

*В.В. Тур, д.т.н., профессор  
Брестский государственный технический университет, Брест  
В.В. Надольский, аспирант, ст. преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, Минск*

## **ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ НАДЕЖНОСТИ, ПРИНЯТОЙ В ЕВРОКОДАХ**

*Определены значения частных коэффициентов для обеспечения заданного уровня проектной надежности строительных конструкций при доминирующем воздействии снеговой нагрузки. Доказано, что использование полученных калибровкой значений частных коэффициентов приводит к обеспеченности расчетного значения снеговой нагрузки, близкой к обеспеченности чрезвычайных (особых) воздействий. Данная ситуация особенно ярко проявилась для стальных конструкций, но методологические неточности прослеживаются для конструкций, изготовленных из других материалов.*

**Ключевые слова:** *частный коэффициент, надежность, базисная переменная.*

*В.В. Тур, д.т.н., профессор  
Брестський державний технічний університет, Брест  
В.В. Надольський, аспірант, ст. викладач  
Білоруський національний технічний університет, Мінськ*

## **ПРОБЛЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТКОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКОВИХ МОДЕЛЕЙ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ В РАМКАХ КОНЦЕПЦІЇ НАДІЙНОСТІ, ПРИЙНЯТІЙ В ЄВРОКОДАХ**

*Визначено значення часткових коефіцієнтів для забезпечення заданого рівня проектної надійності будівельних конструкцій при домінуючому впливі снігового навантаження. Доведено, що використання часткових коефіцієнтів призводить до забезпеченості розрахункового значення снігового навантаження близького до забезпеченості надзвичайних (особливих) впливів. Така ситуація особливо яскраво проявилась для сталевих конструкцій, проте методологічні неточності мають місце також і для конструкцій, виготовлених із інших матеріалів.*

**Ключеві слова:** *частковий коефіцієнт, надійність, базисна змінна.*

*V. Tur, ScD, Professor  
Brest State Technical University, Brest  
V. Nadolski, post-graduate, senior lecturer  
Belarusian National Technical University, Minsk*

## **THE PROBLEM OF DETERMINATION OF PARTIAL FACTORS FOR DESIGN MODELS OF STEEL STRUCTURES WITHIN RELIABILITY CONCEPT ADOPTED IN THE EUROCODES**

*Values of the partial factors for a target reliability level of building structures with dominant snow loads are determinate. The analysis showed that the use of the obtained value of the partial factors leads to probability of exceeding the design values more than for accident load. This situation is problematic for steel structures, but methodological errors can be traced to structures made from other materials.*

**Keywords:** *partial factor, reliability, basic variable.*

**Вступление.** Согласно концепции надёжности строительных конструкций, принятой в EN 1990, при проектировании конструктивных элементов следует обеспечивать нормируемые целевые показатели надёжности. В EN 1990 представлены целевые значения показателей надёжности для различных классов надёжности зданий и видов предельных состояний. При расчетах по предельным состояниям несущей способности для конструктивных элементов среднего класса надёжности целевое значение индекса надёжности принято равным 3.8 для 50-летнего периода.

Регламентированные значения уровней проектной надёжности позволяют в рамках теории надёжности посредством вероятностных методов определить значения частичных коэффициентов.

**Обзор последних источников исследований и публикаций.** В современных нормативных документах Европейского Союза, США, Канады и других стран частичные коэффициенты приняты с обоснованием вероятностными методами. В канадских нормах вероятностно подкрепленные частичные коэффициенты были приняты в 1974 г. на основании работ D.E. Allen и D.J.L. Kennedy. В американских нормах проектирования стальных конструкций они появились в 1986 г. на основании работ M. Ravindra, T.V. Galambos, B. Ellingwood, G. MacGregor, A. Cornell. В нормах Австралии метод предельных состояний был введен в 1975 г., но фактически он стал использоваться только с 1986 г. с обоснованием вероятностными методами частичных коэффициентов. При введении Еврокодов многие страны (в том числе Беларусь) принимали рекомендуемые (очень усредненные) значения частичных коэффициентов. В одних случаях они приводят к неэкономичным, а в других – к небезопасным решениям. Результаты определения значений частичных коэффициентов для расчетных моделей железобетонных конструкций для территории Республики Беларусь представлены в работах В.В. Тура и Д.М. Марковского [1].

#### **Выделение не решенных ранее частей общей проблемы.**

На первом этапе введения Еврокодов в практику проектирования стальных конструкций на территории Республики Беларусь значения частичных коэффициентов были частично приняты равными рекомендуемым Еврокодам, частично согласно СНиП, а ряд коэффициентов – по результатам калибровки применительно к железобетонным конструкциям. Система частичных коэффициентов представляет собой один из инструментов регулирования и обеспечения проектной надёжности, поэтому обоснование частичных коэффициентов для стальных конструкций с учетом национальных особенностей республики, исходя из целевого уровня надёжности, является задачей актуальной и необходимой.

**Задачей** настоящего исследования является освещение проблем, возникающих в связи с калибровкой численных значений частичных коэффициентов, применительно к расчетным моделям стальных конструкций в рамках концепции надёжности, принятой в Еврокодах.

**Основной материал и результаты.** В данной работе рассмотрены только проверки предельных состояний несущей способности сечений стальных элементов («по прочности») в соответствии с моделью сопротивления, принятой в нормах EN 1993-1-1 [2]. Для рассматриваемого предельного состояния функция состояния  $g(X)$  принята в следующем виде:

$$g(X) = K_R \cdot z \cdot f_y - K_E \cdot [G + C_S \cdot S(t)], \quad (1)$$

где  $K_R$ ,  $K_E$  – случайные переменные, характеризующие соответственно ошибки расчетных моделей сопротивления и эффектов воздействий;  $z$  – геометрическая характеристика поперечного сечения элемента (площадь, момент сопротивления);  $f_y$  – случайная переменная, характеризующая прочность материала (предел текучести стали);

$G$  – случайная переменная, характеризующая постоянное воздействие;  $S(t)$  – случайная переменная, характеризующая снеговую нагрузку;  $C_s$  – переменная, характеризующая погрешность модели снеговой нагрузки (упрощенное описание распределения нагрузки на поверхности покрытия и т.д.).

Наличие вероятностных моделей этих переменных позволяет выполнять вероятностный расчет строительных конструкций и определить численные значения проектной надежности (безопасности) строительных конструкций. Вероятностные модели базисных переменных приняты в соответствии с общими рекомендациями JCSS [3], а для снеговой нагрузки модель разработана с учетом актуальных исследований для территории Республики Беларусь [4]; для прочностных характеристик стали учтены территориальные особенности поставки проката в республику [5].

Все вероятностные модели, используемые для расчетов, приведены в таблице 1. Базовый период повторяемости (отнесения) принят равным 50 лет.

**Таблица 1. Вероятностные модели базисных переменных**

Переменная	Распред.	$\mu_X / X_k$	$V_X$
Постоянная нагрузка	Нормальное	1,00	0,10
Ошибка модели снеговой нагрузки	Логнорм.	1,00	0,15
Снеговая нагрузка	Гумбеля	0,9 – 1,1	0,19 – 0,23
Предел текучести	Логнорм.	1,15	0,07
Ошибка модели сопротивления обобщенного стального элемента	Логнорм.	1,00	0,05
Ошибка модели эффекта воздействия	Логнорм.	1,00	0,10

Основываясь на актуальных значениях коэффициентов чувствительности, полученных на основании метода теории надежности 1-го порядка (FORM), можно получить значения частных коэффициентов для каждой базисной переменной, необходимые для обеспечения требуемого уровня надежности, используя зависимости

$$\gamma_{Ri} = r_{k,i} / F_{Ri}^{-1}[\Phi(-\alpha_{Ri} \times \beta_i)]; \quad \gamma_{Ei} = F_{Ei}^{-1}[\Phi(-\alpha_{Ei} \times \beta_i)] / e_{k,i}, \quad (2)$$

где  $F^{-1}(\cdot)$  – обратная функция распределения;  $r_{k,i}$  – характеристическое значение переменных, входящих в модель сопротивления;  $e_{k,i}$  – характеристическое значение переменных, входящих в модель эффекта воздействия (усилия);  $\alpha_i$  – коэффициенты чувствительности, полученные с использованием метода FORM;  $\beta_i$  – целевое значение индекса надежности, для периода отнесения 50 лет равен 3,8.

Требуемые значения частных коэффициентов для сопротивления, постоянной и снеговой нагрузки можно получить из следующих выражений:

$$\gamma_{Mo} = \gamma_{Rd} \times \gamma_m; \quad \gamma_G = \gamma_{sd} \times \gamma_g; \quad \gamma_Q = \gamma_{sd} \times \gamma_\mu \times \gamma_q, \quad (3)$$

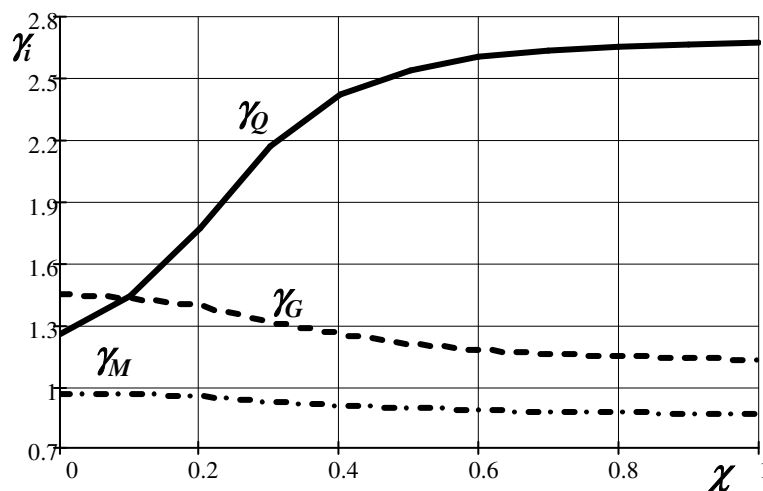
где  $\gamma_{Rd}$  – частный коэффициент, учитывающий погрешность модели сопротивления;  $\gamma_{sd}$  – частный коэффициент, учитывающий погрешность (неопределенность) модели эффектов воздействий;  $\gamma_m$  – частный коэффициент для свойства материала (предела текучести), учитывающий возможность неблагоприятных отклонений свойства материала от его характеристического значения;  $\gamma_g, \gamma_q$  – частные коэффициенты соответственно для постоянной и снеговой нагрузки, учитывающие возможность нежелательного отклонения величины воздействия от репрезентативного значения;  $\gamma_\mu$  – частный коэффициент, учитывающий погрешность модели снеговой нагрузки, т.е. возможность неблагоприятных отклонений для коэффициента формы снеговой нагрузки.

Для анализа различных соотношений постоянной и снеговой нагрузок использован безразмерный параметр нагружения  $\chi$ . Параметр нагружения  $\chi$  представляет собой долю снеговой нагрузки в полном значении воздействия:

$$\chi = S_k / (G_k + S_k). \quad (4)$$

Анализ реальных объектов показывает, что наиболее вероятный интервал значения параметра нагружения  $\chi$  для стальных конструкций при воздействии снеговой нагрузки составляет 0,4...0,7.

На рисунке представлены требуемые значения частичных коэффициентов, необходимые для достижения индекса надежности  $\beta_t = 3,8$ . По оси ординат отложены значения частичных коэффициентов  $\gamma_i$ , а по оси абсцисс – параметр нагружения  $\chi$ . На рисунке 1 отображены средние значения частичных коэффициентов.



**Рис. 1. Требуемые значения частичных коэффициентов для обеспечения индекса надежности  $\beta_t = 3,8$  при расчетах стальных конструкций**

Полученные значения частичных коэффициентов согласуются с результатами, полученными в работах М. Holicky, М. Sykora [6] для территории Чешской республики, в работах Z. Sadovsky [7] для территории Германии и Словакии, а отчасти также с результатами, представленными в справочной документации (комментариям) [8] к EN 1990. Для этих стран характер снеговых нагрузок схож с условиями Республики Беларусь.

**Выводы.** Полученные значения частичных коэффициентов значительно превышают применяемые в настоящее время в отечественной и мировой практики нормирования переменных воздействий.

Используя функцию распределения базисной переменной можно определить обеспеченность её расчетного значения. Результаты расчетов показывают, что вероятность превышения расчетных значений переменных воздействий составила в среднем 10-5. Такая вероятность возможна только при нормировании редких природных и климатических явлений (например, сейсмические воздействия) или чрезвычайного (особого) значения воздействия и неприемлема для расчётных значений переменных воздействий для постоянных расчетных ситуаций. К сведению, согласно рекомендациям Еврокода 1-1-3 «Общие воздействия. Снеговые нагрузки» значение коэффициента перехода к чрезвычайному значению снеговой нагрузки равно 2 (данный коэффициент уже учитывает погрешности модели снеговой нагрузки и модели эффектов воздействия).

Прогнозирование возможных значений случайных величин с такой малой вероятностью приобретает весьма сомнительный смысл: длина экстраполяции аппроксимирующей функции противоречит математическим принципам; существенная изменчивость конечного результата от принятых предпосылок; нестабильность получаемых результатов.

Описанная ситуация особенно ярко проявилась для стальных конструкций, но методологические неточности прослеживаются для конструкций, изготовленных из других материалов. Очевидно, что при предпосылках, заложенных в Еврокодах, невозможно получить разумные и научно обоснованные значения частичных коэффициентов. Выходом из этой ситуации является пересмотр численных значений параметров надежности либо несколько иной подход к обеспечению проектной надежности.

Введение европейских норм, осуществляемое в настоящее время в некоторых странах СНГ, требует внимательного теоретического анализа и апробации, в частности в тех случаях, когда при проверках предельных состояний основной вклад в изменчивость модели сопротивления вносят климатические воздействия.

### *Литература*

1. Тур В.В. Калибровка значений коэффициентов сочетаний для воздействий при расчетах железобетонных конструкций в постоянных и особых расчетных ситуациях / В.В. Тур, Д.М. Марковский // *Строительная наука и техника*. – 2009. – № 2 (23). – С. 32–48.
2. ТКП EN 1993-1-1. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2009.
3. JCSS Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.jcss.ethz.ch>. – Date of access: 15.01.2012.
4. Нормирование снеговых нагрузок для территории Республики Беларусь / В.В. Тур, В.Е. Валугев, С.С. Дереченник, О.П. Мешик, И.С. Воскобойников // *Строительная наука и техника*. – 2008. – № 2. – С. 27–45.
5. Мартынов Ю.С. Статистические параметры базисных переменных, входящих в модели сопротивления стального элемента / Ю.С. Мартынов, В.В. Надольский // *Архитектура и строительные науки*. – 2014. – № 1, 2(18, 19). – С. 39–41.
6. Sýkora M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load. / M. Sýkora, M. Holický, Li In, 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.
7. 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*. – Vol. 14, Issue 06. – 2007.
8. CEN/TC250. Background Document EC1:Part1: Basis of Design. – 2nd draft. – ECCS, 1996.

Надійшла до редакції 17.12.2014

© В.В. Тур, В.В. Надольський