

Верификация программы N_2015 средствами конечно-элементного пакета ANSYS

Специализированная программа **N_2015** отличается от известных программных пакетов («ЛИРА», «СКАД» и т.п.) тем, что позволяет вычислить коэффициенты **k** защемления сжатых стержневых элементов (далее **СЭ**) трубчатого пространственного каркаса. При этом уточненное расчетное значение **N*** несущей способности сжатого СЭ определяется исходя из неплоской формы его продольного изгиба согласно п.10.2.6 СП 16.1333.2011. При определении **k** наиболее важен момент вычисления жесткости **R**, с которой сопротивляется повороту каждый из узловых элементов (далее **УЭ**), с которыми соединен данный стержень по концам.

Верификации подлежит, именно, процедура вычисления **R** по программе **N_2015**. Важнейшая особенность этой процедуры состоит в том, что **R** вычисляется во многих плоскостях, проходящих через ось стержня с шагом 12° .

Моделирование в ANSYS осуществляется для тех же фрагментов каркаса, которые анализируются по программе **N_2015**. Каждый такой фрагмент содержит исследуемый УЭ и все соединенные с ним СЭ.

Обычная схема расположения элементов фрагмента представлена на рис. 1а. Переходные жесткости СЭ моделируются промежуточными стержнями с длиной, составляющей одну сотую от общей длины СЭ (см. рис 1б). Необходимая изгибная жесткость промежуточного стержня, соответствующая расчетной жесткости **p**, задается выбором эффективного модуля упругости для каждого из переходных элементов.

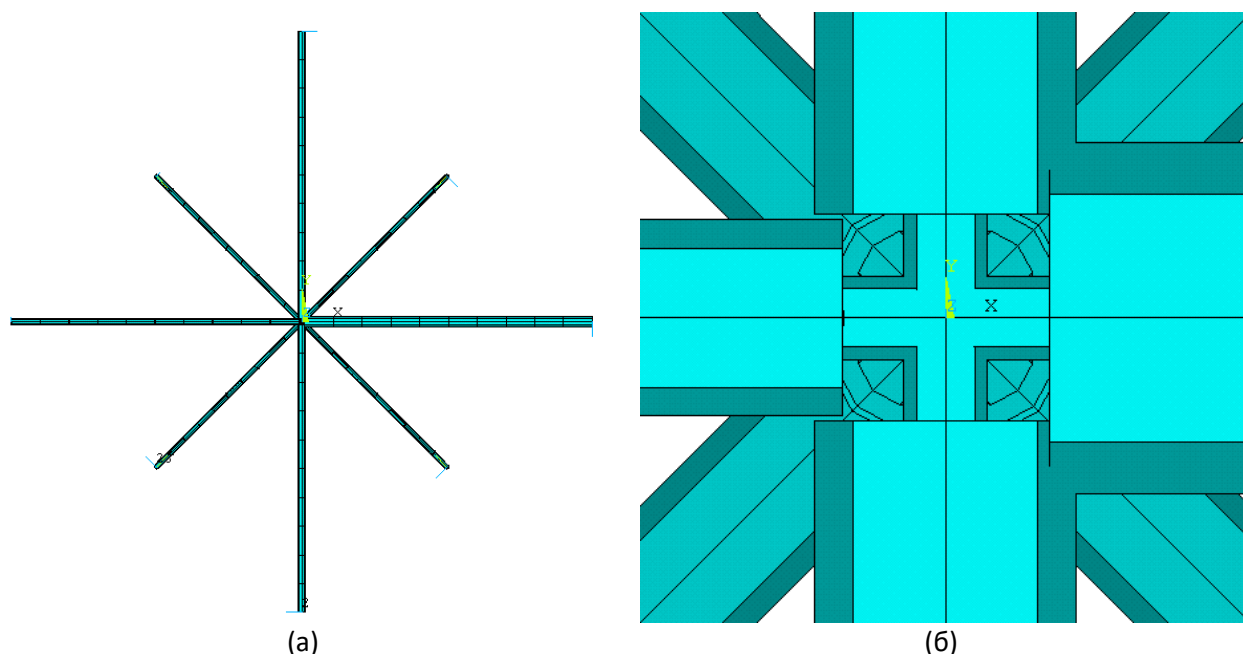


Рисунок 1. Вид конечно-элементной модели фрагмента каркаса (а) и схема расположения переходных элементов в центральном узле (б).

Анализ фрагмента проводится при различных условиях закрепления свободных концов СЭ и различных значениях продольных усилий в СЭ.

Фрагмент 1 каркаса схематически представлен на рис. 2.

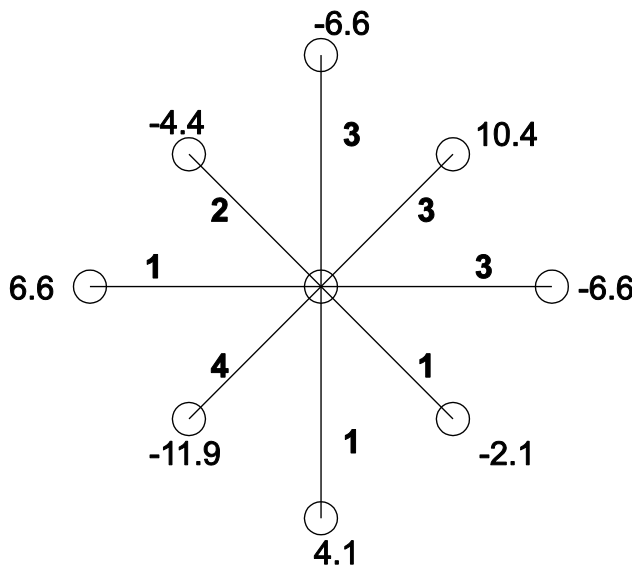


Рис 2. Фрагмент 1.

Здесь цифры меньшего кегля – номера сечений; более крупные – продольные усилия **N**. Положительные значения усилий соответствуют растяжению, отрицательные – сжатию. Все СЭ имеют кольцевое сечение (труба). Номера сечений их размеры и значения переходных жесткостей представлены в табл. 1.

Таблица 1.

№	Диаметр (мм)	Толщина стенки (мм)	Переходная жесткость ρ (кг*м/рад)
1	48	2.8	6000
2	57	3.2	6000
3	76	3.0	6000
4	102	4.0	10000

Поясные СЭ расположены горизонтально, их длина – 3300мм. Раскосы наклонены к горизонту под углом 40,6, их длина - 3073 мм.

В качестве нагрузки центрального узла выступает момент $M=1$ кг*м, вектор которого лежит в горизонтальной плоскости и проходит через центр узла.

Для всех стержней на свободных концах задаются два варианта граничных условий:

- 1) скользящая вдоль оси заделка (жесткие связи в двух перпендикулярных к оси стержня направлениях);
- 2) сферический шарнир, закрепленный от линейных перемещений.

Центральный узел закреплен от любых линейных перемещений и двух поворотов, кроме поворота в плоскости приложения момента.

Решение задачи представляет собой последовательность решений подзадач, для каждой из которых вектор момента занимает в горизонтальной плоскости одно из положений, различающихся на постоянную угловую величину. Для каждого из этих положений в диапазоне от 0 до 360 градусов вычисляется угол поворота φ центрального узла, равный его податливости повороту в [рад/кг*м] и величина обратная податливости, т.е. жесткость **R** сопротивления узла

повороту в [кг*м/рад]. В результате получены полярные графики жесткости **R** центрального узла в зависимости от положения вектора момента.

На рис.3 представлен такой график, полученный без учета продольных усилий **N** в стержнях фрагмента, на рис. 4 – график с учетом **N**.

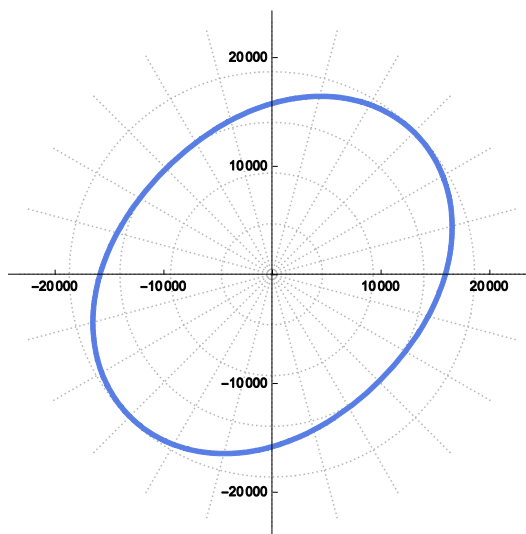


Рис. 3. График зависимости жесткости **R** центрального узла от направления вектора момента, полученный без учета продольных сил **N**.

Таблица 2. Значения максимальны и минимальных жесткостей **R** узла и их отношение без учета продольных сил в стержнях

	Rmax	Rmin	n
По ANSYS	18498	13858	1.33
По N_2015	17654	13580	1.3

На рис.4 представлен график **R** для того же фрагмента, полученный с учетом усилий **N**.

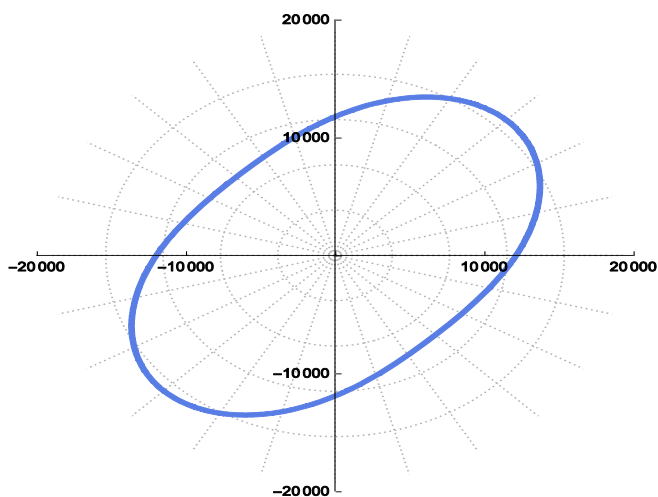


Рис. 4. График жесткости **R** для центрального узла в зависимости от направления вектора момента с учетом продольных сил.

Таблица 3. Значения максимальных и минимальных жесткостей **R** центрального узла и их отношение с учетом продольных сил **N** в стержнях фрагмента.

	Rmax	Rmin	n
По ANSYS	16240	9453	1.71
По N_2015	15351	9030	1.7

Фрагмент 2 (фрагменты 2-4 из файла N_2015_K/ КУРВА_K1/)представлен на рис. 5. Все обозначения аналогичны принятым для фрагмента 1.

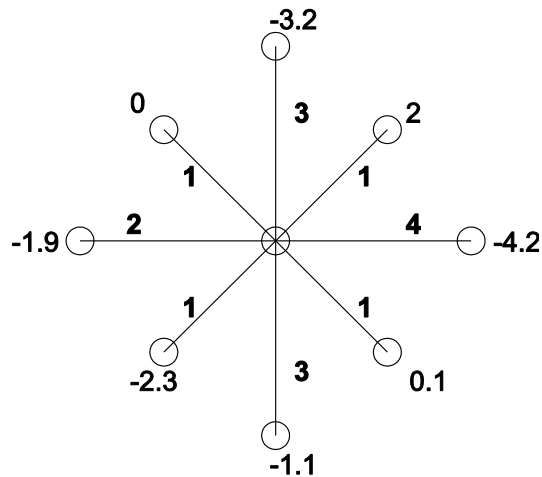


Рисунок 5.

Длина каждого стержня составляет 3000 мм, поясные СЭ расположены горизонтально, раскосы – под углом 45° градусов к горизонту.

В результате моделирования в **ANSYS** построен график жесткости **R** узла в зависимости от направления момента (см. рис. 6).

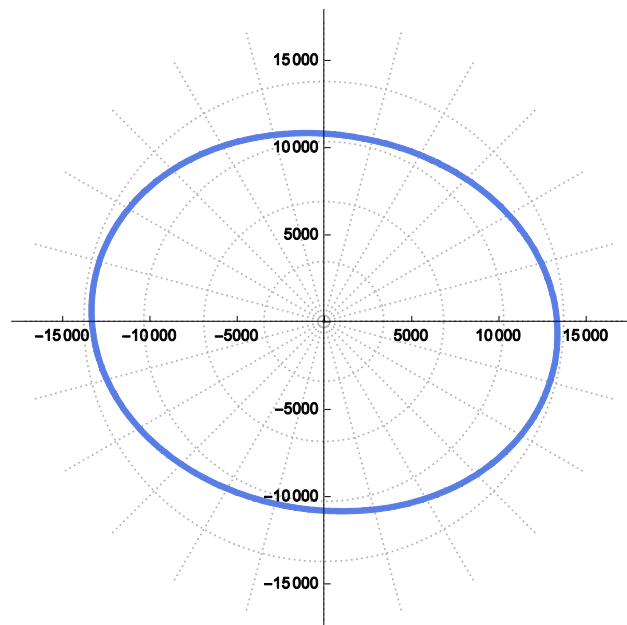


Рисунок 6. График жесткости **R** для центрального узла в зависимости от направления вектора момента с учетом продольных сил.

Таблица 4. Максимальные, минимальные значения и их отношение с учетом продольных сил в стержнях фрагмента 2.

	Kmax	Kmin	n
По ANSYS	13401	10755	1.24
По N_2015	12768	10640	1.2

Фрагмент 3 представлен на рис. 7.

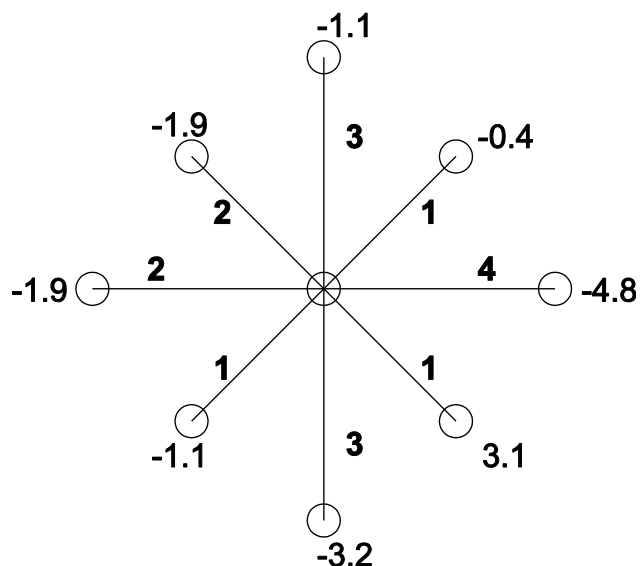


Рис. 7.

Длина каждого стержня составляет 3000 мм, поясные СЭ расположены горизонтально, раскосы – под углом 45° градусов к горизонту.

В результате построена диаграмма жесткости **R** центрального узла в зависимости от направления момента поворачивающего узел (см. рис. 8).

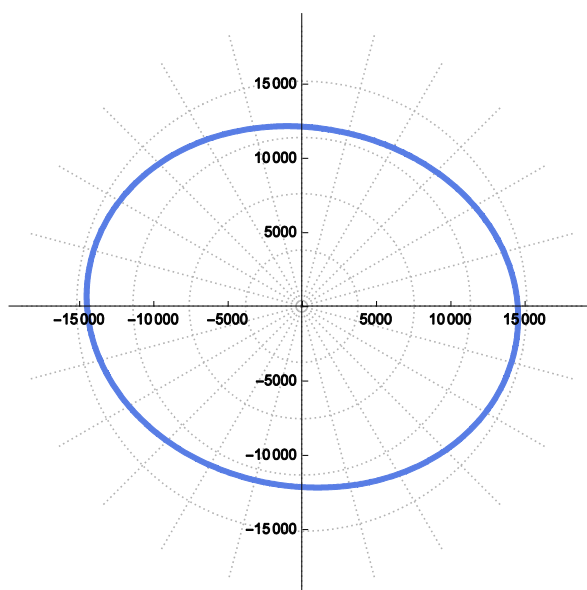


Рис.8.

График жесткости **R** для центрального узла в зависимости от направления вектора момента с учетом продольных сил.

Таблица 5. Максимальные, минимальные значения **R** и их отношение с учетом продольных сил в стержнях фрагмента 3

	Kmax	Kmin	n
По ANSYS	14590	12079	1.2
По N_2015	14028	11690	1.2

Фрагмент 4 схематически представлен на рис.10 (фрагменты 2-4 из файла N_2015_K/ КУРВА_K1/).

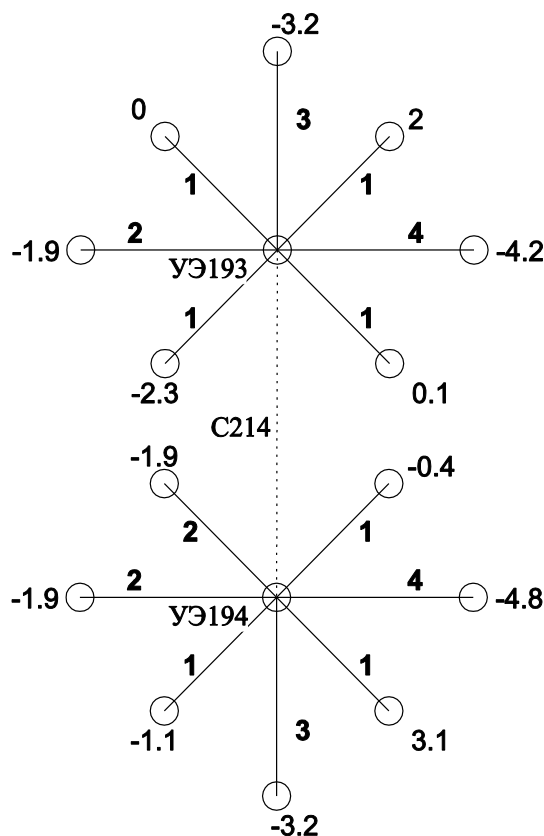


Рисунок 9.

Этот фрагмент выделен из исследуемого каркаса покрытия ТРЦ «Горизонт» и включает сжатый стержень №214 (между УЭ193 и УЭ194), для которого по программе N_2015 получены значения параметров, приведенные в нижней строке таблицы 6.

Очередная задача верификации состоит в том, чтобы вычислить те же параметры средствами пакета ANSYS и сравнить их с вышеупомянутыми значениями. Как и при использовании программы N_2015 в ANSYS последовательно решаются следующие подзадачи. К каждому из УЭ193, УЭ194 прикладывается единичный момент $M=1$, вектор которого вращается в вертикальной плоскости, нормальной к оси стержня №214. При каждом положении вектора $M=1$ в интервале от 0 до 360° вычисляется угол φ поворота центрального узла, равный его податливости при каждом очередном положении вектора $M=1$. Вычислив соответствующие значения $R=1/\varphi$, получаем диаграммы жесткости **R** узлов УЭ193 и УЭ194, приведенные на рис.10

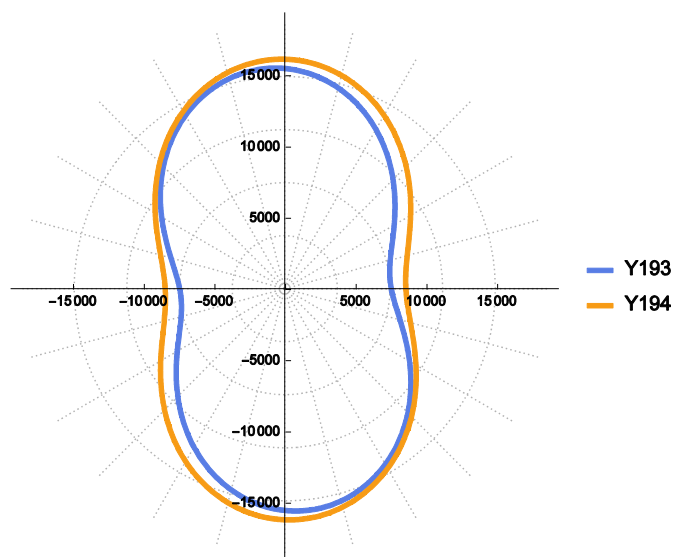


Рис.10. Диаграммы жесткости R для УЭ193 и УЭ194 с учетом того, что стержень №214 удален. Кроме того получаем для УЭ193(1) и УЭ194(2) главные значения R [кг*м/рад] :

$$R_{1\min} = 8930 ; \quad R_{1\max} = 17194; \quad R_{2\min} = 10182; \quad R_{2\max} = 17931,$$

а также значение угла $\delta = 3^\circ$ сдвига между главными значениями R в узлах 1 и 2.

Вычисленные параметры позволяют построить конечноэлементную модель сжатого стержня №214, которая представлена на рис. 11.

При известных параметрах стержня №214:

- погонной жесткости $r = 3\,200$ [кг*м/рад];

- переходной жесткости $\rho = 10\,000$ [кг*м/рад]

коэффициенты его защемления по концам определяются как $k = 1/r (1/R + 1/\rho)$.

Подставив сюда главные значения R УЭ193(1) и УЭ194(2), получаем главные значения коэффициентов защемления k_1 и k_2 и их отношения:

$$k_{1\min} = 1,47; \quad k_{1\max} = 1,97; \quad n_1 = 1,34;$$

$$k_{2\min} = 1,57; \quad k_{2\max} = 1,99; \quad n_2 = 1,27.$$

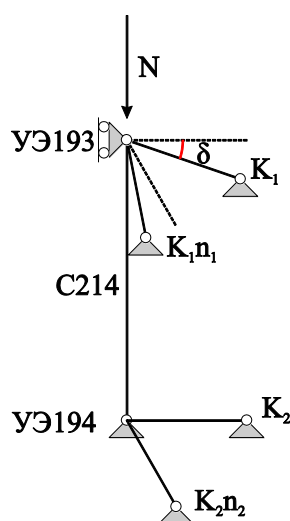


Рис.11.

Схема модели для анализа устойчивости стержня, защемленного по концам, при неплоском продольном изгибе.

Здесь коэффициенты защемления k_1 и k_2 по концам 1 и 2 стержня №214 обеспечиваются введением, как и в программе N_2015, эквивалентных упругих балок. Каждая из них жестко сопряжена со стержнем №214 одним своим концом, а другой ее конец закреплен шарнирно-подвижно. На каждом конце стержня №214 эквивалентные балки взаимноортогональны и ортогональны к оси стержня. Эквивалентные балки 1 повернуты относительно балок 2 вокруг оси стержня на угол $\delta = 3^\circ$.

Путем анализа устойчивости в системе ANSYS модели на рис.11 при центральном сжатии стержня №214 получен критическое значение усилия $N_{кр} = 16.6$ Тс, которое позволяет вычислить коэффициент расчетной длины для этого стержня с учетом его защемлений по концам и известного $N_э = 10.546$ Тс.

$$\mu = (N_э / N_{кр})^{0,5} = (10.546/16.600)^{0,5} = 0.797$$

Вычисление несущей способности стержня №214 по СП 16.13330.2011 дает $N^* = 10.595$.

Таблица 6

		k_1	n_1	k_2	n_2	δ	μ	N^*
По	ANSYS	1,47	1,34	1,57	1,27	3°	0.797	10.595
По	N_2015	1,4	1,4	1,5	1,3	0.7°	0,809	10,437

Из таблицы 6 видно, что на всех этапах, включая последний (вычисление N^*), программа N_2015 дает результаты весьма близкие к эталону, отличающиеся большей безопасностью.