



ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
METAL CONSTRUCTIONS**

2020, ТОМ 26, НОМЕР 1, 5–14
УДК 624.047.2

(20)-0403-1

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ РАМНО- КОНСОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НАД ТРИБУНАМИ СТАДИОНОВ

А. Н. Оржеховский

*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.
E-mail: aorzhevovskiy@bk.ru*

Получена 24 января 2020; принята 27 марта 2020.

Аннотация. В статье рассматриваются стационарные рамно-консольные покрытия над трибунами стадионов. А именно влияние таких стохастических величин, как: отклонения геометрических характеристик металлопроката, снеговая нагрузка, просадки основания и прочностные свойства стали на надежность конструкции. Рассматривается методика упрощенного подхода к вычислению характеристик надежности системы, базирующегося на анализе характеристик надежности группы наиболее ответственных элементов. Определен наиболее рациональный метод вычисления вероятности отказа конструкции. Обоснованы основные параметры, влияющие на надежность системы, и способы их учета при определении характеристик надежности. Приведен алгоритм определения группы наиболее ответственных элементов конструкции и анализа живучести сооружения. Предложен алгоритм численного определения характеристик надежности системы, базирующийся на методе конечных элементов. Выполнен анализ характеристик надежности несущих конструкций покрытия над трибунами с использованием варьируемых параметров в виде вылета консоли, шага рам, угла наклона покрытия к горизонту. Анализ производился при учете как отдельно действующих факторов, так и при совместном учете. Для численного эксперимента вышеупомянутые алгоритмы реализованы на языке программирования MATLAB.

Ключевые слова: строительные конструкции, рамно-консольные покрытия над трибунами стадионов, надежность, стохастические величины.

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ РАМНО- КОНСОЛЬНИХ ПОКРИТТІВ НАД ТРИБУНАМИ СТАДІОНІВ

А. М. Оржеховський

*ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.
E-mail: aorzhevovskiy@bk.ru*

Отримана 24 січня 2020; прийнята 27 березня 2020.

Анотация. У статті розглядаються стаціонарні рамно-консольні покриття над трибунами стадіонів. А саме вплив таких стохастичних величин, як: відхилення геометричних характеристик металлопрокату, снігове навантаження, просадки основи та міцнісні властивості сталі на надійність конструкції. Розглядається методика спрощеного підходу до обчислення характеристик надійності системи, що базується на аналізі характеристик надійності групи найбільш відповідальних елементів конструкції. Визначено найбільш раціональний метод обчислення ймовірності відмови конструкції. Обґрунтовано основні параметри, що впливають на надійність системи та способи їх урахування при визначенні характеристик надійності. Наведено алгоритм визначення групи найбільш відповідальних елементів

конструкції та аналізу живучості споруди. Запропоновано алгоритм чисельного визначення характеристик надійності системи, що базується на методі кінцевих елементів. Виконано аналіз характеристик надійності несучих конструкцій покриття над трибунами з використанням змінних параметрів у вигляді вильоту консолі, кроку рам, кута нахилу покриття до горизонту. Аналіз проводився як при окремо діючих факторах, так і при спільному урахуванні. Для чисельного експерименту вищезазначені алгоритми реалізовані на мові програмування MATLAB.

Ключові слова: будівельні конструкції, рамно-консольні покриття над трибунами стадіонів, надійність, стохастичні величини.

ANALYSIS OF RELIABILITY PARAMETERS OF STRUCTURES OF FRAME-CANTILEVER COVERINGS OVER STADIUM STANDS

Anatoly Orzhekhovsky

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,

2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.

E-mail: aorzhehovskiy@bk.ru

Received 24 January 2020; accepted 27 March 2020.

Abstract. The article discusses stationary frame-cantilever over the stadium stands. Namely, the influence of stochastic variables such as deviations in the geometric characteristics of rolled metal, snow load, subsidence of the base and strength properties of steel on the reliability of the structure. The technique of a simplified approach to calculating the reliability characteristics of a system based on an analysis of the reliability characteristics of the group of the most critical structural elements is considered. The most rational method for calculating the probability of structural failure has been determined. The main parameters affecting the reliability of the system, and methods for taking them into account when determining the reliability characteristics, are substantiated. An algorithm for determining the group of the most critical structural elements and analysis of the survivability of the structure is given. An algorithm is proposed for the numerical determination of the system reliability characteristics based on the finite element method. It has been carried out the analysis of reliability of bearing structures covering over the stands, using variable parameters in the form of departure the console, step frames, angle coverage to the horizon. The analysis was carried out taking into account both separately acting factors, and with joint accounting. For a numerical experiment, the above algorithms are implemented in the MATLAB programming language.

Keywords: building construction, frame and cantilever of the roof above the stands of the stadiums, reliability, stochastic value.

На данный момент проектирование стальных рамно-консольных стационарных конструкций покрытий над трибунами стадионов базируется на методе предельных состояний. Данный метод лежит в основе таких нормативных документов в области строительства, как ДБН [1], СП, EUROCODE [16], а также многих других. При использовании методики, предложенной в этих документах, возникает ряд спорных вопросов в

области обеспечения надежности конструкции. Метод предельных состояний требует сопоставления расчетного напряжения в элементе (Q_p) с расчетным значением несущей способности (R_y). При выполнении условия $Q_p < R_y$, считается, что надежность обеспечена. Таким образом, надежность конструкций во всех расчетных случаях оказывается приблизительно одинаковой и зависит только от расчетной и конструктивной схемы, а

также материала конструкции. Пытаясь учесть этот недостаток норм, ДБН [1] и EUROCODE [16] ранжируют конструкции по классу последствий аварий (экономических и людских потерь) и категориям ответственности, а также приводят максимально допустимые характеристики надежности для этой классификации. Но, несмотря на требования строительных норм обеспечивать заданную степень надежности строительных конструкций, при использовании методики проектирования по предельным состояниям не всегда это условие выполняется для конструкций повышенной ответственности, каковыми являются конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов.

С целью проведения анализа живучести стержневой рамно-консольной конструктивной формы покрытия над трибунами стадиона выполняется численный расчет покрытия, по результатам которого определяется и фиксируется группа разрушенных элементов, определяющих верхнюю границу надежности конструкции в целом. Состоянием разрушения считается момент прекращения возможности дальнейшей эксплуатации сооружения вследствие потери несущей способности. С целью определения порядка выхода из строя элементов конструкции выполняется поэтапный численный расчет покрытия при приведённой к узловому воздействию характеристической временной снеговой нагрузке $S_{норм}$ для рассматриваемого района строительства (г. Донецк). В случае если ни один элемент покрытия не разрушается, временная нагрузка увеличивается этапами по 0,5 кН и выполняется перерасчет.

После получения порядка выхода из строя элементов определяется группа стержней, для которой будут насчитываться характеристики надежности, в частности вероятность отказа и β – характеристика безопасности. Таким образом, выбирается группа из 5–7 стержней, которая и будет определять надежность системы в целом (рис. 1).

Для выбранных на предыдущем этапе расчете элементов выполняется циклический расчет, основанный на методе конечных элементов, с учетом рассматриваемых случайных величин (снег, ветер, геометрические отклонения и т. д.). Количество циклов расчета определяется совокупностью значений выборки входных случайных величин. Таким образом, формируется выборка напряжений для рассматриваемой группы стерж-

ней. Выборка должна иметь значительный объем. Исследуя эту проблему, ряд авторов (Райзер, Шпетте, Пичугин) приводят числа в интервале 10^4 – 10^8 . В качестве второй составляющей уравнения надежности [4] выступает случайная величина характеристики сопротивления материала конструкции (предел текучести) $\check{R}(t)$, которая формируется на основе анализа статистических данных, полученных на металлургических заводах либо экспериментально. Полученные две обобщенных случайных величины обрабатываются методами математической статистики (определяются их законы и плотности распределения). На основе установленных законов распределения случайных величин вычисляются соответствующие статистические характеристики (математическое ожидание, стандартное отклонение). Далее, оперируя плотностью, законами и характеристиками распределений, вычисляются вероятности отказа и характеристика безопасности (дальность отказа) для каждого из выбранных элементов в группе. Максимальное значение вероятности отказа является нижней границей надежности. На рисунке 2 изображена блок-схема предложенного алгоритма. Вероятность отказа определяется методом Монте-Карло [5].

Для проведения численного эксперимента с целью определения показателей надежности, на основе предложенных алгоритмов, принят пространственный блок покрытия над трибунами стадиона, состоящий из шести несущих консольных рам и, соответственно, пяти пролетов. Геометрическая схема несущих консольных рам с маркировкой основных параметров конструкции приведена на рисунке 3.

Приведенная конструкция несущих рам покрытия над трибунами стадионов (рис. 3) часто применима при реконструкции старых стадионов, построенных в Советском Союзе (стадион «Авангард» г. Макеевка, стадион «Металлург» г. Донецк), также на стадионах небольшой вместительности или запасных полях, и на стадионах средней вместительности до 10 000 сидячих мест (покрытие над трибунами основного поля ФК «Олимпик»).

Для каждой из характеристик, исходя из конструктивных ограничений и требований целесообразности, назначались максимальное и минимальное значение.

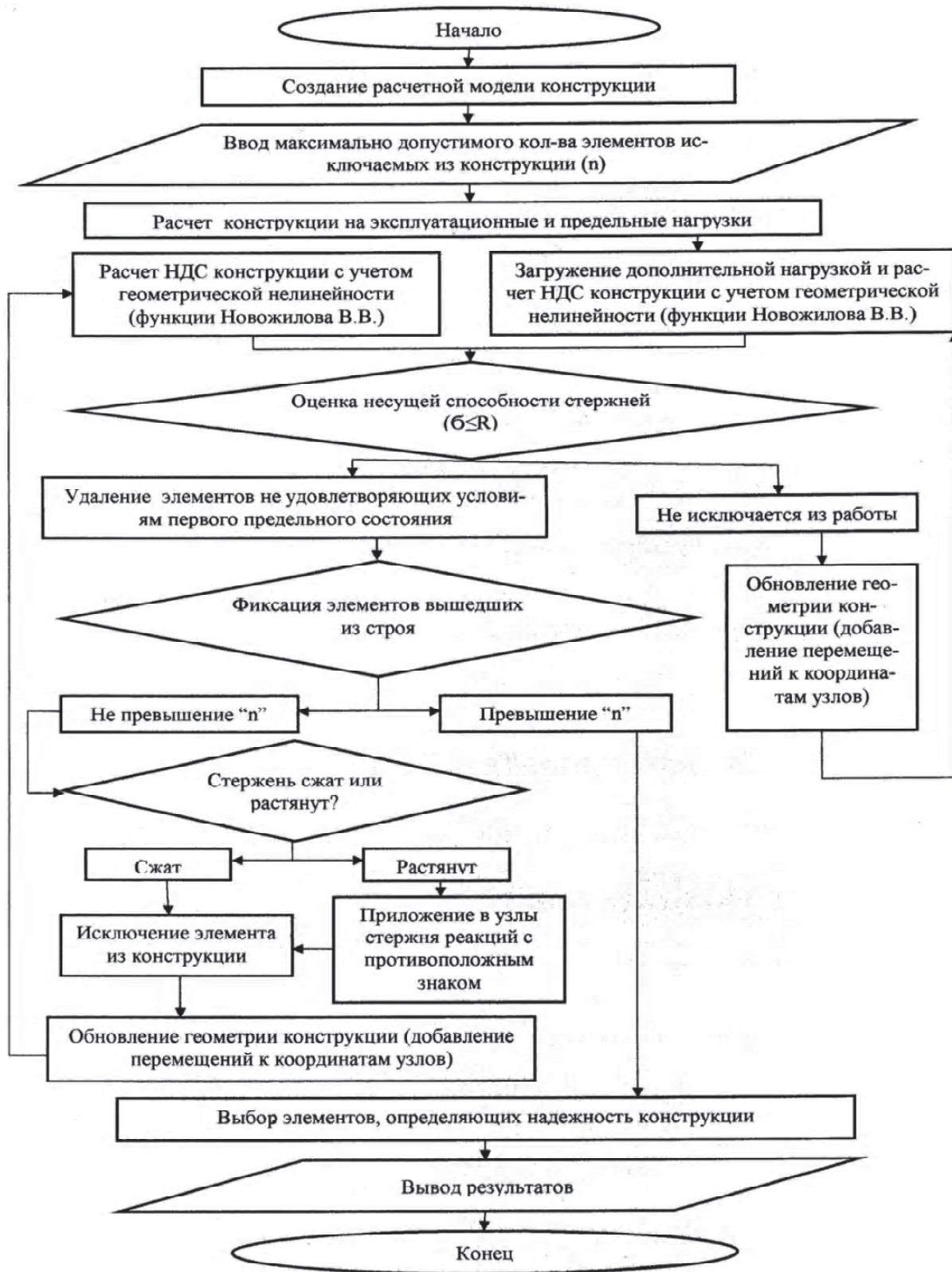


Рисунок 1. Блок-схема определения группы элементов конструкции, характеризующих надежность системы в целом.

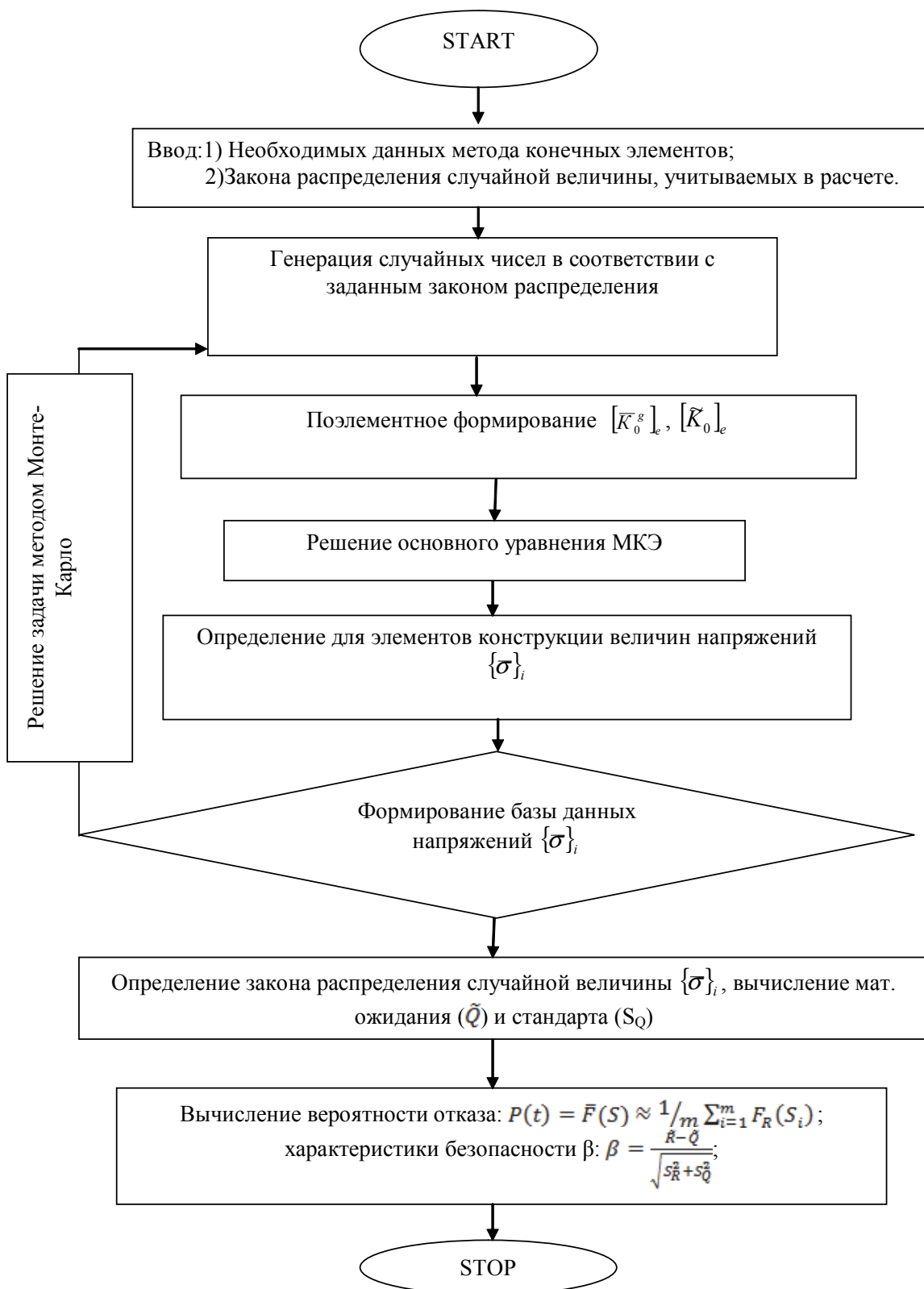


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма определения критериев надежности стационарных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов.

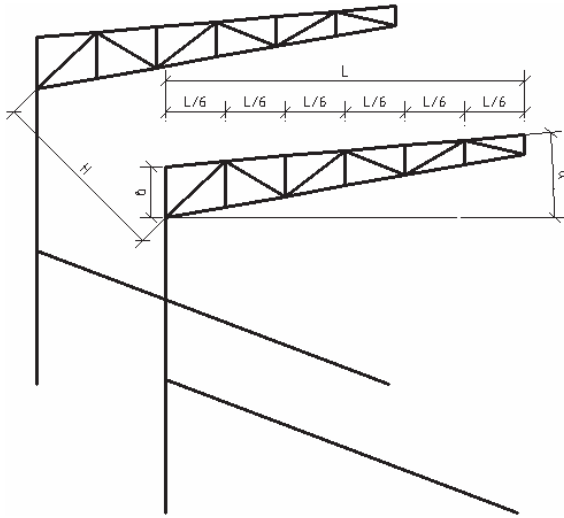


Рисунок 3. Геометрическая схема несущих консольных рам покрытия над трибунами стадиона.

Следовательно, рассматривается 8 вариантов комбинаций значений параметров в конструкции (табл. 1). В качестве варьируемых параметров системы рассматривались следующие характеристики: L – вылет консольной фермы покрытия (4...22 м); α – угол наклона покрытия к горизонтали (0...30°); H – шаг несущих рам (4...12 м). Следует отметить, что в работе рассматривается напряженно-деформируемое состояние только конструкций консольной части покрытия, напряженное состояние опорной стойки рамы не вошло в область изучения.

При анализе схем разрушения конструкций очевидно, что стержни, выходящие из строя в первую очередь (до первого этапа лавинообраз-

Таблица 1. Рассматриваемые комбинации варьируемых параметров системы

№ варианта конструкции	Угол наклона α (градусы)	Шаг рам H (м)	Вылет фермы L (м)
1	0	4	4
2	30	4	4
3	0	12	4
4	30	12	4
5	0	4	22
6	30	4	22
7	0	12	22
8	30	12	22

ного разрушения), принадлежат основной несущей конструкции – консольной ферме. В таблице 2 приведен список элементов, вышедших из строя на первом этапе разрушения системы. Все эти стержни находились в рамках одной фермы со стержнями, испытывающими наибольшие значения усилий из всего рассматриваемого блока покрытия. Схема фермы приведена на рисунке 4.

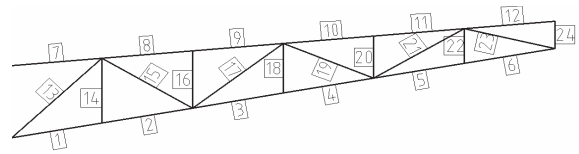


Рисунок 4. Присвоение порядковых номеров стержням несущей фермы.

Следовательно, надёжность всего покрытия может определяться надёжностью элемента или группы элементов, приведенных в таблице 2.

Геометрические характеристики плоских сечений и прочностные характеристики генерируются на основании анализа металлопроката двух металлургических заводов: «Луганский трубный завод» и «ПАО Днепропетровский металлургический завод им. Коминтерна». Данные по этим случайным величинам приведены в источнике [4].

Выборки прочностных свойств и геометрических характеристик металлопроката всех сечений были подвергнуты χ^2 -анализу на предмет возможности аппроксимации распределения случайных величин нормальным законом распределения по критерию Пирсона (использовалась программа *Microsoft Excel*). Анализ показал, что распределение каждой из случайных величин отличается от нормального не более, чем на 5% (был задан уровень значимости 0,05).

Снеговая нагрузка как случайная величина принималась в соответствии с двойным экспоненциальным законом распределения Гумбеля [5]. Методом математической инверсии было получено выражение, позволяющее сформировать выборку значений снеговой нагрузки для Донецкого региона:

$$S = 521,48 - 270,413 \times \ln(-1,0 \cdot \ln(R + 0,0375)) \quad (1)$$

Таблица 2. Выход из строя стержней фермы, имеющей наибольшие напряжения в элементах

№ схемы	Шаг рам Н (м)	Вылет фермы L (м)	Угол наклона α (°)	Шаг догрузки	Кол-во исключаемых стержней	Номера стержней*
1	4	4	0	8	1	1
2	4	4	30	7	3	1,2,7
3	12	4	0	8	1	2
4	12	4	30	9	1	1
5	4	22	0	12	1	7
6	4	22	30	6	1	1
7	12	22	0	2	3	1, 2, 7
8	12	22	30	2	4	1, 2, 7, 13

*В силу симметрии блока покрытия, наиболее напряженные элементы находятся в двух средних фермах.

где R – генератор равномерной случайной величины в пределах $[0...0,935]$.

Необходимые параметры распределения Гумбеля получены путем анализа статистики снеговых максимумов за год в течение 40 лет. Анализируя формулу (1) видно, что должно выполняться условие $\ln(R+0,0375) < 0$, чтобы значение снеговой нагрузки не перешли в область комплексных чисел. При использовании максимального значения $R = 0,935$ этого не произойдет. Данное выражение позволяет осуществить реализации значений снеговой нагрузки в пределах от 200 до 1 500 Па, что соответствует характеру нагрузки для рассматриваемого региона.

Так как способы учета геометрических несовершенств, получаемых конструкцией на монтаже, и податливости основания крайне сложно реализуемы, для много раз статически неопределимой системы, каковой является рассматриваемая конструкция покрытия над трибунами стадиона, то учет данных факторов осуществляется на основе анализа реальной геометрической формы системы [6]. На практике это осуществлялось с помощью фиксации координат узлов конструкции методами геодезии. Представляя отклонения геометрии точек как случайную величину, рассматривались несколько законов распределения на предмет аппроксимации (χ^2 , логнормальное и нормальное распределения). В качестве аппроксимирующего принят нормальный закон распределения. Дополнительно рассматриваемая случайная величина была подвергнута χ^2 -анализу по критерию Пирсона (использовалась программа *Microsoft Excel*). Анализ показал, что распреде-

ление отклонений случайной величины по рассматриваемым точкам отличается от нормального не более чем на 5%. Следовательно, можно считать нормальный закон распределения приемлемым.

Результаты проведенных вычислений вероятности отказа и характеристики надежности рассматриваемых форм конструкции покрытия над трибунами стадиона при совместном учете вышперечисленных факторов приведены в таблице 3.

Анализируя данные, приведенные в таблице 3, однозначно можно сказать, что комплексный учет стохастических величин дает большее значение вероятности отказа, чем каждой по отдельности. Значения характеристик безопасности сопоставимо с нормативными, но в большинстве вариантов (схемы 1–3, 6–8) не удовлетворяет требованиям надежности, выдвигаемым к покрытиям над трибунами стадионов, как к конструкциям, в случае обрушения которых могут быть большие финансово-экономические, а также человеческие потери.

Выводы

1. Комплексный и частный учет таких стохастических величин как прочностные свойства металлопроката, начальные геометрические несовершенства проката, снеговая нагрузка, податливость основания (просадка) и геометрические несовершенства, полученные конструкцией на монтаже позволяет оценить влияние каждого отдельного фактора на общую надежность системы. Путем анализа вероятности

Таблица 3. Характеристики надежности наиболее ответственного элемента конструкции при раздельном и комплексном учете ряда случайных величин

№ схемы	Снеговая нагрузка		Податливость основания и геометрические несовершенства конструкции		Геометрических несовершенств плоских сечений металлопроката		Комплексный учет всех факторов		Нормативные значения (ДБН Украина)	
	β	P_f	β	P_f	β	P_f	β	P_f	β_i^{ex}	P_i^{ex}
1	5,46	$0,946 \cdot 10^{-7}$	5,72	$0,235 \cdot 10^{-9}$	7,04	$0,334 \cdot 10^{-11}$	4,47	$0,824 \cdot 10^{-4}$	4,76	$1 \cdot 10^{-6}$
2	5,21	$0,564 \cdot 10^{-7}$	5,33	$0,783 \cdot 10^{-8}$	6,52	$0,543 \cdot 10^{-11}$	4,49	$0,772 \cdot 10^{-4}$		
3	5,41	$0,629 \cdot 10^{-7}$	5,64	$0,698 \cdot 10^{-7}$	7,22	$0,752 \cdot 10^{-10}$	4,52	$0,835 \cdot 10^{-4}$		
4	5,77	$0,994 \cdot 10^{-7}$	5,93	$0,988 \cdot 10^{-7}$	7,11	$0,654 \cdot 10^{-10}$	4,89	$0,568 \cdot 10^{-6}$		
5	5,91	$0,547 \cdot 10^{-8}$	6,07	$0,255 \cdot 10^{-9}$	7,21	$0,256 \cdot 10^{-11}$	5,01	$0,986 \cdot 10^{-6}$		
6	5,04	$0,743 \cdot 10^{-7}$	5,21	$0,815 \cdot 10^{-7}$	6,29	$0,112 \cdot 10^{-9}$	3,57	$0,378 \cdot 10^{-4}$		
7	4,85	$0,217 \cdot 10^{-5}$	4,82	$0,348 \cdot 10^{-5}$	6,03	$0,952 \cdot 10^{-6}$	3,22	$0,267 \cdot 10^{-4}$		
8	4,81	$0,443 \cdot 10^{-5}$	4,79	$0,321 \cdot 10^{-5}$	5,99	$0,419 \cdot 10^{-7}$	3,08	$0,399 \cdot 10^{-4}$		

Примечание: серым цветом выделены ячейки, в которых указан уровень надежности ниже нормативного значения.

отказа отдельно рассмотренного фактора установлено, что наибольшее влияние на надежность оказывает снеговая нагрузка, и далее (в порядке убывания) податливость основания и геометрические несовершенства, полученные на монтаже, исходные геометрические несовершенства проката.

- По результатам численного эксперимента установлено, что, в силу стохастического характера величины вероятности отказа P_f , она менее четко характеризует степень надежности конструкции, в отличие от характеристики безопасности β . Следовательно, с целью более точной оценки надежности системы рекомендуется пользоваться (в случае возможности) характеристикой β .

- Анализ показателей надежности рассмотренных конструктивных схем, запроектированных в соответствии с требованиями нормативных документов в рамках расчета по предельным состояниям, показывает, что такой подход в большинстве случаев не обеспечивает требуемого уровня надежности уникальных конструкций, каковыми являются стационарные стальные рамно-консольные покрытия над трибунами стадионов. Следовательно, можно сделать вывод о необходимости применения прямых методов теории надежности для подбора сечений элементов конструкции, определения показателей надежности с последующим уточнением соответствующих значений частных коэффициентов надежности.

Литература

- ДБН В 1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – Уведено вперше (зі скасуванням в Україні ГОСТ 27751, СТ СЭВ 3972-83, СТ СЭВ 3973-83, СТ СЭВ 4417-83, СТ СЭВ 4668-84) ; надано чинності 2009-12-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 49 с.

References

- DBN V 1.2-14-2009. General principles for ensuring the reliability and structural safety of buildings, structures, constructions and foundations [Text]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2009. 49 p. (in Ukraine)
- Mushchanov, V. F.; Orzhekhovskiy, A. N. Determination of the trajectory of the destruction of structures above the stands of stadiums using

2. Мушчанов, В. Ф. Определение траектории разрушения конструкций над трибунами стадионов на примере стадиона «Металлург» в городе Донецк [Текст] / В. Ф. Мушчанов, А. Н. Оржеховский // Вестник ДонНАСА. 2012. Вып. 2012-3(95) Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. С. 40–43.
3. Мушчанов, В. Ф. Учет геометрической нелинейности в численных методах расчета строительных конструкций [Электронный ресурс] / В. Ф. Мушчанов, А. И. Демидов, А. Н. Оржеховский // Вестник ДонНАСА. 2018. Вып. 2018-4(132) Научно-технические достижения студентов строительной архитектурной отрасли. Т. 2. Технологии строительных конструкций, изделий и материалов. С. 87–91. – Режим доступа : [http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2018/vestnik_2018-4\(132\)_tom_2.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2018/vestnik_2018-4(132)_tom_2.pdf).
4. Мушчанов, В. Ф. Экспериментальное исследование прочностных и геометрических характеристик гнуто-сварных труб прямоугольного сечения украинских производителей [Текст] / В. Ф. Мушчанов, А. Н. Оржеховский // Вестник ДонНАСА. 2013. Вып. 2013-3(101) Здания и конструкции с использованием новых материалов и технологий. С. 9–12.
5. Мушчанов, В. Ф. Численное определение вероятности отказа изгибаемого стального стержня [Электронный ресурс] / В. Ф. Мушчанов, И. М. Гаранжа, А. Н. Оржеховский // Металлические конструкции. 2017. Том 23, № 1. С. 15–23. – Режим доступа : http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2017-1/02_mushchanov_garanzha_orzhekovskiy.pdf.
6. Роменский, Д. И. Подбор сечения элементов стальных рамно-консольных покрытий над трибунами стадионов с учетом требований надежности [Текст] / Д. И. Роменский, А. Н. Оржеховский // Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова». 2017. № 8. С. 35–46.
7. Gorokhov, Ye. Reliability provision of rod shells of steady roofs over stadium stands at stage of design work [Текст] / Ye. Gorokhov, V. Mushchanov, Yu. Pryadko // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. P. 353–363.
8. Krejsa, M. Application of the DOProC method in solving reliability problems [Текст] / M. Krejsa, P. Janas, V. Krejsa // Applied Mechanics and Materials. 2016. № 821. P. 717–724.
9. Mushchanov, V. Accounting for the probabilistic nature of geometric imperfections form spatial coatings on the stands braced-cantilever type [Текст] / V. Mushchanov, A. Annenkov, A. Orzhekovskiy // Металлические конструкции. 2014. Том 20, № 3. С. 169–178.
10. An unsymmetric 8-node hexahedral solid-shell element with high distortion tolerance: Linear formulations [Текст] / J. Huang, S. Cen, Z. Li [et. al.] // International Journal for Numerical Methods in Engineering. Volume 116. Issue 12–13. P. 759–783.
11. the example of the «Metallurg» stadium in Donetsk [Text]. In: *Proceedings of the DNACA*. 2012. Issue 2012-3(95) Buildings and structures using new materials and technologies. P. 40–43. (in Russian)
3. Mushchanov, V. F.; Demidov, A. I.; Orzhekhovskiy, A. N. Accounting for geometric nonlinearity in numerical methods for calculating building structures [Electronic resource]. In: *Proceedings of the DNACA*. 2018. Issue 2018-4(132) Scientific and technical achievements of students in the construction and architectural industry. Vol. 2. Technologies of building structures, products and materials. P. 87–91. Access mode: [http:// donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2018/vestnik_2018-4\(132\)_tom_2.pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2018/vestnik_2018-4(132)_tom_2.pdf). (in Russian)
4. Mushchanov, V. F.; Orzhekhovskiy, A. N. An experimental study of the strength and geometric characteristics of bent-welded pipes of rectangular cross section of Ukrainian manufacturers [Text]. In: *Proceedings of the DNACA*. 2013. Issue 2013-3(101) Buildings and structures using new materials and technologies. P. 9–12. (in Russian)
5. Mushchanov, V. F.; Garanzha, I. M.; Orzhekhovskiy, A. N. Numerical determination of the probability of failure of a bent steel rod [Electronic resource]. In: *Metal constructions*. 2017. Vol. 23, № 1. P. 15–23. Access mode: http://donnasa.ru/publish_house/journals/mk/2017-1/02_mushchanov_garanzha_orzhekovskiy.pdf. (in Russian)
6. Romenskiy, D. I.; Orzhekhovskiy, A. N. Selection of the cross-section of the elements of steel frame-console coatings over the stands of stadiums, taking into account the requirements of reliability [Text]. In: *Scientific and theoretical journal «Proceedings of the BSTU V. G. Shukhov»*. 2017. № 8. P. 35–46. (in Russian)
7. Gorokhov, Ye.; Mushchanov, V.; Pryadko, Yu. Reliability provision of rod shells of steady roofs over stadium stands at stage of design work [Text]. In: *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. P. 353–363. (in English)
8. Krejsa, M.; Janas, P.; Krejsa, V. Application of the DOProC method in solving reliability problems [Text]. In: *Applied Mechanics and Materials*. 2016. № 821. P. 717–724. (in English)
9. Mushchanov, V.; Annenkov, A.; Orzhekovskiy, A. Accounting for the probabilistic nature of geometric imperfections form spatial coatings on the stands braced-cantilever type [Text]. In: *Metal constructions*. 2014. Vol. 20, № 3. P. 169–178. (in English)
10. Huang, J.; Cen, S.; Li, Z. [et. al.]. An unsymmetric 8-node hexahedral solid-shell element with high distortion tolerance: Linear formulations [Text]. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. Volume 116. Issue 12–13. P. 759–783. (in English)
11. Yu T.; Hu Y. M.; Teng J. G. Cyclic lateral response of FRP-confined circular concrete-filled steel tubular columns [Text]. In: *Journal of Constructional Steel*

11. Yu, T. Cyclic lateral response of FRP-confined circular concrete-filled steel tubular columns [Текст] / Yu T., Hu Y. M., Teng J. G. // *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Volume 124 (2016). P. 12–22.
12. Spatial Finite Element Analysis for Dynamic Response of Curved Thin-Walled Box Girder Bridges [Электронный ресурс] / Y. Wang, Y. Xu, Z. Luo [et. al.] // *Mathematical Problems in Engineering*. 2016. Volume 2016 Advances in Finite Element Method. P. 1–8. Article ID 8460130. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1155/2016/8460130>.
13. Modelling a Cracked Beam Structure Using the Finite Element Displacement Method [Электронный ресурс] / Hui Long, Yilun Liu, Changzheng Huang [et. al.] // *Shock and Vibration*. 2019. Volume 2019. P. 1–13. Article ID 7302057. Режим доступа : <https://doi.org/10.1155/2019/7302057>.
14. Liu, W. Nonlinear vibrational response of a single edge cracked beam [Текст] / W. Liu, M. E. Barkey // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017. Vol. 31, №. 11. P. 5231–5243.
15. Zarfam, R. Vibration control of beams on elastic foundation under a moving vehicle and random lateral excitations [Текст] / R. Zarfam, A. R. Khaloo // *Journal of Sound and Vibration*. 2012. Vol. 331, № 6, P. 1217–1232.
16. EN 1990:2002+A1. Eurocode. Basis of structural design [Текст]. – Supersedes ENV 1991-1:1994; This European Standard was approved by CEN on 29 November 2001. – Brussels : Management Centre, 2002. – 116 p. – (European Standard).
- Research*. 2016. Volume 124 (2016). P. 12–22. (in English)
12. Wang, Y.; Xu, Y.; Luo, Z. [et. al.]. Spatial Finite Element Analysis for Dynamic Response of Curved Thin-Walled Box Girder Bridges [Electronic resource]. In: *Mathematical Problems in Engineering*. 2016. Volume 2016 Advances in Finite Element Method. P. 1–8. Article ID 8460130. Access mode: <https://doi.org/10.1155/2016/8460130>. (in English)
13. Hui Long; Yilun Liu; Changzheng Huang [et. al.]. Modelling a Cracked Beam Structure Using the Finite Element Displacement Method [Electronic resource]. In: *Shock and Vibration*. 2019. Volume 2019. P. 1–13. Article ID 7302057. Access mode: <https://doi.org/10.1155/2019/7302057>. (in English)
14. Liu, W.; Barkey, M. E. Nonlinear vibrational response of a single edge cracked beam [Text]. In: *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017. Vol. 31, №. 11. P. 5231–5243. (in English)
15. Zarfam, R.; Khaloo, A. R. Vibration control of beams on elastic foundation under a moving vehicle and random lateral excitations [Text]. In: *Journal of Sound and Vibration*. 2012. Vol. 331, №. 6, P. 1217–1232. (in English)
16. EN 1990:2002+A1. Eurocode. Basis of structural design [Text]. Brussels: Management Centre. 2002. 116 p. (in English)

Оржеховский Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование действительной работы и показателей надежности стержневых систем в строительстве, численные методы расчета пространственных стержневых конструкций.

Оржеховський Анатолій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної та прикладної механіки ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження дійсної роботи і показників надійності стержневих систем в будівництві, чисельні методи розрахунку просторових стержневих конструкцій.

Orzhekhovsky Anatoly – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the study of the actual work and reliability indicators of pivotal systems in construction, numerical methods for calculating spatial pivotal structures.