

Мерзлякова Юлия Владимировна, Магистрант,
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ НА ПРИМЕР РАСЧЕТА СВОБОДНОЙ ДВУХЭТАЖНОЙ РАМЫ

Аннотация: В статье детально описаны основные принципы и формулы, используемые в американской методике ручного расчета на устойчивость, и проведен численный анализ устойчивости конструкции на примере свободной двухэтажной рамы. Результаты показывают, что российские нормы зачастую приводят к повышенному запасу прочности, что может повышать стоимость и трудоемкость проектов. Выводы подчеркивают, что все представленные в статье методы расчета на устойчивость могут быть использованы в рамках российских норм.

Ключевые слова: Устойчивость, свободная рама, зарубежные методы расчета, метод прямого анализа, коэффициент расчетной длины.

Расчет устойчивости является одним из ключевых аспектов проектирования металлических конструкций, так как обеспечивает их безопасность и надежность, а также способствует экономической эффективности, предотвращению аварийных ситуаций и позволяет применять инновационные решения в строительстве.

Стальные рамы широко используются в различных инженерных сооружениях благодаря своим высоким прочностным характеристикам и относительной легкости монтажа. Для обеспечения безопасности и долговечности таких конструкций необходимо учитывать особенности их расчета на устойчивость в соответствии с действующими нормативными документами.

В различных странах существуют свои национальные нормы проектирования стальных конструкций, которые могут существенно различаться по подходам и методологиям. В данной статье приводится сравнительный анализ методов расчета на устойчивость, принятых в России и США. Российские нормы, представленные в [1] и [2], и американские стандарты, такие как [3], предлагают различные методы и допущения для оценки устойчивости стальных стержневых систем.

Необходимость обращения к зарубежным нормам вызвана тем, что в российских нормах представлено лишь ограниченное количество расчетных схем. Это ограничивает возможности проектирования и зачастую затрудняет процесс идентификации конкретной конструкции с одной из представленных в нормах расчетных схем. Такое положение дел делает расчет устойчивости по СП трудоемким, а достоверность результатов вызывает вопросы. Решение этого вопроса можно найти в литературе, например, используя справочник Лейтеса, но представлено оно в виде достаточно громоздких графиков и номограмм, точность которых, к тому же, зависит от невысокого качества печати. В то же время, результаты расчетов по отечественным нормам часто приводят к значительному запасу прочности, что, с одной стороны, обеспечивает высокий уровень безопасности, но также может и приводить к увеличению затрат и сложности в реализации проектов [4].

Американские нормы [3], напротив, предлагают более гибкие подходы (без ограничений в представленных схемах), что позволяет оптимизировать проектирование и снижать затраты без ущерба для безопасности. С развитием компьютерных технологий



помимо ручных расчетов стало возможным также применение метода прямого анализа, который позволяет выполнять сложные расчеты без больших временных затрат. На примере расчета свободной двухэтажной стальной рамы в статье рассматриваются основные различия в подходах, используемых в российских и американских нормах как для ручных так и для МКЭ расчетов. Проводится численный анализ устойчивости конструкции по обеим методикам, что позволяет выявить их сильные и слабые стороны.

Для сравнения методов расчета выбрана схема, представленная в табл. 31 [1]. Рассчитаем раму, представленную на рисунке 1.

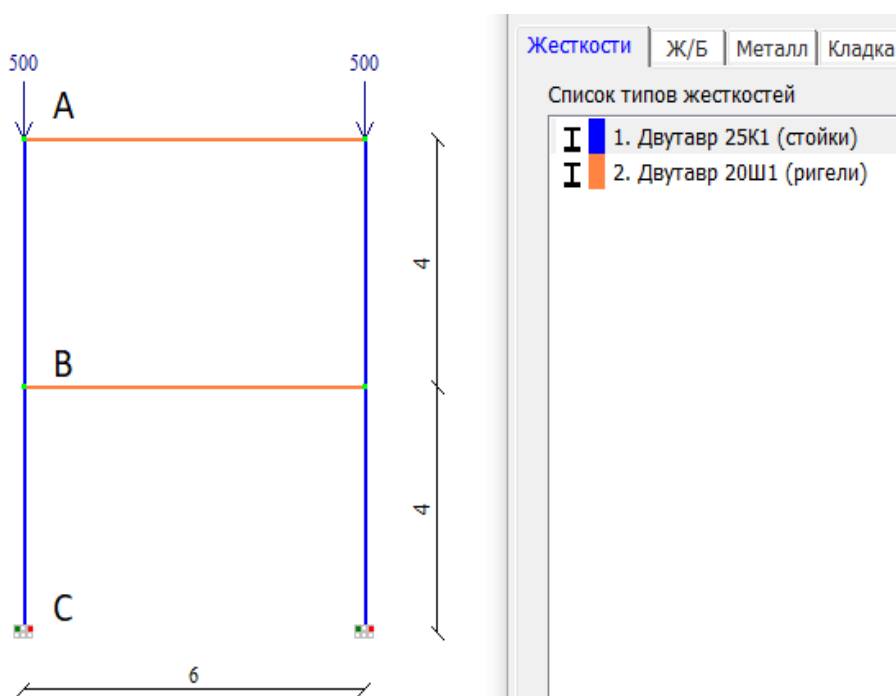


Рисунок 1 – 2-этажная свободная рама

Для начала выполним расчет колонны первого этажа по [1]. Результаты расчета сведены в таблицу 1 с учетом того, что $p_1 = 0$, $p_2 = 0$, $n_2 = 0$, так как рама однопролетная. Здесь и далее для упрощения расчетов критическая сила рассчитывается по формуле Эйлера.

Таблица 1

Расчет колонны однопролетной двухэтажной рамы по методике [1].

Величина	Формула	Ед. изм.	Результат
Колонна BC			
p	$\frac{2k(p_1 + p_2)}{k + 1}$	-	0
n_1	$\frac{I_{gB} \cdot l_c}{I_c \cdot l_1}$	-	0.196
n	$\frac{k(n_1 + n_2)}{k + 1}$	-	0.098
μ_{BC}	$\frac{(p + 0.68) \cdot \sqrt{n + 0.22}}{\sqrt{0.68p \cdot (n + 0.08)(p + 0.9) + 0.1n}}$	-	3.877
P_{cr}	$\frac{\pi^2 EI_c}{(l_{c\mu_{BC}})^2}$	кН	775,4



Расчеты по [2] сведены в таблицу 2

Таблица 2

Расчет колонны однопролетной двухэтажной рамы по методике [2].

Величина	Формула	Ед. изм.	Результат
Колонна AB			
G_A	$\frac{E_c I_c / L_{cAB}}{E_g I_g / L_g}$	-	5.114
$G_{B,AB}$	-	-	∞
K_{AB}	$\frac{G_A G_{B,AB} (\pi/K)^2 - 36}{6 (G_A + G_{B,AB})} - \frac{\pi}{\tan(\frac{\pi}{K})} = 0$	-	3.45
P_{crAB}	$\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_c}{(L_{cAB} \cdot K_{AB})^2}$	кН	979.27
Колонна BC			
$G_{B,BC}$	$\frac{E I_c}{L_{cBC}} \cdot \frac{E I_g}{L_g}$	-	5.114
G_C	-	-	∞
K_{BC}	$\frac{G_C G_{B,BC} (\pi/K)^2 - 36}{6 (G_C + G_{B,BC})} - \frac{\pi}{\tan(\frac{\pi}{K})} = 0$	-	3.45
P_{cr}	$\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_c}{(L_{cBC} \cdot K_{BC})^2}$	кН	979.27

Результаты линейного расчета рамы на устойчивость в ПК Лира-САПР представлены на рисунке 2.

1.РСН1(СП 20.13330.2011/2016_1)
 Форма потери устойчивости в гл. с. 1
 Устойчивость. Анализ чувствительности
 Коэффициент 1.9545

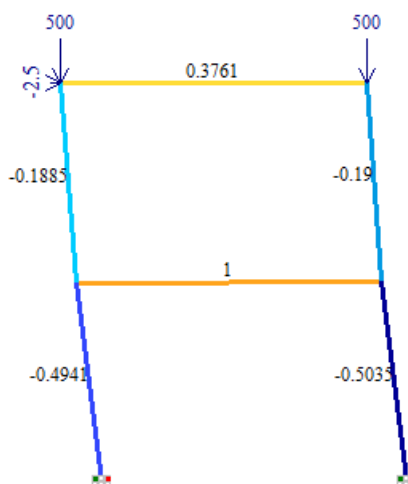


Рисунок 2 – Результаты линейного расчета



Тогда критическая нагрузка будет равна $P_{cr} = 500 \cdot 1.95 = 975$ кН. Из анализа чувствительности также видно, что колонны первого этажа наиболее подвержены потере устойчивости. Коэффициенты расчётных длин представлены на рисунке 3.

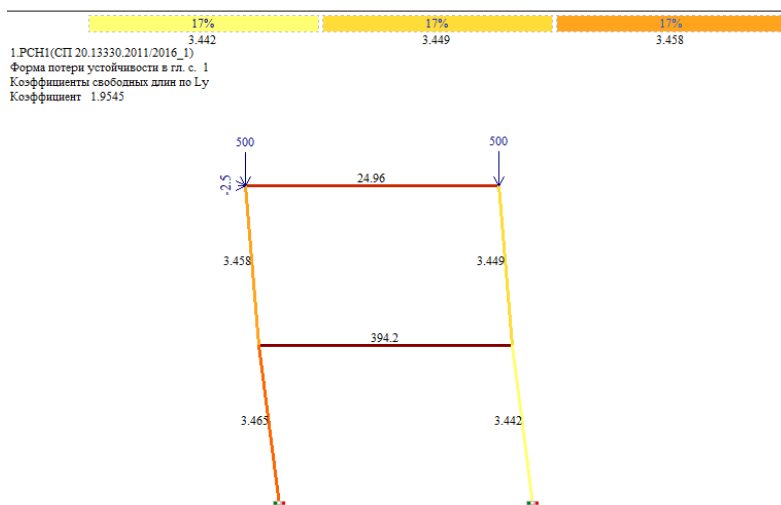


Рисунок 3 – Коэффициенты свободных длин

Далее был выполнен нелинейный расчет в ПК Лира-САПР. Методика расчета соответствует [3], а также подробно описана в статье [5]. График зависимости перемещения от нагрузки при нелинейном расчете представлен на рисунке 4.

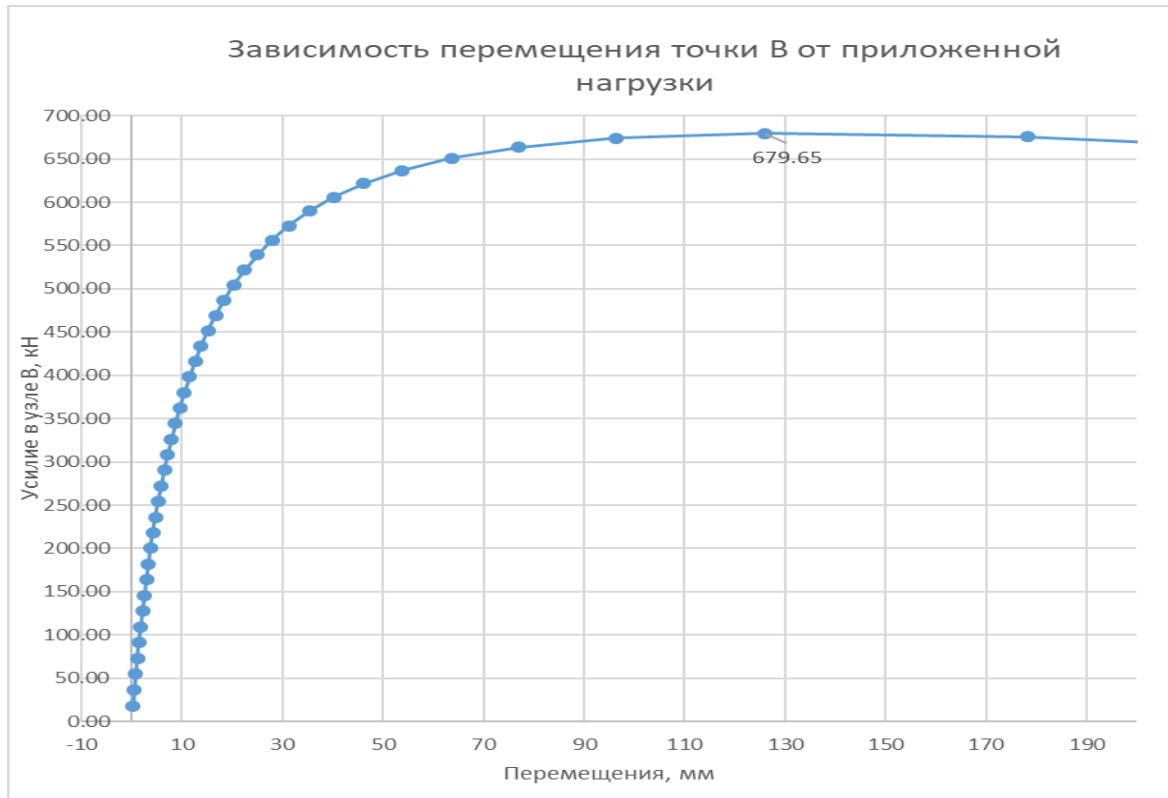


Рисунок 4 – График зависимости перемещения узла В от приложенной нагрузки



Из рисунка видно, что максимальное усилие в узле В составляет 680 кН.
Итоговые результаты расчета сведены в таблицу 3.

Таблица 3
Результаты расчета

Параметр	Ручные расчеты		МКЭ в Лира-САПР	
	μ по СП	K по AISC	КЗУ (линейный расчет МКЭ)	Нелинейный расчет с моделированием несовершенств
μ	3,877	3.45	-	-
КЗУ	-	-	1,95	1,36
P_{cr} , кН	775.4	979.3	975	680

Из таблицы видно, что результаты линейного анализа в ПК Лира-САПР совпадают с ручным расчетом по методике [2]. А результаты расчетов по методу прямого анализа и по СП оказались более консервативными (в запас) на 43,3% и 25,7% соответственно. Разница результатов с методом прямого анализа объясняется фактом учета физической нелинейности путем понижения жесткости элементов на 20%.

Таким образом, из всего вышесказанного можно сделать вывод, что все из перечисленных методов расчета на устойчивость могут применяться в рамках действующих норм РФ, и в некоторых случаях их применение обусловлено также менее трудоемким расчетом.

Список литературы:

1. СП 16.13330.2017. Свод правил. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*.
2. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14474/> (Дата обращения 10.04.2024)
3. СП 294.1325800.2017. Свод правил. Конструкции стальные. Правила проектирования.
4. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/15053/> (Дата обращения 10.04.2024)
5. AISC 360-22 Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Inc., August 1, 2022.
6. Видео «LIRA 10 | Расчётные длины стальных стоек с неполными связями». URL: https://www.youtube.com/watch?v=sBTGcSlsm_I&t=585s (Дата обращения 15.04.2024)
7. Мерзлякова Ю.В. Обзор методов расчета на устойчивость стальных стержневых элементов. / Сборник статей магистрантов и аспирантов. В 2-х томах. Том 1. Выпуск 6. – Санкт-Петербург, 2023.

