reticulated shells with stochastic imperfections // Engineering Structures. 2016. Vol. 124. Pp. 473–479. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.06.046

9. Alekseytsev A.V., Gaile L., Drukis P. Optimization of steel beam structures for frame buildings subject to their safety requirements // Magazine of Civil Engineering. 2019. No. 7 (91). Pp. 3–15. DOI: 10.18720/MCE.91.1. EDN GDKVHM.

10. 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. DOI: 10.1016/J.JCSR.2021.107085

11. Truesdell C. Novozhilov's foundations of the nonlinear theory of elasticity (1953) // *An Idiot's Fugitive Essays on Science*. 1984. Pp. 151–157. DOI: 10.1007/978-1-4613-8185-3_15
12. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perelmuter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 2 (102). P. 10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14. EDN ZVLLVV.
13. 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. Vol. 234. Issue 5. Pp. 664–675. DOI: 10.1177/1748006X20928196
14. Luo H., Lin L., Chen K., Antwi-Afari M.F., Chen L. Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions // *Developments in the Built Environment*. 2022. Vol. 12. P. 100087. DOI: 10.1016/J. DIBE.2022.100087
15. 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 (4). С. 13–18. EDN NBMYRH.
16. Ram M., Davim J.P. Acknowledgments // *Advances in System Reliability Engineering*. 2019. DOI: 10.1016/B978-0-12-815906-4.09998-X
17. Yang W., Zhang B., Wang W., Li CQ. Time-dependent structural reliability under nonstationary and non-Gaussian processes // *Structural Safety*. 2023. Vol. 100. P. 102286. DOI: 10.1016/J. STRUSAFE. 2022.102286
18. Krejsa M., Janas P., Krejsa V. Structural reliability analysis using DOProC Method // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 142. Pp. 34–41. DOI: 10.1016/J. PROENG.2016.02.010
19. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. About the problem of analysis resistance bearing systems in failure of a structural element // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018. Vol. 14. Issue 3. Pp. 103–113. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-3-103-113
20. Zhang Z., Jiang C. Evidence-theory-based structural reliability analysis with epistemic uncertainty : a review // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2021. Vol. 63. Issue 6. Pp. 2935–2953. DOI: 10.1007/s00158-021-02863-w
21. Ведяков И.И., Райзер В.Д. Надежность строительных конструкций. Теория и расчет : монография. М. : АСБ, 2018. 414 с. EDN YTYHTE.
22. Truong V.H., Kim S.E. Reliability-based design optimization of nonlinear inelastic trusses using improved differential evolution algorithm // *Advances in Engineering Software*. 2018. Vol. 121. Pp. 59–74. DOI: 10.1016/J. ADVENGSOFT.2018.03.006
23. Saad L., Chateaufneuf A., Raphael W. Robust formulation for Reliability-based design optimization of structures // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018. Vol. 57. Issue 6. Pp. 2233–2248. DOI: 10.1007/s00158-017-1853-7
24. 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. DOI: 10.1016/j.cma. 2020.113018
25. Корноухов Н.В. Прочность и устойчивость стержневых систем: упругие рамы, фермы и комбинированные системы. М. : Стройиздат, 1949. 376 с.
26. Стрелецкий Н.С. Избранные труды / под ред. Е.И. Белея. М. : Стройиздат, 1975. 423 с.
27. Mushchanov V.P., Orzhekhovskii A.N., Zubenko A.V., Fomenko S.A. Refined methods for calculating and designing engineering structures // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 2 (78). Pp. 101–115. DOI: 10.18720/MCE.78.8. EDN XPKZTN.
28. Mushchanov V.F., Orzhekhovsky A.N. Numerical methods in assessing the reliability of spatial metal structures of a high level of responsibility // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023. Vol. 106. Issue 1. P. 10605. DOI: 10.4123/CUBS.106.05
29. Мушанов А.В., Цепляев М.Н. Новые подходы в оценке устойчивости элементов пространственных металлических конструкций // *Наука и творчество: вклад молодежи : сб. мат. Всерос. мол. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*. 2022. С. 196–200. EDN NEWMKM.
30. Orzhekhovskiy A., Priadko I., Tanasoglo A., Fomenko S. Design of stadium roofs with a given level of reliability // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 209. P. 110245. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110245

Поступила в редакцию 4 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 14 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Филиппович Мушанов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА); 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 9465-1673, Scopus: 55988406500, ResearcherID: AAO-8875-2021, ORCID: 0000-0003-3188-3400; mvf@donnasa.ru;

Анатолий Николаевич Оржеховский — кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА)**; 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 3058-6140, Scopus: 85079126906, ORCID: 0000-0002-9332-3807; aorzhehovskiy@bk.ru;

Александр Владимирович Муцанов — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА)**; 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 4194-7922, ResearcherID: HDO-4425-2022, ORCID: 0000-0002-4381-9476; a.v.mushchanov@donnasa.ru;

Максим Николаевич Цепляев — кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики; **Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА)**; 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 5039-9174, Scopus: 57208101665, ORCID: 0000-0002-1729-4127; m.n.cepliaev@donnasa.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Vedyakov I.I., Eremeev P.G., Odesskiy P.D., Popov N.A., Solovyev D.V. Regulatory requirements for the design of building structures for progressive collapse. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 4:16-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24. EDN ZIJLAD. (rus.).
2. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Kovalev V.V., Iliushchenko T.A. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 8(92):155-162. DOI: 10.18720/MCE.92.13. EDN ZZORLS.
3. 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. DOI: 10.1016/J. ENGSTRUCT.2018.06.082
4. Savin S.Y., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modelling of resistance to destruction of multi-storey frame-connected buildings at sudden loss of bearing elements stability. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456:012089. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012089
5. Guo Z., Li Z., Xing Z., Chen Y., Zheng Z., Lin G. Numerical analyses of post-fire beam-column assemblies with WUF-B connections against progressive collapse. *Engineering Failure Analysis*. 2022; 140:106502. DOI: 10.1016/J. ENGFAILANAL.2022.106502
6. 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. DOI: 10.13204/j.gyjz20180402
7. Zhi X., Li W., Fan F., Shen S. Influence of initial geometric imperfection on static stability of single-layer reticulated shell structure. *Spatial Structures*. 2021; 27:7. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2021.01.009
8. Liu H., Zhang W., Yuan H. Structural stability analysis of single-layer reticulated shells with stochastic imperfections. *Engineering Structures*. 2016; 124:473-479. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.06.046
9. Alekseytsev A.V., Gaile L., Druks P. Optimization of steel beam structures for frame buildings subject to their safety requirements. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 7(91):3-15. DOI: 10.18720/MCE.91.1. EDN GDKVHM.
10. 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. DOI: 10.1016/J. JCSR.2021.107085
11. Truesdell C. Novozhilov's Foundations of the nonlinear theory of elasticity (1953). *An Idiot's Fugitive Essays on Science*. 1984; 151-157. DOI: 10.1007/978-1-4613-8185-3_15
12. Fialko S.Yu., Kabantsev O.V., Perel'muter A.V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 2(102):10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14. EDN ZVLLVV.
13. 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. DOI: 10.1177/1748006X20928196
14. Luo H., Lin L., Chen K., Antwi-Afari M.F., Chen L. Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions. *Developments in the Built Environment*. 2022; 12:100087. DOI: 10.1016/J. DIBE.2022.100087
15. Perel'muter A.V., Kriksunov E.Z., Mosina N.V. Implementation of calculation of monolithic residential buildings for progressive (avalanche-like) collapse in the environment of the computer complex "SCAD Office". *Magazine of Civil Engineering*. 2009; 2(4):13-18. EDN NBMYRH. (rus.).
16. Ram M., Davim J.P. Acknowledgments. *Advances in System Reliability Engineering*. 2019. DOI: 10.1016/B978-0-12-815906-4.09998-X
17. Yang W., Zhang B., Wang W., Li CQ. Time-dependent structural reliability under nonstationary

and non-Gaussian processes. *Structural Safety*. 2023; 100:102286. DOI: 10.1016/J. STRUSAFE.2022.102286

18. Krejsa M., Janas P., Krejsa V. Structural reliability analysis using DOProC Method. *Procedia Engineering*. 2016; 142:34–41. DOI: 10.1016/J. PROENG. 2016.02.010

19. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. About the Problem of Analysis Resistance Bearing Systems in Failure of a Structural Element. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2018; 14(3):103–113. DOI: 10.22337/2587-9618-2018-14-3-103-113

20. Zhang Z., Jiang C. Evidence-theory-based structural reliability analysis with epistemic uncertainty : a review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2021; 63(6):2935–2953. DOI: 10.1007/s00158-021-02863-w

21. Vedyakov I.I., Rayzer V.D. *Reliability of building structures. Theory and calculation*. Moscow, ASV, 2018; 414. EDN: YTYHTE. (rus.).

22. Truong V.H., Kim S.E. Reliability-based design optimization of nonlinear inelastic trusses using improved differential evolution algorithm. *Advances in Engineering Software*. 2018; 121:59–74. DOI: 10.1016/J. ADVENGSOFT.2018.03.006

23. Saad L., Chateaufneuf A., Raphael W. Robust formulation for Reliability-based design optimization of structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018; 57(6):2233–2248. DOI: 10.1007/s00158-017-1853-7

24. 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. DOI: 10.1016/j.cma. 2020.113018

25. Kornouhov N.V. *Strength and stability of rod systems: elastic frames, trusses and combined systems*. Moscow, Stroyizdat, 1949; 376. (rus.).

26. Streletsky N.S. *Selected works* / ed. by E.I. Belenya. Moscow, Stroyizdat, 1975; 423. (rus.).

27. Mushchanov V.P., Orzhekhovskii A.N., Zubenko A.V., Fomenko S.A. Refined methods for calculating and designing engineering structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 2(78):101–115. DOI: 10.18720/MCE.78.8. EDN XPKZTN.

28. Mushchanov V.F., Orzhekhovsky A.N. Numerical methods in assessing the reliability of spatial metal structures of a high level of responsibility. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023; 106(1):10605. DOI: 10.4123/CUBS.106.05

29. Mushchanov A.V., Tseplyaev M.N. New approaches to assessing the stability of elements of spatial metal structures. *New approaches in assessing the stability of elements of spatial metal structures : collection of materials of the All-Russian Youth Scientific and practical Conference of students, postgraduates and young scientists*. 2022; 196–200. EDN NEWMKM. (rus.).

30. Orzhekhovskiy A., Priadko I., Tanasoglo A., Fomenko S. Design of stadium roofs with a given level of reliability. *Engineering Structures*. 2020; 209:110245. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110245

Received October 4, 2023.

Adopted in revised form on October 20, 2023.

Approved for publication on December 14, 2023.

B I O N O T E S : **Vladimir F. Mushchanov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Vice-Rector for Research; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People’s Republic, Russian Federation; SPIN-code: 9465-1673, Scopus: 55988406500, ResearcherID: AAO-8875-2021, ORCID: 0000-0003-3188-3400; mvf@donnasa.ru;

Anatoly N. Orzhekhovskiy — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People’s Republic, Russian Federation; SPIN-code: 3058-6140, Scopus: 85079126906, ORCID: 0000-0002-9332-3807; aorzhehovskiy@bk.ru;

Alexander V. Mushchanov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Structures; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People’s Republic, Russian Federation; SPIN-code: 4194-7922, ResearcherID: HDO-4425-2022, ORCID: 0000-0002-4381-9476; a.v.mushchanov@donnasa.ru;

Maxim N. Tseplyaev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics; PhD (Engineering), lecturer of the department, department of theoretical and applied mechanics; **Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People’s Republic, Russian Federation; SPIN-code: 5039-9174, Scopus: 57208101665, ORCID: 0000-0002-1729-4127; m.n.ceplyaev@donnasa.ru.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.