

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014:624.074

DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.1

Комплексный подход к оценке надежности пространственных металлических конструкций

Владимир Филиппович Мущанов, Анатолий Николаевич Оржеховский,
Максим Николаевич Цепляев, Александр Владимирович Мущанов

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (ДОННАСА);

г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведены некоторые результаты реализации разрабатываемого комплексного подхода к оценке надежности проектных решений зданий и сооружений повышенного уровня ответственности (большепролетные стержневые и листовые металлические конструкции, вертикальные цилиндрические резервуары больших объемов) с несущими металлическими конструкциями.

Материалы и методы. Начальным этапом разрабатываемого подхода оценки надежности зданий и сооружений повышенной ответственности является формирование уточненных конечно-элементных расчетных схем, основанных на детализации узловых соединений, и геометрических схем проектируемых конструкций, что позволяет выявить особенности напряженно-деформированного состояния (НДС) и выполнить уточненную оценку устойчивости элементов конструкций. Для реализации следующего этапа оценки склонности проектируемой системы к лавинообразному обрушению разработан и приведен специальный алгоритм расчета НДС конструкции, реализованный в геометрически и конструктивно нелинейной постановке. На заключительном этапе в случае необходимости выполняется с использованием метода Нелдера – Мида оптимизация полученного конструктивного решения по заданным показателям вероятности отказа для ключевых и второстепенных элементов.

Результаты. Предложенный подход позволяет с приемлемой практической точностью определять показатели надежности многократно статически неопределимых систем. Это особенно актуально для уникальных конструкций повышенной ответственности. Уточнен механизм потери устойчивости сжатых стержней структурных конструкций системы МАРХИ, предложена методика корректировки определения коэффициента μ с учетом полученных результатов; получены данные изменения аэродинамического коэффициента цилиндрических резервуаров больших объемов $V = 10\,000\text{--}30\,000\text{ м}^3$. Это дало возможность определить особенности рассматриваемых конструкций.

Выводы. Предложен комплексный алгоритм, позволяющий на основе детализации расчетных схем и оценки склонности проектируемых конструкций высокого уровня ответственности к лавинообразному разрушению выполнить уточненную оценку их уровня проектной надежности. На базе алгоритма предложена процедура оптимизации исходного проектного решения, базирующаяся на использовании метода Нелдера – Мида и реализованная на данный момент для минимизации целевой функции в виде массы основных конструктивных элементов (стержней и узлов-коннекторов).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: металлические конструкции, численные методы, лавинообразное разрушение, надежность, структурные конструкции, геометрическая нелинейность, конструктивная нелинейность, конструкции повышенного уровня ответственности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мущанов В.Ф., Оржеховский А.Н., Цепляев М.Н., Мущанов А.В. Комплексный подход к оценке надежности пространственных металлических конструкций. 2024. Т. 14. Вып. 1. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.1

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Николаевич Оржеховский, a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru.

An integrated approach to reliability assessment of spatial metal structures

Vladimir F. Mushchanov, Anatoly N. Orzhehovsky, Maxim N. Tseplyaev,
Alexander V. Mushchanov

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (DonNACEA);
Makeevka, Donetsk People's Republic, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Some results of implementation of the integrated approach to reliability assessment of design solutions of buildings and structures of increased level of responsibility (large-span rod and sheet metal structures, vertical cylindrical tanks of large volumes) with load-bearing metal structures are presented.

Materials and methods. The initial stage of the developed approach to assess the reliability of buildings and structures of increased responsibility is the formation of refined finite element design schemes based on the detailing of nodal connections and geometric schemes of designed structures, which allows to identify the features of the stress-strain state (SSS) and perform a refined assessment of the stability of structural elements. Some general patterns obtained based on such detail are given for large-span structural coatings and structures of vertical cylindrical tanks. To realize the next stage of assessment of the propensity of the designed system to avalanche collapse, a special algorithm for calculating the SSS of the structure, implemented in a geometrically and structurally non-linear formulation, was developed and presented. At the same time, for the considered calculation situation, during the multi-stage calculation, a set of key elements is determined, the failure of which, on the one hand, initiates the beginning of avalanche-like destruction, on the other hand, allows using the established set of elements to determine the upper bound of the numerical value of the probability of failure (or the reliability index) of a repeatedly statically indeterminate system. At the final stage, if necessary, optimization of the obtained structural solution is performed using the Nelder – Mead method according to the specified failure probability indicators for key and minor elements.

Results. The proposed approach allows to determine reliability indices of multiply statically indeterminate systems with acceptable practical accuracy. This is especially relevant for unique structures of increased responsibility. The mechanism of loss of stability of compressed rods of structural structures of the MARHI system was clarified, the methodology of correction of the μ coefficient determination taking into account the obtained results was proposed; the data of change of the aerodynamic coefficient of cylindrical tanks of large volumes $V = 10,000\text{--}30,000\text{ m}^3$ were obtained. This allowed us to determine the following features for the constructions under consideration: with an increase in the volume of the reservoir, there is a change in wind pressure in the area of the ladder junction, compared with a reservoir without a ladder; the maximum discrepancy with the normative values (up to 20 %) was noted in the negative pressure zones (opening effect on the wall); in the active pressure zone, there is a decrease in the vacuum pressure, depending on the size, up to 6 %.

Conclusions. A complex algorithm is proposed, which allows, on the basis of detailed design schemes and assessment of the propensity of the designed structures of high level of responsibility to avalanche-like destruction, to perform a refined assessment of their level of design reliability. On the basis of the algorithm, an optimization procedure of the initial design solution is proposed, based on the use of the Nelder – Mead method and currently implemented to minimize the target function in the form of the mass of the main structural elements (rods and connector nodes).

KEYWORDS: metal structures, numerical methods, avalanche failure, reliability, structural constructions, geometrical non-linearity, structural nonlinearity, structures of increased level of responsibility

FOR CITATION: Mushchanov V.F., Orzhehovsky A.N., Tseplyaev M.N., Mushchanov A.V. An integrated approach to reliability assessment of spatial metal structures. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(1):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.1

Corresponding author: Anatoly N. Orzhehovsky, a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие конструктивных форм пространственных конструкций, применяемых в современном строительстве, приводит к созданию новых конструктивных систем, не имеющих прецедентов в практике строительства. В сочетании с ростом масштабов объектов, использованием новых методов изготовления и монтажа, новых материалов это обостряет проблему оценки надежности разрабатываемых проектных решений, для которых в рамках использования традиционного метода предельных состояний не всегда обеспечивается требуемый уровень надежности¹.

¹ ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные требования. Актуализирован 01.01.2021. М. : Стандартинформ, 2019. 16 с.

В дополнение к техническим и технологическим аспектам, обуславливающим вопрос обеспечения надежности строительных объектов повышенного уровня ответственности, в последние годы важность проблемы обострилась угрозой террористических актов в отношении таких объектов, что также требует соответствующего учета и совершенствования их методики расчета и проектирования.

Отдельные аспекты рассматриваемой темы постоянно находятся в поле зрения научных коллективов во всем мире, о чем свидетельствует анализ научных публикаций в изданиях, представленных в ведущих международных базах данных. Однако в большинстве подобного рода исследований отсутствует комплексный подход к решению проблемы, охватывающий основные этапы проектирования от форми-

рования уточненных расчетных схем до разработки оптимальных конструктивных решений, обеспечивающих сочетание требуемого уровня надежности с достаточной экономичностью (рис. 1). Отсутствие четких, научно обоснованных результатов исследований приводит к тому, что в подавляющем большинстве действующих на сегодняшний день нормативных документов рекомендации по проектированию сооружений с повышенным уровнем ответственности носят фрагментарный, общий и неконкретный характер, который невозможно реализовать в виде определенного алгоритма проектирования.

На важность отдельных аспектов обозначенной проблемы указывает ряд работ, в рамках которых они, как правило, рассматриваются по отдельности, например:

- уточнение расчетных схем конструкций, в том числе за счет учета влияния конструктивного решения узлового соединения на напряженно-деформированное состояние (НДС) [1–6];
- совершенствование конструктивных решений узловых соединений и конструкций с целью предотвращения развития лавинообразного обрушения [7–9] путем управления НДС объекта за счет целенаправленного изменения основных параметров НДС [10–13];
- определение численных значений показателей надежности проектируемой конструкции во избежание недостатков, присущих полувероятностной основе метода предельных состояний [14–18]. При этом следует отметить отсутствие как четкого алгоритма действий при вычислении численных характеристик надежности конструкций в норма-

тивной литературе^{2, 3}, что значительно усложняет работу инженера, так и определения показателей надежности сложных многоэлементных статически неопределимых конструкций. Объединение подходов, когда склонность к лавинообразному обрушению⁴ оценивается на основе анализа вычисленных показателей надежности конструкции, используется в ограниченном числе работ [7, 19–21];

- оптимизация начального проектного решения на основании принятого значения заданной целевой функции [7, 19, 21, 22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Суммируя сказанное, можно отметить основные нерешенные научные проблемы, которые заключаются в:

- отсутствии теории расчета и общих принципов проектирования оптимальных пространственных металлических конструкций высокого уровня ответственности, обеспечивающих заданный уровень надежности и устойчивых к развитию прогрессирующего разрушения;
- недостаточности эмпирических знаний о влиянии конструктивных решений узловых соединений на общее НДС и несущую способность основных элементов и соответствующем учете этих факторов при определении численных значений показателей надежности проектируемой конструкции.

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 элементов⁵.

На различных этапах проводимого исследования авторами использовались методы:

- строительной механики: в форме метода конечных элементов (для анализа НДС и численного моделирования аэродинамических процессов) в геометрически и конструктивно нелинейной по-

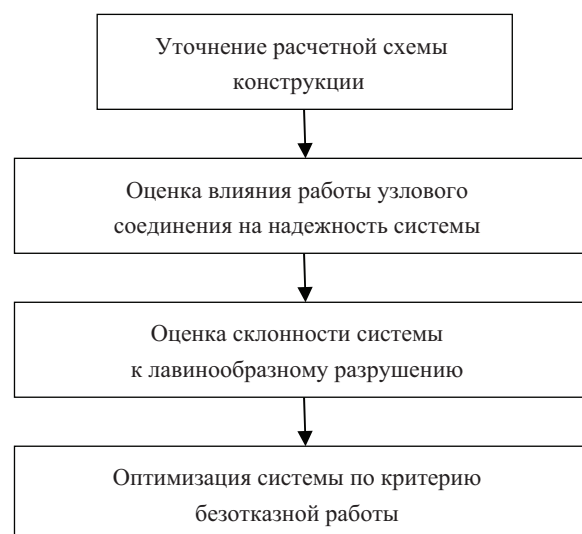


Рис. 1. Ключевые моменты совершенствования методик расчета и проектирования конструкций повышенного уровня ответственности

² ГОСТ Р ИСО 2394–2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности. Актуализирован 01.02.2017. М. : Стандартинформ, 2016. 62 с.

³ EN 1990:2002+A1. Eurocode — Basis of structural design. Brussels : Management Centre, 2002. 116 с.

⁴ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. Введен в действие 06.01.2019. М. : Стандартинформ, 2020. 24 с.

⁵ Данное исследование выполняется в рамках НИР «Научное обоснование новых подходов к проектированию оптимальных пространственных строительных металлоконструкций высокого уровня ответственности» на основе Соглашения № 22-29-00139 между Российским научным фондом и ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

становке (при оценке склонности систем к лавинообразному обрушению);

- теории подобия при физическом моделировании действительной работы элементов пространственных стержневых и листовых металлических конструкций (для верификации результатов численных исследований НДС на моделях конструкций);

- теории надежности строительных конструкций (при определении вероятности отказа системы и формировании критерия склонности системы к лавинообразному обрушению);

- оптимального проектирования (при совершенствовании исходного проектного решения на основе заданных ограничений для вероятности отказа ключевых и второстепенных элементов).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как было отмечено выше, учитывая комплексный характер рассматриваемой проблемы, *первый этап* решения задачи обеспечения надежности сооружений повышенного уровня ответственности предлагается осуществлять на основе *формирования уточненных расчетных схем* проектируемых сооружений, учитывающих, как правило, конструктивное исполнение узловых соединений и особенности конструкции, что не всегда принимается во внимание традиционными расчетными схемами [23]. Проиллюстрируем эффект такого исполнения на примере двух исследуемых конструктивных схем:

1. Сжатые стержневые элементы структурных покрытий.

Для сжатых стержневых элементов структурных покрытий с узловыми соединениями типа МАРХИ в диапазоне гибкостей $\lambda = 50\text{--}140$ на основе детального моделирования конструктивных особенностей узловых соединений (рис. 2, а) выполнено исследование процесса потери устойчивости с применением универсального расчетного комплекса ЛИРА-САПР 2019 R1. Расчет проводился с учетом физической и геометрической нелинейности. Начало процесса потери устойчивости фиксировалось для уровня нарушения прямо пропорциональной зависимости «напряжение – деформация» в процессе пошагового нагружения стержня (рис. 2, б). На рис. 2, с, d приведена визуализация картины НДС в исследуемом стержне и испытываемой модели фрагмента структурного покрытия, изготовленного в масштабе 1:1, в процессе испытаний соответственно.

Сравнение результатов численных исследований процессов потери устойчивости для случаев детального и идеализированного моделирования узлового соединения стержней структурного покрытия позволило зафиксировать следующие результаты:

1) для элементов малой и средней гибкости (при гибкости стержней $\lambda < 82$ и $R = 240$ МПа) несущая способность стержней несколько понижается по сравнению с данными отечественных норм проектирования (в пределах 1–10 %), что объясняется повышенным влиянием изгибных напряжений $\sigma_{loc,M}$

в зонах действия локального изгибающего момента, что способствует более раннему достижению на этих участках напряжений, превышающих σ_T , с последующей потерей устойчивости;

2) для элементов высокой гибкости (при гибкости стержней $\lambda > 82$ и $R = 240$ МПа) несущая способность стержней, наоборот, повышается по сравнению с данными отечественных норм проектирования. При этом в диапазоне гибкостей 83–100 увеличение составляет менее 10 %. С увеличением гибкости отличие от нормативных документов увеличивается в сторону большей несущей способности, что объясняется:

- значительным отличием формы искривления оси стержня в момент потери устойчивости от схемы деформирования в виде полуволны синусоиды, используемого в классических решениях задачи устойчивости;

- защемлением части длины приопорного участка стержня в узлах вставки-коннектора, что вызывает сокращение его расчетной длины, а следовательно, уменьшение гибкости и повышение несущей способности из условия устойчивости.

2. Стенки вертикальных цилиндрических резервуаров.

Для листовых конструкций вертикальных цилиндрических резервуаров больших объемов $V = 10\,000\text{--}30\,000$ м³ в конечно-элементной постановке исследовалось влияние детализации расчетных схем за счет учета конструктивных элементов технологических лестниц (рис. 3, а) на устойчивость стенки резервуара к действию кольцевых напряжений. Для проведения этого исследования дополнительно в среде SolidWorks Flow Simulation была определена необходимость уточненного моделирования обтекания конструкции вертикальных цилиндрических резервуаров (ВЦР) при отображении в расчетной схеме технологических лестниц (рис. 3, б). Полученные данные изменения аэродинамического коэффициента позволили установить следующие особенности для рассматриваемых конструкций:

1) с увеличением объема резервуара наблюдается изменение ветрового давления в зоне примыкания лестницы, по сравнению с резервуаром без лестницы;

2) максимальное расхождение до 20 % отмечено в зонах отрицательного давления (отрывающее воздействие на стенку);

3) в зоне активного давления возникает снижение вакуумметрического давления в зависимости от типоразмера до 6 %.

Проведенное исследование позволило зафиксировать, что учет в моделях лестниц существенно повышает значение σ_{cr} до 25–46 %, а их объемное моделирование дает возможность выбрать наиболее предпочтительный для повышения устойчивости конструктивный вариант.

В качестве *второго этапа* предлагается выполнить оценку системы на склонность к лавинообраз-

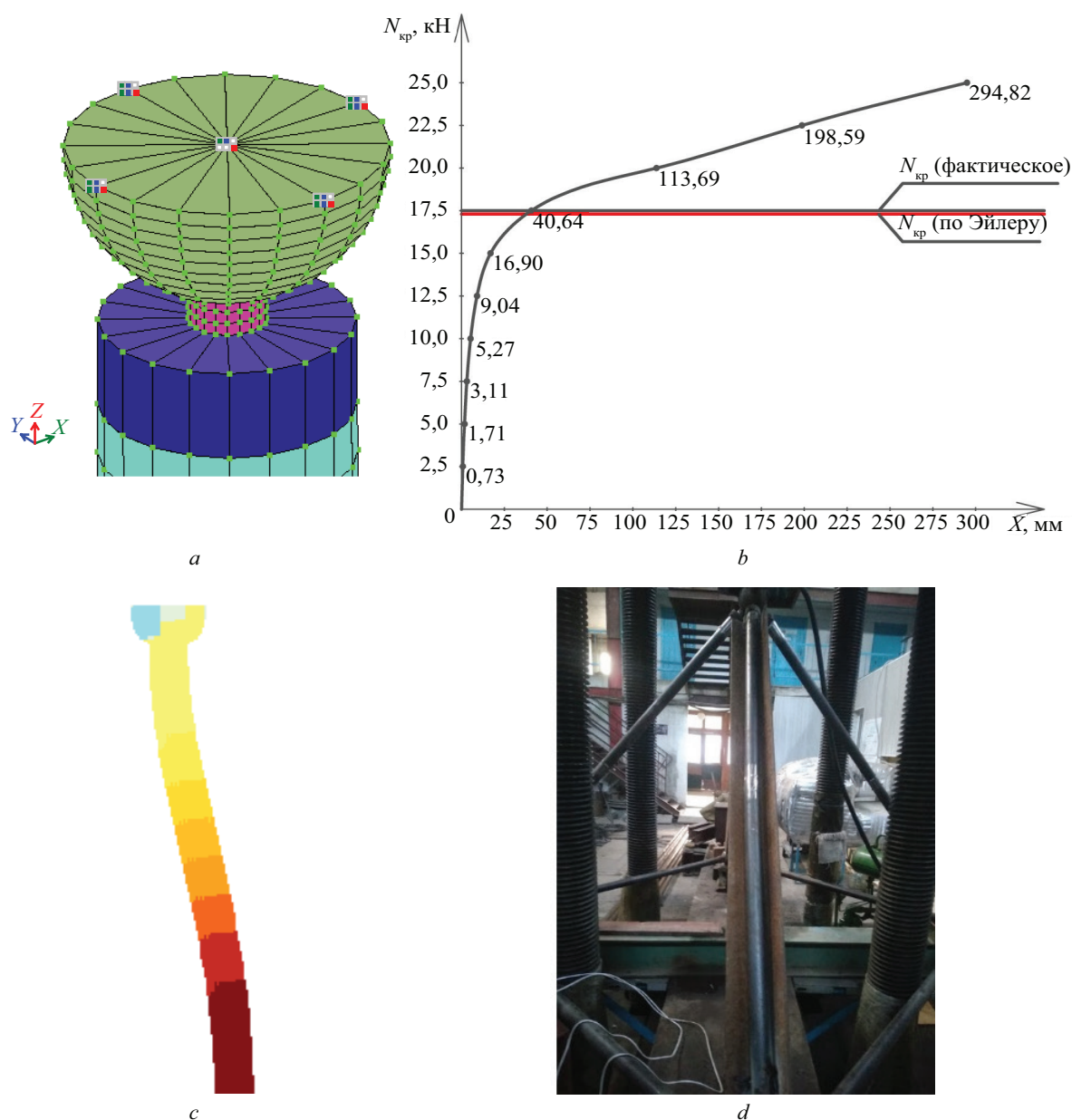


Рис. 2. Исследование устойчивости стержневых элементов структурных покрытий на основе формирования уточненных расчетных схем: *a* — конечно-элементное моделирование узлового соединения; *b* — зависимость «напряжение — деформация»; *c* — картина НДС при потере устойчивости стержня; *d* — экспериментальная верификация результатов численного исследования

ному обрушению. Определение склонности систем к лавинообразному разрушению в нормативной литературе, как правило, предписывается путем исключения из расчетной схемы конструкции одного элемента с заменой внешними нагрузками, равными усилиям в нем. Описанная методика реализована в ряде современных программных комплексов [13], но при всех их достоинствах остается открытым вопрос выбора исключаемого элемента, т.е. какой из всех элементов конструкции имеет наибольшую степень ответственности с точки зрения склонности системы к лавинообразному разрушению? Решение должен принять инженер, и он несет персональную ответственность за него, но в случаях многократно

статически неопределимых систем с большим количеством элементов однозначного ответа может и не быть даже с учетом рекомендаций в нормах.

Анализируя основные положения нормативных документов и научных публикаций, посвященных данному вопросу, можно сделать следующие выводы:

- основным нагружением первого расчетного этапа является суммарное действие постоянной и длительная часть временных нагрузок, действующих на сооружение;
- учитывая неопределенность, а зачастую и нелогичность назначения удаляемого на втором этапе расчета элемента (или совокупности элементов) конструкции, а также принимая во внимание те факты,

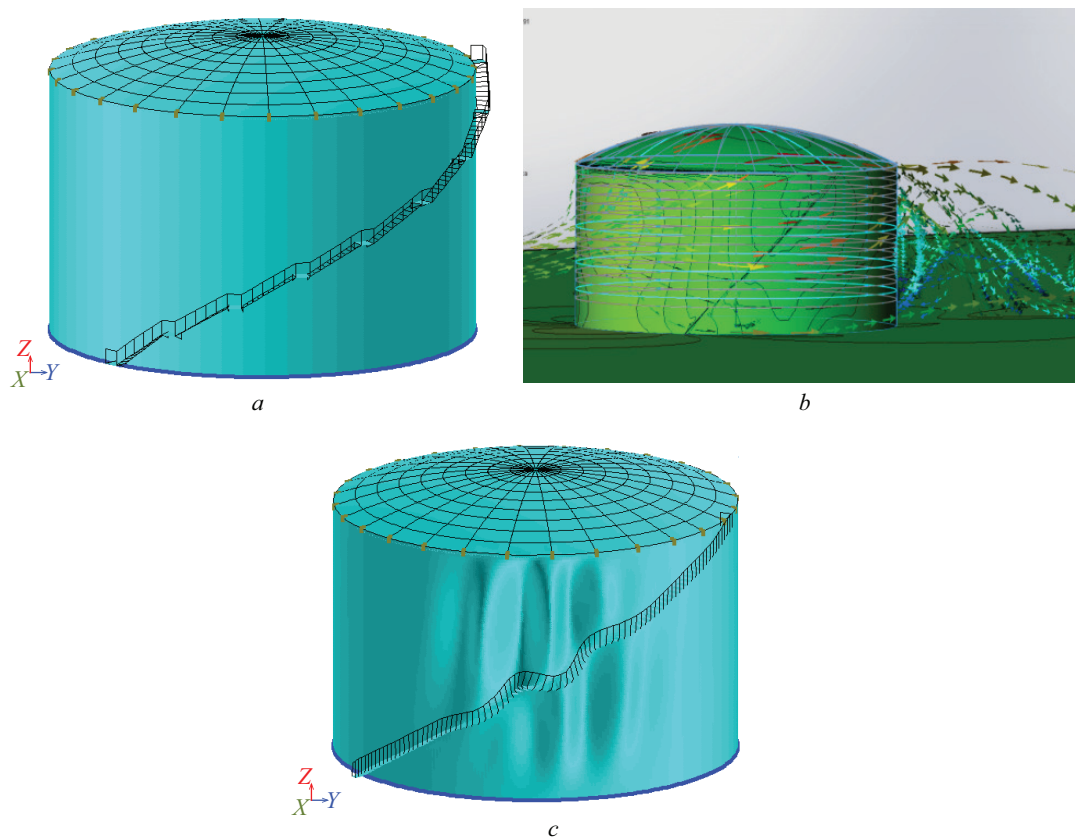


Рис. 3. Определение устойчивости стенок резервуаров на основе детального моделирования технологических лестниц: *a* — конечно-элементная модель резервуара; *b* — модель в SolidWorks для расчета ветрового давления; *c* — форма потери устойчивости в зоне стенки

что при нерасчетном увеличении временных нагрузок (прежде всего нерасчетных атмосферных нагрузок) первыми выходить из строя будут элементы, наиболее нагруженные для рассматриваемой схемы загрузки; при реализации террористических атак воздействию в первую очередь подвергаются наиболее нагруженные элементы конструкции, которые легче всего вывести из строя, то при определении удаляемой совокупности ключевых элементов конструкции логичным шагом станет поэтапное удаление элементов, обусловленное поэтапным увеличением рассматриваемых на первом этапе временных нагрузок;

- принимая во внимание тот факт, что большинство несущих металлических конструкций выполняется из пластичных малоуглеродистых и низколегированных сталей, у которых потеря несущей способности сопровождается значительным развитием пластических деформаций, что в корне отличается от хрупкого разрушения, характерного для железобетонных конструкций, для первичной оценки склонности конструкции к лавинообразному обрушению появляется возможность отказаться от принятого для расчета железобетонных каркасов зданий в ряде расчетных комплексов коэффициента динамичности $\mu = 2$.

На основании изложенного выше авторами предложен подход, позволяющий для анализируе-

мой расчетной ситуации определить степень ответственности элементов конструкции и точно установить наиболее ответственные элементы, которые и следует исключать из первичной расчетной схемы при расчете на склонность к прогрессирующему обрушению. Для определения степени ответственности элементов стержневых конструкций расчет НДС предлагается выполнять в геометрически и конструктивно нелинейной постановке с поэтапным приложением нагрузки [17, 24–26]. Анализируя порядок и последствия отказа стержня, определяется склонность конструкции к прогрессирующему разрушению. Алгоритм предложенной методики и блок-схема его реализации подробно описаны в работах [27, 28], а некоторые результаты, полученные с его применением, представлены на рис. 4.

В ходе *третьего этапа* осуществляется установление показателя надежности проектируемой системы. Особенностью предлагаемого подхода к определению численных показателей надежности рассматриваемых многократно статически неопределимых систем является установление своеобразного диапазона в виде верхней и нижней границ показателя надежности, для которых вероятность отказа системы будет находиться в диапазоне между вероятностью отказа одного, наиболее ответственного элемента, и вероятностью отказа группы эле-

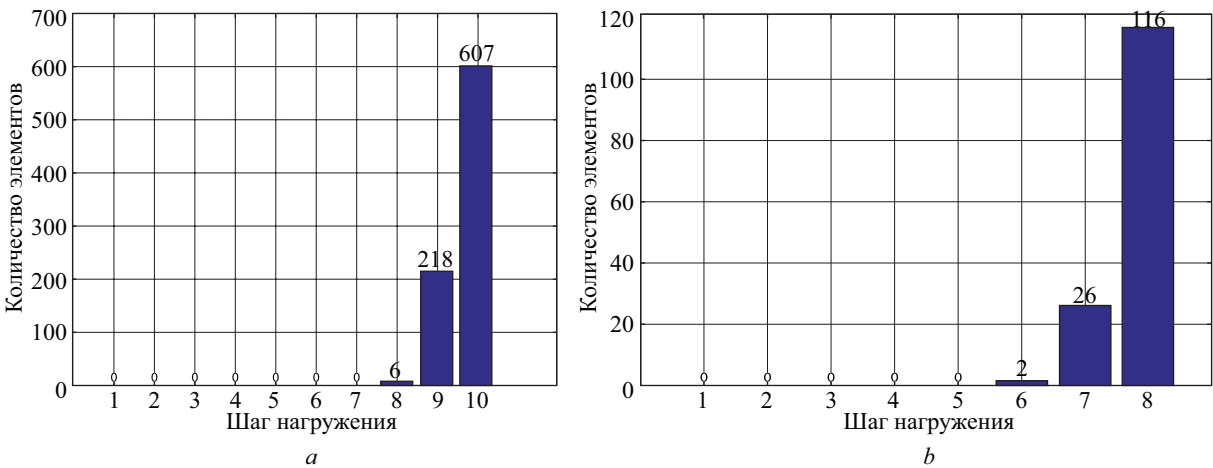


Рис. 4. Развитие лавинообразного обрушения в конструкциях: *a* — рамно-консольного покрытия над трибунами стадиона вылетом $l = 22$ м; *b* — структурного покрытия $24 \times 24 \times 3$ м

ментов, инициирующих начало лавинообразного разрушения, определенных по результатам второго этапа расчета.

В данном исследовании в качестве случайных величин выступают предел текучести стали и уровень напряжений в стержнях конструкции, который в свою очередь является комплексной случайной величиной, зависящей от ряда стохастических факторов: атмосферных нагрузок, геометрических характеристик сечений, осадок основания, геометрических несовершенств формы конструкции, полученных на монтаже и при эксплуатации. При такой постановке задачи наиболее целесообразным методом определения вероятности отказа выступает метод Монте-Карло (рис. 5). Вероятность отказа группы элементов, инициирующих начало лавинообразного разрушения, рассматривается с позиций модели параллельного соединения элементов, а также с учетом степени взаимозависимости рассматриваемой пары элементов в процессе вычисления [29].

В таблице приведены некоторые результаты применения разработанных процедур по корректировке начального проектного решения структурного покрытия размером $24 \times 24 \times 3$ м в части предотвращения лавинообразного разрушения и обеспечения нормативного уровня надежности.

В ходе *четвертого этапа* при необходимости выполняется оптимизация исходного проектного решения по заданному значению критерия надежности. На настоящий момент в терминах комплекса MATLAB на основе метода Нелдера – Мида реализован алгоритм поиска оптимального конструктивного решения для структурных покрытий на прямоугольном плане, основанный на минимизации теоретической массы конструкции. Разработанный алгоритм учитывает возможность подбора сечений центрально-сжатых стержней как в соответствии с требованиями нормативных документов, так и с использованием уточненных зависимостей, реализованных в ходе первого этапа. Оптимизация

конструктивной формы выполняется одним из двух способов:

- изменением относительной высоты покрытия (h/b);
- преобразованием исходной плоской формы в стержневую оболочку с приданием ей относитель-

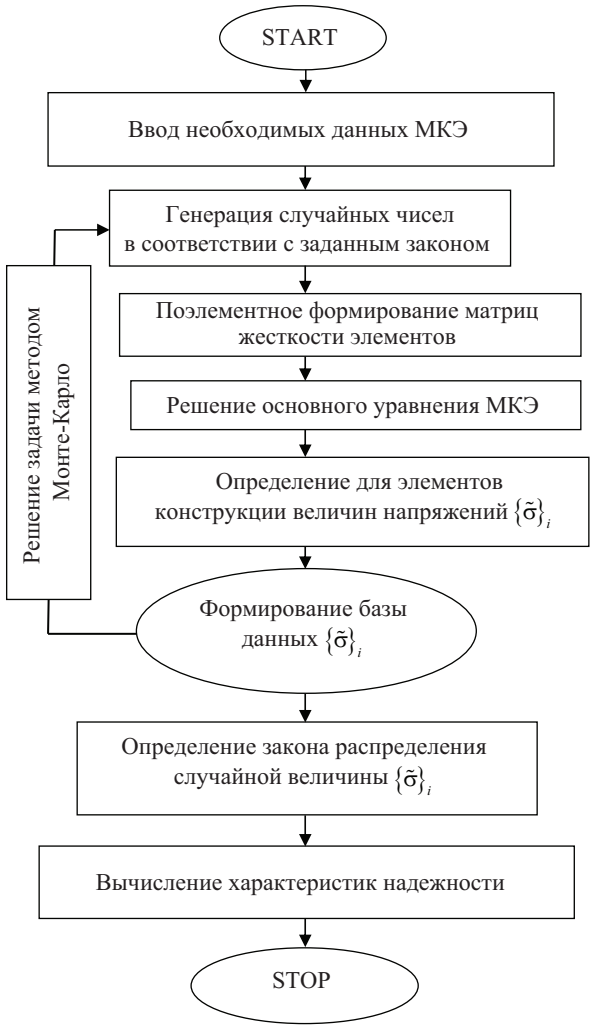


Рис. 5. Блок-схема алгоритма определения характеристик надежности конструкции

Сравнение уровней надежности структуры

Итерация	Сечение элемента	Конструктивный элемент	Количество элементов, вышедших из строя	β_{min}	β_{max}	Масса конструкции, т
1	63,5 × 3	Верхний пояс	0	−1,54	−1,36	6,14
	38 × 4	Раскосы	200			
2	63,5 × 3	Верхний пояс	40	0,51	1,14	7,21
3	63,5 × 3	Раскосы	0	2,67	2,67	7,52
	76 × 3,5	Нижний пояс	2			

ного выгиба (f/b) в сочетании с изменением относительной высоты покрытия (h/b).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе исследования результаты дают исходную информацию для дискуссии и позволяют наметить пути дальнейшего совершенствования разрабатываемого подхода, а именно:

1) предложенный в статье подход позволяет с приемлемой практической точностью определить показатели надежности многократно статически неопределимой стержневой системы. Это особенно актуально для уникальных большепролетных конструкций, представляющих собой сооружения с высоким уровнем ответственности, для которых важно расчетным путем обеспечить требуемый уровень надежности. При этом, конечно, более строгого теоретического обоснования требует гипотеза об установлении верхней границы надежности, определяемой на основе вероятности отказа группы элементов, инициирующих начало лавинообразного обрушения;

2) дальнейшего развития требует обоснование расчетных ситуаций, на основании анализа которых определяется совокупность ключевых элементов, надежность которых устанавливает устойчивость системы к развитию прогрессирующего разрушения. Здесь же отдельных исследований требует установление рекомендуемых значений динамических коэффициентов для элементов металлических пространственных конструкций, выполняемых из различных классов стали.

3) разработанные алгоритмы оценки надежности и оптимизации исследуемых систем в дальнейшем предполагается развивать в направлениях:

- обоснования расчетных ситуаций для формирования анализируемых расчетных схем;
- обоснования необходимой степени детализации расчетных схем, влияющих на уточнение расчетных показателей НДС конструкции, а сле-

довательно, показателей надежности элементов системы;

- учета конструктивного исполнения узловых соединений в моделях надежности;
- оптимизации исходных проектных решений по заданным значениям вероятности отказа для ключевых и второстепенных элементов.

Основные результаты, полученные авторами в ходе научных изысканий, обобщены и приведены ниже.

Представленные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют утверждать, что предложен комплексный алгоритм, позволяющий на основе детализации расчетных схем и оценки склонности проектируемых конструкций высокого уровня ответственности к лавинообразному разрушению выполнить уточненную оценку их уровня проектной надежности.

Разработан сквозной подход к установлению совокупности ключевых элементов, с одной стороны, определяющих устойчивость проектируемой системы к развитию прогрессирующего лавинообразного разрушения, с другой — определяющих верхнюю границу надежности многократно статически неопределимых систем.

Предложен универсальный инженерный подход к определению показателя надежности проектируемой многократно статически неопределимой системы высокого уровня ответственности, отличающийся установлением расчетных значений верхней и нижней границ показателя надежности, базирующихся на вероятности отказа одного (наиболее ответственного) и совокупности ключевых элементов соответственно.

Предложена процедура оптимизации исходного проектного решения, базирующаяся на использовании метода Нелдера – Мида и реализованная на данный момент для минимизации целевой функции в виде массы основных конструктивных элементов (стержней и узлов-коннекторов).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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
2. 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. Vol. 456. P. 012089. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012089
3. 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
4. Li H., Wang C., Han J. Research on effect of random initial imperfections on bearing capacity of single-layer spherical reticulated shell // *Ind. Constr.* 2018. Vol. 48. Pp. 23–27. DOI: 10.13204/j.gyz20180402
5. Zhi X., Li W., Fan F., Shen S. Influence of initial geometric imperfection on static stability of single-layer reticulated shell structure // *Spat. Struct.* 2021. Vol. 27. P. 7. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2021.01.009
6. 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
7. Алексейцев А.В., Гейли Л., Друкус П. Оптимизация балочных конструкций каркасных зданий с учетом требований к их безопасности // *Инженерно-строительный журнал*. 2019. № 7 (91). С. 3–15. DOI: 10.18720/MCE.91.1
8. Zheng L., Wang W., Li H.W. 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
9. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Ковалев В.В., Ильющенко Т.А. Моделирование разрушения железобетонного каркаса многоэтажного здания с предварительно напряженными ригелями // *Инженерно-строительный журнал*. 2019. № 8 (92). С. 155–162. DOI: 10.18720/MCE.92.13
10. 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. Vol. 102. Issue 2. P. 10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14
11. 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
12. Luo H., Lin L., Chen K., Antwi-Afari M., 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
13. 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. С. 13–18.
14. Ram M., Davim J.P. Acknowledgments // *Advances in System Reliability Engineering*. 2019. DOI: 10.1016/b978-0-12-815906-4.09998-x
15. Yang W., Zhang B., Wang W., Li C.Q. Time-dependent structural reliability under nonstationary and non-Gaussian processes // *Structural Safety*. 2023. Vol. 100. P. 102286. DOI: 10.1016/J.STRUSAFE.2022.102286
16. 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
17. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. Bout 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
18. 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
19. 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
20. 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
21. Cao T.S., Nguyen T.T.T., Nguyen V.S., Truong V.H., Nguyen H.H. Performance of six metaheuristic algorithms for multi-objective optimization of nonlinear inelastic steel trusses // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Issue 4. P. 868. DOI: 10.3390/buildings13040868
22. 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. 374. Pp. 113451–113468. DOI: 10.1016/J.CMA.2020.113451

neering. 2020. Vol. 366. P. 113018. DOI: 10.1016/j.sma.2020.113018

23. Мушчанов А.В., Цепляев М.Н. Новые подходы в оценке устойчивости элементов пространственных металлических конструкций // Наука и творчество: вклад молодежи : сб. мат. Всерос. молодежной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2022. С. 196–200. EDN NEWMKM.

24. 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

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. 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. Pp. 101–115. DOI: 10.18720/MCE.78.8

28. Mushchanov V., Orzhekhovskiy A. Numerical methods in assessing the reliability of spatial metal structures with a high level of responsibility // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. Vol. 106. P. 10605. DOI: 10.4123/CUBS.106.5

29. 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 10 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 27 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Филиппович Мушчанов** — 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;

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;

Александр Владимирович Мушчанов — 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.

Вклад авторов:

Мушчанов В.Ф. — научное руководство, концепция исследования, написание исходного текста.

Оржеховский А.Н. — написание исходного текста и его доработка.

Цепляев М.Н. — написание исходного текста.

Мушчанов А.В. — написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The development of structural forms of spatial structures used in modern construction leads to the creation of new structural systems that have no precedents in construction practice. In combination with the growing scale of objects, the use of new methods of manufacturing and assembly, new materials, this aggravates the problem of assessing

the reliability of the developed design solutions, for which the required level of reliability is not always ensured within the framework of using the traditional method of limit states¹. In addition to the technical

¹ GOST R ISO 2394–2016. Structures of construction. Basic principles of reliability. Updated 01.02.2017. Moscow, Standardinform Publ., 2016; 62. (rus.).

and technological aspects that determine the issue of ensuring the reliability of construction facilities of increased level of responsibility, in recent years the importance of the problem has been exacerbated by the threat of terrorist acts against such facilities, which also requires appropriate consideration and improvement of their calculation and design methods.

Certain aspects of the topic under consideration are constantly in the field of view of scientific teams all over the world, as evidenced by the analysis of scientific publications in the editions presented in the leading international databases. However, most of such studies lack a comprehensive approach to solving the problem, covering the main stages of design from the formation of refined design schemes to the development of optimal design solutions that ensure the combination of the required level of reliability with sufficient cost-effectiveness (Fig. 1). The lack of clear, scientifically substantiated research results in the fact that in the vast majority of currently valid regulatory documents recommendations on the design of structures with increased level of responsibility are fragmentary, general and unspecific, which cannot be realized in the form of a specific design algorithm.

The importance of certain aspects of the problem is indicated by a number of works, within the framework of which they are usually considered separately, for example:

- refinement of design schemes of structures, including by taking into account the influence of the structural solution of the nodal joint on the stress-strain state (SSS) [1–6];
- improvement of design solutions of nodal connections and structures in order to prevent the development of avalanche-like collapse [7–9] by controlling the SSS of the object through targeted changes in the main parameters of SSS [10–13];

- determination of numerical values of reliability indicators of the designed structure in order to avoid the disadvantages inherent in the semi-likelihood basis of the method of limit states [14–18]. At the same time, it should be noted that there is no clear algorithm of actions for calculating numerical reliability characteristics of structures in the normative literature^{2,3}, which significantly complicates the engineer's work, as well as the determination of reliability indicators of complex multi-element statically indeterminate structures. The combination of approaches, when the tendency to avalanche collapse⁴ is estimated on the basis of analyzing the calculated reliability indices of a structure, is used in a limited number of works [7, 19–21];

- optimization of the initial design solution based on the accepted value of the given target function [7, 19, 21, 22].

MATERIALS AND METHODS

To summarize, the main unresolved scientific problems are:

- lack of calculation theory and general principles of design of optimal spatial metal structures of high level of responsibility, providing a given level of reliability and resistant to the development of progressive failure;
- insufficient empirical knowledge about the influence of design solutions of nodal joints on the overall SSS and load-bearing capacity of the main elements and appropriate consideration of these factors in determining the numerical values of reliability indicators of the designed structure.

The aim of the research is to develop scientific substantiation of new approaches to the design of optimal spatial building steel structures of high level of responsibility resistant to the development of progressive collapse with guaranteed levels of reliability of key and secondary elements⁵.

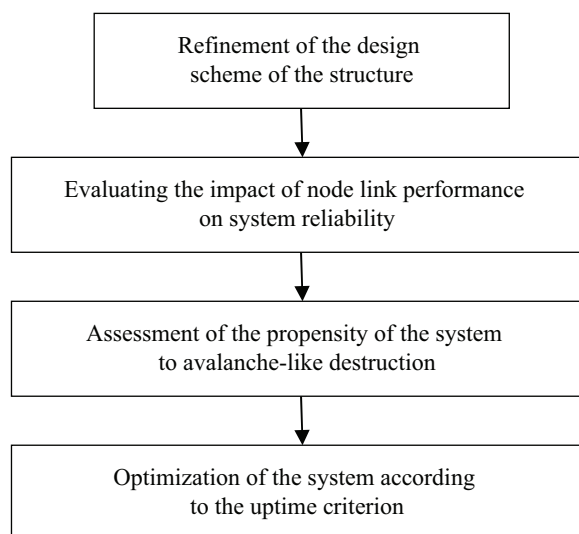


Fig. 1. Key points of improvement of methods of calculation and design of structures of increased level of responsibility

² EN 1990:2002+A1. Eurocode — Basis of structural design. Brussels, Management Centre, 2002; 116. (rus.).

³ CP 385.1325800.2018. Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. Basic provisions. Put into effect on 06.01.2019. Moscow, Standardinform Publ., 2020; 24. (rus.).

⁴ This research is carried out within the framework of the research work “Scientific substantiation of new approaches to the design of optimal spatial building steel structures of high level of responsibility” on the basis of Agreement No. 22-29-00139 between the Russian Science Foundation and FSAEI HE “Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University”.

⁵ This research is carried out within the framework of the research work “Scientific substantiation of new approaches to the design of optimal spatial building steel structures of high level of responsibility” on the basis of Agreement No. 22-29-00139 between the Russian Science Foundation and FSAEI HE “Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University”.

The authors used methods at different stages of the ongoing research:

- structural mechanics: in the form of the finite element method (for the analysis of SSS and numerical modelling of aerodynamic processes) in geometrically and structurally nonlinear formulation (when assessing the tendency of systems to avalanche collapse);
- similarity theory in physical modelling of the actual work of elements of spatial rod and sheet metal structures (for verification of the results of numerical studies of SSS on structural models);
- reliability theory of building structures (in determining the probability of system failure and forming the criterion of the system's propensity to avalanche collapse);
- optimal design (when improving the initial design solution on the basis of specified constraints for the probability of failure of key and minor elements).

RESEARCH RESULTS

As noted above, given the complex nature of the problem under consideration, the *first stage* of solving the problem of ensuring the reliability of a structure of a higher level of responsibility is proposed to be carried out on the basis of the *formation of refined design schemes* of designed structures, taking into account, as a rule, the structural design of nodal connections and design features, which is not always taken into account by traditional design schemes [23]. Let us illustrate the effect of such design on the example of two structural schemes under research:

1. Compressed rod elements of structural coatings.

For compressed rod elements of structural coverings with nodal joints of MARHI type in the range

of flexibility $\lambda = 50\text{--}140$ on the basis of detailed modelling of structural features of nodal joints (Fig. 2, *a*), the research of the stability loss process using the universal calculation complex LIRA-SAPR 2019 R1 has been performed. The calculation was carried out taking into account physical and geometrical nonlinearity. The beginning of the stability loss process was fixed for the level of violation of the directly proportional stress-strain relationship in the process of step-by-step loading of the rod (Fig. 2, *b*). Fig. 2, *c*, *d* show the visualization of the SSS picture in the investigated rod and the tested model of the structural coating fragment made in 1:1 scale during the testing process, respectively.

Comparison of the results of numerical investigations of the stability loss processes for the cases of detailed and idealized modelling of the nodal connection of the structural pavement rods allowed us to record the following results:

1) for elements of small and medium flexibility (at rod flexibility $\lambda < 82$ and $R = 240$ MPa) the load-bearing capacity of rods slightly decreases in comparison with the data of domestic design standards (within 1–10 %), which is explained by the increased influence of bending stresses $\sigma_{loc,M}$ in the zones of local bending moment action, which promotes earlier achievement of stresses exceeding σ_T in these sections with subsequent loss of stability;

2) for elements of high flexibility (at rod flexibility $\lambda > 82$ and $R = 240$ MPa), the load-bearing capacity of rods, on the contrary, increases in comparison with the data of domestic design standards. At the same time in the range of flexibility 83–100, the increase is less than 10 %. With increasing flexibility, the difference

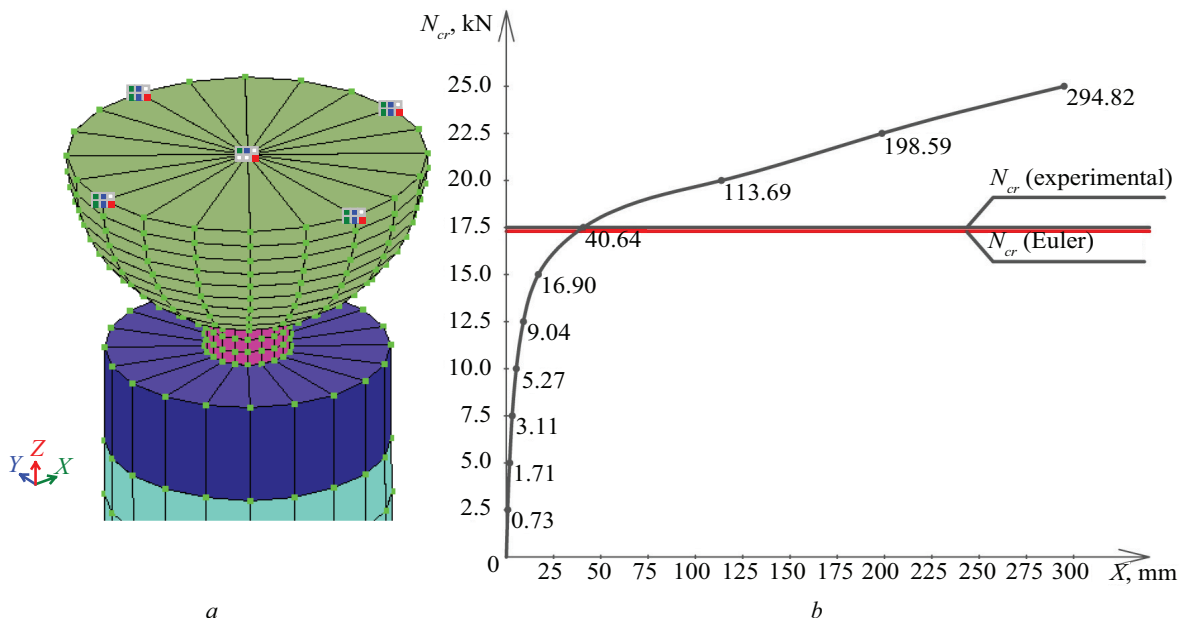


Fig. 2. Investigation of the stability of rod elements of structural coatings based on the formation of refined calculation schemes: *a* — finite element modelling of the nodal joint; *b* — “stress-strain” relationship; *c* — SSS picture at the loss of rod stability; *d* — experimental verification of the results of the numerical research

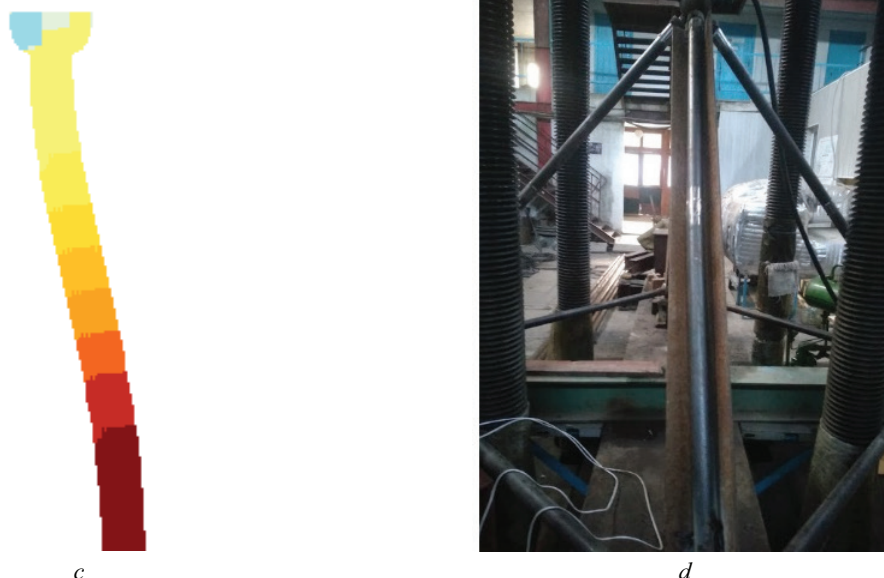


Fig. 2. Investigation of the stability of rod elements of structural coatings based on the formation of refined calculation schemes: *a* — finite element modelling of the nodal joint; *b* — “stress-strain” relationship; *c* — SSS picture at the loss of rod stability; *d* — experimental verification of the results of the numerical research (ending)

from the normative documents increases in the direction of higher load-bearing capacity, which is explained by:

- a significant difference in the shape of the curvature of the rod axis at the moment of loss of stability from the deformation scheme in the form of a half-wave sinusoid used in classical solutions of the stability problem;
- pinching a part of the length of the supported section of the rod in the nodes of the insert-connector, which causes a reduction in its design length, and consequently, a reduction in flexibility and an increase in the load-bearing capacity under the condition of stability.

2. Walls of vertical cylindrical tanks.

For sheet structures of vertical cylindrical tanks of large volumes $V = 10,000\text{--}30,000 \text{ m}^3$ in finite element formulation the influence of detailing of design schemes by taking into account the structural elements of technological ladders (Fig. 3, *a*) on the stability of the tank wall to the action of annular stresses was investigated. In order to carry out this research, the need for refined modelling of the flow of the vertical cylindrical tanks (VCT) structure was additionally determined in the SolidWorks Flow Simulation environment when technological ladders are shown in the design scheme (Fig. 3, *b*). Obtained data of aerodynamic coefficient changes allowed to establish the following features for the considered structures:

- 1) as the tank volume increases, there is a change in the wind pressure in the area of the ladder connection, compared to a tank without a ladder;
- 2) the maximum discrepancy of up to 20 % was observed in the negative pressure zones (breakaway effect on the wall);
- 3) a vacuum pressure drop of up to 6 % occurs in the active pressure zone, depending on the size.

The conducted research allowed to fix that the consideration in the models of stairs significantly increases the value of σ_{cr} to 25–46 %, and their volumetric modelling makes it possible to choose the most preferable structural variant for increasing stability.

As a *second step*, it is proposed to evaluate the system for avalanche collapse susceptibility. The determination of the avalanche collapse susceptibility of systems in the normative literature is usually prescribed by excluding one element from the design scheme of the structure and replacing it with external loads equal to the forces in it. The described methodology is implemented in a number of modern software packages [13], but with all their advantages, the question of selecting the excluded element remains open, i.e. which of all structural elements has the highest degree of responsibility in terms of the propensity of the system to avalanche failure? The engineer should make the decision, and he is personally responsible for it, but in cases of multiple statically indeterminable systems with a large number of elements, there may not be a clear-cut answer, even taking into account the recommendations in the standards.

Analyzing the main provisions of normative documents and scientific publications devoted to this issue, the following conclusions can be drawn:

- the main loading of the first design stage is the total action of permanent and the long term part of temporary loads acting on the structure;
- taking into account the uncertainty and often illogicality of the purpose of the element (or set of elements) of the structure to be removed at the second stage of calculation, and also taking into account the facts that in case of an uncalculated increase in temporary loads (first of all, uncalculated atmospheric loads),

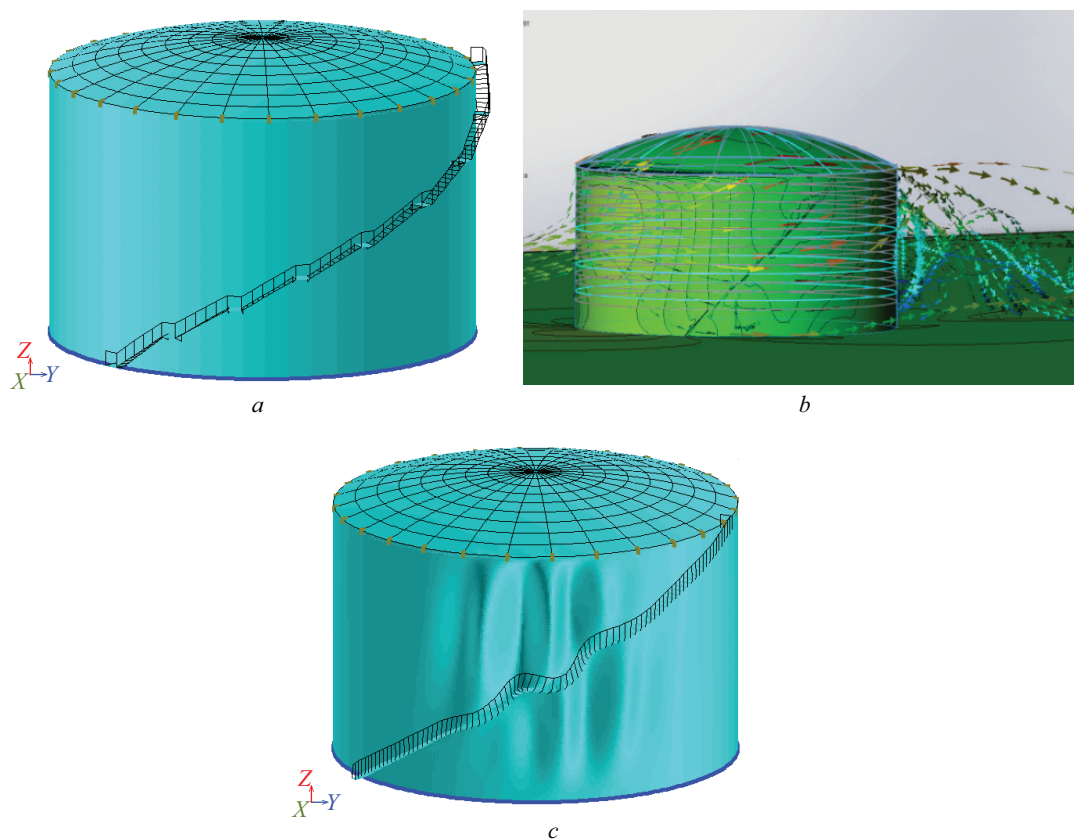


Fig. 3. Determination of tank wall stability based on detailed modelling of technological ladders: *a* — finite element model of the tank; *b* — model in SolidWorks for calculation of wind pressure; *c* — form of stability loss in the wall zone

the elements most loaded for the loading scheme under consideration will be the first to fail; in case of terrorist attacks, the most loaded elements of the structure, which are the easiest to fail, will be affected first of all;

- taking into account the fact that the majority of load-bearing metal structures are made of ductile low-carbon and low-alloy steels, in which the loss of bearing capacity is accompanied by a significant development of plastic deformations, which is fundamentally different from the brittle failure characteristic of reinforced concrete structures, for the initial assessment of the propensity of the structure to avalanche-like collapse there is an opportunity to abandon the coefficient adopted for the calculation of reinforced concrete building frames in a number of calculation complexes.

On the basis of the above, the authors propose an approach that makes it possible to determine the degree of responsibility of structural elements for the analyzed design situation and to accurately identify the most critical elements that should be excluded from the primary design scheme when calculating the propensity to progressive collapse. In order to determine the degree of responsibility of the elements of rod structures, it is proposed to perform the SSS calculation in a geometrically and structurally nonlinear formulation with systematic load application [17, 24–26]. By analyzing the order and consequences of rod failure, the propensity of the structure to progressive

failure is determined. The algorithm of the proposed technique and the block diagram of its implementation are described in detail in [27, 28], and some results obtained with its application are presented in Fig. 4.

In the course of the *third stage*, the reliability index of the designed system is established. The peculiarity of the proposed approach to the determination of numerical reliability indices of the considered multiply statically indeterminate systems is the establishment of a peculiar range in the form of upper and lower limits of the reliability index, for which the probability of failure of the system will be in the range between the probability of failure of one, the most critical element, and the probability of failure of a group of elements that initiate the onset of avalanche-like destruction, determined by the results of the second stage of calculation.

In this research, the yield strength of steel and the level of stresses in the bars of the structure act as random variables, which in turn is a complex random variable depending on a number of stochastic factors: atmospheric loads, geometric characteristics of sections, foundation settlement, and geometric imperfections in the shape of the structure obtained during installation and operation. In such a problem formulation, the most appropriate method for determining the probability of failure is the Monte Carlo method (Fig. 5). The probability of failure of a group of elements initiating the onset of avalanche-like failure is considered

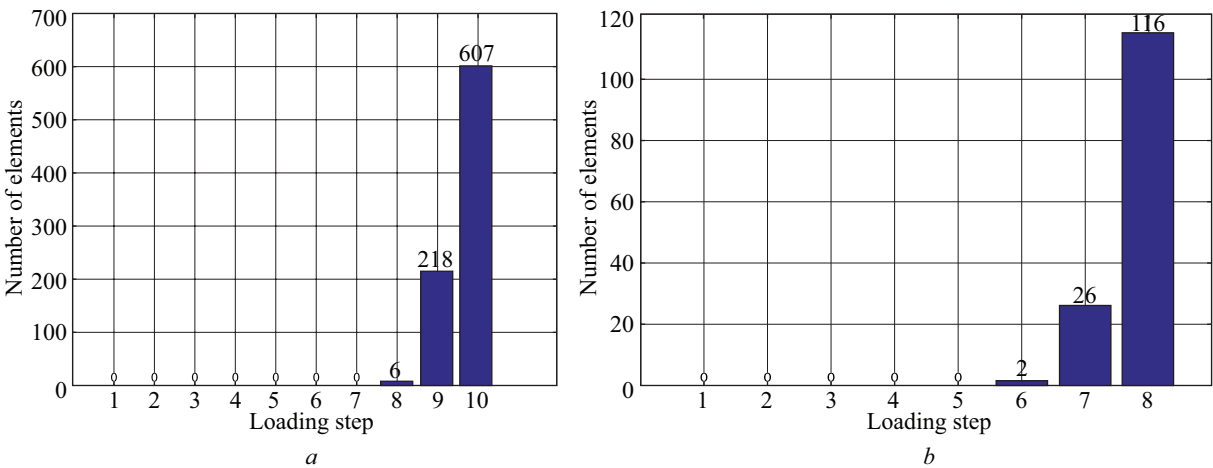


Fig. 4. Development of avalanche-like collapse in structures: *a* — frame-console covering over the stadium stands with a span of $l = 22$ m; *b* — structural covering $24 \times 24 \times 3$ m

from the standpoint of the model of parallel connection of elements, as well as taking into account the degree of interdependence of the considered pair of elements in the calculation process [29].

The table shows some results of the application of the developed procedures to adjust the initial design solution of a $24 \times 24 \times 3$ m structural pavement in terms of preventing avalanche failure and ensuring the normative level of reliability.

In the course of the *fourth stage*, if necessary, the initial design solution is optimized according to a given value of the reliability criterion. At present, in terms of MATLAB complex on the basis of the Nelder-Mead method, an algorithm for searching the optimal structural solution for structural coverings on a rectangular plan, based on minimization of the theoretical mass of the structure, has been implemented. The developed algorithm takes into account the possibility of selecting cross-sections of centrally compressed bars both in accordance with the requirements of normative documents and using the refined dependencies implemented during the first stage. Optimization of the structural shape is performed in one of two ways:

- by changing the relative height of the pavement (h/b);
- by converting the original flat shape into a rod shell by giving it a relative camber (f/b) combined with a change in the relative height of the cover (h/b).

CONCLUSION AND DISCUSSION

The findings of the research provide background information for discussion and suggest ways to further improve the approach being developed, namely:

- 1) the approach proposed in the article allows to determine with acceptable practical accuracy the reliability indices of a multiple statically indeterminate rod system. This is especially relevant for unique large-span structures, which are structures with a high level of responsibility, for which it is important to ensure the required level of reliability by calculation. At the same time, of course, more rigorous theoretical justification is required for the hypothesis of establishing the upper limit of reliability, determined on the basis of the probability of failure of a group of elements that initiate the onset of avalanche collapse;

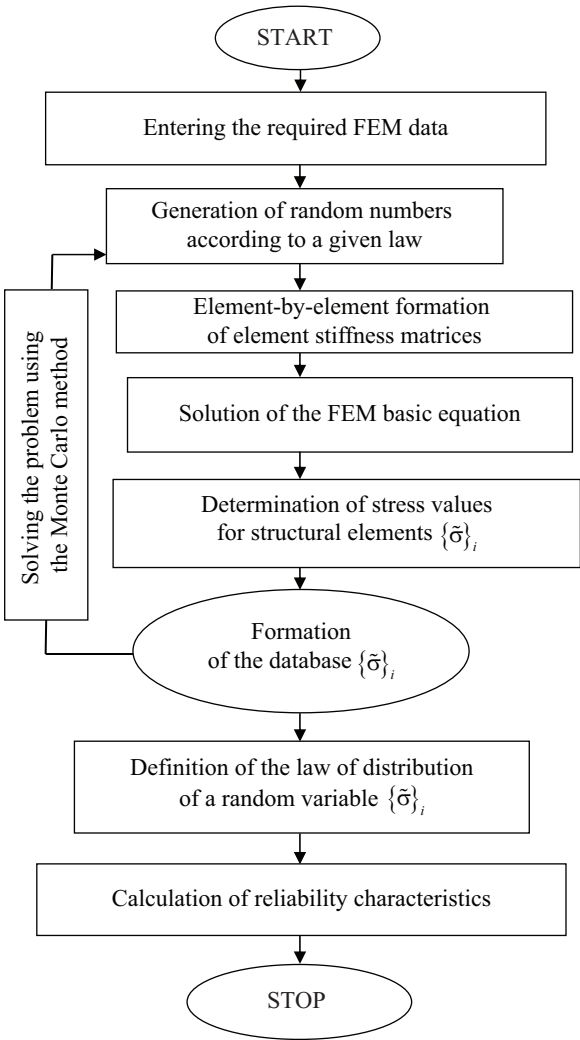


Fig. 5. Block diagram of the algorithm for determining the reliability characteristics of the design

Comparison of structure reliability levels

Iteration	Element section	Structural element	Number of elements out of service	$\beta_{\min}$	$\beta_{\max}$	Weight of the structure, tonnes
1	63.5 × 3	Top chord	0	-1.54	-1.36	6.14
	38 × 4	Struts	200			
2	63.5 × 3	Top chord	40	0.51	1.14	7.21
3	63.5 × 3	Struts	0	2.67	2.67	7.52
	76 × 3.5	Lower chord	2			

2) further development requires justification of design situations, on the basis of analysis of which a set of key elements is determined, the reliability of which establishes the stability of the system to the development of progressive failure. Here also separate researches require establishment of recommended values of dynamic coefficients for elements of metal spatial structures made of different steel classes;

3) the developed algorithms for reliability assessment and optimization of the systems under research will be further developed in the following directions:

- justification of calculation situations for the formation of the analyzed calculation schemes;
- justification of the necessary degree of detailing of the design schemes, affecting the specification of the design indicators of the VAT of the structure, and, consequently, the reliability indicators of the system elements;
- consideration of structural design of nodal joints in reliability models;
- optimization of initial design solutions according to specified values of failure probability for key and minor elements.

The main results obtained by the authors in the course of scientific research are summarized and presented below.

The presented results of theoretical and experimental studies allow us to assert that a complex algorithm is proposed, which makes it possible to perform a refined assessment of their level of design reliability on the basis of detailed design schemes and assessment of the propensity of the designed structures of high level of responsibility to avalanche-like destruction.

An end-to-end approach to the establishment of a set of key elements, on the one hand, determining the resistance of the designed system to the development of progressive avalanche-like failure, on the other hand, determining the upper limit of reliability of multiply statically indeterminable systems, has been developed.

A universal engineering approach to determining the reliability index of the designed multiple statically indeterminable system of high level of responsibility is proposed, which differs by establishing the calculated values of the upper and lower limits of the reliability index based on the probability of failure of one (the most responsible) and a set of key elements, respectively.

An optimization procedure for the initial design solution based on the use of the Nelder – Meade method is proposed and implemented so far to minimize the target function in the form of the mass of the main structural elements (rods and connector nodes).

REFERENCES

1. 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
2. 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
3. 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
4. Li H., Wang C., Han J. Research on effect of random initial imperfections on bearing capacity of single-layer spherical reticulated shell. *Ind. Constr.* 2018; 48:23-27. DOI: 10.13204/j.gyz20180402
5. Zhi X., Li W., Fan F., Shen S. Influence of initial geometric imperfection on static stability of single-layer reticulated shell structure. *Spat. Struct.* 2021; 27:7. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2021.01.009
6. 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
7. 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; 91(7):3-15. DOI: 10.18720/MCE.91.1 (rus.).

8. Zheng L., Wang W., Li H.W. 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
9. 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; 92(8):155-162. DOI: 10.18720/MCE.92.13 (rus.).
10. 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; 102(2):10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14
11. 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
12. Luo H., Lin L., Chen K., Antwi-Afari M., 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
13. Perelmuter A.V., Kriksunov E.Z., Mosin N.V. Implementation of the calculation of monolithic residential buildings for progressive (avalanche) collapse in the environment of the computer complex "SCAD Office". *Magazine of Civil Engineering*. 2009; 2:13-18. (rus.).
14. Ram M., Davim J.P. Acknowledgments. *Advances in System Reliability Engineering*. 2019. DOI: 10.1016/b978-0-12-815906-4.09998-x
15. Yang W., Zhang B., Wang W., Li C.Q. Time-dependent structural reliability under nonstationary and non-Gaussian processes. *Structural Safety*. 2023; 100:102286. DOI: 10.1016/J.STRUSAFE.2022.102286
16. 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
17. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. Bout 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
18. 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
19. 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
20. Saad L., Chateaneuf 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
21. Cao T.S., Nguyen T.T.T., Nguyen V.S., Truong V.H., Nguyen H.H. Performance of six meta-heuristic algorithms for multi-objective optimization of nonlinear inelastic steel trusses. *Buildings*. 2023; 13(4):868. DOI: 10.3390/buildings13040868
22. 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
23. Mushchanov A., Tseplyaev M. New approaches to assessing the stability of elements of spatial metal structures. *Science and creativity: the contribution of youth : collection of materials from the All-Russian youth scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists*. 2022; 196-200. EDN NEWMKM. (rus.).
24. 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
25. Kornoukhov N.V. *Strength and stability of rod systems: elastic frames, trusses and combined systems*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1949; 376. (rus.).
26. Streletsky N.S. *Selected works*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975; 422. (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; 2:101-115. DOI: 10.18720/MCE.78.8
28. Mushchanov V., Orzhekhovskiy A. Numerical methods in assessing the reliability of spatial metal structures with a high level of responsibility. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023; 106:10605. DOI: 10.4123/CUBS.106.5
29. 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 September 10, 2023.

Adopted in revised form on September 20, 2023.

Approved for publication on September 27, 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;

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.cepliaev@donnasa.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.

Contribution of the authors:

Vladimir F. Mushchanov — scientific guidance, research concept, writing original text.

Anatoly N. Orzhekhovskiy — writing original text, text revision.

Maxim N. Tseplyaev — writing original text.

Alexander V. Mushchanov — writing original text.

The authors declare no conflict of interest.