

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА. УНИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 693

В.В. Надольский, М. Голицки*, М. Сикора*, В.В. Тур**

*БНТУ, *Чешский технический университет в Праге,
Институт Клокнера, **БрГТУ*

СОПОСТАВЛЕНИЕ УРОВНЕЙ НАДЕЖНОСТИ, ОБЕСПЕЧИВАЕМЫХ НОРМАМИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И ЕВРОСОЮЗА¹

Представлены результаты сопоставления уровней проектной надежности стальных конструкций, запроектированных в соответствии с нормами Российской Федерации и Евросоюза. Проанализированы детерминированные расчеты по нормам Российской Федерации и Евросоюза для обобщенного стального элемента с точки зрения сопротивления элемента и расчетных эффектов воздействий (внутренних усилий). Сопоставлены системы частных коэффициентов и коэффициентов сочетаний. Показаны различия в правилах составления расчетных сочетаний нагрузок и воздействий. Приведены к сопоставимому виду параметры моделей сопротивления и эффектов воздействий. Представлены вероятностные модели базисных переменных. Для анализа надежности в качестве переменных нагрузок рассмотрены снеговая и полезная нагрузки.

Ключевые слова: Еврокод, частный коэффициент, вероятностный анализ, уровень надежности, надежность конструкции, переменное воздействие.

Вопрос сравнения европейской системы норм (Еврокоды) и нормативных документов Российской Федерации (СП) по расчету строительных конструкций представляет большой интерес в связи с современным процессом гармонизации норм проектирования. Сравнение базовых расчетных положений и уровня надежности, обеспечиваемого этими документами, позволит судить о возможности внедрения Еврокодов на территории России. Данные, полученные из таких исследований и практического опыта применения Еврокодов полезны для разработки национальных приложений, а также для улучшения и согласования норм проектирования (Еврокодов, СП).

Ответ на этот вопрос требует достаточно обширных и комплексных исследований. Можно выделить основные подпункты этого исследования, в общем случае справедливые и для сравнения между собой других норм:

1) изучение базовых положений проектирования, заложенных в систему нормативных документов (таких как правила сочетания нагрузок, система частных коэффициентов);

¹ Исследование выполнено в рамках программы CZ/11/LLP-LdV/TOI/134005 «Профессиональное образование в области оценки существующих конструкций» (Vocational Training in Assessment of Existing Structures), при поддержке Европейской комиссии (программы Леонардо да Винчи). Статья отражает только точку зрения авторов и Европейская комиссия не несет ответственность за любое использование информации, содержащейся в статье. Также были использованы результаты проекта LG11043.

- 2) сопоставление основных положений по определению параметров, характеризующих эффекты воздействий и сопротивление;
- 3) анализ отдельных расчетных положений и проверочных формул.

В статье основной упор сделан на сопоставление параметров моделей сопротивления и эффектов воздействий (внутренних усилий) для обобщенного стального элемента. Исследована надежность стальных элементов с использованием вероятностных методов. Следует отметить, что сравнение отдельных расчетных положений и проверочных формул требует дополнительных исследований. В статье выполнена оценка уровня надежности конструкций с применением методов теории надежности первого порядка.

2. Детерминированный расчет

В основу Еврокодов и СП положен метод предельных состояний с использованием системы частных коэффициентов. Общая формулировка проверки предельного состояния несущей способности стального элемента по EN 1993-1-1 [1] и СП 16.13330 [2] имеет схожий характер (табл. 1).

Табл. 1 Проверки предельных состояний несущей способности (по прочности и устойчивости) конструктивного элемента

Проверка по прочности	Проверка по устойчивости
$E_d \leq z f_y / \gamma_{M0}$	$E_d \leq z \chi f_y / \gamma_{M1}$
$\gamma_n C_m / z \leq \gamma_c R_y = \gamma_c R_{ym} / \gamma_m$	$\gamma_n C_m / (j z) \leq \gamma_c R_y$

Примечание. E_d — расчетный эффект воздействия (внутренне усилие); C_m — нагрузка для основного сочетания [3]; z — геометрическая характеристика поперечного сечения элемента (площадь, момент сопротивления); χ и ϕ — понижающие коэффициенты для соответствующей формы потери устойчивости; f_y — характеристическое значение предела текучести стали; R_y — расчетное значение предела текучести; R_{ym} — нормативное значение предела текучести; γ_{M0} — частный коэффициент для проверки предельного состояния по прочности; γ_{M1} — частный коэффициент для проверки предельного состояния по устойчивости; γ_c — коэффициент условий работы; γ_n — коэффициент надежности по ответственности здания.

2.1. Сопоставление параметров, характеризующих сопротивление элемента. Существуют некоторые отличия в определении характеристик поперечного сечения (при учете пластической стадии работы материала и при учете эффектов потери местной устойчивости), а также в определении коэффициентов χ и ϕ , поэтому сопоставление этих величин требует отдельного изучения и в данной работе не рассматриваются.

В соответствии с EN 1990 [4] характеристическое значение предела текучести стали f_y назначается с обеспеченностью не ниже 0,95, что соответствует определению нормативного значения предела текучести R_{ym} по ГОСТ 27772 [5]. Согласно [2] расчетное значение предела текучести R_y определяется делением нормативного значения R_{ym} на коэффициент надежности по материалу γ_m . Значение частного коэффициента γ_m принимается в зависимости от государственного стандарта или технических условий на прокат. Для упрощения примем γ_m равным 1,025, как для проката по ГОСТ 27772 [5].

Частные коэффициенты γ_{M0} и γ_{M1} относятся ко всей правой части неравенства (сопротивление) для проверок предельных состояний несущей способ-

ности по прочности и устойчивости, соответственно. Эти коэффициенты учитывают неопределенности базисных переменных, входящих в модель сопротивления (такие как неблагоприятные отклонения свойств материалов от его характеристического значения, погрешности модели сопротивления и ряд других). Примем рекомендуемые значения этих коэффициентов согласно $\gamma_{M0} = 1$; $\gamma_{M1} = 1$ [1].

В [2] используется коэффициент условий работы γ_c для учета особенностей действительной работы стали, элементов конструкций и их соединений, имеющие систематический характер, но не отражаемые непосредственно в расчетах [6]. Для упрощения примем $\gamma_c = 1$.

2.2. Сопоставление правил сочетания нагрузок. Согласно EN 1990 [4] и СП 20.13330 [3] расчетное значения эффекта воздействия определяется для наиболее неблагоприятного сочетания нагрузок. Для дальнейшего сопоставления рассмотрены правила составления сочетаний нагрузок в постоянных расчетных ситуациях для случая, когда действуют постоянная G , доминирующая Q_1 и сопутствующая Q_2 переменные нагрузки. В качестве переменных нагрузок рассмотрены полезная и снеговая нагрузки. Как правило, конструкции подверженные воздействию снеговой нагрузки обладают меньшей надежностью, чем конструкции под воздействием ветра [7]. А также сопоставление ветровых воздействий в общем виде очень громоздко и требует отдельного изучения.

Сочетания нагрузок согласно EN 1990. В EN 1990 [4] для сочетания эффектов воздействий предложены альтернативные схемы, обозначенные далее как Схема А и Схема Б. Для сочетания эффектов воздействий предполагается линейное поведение конструктивного элемента.

Используя формулу (6.10) [4] расчетное значение эффекта воздействий E_d при сочетании постоянной и двух переменных нагрузок можно записать в следующем виде (Схема А):

$$E_d = \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \gamma_{Q,2} \Psi_{0,2} Q_{k,2}. \quad (1)$$

В [4] предложена альтернативная схема сочетания с использованием двух выражений (6.10а) и (6.10б), переписав данные выражения для принятых условий, получим следующие формулы (Схема Б):

$$E_d = \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \Psi_{0,1} Q_{k,1} + \gamma_{Q,2} \Psi_{0,2} Q_{k,2}; \quad (2)$$

$$E_d = \xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \gamma_{Q,2} \Psi_{0,2} Q_{k,2}. \quad (3)$$

Менее благоприятное значение эффекта воздействий, полученное из выражения (2) и (3) принимается для дальнейших расчетов.

Символы G_k , Q_k обозначают характеристические значения постоянной и переменной нагрузок, назначенные по [4]. Частные коэффициенты γ_G и ξ принимаются равными 1,35 и 0,85 соответственно. Частные коэффициенты для переменных нагрузок $\gamma_{Q,i}$ равны 1,5. Коэффициент сочетаний ψ_0 для снеговой и полезной нагрузки по [4] принимается соответственно равными 0,5 и 0,7.

В соответствии с EN 1990 [4] допускается использовать Схему Б с упрощением выражения (2), рассматривая только постоянную нагрузку, и далее по аналогии со Схемой Б выбирается менее благоприятное усилие из двух выражений. В статье не рассматривается данная схема сочетания усилий, так как она обеспечивает меньший уровень надежности, чем Схемы А и Б [8, 9], и используется только в нескольких странах.

Сочетания нагрузок согласно СП 20.13330. Рассмотрим основное сочетание нагрузок согласно п. 6.2 [3] для определения расчетного значения результирующего усилия. В статье не рассматриваются длительные эффекты, в этом случае для полезной и снеговой нагрузки приняты только кратковременные значения. Запишем основное сочетание нагрузок в обозначениях аналогичных EN 1990 [4] для принятых условий (Схема В):

$$C_m = \gamma_G^* G_k^* + \gamma_{Q,1}^* \psi_{t,1} Q_{k,1}^* + \gamma_{Q,2}^* \psi_{t,2} Q_{k,2}^* \quad (4)$$

Символы G_k^* , Q_k^* обозначают нормативные значения постоянной и переменных нагрузок. Коэффициент надежности γ_G^* для постоянной нагрузки зависит от составляющих компонентов этой нагрузки. Примем усреднено $\gamma_G^* = 1,2$. Коэффициент надежности для переменной нагрузки назначается в зависимости от ее вида. Коэффициент надежности для снеговой нагрузки принимается равным 1,4 [3]. Коэффициент надежности для полезной нагрузки принимается равным: 1,3 при полном нормативном значении менее 2,0 кПа; 1,2 при полном нормативном значении 2,0 кПа и более. Коэффициенты сочетания для доминирующей $\psi_{t,1} = 1$ и сопутствующей $\psi_{t,2} = 0,9$ нагрузок приняты согласно [3].

Отличия в классификации нагрузок и в способах назначения нормативных значений отражены в п. 2.4.

2.3. Дифференциация уровней надежности. В соответствии с [4], для дифференциации уровней надежности, как один из вариантов предложено применение скорректированных частных коэффициентов по нагрузке γ_{F^*} используемых в базовых сочетаниях для постоянной расчетной ситуации. Корректировку производят, вводя множитель k_{F1} для неблагоприятных воздействий. Согласно ГОСТ Р 54257 [10] для учета ответственности зданий и сооружений (социальных, экономических и экологических последствий наступления предельного состояния) используется коэффициент надежности по ответственности γ_n . Учитывая сходства в определении классов надежности по [4] и классов ответственности по ГОСТ Р 54257 [10], примем для расчета соответственно $k_{F1} = 1$ (RC2) и $\gamma_n = 1$ (Класс 2).

2.4. Сопоставление параметров, характеризующих эффект воздействия

Постоянная нагрузка. Определение характеристического [11] и нормативного [3] значений постоянной нагрузки носит одинаковый характер, поэтому $G_k = G_k^*$.

Снеговая нагрузка. В данном пункте выполнено сопоставление снеговой нагрузки (определения соотношения между снеговой нагрузкой), вычисленной согласно [12] и [3] для наиболее распространенных случаев применения металлических конструкций. Отметим, что существуют различия не только в коэффициентах, но и в схемах распределения снеговой нагрузки.

Согласно [12] характеристическое значение снеговой нагрузки на покрытие определяются по формуле

$$S_k = s = \mu_i C_e C_t S_k^* \quad (5)$$

где μ_i — коэффициент формы снеговых нагрузок; C_e — коэффициент окружающей среды; C_t — температурный коэффициент; S_k^* — характеристическое значение снеговой нагрузок на грунт.

Нормативное значение снеговой нагрузки на покрытие согласно [3] определяется по формуле

$$S_k^* = S_0 = 0,7c_e c_i \mu S_g, \quad (6)$$

где μ — коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие; c_e — коэффициент, учитывающий снос снега с покрытий зданий под действием ветра или иных факторов; c_i — термический коэффициент; S_g — вес снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли.

Коэффициенты μ , c_e и c_i [12] имеют одинаковый физический смысл с коэффициентами μ , c_e и c_i [3]. Для некоторых частных случаев значения этих коэффициентов отличаются. Коэффициенты $C_e(c_e)$ и $C_i(c_i)$ приняты равными единице. Значения коэффициентов $\mu_i = 0,8$ [12] и $\mu = 1$ [3] приняты для здания с односкатным покрытием с уклоном менее 30°.

Подставим значения коэффициентов формулы (5) и (6) и получим соотношение нормативных и характеристических значений снеговых нагрузок на покрытие:

$$S_k^* / S_k = 0,7S_g / 0,8S_k = 0,88S_g / S_k. \quad (7)$$

Согласно [4, 12] в качестве характеристического значения снеговой нагрузки S_k принято значение, превышаемое в среднем один раз в 50 лет или с годовой вероятностью превышения 0,02. Согласно п. 10.2 [3] значение S_g следует принимать как превышаемый в среднем один раз в 25 лет ежегодный максимум веса снегового покрова. Приняв двойной экспоненциальный закон распределения Гумбеля для ежегодных максимумов веса снегового покрова можно выразить значение снеговой нагрузки через среднее значение $\mu_{S,1}$ и коэффициент вариации $V_{S,1}$ годовых максимумов:

$$S_k = S_{0,02} = \mu_{S,1} \{1 - [0,45 + 0,78 \ln(-\ln(1 - 0,02))] V_{S,1}\}; \quad (8)$$

$$S_g = S_{0,04} = \mu_{S,1} \{1 - [0,45 + 0,78 \ln(-\ln(1 - 0,04))] V_{S,1}\}. \quad (9)$$

Для обширной территории Российской Федерации коэффициент вариации годовых максимумов веса снегового покрова на поверхности земли может принимать значения от 0,3 до 0,5 в районах со стабильным снежным покровом от 0,7 до 1,0 в районах с неустойчивым снежным покровом [13, 14]. По данным [6] коэффициент вариации для снеговой нагрузки при использовании вероятностных методов расчета может быть принят от 0,3 до 0,45, соответственно для снеговых районов от V до I. Для общего анализа рассмотрим значения коэффициента вариации, равные 0,3, 0,5 и 0,7. Тогда отношение S_k^* / S_k снеговых нагрузок на покрытие составляет 0,79, 0,77 и 0,76 соответственно для коэффициентов вариации 0,3, 0,5 и 0,7.

Полезная нагрузка. Анализ нормативных значений полезной нагрузки [3, 11] показал, что для большинства случаев отношение Q_k^* / Q_k изменяется в диапазоне от 0,7 до 1.

Различия в определении нормативных значений и частных коэффициентов по табл. 8.3 [3] и 6.2 [11] в соответствии с СП и Еврокодами приведены в табл. 2.

Табл. 2. Сравнение нормативных значений и частных коэффициентов

Параметры	Нормативные значения	Частные коэффициенты	
		Еврокоды	СП
Постоянная нагрузка	$G_k^*/G_k = 1$	$\gamma_G = 1,35; \xi = 0,85$	$\gamma_G^* = 1,2$
Полезная нагрузка	$Q_k^*/Q_k = 0,7...1$	$\gamma_Q = 1,5; \psi_{0,Q} = 0,7$	$\gamma_Q^* = 1,3$ или $1,2;$ $\psi_{t,1} = 1$ или $\psi_{t,2} = 0,9$
Снеговая нагрузка	$S_k^*/S_k = 0,77$ $0,79$ $0,76$	$\gamma_S = 1,5; \psi_{0,S} = 0,5$	$\gamma_S^* = 1,4;$ $\psi_{t,1} = 1$ или $\psi_{t,2} = 0,9$
Предел текучести	$R_{yn}/f_y = 1$	$\gamma_{Mo} = 1$	$\gamma_c = 1; \gamma_m = 1,025$
Дифференциация надежности	—	$k_{FI} = 1$	$\gamma_n = 1$

3. Анализ надежности

3.1. Функция состояния. Для рассматриваемого предельного состояния (проверки предельного состояния несущей способности по прочности) функция состояния $g(X)$, характеризующая запас прочности конструктивного элемента, в общем виде может быть записана как

$$g(X) = K_R z f_y - K_E [G + C_{0,Q1} Q_1(t) + C_{0,Q2} Q_2(t)], \tag{10}$$

где K_R и K_E — случайные переменные, характеризующие, соответственно, ошибки расчетных моделей сопротивления и эффектов воздействий; $C_{0,Qi}$ — зависящая от времени переменная, характеризующая ошибку модели воздействий (полезной и снеговой нагрузок).

Для сочетания переменных во времени нагрузок использовалось правило Turkstra [15]. Базовый период отнесения T принят равным 50 лет. В соответствии с правилом Turkstra следует рассмотреть два сочетания:

1) Q_1 — доминирующая нагрузка, Q_2 — не доминирующая (сопутствующая) нагрузка. Результирующий эффект воздействий

$$E_{\max} = E(Q_{1,\max,T} Q_{2C}); \tag{11}$$

2) Q_2 — доминирующая нагрузка, Q_1 — не доминирующая (сопутствующая) нагрузка. Результирующий эффект воздействий

$$E_{\max} = E(Q_{1C} Q_{2,\max,T}), \tag{12}$$

где $Q_{i,\max,T}$ — максимальное значение i -й нагрузки в течение базового периода времени T ; Q_{iC} — комбинационное значение нагрузки i -й нагрузки равно максимальному значению этой нагрузки, имеющему место в течение периода длительности максимума доминирующей нагрузки.

По правилу Turkstra для наших условий рассмотрены две варианта сочетания эффектов воздействий.

Вариант 1. В качестве доминирующей нагрузки принята полезная нагрузка с функцией распределения для 50-летнего максимума $Q_{1,\max,T} = Q_{50лет}$. Продолжительность 50-летнего максимума полезной нагрузки принята 5 лет [16]. Тогда для снеговой нагрузки комбинационное значение принимается как 5-летний максимум $Q_{2C} = S_{5лет}$.

$$g(X) = K_R z f_y - K_E (G + C_{0Q} Q_{50лет} + C_{0S} S_{5лет}). \tag{13}$$

Вариант 2. В качестве доминирующей нагрузки принята снеговая нагрузка с функцией распределения для 50-летнего максимума $Q_{2, \max, T} = S_{50 \text{ лет}}$. Продолжительность 50-летнего максимума снеговой нагрузки составляет неделю [16]. Поэтому для полезной нагрузки необходимо рассмотреть недельный максимум, но при этом длительная часть полезной нагрузки в среднем изменяется раз в 5 лет [16]. Поэтому наименьший период для распределения максимумов полезной нагрузки может быть принят только 5 лет. Тогда комбинационное значение полезной нагрузки $Q_{1C} = Q_{5 \text{ лет}}$. Функция состояния примет вид

$$g(X) = K_R z f_y - K_E (G + C_{0S} S_{50 \text{ лет}} + C_{0Q} Q_{5 \text{ лет}}). \quad (14)$$

3.2. Вероятностные модели базисных переменных. Важным этапом в определении частных коэффициентов вероятностными методами является определение вероятностных моделей базисных переменных. Это требует наиболее точного и достоверного определения статистических параметров распределения базисных переменных для территории Российской Федерации. Также, в силу различных факторов, изучение моделей базисных переменных должно производиться систематически.

Предел текучести. Примем логнормальный закон распределения со средним $\mu_{f_y} = f_y \exp(1,65 V_{f_y})$ и коэффициентом вариации $V_{f_y} = 0,08$.

Ошибки моделей. Для описания ошибок моделей принято логнормальное распределение [16]. Для ошибки модели сопротивления приняты статистические параметры как для прокатного сечения, подверженного действию изгибающего момента относительно главной оси и раскрепленного от потери устойчивости. При этом среднее значение 1,15 и коэффициент вариации 0,05 приняты по данным, приведенным в справочном документе к Еврокоду 3 [17].

Для моделей эффектов воздействий рассмотрены два вида ошибок. Первый вид ошибки учитывает упрощения, принятые в модели воздействия (к примеру, равномерное распределение полезной и снеговой нагрузки). Эти ошибки учитываются коэффициентами C_{0Q} и C_{0S} (C_{0S} также учитывает неточности в определении коэффициента формы снеговой нагрузки). Статистические параметры этих ошибок приняты из [16, 18].

Второй вид ошибок учитывает неточности в определении эффекта воздействия (внутренних усилий), возникающие из-за идеализации геометрии, упрощений методов определения усилий и т.д. Данная ошибка описывается случайной переменной K_R , статистические параметры которой приняты из [16].

Постоянная нагрузка. Согласно [3, 11] нормативное значение для постоянной нагрузки принимают равным номинальному проектному значению, что соответствует 50 % квантили распределения, т.е. $\mu_G = G_k$. При вероятностных расчетах наиболее часто используемое значение коэффициента вариации равно $V_G = 0,1$, что представляет собой верхнее значение данного коэффициента.

Снеговая нагрузка. Для снеговой нагрузки достаточно точной и наиболее распространенной является вероятностная модель последовательности годовых максимумов снеговой нагрузки. Результаты многочисленных исследований [13, 14] свидетельствуют о возможности описания таких последовательностей двойным экспоненциальным законом распределения (Гумбеля), также данное распределение рекомендовано в международном стандарте ISO 4355 [19].

Статистические параметры распределения Гумбеля для различных периодов можно найти по формулам

$$\mu_{s,T} = \mu_{s,1} [1 + 0,78 \ln(T) V_{s,1}]; \quad (15)$$

$$\sigma_{s,T} = \sigma_{s,1}. \quad (16)$$

Для периода отнесения $T = 50$ лет параметры функции распределения (среднее $\mu_{s,50}$, коэффициентов вариации $V_{s,50} = \sigma_{s,50} / \mu_{s,50}$) при коэффициентах вариации годовичных максимумов снеговой нагрузки $V_{s,1}$, равных 0,3, 0,5 и 0,7, приведены в табл. 3.

Все вероятностные модели, используемые для расчетов, приведены в табл. 3.

Табл. 3. Вероятностные модели базисных переменных

Переменная	Обозн.	Распред.	μ_x	V_x
Постоянная нагрузка	G	Нормальное	G_k	0,10
Полезная нагрузка (5 лет)	Q_{5years}	Гумбеля	$0,2Q_k$	1,10
Полезная нагрузка (50 лет)	$Q_{50years}$	Гумбеля	$0,6Q_k$	0,35
Ошибка модели полезной нагрузки	C_{0Q}	Логнормальное	1,0	0,10
Снеговая нагрузка (1 год)	S_{5years}	Гумбеля, $V_{s,1} = 0,5$	$0,44S_k$	0,50
Снеговая нагрузка (50 лет)	$S_{50years}$	$V_{s,1} = 0,3$	$1,08S_k$	0,16
		Гумбеля, $V_{s,1} = 0,5$	$1,10S_k$	0,20
		$V_{s,1} = 0,7$	$1,11S_k$	0,22
Ошибка модели снеговой нагрузки	C_{0S}	Логнормальное	1,0	0,15
Предел текучести	f_y	Логнормальное	$1,14f_y$	0,08
Ошибка модели сопротивления	K_R	Логнормальное	1,15	0,05
Ошибка модели эффекта воздействия	K_E	Логнормальное	1,0	0,10

Полезная нагрузка. Вероятностная модель полезных нагрузок не имеет строгой зависимости от территориальных особенностей района строительства, поэтому возможно использовать данные в ряде других стран. В большинстве работ [8, 9, 20, 21], связанных с вероятностными расчетами, для вероятностной модели переменных полезных нагрузок используются статистические параметры, опубликованные в нормах JCSS [16], основанные на вероятностных методах расчета. Можно отметить, что эти модели хорошо согласуются с отечественными исследованиями, опубликованными в 1980-х гг. Снарскисом, Райзером, Булычевым и др. [13, 14, 22].

4. Сравнение индексов надежности

Для оценки уровня надежности использовался метод теории надежности 1-го порядка (FORM [4]). Для анализа различных соотношений нагрузок использованы безразмерные параметры нагружения χ и k . Параметр нагружения χ представляет собой долю переменных воздействий в полной величине воздействий

$$\chi = (Q_{k,1} + Q_{k,2}) / (G_k + Q_{k,1} + Q_{k,2}). \quad (17)$$

Параметр нагружения χ может изменяться практически от 0 (подземные конструкции, фундаменты) до 1 (локальные эффекты в подкрановых балках). Но для стальных конструкций наиболее распространенные значения параметра нагружения χ от 0,4 до 0,8 [23].

Параметр нагружения k характеризует соотношение между сопутствующей и доминирующей нагрузкой

$$k = Q_{k,2}/Q_{k,1}. \quad (18)$$

Для сравнения были построены графики зависимости индекса надежности β от параметра нагружения χ для базового периода 50 лет. На рис. 1 приведена зависимость $\beta - \chi$ при действии постоянной и полезной нагрузки (вариант 1, $k = 0$). Для сочетания усилий по Схеме В принято $\gamma_Q^* = 1,2$ (см. п. 2.2) и $Q_k^*/Q_k = 0,7$ и 1.

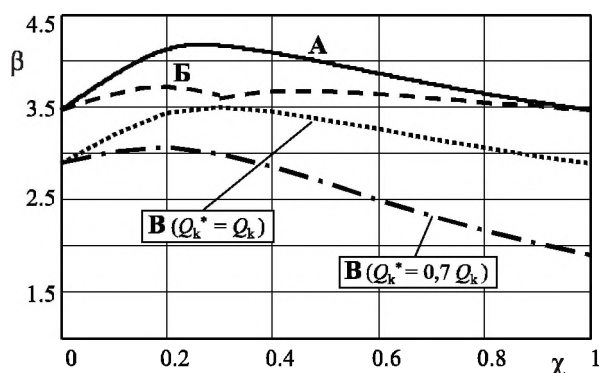


Рис. 1. Зависимость индекса надежности конструкций от параметра нагружения при действии постоянной и полезной нагрузки (вариант 1, $k = 0$)

На рис. 2 приведена зависимость $\beta - \chi$ при действии постоянной и снеговой нагрузки (вариант 2, $k = 0$). Для снеговой нагрузки коэффициент вариации годовых максимумов веса снегового покрова принят равным $V_{s,1} = 0,5$. Дополнительно для сочетания усилий по Схеме В представлены зависимости $\beta - \chi$ при коэффициенте вариации $V_{s,1}$, равном 0,3 и 0,7.

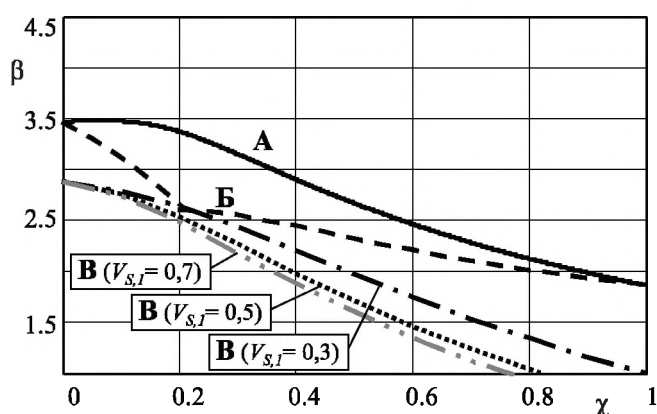


Рис. 2. Зависимость индекса надежности конструкций от параметра нагружения при действии постоянной и снеговой нагрузки (вариант 2, $k = 0$)

На рис. 3 приведен график зависимости $\beta - \chi$ при действии постоянной, полезной и снеговой нагрузки (вариант 1, $k = 0,9$). Отношение снеговой нагрузки к полезной принято 0,9. Для снеговой нагрузки принят коэффициент вариации годовых максимумов веса снегового покрова равным $V_{s,1} = 0,5$. Для сочетания усилий по Схеме В принято $\gamma_Q^* = 1,2$ и 1,3 (см. п. 2.2) и $Q_k^*/Q_k = 1$.

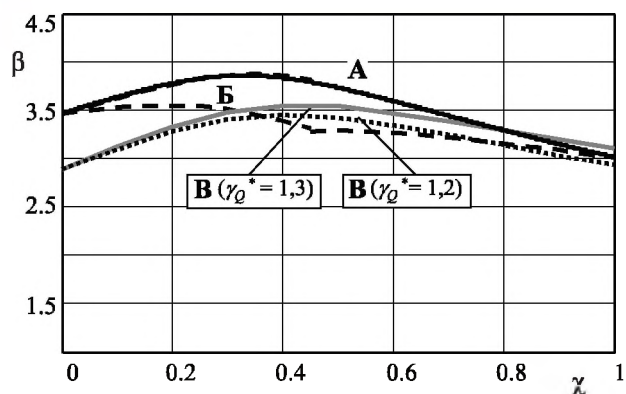


Рис. 3. Зависимость индекса надежности конструкций от параметра нагружения для варианта 3 при $k = 0,9$

Анализ результатов статистического моделирования (см. рис. 1—3) позволил выявить следующие значимые отличия в уровнях надежности по проектированию стальных конструкций по нормам Российской Федерации и Европейского Союза:

надежность конструкций при воздействии снеговой нагрузки, запроектированных согласно СП и Еврокодам, ниже, чем при воздействии полезной нагрузки;

Российская система нормативных документов (СП) по расчету стальных конструкций обеспечивает меньший уровень надежности по сравнению с европейской (Еврокоды). За исключением случаев, когда сочетаются близкие по величине переменные нагрузки;

схемы сочетания нагрузок А и В приводят к подобному изменению индекса надежности в зависимости от параметра нагружения;

при данных вероятностных моделях базисных переменных и принятой системе частных коэффициентов расчеты согласно Еврокодам не обеспечивают требуемый уровень надежности по EN 1990 [4];

в СП не регламентирован требуемый уровень надежности, поэтому невозможно сделать заключение о том, обеспечена или нет требуемая надежность.

Выводы. В российской системе нормативных документов более дифференцированная система частных коэффициентов, которая позволяет учесть в проверках более разнообразные условия.

Российская система нормативных документов по расчету стальных конструкций обеспечивает меньший уровень надежности по сравнению с европейской (Еврокоды). Основной причиной является разная обеспеченность нормативных значений нагрузок и отличия в системе частных коэффициентов.

В российской системе нормативных документов не регламентированы показатели надежности, что не позволяет говорить об обеспечении требуемого уровня надежности. Это усложняет применение вероятностных методов расчета и дальнейшего развития метода частных коэффициентов.

Надежность конструкций при воздействии снеговой нагрузки, запроектированных согласно СП и Еврокодам, существенно ниже, чем при воздействии полезной нагрузки.

Для более точного и достоверного определения уровня надежности (вероятности отказа, индекса надежности) необходимо уточнять вероятностные модели базисных переменных. В частности в первую очередь для предела текущей и переменных нагрузок. Выявление требуемого уровня надежности для отечественных документов с учетом сложившейся практики проектирования. Для получения более общих результатов сравнения надежности необходимо выполнить анализ с учетом ветрового воздействия.

Библиографический список

1. EN 1993-1-1 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings – Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
2. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции (Актуализированная редакция СНиП II-23—81*). М., 2011.
3. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия (Актуализированная редакция СНиП 2.01.07—85). М., 2011.
4. EN 1990 Eurocode: Basis of structural design. / Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
5. ГОСТ 27772—88. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия.
6. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23—81* «Стальные конструкции») / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. 148 с.
7. *Sykora M., Holický M.* Comparison of load combination models for probabilistic calibrations. In Faber M.H., Köhler J., Nishijima K. (eds.), Proceedings of 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering ICASP11, 1-4 August, 2011, ETH Zurich, Switzerland. Leiden (The Netherlands): Taylor & Francis/Balkema, 2011, pp. 977—985.
8. *Holický M. and Retief J.V.* Reliability assessment of alternative Eurocode and South African load combination schemes for structural design, Journal of the South African Institution of Civil Engineering, Vol 47, No 1, 2005, pp. 15—20.
9. *Gulvanessian H. and Holicky M.* Eurocodes: using reliability analysis to combine action effects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings Vol. 158, No. August 2005, Issue SB4, pp. 243—252.
10. ГОСТ Р 54257. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования.
11. EN 1991-1-1 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions. Densities, self-weight, imposed loads for buildings. / Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
12. EN 1991-1-3 Eurocode 1: Actions on structures. Part1-3: General actions. / Snow loads. / Brussels: European Committee for Standardization, 2003.
13. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, В.А. Пашинский, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин ; под общ. ред. А.В. Перельмутера. М. : Изд-во АСВ, 2007. 482 с.
14. *Райзер В.Д.* Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкции. М. : Стройиздат, 1986. 192 с.
15. *Turkstra C.J.* Theory of Structural Design Decisions, SM Studies Series No. 2. Ontario, Canada: Solid Mechanics Division, University of Waterloo. 1970.
16. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001. Режим доступа: <www.jcss.byg.dtu.dk>.

17. Eurocode 3 Editorial Group Background Documentation to Eurocode No. 3 Design of Steel Structures Part 1 – General Rules and Rules for Buildings, Background Document for Chapter 5 of Eurocode 3, Document 5.01, 1989.

18. Holicky, M. & Sykora, M. Conventional probabilistic models for calibration of codes. In M.H. Faber, J. Köhler & K. Nishijima (eds.), Proceedings of 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering ICASP11, 1–4 August, 2011, ETH Zurich, Switzerland. Leiden (The Netherlands): Taylor & Francis/Balkema, 2011. pp. 969–976.

19. ISO 4355:1998. Bases for design of structures - Determination of snow loads on roofs. International Organisation for Standardisation, TC 98/SC 3.

20. Тур В.В., Марковский Д.М. Калибровка значений коэффициентов сочетаний для воздействий при расчетах железобетонных конструкций в постоянных и особых расчетных ситуациях // Строительная наука и техника. 2009. № 2 (23). С. 32–48.

21. Марковский Д.М. Калибровка значений параметров безопасности железобетонных конструкций с учетом заданных показателей надежности : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Брест, 2009.

22. Булычев А.П. Временные нагрузки на несущие конструкции зданий торговли // Строительная механика и расчет сооружений. 1989. № 3. С. 57–59.

23. Holicky M., Sykora M. Partial Factors for Light-Weight Roofs Exposed to Snow Load. In Bris R., Guedes Soares C., Martorell S. (eds.), Supplement to the Proceedings of the European Safety and Reliability Conference ESREL 2009, Prague, Czech Republic, 7–10 September 2009. Ostrava: VŠB Technical University of Ostrava, 2009, pp. 23–30.

Поступила в редакцию в мае 2013 г.

Об авторах: **Надольский Виталий Валерьевич** — магистр, ассистент кафедры металлических и деревянных конструкций, **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**, Республика Беларусь, 220013, г. Минск, проспект Независимости, д. 65, NadolskiVV@mail.ru;

Голицки Милан — доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института Клокнера, **Чешский технический университет в Праге**, Чешская Республика, 166 08 Прага 6, ул. Солинова, д. 7, milan.holicky@klok.cvut.cz;

Сыкора Мирослав — кандидат технических наук, научный работник Института Клокнера, **Чешский технический университет в Праге**, Чешская Республика, 166 08 Прага 6, ул. Солинова, д. 7, miroslav.sykora@klok.cvut.cz;

Тур Виктор Владимирович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов, **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**, Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267, vvtur@bstu.by.

Для цитирования: Сопоставление уровней надежности, обеспечиваемых нормами Российской Федерации и Евросоюза / В.В. Надольский, М. Голицки, М. Сикора, В.В. Тур // Вестник МГСУ. 2013. № 6. С. 7–20.

V.V. Nadolski, M. Holický, M. Sykora, V.V. Tur

COMPARISON OF RELIABILITY LEVELS PROVIDED BY THE EUROCODES AND STANDARDS OF THE RUSSIAN FEDERATION

In the article, the authors compare the levels of reliability of steel structures designed according to the Eurocodes and the standards of the Russian Federation. Major differences between basic principles of both standards (such as load combinations, the

system of partial factors) with a particular focus on design of steel structures are described. The main parameters characterizing load effects and resistances are compared in general. In the numerical example, the reliability of generic steel members is analysed for different combinations of permanent and variable actions. It appears that in most cases standards of the Russian Federation assure a lower reliability level than the Eurocodes. The main reason for this difference is attributed to the specification of design values of permanent and variable loads. For both considered systems of standards, reliability of structures exposed to snow loads is significantly lower than the reliability of structures exposed to imposed loads; therefore, harmonisation is required in this regard. Further studies concerning more complicated structural elements made of various grade steels and exposed to wind actions are needed.

Key words: Eurocodes, partial factor, probabilistic analysis, reliability level, structural reliability, variable action.

References

1. EN 1993-1-1 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels, European Committee for Standardization, 2005.
2. SP 16.13330.2011. *Stal'nye konstruksii (Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23—81*)* [Construction Rules SP 16.13330.2011. Steel Structures (Updated Version of Construction Norms and Regulations II-23—81*)]. Moscow, Ministry of Regional Development, 2011.
3. SP 20.13330.2011 *Nagruzki i vozdeystviya (Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07—85)* [Construction Rules SP 20.13330.2011. Loads and Actions. (Updated Version of Construction Norms and Regulations 2.01.07—85)]. Moscow, Ministry of Regional Development, 2011.
4. EN 1990 Eurocode: Basis of Structural Design. Brussels, European Committee for Standardization, 2002.
5. GOST 27772—88. *Prokat dlya stroitel'nykh stal'nykh konstruksiy. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard 27772—88. Rolled Products for Structural Steelwork. General Specifications].
6. *Posobie po proektirovaniyu stal'nykh konstruksiy (k SNiP II-23—81* «Stal'nye konstruksii»)* [Handbook of Design of Steel Structures (based on Construction Norms and Rules II-23—81*. Steel Structures)] TsNIISK im. Kucherenko Gosstroya SSSR Publ., Moscow, 1989, 148 p.
7. Sýkora M., Holický M. Comparison of Load Combination Models for Probabilistic Calibrations. In Faber M.H., Köhler J., Nishijima K., editors. Proceedings of 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering ICASP11. 1-4 August, 2011, ETH Zurich, Switzerland, Leiden, Netherlands, Taylor & Francis/Balkema, 2011, pp. 977—985.
8. Holický M. and Retief J.V. Reliability Assessment of Alternative Eurocode and South African Load Combination Schemes for Structural Design. Journal of the South African Institution of Civil Engineering. Vol. 47, no. 1, 2005, pp. 15—20.
9. Gulvanessian H. and Holický M. Eurocodes: Using Reliability Analysis to Combine Action Effects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings. August 2005, vol. 158, no. SB4, pp. 243—252.
10. GOST R 54257 *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy. Osnovnye polozeniya i trebovaniya* [State Standard P 54257. Reliability of Structures and Foundations. Basic Provisions and Requirements].
11. EN 1991-1-1 Eurocode 1. Actions on Structures - Part 1-1: General Actions. Densities, Self-weight, Imposed Loads for Buildings. Brussels, European Committee for Standardization, 2002.
12. EN 1991-1-3 Eurocode 1: Actions on Structures. Part 1-3: General Actions — Snow Loads. Brussels, European Committee for Standardization, 2003.
13. Gordeev V.N., Lantukh-Lyashchenko A.I., Pashinskiy V.A., Perel'muter A.V., Pichugin S.F., Perel'muter A.V., editor. *Nagruzki i vozdeystviya na zdaniya i sooruzheniya* [Loads and Actions on Buildings and Structures]. Moscow, ASV Publ., 2007, 482 p.

14. Rayzer V.D. *Metody teorii nadezhnosti v zadachakh normirovaniya raschetnykh parametrov stroitel'nykh konstruksiy* [Methods of Reliability Theory in Problems of Standardization of Design Parameters of Building Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 192 p.
15. Turkstra C.J. *Theory of Structural Design Decisions*. Canada, Ontario, University of Waterloo, Solid Mechanics Division, SM Studies Series, no. 2, 1970.
16. JCSS Probabilistic Model Code. Zurich, Joint Committee on Structural Safety, 2001. Available at: www.jcss.byg.dtu.dk.
17. Eurocode 3. Editorial Group Background Documentation to Eurocode no. 3. Design of Steel Structures. Part 1 – General Rules and Rules for Buildings, Background Document for Chapter 5 of Eurocode 3. Document 5.01, 1989.
18. Holický M., Sýkora M. Conventional Probabilistic Models for Calibration of Codes. In Faber M.H., Köhler J. and Nishijima K., editors. *Proceedings of 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering. ICASP11*, 1-4 August, 2011, ETH Zurich, Switzerland, Leiden, Netherlands, Taylor & Francis/Balkema, 2011, pp. 969—976.
19. ISO 4355:1998. Bases for Design of Structures - Determination of Snow Loads on Roofs. International Organisation for Standardisation, TC 98/SC 3.
20. Tur V.V., Markovskiy D.M. Kalibrovka znacheniy koeffitsientov sochetaniy dlya vozdeystviy pri raschetakh zhelezobetonnykh konstruksiy v postoyannykh i osobykh raschetnykh situatsiyakh [Calibration of Values of Combination Factors for Actions in Case of Analysis of Reinforced Concrete Structures in Permanent and Accidental Design Situations]. *Stroitel'naya nauka i tekhnika* [Construction Science and Machinery]. 2009, no. 2(23), pp. 32—48.
21. Markovskiy D.M. *Kalibrovka znacheniy parametrov bezopasnosti zhelezobetonnykh konstruksiy s uchetom zadannykh pokazateley nadezhnosti* [Calibration of Values of Safety Parameters for Reinforced Concrete Structures with Account for Pre-set Reliability Parameters]. Brest, 2009.
22. Bulychev A.P. Vremennye nagruzki na nesushchie konstruksii zdaniy torgovli [Temporary Loads on Bearing Structures of Retail Trade Buildings]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Analysis of Structures]. 1989, no. 3, pp. 57—59.
23. Holický M., Sýkora M. Partial Factors for Light-Weight Roofs Exposed to Snow Load. In Bris R., Guedes Soares C., Martorell S., editors. *Supplement to the Proceedings of the European Safety and Reliability Conference ESREL 2009*, Prague, Czech Republic, 7—10 September 2009. Ostrava, VŠB Technical University of Ostrava, 2009, pp. 23—30.

About the authors: **Nadolski Vitaliy Valer'evich** — master of sciences, assistant lecturer, Department of Metal and Timber Structures, **Belarusian National Technical University (BNTU)**, 65 prospekt Nezavisimosti, Minsk, 220013, Republic of Belarus; Nadolskivv@mail.ru;

Holický Milan — Doctor of Philosophy, Professor, Deputy Director, **Klokner Institute, Czech Technical University in Prague (CTU)**, Solinova 7, 166 08, Prague 6, Czech Republic, milan.holicky@klok.cvut.cz;

Sýkora Miroslav — Doctor of Philosophy, researcher, **Klokner Institute, Czech Technical University in Prague (CTU)**, Solinova 7, 166 08, Prague 6, Czech Republic, miroslav.sykora@klok.cvut.cz;

Tur Viktor Vladimirovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chair, Department of Technology of Concrete and Construction Materials, **Brest State Technical University (BSTU)**, 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Belarus; vvtur@bstu.by.

For citation: Nadolski V.V., Holický M., Sýkora M. Sopotavlenie urovney nadezhnosti, obespechivaemykh normami Rossiyskoy Federatsii i Evrosoyuza [Comparison of Reliability Levels Provided by the Eurocodes and Standards of the Russian Federation]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, no. 6, pp. 7—20.