

**ВОПРОСЫ ПЕРЕХОДА НА ЕВРОПЕЙСКИЕ НОРМЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

(г. Минск, СФ БНТУ — 30.11.2010)

УДК 69+624.014.2

***СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАК ЧАСТЬ СИСТЕМЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПО ТКП ЕН 1993-1-1***

МАРТЫНОВ Ю. С., ЛАГУН Ю. И., НАДОЛЬСКИЙ В. В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В статье рассмотрены основные принципы и особенности статического расчета стальных каркасов по ТКП ЕН 1993-1-1 [1]. Затронуты вопросы моделирования элементов конструкции, узлов сопряжений, методов выполнения статического расчета, а также порядок учета несовершенств.

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 ТНПА, действующим на территории Республики Беларусь. Основные принципы, особенности статического расчета стальных каркасов и требования к нему изложены в разделе 5 ТКП ЕН 1993-1-1 [1]. Они регламентируют процедуры моделирования элементов конструкции, 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 [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, соединений и несовершенства с допустимой степенью идеализации для конкретного вида предельного состояния. При простоте этого требования реализация его на практике весьма затруднительна. Основные трудности связаны с обоснованием параметров, характеризующих реальное поведение конструкции. ТКП [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 этот эффект должен быть учтён при выполнении статического расчета. Согласно п.5.2.1(5) ТКП [1] при назначении характеристик поперечного сечения и элемента в целом необходимо учесть эффекты потери местной устойчивости, если они значительно влияют на результаты статического расчета. Степень значимости влияния этих эффектов можно определить по указаниям п.2.2 (5) ТКП [2], используя отношения площади эффективного сечения к площади «брутто». Эффективное сечение — это сечение, в котором исключена неустойчивая часть элемента сечения, определенная по ТКП [2].

При проектировании по ТКП [1] различают следующие три типа узлов (см. п. 5.1.2 (2): *а) жесткий узел*, деформации которого не оказывает 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 [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 [4].

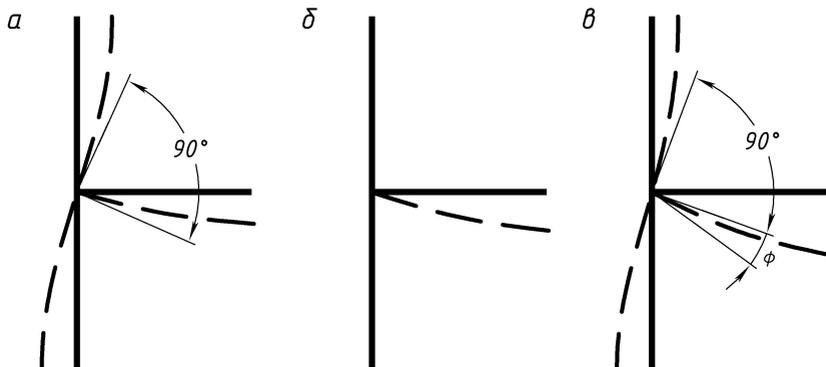


Рис. 1. Типы узлов:

а — жесткий; *б* — простой; *в* — полужесткий

2. Влияние деформированной геометрии конструкции при статическом расчете

Общие сведения

В процессе нагружения конструкции происходит изменение геометрической схемы, что может привести к дополнительным усилиям и их распределению. Поэтому в п. 5.2.1 ТКП [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 представления расчетов первого и второго порядков представлено на рис. 2 для консольного стержня.

Эти виды расчетов хорошо известны, но нормативно закрепленной базы для применения и разграничения этих видов расчета от-

сутствуют. По этой причине, как правило, прибегают к более простому расчету, не учитывая при этом последствия. Применение Еврокодов позволяет обосновано применять тот или иной вид статического расчета.

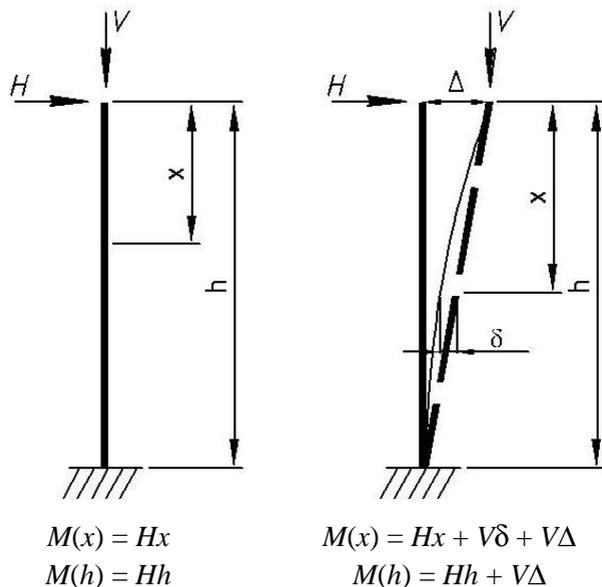


Рис. 2. Расчетные схемы стержня при расчете первого и второго порядка

Согласно п.5.2.1(3) ТКП [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 $\alpha_{cr} > 10$.

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

Определение параметра α_{cr}

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

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}},$$

где F_{Ed} — расчетное воздействие на конструкцию;

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

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) ТКП [1] по формуле:

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right),$$

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

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

h — высота 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, 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

$$\bar{\lambda} \geq 0.3 \sqrt{\frac{Af_y}{N_{Ed}}},$$

где N_{Ed} — значение расчетной силы сжатия;

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

3. Расчет конструкции с учетом деформированной геометрии

В случаи 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 [5].

Расчет первого порядка с использованием «коэффициента поперечного отклонения»

Это один из наиболее простых методов, позволяющий учесть эффекты второго рода, но он имеет свои ограничения. Он учитывает только те эффекты второго рода, которые возникают при поперечном отклонении конструкции (т.е. только $P-\Delta$ 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 порядка 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} ϕ , обусловленные несовершенствами конструкции (несовершенства рассмотрены ниже).

Коэффициент поперечного отклонения определяется по следующей формуле:

$$\frac{\alpha_{cr}}{\alpha_{cr} - 1}.$$

Расчет первого порядка с использованием итерационного метода

Этот метод, как и метод, основанный на коэффициенте поперечного отклонения, позволяет учесть только $P-\Delta$ 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 ϕ_{init} поперечного отклонения. Из этого расчета получают значения угла поперечного отклонения ϕ_i каждого сжатого элемента и внутренние усилия.

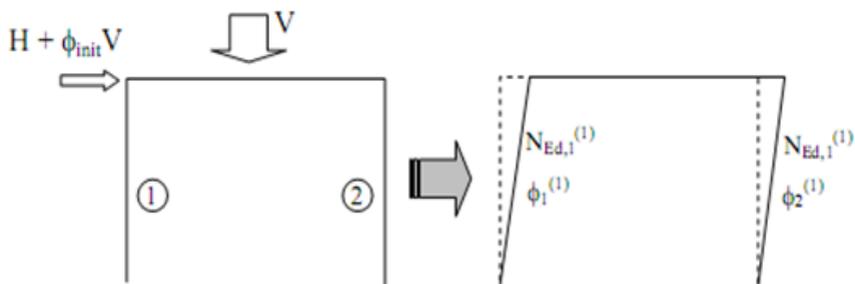


Рис. 3. Первая итерация расчета

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 $\phi_i N_{Ed,i}$ ($N_{Ed,i}$ — продольная сила), 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.

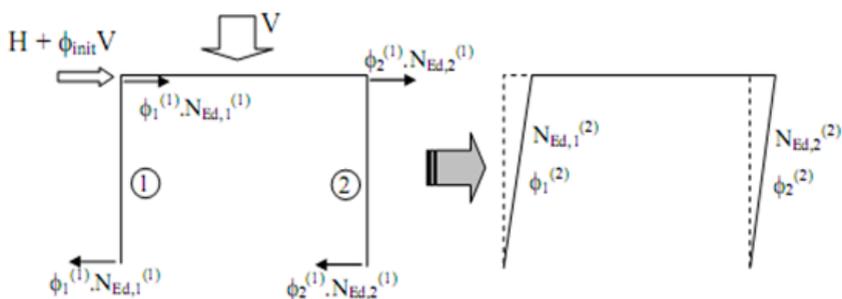


Рис. 4. Вторая итерация расчета

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

В общем случае достаточно 3 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 распределение сжимающих усилий при действии распределенных нагрузок.

4. 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, сопротивляемой поперечным отклонением, эффект несовершенств учитывается посредством расчета рамы с эквивалентным несовершенством в виде начального поперечного отклонения ϕ_1 и местных изгибных отклонений δ элементов.

Общие начальные несовершенства в виде поперечного отклонения определяются из выражения

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m,$$

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

α_h — понижающий коэффициент, учитывающий высоту колонн h :

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

α_m — понижающий коэффициент, учитывающий количество колонн в ряду:

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

Здесь 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 ТКП [1]).

Начальные *местные изгибные несовершенства* элементов рам при плоской форме потери устойчивости, представлены в виде: e_0/L , где e_0 — выгиб элемента.

Рекомендуемые значения приведены в табл. 5.1 ТКП [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 $0,5 \sqrt{\frac{Af_y}{N_{Ed}}}$.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Действующая нормативная база Республики Беларусь по проектированию стальных конструкций ограничивается общими указаниями по выполнению статического расчета. Согласно п. 1.8 СНиП [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.

Введенный в действие с 01.01.2010 технический кодекс ТКП ЕН 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.

Практическое значение имеют рекомендации по учету 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).

Важно отметить, что при выполнении статических расчетов строгие требования предъявляются к последующей практической реализации узлов с точки зрения соответствия их заданных в расчете жесткостей, вращательной и несущей способности. Этот аспект детально рассмотрен в ТКП [3].

ЛИТЕРАТУРА

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