

МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОМУ СЖАТИЮ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РАЗЛИЧНЫМ НОРМАТИВНЫМ ДОКУМЕНТАМ



Ю.С. МАРТЬНОВ,
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

Полноценное и объективное сравнение методик расчета по различным нормативным документам связано с выполнением многочисленных расчетов элементов реальных конструкций в широком диапазоне геометрических параметров, прочностных характеристик материалов и значений воздействий. Работы в этом направлении планируется осуществить в период 2013–2014 гг. при поддержке РУП «Стройтехнорм».

Авторами предпринята попытка сравнить методики расчета в первом приближении на основе результатов анализа моделей сопротивления центральному сжатию стальных элементов в зависимости от условной гибкости.

Введение

Модели сопротивления, применяемые в СНиП II-23 [1], на момент разработки документа были хорошо изучены и проработаны. Модель сопротивления центральному сжатию элемента¹ в СНиП II-23 [1] базируется на прогрессивных расчетных положениях, но на момент принятия этого документа не было достаточного их подтверждения, и по этой причине численные параметры были приняты с запасом и усредненно. Основные усилия по совершенствованию моделей сопротивления сжатию сводились к обоснованию и верификации базовых положений, поэтому сама модель сопротивления принципиально не поменялась, а только уточнялась.

Сравнение моделей сопротивления по различным документам позволит критически оценить модель, заложенную в СНиП. Наиболее актуальным и имеющим практическое значение представляется сравнение этой модели с моделью сопротивления, принятой в EN 1993-1-1 [2] (далее — EN), введенный на территории Республики Беларусь в 2010 году в степени IDT — ТКП EN 1993-1-1-2009 «Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие положения». В связи с этим в статье детально рассмотрены основные теоретические предпосылки, положенные в основы этих двух документов. Для нормативных документов некоторых стран приведены краткие выдержки расчетных положений.

В статье представлено сопоставление моделей сопротивления стального элемента сплошностенчатого сечения при плоской форме потери устойчивости на основе результатов факторного анализа, что не позволяет сделать вывод о предпочтении какой-либо из моделей сопротивления. Поэтому необходимо дальнейшее изучение этого вопроса с учетом экспериментальных значений сопротивления и рассмотрение этой проблемы в вероятностной постановке с выявлением уровня надежности.

1. Теоретические положения расчета элемента на устойчивость

Потеря устойчивости представляет собой такое состояние системы, при достижении которого первоначальная форма ее равновесия становится неустойчивой. Основной задачей является отыскание силы, соответствующей моменту потери устойчивости. В настоящее время получено достаточно много теоретических решений с учетом разнообразных условий (начальные несовершенства, остаточные напряжения и т. д.).

¹ Под термином «сопротивление элемента» подразумевается его устойчивость, а при использовании термина «сопротивление сечения» — прочность.

В строительных конструкциях условно выделяют **две схемы работы сжатых стержней**. Первая схема реализуется в сжатых элементах статически неопределимых систем (ферм, рам), которые теряют устойчивость по схеме с разгрузкой (классическая схема). В момент потери устойчивости происходит перераспределение усилий между элементами. В приведенной классической схеме предполагается, что в момент потери устойчивости нагрузка остается постоянной, тогда на выпуклой стороне стержня происходит разгрузка, и материал начинает работать по упругому закону. В элементах, работающих по статически определимой схеме, будет реализовываться **вторая схема** — без разгрузки. При этой схеме предполагается, что деформация сжатия в процессе продольного изгиба растет или остается постоянной в каждой точке сечения стержня, то есть разгрузки не происходит, и все сечение будет находиться в пластическом состоянии, характеризуемом касательным модулем деформации.

Необходимо отметить, что до сих пор речь шла об идеально прямом стержне с нагрузкой, приложенной строго по оси. В реальных конструкциях таких условий практически не существует. Ось стержня всегда имеет некоторые искривления, конструктивное оформление концов сжатых стержней не может обеспечить идеальную центровку сжимающей силы и т. д., что приводит к заметному снижению критических напряжений. Учет влияния указанных факторов осуществляется введением в расчет эквивалентного эксцентриситета сжимающей силы. Этот эксцентриситет зависит от многих случайных факторов: технологии изготовления, транспортировки, монтажа, конструктивного решения стержня и его узлов и т. д.

Существенное влияние на устойчивость стержня оказывают остаточные напряжения. Эти напряжения в сочетании с напряжениями от внешних сил приводят к уменьшению эффективной площади поперечного сечения сжатого элемента, и в результате чего сопротивление центральному сжатию снижается.

Основное различие в моделях сопротивления связано со способами учета начальных несовершенств и остаточных напряжений [6, 8].

При дальнейшем изложении расчетных методик будем придерживаться обозначений, принятых в оригиналах нормативных документов.

2. Сопротивление центральному сжатию элемента согласно СНиП II-23 [1]

Модель сопротивления центральному сжатию элемента, принятая в СНиП II-23 [1], в основном базируется на теоретическом решении. Сопротивление центральному сжатию элемента установлено на основе расчета внецентренно сжатых стержней (рис. 1а) с учетом влияния формы поперечного сечения, начального искривления оси, случайного эксцентриситета сжимающей силы, а также соединительных элементов (для сквозных стержней) [7]. При этом решение выполнялось в предположении малости перемещений по деформированной схеме с учетом пластических деформаций, а значение расчетного сопротивления элемента принято предельному значению сжимающей силы N_u (рис. 1б), которая может быть воспринята элементом. Форма изогнутой оси принималась по полуволне синусоиды.

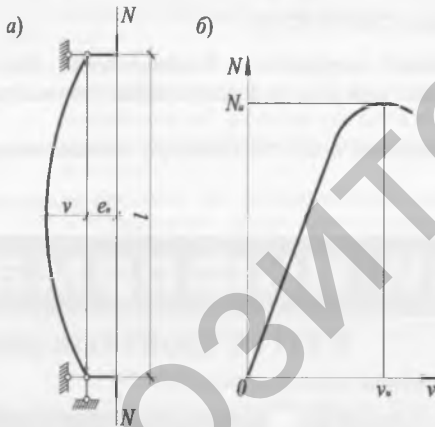


Рис. 1.
К расчету сжатых стержней:
а — расчетная схема;
б — кривая состояния равновесия

Для практических расчетов центрально сжатых элементов был введен коэффициент устойчивости при центральном сжатии φ (коэффициент продольного изгиба), который назначается в зависимости от условной гибкости² элемента. Значения коэффициентов φ определялись на основании двух методик:

- на основании расчета стержня как внецентренно сжатого с учетом начальных несовершенств $e_b = i/20 + l/750$ по формуле:

$$\varphi = N_u (AR_y); \quad (1)$$

- по методу Эйлера с введением коэффициента надежности $\gamma = 1.3$,

$$\varphi = \pi^2 / (1.3 \bar{\lambda}^2); \quad (2)$$

где $\bar{\lambda} = (l/i) \sqrt{R_y/E}$ — условная гибкость элемента;

R_y — расчетное сопротивление стали, установленное по пределу текучести;

E — модуль упругости стали;

² Следует отметить, что условная гибкость по СНиП [1] определяется иначе, чем по EN [2] и CSA-S16 [4]. Поэтому в статье различают условную гибкость, рассчитанную по СНиП [1] — $\bar{\lambda}$, рассчитанную по EN [2] — $\bar{\lambda}_{EN}$ и рассчитанную по CSA-S16 [4] — $\bar{\lambda}_{CSA}$.

- A — площадь поперечного сечения «брутто»;
- l — расчетная длина элемента;
- i — радиус инерции поперечного сечения элемента.

Полученные таким образом значения коэффициентов φ для различных форм поперечных сечений были усреднены и аппроксимированы с помощью формул (8)–(10) СНиП II-23 [1]. В дальнейшем для различных значений расчетных сопротивлений R_y была составлена таблица 72 СНиП II-23 [1].

Несущая способность стержня по устойчивости определяется по формуле:

$$N = \varphi AR_y \gamma_c \quad (3)$$

В СНиПе II-23 [1] также предусмотрена проверка сжатых элементов со сплошными стенками открытого П-образного сечения на устойчивость при изгибно-крутильной форме потери устойчивости. В основу данной проверки принята теория Власова В.3.

3. Сопротивление центральному сжатию элемента согласно СП 16.13330 [5]

С 2011 года на территории Российской Федерации введены в действие новые нормативные документы по расчету строительных конструкций, которые фактически являются актуализированными версиями строительных норм. Проектирование стальных конструкций регламентировано сводом правил СП 16.13330 [5]. В нем сохранены базовые положения СНиП II-23 [1], однако в модель сопротивления центральному сжатию внесены изменения, позволяющие более детально и дифференциально учесть влияния формы поперечного сечения [9], начального искривления оси, случайного эксцентриситета сжимающей силы. Значение коэффициента φ определяется в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}$:

при $\bar{\lambda} \geq 0.4$

$$\varphi = 0.5 \left(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39.48 \bar{\lambda}^{-2}} \right) / \bar{\lambda}^2 \quad (4)$$

Значение коэффициента δ следует определять по следующей формуле:

$$\delta = 9.87(1 + \alpha + \beta \bar{\lambda}) + \bar{\lambda} \quad (5)$$

где α и β — коэффициенты, принимаемые в зависимости от типа сечения;

$\bar{\lambda}$ — условная гибкость элемента, определяется так же, как в СНиП II-23 [1].

— Значение коэффициента, найденного по формуле (4), следует принимать не более $7.6/\bar{\lambda}^2$ при значениях $\bar{\lambda}$, превышающих предельные, которые зависят от типа сечения. При $\bar{\lambda} < 0.4$ допускается принимать для всех типов сечений $\varphi = 1$.

Сопротивление центральному сжатию элемента в соответствии с СП 16.13330 [5] определяется по формуле (3).

Продолжение следует.