

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.046:624.014

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1606-1616

Коэффициенты надежности для стальных элементов, проектируемых на основе компьютерных численных моделей

Виталий Валерьевич Надольский^{1,2}

¹ Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь;

² Белорусский национальный технический университет (БНТУ); г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Сегодня для оценки несущей способности строительных конструкций все больше полагаются на компьютерные численные модели. Однако малое количество исследований затрагивает вопросы обеспечения надежности получаемых результатов. В существующей практике проектирования проектная надежность конструкций обеспечивается системой частных коэффициентов надежности, которые учитывают изменчивость случайных физических величин и точность модели. Поэтому важно закрепление значений коэффициентов надежности или методики их определения в нормах проектирования.

Материалы и методы. Предложенный метод установления коэффициентов надежности и их значения основаны на методе теории надежности первого порядка. Статистические характеристики случайных величин и метрики точности компьютерной модели (КМ) базируются на систематизации, анализе и обобщении имеющихся исследований.

Результаты. Представлена система коэффициентов надежности и методика их определения для изученных конструктивных решений и стандартизированных параметров КМ. Приведены результаты исследований статистических характеристик метрики точности КМ. Предложены значения коэффициентов пересчета, позволяющие учитывать разные модели материала, степень дискретизации и значения несовершенств.

Выводы. В области проектирования строительных конструкций следует выделить два крайних случая применения компьютерных численных моделей с позиции изученности моделируемого объекта (для новых конструктивных решений и для изученных конструктивных решений) и два крайних случая с позиции изученности параметров модели (применяются стандартизированные или нестандартизированные параметры КМ). В зависимости от рассматриваемого случая должны быть указаны процедуры проверки модели и назначены способы обеспечения проектной надежности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод конечных элементов (МКЭ), численная модель, компьютерная модель, дискретизация, погрешность модели, расчетное значение, коэффициент надежности

Благодарности. Автор выражает благодарность своим наставникам: профессорам Юрию Семеновичу Мартынову и Виктору Владимировичу Туру, а также анонимным рецензентам за конструктивные замечания и предложения.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Надольский В.В. Коэффициенты надежности для стальных элементов, проектируемых на основе компьютерных численных моделей // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 10. С. 1606–1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1606-1616

Автор, ответственный за переписку: Виталий Валерьевич Надольский, NadolskiVV@mail.by.

Reliability factors for steel elements designed on the basis of computer numerical models

Vitali V. Nadolski^{1,2}

¹ Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus;

² Belarusian National Technical University (BNTU); Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. Today, there is an increasing reliance on computer computational models to assess the load-bearing capacity of building structures. However, a very small number of studies address issues of ensuring the reliability of the obtained results. In the current design practice, the design reliability of structures is provided by a system of partial reliability factors that take into account the uncertainty of random variable and the accuracy of the model. Therefore, fixing the values of reliability factors or the methodology for determining them in the design standards is especially important.

Materials and methods. The proposed method for determining reliability factors and their values are based on the methods of reliability theory and probability theory. Statistical characteristics of random variables and accuracy of the computer model are based on the systematization, analysis and generalization of existing studies.

Results. The paper presents a system of reliability factors and a method for determining them for the studied construction solutions and standardized parameters of computer models. The results of studies of statistical characteristics of the measure of accuracy of computer models are presented. The values of conversion coefficients are proposed, which allow taking into account different models of the material, the degree of discretization and the values of imperfections.

Conclusions. In the field of design of building structures, two extreme cases of using computer numerical models from the position of knowledge of the studied object (for new structural solutions and for studied solutions) and two extreme cases from the position of knowledge of model parameters (validated (standardized) or non-validated (non-standardized) computer model parameters are used). Depending on the case under consideration, model verification procedures should be specified and ways to ensure design reliability should be assigned.

KEYWORDS: finite element method (FEM), numerical model, computer model, discretization, model error, design value, partial factor

Acknowledgements. The author would like to thank his mentors, Professors Yuri S. Martynov and Viktor V. Tur, as well as anonymous reviewers for their constructive feedbacks and suggestions.

FOR CITATION: Nadolski V.V. Reliability factors for steel elements designed on the basis of computer numerical models. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(10):1606-1616. DOI: 10.22227/1997-0935. 2024.10.1606-1616 (rus.).

Corresponding author: Vitali V. Nadolski, Nadolskivv@mail.by.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня с целью оценки несущей способности строительных конструкций для сложных и новых конструктивных решений, а также хорошо изученных [1–10] все больше полагаются на компьютерные численные модели. Некоторые из исследований [11, 12] нацелены на разработку стандартизированного набора параметров компьютерных численных моделей, что облегчает создание моделей и позволяет закрепить принципы их формирования в нормах проектирования. Малое количество исследований касаются вопросов точности компьютерных моделей (КМ) и инструментов обеспечения и регулирования надежности конструкций, проектируемых с помощью компьютерных численных моделей.

Для исключения грубых ошибок и повышения достоверности компьютерных численных моделей рекомендуется выполнять следующие этапы проверки [13–17]:

1) верификацию программного обеспечения (ПО), направленную на исключение ошибок и минимизацию погрешностей до игнорируемого уровня в алгоритмах решения и программном коде для всей предполагаемой области применения ПО;

2) верификацию компьютерной модели, направленную на исключение ошибок и минимизацию погрешностей численного решения для рассматриваемого объекта моделирования и его условий эксплуатации;

3) валидацию компьютерной модели, направленную на:

- подтверждение *применимости* компьютерной модели для рассматриваемого конструктивного решения и его условий эксплуатации. Как правило, основывается на общих представлениях механики и физики, инженерных знаниях, опыте и суждениях;

- подтверждение *прогностической способности* компьютерной модели, т.е. способности модели предсказывать поведение элемента (график деформирования, формы отказа). Как правило, ос-

новывается на сравнении с эталонными данными (экспериментальными или существующими моделями, для которых уже доказана прогностическая способность);

- оценку *точности* (погрешности и неопределенности) компьютерной модели на основе сравнения с экспериментальными данными. В отдельных случаях, например при хорошо стандартизированных (формализованных) параметрах модели, оценка точности модели возможна на базе предыдущих исследований.

В существующей практике проектирования надежность конструкций обеспечивается системой частных коэффициентов надежности, которые учитывают изменчивость случайных физических величин (переменных параметров) и точность модели. После того как модель несущей способности и значения коэффициентов надежности внесены в нормы проектирования, у сообщества и проектировщика появляется уверенность в его действиях. Поэтому закрепление значений коэффициентов надежности или методики их определения в нормах проектирования важно [18, 19]. Можно утверждать, и это показано многими исследованиями, что компьютерные численные модели точнее, чем формульные [20–22], но это не отменяет необходимость учитывать статистические характеристики метрики (меры) точности при обеспечении надежности [23, 24]. По этой причине в настоящей работе уделено особое внимание обзору и анализу исследований, посвященных сравнению физических экспериментов и результатов компьютерного моделирования. При этом акцент сделан на выявление зависимостей между статистическими характеристиками метрики точности и набором параметров для КМ.

Цель исследования — научное обоснование значений коэффициентов надежности, применяемых к результатам компьютерных численных моделей. Предложенная система коэффициентов надежности

и методика их определения справедлива для конструкций из любого материала, но результаты исследования и выводы сделаны для стальных конструкций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В области проектирования строительных конструкций можно выделить два крайних случая применения компьютерных численных моделей с *позиции изученности моделируемого объекта*:

- для новых конструктивных решений. В этом случае компьютерные модели направлены на исследование и внедрение в практику новых конструктивных решений и особенно актуальными становятся проверки применимости и прогностической способности компьютерной модели;
- для изученных конструктивных решений. Тогда компьютерные модели направлены на оценивание поведения, а не только значения несущей способности, автоматизацию процессов проектирования, более точное проектирование и т.д. При этом набор случайных величин и степень их влияния известны из предыдущих исследований.

Можно выделить два крайних случая использования компьютерных численных моделей с *позиции изученности параметров модели*:

- применяются стандартизированные параметры компьютерной модели. В этом случае могут быть сделаны предпосылки о степени влияния параметров компьютерной модели на результаты и приняты статистические характеристики метрики точности;
- используются нестандартизированные параметры компьютерной модели. Особенно актуальной становится оценка влияния параметров компьютерной модели на результаты и оценка точности компьютерной модели на основе сравнения с экспериментальными данными.

Методика определения расчетных значений несущей способности стальных конструкций, проектируемых на основе компьютерных численных моделей, представлена в работе [15]. Однако применение этой методики требует наличия достаточно большого количества экспериментальных данных и их прямого сравнения с компьютерными результатами. Для изученных конструктивных решений и стандартизированных параметров моделей общую методику определения расчетного значения можно преобразовать/упростить с учетом следующих предпосылок:

- известен перечень случайных величин X , оказывающих влияние на несущую способность моделируемого объекта, и понятна принципиальная их взаимосвязь и степень их влияния на общую изменчивость несущей способности, предпосылка позволяет оценить среднее значение μ_r и коэффициент вариации V_r несущей способности;
- известен перечень параметров дискретизации и численного решения, оказывающих влияние на значение несущей способности моделируемого объекта, и известны зависимости статистических характери-

стик метрики точности численной модели от параметров компьютерной модели.

Тогда, предполагая, что параметры численных моделей обоснованы на значительном количестве экспериментальных данных и статистические характеристики не содержат статистической неопределенности, несущая способность может быть установлена согласно следующему выражению:

$$R_d \approx \mu_\theta \cdot \mu_r \cdot \exp(-\alpha_R \beta \sqrt{(V_r^2 + V_\theta^2)}), \quad (1)$$

где μ — среднее значение случайной величины; θ — метрика точности (неопределенности и погрешности) компьютерной модели несущей способности; α_R — коэффициент чувствительности метода надежности первого порядка (FORM) для несущей способности; β — индекс надежности; V — коэффициент вариации случайной величины.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сначала проанализируем имеющиеся исследования точности (КМ). Это позволит выработать стратегию для назначения статистических характеристик метрики точности и дальнейшего их учета при обеспечении надежности.

Результаты исследования статистических характеристик метрики точности можно найти в работе [11]. Так, на основании обработки 114 результатов компьютерного моделирования несущей способности среднее значение и коэффициент вариации метрики точности составили соответственно 1,0 и 4,5 % [11]. Среднее значение метрики точности, равное 1,0, свидетельствует об отсутствии систематических отклонений в хорошо подогнанных моделях. Маленькое значение коэффициента вариации 4,5 % свидетельствует о высокой степени соответствия между экспериментом и компьютерной моделью. Данные статистические характеристики, вероятнее всего, следует рассматривать как минимально возможные. Но даже при таких минимальных характеристиках ими нельзя пренебрегать при обеспечении надежности, так как порядок значений сопоставим с изменчивостью предела текучести для стали. Однако более репрезентативными для практического применения являются результаты исследований, цель которых состояла в применении наиболее стандартизированных параметров компьютерной модели и анализе точности этих моделей. Довольно обширные результаты изучения статистических характеристик метрики точности представлены в работе [12]. Выполнена проверка оболочечных моделей на соответствие широкому спектру испытаний стальных элементов из горячекатаных двутавровых профилей и квадратных/прямоугольных полых профилей, подвергнутых изгибу, сжатию и комбинированному сжатию с изгибом. Общее количество экспериментальных образцов составило 52, при этом μ_θ и V_θ составили соответственно 0,98 и 7,4 %. Также обширные результаты исследований статистических характеристик метрики точности при-

ведены в публикации [11]. Проанализированы 14 возможных комбинаций параметров КМ для 56 экспериментальных образцов, при этом μ_θ и V_θ составили 0,89–1,03 и 6,5–8,5 %. Одновременный анализ 14 комбинаций параметров КМ для общего набора экспериментальных данных позволяет проследить взаимосвязь точности модели от изменения параметра. Результаты исследований коэффициентов вариации метрики точности V_θ обобщены в табл. 1. Результаты дополнены сведениями для холодноформованных элементов [25] и узлов [26], однако статистические характеристики в этих исследованиях получены на основании небольшого количества результатов сравнения. Наиболее проблематичными с точки зрения обеспечения точности КМ видятся холодноформованные конструкции из-за трудности моделирования свойств стали, несовершенств и метизов (заклепок, саморезов, сварки). Обобщая результаты исследований точности КМ, можно отметить, что коэффициент вариации находится в пределах 10 % и в качестве консервативных предположений.

Статистические характеристики метрики точности компьютерных численных моделей при разных значениях параметров модели рассмотрены в труде [11]. Анализ статистических характеристик показывает, что стандартное отклонение при рекомендуемых параметрах моделей практически не изменяется. Следовательно, можно ввести коэффициенты, с помощью которых пересчитать значение несущей способности при разных параметрах КМ и тем самым приближенно учитывать изменение среднего значения метрики точности. Эти коэффициенты могут быть получены на основании средних значений метрики точности $\mu_{\theta,i}$ или на основании расчетного значения метрики точности $\theta_{d,i}$ моделирования (более точный подход), согласно формулам:

$$k_{i,\mu} = \mu_{\theta,i} / \mu_{\theta,баз}; \tag{2}$$

Табл. 1. Значения коэффициентов вариации несущей способности V_r и коэффициентов вариации метрики точности компьютерной модели V_θ

Table 1. Values of the coefficients of variation for the load-bearing capacity V_r and the accuracy metric of the computer model V_θ

Конструкции / Structures	V_θ , %	V_r , %
Элементы двутаврового и коробчатого сечения при проверках, не сопровождающихся потерей устойчивости I-beam and box-shaped elements that are not subject to loss of stability	5–6 [11, 12, 27]	5–6 [28, 29]
Элементы двутаврового и коробчатого сечения при проверках, сопровождающихся потерей устойчивости I-beam and box-shaped elements that are subject to loss of stability	5–8 [11, 12, 27]	6–8 [30–32]
Балки с гибкой стенкой, балки с гофрированной стенкой Flexible web beams, corrugated web beams	6–8 [11]	5–9 [29, 33]
Холодноформованные элементы Cold-formed elements	9–10 [25]	7–9 [29, 34]
Узлы при верифицированных моделях сварки, болтов, контактов Joints with verified models for welding, bolts, contacts	5–7 [26]	5–7 [26, 28]
Наиболее консервативные предпосылки The most conservative prerequisites	7–12 [11, 12]	7–10 [29]

$$k_{i,\theta d} = \theta_{d,i} / \theta_{d,баз}, \tag{3}$$

где $\mu_{\theta,i}$ — среднее значение метрики точности для i -й модели; $\mu_{\theta,баз}$ — среднее значение метрики точности для базовой модели; $\theta_{d,i}$ — расчетное значение метрики точности для i -й модели, вычисленное как:

$$\theta_{d,i} = \mu_{\theta,i} \cdot \exp(-0,7\alpha_R \beta V_{\theta,i}). \tag{4}$$

Результаты расчета коэффициентов пересчета, полученных посредством этих двух способов, приведены в табл. 2.

Обобщая результаты расчетов коэффициента пересчета, можно выделить строгую зависимость среднего значения метрики точности от модели материала, степени дискретизации и значения несовершенства. Соответственно предлагается выделить коэффициенты для пересчета между моделями материала (вид графика деформирования стали) $k_{fea,mat}$, степенью дискретизации (размер конечного элемента) $k_{fea,con}$ и моделями несовершенств $k_{fea,imp}$. Таким образом, коэффициенты пересчета позволят вносить корректировку в результаты моделирования для учета систематических смещений в оценивании несущей способности. Рекомендуемые значения коэффициентов пересчета представлены в табл. 3.

Далее проанализируем общую изменчивость несущей способности, обусловленную изменчивостью случайных величин, оказывающих влияние на поведение стальных конструкций. Для большинства элементов и видов отказа наибольшую долю в изменчивость вносит предел текучести стали [28]. На устойчивость также оказывает влияние неопределенность геометрических несовершенств и начальных напряжений [30–32]. Изменчивость геометрических размеров, как правило, незначительна и ей пренебрегают, однако для тонкостенных элементов необходим учет изменчивости толщины проката [29, 34]. На очень гибкие элементы оказывает влияние изменчивость модуля упругости стали [25]. Следует учитывать, что в некоторых моделях несущей способности параметры мо-

Табл. 2. Расчет значений коэффициентов пересчета

Table 2. Calculation of conversion coefficients

Набор параметров согласно работе [11] A set of parameters according to [11]	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 1	№ 6	№ 7	№ 8	№ 11	№ 12	№ 1	№ 13	№ 14
Модель материала* Material model*	а)	б)	в)	г)	а)					а)				
Степень дискретизации Discretization degree	5t				2t	5t	6t	8t	10t	5t				
Несовершенства Imperfections	$h_w/100$				$h_w/100$					$h_w/300$	$h_w/200$	$h_w/100$	$h_w/75$	$h_w/50$
μ_θ	0,97	1,03	0,98	0,93	0,99	0,97	0,96	0,95	0,89	0,95	0,96	0,97	0,99	1,01
$V_\theta, \%$	6,4	8,4	6,6	7,8	6,4	6,4	6,5	6,6	7,2	6,8	6,4	6,4	6,6	7,3
$\theta_{d,i}$	0,90	0,93	0,90	0,84	0,92	0,90	0,89	0,88	0,81	0,87	0,89	0,90	0,91	0,92
$k_{i,\mu}$	1,00	0,94	0,99	1,04	1,00	1,02	1,03	1,04	1,12	1,02	1,01	1,00	0,98	0,97
$k_{i,0d}$	1,00	0,97	1,00	1,06	1,00	1,02	1,03	1,04	1,13	1,03	1,01	1,00	0,98	0,98

Примечание: * — расшифровку моделей материала см. в работе [11].

Note: * — abbreviation for material models, see in [11].

гут входить в степени, что усиливает их влияние на итоговую неопределенность [29, 35]. Точное значение коэффициента вариации численной модели проблематично вычислить имеющимися методами. Наиболее распространенным методом является метод Монте-Карло, однако для повседневного применения он очень

трудоемкий [36]. В настоящее время многие исследования сосредоточены на решении этой проблемы. Перспективным видится подход, предложенный в публикации [29]. Для существующих моделей несущей способности значение коэффициента вариации можно установить на основании предыдущих исследований.

Табл. 3. Рекомендуемые значения коэффициентов пересчета $k_{fea,i}$, учитывающие влияние параметров компьютерной модели на точность модели

Table 3. Recommended values of conversion coefficients $k_{fea,i}$, taking into account the influence of computer model parameters on the accuracy of the model

Модель материала $k_{fea,mat}$ Material model $k_{fea,mat}$	
Билинейная зависимость без деформационного упрочнения Bilinear dependence without deformation hardening	0,95
Мультилинейная зависимость с площадкой текучести и со стадией самоупрочнения Multilinear dependence with a yield platform and with a self-hardening stage	1,0
На основании испытаний Based on the tests	1,0
Билинейная зависимость без площадки текучести, но со стадией самоупрочнения Bilinear dependence without a yield platform, but with a self-hardening stage	1,05
Степень дискретизации $k_{fea,con}$ Discretization degree $k_{fea,con}$	
Параметры дискретизации приняты для решения, отличающегося на +2 % от конвергентного значения The discretization parameters were adopted for a solution that differs by +2 % from the convergent value	1,0
Параметры дискретизации приняты для решения, отличающегося на +5 % от конвергентного значения The discretization parameters were adopted for a solution that differs by +5 % from the convergent value	1,05
Параметры дискретизации приняты для решения, отличающегося на +10 % от конвергентного значения The discretization parameters were adopted for a solution that differs by +10 % from the convergent value	1,10
Несовершенства $k_{fea,imp}$ Imperfections $k_{fea,imp}$	
Геометрические несовершенства Geometric imperfections	1,05
Эквивалентные несовершенства Equivalent imperfections	1,0

Табл. 4. Значения коэффициентов надежности
Table 4. Values of reliability factors

$V_r, \%$	$\gamma_{R,\mu \rightarrow d}$					
	$V_\theta, \%$					
	5	6	7	8	9	10
5	1,14	1,15	1,17	1,19	1,20	1,22
6	1,15	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23
7	1,17	1,18	1,20	1,21	1,23	1,25
8	1,19	1,20	1,21	1,23	1,24	1,26
9	1,20	1,21	1,23	1,24	1,26	1,27

Анализ трудов [29–32, 34, 35] показывает, что коэффициент вариации несущей способности стальных элементов из-за изменчивости случайных физических величин находится в пределах 5–9 %. В табл. 1 обобщены результаты исследований, которые можно использовать как рекомендуемые значения при отсутствии более точной информации.

Далее перейдем к обоснованию численных значений коэффициентов надежности для стальных элементов, проектируемых на базе КМ. Значения коэффициента надежности вычислим на основании следующего выражения:

$$\gamma_{R,\mu \rightarrow d} = \mu_\theta \cdot \mu_r / R_d \tag{5}$$

где R_d — расчетное значение несущей способности, вычисленное согласно выражению (1).

Значения индекса надежности и коэффициента чувствительности для стальных конструкций приняты $\beta = 3,0$, $\alpha_R = 0,6$ [37, 38]. Тогда значения коэффициентов $\gamma_{R,\mu \rightarrow d}$ для разных значений коэффициентов вариации представлены в табл. 4.

Для дальнейшего анализа представим общий коэффициент надежности $\gamma_{R,\mu \rightarrow d}$ в виде произведения двух коэффициентов, один из которых будет учитывать погрешность КМ γ_θ , а второй — изменчивость случайных физических величин $\gamma_{r,\mu \rightarrow d}$:

$$\gamma_{R,\mu \rightarrow d} = \gamma_\theta \cdot \gamma_{r,\mu \rightarrow d} \tag{6}$$

Значение коэффициента надежности $\gamma_{r,\mu \rightarrow d}$ можно вычислить согласно выражению:

$$\gamma_{r,\mu \rightarrow d} = \exp(0,7\alpha_R\beta V_r). \tag{7}$$

В качестве базового случая примем значение $\gamma_{r,\mu \rightarrow d}$ вычисленное при значении коэффициента вариации несущей способности, равным 8 %, тогда $\gamma_{r,\mu \rightarrow d} = \exp(0,7 \cdot 0,6 \cdot 3,0 \cdot 0,08) \approx 1,10$. Тогда значения частных коэффициентов γ_θ , учитывающих точность компьютерной модели γ_θ , вычислим как $\gamma_\theta = \gamma_{R,\mu \rightarrow d} / \gamma_{r,\mu \rightarrow d}$. Полученные значения γ_θ представлены в табл. 5.

Обобщим результаты исследования. Расчетное значение несущей способности можно вычислить из среднего значения несущей способности с помощью выражения:

$$R_d \approx r(\mu_X) / (\gamma_{FEA} \cdot \gamma_{r,\mu \rightarrow d}), \tag{8}$$

где $r(\mu_X)$ — значение несущей способности, вычисленное на основе КМ при средних значениях слу-

чайных величин; γ_{FEA} — коэффициент надежности для компьютерной модели; $\gamma_{r,\mu \rightarrow d}$ — коэффициент надежности, учитывающий неопределенность случайных величин, рекомендуемое значение 1,10.

Коэффициент надежности для КМ предлагается определять согласно выражению:

$$\gamma_{FEA} = 1,05 k_{fea,mat} \cdot k_{fea,con} \cdot k_{fea,imp} \cdot \gamma_\theta, \tag{9}$$

где 1,05 — поправочный коэффициент, учитывающий упрощенный подход к валидации модели на основании существующих моделей несущей способности и имеющихся знаний; $k_{fea,i}$ — коэффициенты пересчета (см. табл. 3); γ_θ — коэффициент надежности, учитывающий точность КМ (табл. 6).

В практике проектирования стальных конструкций, как правило, для расчетов применяют характеристическое (нормативное) значение предела текучести, а все остальные случайные величины, такие как геометрические размеры, модуль упругости, входят со своими номинальными значениями. Исследование [29] показывает, что такой подход для гибких элементов или гибких частей сечения, на поведение которых существенно влияют изменчивость толщины проката или модуля упругости, приводит к некорректным результатам и требует введения дополнительного коэффициента. В качестве критерия чувствительности элемента к потере устойчивости принято отношение критической силы упругой потери устойчивости F_{cr} к действующей силе F_{Ed} , т.е. $\alpha_{cr} = F_{cr} / F_{Ed}$. Если это отношение меньше 4, то характерна упругая потеря устойчивости. Данный критерий может быть применен для всех видов потери устойчивости (потери устойчивости элементов, устойчивости формы сечения, устойчивости полки или стенки сечения). Если при создании КМ $r\{f_{yk}, t_{nom}, E_{nom}\}$ приняты характеристическое значение предела текучести f_{yk} и номинальные значения остальных случайных величин (например, геометрических размеров t_{nom} и модуля упругости E_{nom}), то расчетное значение несущей способности можно вычислить следующим образом:

$$R_d \approx r\{f_{yk}, t_{nom}, E_{nom}\} / \gamma_{FEA} \cdot \gamma_{r,fyk \rightarrow d} = r_{fjk} / (\gamma_{FEA} \cdot \gamma_{r,fjk \rightarrow d}), \tag{10}$$

Табл. 5. Значения коэффициентов надежности, учитывающие точность компьютерной модели

Table 5. Values of reliability factors that take into account the accuracy of the computer model

$V_r, \%$	γ_θ при $\gamma_{r,\mu \rightarrow d} = 1,1$ γ_θ with $\gamma_{r,\mu \rightarrow d} = 1.1$					
	$V_\theta, \%$					
	5	6	7	8	9	10
5	1,03	1,05	1,06	1,08	1,09	1,11
6	1,05	1,06	1,07	1,09	1,10	1,12
7	1,06	1,07	1,09	1,10	1,12	1,13
8	1,08	1,09	1,10	1,11	1,13	1,14
9	1,09	1,10	1,12	1,13	1,14	1,16

Табл. 6. Значения коэффициентов надежности, учитывающие точность компьютерной модели
Table 6. Values of reliability factors that take into account the accuracy of the computer numerical model

Конструкции / Structures	γ_0
Элементы двутаврового и коробчатого сечения при проверках, не сопровождающихся потерей устойчивости I-beam and box-shaped elements that are not subject to loss of stability	1,05
Элементы двутаврового и коробчатого сечения при проверках, сопровождающихся потерей устойчивости I-beam and box-shaped elements that are subject to loss of stability	1,10
Балки с гибкой стенкой, балки с гофрированной стенкой Flexible web beams, Corrugated web beams	1,10
Холодноформованные элементы Cold-formed elements	1,15
Узлы при верифицированных моделях сварки, болтов, контактов Joints with verified models for welding, bolts, contacts	1,10
Наиболее консервативные предпосылки The most conservative prerequisites	1,20

где γ_{FEA} — коэффициент надежности для компьютерной модели, определяется согласно выражению (9); $\gamma_{r,fjk \rightarrow d}$ — коэффициент надежности, учитывающий неопределенность случайных величин, равен 1,05 при значениях параметра α_{cr} меньше 4, в остальных случаях равен 1,0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представлена система коэффициентов надежности и методика их определения для изученных конструктивных решений и стандартизированных параметров КМ. Систематизированы и обобщены результаты исследований статистических характеристик метрики точности КМ. Предложены значения коэффициентов пересчета, позволяющие учитывать разные модели материала, степень дискретизации и значения несовершенств. Данная методика и полученные значения коэффициентов обоснованы для наиболее распространенных видов элементов, но на ограниченном наборе данных, поэтому необходимы дальнейшие исследования для подтверждения и расширения практических случаев применения.

Принципиальное отличие проектирования на основе КМ от классических формульных моделей заключается в отсутствии формализованной (зафиксированной) модели несущей способности, т.е. в отсутствии строгой записи модели. Это и является основной проблемой гарантирования уверенности в точности модели при повседневном проектировании. Поэтому повышение формализации компьютерной модели — одна из приоритетных задач ближайшего будущего. Формализацию КМ предлагается повысить следующими действиями:

- разработкой норм проектирования, включающих указания по назначению физических параметров КМ, таких как диаграммы деформирования материалов, моделей несовершенств, начальных напряжений и т.д.;
- разработкой специализированного ПО, содержащего стандартизированные наборы параметров КМ, в особенности параметров дискретизации и алгоритмов решения, таких как тип и размеры конечных элементов, настройки итерационных и инкрементальных алгоритмов решения с критериями сходимости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 103. Pp. 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018

2. Prokop J., Vičan J., Jošt J. Numerical analysis of the beam-column resistance compared to methods by European standards // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 7. P. 3269. DOI: 10.3390/app11073269

3. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sýkora M. On Development of numerical resistance models of thin-web steel girders // Transactions of the VSB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series. 2023. Vol. 23 (1). Pp. 12–19. DOI: 10.35181/tces-2023-0003

4. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 158. Pp. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025

5. Белый Г.И., Кубасевич А.Е. Влияние усталостных трещин в стенке на прочность подкрановых балок // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 11. С. 1780–1790. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1780-1790

6. Матвеев А.Д. Метод многосеточных конечных элементов в расчетах композитных балок сложной формы // Решетневские чтения. 2018. Т. 1. С. 568–569. EDN YTFBAD.

7. Устименко Е.Е., Скачков С.В. Метод конечных элементов модели тонкостенного профиля с полками объемного фасонного элемента // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4 (55). С. 54. EDN KSJBFE.

8. Мартыненко Т.М., Пронкевич С.А., Мартыненко И.М., Максимович В.А. Анализ прочности узловых соединений при различных исполнениях конструкции на основе моделирования в среде ANSYS // Механика. Исследования и инновации. 2022. № 15. С. 147–151. EDN QHUBTE.

9. Фролов А.В., Воронов М.В., Медельцев А.А., Седова К.А., Шаповалов П.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния сварных соединений в ANSYS Mechanical // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 11. С. 61–76. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-11-61-76. EDN UTPZGM.

10. Палаев А.Г., Носов В.В., Красников А.А. Моделирование распределения температурных полей и напряжений в сварном соединении с применением ANSYS // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Т. 12. № 5. С. 461–469. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469. EDN YWMJEF.

11. Надольский В.В. Статистические характеристики погрешности численных моделей несущей способности для стальных элементов // Строительство и реконструкция. 2023. № 3 (107). С. 17–34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34. EDN TNLEVH.

12. Fieber A., Gardner L., Macorini L. Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits // Engineering Structures. 2019. Vol. 199. P. 109624. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624

13. Алексеев А.К., Бондарев А.Е. Об апостериорной оценке нормы погрешности численного расчета на ансамбле независимых решений // Сибирский журнал вычислительной математики. 2020. Т. 23. № 3. С. 233–248. DOI: 10.15372/SJNM20200301. EDN TLUUTP.

14. Бритов Г.С. Верификация, валидация и тестирование компьютерных моделей линейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2 (63). С. 75–82. EDN PYPBYF.

15. Надольский В.В. Оценка расчетного значения несущей способности стальных элементов, проектируемых на основе численных моделей // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 3. С. 367–378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378

16. Сальников А.В., Французов М.С., Виноградов К.А., Пятунин К.Р., Никулин А.С. Верификация и валидация компьютерных моделей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022.

№ 9 (750). С. 100–115. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115. EDN CUFIKS.

17. Борисов Е.А., Теплов А.В. Особенности проверки качества программного обеспечения // Наука через призму времени. 2020. № 1 (34). С. 27–29. EDN KUTVJO.

18. Tur V.V., Tur A.V., Lizahub A.A.I. Experimental and theoretical study of the reinforced concrete flat slabs with the central support loss // Building and Reconstruction. 2023. No. 1 (105). Pp. 77–103. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-77-103. EDN HIIQFH.

19. Перельмутер А.В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Т. 13. № 3. С. 86–102. EDN ZRKJPX.

20. Афенченко Д.С., Петрова Ю.Н., Устинова М.Э., Олейникова Р.Е. Верификация аналитического расчета несущей способности перфорированного стержня средствами конечно-элементного комплекса // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2019. № 4. С. 118–129. EDN CXAONF.

21. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders — Tests and numerical model verification // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 85. Pp. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007

22. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 80. Pp. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018

23. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Hidden safety in structural design codes // Engineering Structures. 2021. Vol. 257. P. 114017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114017

24. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Über den Umgang mit versteckten Sicherheiten — Eine Fallstudie am Windlastmodell des Eurocode // Baustatik — Bau-praxis. 2020. Vol. 14. Pp. 1059–1069.

25. Laim L., Rodrigues J.P.C., Simões da Silva L. Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams // Thin-Walled Structures. 2013. Vol. 72. Pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.tws.2013.06.008

26. Girão Coelho A.M., Simões da Silva L., Bijlaard F.S.K. Finite-element modeling of the nonlinear behavior of bolted t-stub connections // Journal of Structural Engineering. 2006. Vol. 132. Issue 6. Pp. 918–928. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:6(918)

27. Simões da Silva L., Rebelo C., Nethercot D., Marques L., Simões R., Vila Real P.M.M. Statistical evaluation of the lateral–torsional buckling resistance of steel I-beams. Part 2: Variability of steel properties // Journal of Constructional Steel Research. 2009. Vol. 65. Issue 4. Pp. 832–849. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.017

28. Kala Z., Melcher J., Puklický L. Material and geometrical characteristics of structural steels based on

statistical analysis of metallurgical products // Journal of Civil Engineering and Management. 2009. Vol. 15. Issue 3. Pp. 299–307. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.299-307

29. Надольский В.В. Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 852–863. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863

30. Kala Z. Sensitivity assessment of steel members under compression // Engineering Structures. 2009. Vol. 31. Issue 6. Pp. 1344–1348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.001

31. Agüero A., Pallarés L., Pallarés F.J. Equivalent geometric imperfection definition in steel structures sensitive to flexural and/or torsional buckling due to compression // Engineering Structures. 2015. Vol. 96. Pp. 160–177. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.065

32. Kala Z., Kala J., Simos T.E., Psihoyios G., Tsitouras Ch., Anastassi Z. Sensitivity analysis of stability problems of steel structures using shell finite elements and nonlinear computation methods // AIP Conference Proceedings. 2011. Pp. 1865–1868. DOI: 10.1063/1.3636974

33. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными

типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 676–687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687

34. Kala Z. Sensitivity of load-carrying capacity of a thin-walled steel member to the initial curvature shape of its axis // Thin-Walled Structures. 2018. Pp. 835–842. DOI: 10.1201/9781351077309-96

35. Kala Z. Global sensitivity analysis in stability problems of steel frame structures // Journal of Civil Engineering and Management. 2016. Vol. 22. Issue 3. Pp. 417–424. DOI: 10.3846/13923730.2015.1073618

36. Sykora M., Nadolski V., Novak L., Novak D., Diamantidis D. Pilot comparison of semi-probabilistic methods applied to RC structures with multiple failure modes // Proceedings of fib International Congress. 2022. Pp. 10–20.

37. Соловьев С.А., Соловьева А.А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 2. С. 153–167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167

38. Соловьев С.А., Соловьева А.А. Метод вероятностного анализа надежности элементов конструкций на основе граничных функций распределения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 10. С. 1545–1555. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1545-1555

Поступила в редакцию 21 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 25 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 7 июня 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: **Виталий Валерьевич Надольский** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительного производства; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; доцент кафедры строительных конструкций; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65; РИНЦ ID: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskiv@mail.by.

REFERENCES

1. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014; 103:327-343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018

2. Prokop J., Vičan J., Jošt J. Numerical analysis of the beam-column resistance compared to methods by European standards. *Applied Sciences*. 2021; 11(7):3269. DOI: 10.3390/app11073269

3. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sýkora M. On Development of numerical resistance models of thin-web steel girders. *Transactions of the VSB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2023; 23(1):12-19. DOI: 10.35181/tces-2023-0003

4. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 158:213-229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025

5. Belyy G.I., Kubasevich A.E. Effect of fatigue cracks in the wall on the strength of crane beams. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1780-1790. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1780-1790 (rus.).

6. Matveev A.D. Multigrid finite element method in the calculations of composite beams of irregular shape. *Reshetnev Readings*. 2018; 1:568-569. EDN YTFBAD. (rus.).

7. Ustimenko E.E., Skachkov S.V. Method finite elements thin-walled profile shelves surround the nishing. *Engineering journal of Don*. 2019; 4(55):54. EDN KSJBFE. (rus.).

8. Martynenko T.M., Pronkevich S.A., Martynenko I.M., Maximovich V.A. Strength analysis of junction joints for different design performances on the basis of simulation in the ANSYS software. *Mechanics*.

Researches and Innovations. 2022; 15:147-151. EDN QHUBTE. (rus.).

9. Frolov A.V., Voronov M.V., Medeltsev A.A., Sedova K.A., Shapovalov P.A. Modeling of the stress-strain state of welded joints in ANSYS mechanical. *Izvestiya Tula State University*. 2022; 11:61-76. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-11-61-76. EDN UTPZGM. (rus.).

10. Palaev A.G., Nosov V.V., Krasnikov A.A. Simulating distribution of temperature fields and stresses in welded joint using ANSYS. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2022; 12(5):461-469. DOI: 10.28999/2541-9595-2022-12-5-461-469. EDN YWMJEF. (rus.).

11. Nadolski V.V. Statistical characteristics of the numerical model uncertainties for steel elements. *Building and Reconstruction*. 2023; 3(107):17-34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34. EDN TNLEVH. (rus.).

12. Fieber A., Gardner L., Macorini L. Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits. *Engineering Structures*. 2019; 199:109624. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624

13. Alekseev A.K., Bondarev A.E. On a posteriori estimation of the approximation error norm for an ensemble of independent solutions. *Siberian Journal on Numerical Mathematics*. 2020; 23(3):233-248. DOI: 10.15372/SJNM20200301. EDN TLUUTP. (rus.).

14. Britov G.S. Verification, validation and testing of computer models of linear dynamic systems. *Information and Control Systems*. 2013; 2(63):75-82. EDN PYPBYF. (rus.).

15. Nadolski V.V. Evaluating the design value of the bearing capacity of steel elements designed using numerical models. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):367-378. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.367-378 (rus.).

16. Salnikov A.V., Frantsuzov M.S., Vinogradov K.A., Pyatunin K.R., Nikulin A.S. Digital simulation verification and validation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2022; 9(750):100-115. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115. EDN CUFIKS. (rus.).

17. Borisov E.A., Teplov A.V. Features of software quality control. *Science Through the Prism of Time*. 2020; 1(34):27-29. EDN KUTVJO. (rus.).

18. Tur V.V., Tur A.V., Lizahub A.A.I. Experimental and theoretical study of the reinforced concrete flat slabs with the central support loss. *Building and Reconstruction*. 2023; 1(105):77-103. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-77-103. EDN HIIQFH.

19. Perelmutter A.V., Tur V.V. Whether we are ready to proceed to a nonlinear analysis at designing? *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(3):86-102. EDN ZRKJPX. (rus.).

20. Afenchenko D.S., Petrova Yu.N., Ustinova M.E., Olejnikova R.E. Verification of analytical calculation of perforated rod bearing capacity by means of ANSYS finite element complex. *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*. 2019; 4:118-129. EDN CXAONF. (rus.).

21. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders — Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 85:116-129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007

22. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 80:202-212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018

23. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Hidden safety in structural design codes. *Engineering Structures*. 2021; 257:114017. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114017

24. Teichgräber M., Köhler J., Straub D. Über den Umgang mit versteckten Sicherheiten — Eine Fallstudie am Windlastmodell des Eurocode. *Baustatik — Bau-praxis*. 2020; 14:1059-1069.

25. Laím L., Rodrigues J.P.C., Simões da Silva L. Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures*. 2013; 72:1-13. DOI: 10.1016/j.tws.2013.06.008

26. Girão Coelho A.M., Simões da Silva L., Bijlaard F.S.K. Finite-element modeling of the nonlinear behavior of bolted t-stub connections. *Journal of Structural Engineering*. 2006; 132(6):918-928. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2006)132:6(918)

27. Simões da Silva L., Rebelo C., Nethercot D., Marques L., Simões R., Vila Real P.M.M. Statistical evaluation of the lateral–torsional buckling resistance of steel I-beams. Part 2: Variability of steel properties. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009; 65(4):832-849. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.07.017

28. Kala Z., Melcher J., Puklický L. Material and geometrical characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2009; 15(3):299-307. DOI: 10.3846/1392-3730.2009.15.299-307

29. Nadolski V.V. Reliability coefficients for nonlinear models of load-bearing capacity of beams with flexible web. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):852-863. DOI: 10.22227/19970935.2023.6.852-863 (rus.).

30. Kala Z. Sensitivity assessment of steel members under compression. *Engineering Structures*. 2009; 31(6):1344-1348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.04.001

31. Agüero A., Pallarés L., Pallarés F.J. Equivalent geometric imperfection definition in steel structures sensitive to flexural and/or torsional buckling due to compression. *Engineering Structures*. 2015; 96:160-177. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.065

32. Kala Z., Kala J., Simos T.E., Psihoyios G., Tsitouras Ch., Anastassi Z. Sensitivity Analysis of Stability Problems of Steel Structures using Shell Finite Elements

and Nonlinear Computation Methods. *AIP Conference Proceedings*. 2011; 1865-1868. DOI: 10.1063/1.3636974

33. Saiyan S.G., Paushkin A.G. The numerical parametric study of the stress-strain state of I-beams having versatile corrugated webs. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):676-687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687 (rus.).

34. Kala Z. Sensitivity of load-carrying capacity of a thin-walled steel member to the initial curvature shape of its axis. *Thin-Walled Structures*. 2018; 835-842. DOI: 10.1201/9781351077309-96

35. Kala Z. Global sensitivity analysis in stability problems of steel frame structures. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2016; 22(3):417-424. DOI: 10.3846/13923730.2015.1073618

36. Sykora M., Nadolski V., Novak L., Novak D., Diamantidis D. Pilot comparison of semi-probabilistic methods applied to RC structures with multiple failure modes. *Proceedings of fib International Congress*. 2022; 10-20.

37. Soloveva A.A., Solovev S.A. Reliability analysis of planar steel trusses based on p-box models. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(2):153-167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167 (rus.).

38. Solovev S.A., Soloveva A.A. Method of structural reliability analysis based on boundary distribution functions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1545-1555. DOI: 10.22227/19970935.2023.10.1545-1555 (rus.).

Received April 21, 2024.

Adopted in revised form on April 25, 2024.

Approved for publication on June 7, 2024.

BIONOTES: **Vitali V. Nadolski** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Building Production Technologies; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; Associate Professor of the Department of Building Structures; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; ID RISC. 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskiv@mail.by.