

ПРОВЕРКА УСТОЙЧИВОСТИ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СОГЛАСНО ТКП EN 1993-1-1

В. В. Надольский, Ф. А. Верёвка

***Аннотация:** в статье рассмотрены основные принципы и особенности проверки устойчивости стальных элементов согласно ТКП EN 1993-1-1. Затронуты вопросы учета эффектов второго порядка, моделирования узлов сопряжений, а также учета несовершенств.*

***Abstract:** in the article main principles and features of stability checks of steel elements according to ТКП EN 1993-1-1 are considered. Features of the account effects of the second order, modeling of joints and the account of imperfections are mentioned.*

Введение. В связи с имеющимися особенностями и наличием распространенных заблуждений среди инженеров-конструкторов относительно выполнения проверок устойчивости стальных элементов в рамках ТКП EN 1993-1-1 [1] авторами статьи рассмотрены основные принципы и некоторые особенности проверки устойчивости стальных элементов, требования к которой изложены в разделе 5 ТКП EN 1993-1-1 [1]. Также в статье отражен ряд вопросов, связанных с процедурой моделирования элементов конструкции, узлов сопряжений, методов выполнения статического расчета, а также затронут вопрос порядка учета несовершенств.

Базовые положения проверки устойчивости отдельных элементов. Согласно п. 5.2.2 (7) ТКП EN 1993-1-1 [1] устойчивость отдельных элементов должна быть проверена, учитывая следующие положения:

а) если эффекты второго порядка в отдельных элементах и соответствующие несовершенства элемента (см. 5.3.4) полностью учитываются при статическом расчете конструкции, проверка устойчивости отдельных элементов согласно 6.3 не требуется;

б) если эффекты второго порядка в отдельных элементах или некоторые несовершенства отдельных элементов (например, отклонения элемента при потере устойчивости по изгибной и/или изгибно-крутильной форме, см. 5.3.4) не учитываются полностью в статическом расчете, должна быть проверена устойчивость отдельных элементов согласно соответствующим критериям по 6.3 на эффекты, не включенные в статический расчет. Эта проверка должна учитывать концевые моменты и силы, полученные из статического расчета конструкции, включая общие эффекты второго порядка и общие несовершенства (см. 5.3.2), если они имеют место, и ее допускается основывать на расчетной длине, равной конструктивной длине».

На основании анализа положений п. 5.2.2(7а/б) [1] можно выделить два подхода к проверке устойчивости стальных элементов. Так, особенностью первого подхода, основанного на п. 5.2.2(7а) [1], является тот факт, что в случае учета в статическом расчете эффектов второго порядка и несовершенств, проверка устойчивости производится на основании проверки прочности сечения,

т. к. усилия, полученные в результате такого расчета, уже учитывают все возможные «накопления» внутренних усилий. Однако практическая реализация такого подхода при большом количестве рассчитываемых элементов является очень трудоемким процессом и требует больших вычислительных мощностей.

Второй подход, изложенный в п. 5.2.2(7b) [1], получает все большее распространение. Согласно данному подходу необходимо:

– выполнить статический расчет конструкции, учитывая общие эффекты второго порядка (P-Δ эффекты) и общие несовершенства (если они имеют место);

– выполнить проверку устойчивости отдельных элементов согласно соответствующим критериям, приведенным в подразделе 6.3 [1], на эффекты, которые не были учтены в статическом расчете, как правило, к данным «неучтенным» эффектам стоит отнести следующие: локальные эффекты второго порядка (P-δ эффекты) и локальные несовершенства элемента (искривления, сварочные напряжения и т. д.). При этом стоит обратить внимание на то, что согласно этому подходу расчетную длину элемента допускается принимать равной конструктивной длине.

Отдельным пунктом 5.2.2(8) [1] изложен еще один подход к проверке устойчивости элементов:

«Если устойчивость каркаса оценена проверкой по методу эквивалентной колонны согласно 6.3, значения расчетных длин должны быть основаны на форме общей потери устойчивости каркаса с учетом жесткостей элементов и соединений, наличия пластических шарниров и распределения сжимающих усилий при действии расчетных нагрузок. В этом случае внутренние усилия, используемые при определении сопротивления, вычисляются согласно теории первого порядка без учета несовершенств».

Пример практической реализации проверки устойчивости элементов одноэтажной рамной конструкции. Рассмотрим практический пример реализации описанных подходов. В качестве примера рассмотрим одноэтажную раму пролетом 20 м, высотой в карнизном узле 5,75 м, высота в коньковом узле 6,63 м. Для поперечного сечения ригеля и колонны принят прокатной двутавр 55Б2 по СТО АСЧМ 20-93, сталь С255. Приняты следующие значения нагрузок на поперечную раму:

– постоянные нагрузки на ригель рамы 4,0 кН/м;

– постоянные нагрузки на колонну рамы 3,0 кН/м;

– снеговая нагрузка 4,5 кН/м;

– ветровое воздействие на колонны для наветренной стороны 2,5 кН/м, для подветренной 1,6 кН/м, на ригель рамы -2,0 кН/м.

В статическом расчете было учтено влияние деформации узлов [1, 5.1.2(2)]. Карнизный узел был классифицирован как полужесткий [2, т. 5.1]. Согласно методам, изложенным в ТКП EN 1993-1-8 [2], была определена начальная жесткость узла $S_{j,ini}$ (71536 кНм/рад), однако в расчете учитывалась текущая жесткость $S_{j,ult}$ (35768 кНм/рад), так как предполагается, что действующий момент $M_{j,Ed}$ будет превышать $2/3 M_{j,Rd}$. [2, п. 5.1.2(3) и п. 5.1.2(4)].

Сочетания составлены в соответствии с п. 6.4.3.2 [3], согласно правилам комбинаций 6.10a и 6.10b из таблицы A1.2(B) [3].

Таблица 1 – Рассматриваемые сочетания воздействий

CO1	1.35G
CO2	1.35G + 0.90Qs
CO3	1.35G + 0.90Qs + 0.90Qw
CO4	1.35G + 0.90Qw
CO5	1.15G + 1.50Qs
CO6	1.15G + 1.50Qs + 0.90Qw
CO7	1.15G + 1.50Qw
CO8	1.15G + 0.90Qs + 1.50Qw

На следующем этапе следует установить необходимость учета общих несовершенств и влияние эффектов второго порядка.

Согласно п. 5.2.1(3) [1] при упругом расчете конструкций допускается применять расчет первого порядка, если увеличением соответствующих внутренних усилий или любыми другими изменениями работы конструкции, вызванными деформациями, можно пренебречь. Выполнение этого условия достигается соблюдением следующего критерия:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10. \quad (1)$$

Значения α_{cr} для основных сочетаний воздействий представлены в таблице 2. Так как для всех комбинаций выполняется условие, то допускается выполнять упругий расчет первого порядка.

Таблица 2 – Значения α_{cr} для рассматриваемых сочетаний воздействий

№ сочетания	CO1	CO2	CO3	CO4	CO5	CO6	CO7	CO8
α_{cr}	36,1	22,5	27,0	49,4	19,4	22,7	89,3	35,8

Согласно 5.3.2(3) [1] для каркасов, чувствительных к потере устойчивости, сопровождаемой поперечным отклонением, несовершенства следует учитывать расчетом каркаса с эквивалентным несовершенством в виде начального поперечного отклонения и локальными изгибными отклонениями элементов. При этом общие начальные несовершенства в виде отклонений от вертикали (поперечные отклонения) принимаются равными:

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0,005 \cdot 0,834 \cdot 0,886 = 0,0036 \quad (2)$$

где $\phi_0 = 0,005$, $\alpha_h = 0,834$, $\alpha_m = 0,886$.

Исходя из приведенных выше значений α_{cr} , следует, что в рамках данного примера эффектами второго порядка и начальными общими несовершенствами можно пренебречь. Однако стоит обратить внимание на то, что для того чтобы установить этот факт, необходимо было выполнить расчет на устойчивость для каждого из рассматриваемых сочетаний, при этом большинство программных продуктов позволяет выполнить за один раз расчет только для одного сочетания. Поэтому значительно более оптимальным подходом видится всегда выполнять расчет с учетом эффектов второго порядка (Р-Δ эффектов) и общих несовершенств.

Ниже на рисунках 1, 2 представлены результаты статического расчета (значения изгибающих моментов, кН/м) одноэтажной плоской рамы без и с учетом эффектов второго порядка и общих несовершенств соответственно.

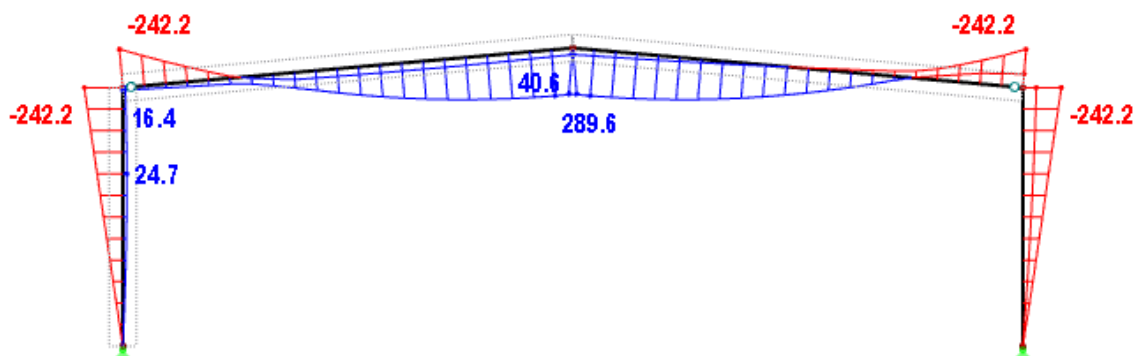


Рисунок 1 – Огибающие максимальных и минимальных значений изгибающих моментов, кН/м, без учета эффектов второго порядка и общих несовершенств

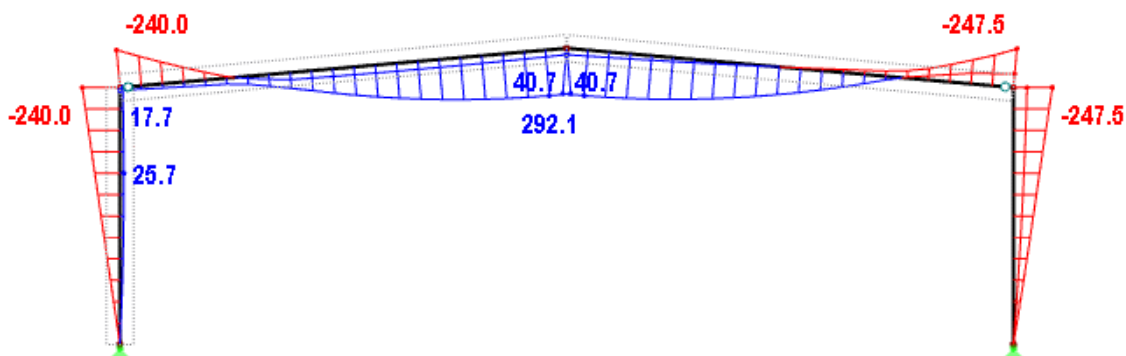


Рисунок 2 – Огибающие максимальных и минимальных значений изгибающих моментов, кН/м, с учетом эффектов второго порядка и общих несовершенств

На основании сравнения значений изгибающих моментов, представленных на рисунках 1, 2, можно отметить, что для рассматриваемого примера отсутствует существенное влияние эффектов второго порядка и общих несовершенств на значения внутренних усилий, возникающих в элементах конструкции. Однако в рамках ТКП EN 1993-1-1 [1] в зависимости от применения теории первого или же теории второго порядка для дальнейшей проверки устойчивости возникает принципиальное различие в назначении расчетных длин элементов. Так, при статическом расчете по теории первого порядка без учета несовершенств согласно п. 5.2.2(8) [1] «значения расчетных длин должны быть основаны на форме общей потери устойчивости каркаса с учетом жесткостей элементов и соединений, наличия пластических шарниров и распределения сжимающих усилий при действии расчетных нагрузок», а при статическом расчете по теории второго порядка с учетом несовершенств согласно п. 5.2.2(7b) «...допускается основывать на расчетной длине, равной конструктивной длине».

Для сравнения выполним проверку устойчивости по двум указанным выше вариантам учета расчетных длин элементов, результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты проверки устойчивости колонн одноэтажной плоской рамы с различными расчетными длинами (с использованием теории первого и второго порядка соответственно)

Применяемая теория	$L_{cr,y}, м$	λ_y	χ_y	K_{Ny}	$L_{cr,z}, м$	λ_z	χ_z	K_{Nz}	-
Без уч. Р-Δ	23,0	1,127	0,578	0,06	5,75	1,34	0,407	0,09	-
С уч. Р-Δ	5,75	0,282	0,982	0,04	5,75	1,343	0,407	0,09	-
Применяемая теория	$M_{cr}, кНм$	λ_{LT}	χ_{LT}	$\chi_{LT,mod}$	K_{My}	k_{yy}	k_{zy}	K_1	K_2
Без уч. Р-Δ	1030,9	0,791	0,769	0,878	0,43	0,945	0,974	0,47	0,51
С уч Р-Δ	1025,6	0,793	0,768	0,877	0,44	0,903	0,974	0,43	0,52

В таблице 3 приняты следующие обозначения:

$$K_{Ny} = N_{Ed} / (\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}) \quad (3)$$

$$K_{Nz} = N_{Ed} / (\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}) \quad (4)$$

$$K_1 = N_{Ed} / (\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}) + k_{yy} M_{y,Ed} / (\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}) \quad (5)$$

$$K_2 = N_{Ed} / (\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}) + k_{zy} M_{y,Ed} / (\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1}) \quad (6)$$

Как видно в данном примере, существенных различий в конечном результате нет, однако более простым и практичным способом следует считать метод расчета с учетом общих несовершенств (Ф-несовершенства) и общих эффектов второго порядка (Р-Δ эффекты).

Пример практической реализации проверки устойчивости элементов трехэтажной рамной конструкции. Рассмотрим еще один пример реализации подходов статического расчета и проверки устойчивости элементов. В качестве примера рассмотрим рамное трехэтажное здание пролетом 20 м, высотой в карнизном узле 17,25 м, высота в коньковом узле 18.13 м, высота первых двух этажей 5,75 м. Для поперечного сечения ригелей и колонн принят прокатной двутавр 55Б2 по СТО АСЧМ 20-93, сталь С255.

Приняты следующие значения нагрузок на поперечную раму:

- постоянные нагрузки на ригель покрытия и перекрытия 4,0 кН/м;
- постоянные нагрузки на колонны рамы 3,0 кН/м;
- снеговая нагрузка на покрытие 4,5 кН/м
- ветровое воздействие на колонны для наветренной стороны 2,5 кН/м, для подветренной 1,6 кН/м, на ригель рамы -2,0 кН/м.

Руководствуясь положением п. 5.1.2(2) [1], в статическом расчете было учтено влияние деформации узлов. Карнизный узел был классифицирован как полужесткий [2, т. 5.1], в расчете учитывалась секущая жесткость $S_{j,ult}$ (35768 кНм/рад).

Сочетания составлены в соответствии с 6.4.3.2 [3], согласно правилам комбинаций 6.10а и 6.10б из таблицы А1.2(В) [3].

Значения α_{cr} для сочетаний воздействий представлены в таблице 4. В рассматриваемом случае есть сочетания, для которых α_{cr} получилось меньше 10, следовательно, необходимо учитывать эффекты второго порядка и несовершенства.

Таблица 4 – Значения α_{cr} для рассматриваемых сочетаний воздействий

Сочетание	CO1	CO 2	CO 3	CO 4	CO 5	CO 6	CO 7	CO 8
α_{cr}	13,3	8,6	9,1	14,6	7,5	7,9	19,1	10,6

Ниже на рисунках 3, 4 приставлены результаты расчета без и с учетом эффектов второго порядка и общих несовершенств соответственно.

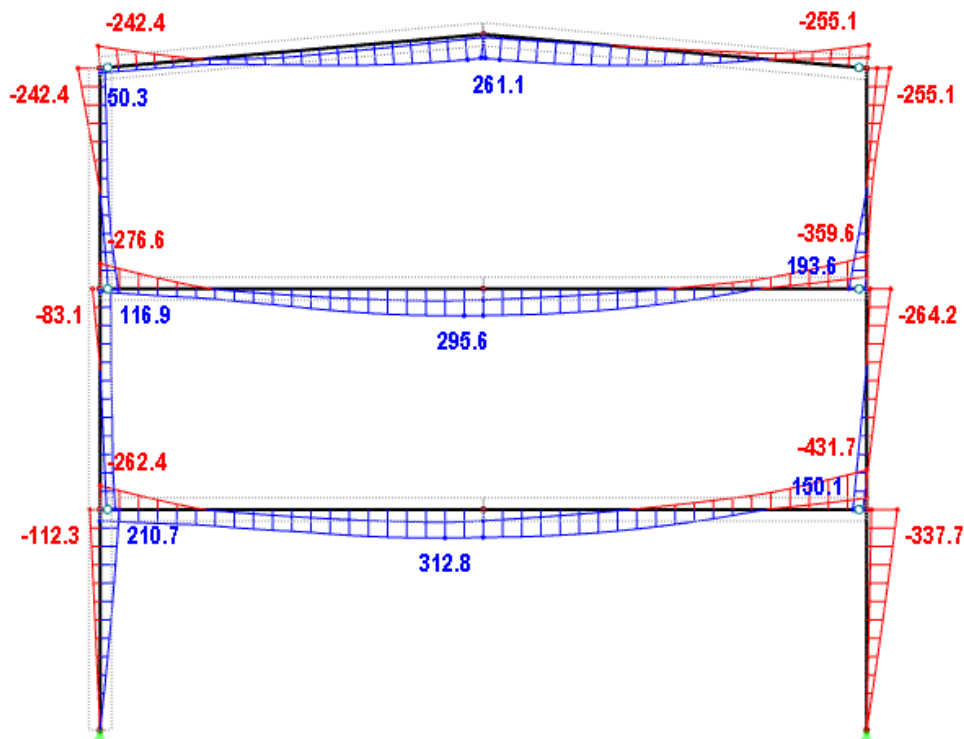


Рисунок 3 – Огибающие максимальных и минимальных значений изгибающих моментов, кН/м, без учета эффектов второго порядка и общих несовершенств

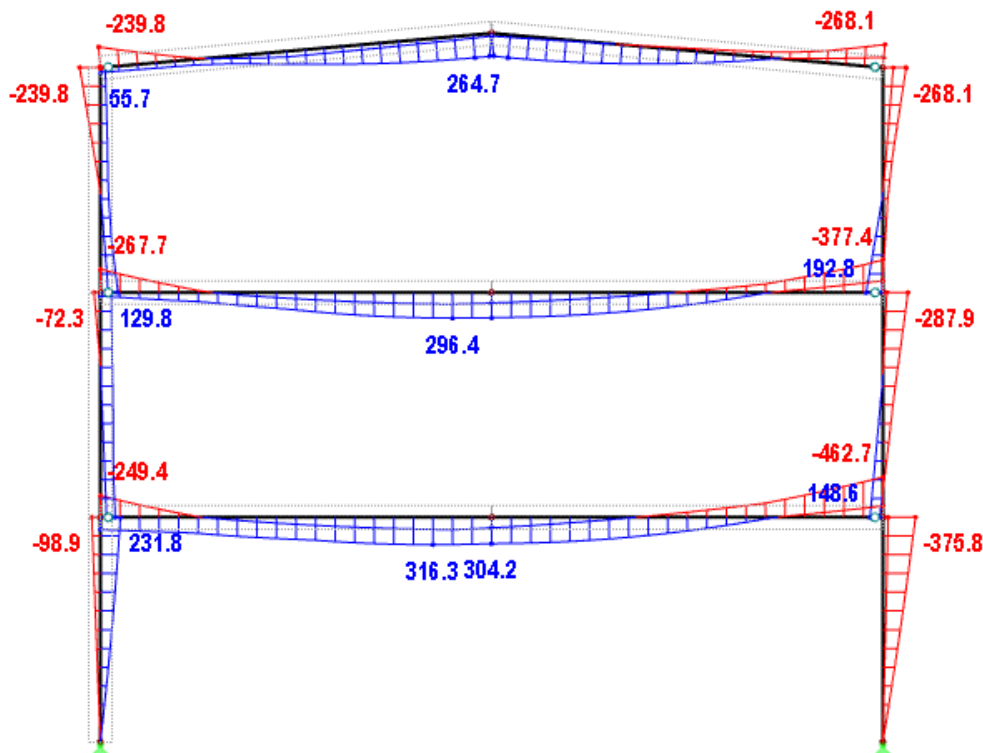


Рисунок 4 – Огибающие максимальных и минимальных значений изгибающих моментов, кН/м, с учетом эффектов второго порядка и общих несовершенств

Результаты проверок устойчивости по двум описанным выше подходам сведем в таблицу 4. Следует обратить внимание, что в общем случае расчетные длины колонн для каждого сочетания могут быть разными. Обычно рекомендуется принимать расчетную длину элемента по тому сочетанию, при котором в элементе возникает наибольшее сжатие.

Таблица 4 – Результаты проверок устойчивости с учетом эффектов первого и второго порядка

Сочетание	Результаты проверки для соответствующих эффектов	
	Первого порядка	Второго порядка
CO1	0,28	0,30
CO2	0,45	0,48
CO3	0,75	0,82
CO4	0,58	0,63
CO5	0,53	0,56
CO6	0,82	0,90
CO7	0,74	0,79
CO8	0,91	0,99

Интересным является тот факт, что наихудшим сочетанием для проверки колонн на устойчивость получилось CO8: сочетание с наибольшим значением изгибающего момента в колонне, при этом наименьшее значение α_{cr} получилось для сочетания CO5.

Заключение. Значительный интерес представляет механизм учета начальных несовершенств в виде поперечных отклонений каркаса сооружения от вертикали и в виде местных изгибных отклонений элементов каркаса, а также порядок учета эффектов второго порядка (влияния деформаций элементов каркаса под нагрузкой).

Также значительный интерес представляют подходы к учету таких локальных несовершенств элемента, как искривления, сварочные напряжения и т. д. Одним из таких подходов можно назвать способ, основанный на применении эквивалентных геометрических несовершенств, особенности которого изложены в приложении С ТКП EN 1993-1-5 [4].

Важно отметить, что при выполнении статических расчетов строгие требования предъявляются к последующей практической реализации узлов с точки зрения соответствия их заданным в расчете жесткостям, вращательной и несущей способности.

Список использованных источников

1. КП EN 1993-1-1:2010. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий.
2. ТКП EN 1993-1-8:2010. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений.
3. Еврокод. Основы проектирования конструкций: ТКП EN 1990-2011. Введ. 01.07.12. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2012. – 94 с.
4. ТКП EN 1993-1-5:2010. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы.