

ТУР В.В., НАДОЛЬСКИЙ В.В.

КАЛИБРОВКА ЗНАЧЕНИЙ ЧАСТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ УСЛОВИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ. ЧАСТЬ 2

Цель работы состояла в определении научно обоснованных значений частных коэффициентов норм проектирования стальных конструкций, учитывающих целевые значения уровней конструкционной надежности. Объектом исследования являются изгибаемые стальные элементы. Методы исследования: математическое моделирование, численно – аналитические методы, параметрический и графический анализ. Согласно концепции надежности, сформулированной в ISO 2394 и EN 1990, введенных в действие на территории Республики Беларусь, проектирование конструктивных элементов следует выполнять на основе нормируемых целевых значений уровней надежности. Это вызвало необходимость выполнить калибровку значений частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций, основанную на условии обеспечения целевого уровня надежности. Статья состоит из двух частей. Первая часть посвящена обоснованию вероятностных моделей базисных переменных, входящих в функции состояния стальных элементов. Вторая часть отражает результаты калибровки частных коэффициентов, обеспечивающих достижение целевого уровня надежности.

Ключевые слова: надежность, стальная конструкция, функция состояния, вероятностная модель, вероятностный расчет, погрешность модели, отказ, калибровка, индекс надежности, базисная переменная.

Введение

В первой части статьи обоснованы вероятностные модели базисных переменных, входящих в модели сопротивления стальных элементов и в модели эффектов воздействий с учетом территориальных особенностей Республики Беларусь [1]. На основании принятых моделей для заданных целевых уровней надежности далее определены значения частных коэффициентов.

1 Калибровка значений частных коэффициентов, обеспечивающих уровень надежности, регламентированный EN 1990

Основываясь на значениях коэффициентов чувствительности, полученных с использованием метода теории надежности 1-го порядка (FORM), и при принятых вероятностных моделях базисных переменных получены значения частных коэффициентов, обеспечивающие достижение целевого значения индекса надежности $\beta_t = 3.8$ для класса надежности RC 2 согласно EN 1990 [2].

Значения частных коэффициентов для сопротивления (γ_M), постоянного (γ_G) и переменного (γ_Q) воздействий представлены в следующем виде:

$$\gamma_M = \gamma_{Rd} \times \gamma_m, \quad \gamma_G = \gamma_{Sd} \times \gamma_g, \quad \gamma_Q = \gamma_{Sd} \times \gamma_{\mu} \times \gamma_q, \quad (1)$$

где γ_{Rd} – частный коэффициент, учитывающий погрешность модели сопротивления;

γ_m – частный коэффициент для свойства материала (предела текучести стали), учитывающий возможность неблагоприятных отклонений свойства материала от его характеристического значения;

γ_{Sd} – частный коэффициент, учитывающий погрешность модели эффектов воздействий;

γ_g – частный коэффициент для постоянной нагрузки, учитывающий возможность неблагоприятного отклонения данного воздействия от его репрезентативного значения;

- γ_{μ} – частный коэффициент, учитывающий погрешность модели воздействия (например, для снеговой нагрузки этот коэффициент учитывает неопределенность схемы распределения снеговой нагрузки на покрытие);
- γ_q – частный коэффициент для переменного воздействия, учитывающий возможность неблагоприятного отклонения данного воздействия от его репрезентативного значения.

При описании снеговой нагрузки на поверхности земли распределением Гумбеля и значениях частного коэффициента, учитывающего только изменчивость нагрузки на поверхности земли γ_q (см. формулу 1), вероятность превышения расчетных значений составила на уровне 10^{-5} в год.

На рисунке 1 представлены значения частных коэффициентов γ_i в зависимости от параметра нагружения $\chi = Q_k / (G_k + Q_k)$, обеспечивающие достижение целевого значения индекса надежности $\beta_t = 3.8$. Результаты представлены только для функциональной и снеговой нагрузок. Зависимости $\gamma_i - \chi$ имеют аналогичный характер при рассмотрении ветрового воздействия. Для вероятностного описания базисных переменных приняты средние значения статистических показателей из анализируемого диапазона по таблице 1. Такое представление позволяет отразить качественную сторону исследуемой зависимости.

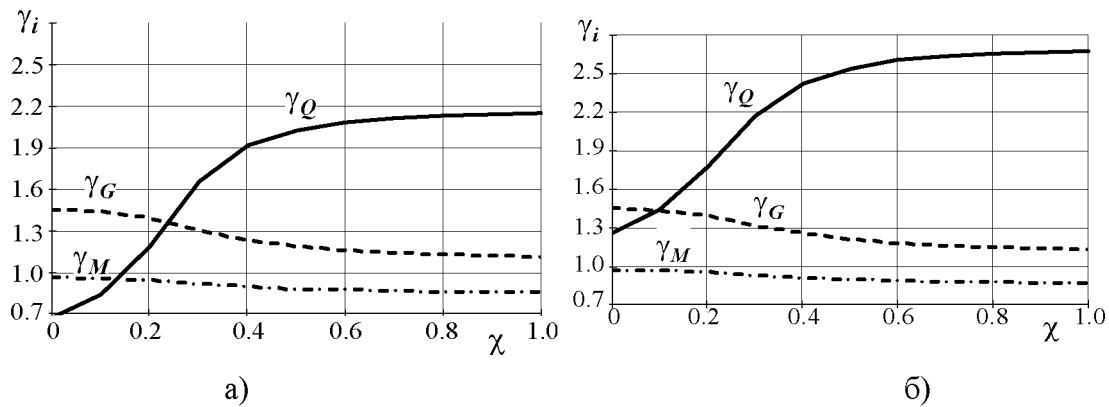


Рисунок 1 – Значения частных коэффициентов, обеспечивающие достижение целевого индекса надежности $\beta_t = 3.8$: а) для функциональной нагрузки, б) для снеговой нагрузки

Полученные значения частных коэффициентов согласуются с результатами других исследователей [3-6].

2 Анализ значений частных коэффициентов, обеспечивающих уровень надежности, регламентированный EN 1990

Анализ значений частных коэффициентов, необходимых для обеспечения уровня надежности, регламентированного в EN 1990 [2], выявил несоответствия в концепции надежности, принятой в Еврокодах, а именно:

- полученные значения частных коэффициентов значительно превышают применяемые в настоящее время в отечественной и мировой практике нормирования переменных воздействий;

- численный анализ обеспеченности расчетных значений базисных переменных показал, что вероятность превышения расчетных значений переменных воздействий находится на уровне $10^{-4} \dots 10^{-5}$. Используя соответствующий закон распределения можно определить обеспеченность расчетного значения. Например, для снеговой нагрузки на поверхности земли, принимая распределения Гумбеля, вероятность превышения полученного расчетного значения нагрузки:

$$P = \exp [-\exp [-a (sd - b)]] \tag{2}$$

где sd – расчетное значение снеговой нагрузки на поверхности земли.

$$s_d = S_k \times \gamma_q \quad (3)$$

a и b параметры распределения, которые определяют через среднее значение μ и стандартное отклонение σ всей выборки:

$$a = \pi / (\sigma \sqrt{6}) \quad (4)$$

$$b = \mu - 0.5772 / a \quad (5)$$

При описании снеговой нагрузки на поверхности земли распределением Гумбеля и значениях частного коэффициента, учитывающего только изменчивость нагрузки на поверхности земли γ_q (см. формулу 1), вероятность превышения расчетных значений составила на уровне 10^{-5} в год.

При этом следует помнить, что значения переменных воздействий нормируются из распределения годовых максимумов. Поэтому такая вероятность применяется только при нормировании редких природных и климатических явлений или чрезвычайного (особого) значения воздействия и неприемлема для расчетных значений переменных воздействий при рассмотрении постоянных расчетных ситуаций. Кроме того, квантиль данного уровня требует существенной экстраполяции далеко за пределы наблюдаемых значений, что приводит к неопределенностям и снижает достоверность оценивания конечного результата.

В выявленной ситуации представляет интерес анализ уровней конструкционной надежности на основании предыдущего опыта нормирования при принятых вероятностных моделях базисных переменных.

3 Оценка уровней надежности на основании предыдущего опыта нормирования для территории Республики Беларусь

В качестве альтернативы выполнена оценка уровней надежности на основании предыдущего опыта нормирования для территории Республики Беларусь. Результаты представлены в виде графиков (см. рисунок 2), где по оси ординат отложены значения индекса надежности β , а по оси абсцисс – параметр нагружения χ . На рисунке 2а) представлены верхняя и нижняя границы изменения β при одновременном действии постоянной и функциональной нагрузок, а на рисунке 2б) – то же при действии постоянной и снеговой нагрузок. Резкий скачок значений β на рисунке 2б) обусловлен изменением частного коэффициента для снеговой нагрузки согласно СНиП [7]. Следует отметить схожие результаты анализа индексов надежности для территории Российской Федерации [8].

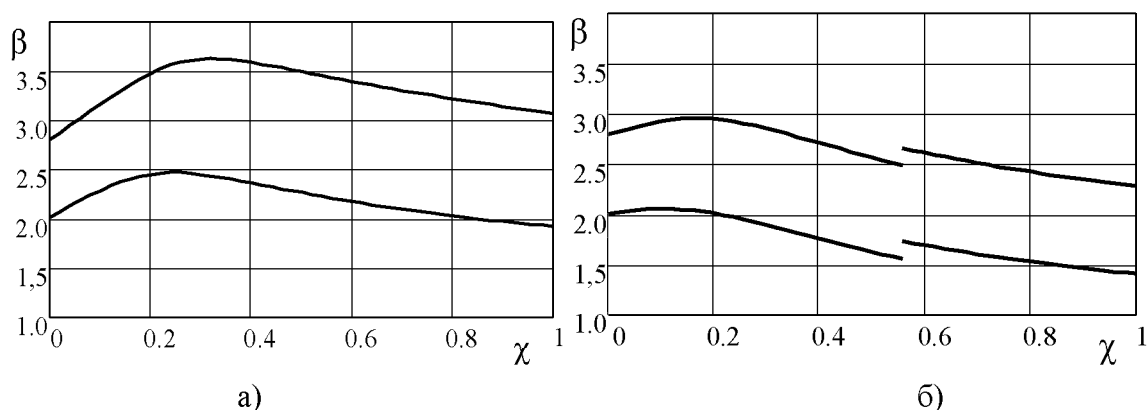


Рисунок 2 – Зависимости $\beta - \chi$: а) для функциональной нагрузки, б) для снеговой нагрузки

На основании анализа результатов исследований уровней надежности, обеспечиваемых предыдущей практикой нормирования и проектирования стальных конструкций, для дальнейшей калибровки частных коэффициентов принято наименьшее значение вероятности отказа $p_f = 10^{-2}$ для периода отнесения 50 лет.

4 Калибровка значений частных коэффициентов, для установленных уровней надежности на основании предыдущего опыта нормирования для территории Республики Беларусь

Частные коэффициенты были откалиброваны таким образом, чтобы обеспечить целевой уровень надежности при установленных значениях статистических показателей базисных переменных для разных значений параметра нагружения χ . На основании результатов исследования рекомендованы следующие значения частных коэффициентов для расчетных моделей сопротивлений и эффектов воздействий при проектировании стальных элементов на территории Республики Беларусь:

для постоянной нагрузки – $\gamma_G = 1.3$;

для функциональной (полезной) нагрузки – $\gamma_Q = 1.4$;

для снеговой нагрузки – $\gamma_Q = 1.6$;

для ветрового воздействия – $\gamma_Q = 1.5$;

для моделей сопротивления обобщенного стального элемента – $\gamma_M = 1.1$.

Следует отметить, что данные значения частных коэффициентов должны использоваться с правилами сочетаний воздействий 6.10 а/б [2]. Рекомендуемая система частных коэффициентов позволяет обеспечить достижение целевого значения индекса надежности. На рисунках 3 – 5 заштрихованная область представляет диапазон изменения значений индексов надежности для наиболее распространенных условий применения стальных конструкций (параметр нагружения $\chi = 0.4 - 0.8$).

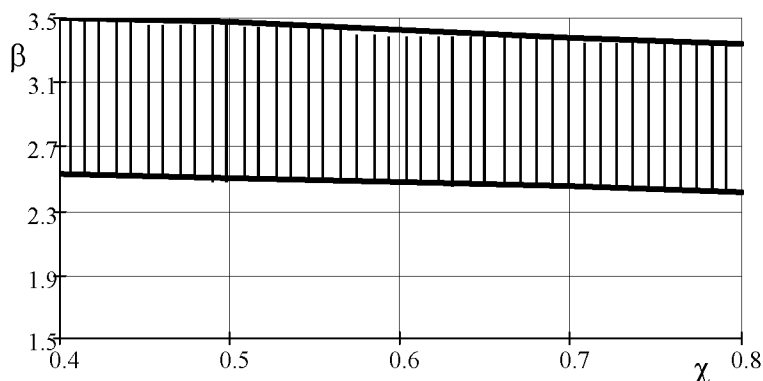


Рисунок 3 – Зависимость $\beta - \chi$ при одновременном действии постоянной и полезной нагрузок

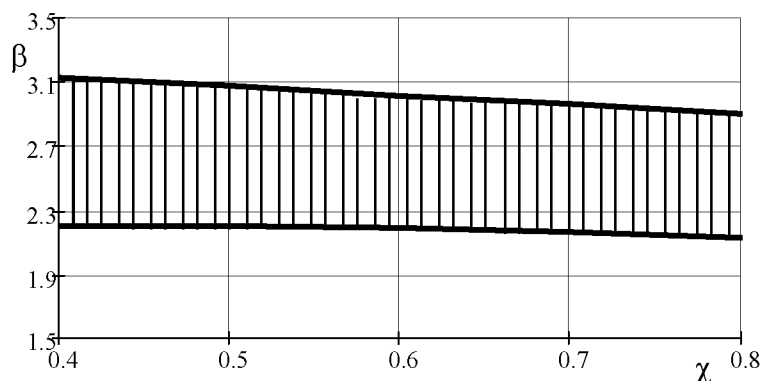


Рисунок 4 – Зависимость $\beta - \chi$ при одновременном действии постоянной и снеговой нагрузок

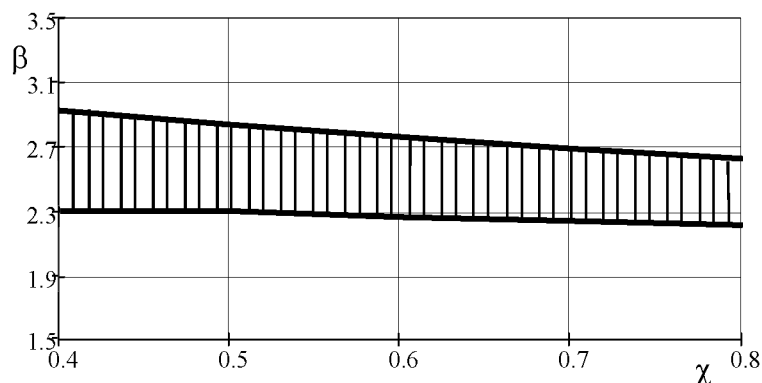


Рисунок 5 – Зависимость $\beta - \chi$ при одновременном действии постоянной и ветровой нагрузок

Заключение

В работе обоснованы вероятностные модели базисных переменных, входящих в модели сопротивления стальных элементов. Уточнены статистические показатели базисных переменных, входящих в модели эффектов воздействий с учетом территориальных особенностей Республики Беларусь.

Обоснованные вероятностные модели сопротивления и эффектов воздействий позволили определить значения частных коэффициентов для расчетных моделей стальных конструкций. Дальнейший анализ показал, что использование полученных калибровкой значений частных коэффициентов приводит к обеспеченности расчетного значения переменного воздействия, близкой к обеспеченности особых воздействий. Выходом из этой ситуации является пересмотр численных значений уровней конструкционной надежности при сохранении общей концепции надежности. Это вызвало необходимость выполнить оценку уровней надежности на основании предыдущего опыта нормирования.

Получены численные значения уровней надежности стальных конструкций на основании предыдущего опыта нормирования применительно к условиям Республики Беларусь. При проверках предельных состояний несущей способности стальных элементов среднего класса надежности (жилые, офисные здания и т. д.) минимальное значение вероятности отказа для периода отнесения 50 лет рекомендуется назначать $p_f = 10^{-2}$ для принятых вероятностных моделей базисных переменных.

Установлены численные значения частных коэффициентов метода предельных состояний в полувероятностной постановке, применяемые в расчетных моделях сопротивлений и эффектов воздействий при проектировании стальных конструкций, полученные для целевых уровней надежности при установленных значениях изменчивости базисных переменных.

Полученные результаты могут быть применены при разработке положений нормативных документов, касающихся обеспечения надежности конструкций, а также позволяют выполнять вероятностные расчеты стальных конструкций. Подтверждена необходимость проведения дальнейших систематических исследований изменчивости базисных переменных и формирования единых принципов их назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тур, В.В. Калибровка значений частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. Часть 1 / В.В. Тур, В.В. Надольский // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2016. – №4(66). – С. 73-84.
2. EN 1990 Eurocode: Basis of structural design – Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
3. Holicky, M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow loads / M.Holicky // Engineering Sciences. – 2007. – №58. – P. 51–57
4. Sýkora, M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load / M. Sýkora, M.Holicky // In Li, J. - Zhao, Y.-G. - Chen, J. (eds.) Reliability Engineering - Proceedings of the International Workshop on Reliability

Engineering and Risk Management IWRERM 2008, Shanghai, 21 - 23 August 2008. Shanghai: Tongji University Press. –2009. – P. 183-188.

5. Sadvoský, Z. Collection and analysis of climatic measurements for the assessment of snow loads on structures / Z. Sadvoský, P. Faško, J. Pecho, O. Bochniček, K. Mikulová, P. Šťastný // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. -2007. – Vol. 14, № 6. – P. 118-126.

6. Sadvoský, Z. Climatic loads and reliability of light roof industrial buildings. Safety and Reliability for Managing Risk – Guedes Soares & Zio (eds) 2006 Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-41620-5

7. SNiP 2.01.07-85 Nagruzki i vozdeystviya [Construction Norms and Rules SNiP 2.01.07-85. Loads and actions]. Moscow, Ministry of Regional Development, 1985.

8. Sykora, M. Comparison of the reliability levels provided by Eurocodes and standards of the Russian Federation / M. Sykora, M. Holicky, V. Nadolski // In R.D.J.M. Steenbergen, P. H. A. J. M. van Gelder, S. Miraglia, A. C. W. M. Vrouwenvelder (eds.) Proceedings of the European Safety and Reliability Conference ESREL 2013, Amsterdam, 29 September – 2 October 2013. Leiden: Balkema/CRC Press, ISBN 978-1-138-00123-7. – 2014. – P. 2637-2644.

Тур Виктор Владимирович

Брестский государственный технический университет, Республика Беларусь, г. Брест

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии бетона и строительных материалов»,

E-mail: vytur@bstu.by.

Надольский Виталий Валерьевич

Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, г. Минск

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлические и деревянные конструкции»

E-mail: Nadolskiv@mail.ru

V. TUR, V. NADOLSKI

THE PARTIAL FACTOR VALUES CALIBRATION FOR THE ULTIMATE LIMIT STATE CHECKING OF STEEL STRUCTURES FOR THE CONDITIONS REPUBLIC OF BELARUS. PART 2

The aim of the study is to determine science-based values of the partial factors for design of steel structures, taking into account the specified values of reliability levels. The object of the study is steel structural elements. Methods: mathematical modeling, numerical and analytical methods, parametric and graphic analysis. According to the reliability concept of building structures adopted in the standard ISO 2394, EN 1990, in the Republic of Belarus the target reliability levels for designed structures are set. It caused a necessity to calibrate the partial factors of steel structures based on the target reliability level using probabilistic methods. The article consists of two parts. The first part is devoted to the justification of the probabilistic models of basic variables included in the function of the limit state of the steel members. The second part reflects the results of the calibration of partial factors ensuring the achievement of the target reliability level.

Keywords: *reliability, steel structure, function of the state, the probability model, a probabilistic calculation, the reference period, model uncertainty, failure, calibration, reliability index, basic variable.*

BIBLIOGRAPHY

1. Tur, V.V. Kalibrovka znacheniy chastnykh koeffitsiyentov dlya proverok predel'nykh sostoyaniy nesu-shchey sposobnosti stal'nykh konstruksiy dlya usloviy Respubliki Belarus'. Chast' 1 / V.V. Tur, V.V. Nadol'skiy// Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2016. – №4(66). – S. 73-84.

2. EN 1990 Eurocode: Basis of structural design – Brussels: European Committee for Standardization, 2002.

3. Holicky, M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow loads / M.Holicky // Engineering Sciences. – 2007. –№58. –P. 51–57

4. Sykora, M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load /M. Sykora, M.Holicky // In Li, J. - Zhao, Y.-G. - Chen, J. (eds.) Reliability Engineering - Proceedings of the International Workshop on Reliability Engineering and Risk Management IWRERM 2008, Shanghai, 21 - 23 August 2008. Shanghai: Tongji University Press. –2009. – P. 183-188.

5. Sadovský, Z. Collection and analysis of climatic measurements for the assessment of snow loads on structures / Z. Sadovský, P. Faško, J. Pecho, O. Bochníček, K. Mikulová, P. Šťastný // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. -2007. – Vol. 14, № 6. – P. 118-126.
6. Sadovský, Z. Climatic loads and reliability of light roof industrial buildings. Safety and Reliability for Managing Risk – Guedes Soares & Zio (eds) 2006 Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-41620-5
7. SNiP 2.01.07-85 Nagruzki i vozdejstviya [Construction Norms and Rules SNiP 2.01.07-85. Loads and actions]. Moscow, Ministry of Regional Development, 1985.
8. Sykora, M. Comparison of the reliability levels provided by Eurocodes and standards of the Russian Federation / M. Sykora, M. Holicky, V. Nadolski // In R.D.J.M. Steenbergen, P. H. A. J. M. van Gelder, S. Miraglia, A. C. W. M. Vrouwenvelder (eds.) Proceedings of the European Safety and Reliability Conference ESREL 2013, Amsterdam, 29 September – 2 October 2013. Leiden: Balkema/CRC Press, ISBN 978-1-138-00123-7. – 2014. – P. 2637–2644.

V. Tur

Brest State Technical University, Republic of Belarus, Brest

Doctor of Technical Sciences, professor, Head of the Department "Technology of concrete and building materials"

E-mail: vvtur@bstu.by.

V. Nadolski

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

Candidate of Technical Sciences, associated professor, Department of "Metal and Timber Structures"

Nadolskivv@mail.ru