

Юрий Семенович МАРТЫНОВ,
кандидат технических наук,
профессор кафедры "Металлические
и деревянные конструкции" Белорусского
национального технического университета

Виталий Валерьевич НАДОЛЬСКИЙ,
магистр технических наук,
аспирант Брестского государственного
технического университета

ОСОБЕННОСТИ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПО ТКП EN 1993-1-1

SPECIFICS OF STATIC ANALYSIS ACCORDING TO TKP EN 1993-1-1

В статье изложены основные принципы и особенности статического расчета стальных каркасов по ТКП EN 1993-1-1. Рассмотрены вопросы моделирования элементов конструкций, узлов сопряжений, методов выполнения статического расчета, а также представлен порядок учета несовершенств.

The article presents the main principles and features of static calculations of steel frames according to TKP EN 1993-1-1. The issues of simulating the elements of the structures, joint connections, methods of performing the static calculations have been considered and the procedure of taking into account the imperfections has been proposed.

ВВЕДЕНИЕ

С января 2010 г. в Республике Беларусь на альтернативной основе введены технические кодексы установившейся практики (ТКП) по проектированию строительных конструкций, идентичные соответствующим европейским нормам — еврокодам. В связи с этим, представляет интерес вопрос сопоставимости методик расчета по различным техническим нормативным правовым актам (ТНПА), действующим на территории Республики Беларусь.

Авторами статьи рассмотрены основные принципы и особенности статического расчета стальных каркасов, требования к которому изложены в разделе 5 ТКП EN 1993-1-1 [1]. Эти требования регламентируют процедуры моделирования элементов конструкций, узлов сопряжений, методов выполнения статического расчета, а также порядок учета несовершенств. Авторами рассмотрен наиболее простой и чаще всего используемый упругий статический расчет.

1 МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Общие требования к моделированию конструкции для статического расчета изложены в п. 5.1.1(2) ТКП EN 1993-1-1 [1] следующим образом: "Расчетная модель и основные допущения при расчетах должны отражать работу конструкции в соответствующем предельном состоянии с заданной точностью и отражать предполагаемый тип поперечных сечений, элементов, соединений и опорных частей". Исходя из этого, в общем случае расчетная модель должна отражать фактическую жесткость опор, жесткость соединений и наличие несовершенств с допустимой степенью идеализации для конкретного вида предельного состояния. При простоте этого требования реализация его на практике весьма затруднительна. Основные сложности связаны с обоснованием параметров, характеризующих реальное поведение конструкции. ТКП EN 1993-1-1 [1] предоставляет нормативную базу для выбора этих параметров.

При потере местной устойчивости части поперечного сечения (и связанное с ней выключение этой части из состава расчетного сечения) может произойти существенное перераспределение усилий в элементе. Поэтому в статическом расчете этот эффект должен найти отражение. Согласно п. 5.2.1(5) [1], при назначении характеристик поперечного сечения и элемента в целом необходимо учесть эффекты потери местной устойчивости, если они значительно влияют на результаты ста-

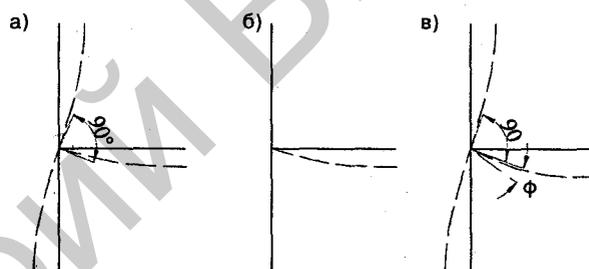


Рис. 1. Типы узлов:
а — жесткий;
б — простой;
в — полужесткий

тического расчета. Степень значимости влияния этих эффектов можно определить по указаниям п. 2.2(5) ТКП EN 1993-1-5 [2], используя отношения площади эффективного сечения к площади "брутто". Эффективное сечение — это сечение, в котором исключена неустойчивая часть элемента сечения, определенная по [2].

При проектировании по [1] различают следующие три типа узлов стальных каркасов (см. п. 5.1.2(2)):

- а) жесткий узел, деформации которого не оказывают влияния на результаты статического расчета;
- б) простой (шарнирный) узел, не передающий изгибающие моменты;
- в) полужесткий (упругоподатливый) узел, деформации которого должны быть приняты во внимание при статическом расчете.

Более детальное определение типов узлов осуществляется по ТКП EN 1993-1-8 [3]. На рис. 1 приведена графическая интерпретация узлов разного типа. На основании этой классификации делается вывод о необходимости учета влияния деформаций узлов на распределение внутренних сил и моментов в конструкции и на суммарные деформации элементов конструктивной системы. Учет взаимодействия основания и конструктивной системы при моделировании конструкции для статического расчета регламентируется в ТКП EN 1997 [4].

2 ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОЙ ГЕОМЕТРИИ КОНСТРУКЦИИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ

2.1 Общие сведения о необходимости учета деформированной геометрии (эффекты второго рода)

В процессе нагружения конструкции происходит изменение геометрической схемы, что может привести

к дополнительным усилиям и их распределению. Поэтому в п. 5.2.1 [1] выделено два типа статического расчета: расчет первого порядка, основанный на начальной геометрии, и расчет второго порядка, учитывающий деформации расчетной схемы. Расчет второго порядка позволяет учесть дополнительные эффекты от деформированной геометрии элементов ("P-δ"-эффекты) и конструкции в целом ("P-Δ"-эффекты).

Наиболее общее представление расчетов первого и второго порядков приведено на рис. 2 для консольного стержня. Эти виды расчетов хорошо известны, но нормативно закрепленные базы для их применения и разграничения отсутствуют. По этой причине, как правило, прибегают к более простому расчету, не учитывая при этом последствия. Применение еврокодов позволяет обоснованно применять тот или иной вид статического расчета.

Согласно п. 5.2.1(3) [1]: "Расчет по теории первого порядка может применяться для конструкции, если увеличением соответствующих внутренних сил или моментов или любым другим изменением работы конструкции, вызванными деформациями, можно пренебречь". Это условие считается выполненным в упругой стадии, если:

$$\alpha_{cr} > 10. \quad (1)$$

При несоблюдении этого условия конструкция должна быть рассчитана с учетом эффектов второго рода, возникающих за счет деформированной геометрии.

2.2 Определение параметра α_{cr}

Параметр α_{cr} , характеризующий чувствительность конструкции к эффектам второго рода, в общем случае можно определить из выражения:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}}, \quad (2)$$

где F_{cr} — критическое воздействие, соответствующее потере общей устойчивости в упругой стадии, определенное на основе начальных упругих жесткостей;

F_{Ed} — расчетное воздействие на конструкцию.

Для рамных каркасов с небольшими уклонами кровли и балочно-стоечных типов плоских рам зданий при незначительном осевом сжатии в ригелях покрытия и перекрытий параметр α_{cr} можно определить согласно п. 5.2.1(4) [1] по формуле

$$\alpha_{cr} = \frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{h}{\delta_{H,Ed}}, \quad (3)$$

где H_{Ed} — суммарное значение расчетных горизонтальных реакций в основании этажа от внешних горизонтальных нагрузок и фиктивных горизонтальных нагрузок;

V_{Ed} — суммарное расчетное вертикальное усилие в основании этажа;

h — высота этажа;

$\delta_{H,Ed}$ — горизонтальное смещение верха этажа относительно основания этажа при действии горизонтальных нагрузок, в том числе фиктивных горизонтальных нагрузок, приложенных на уровне каждого этажа.

Для более простого определения параметра α_{cr} можно применять следующие допущения:

— допущение (1): при вычислении F_{cr} для многоэтажных каркасов достаточно смоделировать конструкцию с узловой нагрузкой, игнорируя изгибающие моменты, вызванные распределением нагрузки. Однако, вычисляя α_{cr} для большепролетных рам, в которых может быть существенное увеличение осевого сжатия в ригелях,

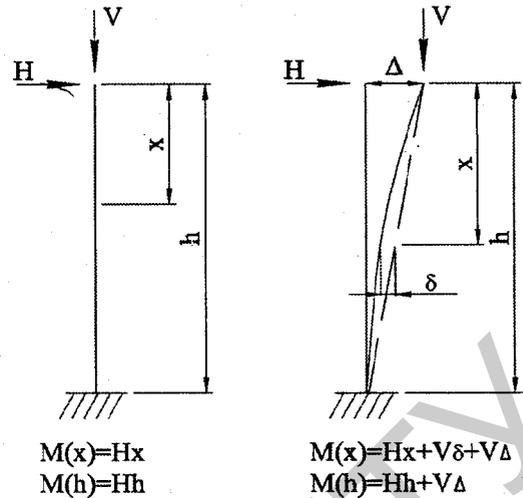


Рис. 2. Расчетные схемы стержня при расчете первого и второго порядков

при моделировании должен быть учтен характер распределения нагрузки;

— допущение (2): уклон кровли можно считать малым, если его значение не более чем 1:2 (26°);

— допущение (3): осевое сжатие в ригелях покрытия и перекрытий существенно, если:

$$\bar{\lambda} = 0,3 \cdot \sqrt{\frac{Af_y}{N_{Ed}}}, \quad (4)$$

где $\bar{\lambda}$ — условная гибкость в плоскости рамы, вычисленная для ригеля, с шарнирным закреплением по концам и длиной, равной конструктивной длине;

N_{Ed} — значение расчетной силы сжатия.

2.3 Расчет конструкции с учетом деформированной геометрии

В случае чувствительности конструкции к эффектам второго рода статический расчет в упругой стадии должен их учитывать. Эффекты второго рода в плоскости рамы могут быть учтены одним из следующих способов:

— расчетом первого порядка с использованием коэффициента поперечного отклонения;

— расчетом первого порядка с использованием итерационного метода;

— расчетом первого порядка с использованием расчетной длины, основанной на форме общей потери устойчивости, сопровождаемой поперечным отклонением;

— расчетом второго порядка с соответствующими начальными несовершенствами.

Расчет, основанный на расчетной длине, представляет собой хорошо знакомую методику, применяемую в СНиП II-23 [5].

Расчет первого порядка с использованием коэффициента поперечного отклонения

Это один из наиболее простых методов, позволяющих учесть эффекты второго рода, но он имеет свои ограничения. Метод учитывает только те эффекты второго рода, которые возникают при поперечном отклонении конструкции (т. е. только "P-Δ"-эффекты). Для одноэтажных рам данный метод применим при малых уклонах кровли, если осевое сжатие в ригелях не существенно и $\alpha_{cr} \geq 3,0$. Для многоэтажных рам дополнительно к перечисленным ограничениям добавляется требование, чтобы для всех этажей было одинаковое распределение вертикальных и горизонтальных нагрузок, а распределение жесткостей элементов было пропорционально приложенным к этажу поперечным силам.

Данный метод реализуется следующим образом. Выполняется упругий статический расчет первого по-

рядка на внешние вертикальные нагрузки и увеличенные горизонтальные нагрузки путем умножения на коэффициент поперечного отклонения. При этом горизонтальные нагрузки могут представлять собой как внешние горизонтальные нагрузки H_{Ed} (например, ветровые), так и эквивалентные нагрузки $V_{Ed} \phi$, обусловленные несовершенствами конструкции (несовершенства рассмотрены ниже).

Коэффициент поперечного отклонения определяется по следующей формуле

$$\frac{\alpha_{cr}}{\alpha_{cr} - 1} \quad (5)$$

Расчет первого порядка с использованием итерационного метода

Этот метод, как и метод, основанный на коэффициенте поперечного отклонения, позволяет учесть только "P-Δ"-эффекты.

Общий порядок расчета по данному методу может быть представлен следующим образом. Вначале выполняется упругий статический расчет первого порядка со всеми нагрузками ($V + H$) и, если необходимо, учитывая эквивалентные нагрузки ($\phi_{init} V$), заменяющие начальные несовершенства поперечного отклонения (ϕ_{init} — начальное поперечное отклонение, установленное в [1]). Из этого расчета получают значения угла поперечного отклонения ϕ_i каждого сжатого элемента и внутренние усилия (рис. 3).

На второй итерации поперечное отклонение ϕ_i для каждого сжатого элемента заменяется парой эквивалентных сил $\phi_i N_{Ed,i}$, и выполняется упругий статический расчет первого порядка на те же нагрузки, но с учетом дополнительных сил $\phi_i N_{Ed,i}$ ($N_{Ed,i}$ — сжимающее усилие), приложенных по концам каждого сжатого элемента. На основании этого расчета уточняются значения внутренних усилий и угол поперечного отклонения ϕ_i для каждого сжатого элемента рамы (рис. 4).

Если сходимость значений перемещений и внутренних усилий не достигнута, то переходят к следующей итерации.

В общем случае достаточно три итерации для достижения весьма приемлемой сходимости. В конце процесса внутренние силы и моменты, а также смещения можно рассматривать как полученные расчетом второго порядка, т. е. расчетом по деформированной расчетной схеме.

Расчет первого порядка с использованием расчетной длины (метод эквивалентной колонны)

Статический расчет выполняется по недеформируемой расчетной схеме и без учета несовершенств. Последние учтены в расчетных формулах проверки устойчивости отдельных элементов конструктивной схемы.

Значения расчетных длин устанавливаются исходя из формы общей потери устойчивости рамы с учетом жесткостей элементов и соединений, наличия пластических шарниров и распределения сжимающих усилий при действии распределенных нагрузок.

3 УЧЕТ НЕСОВЕРШЕНСТВ

В реальных конструкциях существуют неизбежные начальные несовершенства, включая остаточные напряжения и геометрические несовершенства. Их можно учесть либо с помощью корректировок расчетных формул, либо непосредственным учетом при статическом расчете, как это показано ниже.

При расчете рам, чувствительных к потере устойчивости, сопровождается поперечным отклонением, эффект несовершенств учитывается посредством расчета рамы с эквивалентным несовершенством в виде начального поперечного отклонения ϕ_{init} и местных изгибных отклонений δ элементов.

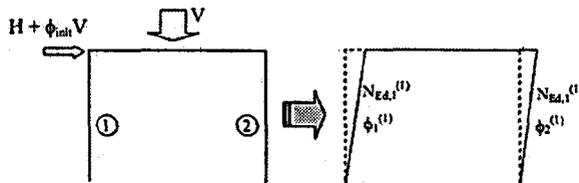


Рис. 3. Первая итерация расчета

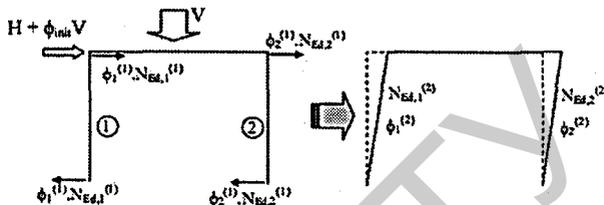


Рис. 4. Вторая итерация расчета

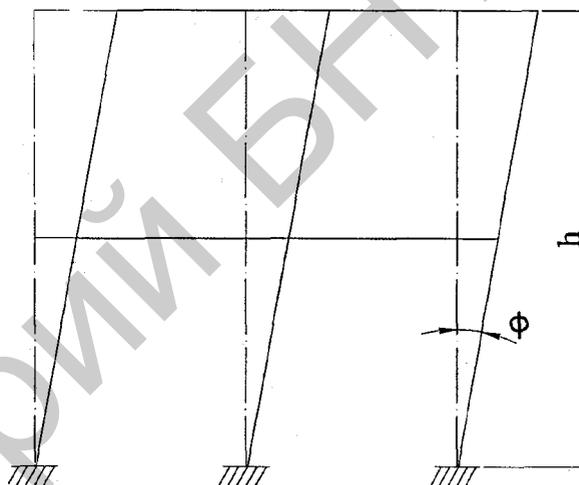


Рис. 5. Общие начальные несовершенства в виде поперечного отклонения

Общие начальные несовершенства в виде поперечного отклонения определяются из выражения

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m, \quad (6)$$

где ϕ_0 — основное значение, принимаемое $\phi_0 = 1/200$;

α_h — понижающий коэффициент, учитывающий высоту колонн h :

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ но не менее } 2/3 \text{ и не более } 1,0;$$

α_m — понижающий коэффициент, учитывающий количество колонн в ряду:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)};$$

m — количество колонн в ряду.

Рассматриваются только колонны, воспринимающие вертикальную силу N_{Ed} , равную не менее 50 % среднего значения, приходящегося на каждую колонну ряда. Для рамных каркасов зданий несовершенствами в виде поперечных отклонений можно пренебречь, если $H_{Ed} \geq 0,15V_{Ed}$. Начальные поперечные отклонения следует рассматривать в любом горизонтальном направлении, но одновременно учитывается только одно из направлений. В многоэтажных балочно-стоечных каркасах здания эквивалентные силы следует прикладывать на уровне каждого этажа и в уровне покрытия. Также подлежат рассмотрению возможные эффекты закручивания

конструкции, вызванные асимметричными поперечными отклонениями двух противоположных граней (см. рис. 5.5 [1]).

Начальные местные изгибные несовершенства элементов рам при плоской форме потери устойчивости представлены как e_0/L , где e_0 — выгиб элемента. Рекомендуемые значения приведены в таблице 5.1 [1].

Для рам, чувствительных к эффектам второго рода, местные изгибные отклонения должны быть введены в расчет рамной конструкции для каждого сжатого элемента, если:

- существует хотя бы одно соединение, воспринимающее момент в конце элемента;
- условная гибкость в плоскости рамы $\bar{\lambda}$, вычисленная для элемента с шарнирами по концам, должна быть не менее $0,5\sqrt{Af_y/N_{Ed}}$.

Начальные поперечные отклонения и начальные местные изгибные отклонения могут быть заменены системами эквивалентных горизонтальных сил, приложенных к каждой из колонн (см. рис 5.4 [1]).

4 АЛГОРИТМ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Для более наглядного представления выше изложенной информации на рис. 6 приведена блок-схема упругого статического расчета по ТКП EN 1993-1-1 [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Действующая нормативная база Республики Беларусь по проектированию стальных конструкций ограничивается общими указаниями по выполнению статического расчета. Согласно п. 1.8 [5], расчетные усилия (изгибающие моменты, продольные и поперечные силы) следует определять в предположении упругих деформаций стали по недеформируемой схеме (расчет первого порядка). Допускается производить расчет по деформируемой схеме, учитывающей влияния перемещений конструкции под нагрузкой.
- 2 Введенный в действие с 01.01.2010 технический кодекс ТКП EN 1993-1 содержит указания по выполнению статических расчетов стальных каркасов в различной постановке: от простейшего упругого расчета до пластического расчета с учетом геометрической и физической нелинейности.
- 3 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).
- 4 Важно отметить, что при выполнении статических расчетов строгие требования предъявляются к последующей практической реализации узлов с точки зрения соответствия их заданным в расчете жесткости, вращательной и несущей способности. Этот аспект детально рассмотрен в ТКП EN 1993-1-8 [3].

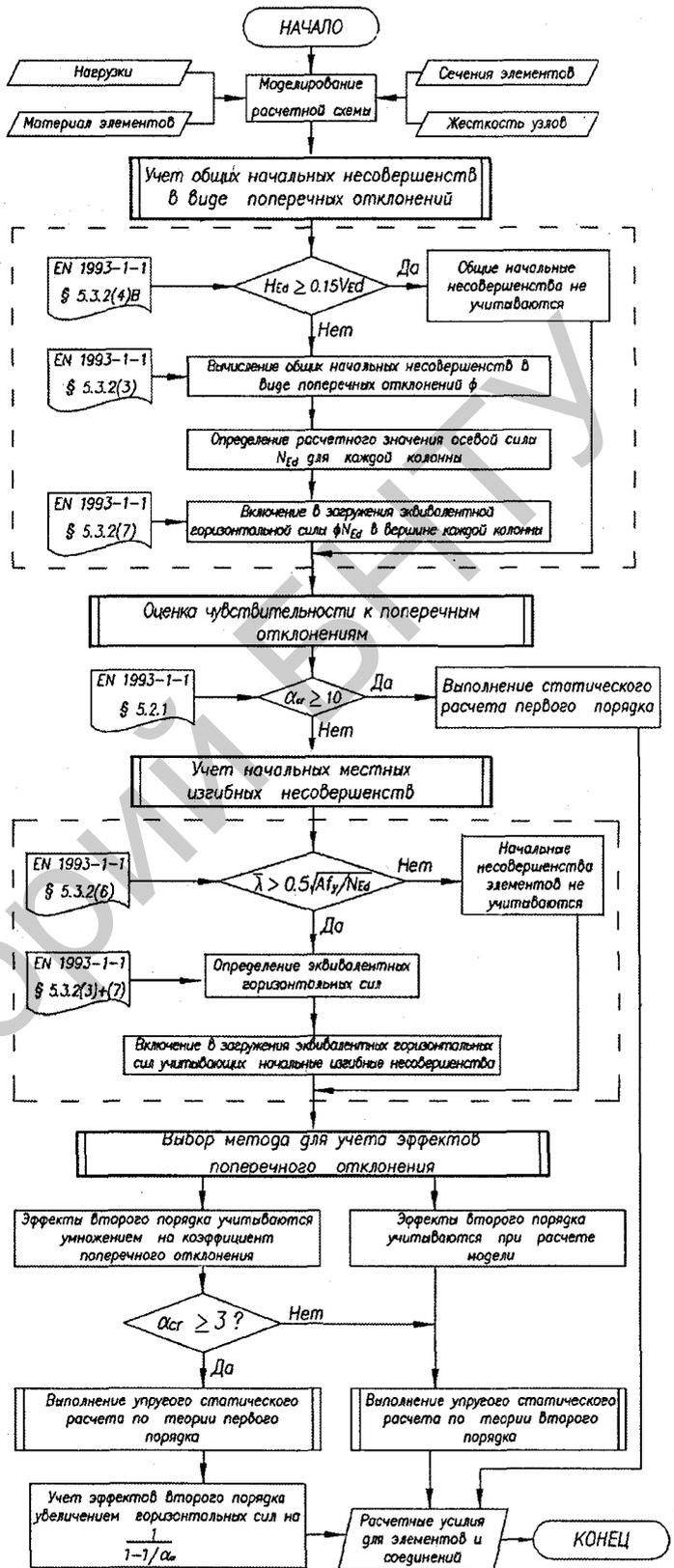


Рис. 6. Блок-схема статического расчета с учетом эффектов второго рода и начальных несовершенств

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1993-1-1:2010. Еврокод 3.
2. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы: ТКП EN 1993-1-5:2010. Еврокод 3.
3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений: ТКП EN 1993-1-8:2010. Еврокод 3.
4. Геотехническое проектирование: ТКП EN 1997:2010. Еврокод 7.
5. Стальные конструкции: СНиП II-23-81*. — ЦИТП Госстроя СССР, 1991. — 96 с.

Статья поступила в редакцию 16.11.2010.