

МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОМУ СЖАТИЮ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РАЗЛИЧНЫМ НОРМАТИВНЫМ ДОКУМЕНТАМ



Ю.С. МАРТЫНОВ,
профессор кафедры
«Металлические
и деревянные
конструкции» БНТУ,
к. т. н.



В.В. НАДОЛЬСКИЙ,
ассистент кафедры
«Металлические и деревянные
конструкции» БНТУ,
магистр технических наук



А.Н. ТАЙМАСОВ,
студент 5-го курса
«Строительного факультета»
БНТУ

(Окончание. Начало в № 3 – 2013.)

4. Сопротивление центральному сжатию согласно EN 1993-1-1 [2]

В основу модели сопротивления центральному сжатию элемента в EN [2] заложено не только теоретическое решение, но и обширные экспериментальные данные [6, 8]. С использованием экспериментальных данных разработаны кривые потери устойчивости, отражающие зависимость понижающего коэффициента χ от условной гибкости элемента и типа поперечного сечения. При разработке кривых потери устойчивости учтены геометрические несовершенства и влияние остаточных напряжений для наиболее распространенных типов поперечного сечения. Кривые потери устойчивости показаны на рис. 2.

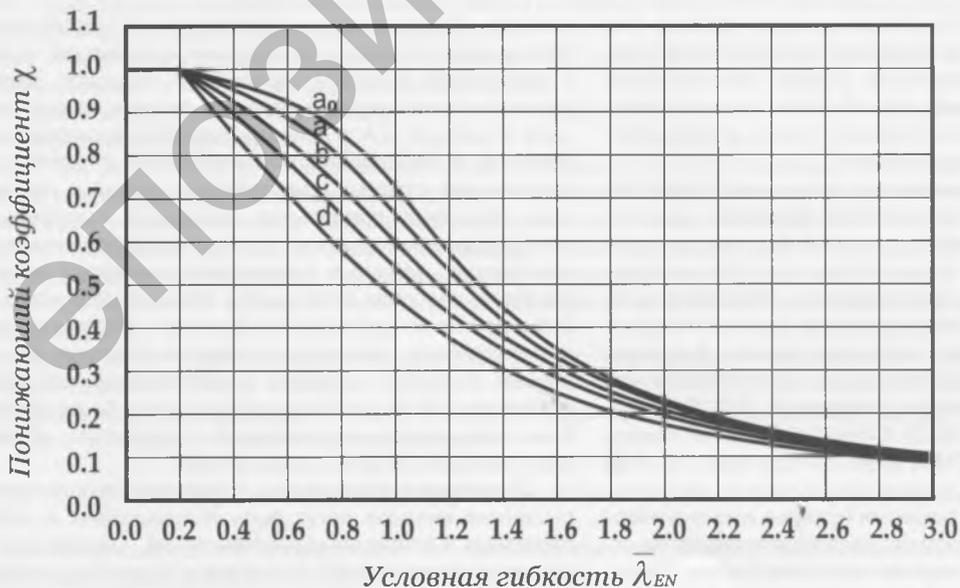


Рис. 2. Кривые потери устойчивости по EN

Согласно EN [2] значения коэффициента χ могут быть определены по графику или по аналитической зависимости:

$$\chi = 1 / \left(\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_{EN}^2} \right) \text{ при } \chi \leq 1,0. \quad (6)$$

$$\Phi = 0.5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_{EN} - 0.2) + \bar{\lambda}_{EN}^2 \right];$$

α — коэффициент, учитывающий начальные несовершенства, зависит от формы поперечного сечения элемента оси, относительно которой происходит потеря устойчивости (ось y или z), способа изготовления сечения;

$\bar{\lambda}_{EN}$ — условная гибкость элемента.

EN [2] позволяет проверить устойчивость элемента по изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форме потери устойчивости. При расчете устойчивости учитывается класс поперечного сечения, который характеризует его напряженно-деформированное состояние. Нормами предусмотрено четыре класса сечений в зависимости от того, насколько местная устойчивость ограничивает несущую и вращательную (поворот) способность поперечного сечения. Для определения класса поперечного сечения элемента необходимо определить классы элементов поперечного сечения (например, полки и стенки для двутаврового сечения) и затем установить класс сечения в целом.

При определении условной гибкости элемента также учитывается класс сечения. В общем случае условная гибкость равна:

$$\bar{\lambda}_{EN} = \sqrt{A f_y / N_{cr}}, \quad (7)$$

где f_y — предел текучести;

N_{cr} — критическая сила для соответствующей формы потери устойчивости в упругой стадии работы стали.

Для более частных случаев, когда известны расчетные длины элементов, $\bar{\lambda}_{EN}$ определяется по следующим выражениям:

$$\bar{\lambda}_{EN} = (L_{cr}/i) \lambda_1 \text{ — для поперечных сечений классов 1, 2 и 3;} \quad (8)$$

$$\bar{\lambda}_{EN} = (L_{cr}/i) \sqrt{A_{eff}/A} / \lambda_1 \text{ — для поперечных сечений класса 4,} \quad (9)$$

где L_{cr} — расчетная длина элемента;

i — радиус инерции поперечного сечения брутто относительно соответствующей оси;

A_{eff} — эффективная площадь поперечного сечения;

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{E/f_y} = 93.9 \varepsilon, \text{ здесь } \varepsilon = \sqrt{235/f_y}.$$

Расчетное значение сопротивления сжатого элемента при проверке устойчивости следует принимать равным:

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} \text{ — для поперечных сечений классов 1, 2 и 3;} \quad (10)$$

$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \text{ — для поперечных сечений класса 4} \quad (11)$$

где γ_{M1} — частный коэффициент безопасности при определении несущей способности элемента по устойчивости.

Для элементов с сечением открытого профиля следует учитывать возможность того, что сопротивление элемента при крутильной или изгибно-крутильной форме потери устойчивости может оказаться меньше сопротивления при изгибной форме потери устойчивости. Тогда в расчете применяется условная гибкость $\bar{\lambda}_{TEN}$, равная:

$$\bar{\lambda}_{TEN} = \sqrt{A f_y / N_{cr}}, \quad (12)$$

$$N_{cr} = \min(N_{cr,TF}; N_{cr,T})$$

$N_{cr,TF}$ — критическая сила потери устойчивости в упругой стадии по изгибно-крутильной форме;

$N_{cr,T}$ — критическая сила потери устойчивости в упругой стадии по крутильной форме:

$$N_{cr,T} = A/I_0 (GI_T + \pi^2 EJ_w / L_{cr,T}^2); \quad (13)$$

$$N_{cr,TF} = I_0 / 2 (I_y + I_z) \left[(N_{cr,z} + N_{cr,T}) - \sqrt{(N_{cr,z} + N_{cr,T})^2 - 4(I_y + I_z) / I_0 N_{cr,z} N_{cr,T}} \right] \quad (14)$$

$$I_0 = I_y + I_z + A z_c^2.$$

Далее расчет сводится к процедуре, описанной выше, с тем лишь исключением, что вместо $\bar{\lambda}_{EN}$ применяется $\bar{\lambda}_{TEN}$.

5. Сопротивление центральному сжатию элемента согласно AISC-360 [3]

Согласно AISC-360 [3] сопротивление центральному сжатию элемента определяется в зависимости от класса поперечного сечения. Аналогично Еврокоду 1993-1-1 [2] в AISC-360 [3] класс поперечного сечения назначается в зависимости от того, насколько местная устойчивость влияет на сопротивление при центральном сжатии.

В AISC-360 [3] проверка устойчивости элемента зависит от формы потери устойчивости: изгибная, крутильная и изгибно-крутильная. Сопротивление центральному сжатию элемента определяется следующим образом:

$$P_n = F_{cr} A_g, \quad (15)$$

где F_{cr} — критическое напряжение (critical stress);
 A_g — площадь поперечного сечения элемента (gross area of member).

Напряжение F_{cr} равно:

- при $KL/r \leq 4.71\sqrt{E/QF_y}$:

$$F_{cr} = Q \left[0.658^{QF_y/F_e} \right] F_y; \quad (16)$$

- при $KL/r > 4.71\sqrt{E/QF_y}$:

$$F_{cr} = 0.877 F_e, \quad (17)$$

где F_y — номинальный минимальный предел текучести стали (specified minimum yield stress);
 F_e — критическое напряжение для соответствующей формы потери устойчивости в упругой стадии (elastic critical buckling stress);

$Q = Q_s Q_a$ — общий понижающий коэффициент, учитывающий гибкость элементов поперечного сечения (полки, стенки), то есть влияние потери местной устойчивости на сопротивление центральному сжатию (full reduction factor for slender compression elements);

K — коэффициент продольного изгиба относительно соответствующей оси сечения элемента (effective length factor);

L — геометрическая длина элемента относительно соответствующей оси сечения (length of the member);

r — радиус инерции поперечного сечения элемента относительно соответствующей оси (governing radius of gyration).

Значение критического напряжения F_e при изгибной форме потери устойчивости определяется по следующему выражению:

$$F_e = \pi^2 E / (KL/r)^2. \quad (18)$$

При крутильной или изгибно-крутильной форме потери устойчивости критическое напряжение F_e равно:

$$F_e = \left[\pi^2 EC_w / (K_x L)^2 + GJ \right] / (J_x + J_y), \quad (19)$$

где C_w — секториальный момент инерции сечения (warping constant);

J — момент инерции сечения при свободном кручении (St. Venant torsional constant);

G — модуль сдвига (shear modulus of elasticity of steel);

I — момент инерции поперечного сечения элемента относительно соответствующей оси (governing radius of gyration).

Значение коэффициента Q равно единице, если потеря местной устойчивости не снижает сопротивление элемента. Коэффициент Q_s определяется в зависимости от типа сечения (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость коэффициента Q_s от типа сечения

Тип сечения	Условия	Коэффициент Q_s
Сварной профиль	$b/t \leq 0.56\sqrt{E/F_y}$	$Q_s = 1.0$
	$0.56\sqrt{E/F_y} < b/t < 1.03\sqrt{E/F_y}$	$Q_s = 1.415 - 0.74(b/t)\sqrt{F_y/E}$
	$b/t \geq 1.03\sqrt{E/F_y}$	$Q_s = 0.69E / [F_y (b/t)^2]$
Прокатный профиль	$b/t \leq 0.64\sqrt{Ek_c/F_y}$	$Q_s = 1.0$
	$0.64\sqrt{Ek_c/F_y} < b/t \leq 1.17\sqrt{Ek_c/F_y}$	$Q_s = 1.415 - 0.65(b/t)\sqrt{F_y/Ek_c}$
	$b/t > 1.17\sqrt{Ek_c/F_y}$	$Q_s = 0.90Ek_c / [F_y (b/t)^2]$

Коэффициент Q_a определяется по следующей формуле:

$$Q_a = A_{eff} / A, \quad (20)$$

где A — полная площадь поперечного сечения элемента (total cross-sectional area of member);

A_{eff} — эффективная площадь поперечного сечения (effective area).

6. Сопротивления центральному сжатию элемента согласно CSA-S16 [4]

Согласно CSA-S16 [4] сопротивление центральному сжатию элемента зависит от класса поперечного сечения. Аналогично EN [2] в CSA-S16 [4] выделяют четыре класса поперечного сечения элемента в зависимости от влияния потери местной устойчивости на сопротивление элемента.

В CSA-S16 [4] предусмотрена проверка при изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форме потери устойчивости.

Сопротивление центральному сжатию элемента согласно CSA-S16 [4] определяется по формуле:

$$C_r = \phi A F_y (1 + \lambda_{CSA}^{2n})^{-1/n} \quad (21)$$

где n — коэффициент, учитывающий форму поперечного сечения элемента и способ его изготовления. Например, для прокатных и сварных двутавровых сечений он принимается соответственно равным 1,34 и 2,24;

λ_{CSA} — условная гибкость элемента, равная:

$$\lambda_{CSA} = \sqrt{F_y / F_e} \quad (22)$$

Критическое напряжение F_e для рассматриваемой формы потери устойчивости определяется так же, как в AISC-360 [3].

Если сечение относится к четвертому классу, то необходимо использовать эффективную площадь поперечного сечения.

7. Анализ моделей сопротивления центральному сжатию стального элемента

В качестве критерия сопоставления моделей сопротивления центральному сжатию по различным нормативным документам принят коэффициент k_ϕ , равный отношению несущей способности по устойчивости к несущей способности по прочности (по своей сути коэффициент продольного изгиба).

В статье не рассматриваются вопросы, связанные с оценкой уровня надежности моделей сопротивления, поэтому частные коэффициенты безопасности ($\gamma_c, \gamma_{M1}, \phi$) исключены из расчетных формул. Для возможности сопоставления результатов анализа прочностные характеристики стали приняты равными между собой: $R_y = f_y = F_y$.

Анализ значений коэффициента k_ϕ в зависимости от условной гибкости позволяет выполнить сравнение в безразмерных величинах. На рис. 3 представлены зависимости коэффициента k_ϕ от условной гибкости элемента и вида кривой потери устойчивости, характеризуемой коэффициентом α .

Для большей наглядности полученных результатов построим график зависимости $\Delta k_\phi / K_{\phi \text{СНиП}}$ (рис. 4 и 5) от условной гибкости $\bar{\lambda}$, где $\Delta k_\phi = k_{\phi i} - k_{\phi \text{СНиП}}$. За базовое значение принят коэффициент k_ϕ , вычисленный согласно СНиП II-23 [1]. На рис. 4 представлены зависимости отношения $\Delta k_\phi / k_{\phi \text{СНиП}}$ от условной гибкости $\bar{\lambda}$ для моделей сопротивления, принятых в EN [2] и СП [5]. Следует отметить, что для наиболее распространенных типов сечений (двутавровых и замкнутых профилей), используемых в качестве центрально сжатых элементов, применяются кривые потери устойчивости а, b и с (α соответственно равно 0,21, 0,34 и 0,49). Кривые

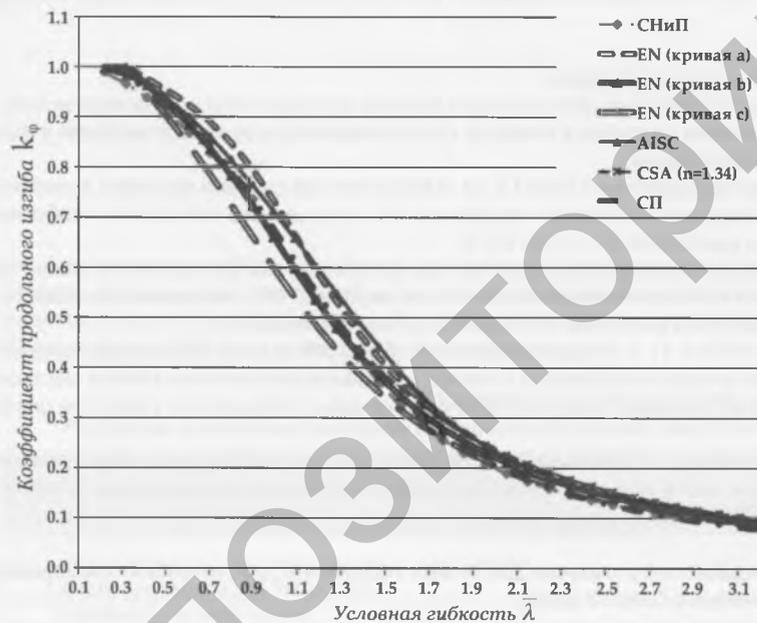


Рис. 3. Зависимость $k_\phi - \bar{\lambda}$

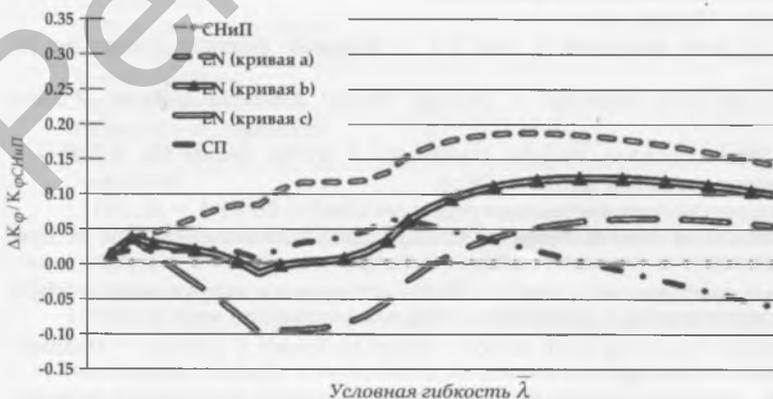


Рис. 4. Зависимость $\Delta k_\phi / K_{\phi \text{СНиП}}$ от условной гибкости

потери устойчивости a_0 и d применяются в редких случаях, поэтому для большей наглядности они исключены из рассмотрения.

На рис. 5 представлены зависимости отношения $\Delta k_\varphi / k_{\varphi CHuII}$ от условной гибкости $\bar{\lambda}$ для моделей сопротивления, принятых в AISC-360[3] и CSA [4].

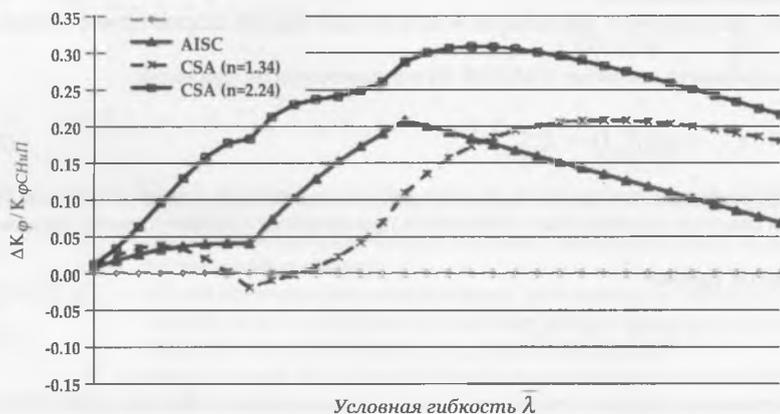


Рис. 5. График $\Delta k_\varphi / k_{\varphi CHuII} - \bar{\lambda}$

Анализируя приведенные графики, можно отметить, что модель сопротивления центральному сжатию, принятая в СНиП II-23, в большинстве случаев занижает значение коэффициента продольного изгиба. При наиболее характерных значениях гибкости 50–90 (что соответствует условной гибкости от 1,7–3) для несущих элементов конструкций сопротивление недооценивается на 10...20 %.

Заключение

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы.

1. Расчетные предпосылки к определению сопротивления центральному сжатию по различным нормативным документам имеют аналогичный характер. Основное различие в моделях сопротивления связано со способами учета начальных несовершенств и остаточных напряжений.
2. Модель сопротивления центральному сжатию, принятая в СНиП II-23, в большинстве случаев занижает значение коэффициента продольного изгиба. Расхождения в значения коэффициента продольного изгиба для наиболее распространенных случаев варьируются в диапазоне от –10 до 20 %.
3. В нормативных документах Европы и Канады проверки предельных состояний центрально сжатых элементов дифференцированы в зависимости от типа сечения. В актуализированной версии СНиП, введенном на территории Российской Федерации, также предусмотрен учет типа поперечного сечения элемента.
4. В нормативных документах Европы (EN 1993-1-1) и Северной Америки (AISC-360 и CSA-S16) сопротивление центральному сжатию элемента зависит от класса поперечного сечения, учитывающего влияния потери местной устойчивости на сопротивление. При этом в Еврокоде 3 класс поперечного сечения учитывается также при определении условной гибкости элемента.
5. В нормативных документах Европы (EN 1993-1-1) и Северной Америки (AISC-360 и CSA-S16) регламентирована процедура определения сопротивления элемента при крутильной и изгибно-крутильной форме потери устойчивости для более общих случаев, чем в СНиП II-23.

Вышесказанное свидетельствует о необходимости уточнения расчетных положений для проверки предельных состояний центрально-сжатого элемента, принятых в СНиП II-23 [1].

Список литературы и использованных источников информации

1. СНиП II-23-81* «Стальные конструкции». Москва, 1991 г.
2. EN 1993-1-1. Eurocodes 3 – Design of steel structures – Part 1.1: – Brussels: European Committee for Standardization, 2006. – 53 pp.
3. AISC-360-05. Specification for Structural Steel Buildings – Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, 2005. – 256 pp.
4. CSA-S16-01. Limit States Design of Steel Structures, Includes Update No. 1 (2010), Update No. 2 (2001) – Mississauga, Ontario: Canadian Standards Association, 2009. – 198 pp.
5. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции (Актуализированная редакция СНиП II-23-81*). – М., 2011.
6. Commentary on the specification for structural steel buildings. – Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, 2005. – 262 pp.
7. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II -23-81* «Стальные конструкции»)/ЦНИИСК им. Кучеренко Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстрой СССР, 1989. – 148 с.
8. Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, Sixth Edition / Edited by Ronald D. Ziemian – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010. – 1117 pp.
9. Металлические конструкции. В 3 т. Т.1. Элементы конструкций: Учеб. для строительных вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов и др.; Под ред. В.В. Горева – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2004. – 551 с.