

## Метод коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций

Виталий Валерьевич Надольский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь;

<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет (БНТУ); г. Минск, Республика Беларусь

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В качестве базового метода проверки предельных состояний применяется метод коэффициентов надежности с фиксированными значениями коэффициентов (закрепленными/декларируемыми в нормативных документах). Однако есть более общая постановка полувероятностного метода, в рамках которого можно более точно учесть специфику конструкции (например, информацию об изменчивости фактических размеров, свойств материалов и т.д.) и специфику местонахождения (например, сведения о климатических нагрузках). Данный метод получил название метод модифицированных (регулируемых) частных коэффициентов.

**Материалы и методы.** Исследование направлено на развитие метода коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций и научное обоснование параметров этого метода. Методологическая формулировка метода базируется на определении расчетных значений базисных переменных на основе функции распределения исходя из заданного квантиля. При этом квантиль распределения вычисляется посредством коэффициентов чувствительности базисных переменных метода надежности первого порядка и целевого значения индекса надежности.

**Результаты.** В общей формулировке описан метод коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций, который позволяет в явном виде учесть целевой уровень надежности и изменчивость базисных переменных. Выполнено научное обоснование коэффициентов чувствительности базисных переменных на основе метода надежности первого порядка и представлены указания по назначению вероятностных моделей случайных величин.

**Выводы.** Анализ обобщенной функции предельного состояния стального элемента вероятностным методом показал, что коэффициент чувствительности существенно меняется с изменением параметра нагружения (характеризующего долю переменных нагрузок в общей нагрузке), при этом незначительно меняется в зависимости от вида переменной нагрузки. Коэффициенты чувствительности могут быть приняты на основании графиков или упрощенных зависимостей, представленных в исследовании. Консервативно значения коэффициента чувствительности для несущей способности стального элемента можно принять равными 0,6, для постоянного воздействия –0,4 и для переменного воздействия –0,9.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** метод модифицированных частных коэффициентов, метод регулируемых частных коэффициентов, коэффициент чувствительности, квантиль расчетного значения, коэффициенты надежности, неопределенности, базисные переменные

**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. Метод коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1444–1453. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1444-1453

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

## Method of reliability coefficients with adjustable values for steel structures design

Vitali V. Nadolski<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus;

<sup>2</sup> Belarusian National Technical University (BNTU); Minsk, Republic of Belarus

### ABSTRACT

**Introduction.** The method of reliability coefficients with fixed values (declared in regulatory documents) is used as a basic method of limit state verification. However, there is a more general formulation of the semi-probabilistic method, within which the specificity of the design (e.g. information on the variability of actual dimensions, material properties, etc.) and the specificity of the location (e.g. information about climatic loads) can be taken into account more accurately. This method is referred to as the modified (adjustable) partial factor method.

**Materials and methods.** The paper is aimed at the development of the method of reliability coefficients with adjustable values for the design of steel structures and the scientific justification of the parameters of this method. The methodological formulation of this method is based on determining the design values of the basic variables based on the distribution function for a given quantile. In this case, the quantile of the distribution is calculated using the sensitivity coefficients of the basic variables of the first-order reliability method and the target value of the reliability index.

**Results.** The study describes in a general formulation a method of reliability coefficients with adjustable values for the design of steel structures, which allows explicitly taking into account the target reliability level and variability of the basic variables. In the course of the study, the scientific substantiation of the sensitivity coefficients of the basic variables based on the first-order reliability method was performed and instructions on the purpose of probabilistic models of random variables were presented.

**Conclusions.** The analysis of the generalized function of the limiting state of the steel element by the probabilistic method showed that the sensitivity coefficients change significantly with the change in the loading parameter (characterizing the ratio of variable loads to the total), while it changes slightly depending on the type of variable load itself. Sensitivity coefficients can be assumed based on graphs or simplified dependencies presented in this study. Conservatively, the sensitivity coefficient values for the bearing capacity of the steel element can be assumed to be 0.6, for constant loading –0.4 and for variable loading –0.9.

**KEYWORDS:** modified partial factor method, adjustable partial factor method, sensitivity coefficient, quantile of design value, reliability coefficients, uncertainties, basis variable

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

**FOR CITATION:** Nadolski V.V. Method of reliability coefficients with adjustable values for steel structures design. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1444-1453. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1444-1453 (rus.).

*Corresponding author:* Vitali V. Nadolski, Nadolskiv@mail.by.

## ВВЕДЕНИЕ

Общепризнанным методом проектирования строительных конструкций является метод предельных состояний, который дает основу для разделения состояний конструкций на удовлетворяющие и не удовлетворяющие предъявляемым проектным требованиям и позволяет сформировать так называемую функцию состояния  $g(\mathbf{X})$ , где  $\mathbf{X}$  — вектор базисных (стохастических) переменных [1–3]. Учитывая случайную природу базисных переменных, входящих в функцию состояния со стороны воздействий (природная изменчивость воздействия, упрощения в описании приложения нагрузок и т.д.) и несущей способности (природная изменчивость предела текучести и т.д.), для проверки предельных состояний применяют один из трех методов.

1. Вероятностный метод, в рамках которого проверка предельного состояния сводится к прямому сравнению вычисленной вероятности отказа  $p_f$  и целевого значения вероятности отказа  $p_r$ , регламентированного в нормативных документах, т.е. к выполнению условия:

$$p_f = P(g(\mathbf{X}) < 0) \leq p_r. \quad (1)$$

При этом природная изменчивость базисных переменных и упрощения, погрешности моделей эффектов воздействий и несущей способности учитываются в полной вероятностной постановке. Вероятностный метод проверки предельных состояний — наиболее точный, однако его применение в проектировании сдерживается из-за сложности реализации в повседневном проектировании [4].

2. Метод, основанный на результатах испытаний (физических экспериментов). На основе результатов испытаний часть неопределенностей базисных переменных учитывают или исключают

с помощью статистических методов при определении характеристических или расчетных значений базисных переменных, или прямым подтверждением проверки предельного состояния при испытаниях на контрольные нагрузки.

3. Полувероятностный метод. В этом случае делается ряд упрощений касательно вероятностных формулировок базисных переменных и собственно способа учета неопределенностей базисных переменных. Проверку предельных состояний производят посредством неравенства вида:

$$E_d \leq R_d, \quad (2)$$

где  $E_d$  — расчетное значение воздействия (эффекта воздействия);  $R_d$  — расчетное значение несущей способности.

В группу полувероятностных методов проверки предельных состояний входит метод коэффициентов надежности с фиксированными значениями коэффициентов (закрепленными/декларируемыми в нормативных документах) [4, 5]. В рамках метода коэффициентов надежности проверку предельного состояния выполняют в детерминированной постановке, когда неопределенности базисных переменных учитывают коэффициентами надежности; а собственно метод получил название полувероятностный, так как значения частных коэффициентов определены на основании вероятностного метода для репрезентативного набора конструктивных элементов [6]. Но есть более общая постановка полувероятностного метода, в рамках которого можно более точно учесть специфику конструкции (например, информацию об изменчивости фактических размеров, свойств материалов и т.д.) и специфику местонахождения (например, сведения о климатических нагрузках) [4, 5]. В европейской практике

данный метод получил название метод модифицированных (регулируемых) частных коэффициентов [7–10], однако в методологическом плане он представляет собой метод определения расчетных значений базисных переменных на основе функции распределения исходя из заданного квантиля.

Установление расчетных значений базисных переменных на основе функции распределения исходя из заданного квантиля обладает рядом преимуществ. По отношению к полностью вероятностному методу этот способ намного проще в реализации. Относительно метода коэффициентов надежности с фиксированными значениями в рамках данного способа можно в явном виде учесть необходимый уровень надежности и изменчивость базисных переменных [11, 12].

Цель исследования — развитие метода коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций и научное обоснование параметров этого метода. Для реализации поставленной цели решены следующие задачи: формулировка метода; разработка указаний по назначению вероятностных моделей случайных величин; научное обоснование коэффициентов чувствительности базисных переменных на основе метода надежности первого порядка (FORM); и, как следствие, обоснование квантиля расчетных значений базисных переменных.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Представлено описание метода регулируемых коэффициентов надежности. Автор не претендует на научную новизну описанного метода, так как считает, что его основы были заложены советскими учеными [1, 2], а делает усилия по его развитию и формированию научно обоснованных исходных данных для использования метода. В рамках этого метода расчетное значение эффекта воздействия от постоянной нагрузки может быть получено следующим образом:

$$G_d \approx \mu_{\theta E} \cdot \mu_g [1 - \alpha_E \beta \sqrt{(V_{\theta E}^2 + V_g^2)}], \quad (3)$$

где  $\mu_{\theta E}$ ,  $V_{\theta E}$  — среднее значение и коэффициент вариации неопределенности (погрешности) модели эффекта воздействия;  $\mu_g$ ,  $V_g$  — среднее значение и коэффициент вариации постоянной нагрузки;  $\alpha_E$  — коэффициент чувствительности метода теории надежности первого порядка (FORM) для эффекта воздействий (для более подробной информации см. СН 2.01.01–2019<sup>1</sup>, [2, 4]);  $\beta$  — целевое значение индекса надежности.

Расчетное значение эффекта воздействия от переменной нагрузки в общем случае можно определить по формуле:

$$Q_d = F_{Q, t_{ref}}^{-1}[\Phi(-\alpha_E \beta), t_{ref}], \quad (4)$$

<sup>1</sup> СН 2.01.01–2019. Основы проектирования строительных конструкций : введ. 08.09.20. Минск : Минстройархитектуры, 2020. 83 с.

где  $F_{Q, t_{ref}}^{-1}$  — обратная кумулятивная функция распределения максимумов переменной нагрузки  $Q_{t, ref}$  в течение периода отнесения  $t_{ref}$  для которого назначен целевой индекс надежности  $\beta$ .

Общая модель переменного воздействия (нагрузки) может быть записана в виде:

$$Q = \theta_E \theta_q q_{t_{ref}}, \quad (5)$$

где  $\theta_E$  — погрешность модели эффекта воздействия;  $\theta_q$  — погрешность модели воздействия (не зависящий от времени компонент переменной нагрузки);  $q_{t_{ref}}$  — переменное воздействие (зависящий от времени компонент переменной нагрузки).

В тех случаях, когда доминирующим источником изменчивости является базисная переменная, подчиняющаяся закону Гумбеля (обычно справедливо для климатических и функциональных нагрузок), расчетное значение можно оценить следующим образом:

$$Q_d \approx \mu_{Q, t_{ref}} \cdot \{1 - V_{Q, t_{ref}} [0,449 + 0,778 \ln(-\ln \Phi(-\alpha_E \beta))]\}, \quad (6)$$

где  $\mu_{Q, t_{ref}}$  — среднее значение максимумов переменной нагрузки;  $V_{Q, t_{ref}}$  — коэффициент вариации максимумов переменной нагрузки.

При этом  $\mu_{Q, t_{ref}}$  и  $V_{Q, t_{ref}}$  могут быть представлены общими выражениями:

$$\mu_{Q, t_{ref}} \approx \mu_{\theta E} \cdot \mu_{\theta q} \cdot \mu_{q, t_{ref}}, \quad (7)$$

$$V_{Q, t_{ref}} \approx \sqrt{(V_{\theta E}^2 + V_{\theta q}^2 + V_{q, t_{ref}}^2)}. \quad (8)$$

В отдельных случаях может быть более корректным применение логнормального закона для описания эффектов воздействий, например, для воздействий от железнодорожного транспорта, для которых величины, независимые от времени,  $\theta E$  и  $\theta q$ , являются доминирующим источником изменчивости. Поскольку  $\theta E$  и  $\theta q$  обычно описываются логнормальным распределением, результирующее распределение эффекта воздействия должно быть близко к логнормальному распределению. Для воздействий, распределяющихся по логнормальному закону, расчетное значение возможно вычислить по формуле:

$$Q_d = \mu_{Q, t_{ref}} \cdot \exp(-\alpha_E \beta V_{Q, t_{ref}}). \quad (9)$$

Предположения о распределениях базисных переменных можно проверить на основании взаимосвязи между коэффициентом асимметрии и коэффициентом вариации для различных вероятностных распределений.

Для большинства случаев вероятностных расчетов и калибровки частных коэффициентов для стальных конструкций модель несущей способности принимается в виде произведения геометрической характеристики поперечного сечения (площадь, момент сопротивления) на прочностную характеристику стали (предел текучести) [13–15]. Расчетное значение для несущей способности

стальных элементов может быть выражено следующим образом:

$$R_d \approx \mu_{\theta R} \mu_a \mu_{f_y} \exp(-\alpha_R \beta \sqrt{(V_{\theta R}^2 + V_a^2 + V_{f_y}^2)}), \quad (10)$$

где  $\mu$  — среднее значение случайных величин (базисных переменных);  $\theta R$  — погрешность модели несущей способности;  $a$  — геометрическая характеристика сечения;  $f_y$  — предел текучести;  $\alpha_R$  — коэффициент чувствительности метода FORM для несущей способности.

Для применения описанного метода регулируемых коэффициентов надежности необходимо:

- назначить *статистические параметры базисных переменных* (среднее значение  $\mu$  и коэффициент вариации  $V$ ) [15, 16]. Важной задачей является закрепление вероятностных моделей в нормативных документах или пособиях, как, например, это сделано в СН 2.01.01–2019<sup>1</sup>. Общие подходы к вероятностному моделированию и обоснованию вероятностных моделей нагрузок и воздействий представлены в работах [15, 17–19]. Как правило, статистические параметры зависят от территориальных особенностей рассматриваемого региона и в общем случае должны быть уточнены или определены для рассматриваемого места строительства. Для территории Российской Федерации общие указания можно найти в трудах [20, 21], конкретные указания для территории Республики Беларусь — в публикациях [22, 23]. В настоящем исследовании выполнены уточнения (актуализация) вероятностных моделей воздействий с учетом последних исследований в этой области<sup>2,3</sup> [24–26];

- задаться значениями коэффициентов чувствительности для базисных переменных, входящих в модели несущей способности и эффектов воздействий. Основное приближение (погрешность) метода регулируемых коэффициентов надежности возникает в назначении коэффициентов чувствительности, так как в общем случае эти коэффициенты зависят от функции предельных состояний и от входящих в нее случайных переменных. Коэффициенты чувствительности указывают на вклад случайной переменной в результирующую изменчивость функции предельного состояния. Значения коэффициентов чувствительности оцениваются на основании метода надежности первого порядка (FORM). Далее выполнен анализ коэффициентов чувствительности для стальных элементов, подверженных воздействию переменных нагрузок, таких как снеговая, ветровая и функциональная.

<sup>2</sup> CEN TC250/ Ad Hoc Group Reliability of Eurocodes (convenor — Ton Vrouwenvelder) Technical Report for the reliability background of Eurocodes. Draft June 2021. 2021. 165 p.

<sup>3</sup> Fikke S., Markova J., Höffer R., Wichura B. Final Report of CEN/ TC250/ SC1 from Apr 2018, Project Team SC1.T5 “Climate Change” (under M 515 between EC and CEN). 2018.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Обоснование статистических параметров базисных переменных.* Для ветрового воздействия учтены результаты исследования [24]. В отношении статистических характеристик для скоростного напора учтены последние данные [24], где отмечается, что «значение коэффициента вариации годовых максимумов скоростного напора лежит в пределах 0,24–0,85, при среднем значении и стандартном отклонении коэффициента вариации 0,47 и 0,14 соответственно», поэтому в вероятностных моделях были повышены значения коэффициентов вариации скоростного напора по отношению к значениям, принятым в работе [22].

В целом об увеличении неопределенности ветрового воздействия и учащении появления таких редких событий, как торнадо и смерч, отмечено в отчете о климатических изменениях<sup>3</sup>. Сведения для неопределенности модели ветрового воздействия приняты с учетом отчета<sup>2</sup>, где для обобщенной модели ветрового воздействия (для элементов с грузовой площадью более 10 м<sup>2</sup>) рекомендуется использовать среднее значение 0,8 и коэффициент вариации 0,25, и с учетом исследования [24], где отмечается, что «значения статистических параметров обобщенного коэффициента “трансформации” находятся в диапазоне 0,64–0,70 и 0,25–0,30 для среднего значения и коэффициента вариации соответственно».

Для снеговой нагрузки, принимая во внимание исследование<sup>2</sup>, уточнены значения статистических характеристик для неопределенности модели снегового воздействия, дополнительно для расширения области анализа влияния неопределенности статистических характеристик их значения приняты в диапазоне интервала. В отчете<sup>2</sup> представлены статистические параметры модели снеговой нагрузки для разных типов кровель, при этом разделены модели для локальных и общих (с учетом осреднения) снеговых нагрузок. В качестве наиболее репрезентативных значений следует считать данные для плоских и малоуклонных кровель, при этом рекомендуется использовать среднее значение 0,83 и коэффициент вариации 0,16. Для кровель с уклонами кровли 25–30 отмечено увеличение коэффициента вариации до значений 25–30 %, однако при этом уменьшается среднее значение до 0,7–0,75. В работах [25, 26] представлены более высокие значения коэффициентов вариации, но указано, что эти значения получены с учетом коэффициента вариации снеговой нагрузки на грунт.

Результаты исследований статистических параметров базисных переменных, входящих в модели эффектов воздействий, сведены в табл. 1.

Общие подходы к вероятностному моделированию несущей способности стального элемента

Табл. 1. Статистические параметры базисных переменных для модели эффектов воздействий

Table 1. Statistical parameters of the basic variables for the load effects model

Базисные переменные Basic variables	Распределение Distribution	$\mu/X_k$	$V, \%$	Источник Source
Собственный вес Deadload	$N$	1,0	3–6	[15, 22, 23]
Постоянная нагрузка Permanent load	$N$	1,0–1,05	7–10	[15, 22, 23]
Полезная нагрузка — 5 лет Imposed load — 5 years	$Gum$	0,17–0,25	80–115	[15, 23]
Полезная нагрузка — 50 лет Imposed load — 50 years	$Gum$	<b>0,45–0,6</b>	<b>35–40</b>	[15, 23]
Неопределенность модели полезной нагрузки Uncertainty of the imposed load model	$LN$	<b>1,0</b>	<b>10</b>	[15, 22, 23]
Снеговая нагрузка — 1 год Snow load — 1 year	$Gum$	0,34–0,44	48–62	[15]
Снеговая нагрузка — 50 лет Snow load — 50 years	$Gum$	<b>0,9–1,1</b>	<b>19–23</b>	[15]
Неопределенность модели снеговой нагрузки Uncertainty of the snow load model	$LN$	<b>0,8–0,9</b>	<b>15–20</b>	[15, 22]
Ветровая нагрузка — 1 год Wind load — 1 year	$Gum$	0,35–0,52	33–61	[15, 22, 24]
Ветровая нагрузка — 50 лет Wind load — 50 years	$Gum$	<b>1,0–1,1</b>	<b>16–21</b>	[22, 24]
Неопределенность модели ветрового воздействия Uncertainty of the wind load model	$LN$	<b>0,7–0,8</b>	<b>25–30</b>	[22, 24]
Неопределенность модели эффектов воздействий Model uncertainty of the load effects	$LN$	<b>1,0</b>	<b>5–10</b>	[15, 22, 23]

представлены в исследованиях<sup>4</sup> [15, 22, 23, 27, 28]. В работе [29] для вероятностного описания предела текучести при условиях поставки проката с разных заводов рекомендовано использовать среднее значение отношения фактического значения предела текучести к характеристическому ( $\mu_{fy}/f_y$ ), равное 1,10–1,20, а коэффициент вариации  $V_{fy} = 5–8 \%$ , при этом в качестве средних значений рекомендовано принимать  $\mu_{fy}/f_y = 1,15$  и  $V_{fy} = 7 \%$ . Для вероятностного описания предела текучести наиболее часто используют нормальный и логнормальный закон распределения [27].

<sup>4</sup> JCSS Probabilistic Model Code. Joint Committee of Structural Safety, 2001.

Для геометрических характеристик предлагается применять  $\mu_x/X_n = 1,0$ ,  $V = 2 \%^4$ . Исследования неопределенности моделей несущей способности, регламентированных в нормативных документах, представлены в публикациях [28, 29]. Статистические параметры погрешности конечно-элементных моделей несущей способности можно найти в труде [30].

Результаты исследований статистических параметров базисных переменных, входящих в модель несущей способности, представлены в табл. 2.

Обоснование коэффициентов чувствительности базисных переменных на основе метода надежности первого порядка. Описание и указания по реализации метода надежности первого порядка

Табл. 2. Статистические параметры базисных переменных для модели несущей способности

Table 2. Statistical parameters of the basic variables for the load-bearing capacity model

Базисные переменные Basic variables	Распределение Distribution	$\mu/X_k$ или / от $\mu/X_{nom}$	$V, \%$	Источник Source
Предел текучести (для диапазонного анализа) Yield strength (for range analysis)	$LN$	1,1–1,2	5–8	[15, 23, 27]
Предел текучести (для осредненного анализа) Yield strength (for average/general analysis)	$LN$	1,15	7	[15, 23, 27]
Неопределенность модели несущей способности обобщенного стального элемента Uncertainty of the resistance model of a generalized steel element	$N$	1,0–1,15	5–10	[15, 23, 28]
Неопределенность конечно-элементной модели несущей способности Uncertainty of the finite element model of load-bearing capacity	$N$	0,9–1,0	6,5–8,5	[30]

и методики определения коэффициентов чувствительности приведены в работах [13, 31, 32], а также в нормативных документах СН 2.01.01<sup>1</sup>, ТКП EN 1990<sup>5</sup>, СТБ ISO 2394<sup>6</sup>. В настоящем исследовании коэффициенты чувствительности вычислены для базисных переменных, входящих в функцию предельного состояния стального элемента. При этом рассмотрены три расчетных ситуации: первая — при действии снеговой нагрузки, вторая — ветровой нагрузки и третья — функциональной (полезной) нагрузки.

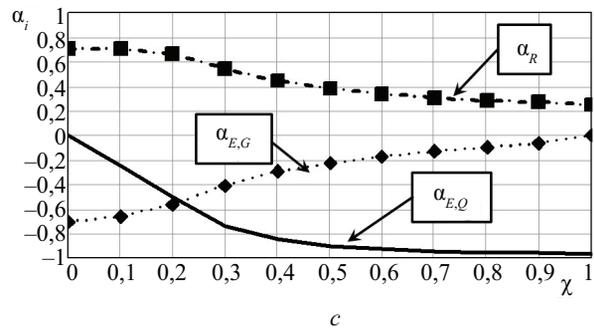
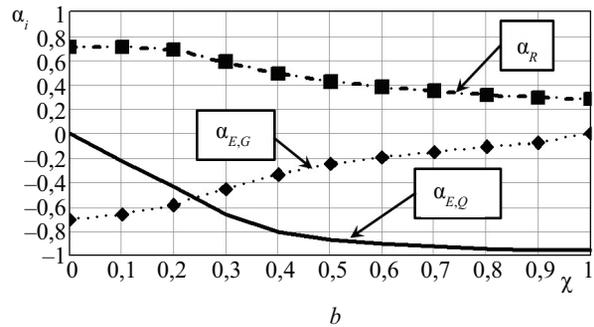
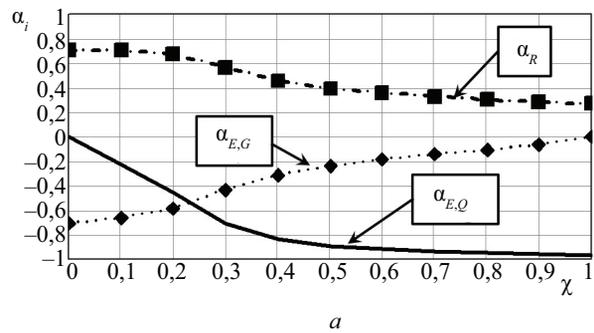
Результаты анализа приведены на рисунке. На вертикальной оси отложены значения коэффициентов чувствительности. Отрицательные значения коэффициентов чувствительности — для нагрузок  $\alpha_E$  ( $\alpha_{E,G}$  — для постоянных нагрузок;  $\alpha_{E,Q}$  — для соответствующих переменных нагрузок), положительные — для несущей способности  $\alpha_R$ . На горизонтальной оси указаны значения параметра нагружения  $\chi$ , который представляет собой долю переменных воздействий в полной величине воздействий [13, 15, 32]. Анализ реальных объектов показывает, что наиболее вероятный интервал значения параметра нагружения  $\chi$  от 0,5 до 0,7 для снеговой нагрузки, от 0,4 до 0,9 для полезной нагрузки. В отдельных случаях при значительной постоянной нагрузке (например, при тяжелых конструкциях пола, кровли) значение коэффициента может опускаться до 0,3, а при действии преимущественно переменных нагрузок (например, подкрановые балки) коэффициент может достигать 1,0. В работах [13–15] для стальных конструкций наиболее распространенные значения параметра нагружения  $\chi$  приняты 0,5–0,8.

Из анализа видно, что коэффициенты чувствительности зависят от значения параметра нагружения (характеризующего долю переменных нагрузок в общей нагрузке), при этом незначительно меняются в зависимости от вида переменной нагрузки. С увеличением параметра нагружения (доли переменной нагрузки) коэффициенты чувствительности для несущей способности и постоянной нагрузки уменьшаются, а для переменной нагрузки увеличиваются. В качестве приближения для практического применения можно рекомендовать определять коэффициенты чувствительности по представленным графикам или по следующим приближенным зависимостям:

$$\begin{aligned} \alpha_R &= 0,78 - 0,43\chi \text{ при } \chi \geq 0,3; \\ \alpha_{E,G} &= -0,65 + 0,65\chi \text{ при } \chi \geq 0,3; \\ \alpha_{E,Q} &= -0,43 - 0,58\chi \text{ при } \chi = (0,3-0,8); \\ \alpha_{E,Q} &= -0,9 \text{ при } \chi \geq 0,8. \end{aligned}$$

<sup>5</sup> ТКП EN 1990–2011\* (02250). Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций : введ. 15.12.11. Минск : Минстройархитектуры, 2011. 94 с.

<sup>6</sup> СТБ ISO 2394–2007. Надежность строительных конструкций. Общие принципы. Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2007. 69 с.



Изменение коэффициентов чувствительности при действии: *a* — функциональной нагрузки; *b* — снеговой нагрузки; *c* — ветровой нагрузки

Changing the values of the sensitivity coefficients for the action: *a* — of functional load; *b* — of snow load; *c* — of wind load

Консервативно значения коэффициентов чувствительности можно принять равными: 0,6 для несущей способности, −0,4 для постоянного воздействия и −0,9 для переменного воздействия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании в общей формулировке описан метод коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций, который позволяет в явном виде учесть целевой уровень надежности и изменчивость базисных переменных. Уровень надежности учитывается с помощью индекса надежности и коэффициентов чувствительности, а изменчивость базисных переменных — среднего значения и коэффициента вариации. Приближение данного метода по отношению к полностью вероятностному методу связа-

но с необходимостью задаваться коэффициентами чувствительности.

Выполнено научное обоснование коэффициентов чувствительности базисных переменных на основе метода надежности первого порядка (FORM). Анализ предельного состояния вероятностным методом показал, что коэффициент чувствительности существенно меняется с изменением параметра нагружения (характеризующего долю переменных нагрузок в общей нагрузке), при этом незначительно меняется в зависимости от вида переменной нагрузки. Коэффициенты чувствительности могут быть приняты на основании графиков или упрощенных зависимостей, представленных в данном исследовании. Консервативно значения коэффициента чувствительности для несущей способности  $\alpha_R$  можно принять равными 0,6, для постоянного воздействия  $\alpha_{E,G} = -0,4$  и для переменного воздействия  $\alpha_{E,Q} = -0,9$ .

В работе также представлены статистические параметры базисных переменных для моделей эффектов воздействий и моделей несущей способности, которые могут быть внесены в нормативные документы или применены в качестве справочной информации в дальнейших исследованиях.

Наибольший выигрыш применения данного метода достигается при оценке технического состояния существующих конструкций, в этом случае на основании результатов наблюдений можно учесть фактическую изменчивость базисных переменных. Поэтому дальнейшие исследования необходимо направить на разработку методики актуализации статистических параметров с учетом количества измерений и доступной информации в момент обследования строительных конструкций, а также на обоснование целевого уровня надежности для существующих конструкций.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. М. : Стройиздат, 1947. 95 с.
2. Балдин В.А., Гольденблат И.И., Коченов В.И., Пильдиш М.Я., Таль К.Э. Расчет строительных конструкций по предельным состояниям. М. : Госстройиздат, 1951. 271 с.
3. Novak L., Cervenka J., Cervenka V., Novák D., Sýkora M. Comparison of advanced semi-probabilistic methods for design and assessment of concrete structures // Structural Concrete. 2022. Vol. 24. Issue 1. Pp. 771–787. DOI: 10.1002/suco.202200179
4. Nadolski V., Holicky M., Sykora M., Tur V. Comparison of approaches to reliability verification of existing steel structures // Budownictwo i Architektura. 2022. Vol. 21. Issue 4. Pp. 13–24. DOI: 10.35784/bud-arch.3022
5. Novák L., Novák D. Semi-probabilistic assessment of existing bridge using simplified methods for estimation of variance // Acta Polytechnica CTU Proceedings. 2022. Vol. 36. Pp. 142–148. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0142
6. Lenner R., Sýkora M. Partial factors for imposed loads in areas for storage and industrial use // Structure and Infrastructure Engineering. 2017. Vol. 13. Issue 11. Pp. 1425–1436. DOI: 10.1080/15732479.2017.1285328
7. Caspeele R., Sykora M., Allaix D.L., Steenbergen R. The design value method and adjusted partial factor approach for existing structures // Structural Engineering International. 2013. Vol. 23. Issue 4. Pp. 386–393. DOI: 10.2749/101686613x13627347100194
8. Zhang Y., Toutlemonde F. Calibrating partial safety factors in line with required reliability levels for concrete structures // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2022. Vol. 26. Issue 9. Pp. 3863–3879. DOI: 10.1080/19648189.2020.1824820
9. Lara C., Tanner P., Zanuy C., Hingorani R. Reliability verification of existing rc structures using partial factors approaches and site-specific data // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. Issue 4. P. 1653. DOI: 10.3390/app11041653
10. Ebrahim Z.A., Abdel-jawad Y.A. A modified semi-probabilistic approach for the assessment of the residual service life of reinforced concrete structures subjected to carbonation // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 44. Pp. 148–155. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.216
11. Orcesi A., Diamantidis D., O'Connor A., Palmisano F., Sykora M., Boros V. et al. Investigating partial factors for the assessment of existing reinforced concrete bridges // Structural Engineering International. 2023. Vol. 34. Issue 1. Pp. 55–70. DOI: 10.1080/10168664.2023.2204115
12. Marková J., Holický M., Jung K., Sýkora M. Reliability of existing reinforced concrete slabs exposed to punching shear // Acta Polytechnica CTU Proceedings. 2022. Vol. 36. Pp. 119–126. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0119
13. Holicky M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow load // WIT Transactions on Engineering Sciences. Vol. 58. 2007. Vol. I. Pp. 51–57. DOI: 10.2495/en070061
14. Sýkora M., Holicky M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load // Reliability Engineering — Proceedings of the International Workshop on Reliability Engineering and Risk Management IWRERM 2008. Shanghai : Tongji University Press, 2009. Pp. 183–188.

15. Nadolski V., Rózsás Á., Sykora M. Calibrating partial factors — methodology, input data and case study of steel structures // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019. DOI: 10.3311/PPci.12822
16. Шинел Г. Надежность несущих строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1994. 287 с.
17. Koteš P., Prokop J., Strieška M., Vičan J. Calibration of partial safety factors according to Eurocodes // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 117. P. 00088. DOI: 10.1051/mateconf/201711700088
18. Hyman P., Sriramula S., Osofero A.I. Calibration of safety factors for prestressed stayed steel columns // *Architecture, Structures and Construction*. 2022. Vol. 2. Issue 3. Pp. 365–380. DOI: 10.1007/s44150-022-00066-5
19. Holický M., Retief J.V., Sýkora M. Assessment of model uncertainties for structural resistance // *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2016. Vol. 45. Pp. 188–197. DOI: 10.1016/j.probingmech.2015.09.008
20. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2008. 184 с. EDN QNNCVJ.
21. Ведяков И.И. Современные принципы нормирования качества материалов и стальных конструкций // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2007. № 2 (211). С. 62–64. EDN ZVYHQV.
22. Tur V., Nadolski V. Belarusian national annex to Eurocode 3: basic variables formulation for the partial factors calibration // *Modern Engineering*. 2016. Vol. 1. Pp. 63–72.
23. Тур В.В., Надольский В.В. Калибровка значенных частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. Часть 1 // *Строительство и реконструкция*. 2016. № 4 (66). С. 73–84. EDN WJFTVB.
24. Тур В.В., Надольский В.В., Черноиван А.В. Вероятностные модели ветрового воздействия для климатических условий Республики Беларусь // *Вестник Брестского государственного технического университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 1 (103). С. 65–71. EDN BDFIGH.
25. Sanpaolesi L., Del Corso R., Formichi P. et al. Phase 1 final report to the european commission, scientific support activity in the field of structural stability of civil engineering works: Snow loads. Department of structural engineering, University of Pisa, 1998.
26. Sanpaolesi L., Del Corso R., Formichi P. et al. Phase 2 Final report to the European commission, scientific support activity in the field of structural stability of civil engineering works: snow loads. Department of Structural Engineering, University of Pisa, 1999.
27. Мартынов Ю.С., Надольский В.В. Статистические параметры базисных переменных, входящих в модели сопротивления стального элемента // *Архитектура и строительные науки*. 2014. № 1–2 (18–19). С. 39–41. EDN NPNGOE.
28. Nadolski V., Sykora M. Uncertainty in resistance models for steel members // *Transactions of the VŠB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2014. Vol. 14. Issue 2. Pp. 26–37. DOI: 10.2478/tvsb-2014-0028
29. Надольский В.В. Надежность стального элемента при потере местной устойчивости стенки // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 5. С. 569–579. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.569-579. EDN BJZUCE.
30. 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.
31. Gulvanessian H., Holicki M. Reliability based calibration of Eurocodes considering a steel member // *JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration*. 2002.
32. Sýkora M., Holický M. Verification of existing reinforced concrete structures using the design value method // *Proceedings of the 3th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*. 2012. Pp. 821–828.

Поступила в редакцию 4 февраля 2024 г.

Принята в доработанном виде 6 июня 2024 г.

Одобрена для публикации 11 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. Streletskiy N.S. *Fundamentals of statistical accounting of the safety factor of structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1947; 95. (rus.).
2. Baldin V.A., Gol'denblat I. I., Kochenov V.I., Pil'dish M.Ya., Tal' K.E. *Calculation of building structures by limit states*. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1951; 272. (rus.).

3. Novak L., Cervenka J., Cervenka V., Novák D., Sýkora M. Comparison of advanced semi-probabilistic methods for design and assessment of concrete structures. *Structural Concrete*. 2022; 24(1):771-787. DOI: 10.1002/suco.202200179
4. Nadolski V., Holicky M., Sykora M., Tur V. Comparison of approaches to reliability verification of existing steel structures. *Budownictwo i Architektura*. 2022; 21(4):13-24. DOI: 10.35784/bud-arch.3022
5. Novák L., Novák D. Semi-probabilistic assessment of existing bridge using simplified methods for estimation of variance. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2022; 36:142-148. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0142
6. Lenner R., Sýkora M. Partial factors for imposed loads in areas for storage and industrial use. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2017; 13(11):1425-1436. DOI: 10.1080/15732479.2017.1285328
7. Caspeele R., Sykora M., Allaix D.L., Steenbergen R. The design value method and adjusted partial factor approach for existing structures. *Structural Engineering International*. 2013; 23(4):386-393. DOI: 10.2749/101686613x13627347100194
8. Zhang Y., Toutlemonde F. Calibrating partial safety factors in line with required reliability levels for concrete structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2022; 26(9):3863-3879. DOI: 10.1080/19648189.2020.1824820
9. Lara C., Tanner P., Zanuy C., Hingorani R. Reliability verification of existing rc structures using partial factors approaches and site-specific data. *Applied Sciences*. 2021; 11(4):1653. DOI: 10.3390/app11041653
10. Ebrahim Z.A., Abdel-jawad Y.A. A modified semi-probabilistic approach for the assessment of the residual service life of reinforced concrete structures subjected to carbonation. *Procedia Manufacturing*. 2020; 44:148-155. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.216
11. Orcesi A., Diamantidis D., O'Connor A., Palmisano F., Sykora M., Boros V. et al. Investigating partial factors for the assessment of existing reinforced concrete bridges. *Structural Engineering International*. 2023; 34(1):55-70. DOI: 10.1080/10168664.2023.2204115
12. Marková J., Holický M., Jung K., Sýkora M. Reliability of existing reinforced concrete slabs exposed to punching shear. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2022; 36:119-126. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0119
13. Holicky M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow load. *WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol 58*. 2007; (I):51-57. DOI: 10.2495/en070061
14. Sýkora M., Holicky M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load. *Reliability Engineering — Proceedings of the International Workshop on Reliability Engineering and Risk Management IWRERM 2008*. Shanghai, Tongji University Press, 2009; 183-188.
15. Nadolski V., Rózsás Á., Sykora M. Calibrating partial factors — methodology, input data and case study of steel structures. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2019. DOI: 10.3311/PPci.12822
16. Shpete G. *Reliability of load-bearing building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1994; 287. (rus.).
17. Koteš P., Prokop J., Strieška M., Vičan J. Calibration of partial safety factors according to Eurocodes. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 117:00088. DOI: 10.1051/mateconf/201711700088
18. Hyman P., Sriramula S., Osofero A.I. Calibration of safety factors for prestressed stayed steel columns. *Architecture, Structures and Construction*. 2022; 2(3):365-380. DOI: 10.1007/s44150-022-00066-5
19. Holický M., Retief J.V., Sýkora M. Assessment of model uncertainties for structural resistance. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2016; 45:188-197. DOI: 10.1016/j.probengmech.2015.09.008
20. Lychev A.S. *Reliability of building structures*. Moscow, ASV Publishing House, 2008; 184. EDN QNNCVJ. (rus.).
21. Vedyakov I.I. Modern principles of rationing the quality of materials and steel structures. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 2007; 2(211):62-64. EDN ZVYHQV. (rus.).
22. Tur V., Nadolski V. Belarusian national annex to Eurocode 3: basic variables formulation for the partial factors calibration. *Modern Engineering*. 2016; 1:63-72.
23. Tur V., Nadolski V. The partial factor values calibration for the ultimate limit state checking of steel structures for the conditions republic of Belarus. Part 1. *Building and Reconstruction*. 2016; 4(66):73-84. EDN WJFTB. (rus.).
24. Tur V.V., Nadolski V.V., Chernoivan A.V. Probabilistic models of wind influence for climatic conditions of republic of Belarus. *Bulletin of BrSTU. Construction and Architecture*. 2017; 1(103):65-71. EDN BDFIGH. (rus.).
25. Sanpaolesi L., Del Corso R., Formichi P. et al. *Phase 1 Final Report to the European Commission, Scientific Support Activity in the Field of Structural Stability of Civil Engineering Works: Snow Loads*. Department of Structural Engineering, University of Pisa, 1998.
26. Sanpaolesi L., Del Corso R., Formichi P. et al. *Phase 2 Final Report to the European Commission, Scientific Support Activity in the Field of Structural Stability of Civil Engineering Works: Snow Loads*. Department of Structural Engineering, University of Pisa, 1999.
27. Martynov I., Nadolski V. The statistical parameters of basic variables in the resistance model of steel element. *Architecture and Building Sciences*. 2014; 1-2(18-19):39-41. EDN NPNGOE. (rus.).
28. Nadolski V., Sykora M. Uncertainty in resistance models for steel members. *Transactions of the VŠB — Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2014; 14(2):26-37. DOI: 10.2478/tvsb-2014-0028
29. Nadolski V.V. Reliability of a steel member in case of loss of local stability of a web. *Vestnik MGSU*

[Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):569-579. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.569-579. EDN BJZUCE. (rus.).

30. 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.).

31. Gulvanessian H., Holicki M. Reliability based calibration of Eurocodes considering a steel member. *JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration*. 2002.

32. Sýkora M., Holický M. Verification of existing reinforced concrete structures using the design value method. *Proceedings of the 3th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*. 2012; 821-828.

Received February 4, 2024.

Adopted in revised form on June 6, 2024.

Approved for publication on June 11, 2024.

**B I O N O T E S:** **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 RSCI: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskiv@mail.by.