

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ СЕМИНАР

**ВОПРОСЫ ВНЕДРЕНИЯ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И
СТАНДАРТОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 22–23.05.2013)

УДК 624.046.5/624.014

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТНОЙ НАДЕЖНОСТИ
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В РАМКАХ
МЕТОДА ЧАСТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ**

ТУР В.В.

Брестский государственный технический университет
Брест, Беларусь

НАДОЛЬСКИЙ В.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Введение

Анализ базовых расчетных положений и уровня надежности, обеспечиваемого европейской системой норм (Еврокоды) по расчету строительных конструкций представляет большой интерес в связи с современным процессом гармонизации норм проектирования. Данные, полученные из таких исследований Еврокодов, полезны для разработки национальных приложений, а также для улучшения и гармонизации норм проектирования. Ответ на этот вопрос требует достаточно обширных и комплексных исследований.

В данной статье обобщены результаты работ [6–8], связанных с исследованиями в области надежности строительных конструкций в свете современных требований нормативных документов. В статье [6] выполнен анализ уровней проектной надежности стальных кон-

струкций, запроектированных в соответствии с ТКП EN и СНиП, действующих на территории Республики Беларусь. В статье [7] представлены результаты сопоставления уровней проектной надежности стальных конструкций, запроектированных в соответствии с нормами Российской Федерации и Евросоюза. В статье [8] получены значения частных коэффициентов необходимые для обеспечения регламентированного уровня надежности по ТКП EN 1990 [13].

1. Детерминированный расчет

В основу Еврокодов, СП и СНиП положен метод предельных состояний с использованием системы частных коэффициентов. Общая формулировка проверки предельного состояния несущей способности стального элемента имеет схожий характер (таблица 1).

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

	Проверка по прочности	Проверка по устойчивости
EN 1993-1-1 [3] ТКП EN 1993-1-1 [14]	$E_d \leq z f_y / \gamma_{M0}$	$E_d \leq z \chi f_y / \gamma_{M1}$
СНиП II-23 [9]	$\gamma_n F / z \leq \gamma_c R_y = \gamma_c R_{yn} / \gamma_m$	$\gamma_n F / (\varphi z) \leq \gamma_c R_y$
СП 16.13330 [11]	$\gamma_n C_m / z \leq \gamma_c R_y = \gamma_c R_{yn} / \gamma_m$	$\gamma_n C_m / (\varphi z) \leq \gamma_c R_y$

В таблице приняты следующие обозначения: E_d – расчетный эффект воздействия (внутренне усилие); C_m – нагрузка для основного сочетания; 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_{yn} – 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.

В таблице 2 представлены правила составления расчетных сочетаний нагрузок и воздействий на конструкции в постоянных рас-

четных ситуациях для случая, когда действуют постоянная, переменная полезная и снеговая нагрузки.

Таблица 2. Правила составления расчетных сочетаний нагрузок и воздействий на конструкции в постоянных расчетных ситуациях

Нормы проектирования	Расчетное значение эффекта воздействий
EN 1990 [2] ТКП EN 1990 [13]	$E_d = \gamma_G G_k + \gamma_{0,1} Q_{k,1} + \gamma_{0,2} \psi_{0,2} Q_{k,2} \quad (7)$ альтернативная схема $E_d = \gamma_G G_k + \gamma_{0,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \gamma_{0,2} \psi_{0,2} Q_{k,2} \quad (8)$ $E_d = \xi \gamma_G G_k + \gamma_{0,1} Q_{k,1} + \gamma_{0,2} \psi_{0,2} Q_{k,2} \quad (9)$
СНиП 2.01.07 [10]	$F = \gamma_G^* G_k^* + \gamma_{0,1}^* \psi_{0,1}^* Q_{k,1}^* + \gamma_{0,2}^* \psi_{0,2}^* Q_{k,2}^* \quad (10)$ $F = \gamma_G^* G_k^* + \max[\gamma_{0,1}^* Q_{k,1}^*; \gamma_{0,2}^* Q_{k,2}^*] \quad (11)$
СП 20.13330 [12]	$C_m = \gamma_G^* G_k^* + \gamma_{0,1}^* \psi_{t,1}^* Q_{k,1}^* + \gamma_{0,2}^* \psi_{t,2}^* Q_{k,2}^* \quad (12)$

Имеются также отличия в классификации нагрузок и в способах назначения характеристических (нормативных) значений. Эти аспекты отражены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Сравнение подходов к нормированию параметров сопротивления и эффектов воздействий в нормативных документах Евросоюза и Российской Федерации [7]

Параметры	Нормативные значения	Частные коэффициенты EN СП	
Постоянная нагрузка	$G_k^* / G_k = 1$	$\gamma_G = 1.35$; $\xi = 0.85$	$\gamma_G^* = 1.2$
Полезная нагрузка	$Q_k^* / Q_k = 0.7 \dots 1$	$\gamma_Q = 1.5$; $\psi_{0,Q} = 0.7$	$\gamma_Q^* = 1.3$ или 1.2 ; $\psi_{t,1} = 1$ или $\psi_{t,2} = 0.9$
Снеговая нагрузка	0.79 $S_k^* / S_k = 0.77$ 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	$R_{yn} / f_y = 1$	$\gamma_{M0} = 1$	$\gamma_c = 1$; $\gamma_m = 1.025$
Дифференциация надежности	–	$k_{FI} = 1$	$\gamma_n = 1$

Таблица 4. Сравнение подходов к нормированию параметров сопротивления и эффектов воздействий в нормативных документах Республики Беларусь [6]

Параметры	Нормативные значения	Частные коэффициенты	
		ТКП EN СНИП	
Постоянная нагрузка	$G_k^* / G_k = 1$	$\gamma_G = 1.35 ;$ $\xi = 0.85$	$\gamma_G^* = 1.2$
Полезная нагрузка	$Q_k^* / Q_k = 1$	$\gamma_Q = 1.5 ;$ $\psi_{0,Q} = 0.7$	$\gamma_Q^* = 1.3$ or $1.2 ;$ $\psi_Q^* = 0.9$
Снеговая нагрузка	$S_k^* / S_k = 0.83$	$\gamma_S = 1.5 ;$ $\psi_{0,S} = 0.6$	$\gamma_S^* = 1.5$ or $1.6 ;$ $\psi_S^* = 0.9$
Предел текучести	$R_{yn} / f_y = 1$	$\gamma_{M0} = 1.025$	$\gamma_c = 1 ; \gamma_m = 1.025$
Дифференциация надежности	–	$k_{FI} = 1$	$\gamma_n = 0.95$

2. Анализ надежности

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:

$$g(X) = K_R z f_y - K_E [G + C_{0,Q1} Q_1(t) + C_{0,Q2} Q_2(t)] \quad (13)$$

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

Для сочетания переменных во времени нагрузок принята модель нагрузок Ferry Borges – Castanheta совместно с правилом Turkstra. Базовый период отнесения T принят равным 50 лет.

Важным этапом в определении частных коэффициентов вероятностными методами является определение вероятностных моделей базисных переменных. Как правило, выделяют две группы базисных переменных: одни оказывающие влияние на модель сопротивления, а другие на модель эффектов воздействий (внутренних уси-

лий). В силу различных факторов, изучение моделей базисных переменных должно производиться систематически.

Таблица 6. Вероятностные модели базисных переменных при анализе надежности для территории Республики Беларусь [6]

Переменная	Обозн.	Распред.	μ_X	V_X
Постоянная нагрузка	G	Normal	G_k	0.10
Полезная нагрузка(50лет)	$Q_{50years}$	Gumbel	$0.6Q_k$	0.35
Снеговая нагрузка(50лет)	$S_{50years}$	Gumbel	$1.04S_k$	0.20
Предел текучести	f_y	LogNormal	$1.14f_y$	0.08
Ошибка модели сопротивления	K_R	LogNormal	1.15	0.05
Ошибка модели эффекта воздействия	K_E	LogNormal	1.0	0.10

Таблица 5. Вероятностные модели базисных переменных при анализе надежности для территории Российской Федерации [7]

Переменная	Обозн.	Распред.	μ_X	V_X
Постоянная нагрузка	G	Normal	G_k	0.10
Полезная нагрузка(5лет)	Q_{5years}	Gumbel	$0.2Q_k$	1.10
Полезная нагрузка(50лет)	$Q_{50years}$	Gumbel	$0.6Q_k$	0.35
Ошибка модели полезной нагрузки	C_{0Q}	LogNormal	1.0	0.10
Снеговая нагрузка(1год)	S_{5years}	Gumbel, $V_{S,1} = 0.5$	$0.44S_k$	0.50
Снеговая нагрузка(50лет)	$S_{50years}$	$V_{S,1} = 0.3$	$1.08S_k$	0.16
		Gumbel, $V_{S,1} = 0.5$	$1.10S_k$	0.20
		$V_{S,1} = 0.7$	$1.11S_k$	0.22
Ошибка модели снеговой нагрузки	C_{0S}	LogNormal	1.0	0.15
Предел текучести	f_y	LogNormal	$1.14f_y$	0.08
Ошибка модели сопротивления	K_R	LogNormal	1.15	0.05
Ошибка модели эффекта воздействия	K_E	LogNormal	1.0	0.10

3. Сравнение индексов надежности

Для оценки уровня надежности использовался метод теории надежности 1-го порядка (FORM). Для анализа различных соотношений нагрузок использованы безразмерные параметры нагруже-

ния χ и k . Параметр нагружения χ представляет собой долю переменных воздействий в полной величине воздействий:

$$\chi = (Q_{k,1} + Q_{k,2}) / (G_k + Q_{k,1} + Q_{k,2}) \quad (14)$$

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.

Параметр нагружения k характеризует соотношение между сопутствующей и доминирующей нагрузкой:

$$k = Q_{k,2} / Q_{k,1} \quad (15)$$

Для сравнения были построены графики зависимости индекса надежности β от параметра нагружения χ для базового периода 50 лет.

3.1 Сравнение индексов надежности для территории Республики Беларусь [6]

На рисунке 1 представлена зависимость $\beta - \chi$ при действии постоянной и полезной нагрузки.

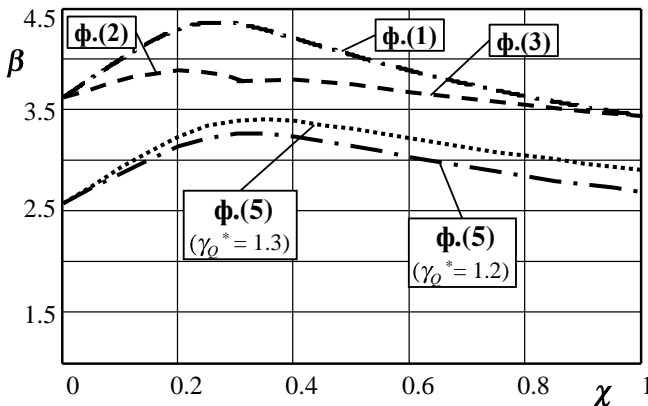


Рисунок 1. Зависимость $\beta - \chi$ при действии постоянной и полезной нагрузки для территории Республики Беларусь

На рисунке 2 представлена зависимость $\beta - \chi$ при действии постоянной и снеговой нагрузки. Для сочетания усилий согласно

СНиП [9] изменение частного коэффициента γ_s^* происходит при $\chi \approx 0.6$, что соответствует $G_k^*/S_k^* = 0.8$.

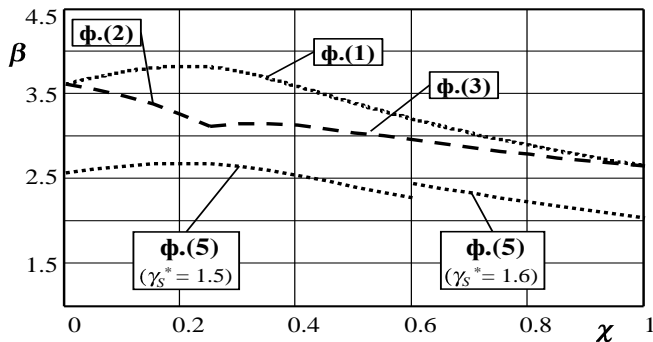


Рисунок 2. Зависимость $\beta - \chi$ при действии постоянной и снеговой нагрузки для территории Республики Беларусь

3.2 Сравнение индексов надежности для территории Российской Федерации [7]

На рисунке 3 представлена зависимость $\beta - \chi$ при действии постоянной и полезной нагрузки. Для сочетания усилий согласно выражению (6) принято $\gamma_Q^* = 1.2$ и $Q_k^*/Q_k = 0.7$ и 1.

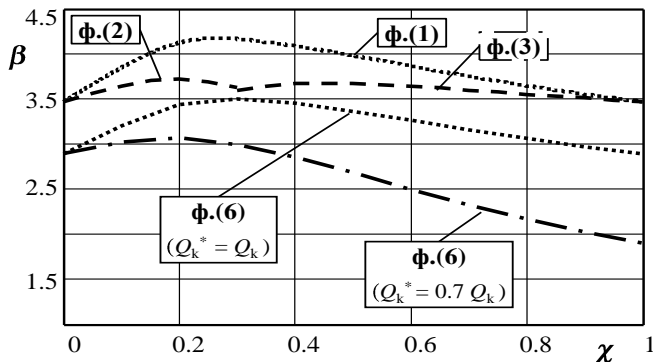


Рисунок 3. Зависимость $\beta - \chi$ при действии постоянной и полезной нагрузки для территории Российской Федерации

На рисунке 4 представлена зависимость $\beta - \chi$ при действии постоянной и снеговой нагрузки. Для снеговой нагрузки принят коэффициент вариации годовых максимумов веса снегового покрова равным $V_{S,1} = 0.5$. Дополнительно для сочетания усилий согласно

выражению (6) представлены зависимости $\beta - \chi$ при коэффициенте вариации $V_{S,1}$ равном 0.3 и 0.7.

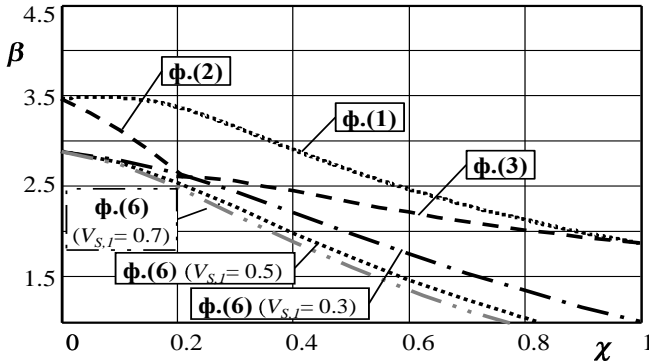


Рисунок 4. Зависимость $\beta - \chi$ при действии постоянной и снеговой нагрузки для территории Российской Федерации

На рисунке 5 представлен график зависимости $\beta - \chi$ при действии постоянной, полезной и снеговой нагрузки. Отношение снеговой нагрузки к полезной принято 0.9. Для снеговой нагрузки принят коэффициент вариации годовичных максимумов веса снегового покрова равным $V_{S,1} = 0.5$. Для сочетания усилий согласно выражению (6) принято $\gamma_{\varrho}^* = 1.2$ и 1.3 и $Q_k^* / Q_k = 1$.

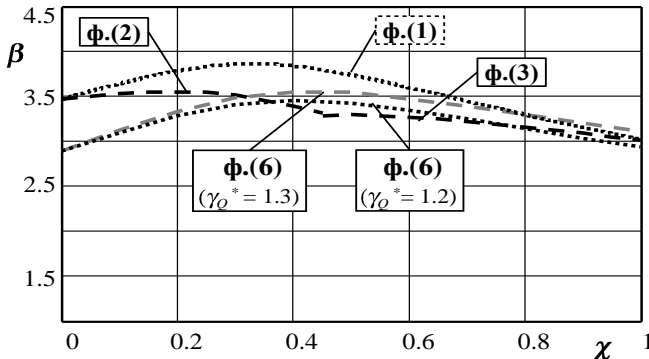


Рисунок 5. Зависимость $\beta - \chi$ при действии постоянной, доминирующей полезной и сопутствующей снеговой нагрузки ($k = 0.9$) для территории Российской Федерации

Анализ результатов статистического моделирования (рисунки 1–5) позволил выявить следующие значимые отличия в уровнях надежности по проектированию стальных конструкций:

1. Надежность конструкций при воздействии снеговой нагрузки ниже, чем при воздействии полезной нагрузки.

2. Нормативные документы СНиП и СП по расчету стальных конструкций обеспечивает меньший уровень надежности по сравнению с Еврокодами. За исключением случаев, когда сочетаются близкие по величине переменные нагрузки.

3. При данных вероятностных моделях базисных переменных и принятой системе частных коэффициентов расчеты согласно Еврокодам не обеспечивают требуемый уровень надежности по EN 1990 [13].

4. В СНиП и СП не регламентирован требуемый уровень надежности, поэтому невозможно сделать заключение о том, обеспечен или нет требуемый уровень надежности.

4. Калибровка частного коэффициента для снеговой нагрузки при расчетах стальных конструкций для территории Республики Беларусь [8]

Из рисунка 2 видно, что рекомендованная система частных коэффициентов при доминирующей снеговой нагрузке не может обеспечить требуемый уровень надежности согласно ТКП EN 1990 [13] (требуемое значение $\beta_1 = 3.8$ для базового периода 50 лет). Аналогичные результаты получены и для условий Чешской Республики [4].

Основываясь на значениях коэффициентов чувствительности, полученные с использованием метода FORM при принятых вероятностных моделях, получены значения частных коэффициентов, необходимых для обеспечения требуемого уровня надежности.

$$\gamma_{Ri} = r_{k,i} / F_{Ri}^{-1}[\Phi(-\alpha_{Ri} \times \beta_1)]; \quad \gamma_{Ei} = F_{Ei}^{-1}[\Phi(-\alpha_{Ei} \times \beta_1)] / e_{k,i} \quad (16)$$

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); α_i – коэффициенты чувствительности, полученные с использованием метода FORM; β_1 – требуемое значение (целевой) индекс надежности, принятый равным 3.8.

Требуемые значения частных коэффициентов для сопротивления, постоянной и снеговой нагрузки приняты равными:

$$\gamma_{M0} = \gamma_{Rd} \times \gamma_m; \quad \gamma_G = \gamma_{Sd} \times \gamma_g; \quad \gamma_Q = \gamma_{Sd} \times \gamma_{\mu} \times \gamma_{S50} \quad (17)$$

где γ_{Rd} – частный коэффициент, учитывающий погрешности модели сопротивления; γ_{Sd} – частный коэффициент, учитывающий погрешности, касающиеся воздействий и/или модели эффектов от воздействий; γ_m – частный коэффициент для свойства материала (предела текучести), учитывающий возможность неблагоприятных отклонений свойства материала от его характеристического значения; γ_g, γ_{S50} – частные коэффициенты соответственно для постоянной и снеговой нагрузки, учитывающие возможность нежелательного отклонения величины воздействия от репрезентативного значения; γ_{μ} – частный коэффициент, учитывающий возможность неблагоприятных отклонений для коэффициента формы снеговой нагрузки.

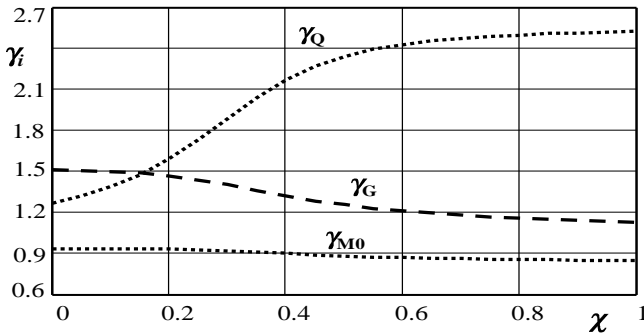


Рисунок 6. Требуемые значения частных коэффициентов для обеспечения индекса надежности $\beta_t = 3.8$ при расчетах стальных конструкций

На рисунке 6 представлены требуемые значения частных коэффициентов в зависимости от параметра нагружения χ необходимые для достижения индекса надежности $\beta_t = 3.8$. При рассматриваемых вероятностных моделях для предела текучести и ошибки модели сопротивления, частный коэффициент γ_{M0} изменяется в диапазоне от 0.85 до 0.95.

Значения частного коэффициента для постоянной нагрузки γ_G варьируется в пределах от 1.1 до 1.5. Значение частного коэффициента для снеговой нагрузки γ_Q , полученного из актуальных коэффициентов чувствительности, существенно отличается от рекомендуемого значения в ТКП EN 1990 [13]. Полученные частный коэффициент больше рекомендуемого значения ($\gamma_Q = 1.5$) почти для всего диапазона параметра нагружения. Эти данные согласуются с результатами, полученными в работах [4, 5], а отчасти также с результатами, представленными в справочной документации [1] к Еврокоду [2].

Следует отметить что значения частного коэффициента γ_{M0} полученные по актуальным коэффициентам чувствительности являются меньшими 1, что входит в противоречие с базовыми положениями метода предельных состояний (в постановке метода частных коэффициентов – расчетное значение свойства материала не могут быть больше его характеристических значений). Тогда принимая в соответствии с Национальным приложением к ТКП EN 1993–1–1 [14] значение $\gamma_{M0} = 1.025$ следует ожидать даже при предварительном оценивании, что значение частного коэффициента для снеговой нагрузки γ_Q будет находиться в интервале от 1.6 до 1.8.

Возможно при уровне надежности, регламентированным в ТКП EN 1990, более экономичным будет разработка специальных мероприятий для повышения надежности. Необходимо использовать расчеты живучести (robustness) для уменьшения возможного ущерба в результате появления экстремальных значений снеговой нагрузки. Достаточная надежность может быть достигнута адекватной системой связей, повышением сопротивления ключевых элементов, использованием вторичной защиты ключевых элементов и т.д.

Учитывая большую изменчивость и неопределённость снеговой нагрузки, возможно, необходимо выделить расчет на снеговую нагрузку в качестве особого воздействия для легких металлических конструкций.

Следует подчеркнуть, что представленные результаты существенно зависят от принятых моделей для базисных переменных, включая ошибки моделирования сопротивления и эффектов воздей-

ствия. Таким образом, результаты, полученные в этом исследовании, следует рассматривать как ориентировочные.

Заключение

Представленный предварительный анализ уровней надежности, позволяет сделать следующие выводы:

1. Нормативные документы СНиП и СП 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.

2. В СНиП и СП 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.

3. В СНиП и СП более дифференцированная система частных коэффициентов, которая позволяет учесть в проверках более разнообразные условия.

4. Надежность конструкций при воздействии снеговой нагрузки, существенно ниже, чем при воздействии полезной нагрузки.

5. Рекомендуемые значения частных коэффициентов не обеспечивают достижения значения целевого индекса надежности, регламентированного базовым документом ТКП EN 1990 при проектировании стальных конструкций для условий Республики Беларусь;

6. Необходимо более детальное исследование вопроса обеспечения надежности строительных конструкций при действии экстремальных снеговых нагрузок, особенно для легких металлических конструкций.

7. Введение европейских норм, осуществляемое в настоящее время в некоторых странах СНГ, требует внимательного теоретического анализа и апробации.

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 текучести и переменных нагрузок. Выявление требуемого уровня надежности для отечественных доку-

ментов с учетом сложившейся практики проектирования. Для получения более общих результатов сравнения надежности необходимо выполнить анализ с учетом ветрового воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. CEN/TC250 Background Document EC1:Part1: Basis of Design. 2nd draft, ECCS, 1996.
2. EN 1990 Eurocode: Basis of structural design – Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
3. 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.
4. 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, p. 23–30.
5. Sadovsky Z., Pales D. Probabilistic optimization of partial safety factors for the design of industrial buildings // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. 2008. Vol. 15, No. 5(2008). P. 411–424.
6. Надольский В.В., Голицки М., Сикора М. Comparison of reliability levels provided by the Eurocodes and standards of the Republic of Belarus. Вестник МГСУ. 2013. № 2. С. 7—21
7. Надольский В.В., Голицки М., Сикора М., Тур В.В. Сопоставление уровней надежности, обеспечиваемых нормами Российской Федерации и Евросоюза. Вестник МГСУ. 2013 (в печати)
8. Надольский В.В., Тур В.В. Калибровка частного коэффициента для снеговой нагрузки при расчетах стальных конструкций. Вестник БрГТУ. – 2013. – № 1: Строительство и архитектура.
9. СНиП II–23–81*. Стальные конструкции. М. : Госстрой, 1991.
10. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия. М. : Госстрой, 1999.
11. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции (Актуализированная редакция СНиП II–23–81*). М., 2011.

12. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия (Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85). М., 2011.

13. ТКП EN 1990. Еврокод. Основы проектирования конструкций. Минск, РУП «Стройтехнорм», 2011.

14. ТКП EN 1993–1–1. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–1. Общие правила и правила для зданий. Минск, РУП «Стройтехнорм», 2009.