

УДК 624.046.5/624.014

**ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**В.В. НАДОЛЬСКИЙ; канд. техн. наук, проф. Ю.С. МАРТЫНОВ**  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Рассматривается проблема вероятностного описания сопротивления стальных элементов. На основании анализа современных исследований представлены обобщённые статистические показатели прочностных характеристик стали, геометрических характеристик сечений и погрешностей моделей сопротивления стальных элементов. Акцент сделан на модели сопротивления, принятые в Еврокодах. Получены значения частного коэффициента для модели сопротивления при одностороннем оценивании функции состояния исходя из заданных показателей надёжности.*

**Введение.** При введении Еврокодов обязательным этапом является определение значений национально устанавливаемых параметров, в частности частных коэффициентов. Система частных коэффициентов представляет собой один из инструментов регулирования и обеспечения заданного уровня надёжности, поэтому обоснование их значений является первостепенной задачей для каждого государства. Для решения данной проблемы необходимо формирование вероятностных моделей базисных переменных, характеризующих сопротивления и эффекты воздействий. При наличии вероятностных моделей базисных переменных  $X$  методами теории надёжности можно определить вероятностно подкреплённые значения частных коэффициентов для заданных (нормируемых) уровней надёжности.

Большинство параметров расчетных моделей имеют неопределённые значения в силу погрешностей измерений, изменчивости физических явлений, недостоверных знаний о физической сущности процессов и т.д. Случайные параметры расчетных моделей и погрешности эти модели принято называть базисными переменными. Как правило, условно выделяют две группы базисных переменных: одни влияют на модели сопротивления, а другие – на модели эффектов воздействий (усилия, перемещения и др.). К базисным переменным модели сопротивления стального элемента относятся деформационные и прочностные характеристики стали (наиболее часто используемая характеристика – предел текучести), геометрические характеристики сечения и элемента, погрешности моделей сопротивления.

Проблема вероятностного описания базисных переменных занимает особое место в теории надёжности и в вероятностных методах расчета строительных конструкций. По своей сути информация о базисных переменных представляет собой исходные данные для вероятностного расчета. Точность вероятностной модели базисной переменной оказывает существенное влияние на результаты расчетов. Поэтому исследования вероятностной природы базисных переменных постоянно сохраняют свою актуальность.

Особое место занимает вопрос установления закона распределения и статистических параметров базисной переменной. Обычно закон распределения устанавливается на основании доступных экспериментальных данных. Часто наличие экспериментальных данных ограничено, что не позволяет получить статистически достоверные результаты. Поэтому при назначении закона распределения используют теоретические предпосылки. Для характеристик свойств материалов, сопротивлений элементов конструкции, погрешностей моделей рекомендуется использовать логарифмически нормальное распределение или распределение Вейбулла [1]. Следует отметить, что существует общая проблема использования в теории надёжности любого из законов распределения случайных величин в области весьма малых значений вероятностей, то есть за пределами области, в которой экспериментально обосновывалась применимость закона распределения и определялись его параметры.

Задачей данного исследования является обобщение и анализ информации об изменчивости базисных переменных моделей сопротивления стальных элементов на основании современных исследований в этой области. По результатам исследования рекомендованы вероятностные модели базисных переменных сопротивления, на основе которых получены значения частного коэффициента для модели сопротивления исходя из заданных показателей надёжности.

**Прочностные характеристики стали.** Источниками изменчивости статистических показателей прочностных и деформационных свойств стали являются вариации химического состава, различия технологий изготовления, методов контроля качества, процедур испытаний, объем выборок и др. Для полноценного и адекватного уточнения (корректировки) фактических законов распределения прочностных и деформационных свойств стали необходимы актуальные экспериментальные данные для различных марок стали, различных видов и толщин проката. Такие работы требуют привлечения широкого круга научных и производственных организаций. Проведение таких исследований на территории Республики Беларусь осложняется тем, что стальной прокат в основном поставляется зарубежными производителями. В сложившейся ситуации представляется целесообразным оценить параметры сталей исходя из наи-

более общих и разнообразных условий поставки проката на основании современных исследований, выполненных за пределами республики. Исследование изменчивости свойств сталей и уточнения их статистических параметров является ближайшей важной задачей.

В работе [2] на основании анализа исследований изменчивости предела текучести, выполненных в разные времена для разных стран [3–10], для вероятностного описания предела текучести при наиболее общих и разнообразных условиях поставки проката рекомендовано использовать среднее значение отношения фактического значения предела текучести к характеристическому ( $\mu_{fy}/f_y$ ), равному 1,10...1,20, а коэффициент вариации  $V = 0,05...0,08$ . Для определения частных коэффициентов рекомендуется статистические показатели распределения предела текучести принимать в диапазоне равновероятных значений.

Для сравнения приведены статистические параметры предела текучести, принятые в различных работах по калибровкам частных коэффициентов:

- без учета изменчивости геометрических характеристик:  $\mu_{fy}/f_y = 1,19$ ,  $V = 0,08$  [11];  $\mu_{fy}/f_y = 1,27$ ,  $V = 0,057$  [12];

- с учетом изменчивости геометрических характеристик:  $\mu_R/X_k = 1,25$ ,  $V = 0,1$  [13];  $\mu_R = R_k e^{2VR}$ ,  $V = 0,08$  [14];  $\mu_R/X_k = 1,18$ ,  $V = 0,15$  [15];  $\mu_R/X_k = 1,18$ ,  $V = 0,08$  [16];  $\mu_R = R_k + 2\sigma$ ,  $V = 0,08$  [19].

Статистические показатели предела прочности, относительных деформаций, модулей упругости обобщены в [2].

Для вероятностного описания предела текучести наиболее часто используют нормальный и логнормальный законы распределения [11–17]. Выбор нормального закона распределения обычно обосновывается тем, что свойства стали зависят от суммарного действия независимых случайных величин, ни одна из которых не оказывает преобладающего влияния, тогда согласно предельным теоремам теории вероятности распределение предела текучести можно принять нормальным. Следует обратить внимание, что данная предпосылка справедлива для первоначальной генеральной совокупности, однако из-за процедуры контроля качества стали, отбраковывающего низкосортную сталь, как правило, имеет место отклонение от нормального закона.

**Геометрические характеристики поперечного сечения.** К геометрическим параметрам поперечного сечения относят размеры сечения и его геометрические характеристики (площадь, момент сопротивления и др.). Допуски геометрических размеров, регламентированные в стандартах на прокат, изготовление и монтаж стальных конструкций, служат подосновой при составлении вероятностной модели отклонений. При этом фактические статистические параметры распределения геометрических размеров поперечных сечений необходимо определять непосредственными измерениями размеров.

Для вероятностных расчетов геометрические характеристики принимают как детерминированные или учитывают их изменчивость. Для сравнения приведены статистические параметры, принятые в различных работах:

$\mu_x/X_n = 1,025$ ,  $V = 0,032$  – для площади прокатного двутаврового сечения IPE 140 [12];

$\mu_x/X_n = 1,0$ ,  $V = 0,04$  – для площади, момента сопротивления, момента инерции прокатных профилей [18];

$\mu_x/X_n = 1,0$ ,  $V = 0,03$  – для момента инерции [19].

Анализ [2] показывает, что в качестве первого приближения с достаточной достоверной вероятностью можно рекомендовать среднее значение отношения фактического значения геометрических характеристик наиболее распространенного сечения (прокатного двутаврового) к его характеристическому значению 0,99...1,03, коэффициент вариации 0,01...0,03.

**Погрешность модели сопротивления.** Следует отметить недостаточную освещенность в научной литературе проблемы вероятностного описания погрешности расчетных моделей. Анализ показывает, что при вероятностных расчетах во многих случаях игнорируется погрешность моделирования либо данные погрешности учитываются довольно условно. Это положение приводит к тому, что результаты исследований по уточнению моделей сопротивления не находят отражения при нормировании частных коэффициентов и свидетельствуют о приравнивании всех моделей сопротивления к одному уровню с точки зрения их точности.

Основой для оценки погрешностей расчетных моделей выступает база результатов испытаний, в которую должны входить все величины, необходимые для повторения испытания и для определения значений сопротивления по расчетным моделям. В общем случае статистические параметры погрешности модели определяют эмпирическим путём, сопоставляя результаты испытаний с теоретическими расчетами. Существуют различные способы учета погрешности расчетной модели. Наиболее часто используется запись следующего вида:

$$R^*(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \theta \cdot R(X_1, \dots, X_n), \quad (1)$$

где  $R^*$  – фактическое сопротивление, полученное по результатам испытаний;  $R(\ )$  – сопротивление, полученное по модели сопротивления с использованием фактических характеристик базисных переменных

(свойств материала, геометрических характеристик);  $\theta$  – случайная переменная с некоторым законом распределения вероятностей, характеризующая погрешность моделирования;  $\mathbf{X}$  – вектор базисных переменных, входящих в модель сопротивления;  $\mathbf{Y}$  – вектор переменных, которые не учитываются моделью сопротивления, но могут влиять на сопротивление.

Обобщение статистических характеристик погрешности моделирования сопротивления осложняется постоянным совершенствованием расчетных моделей. Однако при незначительных различиях моделей сопротивления в качестве приближения можно использовать статистические параметры погрешностей моделей, принятых в других нормативных документах. При этом, как правило, для моделей *сопротивления сечений* их можно использовать в качестве достоверной оценки, для моделей *сопротивления элементов* изгибу и центральному сжатию при проверках устойчивости – в качестве приближенной оценки. Для других моделей сопротивления необходимо непосредственное исследование погрешности на основании обработки экспериментальных данных.

Заметим, что под термином *модели сопротивления сечения* подразумеваются те модели сопротивления, которые связаны только с параметрами конкретного расчетного сечения (например, проверки сечения изгибаемого элемента по нормальным напряжениям), а под термином *модели сопротивления элемента* – связанные с размерами сечения и параметрами элемента (например, проверки устойчивости центрально сжатого элемента).

В документе JCSS [1], на который часто ссылаются при вероятностных расчетах, представлены значения статистических параметров только для модели сопротивления изгибу ( $\mu = 1$ ,  $V = 0,05$ ), сдвигу ( $\mu = 1$ ,  $V = 0,05$ ) и для модели сопротивления сварных ( $\mu = 1,15$ ,  $V = 0,15$ ) и болтовых ( $\mu = 1,25$ ,  $V = 0,15$ ) соединений. Для сравнения приведены статистические параметры погрешностей моделей сопротивления, принятые в работах по калибровке частных коэффициентов Еврокодов:

- погрешность модели сопротивления обобщенного («generic») стального элемента:  $\mu = 1,15$ ,  $V = 0,05$  [16; 20];  $\mu = 1,0$ ,  $V_R = 0,05$  [13];  $\mu = 1,1$ ,  $V = 0,07$  [21].
- погрешность модели сопротивления изгибу:  $\mu = 1,1$ ,  $V = 0,07$  [18; 22];
- погрешность модели определения прогибов:  $\mu = 1,1$ ,  $V = 0,07$  [18];
- сопротивление элемента продольному усилию:  $\mu = 1,3$ ,  $V = 0,1$  [18].

В таблице 1 представлены рекомендуемые статистические показатели для вероятностного описания погрешности модели сопротивления на основании обобщения и анализа [23; 24] исследований моделей сопротивления:

- сечений изгибу (проверка «прочности») [25; 27; 28];
- элементов изгибу (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) [26; 29];
- элементов продольному усилию [30–32];
- элементов сдвигу с учетом потери местной устойчивости стенки отсека [24; 29; 33].

Таблица 1

Рекомендуемые значения статистических параметров  
для описания погрешности моделей сопротивления стальных элементов

Модели сопротивления	$\mu / X_k$	$V$
Для пластического сопротивления изгибу при протяженной зоне развития пластических деформаций (наличие протяженной зоны чистого изгиба)	1,0	0,05
Для пластического сопротивления изгибу при локальной зоне развития пластических деформаций	1,15	0,10
Для упругого сопротивления изгибу	1,10	0,05
Для сопротивления изгибу элементов (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) с прокатными и эквивалентными (подобными) им двутавровыми сечениями	1,10	0,08
Для сопротивления изгибу элементов (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) с другими типами сечений	1,15	0,10
Для сопротивления элементов осевому усилию (проверка устойчивости продольного изгиба)	1,15	0,10
Для сопротивления сдвигу с учетом потери местной устойчивости стенки	1,15	0,15

#### Определение частных коэффициентов для моделей сопротивления стальных конструкций.

Расчетное значение сопротивления, выраженное непосредственно через его характеристическое значение  $R_k$ , можно определить с использованием интегрального частного коэффициента  $\gamma_M$ :

$$R_d = R_k / \gamma_M. \quad (2)$$

Интегральный частный коэффициент  $\gamma_M$  должен учитывать неблагоприятные отклонения свойств материалов, геометрических размеров, неопределенности расчетных моделей сопротивления и т.д. В общем случае частный коэффициент должен быть определен калибровкой исходя из условия обеспечения заданной надежности конструкции с учетом воздействий. Упрощенно интегральный частный коэффициент для модели сопротивления можно определить посредством следующего выражения:

$$1 / \gamma_M = b_R \cdot \exp(-\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R), \quad (3)$$

где

$$b_R = b_z \cdot b_{f_y} \cdot b_\theta.$$

Здесь  $b_z$  – среднее значение отношения фактического (измеренного) значения геометрического параметра сечения (например, высота сечения, площадь, момент инерции, момент сопротивления и т.д.) к его характеристическому значению;  $b_{f_y}$  – среднее значение отношения фактического (полученного посредством испытаний) значения свойства материала (например, предел текучести, предел прочности и т.д.) к его характеристическому значению;  $b_\theta$  – среднее значение погрешности расчетной модели, то есть отношения фактического (экспериментального) значения сопротивления к его значению, определенному по расчетной зависимости).

Далее, в формуле (3)  $\alpha_R$  – значения коэффициентов чувствительности согласно методом теории надежности 1-го порядка (FORM), рекомендованное значение 0,8 [34];  $\beta$  – целевое значение индекса надежности, равное 3,8 [34];  $V_R$  – коэффициент вариации значения сопротивления (в случае независимых величин можно принять  $V_R = (V_z^2 + V_{f_y}^2 + V_\theta^2)^{0,5}$ , где  $V_z$ ,  $V_{f_y}$ ,  $V_\theta$  – коэффициенты вариации геометрических характеристик сечения, свойств материала, погрешности расчетной модели соответственно).

Поскольку значения параметров  $b_z$ ,  $V_z$  и  $b_{f_y}$ ,  $V_{f_y}$  изменяются в диапазоне равновероятных значений, то авторами рассмотрены возможные комбинации наиболее благоприятных и неблагоприятных значений. Значения интегрального частного коэффициента  $\gamma_M$  для модели сопротивления представлены в таблице 2. Для модели сопротивления сдвигу учтен эффект увеличения предела текучести с уменьшением толщины проката, принято  $\mu_{f_y}/f_y = 1,15 \dots 1,25$ ,  $V = 0,05 \dots 0,08$ .

Таблица 2

Статистические параметры моделей сопротивления

Модель сопротивления	$\gamma_M$
Изгибу при протяженной зоне развития пластических деформаций	1,01...1,24
Изгибу при локальной зоне развития пластических деформаций	0,99...1,19
Изгибу при упругой работе материала	0,92...1,13
Изгибу элементов (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) с прокатными и эквивалентными им двутавровыми сечениями	0,98...1,19
Изгибу элементов (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) с другими типами сечений	0,99...1,19
Осевому усилию (проверка устойчивости продольного изгиба)	0,99...1,19
Сдвигу с учетом потери местной устойчивости стенки	1,14...1,29

**Заключение.** В итоге выполненного исследования обобщены результаты изучения изменчивости базисных переменных моделей сопротивления стальных элементов. В качестве первого приближения с достаточной достоверной вероятностью можно рекомендовать следующие исходные предпосылки для вероятностного описания базисных переменных, входящих в модели сопротивления:

- для *предела текучести* среднее значение отношения фактического значения предела текучести к характеристическому – 1,10...1,20, коэффициент вариации – 0,05...0,08;

- для *геометрических характеристик сечений* среднее значение отношения фактического значения геометрических характеристик наиболее распространенного сечения (прокатного двутаврового) к его характеристическому значению – 0,99...1,03, коэффициент вариации – 0,01...0,03;

- для *погрешности моделей сопротивления*: сечений пластическому изгибу при протяженной зоне развития пластических деформаций среднее значение погрешности – 1,0, коэффициент вариации – 0,05; сечений пластическому изгибу при локальной зоне развития пластических деформаций среднее значение погрешности – 1,15, коэффициент вариации – 0,10; сечений упругому изгибу среднее значение погрешности – 1,1, коэффициент вариации – 0,05; элементов изгибу (проверка изгибно-крутильной формы потери устойчивости) с прокатными и эквивалентными (подобными) им двутавровыми сечениями среднее значение погрешности – 1,1, коэффициент вариации – 0,08; элементов изгибу (проверка изгибно-крутильной

формы потери устойчивости) с другими типами сечений среднее значение погрешности – 1,15, коэффициент вариации – 0,10; элементов осевому усилию (проверка потери устойчивости продольного изгиба) среднее значение погрешности – 1,15, коэффициент вариации – 0,10; сдвигу с учетом потери местной устойчивости стенки среднее значение – 1,15, коэффициент вариации – 0,15.

При принятых выше предпосылках значения интегрального частного коэффициента для модели сопротивления изменяются в диапазоне от 1,0 до 1,2. Разброс значений, обусловленный возможными комбинациями благоприятных и неблагоприятных значений предела текучести и геометрических параметров сечения, свидетельствует о необходимости уточнения статических параметров базисных переменных, входящих в модели сопротивления (главным образом предела текучести).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. JCSS Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. – 2001. – Mode of access: <http://www.jcss.ethz.ch>. – Date of access: 15.01.2012.
2. 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.
3. Балдин, В.А. Обеспеченность нормативных и расчетных сопротивлений малоуглеродистой стали для строительных металлоконструкций / В.А. Балдин, М.Р. Урицкий // Промышленное строительство. – 1978. – № 6. – С. 19–21.
4. Уваров, Б.Ю. Статистическое исследование свойств и обоснование расчетных сопротивлений низколегированных сталей для строительных металлических конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б.Ю. Уваров; МИСИ. – М., 1970. – 16 с.
5. Урицкий, М.Р. Исследование обеспеченности нормативных и расчетных сопротивлений малоуглеродистой стали для строительных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.Р. Урицкий; ЦНИИСК. – М., 1975. – 19 с.
6. Ведяков, И.И. Современные принципы нормирования качества материалов и стальных конструкций / И.И. Ведяков // Строительная механика и расчет сооружений. – 2007. – № 2. – С. 62–64.
7. Statistical evaluation of the lateral – torsional buckling resistance of steel I-beams. Part 2: Variability of steel properties / L. Simões da Silva [et al.] // Journal of Constructional Steel Research. – 2009. – № 4(65). – P. 832–849.
8. Byfield, M.P. Steel design and reliability using Eurocode 3 / M.P. Byfield. PhD thesis, University of Nottingham, 1996.
9. Design characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products / J. Melcher [et al.] // Journal of Constructional Steel Research. – 2004. – Vol. 60, № 3–5. – P. 795–808.
10. Kala, Z.D. Comparison of Material Characteristics of Austrian and Czech Structural Steels / Z. Kala, J. Melcher, D. Novák // International Journal of Materials and Structural Reliability. – 2005. – № 1(3). – P. 43–50.
11. Sýkora, M. Reliability Analysis of a Steel Frame / M. Sýkora // In: Acta Polytechnica, Vydavatelství ČVUT, Prague, Czech Republic. – 2002. – № 4(42). – P. 27–34.
12. Kala, Z. Influence of partial safety factors on design reliability of steel structures – probability and fuzzy probability assessments / Z. Kala // Journal of civil engineering and management. – 2007. – № 4(XIII). – P. 291–296.
13. Holicky, M. Safety design of lightweight roofs exposed to snow loads / M. Holicky // Engineering Sciences. – 2007. – № 58. – P. 51–57.
14. Sýkora, M. Reliability-based design of roofs exposed to a snow load / M. Sýkora, M. Holicky // In Li, J. Zhao, Y.G. Chen (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.
15. Beck, A.T. A first attempt towards reliability – based calibration of Brazilian Structural Design codes / A.T. Beck, Jr. Souza // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2010. – № 2(XXXII). – P. 119–127.
16. Sýkora, M. Comparison of load combination models for probabilistic calibrations / M. Sýkora, M. Holicky // 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. – P. 977–985.
17. Gulvanessian, H. Reliability based calibration of Eurocodes considering a steel member / H. Gulvanessian, M. Holicky // Workshop on Reliability Based Code Calibration: Press Release, Zurich, March 21–22, 2002 [Electronic resource] / Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zurich). – 2002. – Mode of access: [http://www.jcss.ethz.ch/events/WS\\_2002-03/WS\\_2002-03.html](http://www.jcss.ethz.ch/events/WS_2002-03/WS_2002-03.html). – Date of access: 08.07.2011.

18. Vrouwenvelder, A.C.W.M. Probabilistic calibration procedure for the derivation of partial safety factors for the Netherlands building codes / A.C.W.M. Vrouwenvelder, A.J.M. Siemes // Delft University of Technology. – 1987. – HERON, 32(4). – P. 9–29.
19. Honfi, D. Reliability of beams according to Eurocodes in serviceability limit state / D. Honfi, A.Mårtensson, S. Thelandersson // Engineering Structures. – 2012. – Vol. 35. – P. 48–54.
20. Nadol'skiy, V.V. Comparison of the reliability levels provided by Eurocodes and by standards of the Republic of Belarus / V.V. Nadol'skiy, M. Holický, M. Sýkora // Вестн. МГСУ. – 2013. – № 2. – С. 7–21.
21. Holický, M. Calibration of Reliability Elements for a Column / M. Holický, J. Markova // Workshop on Reliability Based Code Calibration: Press Release, Zurich, March 21–22, 2002 [Electronic resource] / Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zurich). – 2002. – Mode of access: [http://www.jcss.ethz.ch/events/WS\\_2002-03/WS\\_2002-03.html](http://www.jcss.ethz.ch/events/WS_2002-03/WS_2002-03.html). – Date of access: 08.07.2011.
22. Safety of Structures. An independent technical expert review of partial factors for actions and load combinations in EN 1990 “Basis of Structural Design”: BRE Client Report № 210297 [Electronic resource] / Building Research Establishment. – 2003. – Mode of access: <http://www.europanconcrete.eu>. – Date of access: 10.05.2011.
23. Nadolski, V. Uncertainty in Resistance Models for Steel Members / V. Nadolski, M. Sýkora // Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava. Construction Series. – 2014. – Vol. 14. – P. 26–37.
24. Надольский, В.В. Оценка ошибок моделей сопротивления сдвигу, принятых в EN 1993-1-5 и СНиП II-23 / В.В. Надольский, Ю.С. Мартынов // Вестн. МГСУ. – 2013. – № 5. – С. 7–20.
25. Byfield, M.P. An analysis of the true bending strength of steel beams / M.P. Byfield, D.A. Nethercot // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings. – 1998. – Vol. 128, № 2. – P. 188–197.
26. Mateescu, D. Lateral-torsional buckling of steel beams / D. Mateescu, V. Ungureanu // International Colloquium “Recent Advances and New Trends in Structural Design”, 7–8 mai, 2004 / Editura Orizonturi Universitare. – Timișoara, 2004. – P. 165–174.
27. Kennedy, D.J.L. Limit states design of steel structures-performance factors / D.J.L. Kennedy, M. Gad Aly // Canadian Journal of Civil Engineering. – 1980. – Vol. 7, № 1. – P. 45–77.
28. Galambos, T.V. Load and resistance factor design criteria for steel beams / T.V. Galambos, M.K. Ravindra // Structural Division, Civil and Environmental Engineering Department; Washington University, St. Louis, MO, Research Report No. 27. – 1976.
29. Galambos, T.V. Reliability of the Member Stability Criteria in the 2005 AISC Specification / T.V. Galambos // International Journal of Steel Structures. – 2004. – Vol. 4, № 4. – P. 223–230.
30. Fukumoto, Y. Evaluation of multiple column curves using the experimental data-base approach / Y. Fukumoto, Y. Itoh // Journal of Constructional Steel Research. – 1983. – Vol. 3, № 3. – P. 2–19.
31. BJORHOVDE, R. Columns: From Theory to Practice / R. BJORHOVDE // AISC Eng. J. – 1988. – Vol. 25, № 1. – P. 21–34.
32. Sfintesco, D. Experimental Basis for the European Column Curves / D. Sfintesco // Constr. Met. – 1970. – Vol. 3. – P. 5–12.
33. Hoglund, T. Design of thin plate I-girders in shear and bending with special reference to web buckling (in Swedish), Bulletin No. 94 of the Division of Building Statics and Structural Engineering, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1981.
34. Еврокод. Основы проектирования конструкций: ТКП EN 1990-2011. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2012.

Поступила 11.05.2015

## PROBABILISTIC MODELING OF RESISTANCE OF STEEL ELEMENTS

V. NADOLSKI, I. MARTYNOV

*In the article the problem of probabilistic description of the resistance of steel elements is considered. Generalized statistics of the strength characteristics of steel, geometric characteristics of sections and uncertainty of resistance models of steel elements are presented based on the analysis of modern research. Emphasis is placed on the model of resistance adopted in the Eurocodes. The values of the partial factor for the resistance model are obtained based on the target reliability levels.*