

НАДЕЖНОСТЬ И МАТЕРИАЛОЁМКОСТЬ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СВЕТЕ ТРЕБОВАНИЙ ЕВРОПЕЙСКИХ И НАЦИОНАЛЬНЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Введение

С января 2010 г. в Республике Беларусь на альтернативной основе введены Технические кодексы установившейся практики по проектированию строительных конструкций, идентичные Еврокодам (ТКП EN). Таким образом, в настоящее время на территории Республики Беларусь в области проектирования стальных конструкций действуют две системы нормативных документов. На разных уровнях дискутируются вопросы, связанные с полным переходом на Еврокоды и о последствиях такого перехода. При этом главным образом всех интересуют экономические последствия. Техничко-экономический анализ проектных решений, реализованных на основе ТНПА РБ и Еврокодов прямого введения, свидетельствует о существенном повышении материалоемкости стальных конструкций при проектировании по Еврокодам. Однако оценка последствий требует проведения достаточно обширных и комплексных исследований. При этом следует обращать внимание не только на экономические последствия.

Авторами предпринята попытка сравнить методики расчета в обобщенном виде на основе анализа результатов расчетов стального элемента с позиции надежности и материалоемкости. Для этой цели выполнено сопоставление детерминированных проверок предельных состояний, на основании которого выполнен сравнительный анализ расчетных параметров сечения для обобщенного стального элемента. Параметры моделей сопротивления и эффектов воздействий (внутренних усилий) приведены к сопоставимому виду. Исследована надежность стальных элементов с использованием вероятностных методов.

1 Детерминированный расчет

В основу Еврокодов и СНИП положен метод предельных состояний с использованием системы частных коэффициентов. Общая формулировка проверки предельного состояния несущей способности стального элемента по ТКП EN 1993-1-1 [1] и СНИП II-23 [2] имеет схожий характер (таблица 1).

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

Документ	Проверка по прочности	Проверка по устойчивости
[1]	$E_d \leq z f_y / \gamma_{M0}$	$E_d \leq z \chi f_y / \gamma_{M1}$
[2]	$\gamma_n F / z \leq \gamma_c R_y = \gamma_c R_{yn} / \gamma_m$	$\gamma_n F / (\varphi z) \leq \gamma_c R_y$

В таблице приняты следующие обозначения: F , E_d – расчетный эффект воздействия (внутренне усилие); z – расчетный параметр, как правило, 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 несущей способности по прочности; γ_{M1} – частный коэффициент для проверки предельного состояния несущей способности по устойчивости; γ_c – коэффициент условий работы; γ_n – коэффициент надежности по ответственности здания.

1.1 Сопоставление параметров, характеризующих сопротивление элемента. Сопоставление проверочных формул (моделей сопротивления)

Существуют некоторые отличия в отдельных расчетных положениях и моделях сопротивления (например, при определении понижающих коэффициентов для учета соответствующих форм потери устойчивости). Модели сопротивления поперечного сечения стальных элементов (проверки прочности сечений) без учета эффектов потери местной устойчивости согласно СНиП II-23 [2] и Еврокод 3 [1], практически совпадают. Модели сопротивления центральному сжатию при проверках устойчивости (сопротивление продольному изгибу) стального элемента имеют расхождение в значениях коэффициента продольного изгиба в диапазоне от -10% до +15% [3]. Близкие значения расхождений имеют место при других видах напряжено-деформируемых состояний. Однако в ряде случаев расчетные модели сопротивления существенно различаются. Наиболее существенные расхождения наблюдаются в моделях сопротивления, учитывающих местную потерю устойчивости элементов сечения. Анализ этих моделей показывает, что значения сопротивления могут различаться до двух раз [4]. Поэтому сопоставление отдельных расчетных зависимостей требует дополнительных исследований.

Сопоставление прочностных характеристик стали

В соответствии с EN 1990 [5] 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 [6], следовательно, можно принять $R_{ym} = f_y$. Отметим, что данное соотношение иногда не соблюдается из-за разной степени дифференциации значений предела текучести в зависимости от толщины проката.

Сопоставление частных коэффициентов, входящих в модели сопротивления

Согласно СНиП II-23 [2] значение частного коэффициента γ_m зависит от государственного стандарта или технических условий на прокат. Для наиболее распространенного проката по ГОСТ 27772 [6] он равен 1.025.

Коэффициент условий работы γ_c учитывает особенности работы стали, элементов конструкций и их соединений, имеющие систематический характер, но не отражаемые непосредственно в расчетах [7]. Для упрощения примем $\gamma_c = 1$.

Частные коэффициенты γ_{M0} и γ_{M1} относятся ко всей правой части неравенства (к модели сопротивления) для проверок предельных состояний несущей способности 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). В национальном приложении к ТКП EN 1993-1-1 [1] значения этих коэффициентов приняты следующим образом: $\gamma_{M0} = \gamma_m / \gamma_c$; $\gamma_{M1} = \gamma_m / \gamma_c$

1.2 Сопоставление правил 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. Для сочетания эффектов воздействий предполагается линейное поведение конструктивного элемента под нагрузкой.

Сочетания нагрузок согласно EN 1990

В EN 1990 [5] для сочетания эффектов воздействий предложены альтернативные схемы. Согласно национальному приложению к [5] рекомендовано ис-

пользовать альтернативную схему сочетания с использованием двух выражений (6.10a) и (6.10b). Для сочетания двух переменных нагрузок они имеют вид:

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

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

Для дальнейших расчётов принимается наиболее неблагоприятное значение эффекта воздействий, полученное из выражения (1) и (2).

Сочетания нагрузок согласно СНиП 2.01.07

Рассмотрим основные сочетания нагрузок для определения расчетного значения результирующего усилия. В статье не рассматриваются длительные эффекты, т.к. для стальных конструкций они не существенны. В этом случае для полезной и снеговой нагрузки приняты только кратковременные значения. Запишем основное сочетание нагрузок в обозначениях, принятых в ТКП EN 1990 [5]:

$$F = \gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \psi_{Q,1} Q_{k,1} + \gamma_{Q,2} \psi_{Q,2} Q_{k,2}, \quad (3)$$

$$F = \gamma_G G_k + \max[\gamma_{Q,1} Q_{k,1}; \gamma_{Q,2} Q_{k,2}]. \quad (4)$$

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 усредненно $\gamma_G = 1.2$. Коэффициент надежности для переменной нагрузки назначается в зависимости от её вида. Коэффициент надежности для снеговой нагрузки согласно 5.7 [8] с учетом изменения № 1 принимается равным 1.5, за исключением элементов покрытия, для которых он принимается дифференцированно: $\gamma_Q = 1.5$ при $G_k / Q_k \geq 0.8$ и $\gamma_Q = 1.6$ при $G_k / Q_k < 0.8$. Коэффициент надежности для полезной нагрузки согласно [8] 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 $\psi_{Q,i} = 0.9$ для кратковременных нагрузок принят согласно [8].

Различия в классификации нагрузок и в способах назначения нормативных значений рассмотрены в пункте 1.4.

1.3 Дифференциация уровней надежности

Согласно ТКП EN [5] одним из вариантов дифференциации уровней надежности является корректировка частных коэффициентов по нагрузке γ_F посредством коэффициента k_{FI} , который применяется для неблагоприятных воздействий. Согласно СНиП 2.01.07 [8] и ГОСТ 27751 [9] дифференциация уровней надежности осуществляется коэффициентом надежности по ответственности зданий и сооружений γ_n . Учитывая сходство в определении классов надежности согласно [5] и классов ответственности согласно [9], в расчетах принято: $k_{FI} = 1$ (RC2) и $\gamma_n = 0.95$ (Класс 2), соответственно.

1.4 Сопоставление параметров, характеризующих эффект воздействия

Постоянная нагрузка

Определение характеристического (согласно СТБ EN 1991-1-1 [10]) и нормативного (согласно СНиП 2.01.07 [8]) значений постоянной нагрузки носит одинаковый характер, поэтому $G_k^* = G_k$.

Полезная нагрузка

Согласно национальному приложению к СТБ EN 1991-1-1 [10] характеристическое значение полезной нагрузки принимается по таблице 8.3 СНиП 2.01.07 [8], следовательно $Q_k^* = Q_k$. Анализ нормативных значений полезной нагрузки по различным нормативным документам (в том числе по Еврокодам) в среднем подтверждает обоснованность принятого равенства. Хотя для ряда помещений это соотношение отличается, например для жилых помещений нормативное значение полезной нагрузки согласно [8] равно 1.5 кПа, а в соответствии с базовой редакцией EN 1991-1-1 [10] принимается в пределах 1.5-2 кПа (при этом рекомендуется значение 2 кПа).

Снеговая нагрузка

Сопоставление значений снеговой нагрузки в общем виде, вычисленной согласно СНиП [8] и Еврокод [11], представляет собой сложную задачу даже при анализе наиболее распространённых случаев применения металлических конструкций. Результаты некоторых сравнений представлены в [12]. Следует отметить, что различия имеют место не только в значениях коэффициентов «перехода», но и в схемах распределения снеговой нагрузки. Осредненное (по всей территории Республики Беларусь) отношение значений снеговой нагрузки на поверхности земли составляет $s_k^* = 0.67 s_k$. Отношение значений коэффициентов «перехода» μ^*/μ от нагрузки на поверхности земли к нагрузке на покрытии для наиболее распространенных случаев применения стальных конструкций составляет 1.25, поэтому для усредненных условий Республики Беларусь в этих случаях можно принять $S_k^* = 0.84 S_k$.

Дополнительные различия в эффектах воздействий обусловлены различными процедурами статического расчета (учет начальных несовершенств, деформированной геометрии, деформаций узлов). Особенности статического расчета согласно Еврокоду представлены в [13].

Результаты анализа нагрузок представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Соотношение нормативных значений нагрузок и значений частных коэффициентов

Параметры	Нормативные значения	Частные коэффициенты	
		Еврокод	СНиП
Постоянная нагрузка	$G_k^*/G_k = 1$	$\gamma_G = 1.35; \xi = 0.85$	$\gamma_G^* = 1.2$
Полезная нагрузка	$Q_k^*/Q_k = 1$	$\gamma_Q = 1.5; \psi_{0,Q} = 0.7$	$\gamma_Q = 1.3$ или $1.2;$ $\psi_Q^* = 0.9$
Снеговая нагрузка	$S_k^*/S_k = 0.84$	$\gamma_S = 1.5; \psi_{0,S} = 0.6$	$\gamma_Q = 1.5$ или $1.6;$ $\psi_Q^* = 0.9$
Предел текучести	$R_{yk}/f_y = 1$	$\gamma_{M0} = 1.025$	$\gamma_c = 1; \gamma_m = 1.025$
Дифференциация надежности	–	$k_{FI} = 1$	$\gamma_n = 0.95$

Обозначения со знаком * относятся к величинам, принятым согласно СНиП

2 ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ

2.1 Функция состояния

Для проверки предельного состояния несущей способности функция состояния $g(X)$ может быть записана в следующем виде:

$$g(X) = K_R z f_y - K_E [G + C_{0,Q1} Q_1(t) + C_{0,Q2} Q_2(t)], \quad (5)$$

- где K_R – случайная переменная, характеризующая погрешность расчетной модели сопротивления;
- z – геометрическая характеристика поперечного сечения элемента (площадь, момент сопротивления);
- f_y – случайная переменная, характеризующая прочность материала (предел текучести стали);
- K_E – случайная переменная, характеризующая погрешность расчетной модели эффекта воздействия;
- G – случайная переменная, характеризующая постоянное воздействие;
- $C_{0,Qi}$ – не зависящая от времени переменная, характеризующая ошибку модели i -ого воздействия;
- $Q_i(t)$ – случайная переменная, характеризующая i -е переменное воздействие.

При наличии вероятностных моделей вышеотмеченных переменных (базисных переменных) можно определить вероятность отказа за базовый период времени.

2.2 Вероятностные модели базисных переменных

В силу изменчивой природы базисных переменных анализ и корректировка вероятностных моделей должны производиться систематически. В качестве первого приближения вероятностные модели базисных переменных для Республики Беларусь приняты в соответствии с рекомендациями JCSS [14]. Вероятностная модель снеговой нагрузки представлена с учетом актуальных исследований для территории Республики Беларусь [15]. Статистические параметры функций распределения базисных переменных выражены через их характеристические значения.

Все вероятностные модели, используемые для расчетов, приведены в таблице 3. Базовый период отнесения T принят равным 50 лет.

Таблица 3 – Вероятностные модели базисных переменных

Переменная	Распред.	μ_X	V_X
Постоянная нагрузка	Нормальное	G_k	0.10
Полезная нагрузка (5 лет)	Гумбеля	$0.2Q_k$	1.10
Полезная нагрузка (50 лет)	Гумбеля	$0.6Q_k$	0.35
Ошибка модели полезной нагрузки	Нормальное	1.00	0.10
Снеговая нагрузка (1 год)	Гумбеля	$0.44S_k$	0.50
Снеговая нагрузка (50 лет)	Гумбеля	$1.04S_k$	0.20
Ошибка модели снеговой нагрузки	Нормальное	1.00	0.15
Предел текучести	Логнормальное	$1.18f_c$	0.08
Ошибка модели сопротивления обобщенного стального элемента	Логнормальное	1.10	0.10
Ошибка модели эффекта воздействия	Логнормальное	1.00	0.10

3 АНАЛИЗ

Для оценки материалоемкости принято соотношение расчетных параметров сечения для обобщенного стального элемента:

$$k_z = z_{EN} / z_{СНИП}, \quad (6)$$

где $z_{EN} = E_d / (\chi f_y / \gamma_{M1})$ – расчетный параметр определенный согласно Еврокоду;

$z_{СНИП} = \gamma_n F / (\varphi \gamma_c R_y)$ – расчетный параметр определенный согласно СНиП.

На основании параметра k_z можно судить об относительном изменении расчетного параметра. А для оценки надежности принят индекс надежности для базового периода 50 лет, полученный с использованием метода теории надежности 1-го порядка (FORM).

Для анализа различных соотношений нагрузок использован безразмерный параметр нагружения χ . Параметр нагружения χ представляет собой долю переменного воздействий в полном значении воздействия:

$$\chi = Q_k / (G_k + Q_k). \quad (7)$$

Параметр нагружения χ может изменяться практически от 0 (подземные конструкции) до 1 (локальные эффекты в подкрановых балках). Анализ реальных объектов показывает, что наиболее вероятный интервал значения параметра нагружения χ составляет 0,3...0,7 для снеговой нагрузки и 0,4...0,9 для полезной нагрузки.

Указанные соотношения были положены в основу численных исследований индекса надежности и коэффициента k_z . Результаты представлены в виде графиков. На рисунках 1 и 2 представлены зависимости $\beta - \chi$ и $k_z - \chi$ при действии постоянной и полезной нагрузки ($\alpha = 0$). При сочетании усилий согласно СНиП рассмотрены два значения частного коэффициента для полезной нагрузки $\gamma_Q^* =$

1.2 и 1.3. На рисунках 3 и 4 представлены зависимости $\beta - \chi$ и $k_z - \chi$ при действии постоянной и снеговой нагрузки ($\alpha = 0$). Для снеговой нагрузки частный коэффициент \square_S * меняет свое значение приблизительно при $\chi = 0.6$, что соответствует $G_k^* / Q_k^* = 0.8$.

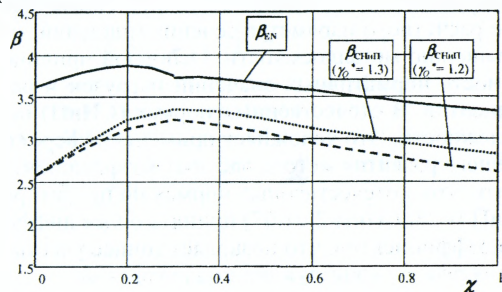


Рисунок 1 – Зависимости $\beta - \chi$ при действии постоянной и полезной нагрузок

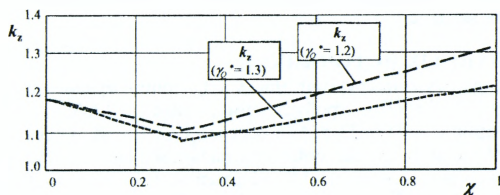


Рисунок 2 – Зависимости $k_z - \chi$ при действии постоянной и полезной нагрузок

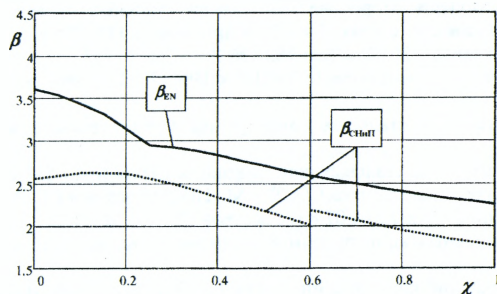


Рисунок 3 – Зависимости $\beta - \chi$ при действии постоянной и снеговой нагрузок

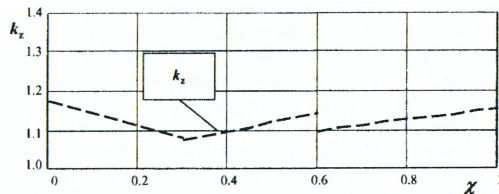


Рисунок 4 – Зависимости $k_z - \chi$ при действии постоянной и снеговой нагрузок

Заключение

При осредненных исходных данных (нагрузках, свойствах материала и т.д.) европейские нормы (Еврокоды) обеспечивают более высокий уровень надежности стальных конструкций по сравнению со СНИП. Последнее приводит к увеличению значения расчетного параметра сечения (площади, момента сопротивления), т.е. к повышению металлоемкости. Основной причиной этого является разная обеспеченность нормативных значений нагрузок и различия в системе частных коэффициентов. В отечественных нормах (СНИП) не регламентированы показатели надежности. Это усложняет применение вероятностных методов расчета и дальнейшее развитие метода частных коэффициентов.

Следует отметить, что в отечественных нормах по проектированию стальных конструкций (СНИП II-23, СНИП 2.01.07) принята более дифференцированная система частных коэффициентов, что позволяет точнее учесть в проверках разнообразные условия работы конструкции под нагрузкой.

Более точное и достоверное определение уровня надежности (вероятности отказа, индекса надежности) связано с совершенствованием вероятностных моделей базисных переменных.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1993-1-1-2009 / НПП РУП «Стройтехнорм». – Минск, 2009.
2. Стальные конструкции: СНИП II-23-81* / Госстрой СССР – М.: Госстрой, 1991.
3. Мартынов, Ю.С. Модели сопротивления центральному сжатию стальных элементов по различным нормативным документам / Ю.С. Мартынов, В.В. Надольский, А.Н. Таймасов // Техническое нормирование, стандартизация и сертификация в строительстве – 2013. – № 3. – С. 70–73 (Начало). – № 4. – С. 58–62 (Окончание).
4. Мартынов, Ю.С. Модели сопротивления сдвигу стальных элементов, учитывающие потерю местной устойчивости стенки / Ю.С. Мартынов, Ю.И. Лагун, В.В. Надольский // Металлические конструкции. – 2012. – Том 18. – № 2. – С. 111–122.
5. Основы проектирования конструкций: ТКП EN 1990-2011. – Минск: НПП РУП «Стройтехнорм», 2012.
6. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия: ГОСТ 27772-88.
7. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНИП II -23-81* «Стальные конструкции») / ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.
8. Нагрузки и воздействия: СНИП 2.01.07-85 / Госстрой СССР – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
9. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету: ГОСТ 27751-88.
10. Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-1. Удельный вес, постоянные и временные нагрузки на здания: СТБ EN 1991-1-1-2007. – Минск: НПП РУП «Стройтехнорм», 2007.
11. Воздействия на конструкции. Часть 1-3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки: ТКП EN 1991-1-3-2009. – Минск: НПП РУП «Стройтехнорм», 2009.
12. Гордеев, В.Н. 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. – Москва: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 482 с.
13. Надольский, В.В. Особенности статического расчета по ТКП EN 1993-1-1/ В.В. Надольский, Ю.С. Мартынов // Наука, техника и технологии. – 2011. – №4 (37). – С. 21–38.
14. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001. <www.jcss.bvg.dtu.dk>.
15. Тур, В.В. Нормирование снеговых нагрузок для территории Республики Беларусь / В.В. Тур, В.Е. Валух, С.С. Дереченник, О.П. Мешик, И.С. Воскобойников // Строительная наука и техника. – 2008. – № 2. – С. 27–45.