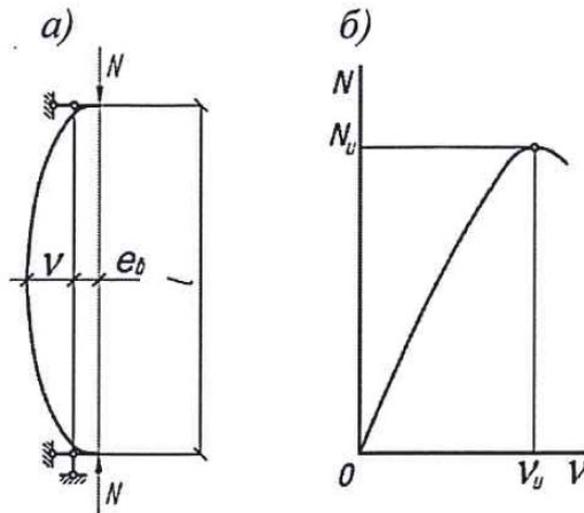


**ТЕСТОВЫЕ РАСЧЕТЫ ЦЕНТРАЛЬНО И ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ
ФИЗИЧЕСКОЙ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ
В ПРОГРАММЕ SCAD++ 21.1.9.5.**

А. В. Теплых

При использовании в практике проектирования расчетов стальных конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности без применения аппарата расчетных длин весьма полезным представляется проведение тестовых расчетов для понимания и настройки технологии выполнения таких расчетов. Для расчета стальных конструкции одним из комплектов тестов могут быть расчеты центрально и внецентренно сжатых элементов стальных конструкций по нормам [1] на основании методики нормирования коэффициентов устойчивости φ и φ_e , приведенной в [2] (п. 7.1.7, 7.1.8, 7.3.2).

Коэффициенты φ и φ_e согласно [2] определяются по формуле $\varphi = \min\left(\frac{N_u}{AR_y}; \frac{N_e}{AR_y\gamma_e}\right) = \min\left(\frac{N_u}{AR_y}; \frac{\pi^2}{1,3\lambda^2}\right)$, где N_u – предельное значение сжимающей силы (см. рис. 1 б), $N_e = \frac{\pi^2 EI}{l_{ef}^2}$ – критическая сила по Эйлеру, $\gamma_e=1,3$ – коэффициент надежности. Для центрально сжатых стержней также учитываются начальные искривления и случайные эксцентриситеты, принятые в соответствии с установленными ГОСТ 23118 и СП 70.13330 и определяемые как $e_b = \frac{i}{20} + \frac{l}{750}$.



*а – расчетная схема; б – кривая состояния равновесия
Рисунок 1 – К расчету сжатых стержней*

Одним из способов оценки несущей способности системы может быть нахождение начала резкого роста характерных деформации на одном из шагов итерационного процесса по аналогии нахождения N_u на кривой равновесного состояния при нормировании коэффициентов φ и φ_e в [2] (см. рис. 1 б). Также на рис. 3 приведен график из приложения Г [3] с зависимостью максимальных

перемещений алюминиевого моста $\delta(\vec{P})$ от вектора приложенных нагрузок, согласно которому вблизи точки b выполняется критерий исчерпания несущей способности, когда минимальному приращению аргумента \vec{P} соответствует несоизмерно большое приращение функции δ .

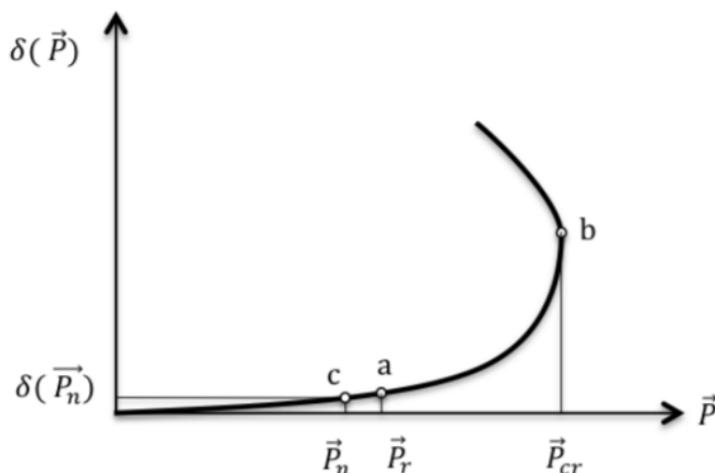


Рисунок 3 – График работы моста согласно приложению Г СП 443.1325800.2019

Согласно [3] проверку выполняют на основе выражения $\gamma = \frac{\vec{P}_{cr}}{\vec{P}_r} \geq [\gamma]$, где \vec{P}_{cr} и \vec{P}_r соответственно предельная и действующая величина нагрузок, а $[\gamma]$ – критерий допустимости эксплуатации моста при случайном превышении расчетных нагрузок, значение которого устанавливается в задании на проектирование.

Тестовые расчеты, выполненные в SCAD++ с учетом геометрической и физической нелинейности для центрально- и внецентренно-сжатых элементов согласно расчетной схеме по рис. 1а, как с применением стержневых, так и оболочечных элементов, показывают достаточно хорошее совпадение полученных результатов с расчетами по нормам [1]. Поскольку пока в SCAD++ не реализованы конечные элементы, позволяющие учесть одновременно и физическую и геометрическую нелинейность, то учет геометрической нелинейности производился путем сохранения деформированной схемы при нагрузке, рассчитанной по нормам [1]. На рис. 2-5 приведены результаты определения предельного усилия N_u в SCAD++ с учетом физической нелинейности деформированной расчетной схемы, сохраненной после расчета с учетом геометрической нелинейности, и сравнение результатов расчета с расчетами по нормам [1] и результатами расчета в программе Nastran, приведенными в статье [4].

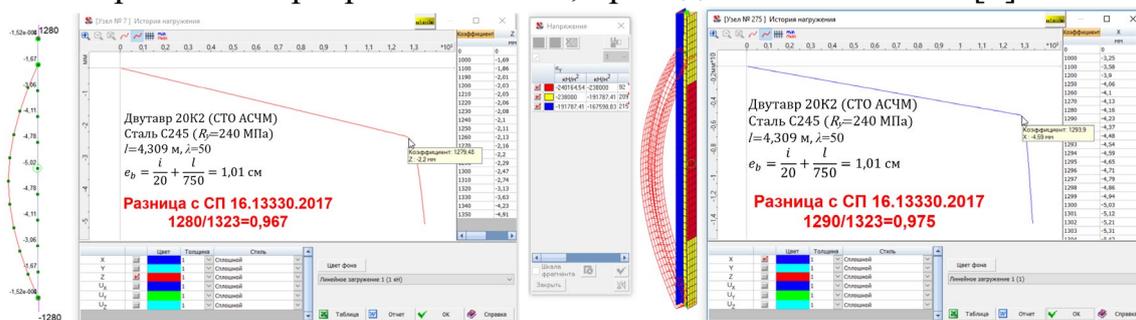


Рисунок 2 – Тестовые модели центрально сжатого элемента при гибкости $\lambda=50$.

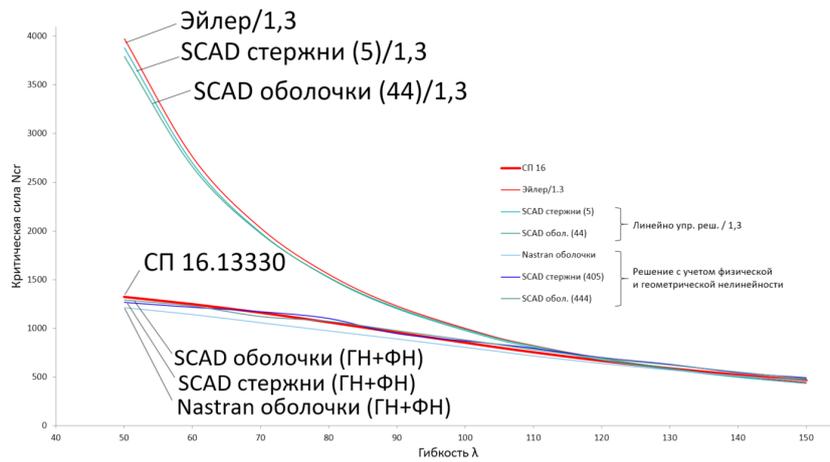


Рисунок 3 – Результаты тестовых расчетов центрально сжатых элементов.

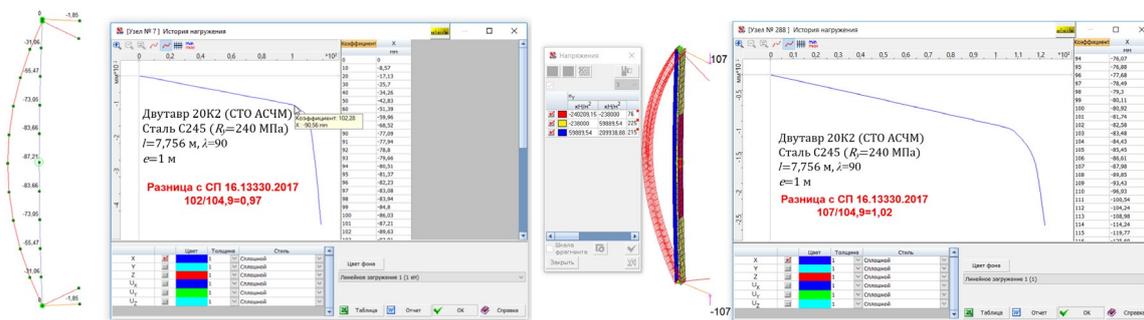


Рисунок 4 – Тестовые модели внецентренно сжатого элемента при гибкости $\lambda=90$.

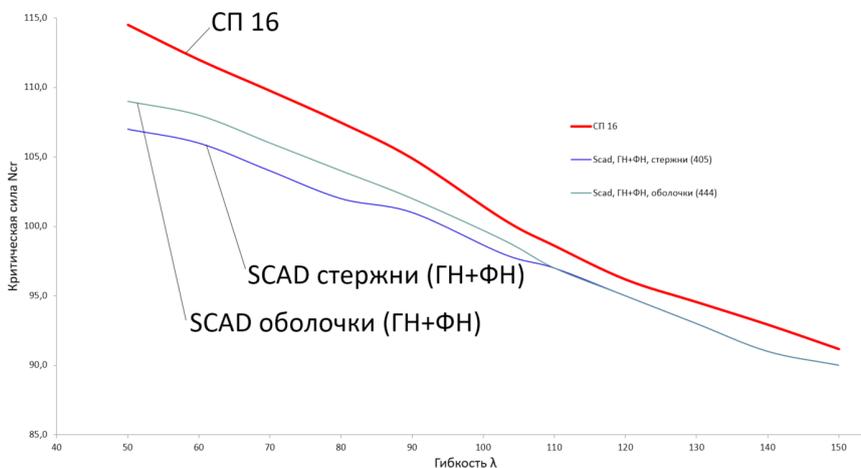


Рисунок 5 – Результаты тестовых расчетов внецентренно сжатых элементов

Для большинства конструкций расчет с учетом физической и геометрической нелинейности без применения аппарата расчетных длин представляется пока затруднительным по ряду причин, многие из которых обозначены в статье [5]. Однако при расчете рам из сварных двутавров с переменной высотой стенки подобные расчеты несущей способности, включающие в том числе и расчет на устойчивость в плоскости рамы с применением даже стержневой модели, уже вполне могут выполняться в процессе обычного проектирования, тем более, что такие расчеты позволяют избежать затруднений при определении расчетных длин, возникающих при расчете по нормам или в дополнение к расчетам по нормам с использованием расчетных длин повысят надежность расчетного обоснования. Результаты расчета несущей способности рамы приведены на рисунке 5. Разница с

расчетом на устойчивость по нормам с применением расчетных длин составила 19,5% в сторону увеличения несущей способности, что можно объяснить в том числе и недогрузкой части элементов рамы.

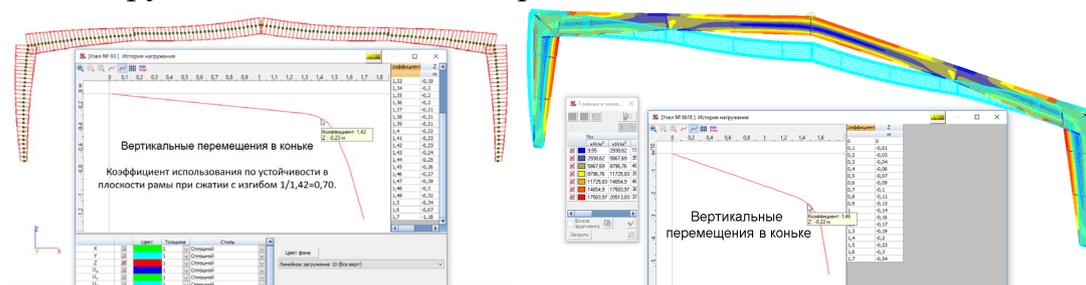


Рисунок 5 – Результаты расчета несущей способности (устойчивости в плоскости) рамы из сварных двутавров с переменной высотой стенки

Для выполнения калибровки модели с целью учета возможных неучтенных эффектов в расчетной модели относительно норм был выполнен тестовый расчет элемента колонны рамы по сечению в стыке с ригелем (рис. 6) с длиной стержня, равной расчетной длине рассмотренного элемента колонны, который показал отношение полученной критической нагрузки к критической по нормам равен 1,06 и в данном случае имеющийся резерв несущей способности может быть принят как $1,42/1,06=1,34$.

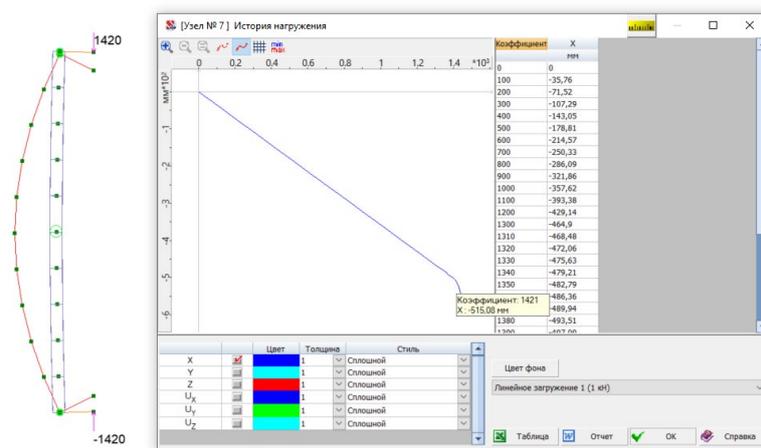


Рисунок 6 – Калибровочная модель

Список использованных источников

1. Стальные конструкции: СП 16.13330.2017 / Минстрой России. – Москва, 2017.
2. Конструкции стальные. Правила проектирования: СП 294.1325800.2017 / Минстрой России. – Москва, 2017.
3. Мосты с конструкциями из алюминиевых сплавов. Правила проектирования: СП 443.1325800.2019 / Минстрой России. – Москва, 2019.
4. Теплых, А.В. Применение оболочечных элементов при расчетах строительных стальных конструкций в программах SCAD и Nastran с учетом геометрической и физической нелинейности. // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 7. – С. 37-40.
5. Перельмутер, А.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? / А.В. Перельмутер, В.В. Тур // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2017. – № 13 (3). – С. 86-102.