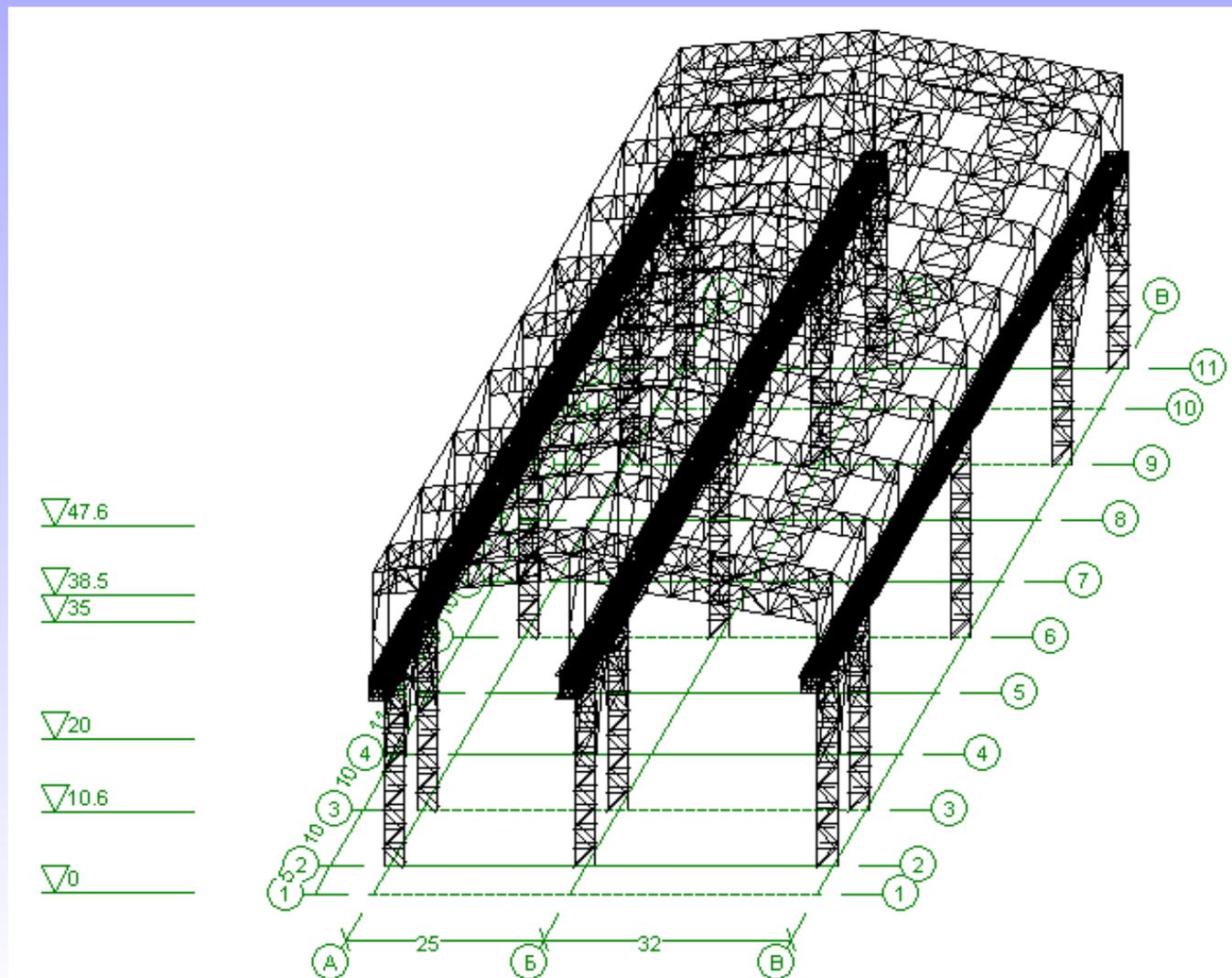


# Применение оболочечных элементов при расчетах стальных конструкций.

Теплых А.В. – Главный инженер проектов ООО «КБТ» г. Самара,  
Региональный представитель ООО НПФ «СКАД СОФТ» в Самарской области.

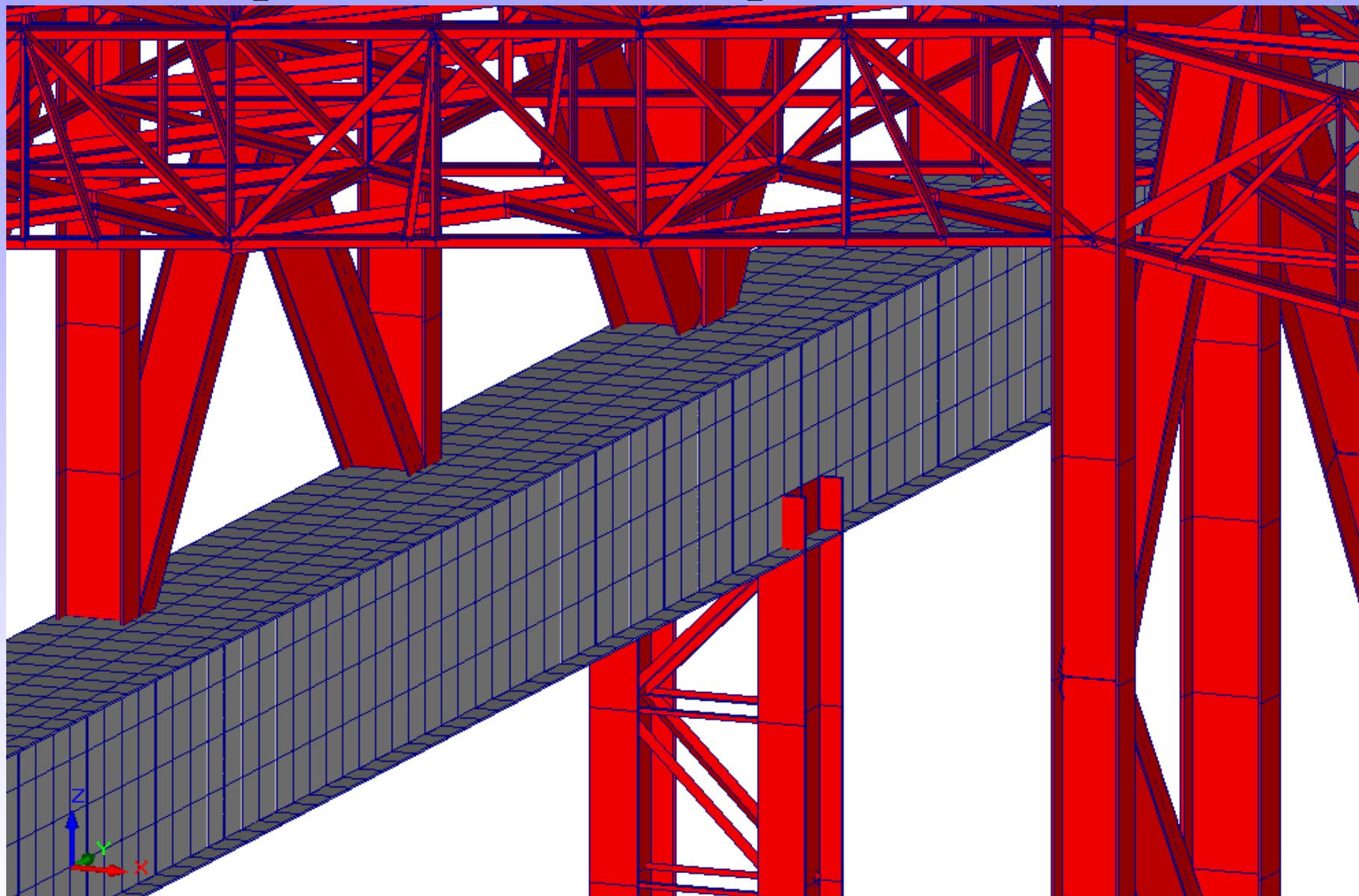
# Пример 1 — моделирование подкрановых балок коробчатого сечения.



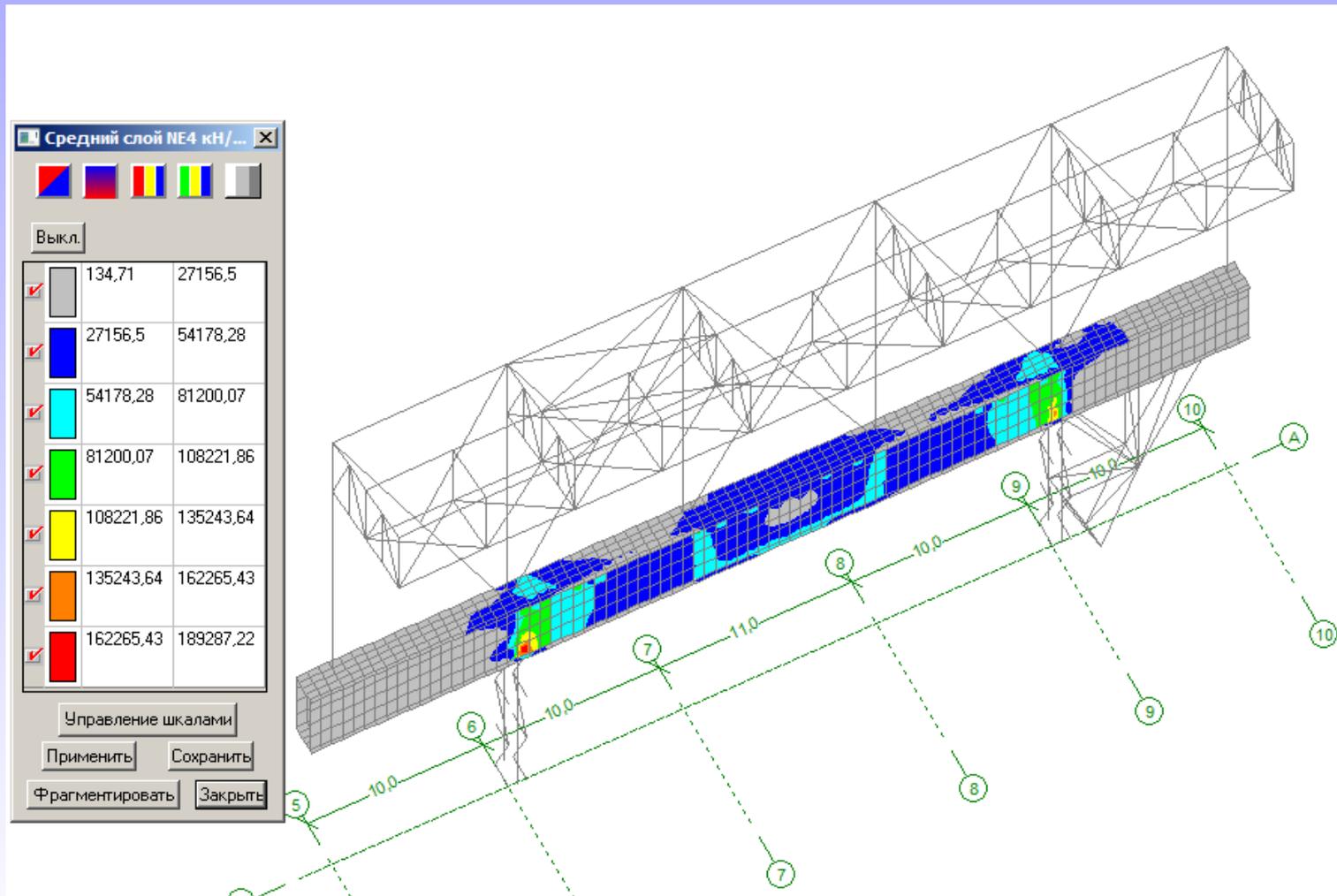
# Основные характеристики здания

- Назначение — цех металлургического комбината.
- Здание двухпролётное  $(25+31,5) \times 94$  м;
- Высота до низа несущих конструкций покрытия — 38,5 м;
- Высота по коньку фонаря — 47,6 м;
- Крановое оборудование — подвесные краны грузоподъемностью 10 тонн и мостовые краны грузоподъемностью 125 и 400 тонн.
- Колонны ниже подкрановых балок состоит двухветвевые.
- Подкрановые балки коробчатого сечения,  $2,5 \times 3(h)$  м, толщина стенок — 30 мм.
- На подкрановые балки опираются подстропильные фермы к которым присоединяются стропильные фермы.

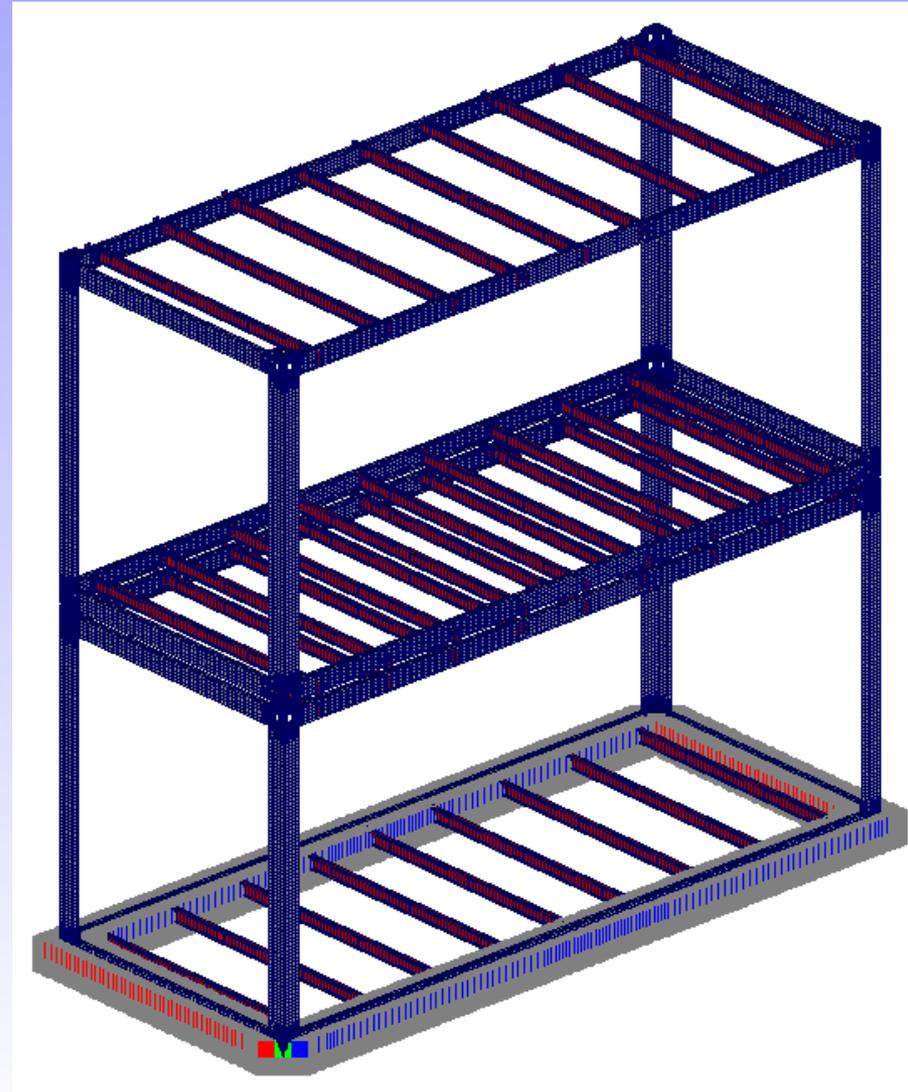
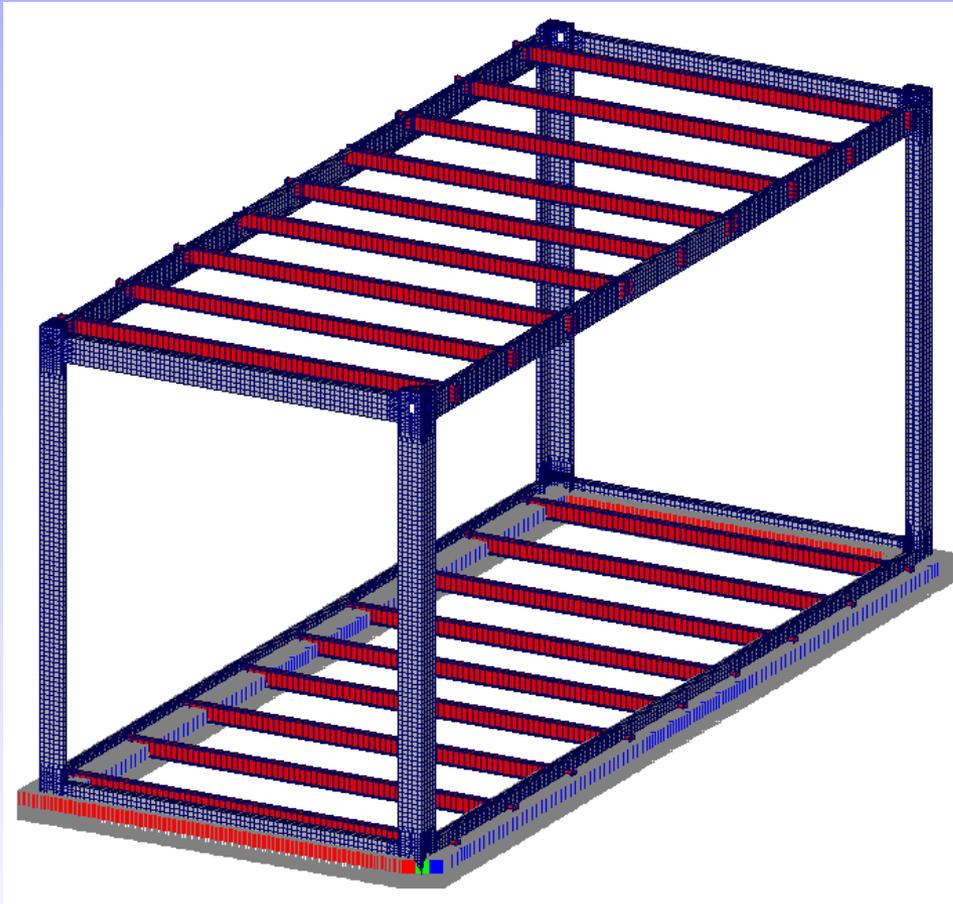
# Фрагмент модели стыка элементов каркаса с подкрановой балкой в расчетной модели.



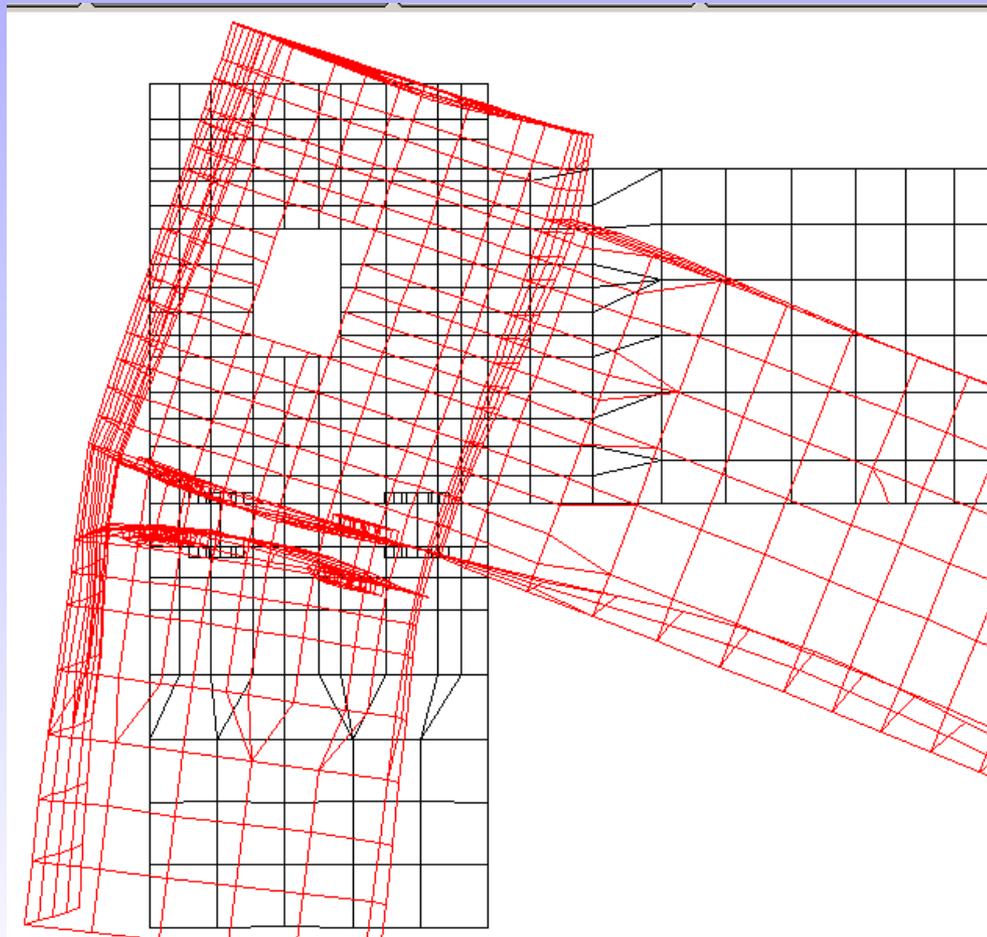
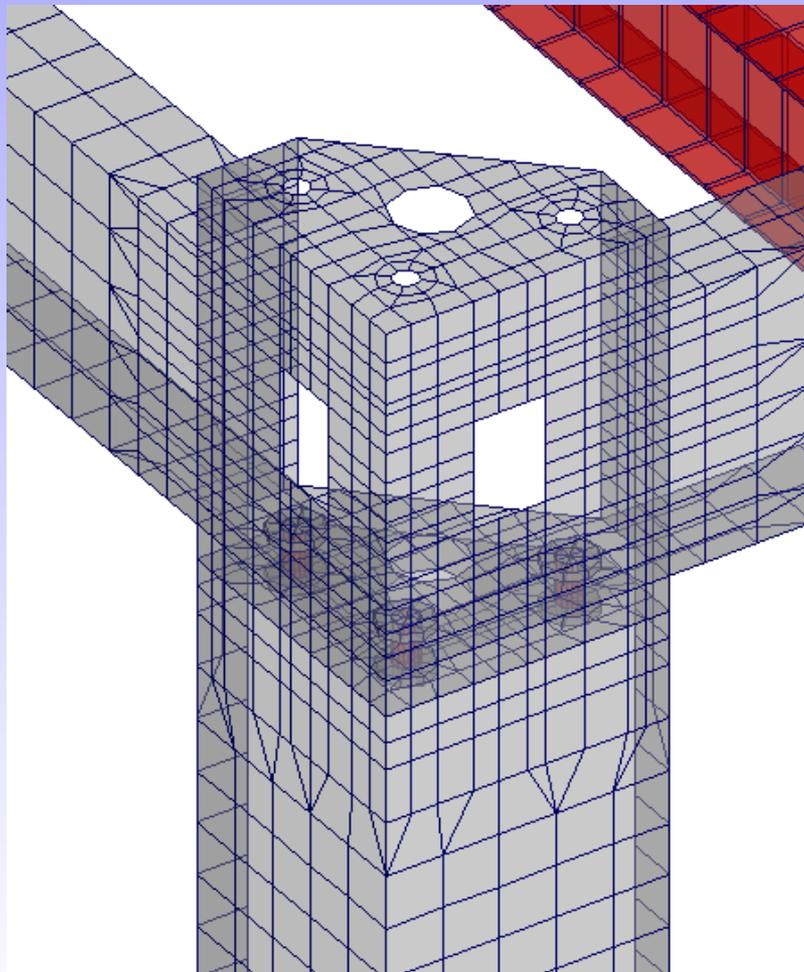
# Анализ напряженного состояния подкрановой балки.



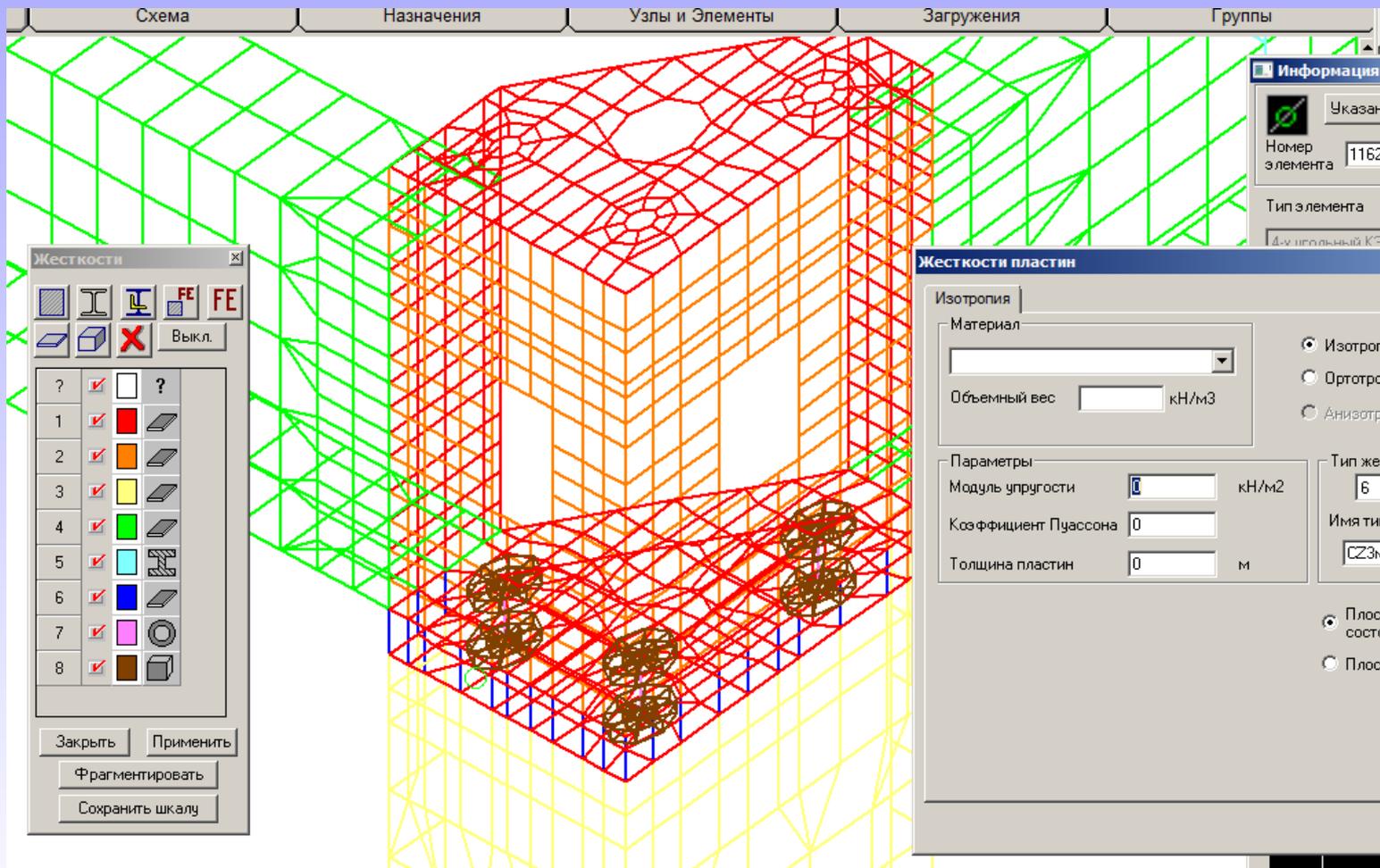
# Пример 2. Расчет несущей рамы модульного блок-бокса.



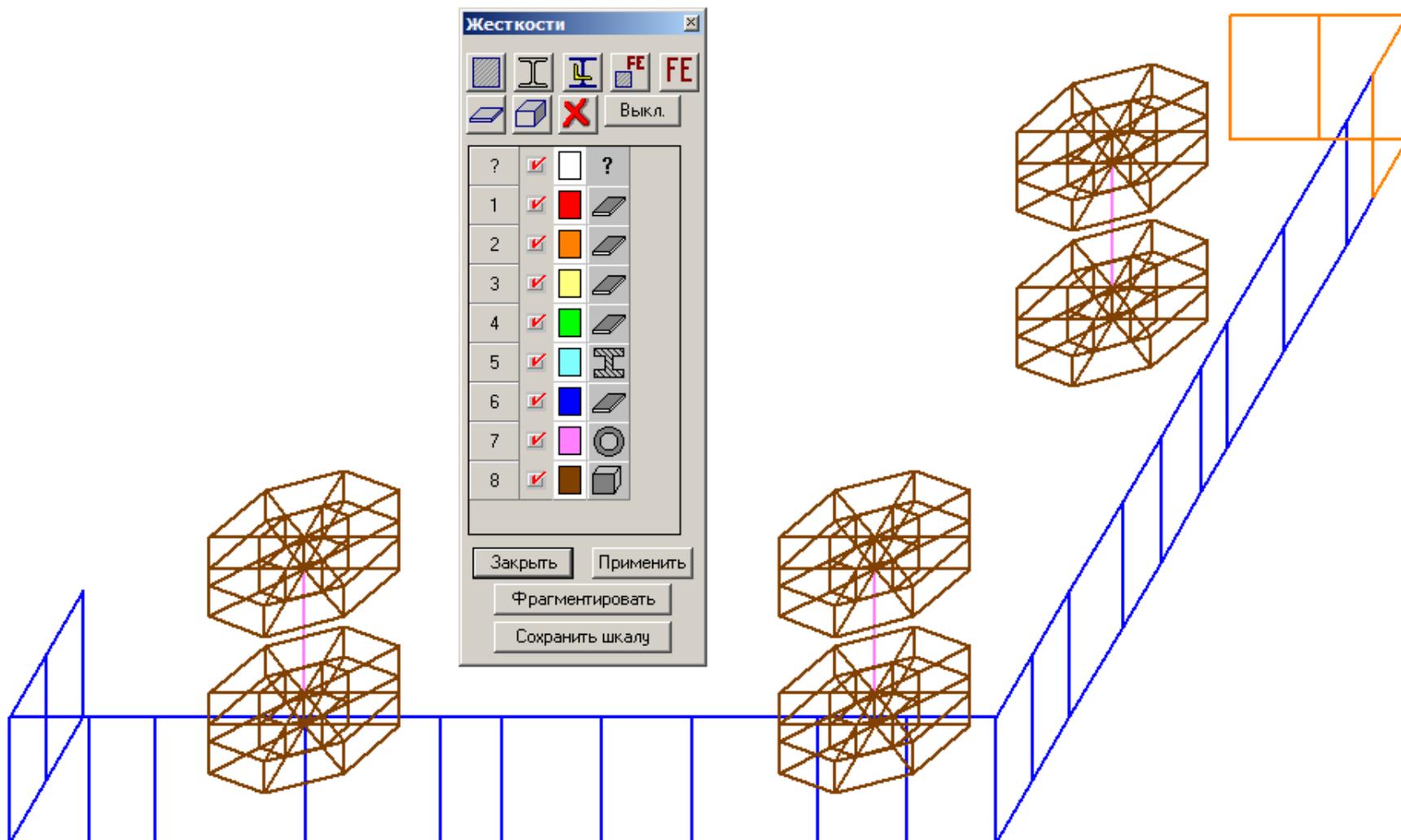
# Модель полужесткого узла стыка балки и стойки



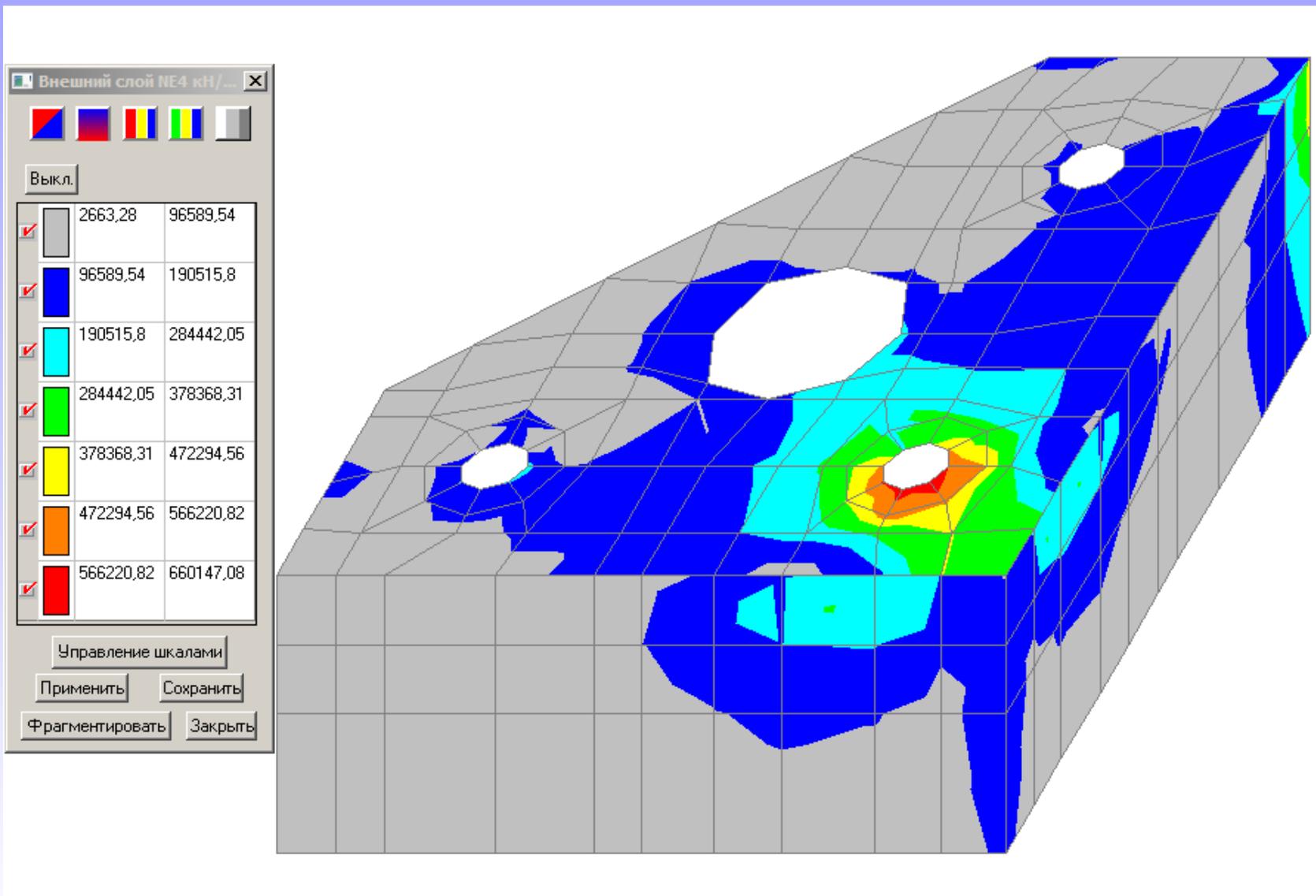
# Модель полужесткого узла стыка балки и стойки



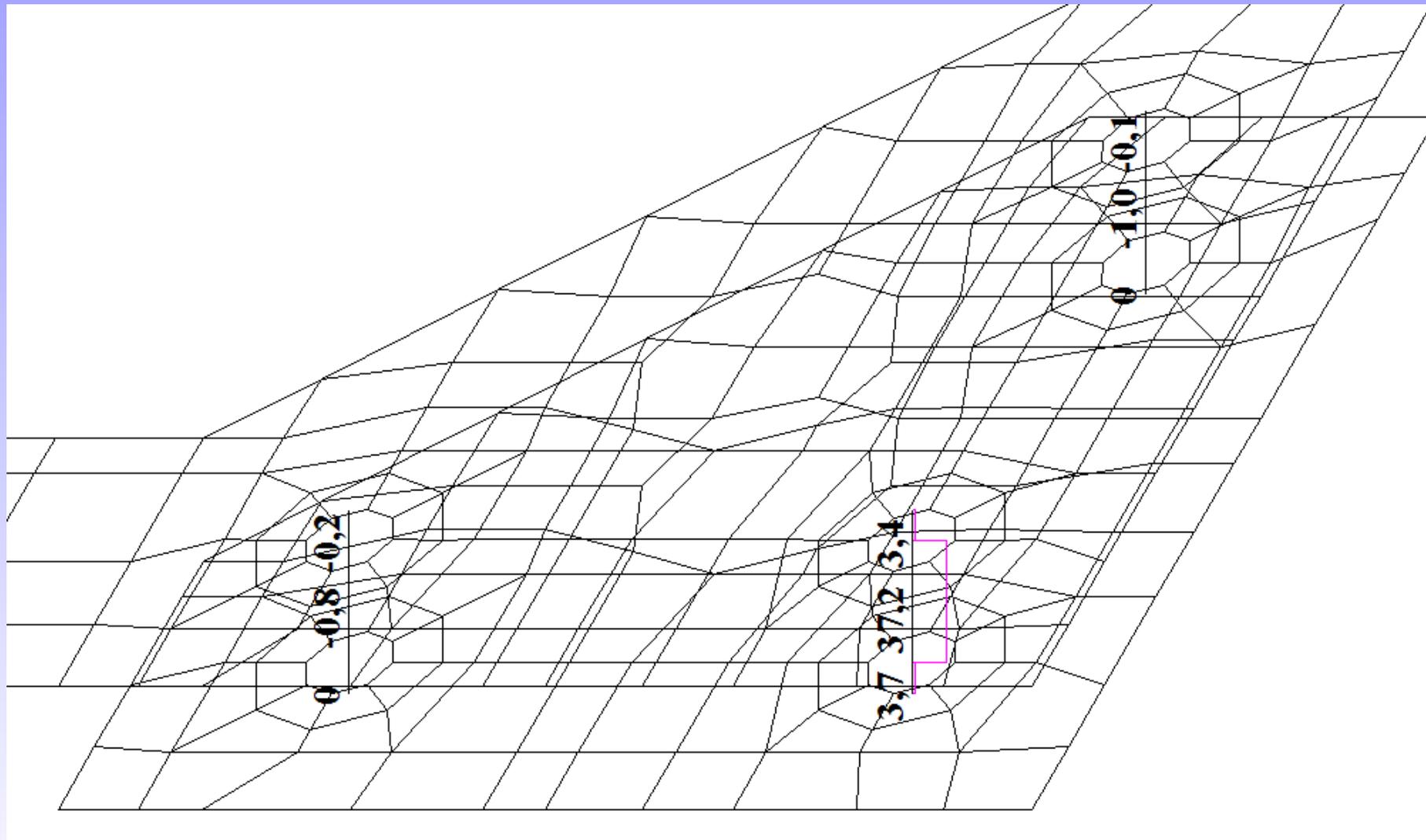
# Модель полужесткого узла стыка балки и стойки



# Напряженное состояние узла.

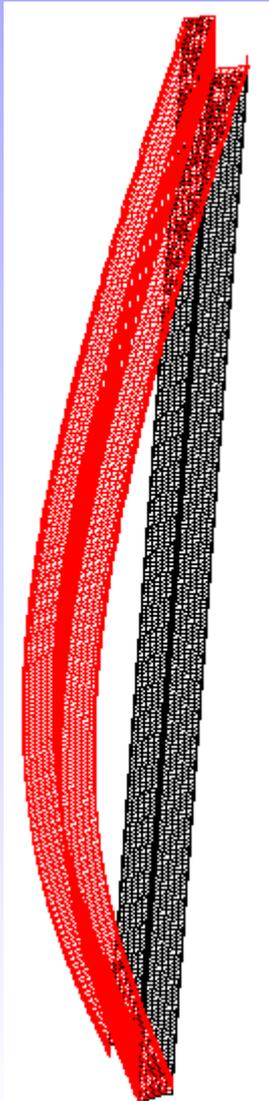


# Усилия в болтах

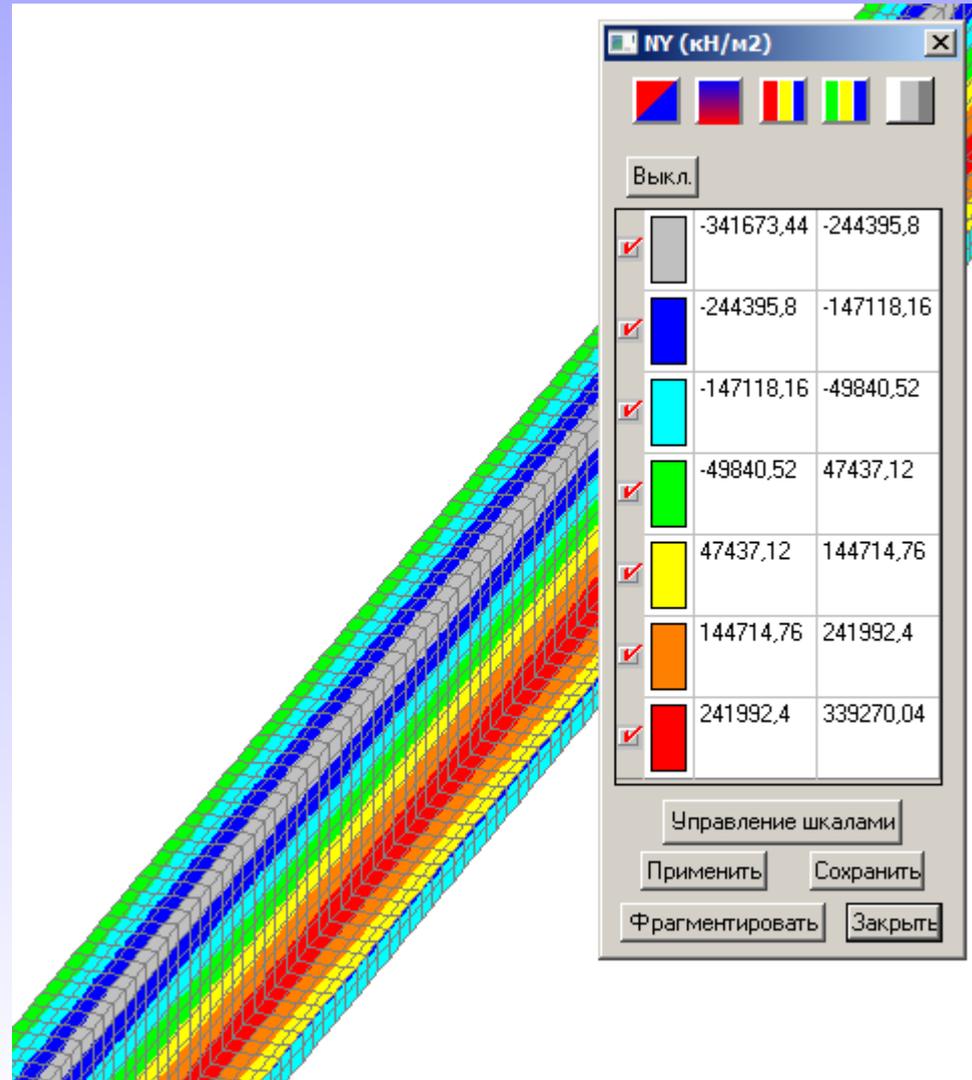


# Анализ НДС прогона рамы модульного блок-бокса из Z-профиля, с толщиной листа 2,5 мм

Прогибы

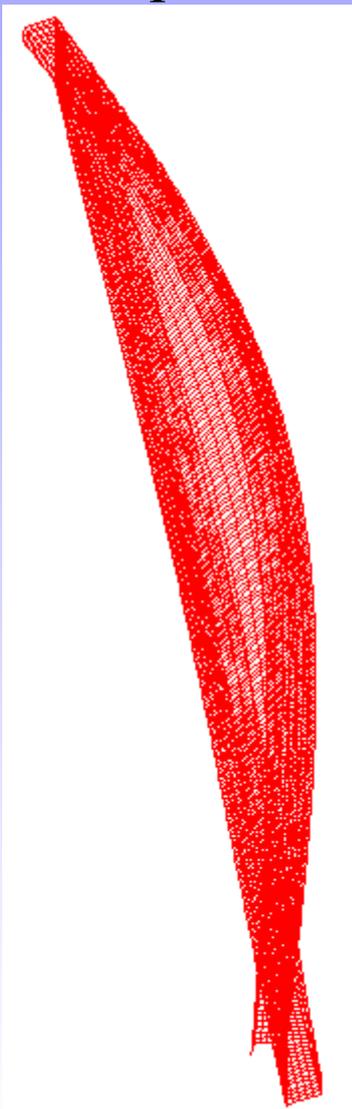


Напряжения

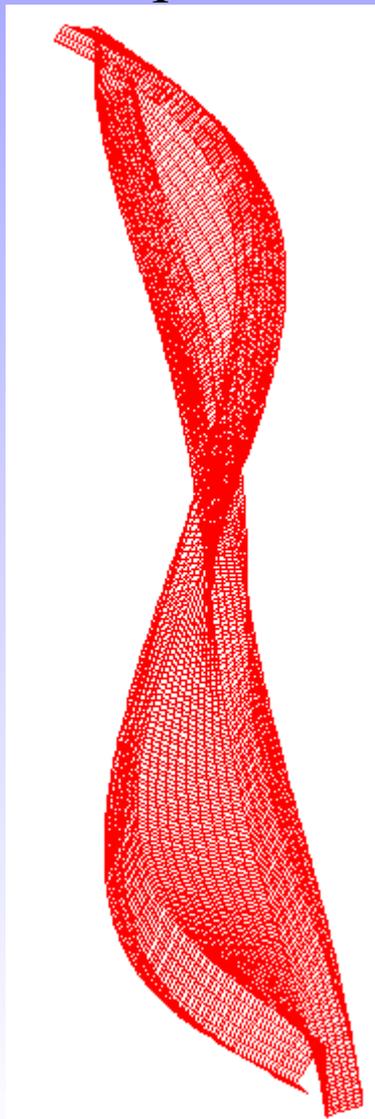


# Анализ устойчивости прогона рамы модульного блок-бокса из Z-профиля, с толщиной листа 2,5 мм

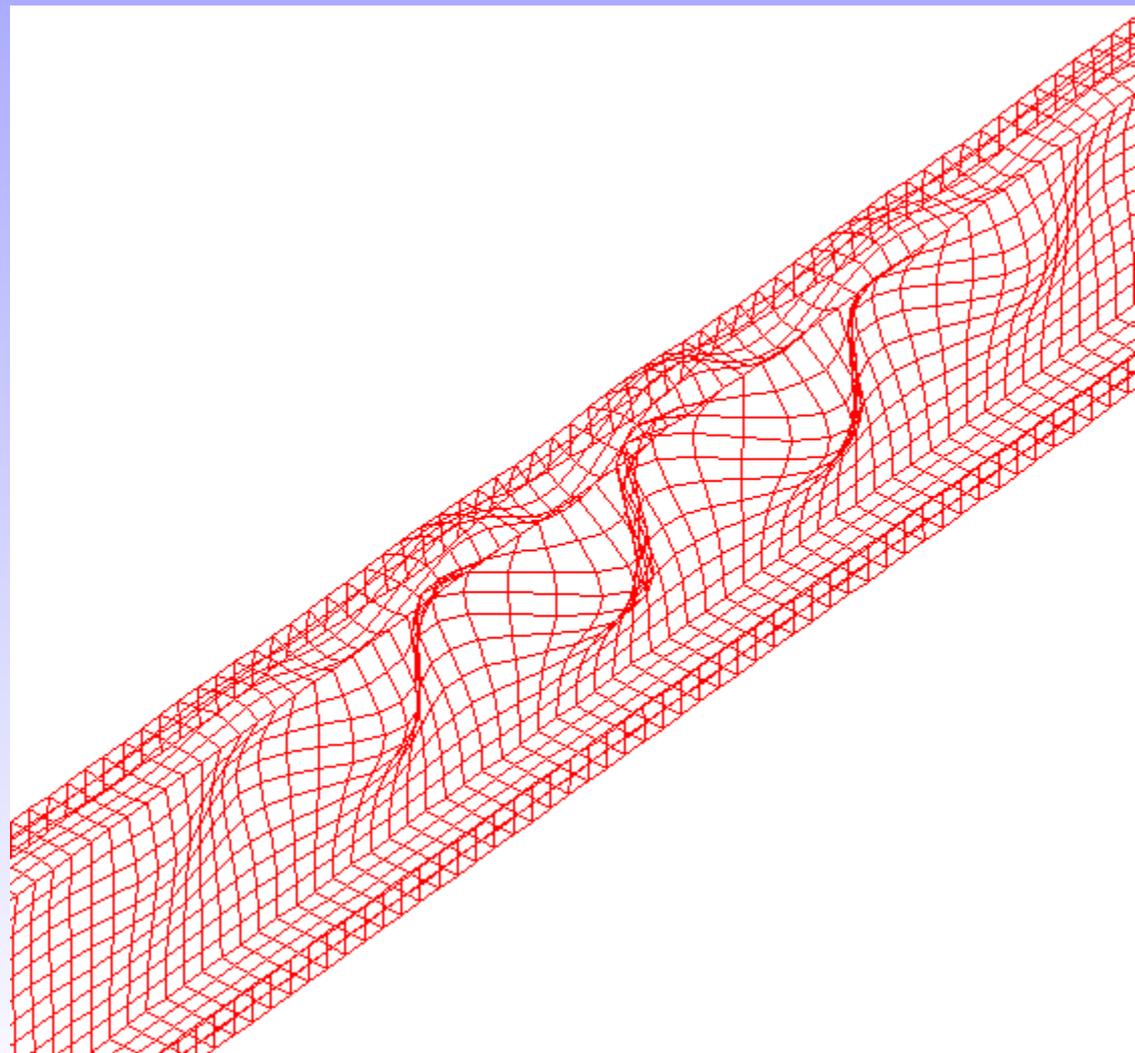
Форма 1



Форма 2



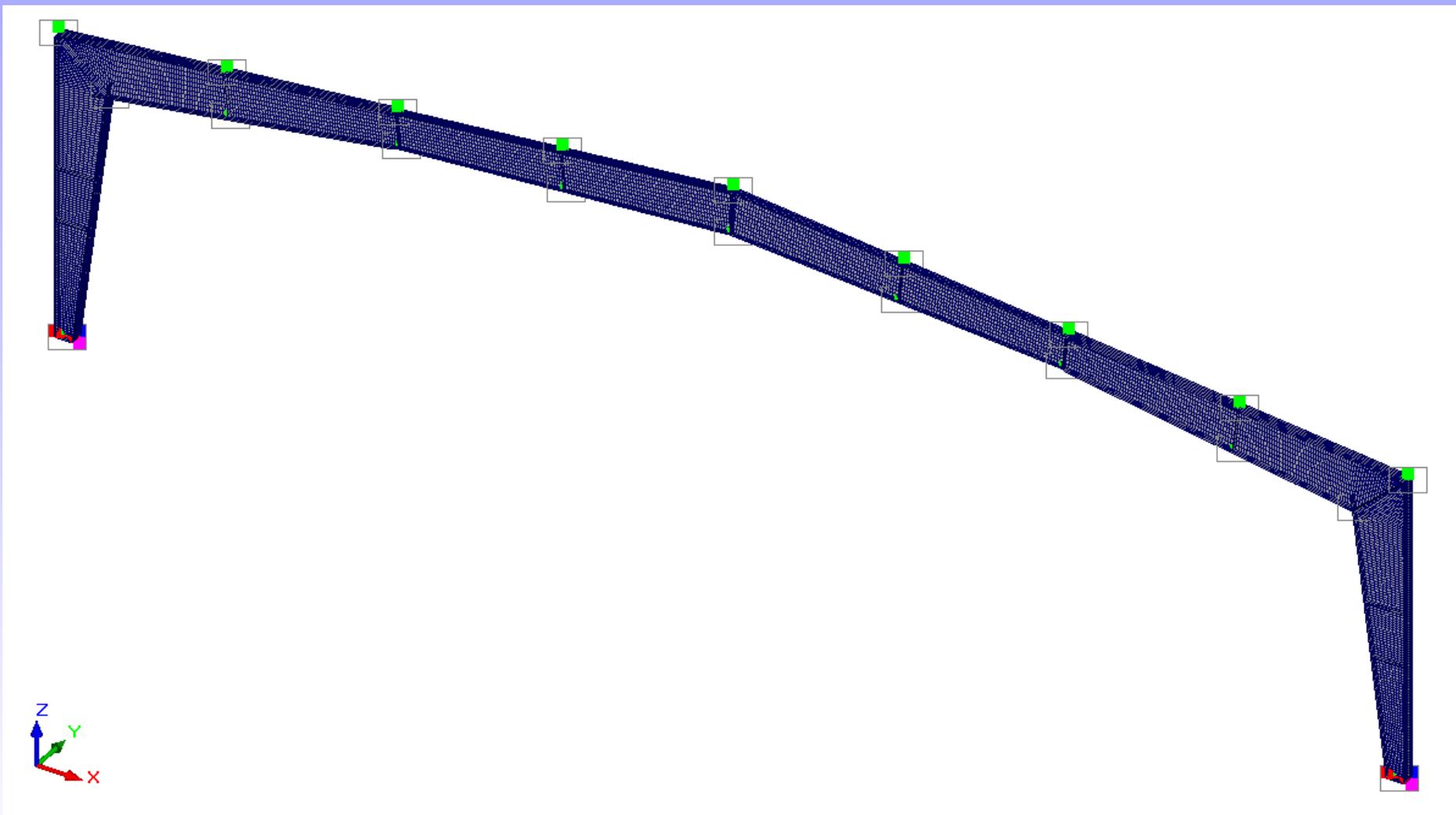
Форма 3



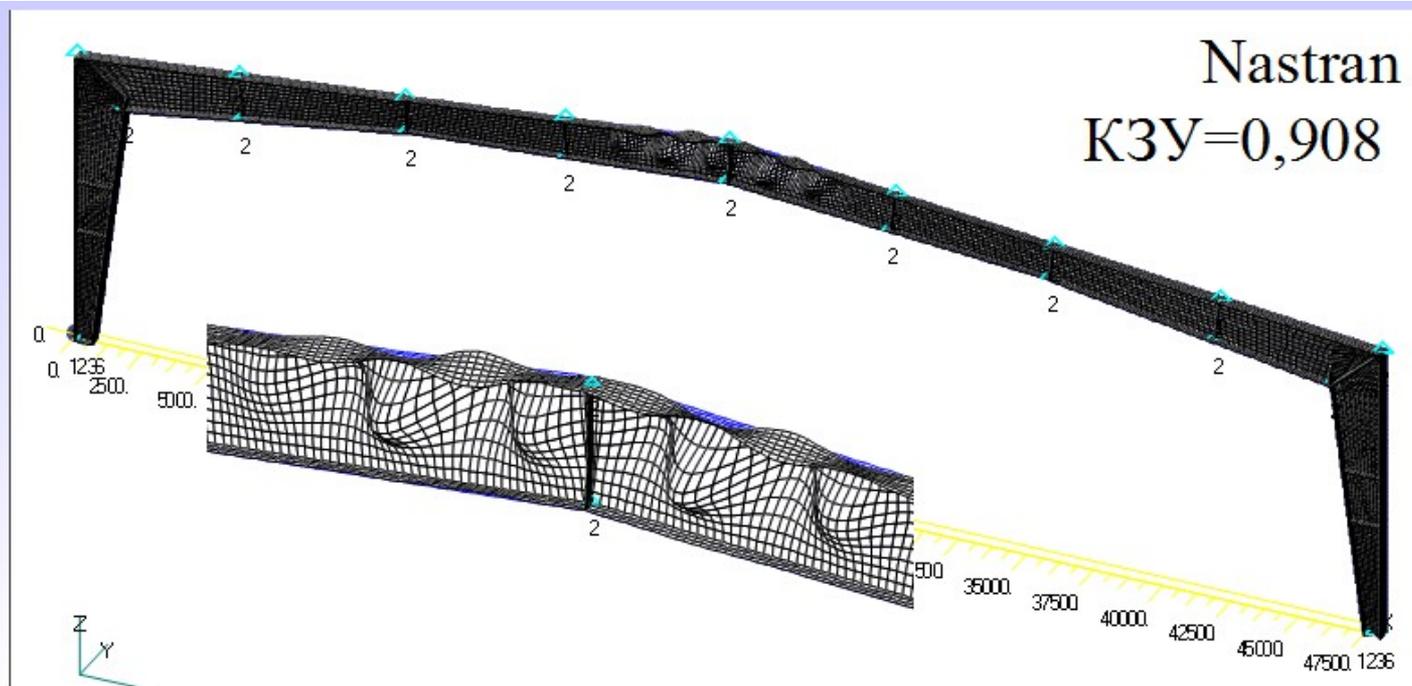
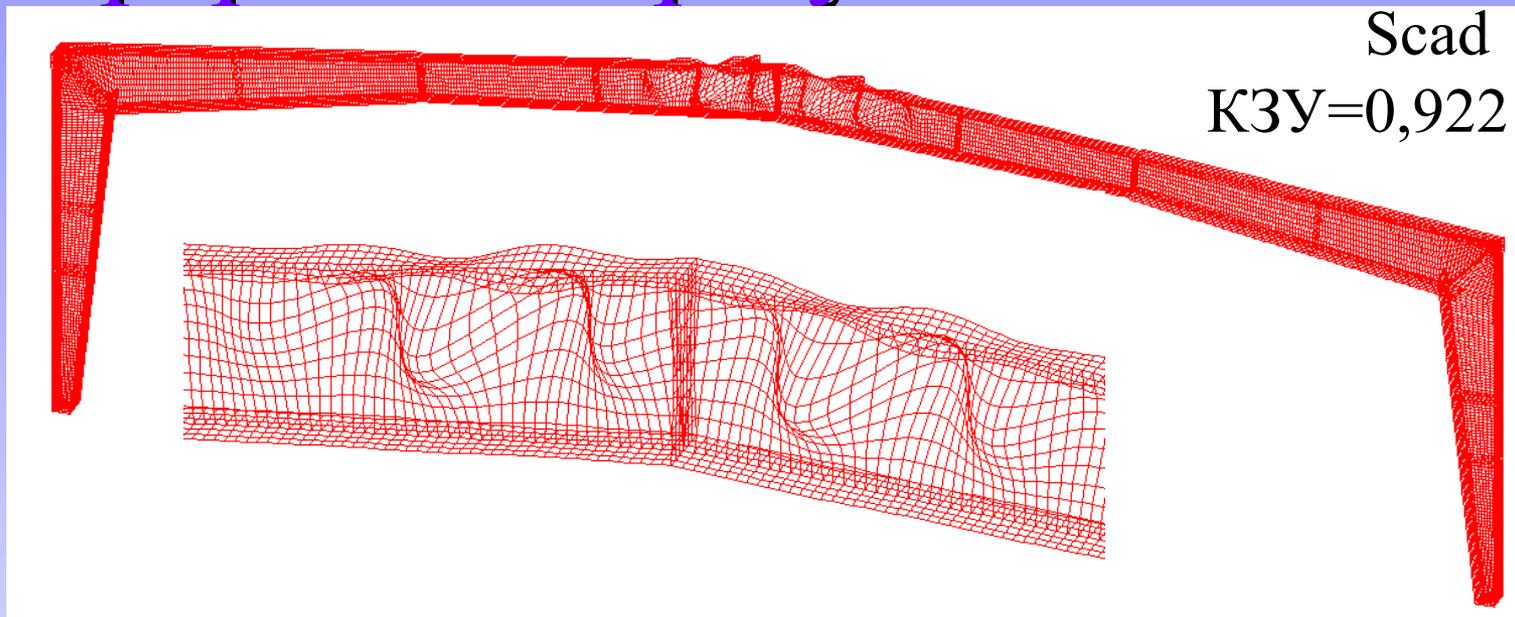
# Расчет устойчивости стенок рам на основе двутавров переменного сечения



# Пример 3. Рама легкоатлетического манежа пролётом 48 м (проект фирмы «Уникон»).

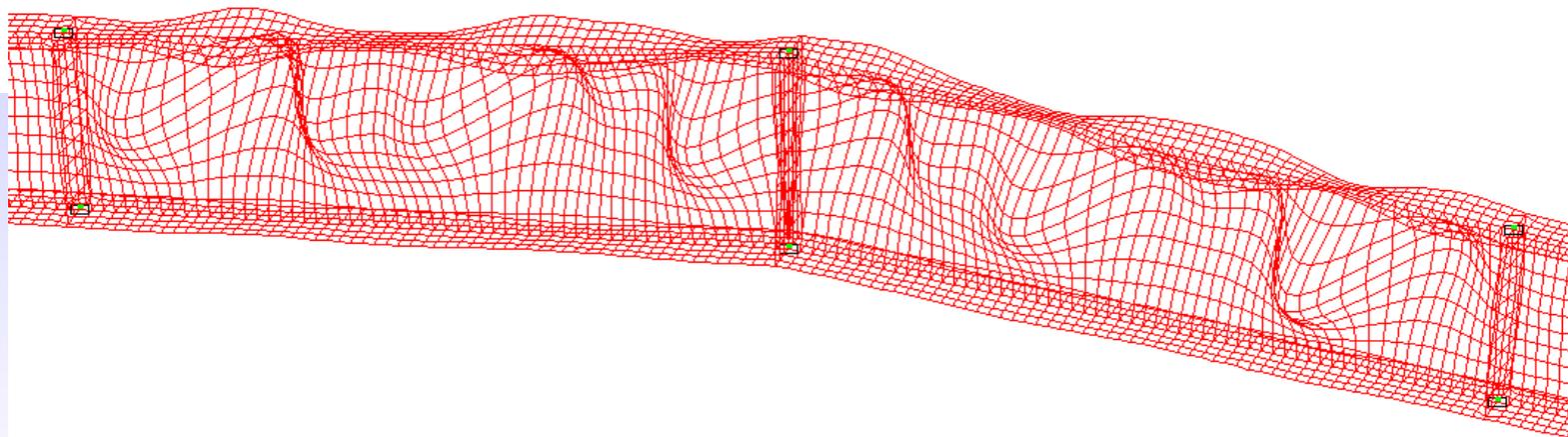
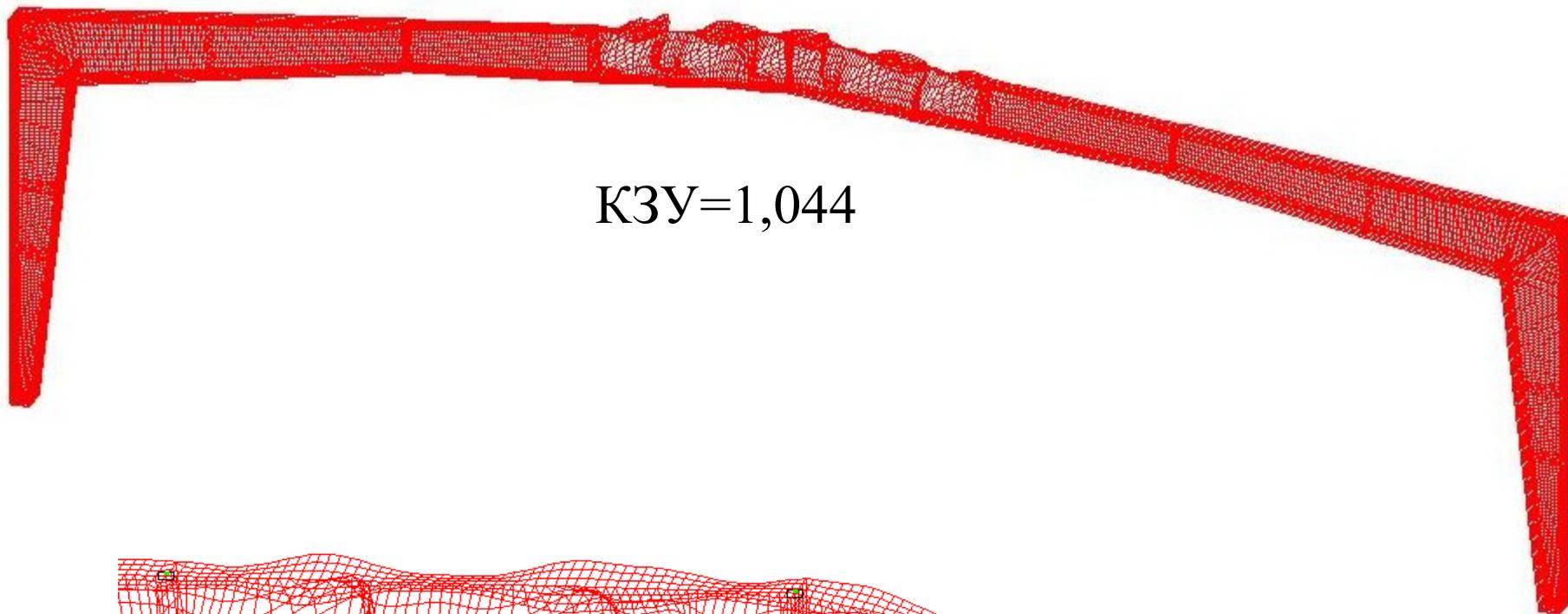


# 1 форма потери устойчивости

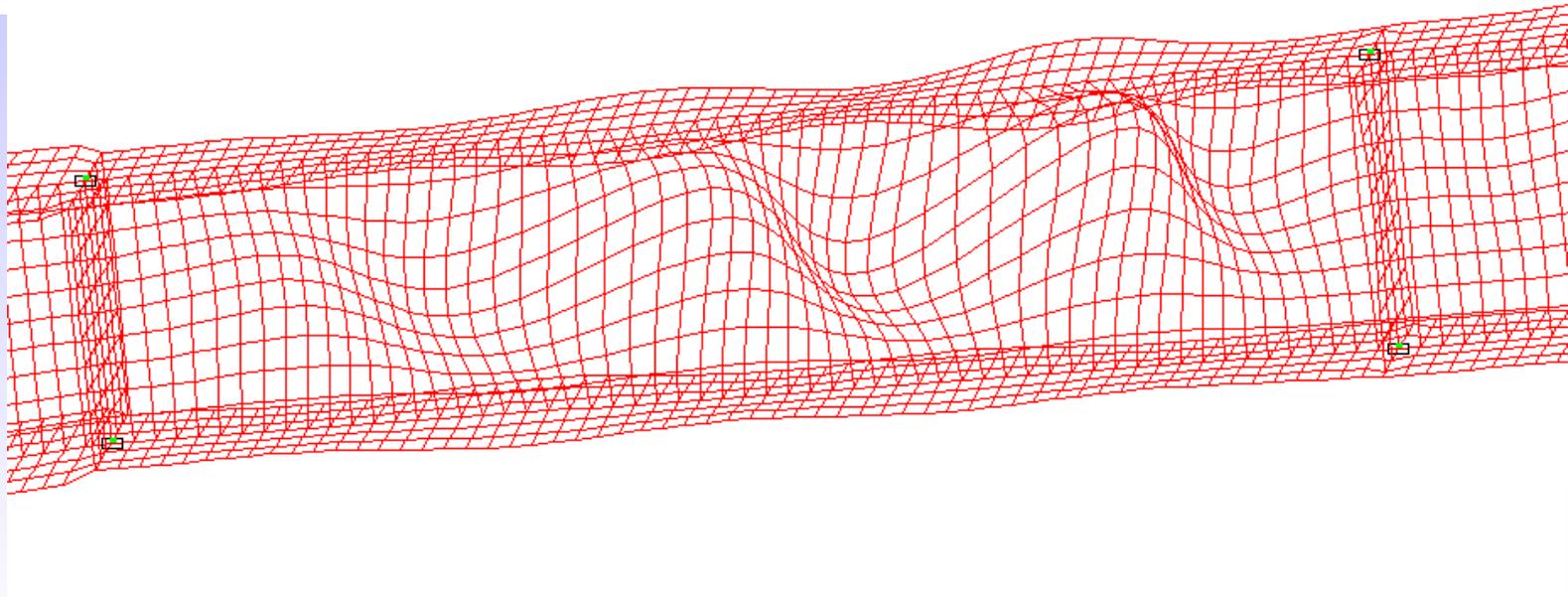
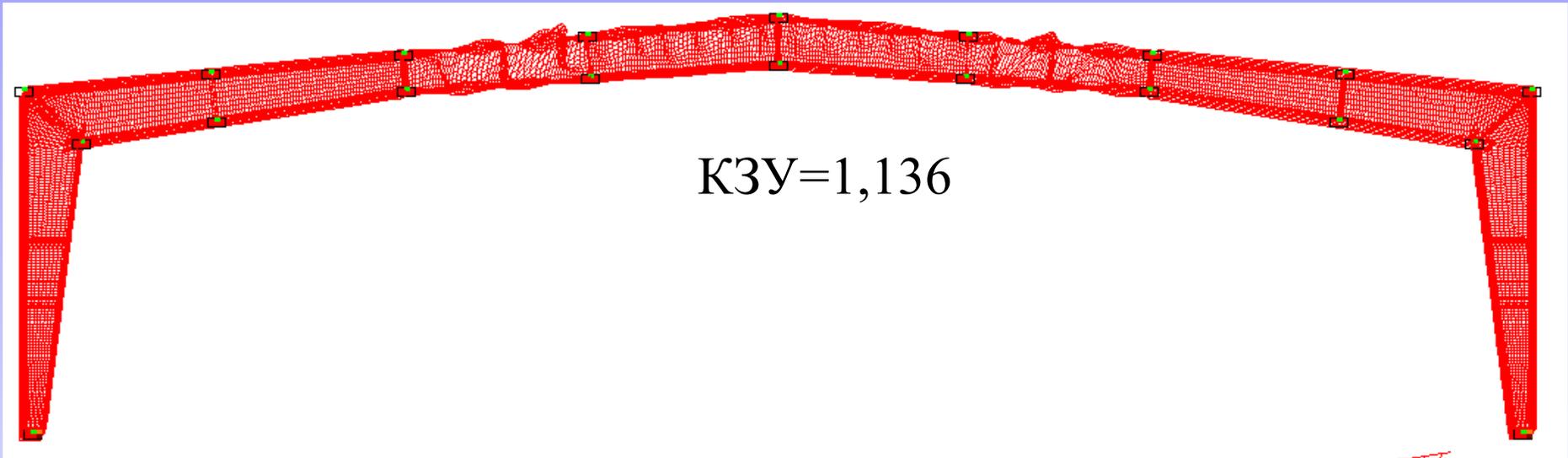


# 9 форма потери устойчивости

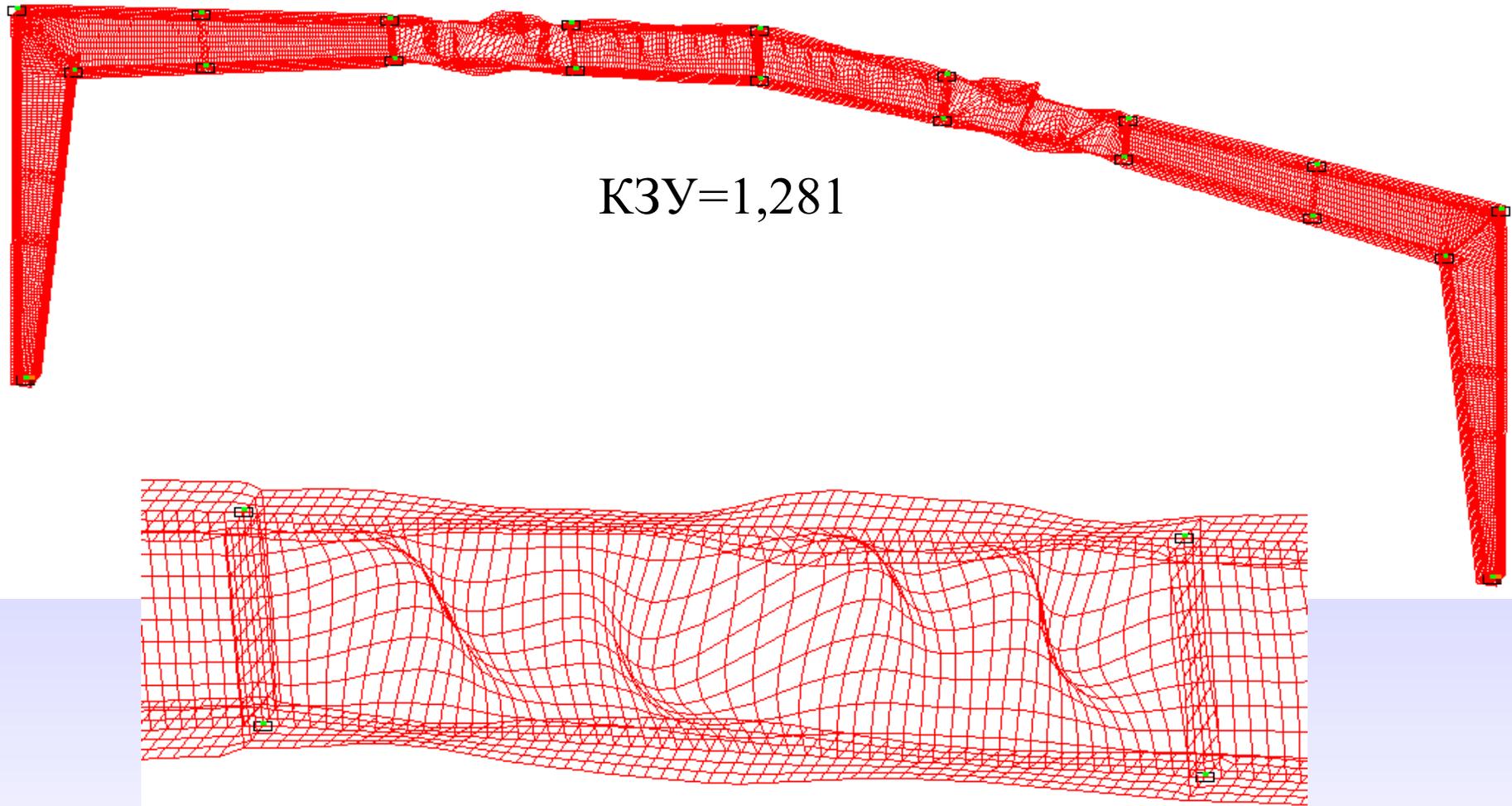
$K_{3Y}=1,044$



# 16 форма потери устойчивости



# 30 форма потери устойчивости



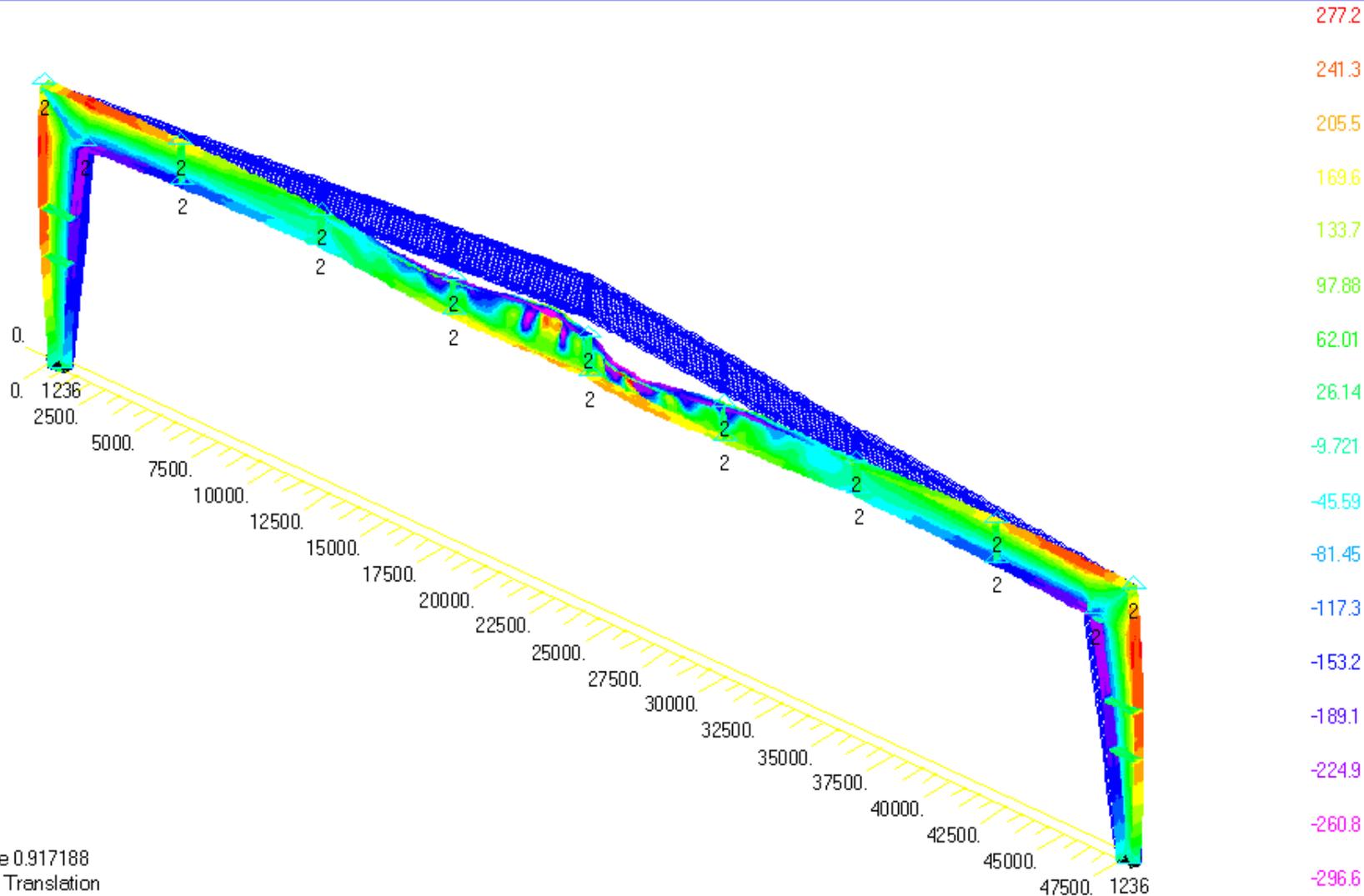
# Настройка Scad для определения нужного количества форм потери устойчивости

- В директории установки Scad открыть файл `scad.ini` (`C:\SCAD Soft\SCAD Office 11.3\scad.ini`);
- В конце раздела `[ScadCalcul]` вписать `QuantityStabform=Количество форм`
- Например при `QuantityStabform=3` — Scad определит 3 формы потери устойчивости.

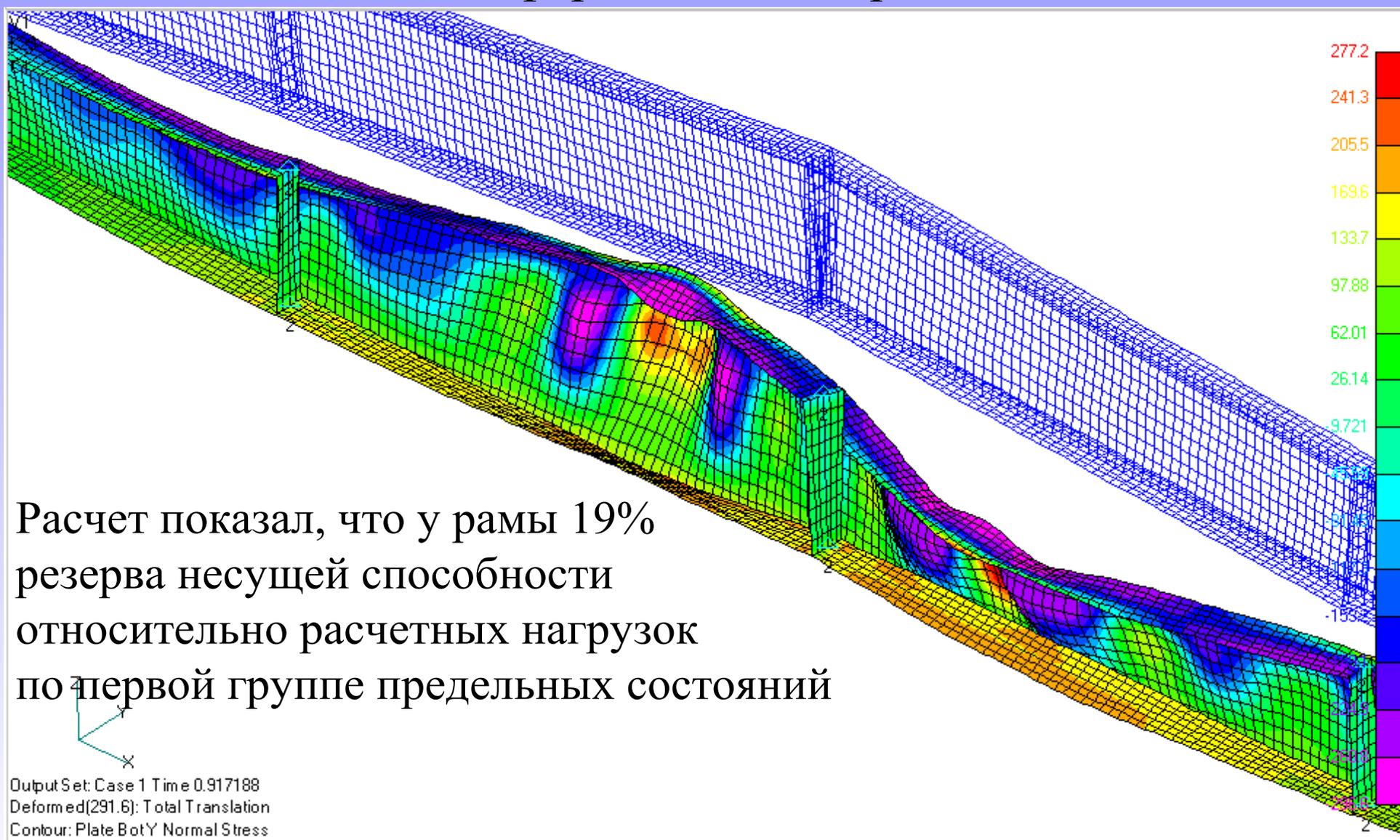


# Определение несущей способности рамы путем выполнения нелинейного деформационного расчета в Nastran.

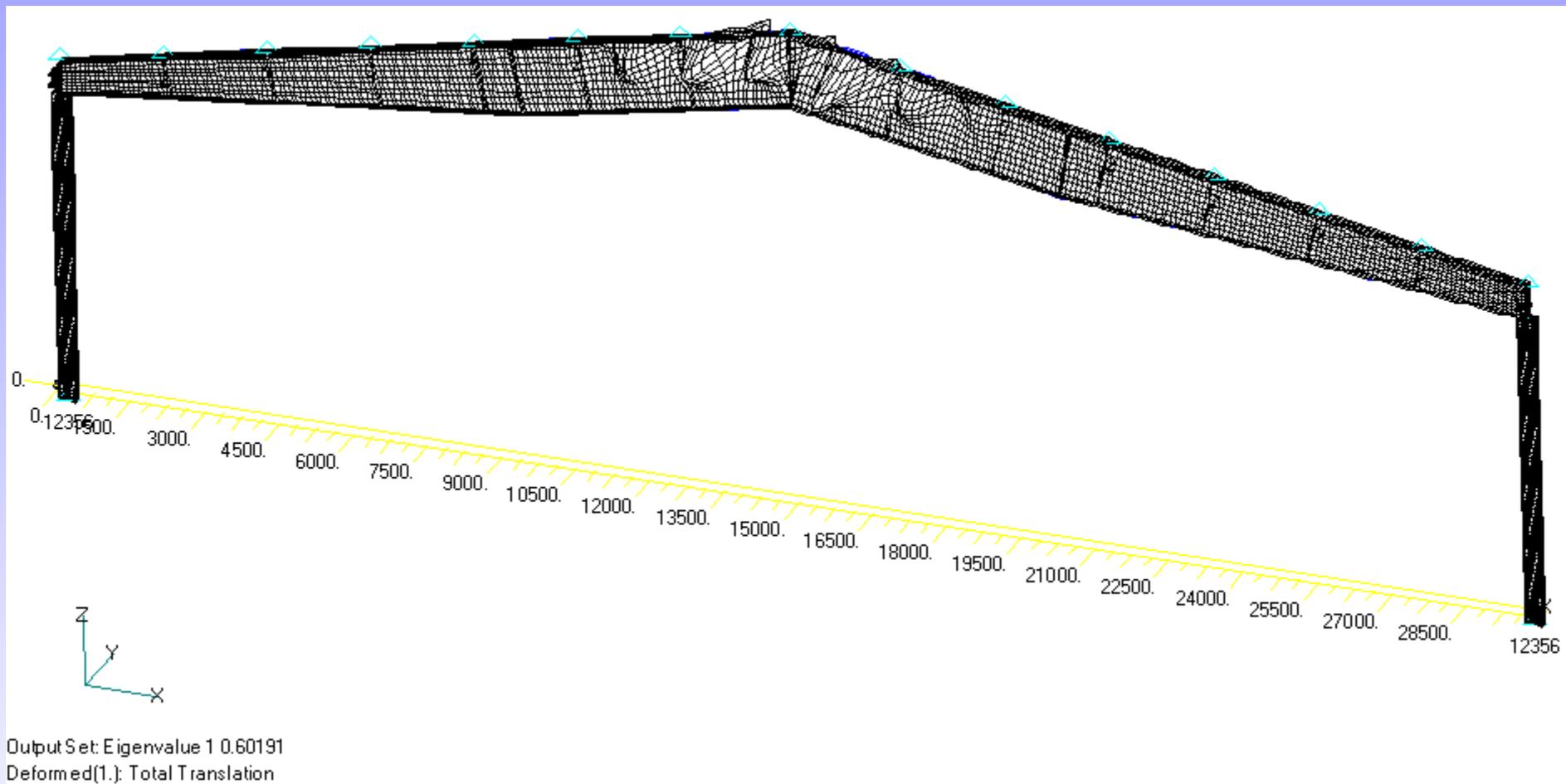
L23  
C1



# Определение несущей способности рамы путем выполнения нелинейного деформационного расчета в Nastran



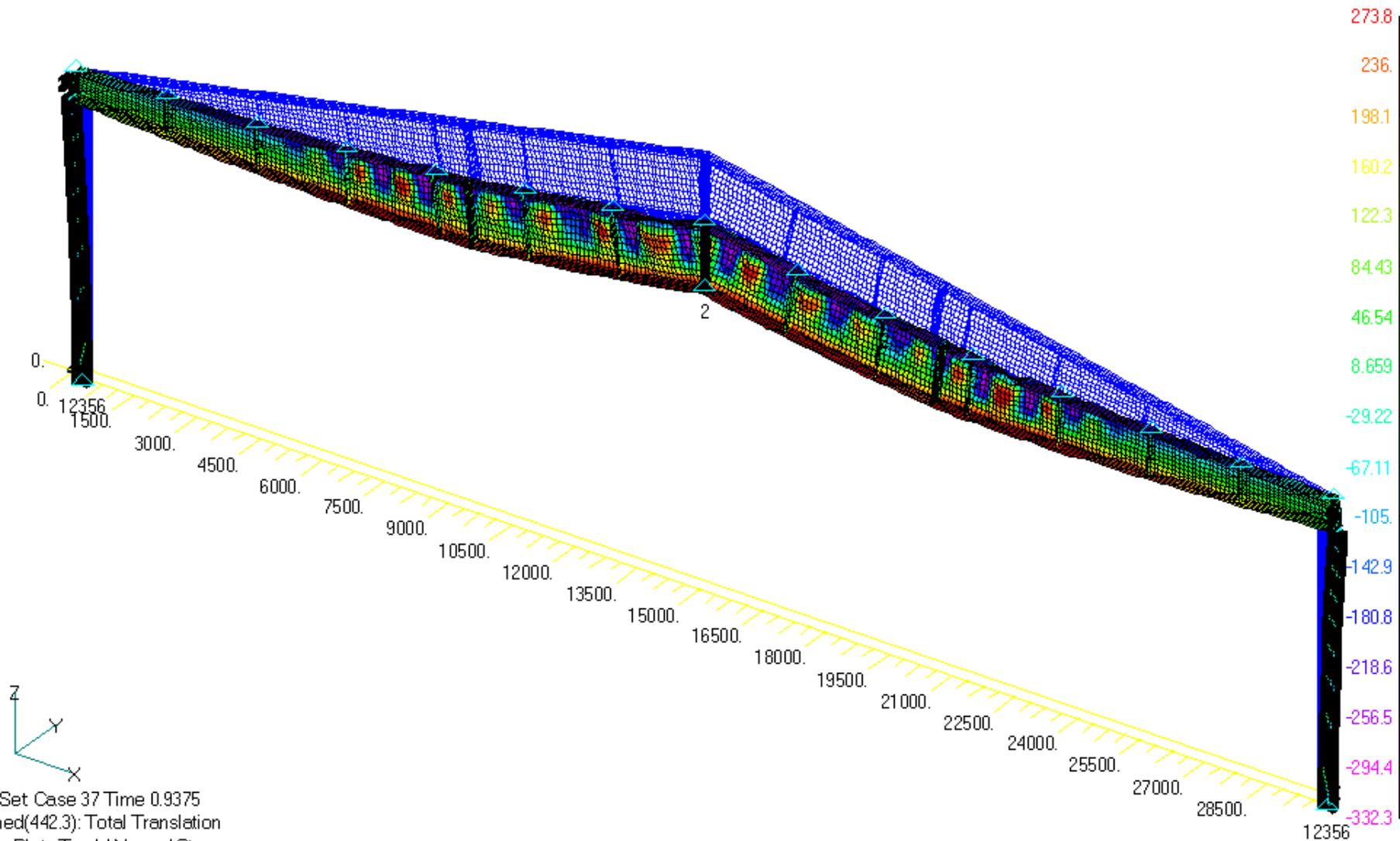
# Пример 4. Рама производственного здания пролетом 30 м (проект фирмы «КБТ»)



Потеря устойчивости стенки в упругой стадии,  
загруженность 0,6.

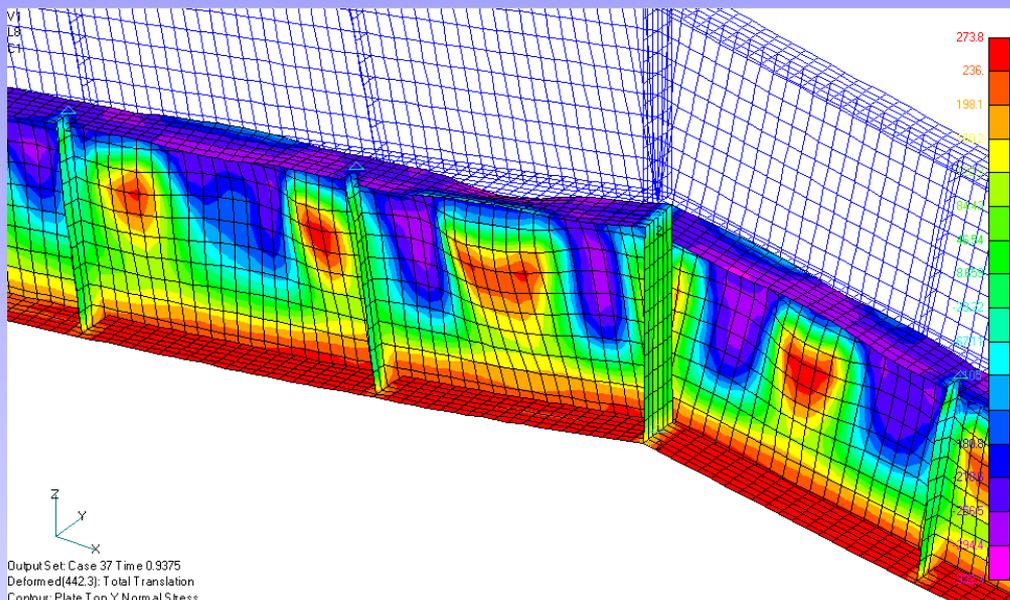
# Определение несущей способности рамы путем выполнения нелинейного деформационного расчета в Nastran

LB  
C1

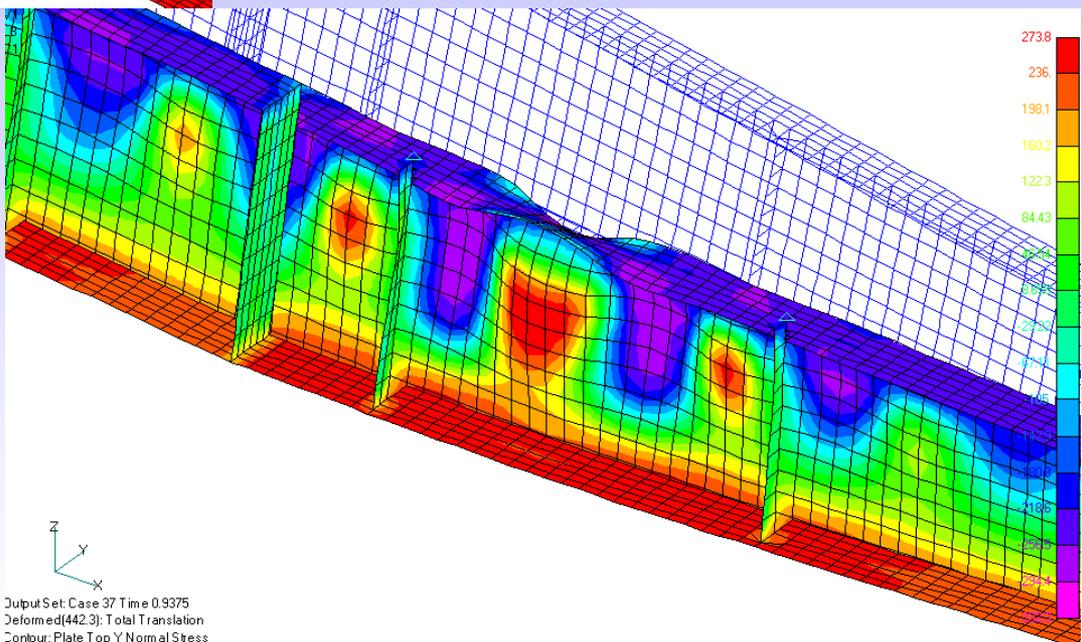


Output Set Case 37 Time 0.9375  
Deformed(442.3): Total Translation  
Contour: Plate Top Y Normal Stress

# Определение несущей способности рамы путем выполнения нелинейного деформационного расчета в Nastran



Расчет показал, что у рамы 22 % резерва несущей способности относительно расчетных нагрузок по первой группе предельных состояний



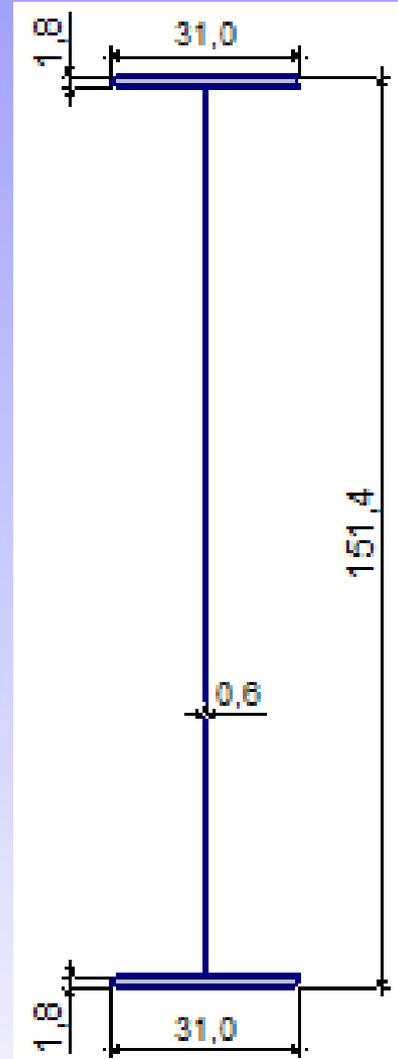
# Расчет тестовой балки с гибкой стенкой по СНиП

Балка шарнирно опертая однопролетная.

Сечение — симметричный двутавр со следующими характеристиками

- высота  $h=1514$  мм;
- высота стенки  $h_w=1460$  мм;
- толщина стенки  $t_w=6$  мм
- толщина верхнего и нижнего поясов  $h_f=18$  мм;
- ширина верхнего и нижнего поясов  $b_f=310$  мм;
- шаг закреплений из плоскости верхнего пояса от 3948 мм (в центре) до 4,28 м (ближе к краям);
- шаг односторонних поперечных ребер жесткости от 1974 мм (два отсека в центре) до 2,14 м (остальные).

Нагрузки  $4,55+13,64=18,19$ кН/м



# Расчет тестовой балки с гибкой стенкой по СНиП

Номера элементов (длина элементов равна половине длины отсека)

27 28 25 26 23 24 21 22 19 20 7 8 3 4 1 2 5 6 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Эпюра M кНм

305 585 822 1037 1232 1406 1559 1691 1802 1892 1962 2011 2038 2046 2046 2038 2011 1962 1892 1802 1691 1559 1406 1232 1037 822 585 305

Эпюра Q кН

273 252 231 211 192 172 153 133 114 94 75 55 36 18 -18 -36 -55 -75 -94 -114 -133 -153 -172 -192 -211 -231 -252 -273

Предельное значение момента по формуле 159 СНиП II-23-81\*

$$M_u = R_y t_w h_w^2 \left[ \frac{A_f}{t_w h_w} + \frac{0,85}{\bar{\lambda}_w} \left( 1 - \frac{1}{\bar{\lambda}_w} \right) \right] = 24 \cdot 0,6 \cdot 146^2 \left[ \frac{31 \cdot 1,8}{0,6 \cdot 146} + \frac{0,85}{8,31} \left( 1 - \frac{1}{8,31} \right) \right] = 223141,85 \text{ кНсм} = 2231$$

кНм > M

Предельное значение поперечной силы по формуле 160 СНиП II-23-81\*

$$Q_u = R_s t h_w \left[ \frac{\tau_{cr}}{R_s} + 3,3 \left( 1 - \frac{\tau_{cr}}{R_s} \right) \frac{\beta \mu}{1 + \mu^2} \right] = 0,58 \cdot 24 \cdot 0,6 \cdot 146 \left[ \frac{2,94}{0,58 \cdot 24} + 3,3 \left( 1 - \frac{2,94}{0,58 \cdot 24} \right) \frac{0,15 \cdot 1,35}{1 + 1,35^2} \right] = 485,27$$

кН

# Расчет тестовой балки с гибкой стенкой по СНиП

Номера элементов (длина элементов равна половине длины отсека)

27 28 25 26 23 24 21 22 19 20 7 8 3 4 1 2 5 6 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Проверка несущей способности по формуле 158 СНиП II-23-81\*

$$\left(\frac{M}{M_u}\right)^4 + \left(\frac{Q}{Q_u}\right)^4 \leq 1 \quad \text{сведена в таблицу 1.}$$

Таблица 1. Результаты расчета балки с гибкой стенкой на прочность.

№ Эл-та	M кНм	Q кН	M <sub>u</sub> кНм	Q <sub>u</sub> кН	M/M <sub>u</sub>	Q/Q <sub>u</sub>	Ф-ла 158
1	2046	0	2231	485,3	0,92	0	0,71
2	2038	36	2231	472,7	0,91	0,08	0,7
5	2011	55	2231	472,7	0,9	0,12	0,66
6	1962	75	2231	472,7	0,88	0,16	0,6
9	1892	94	2231	472,7	0,85	0,2	0,52
10	1802	114	2231	472,7	0,81	0,24	0,43
11	1691	133	2231	472,7	0,76	0,28	0,34
12	1559	153	2231	472,7	0,7	0,32	0,25
13	1406	172	2231	472,7	0,63	0,36	0,18
14	1232	192	2231	472,7	0,55	0,41	0,12
15	1037	211	2231	472,7	0,46	0,45	0,09
16	822	231	2231	472,7	0,37	0,49	0,08
17	585	252	2231	472,7	0,26	0,53	0,09
18	305	273	2231	472,7	0,14	0,58	0,11

# Определение несущей способности тестовой балки путем выполнения нелинейного деформационного расчета в Nastran

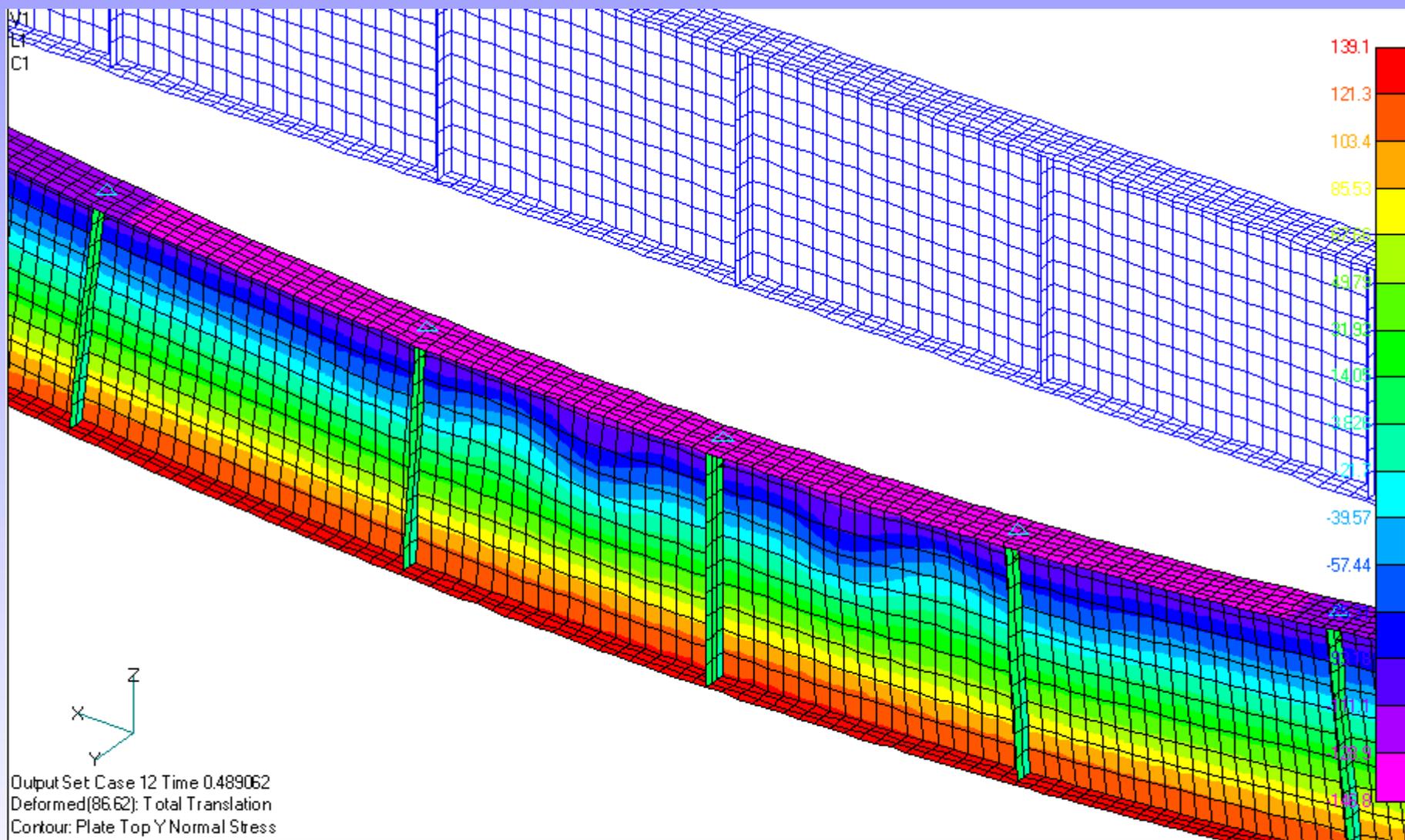
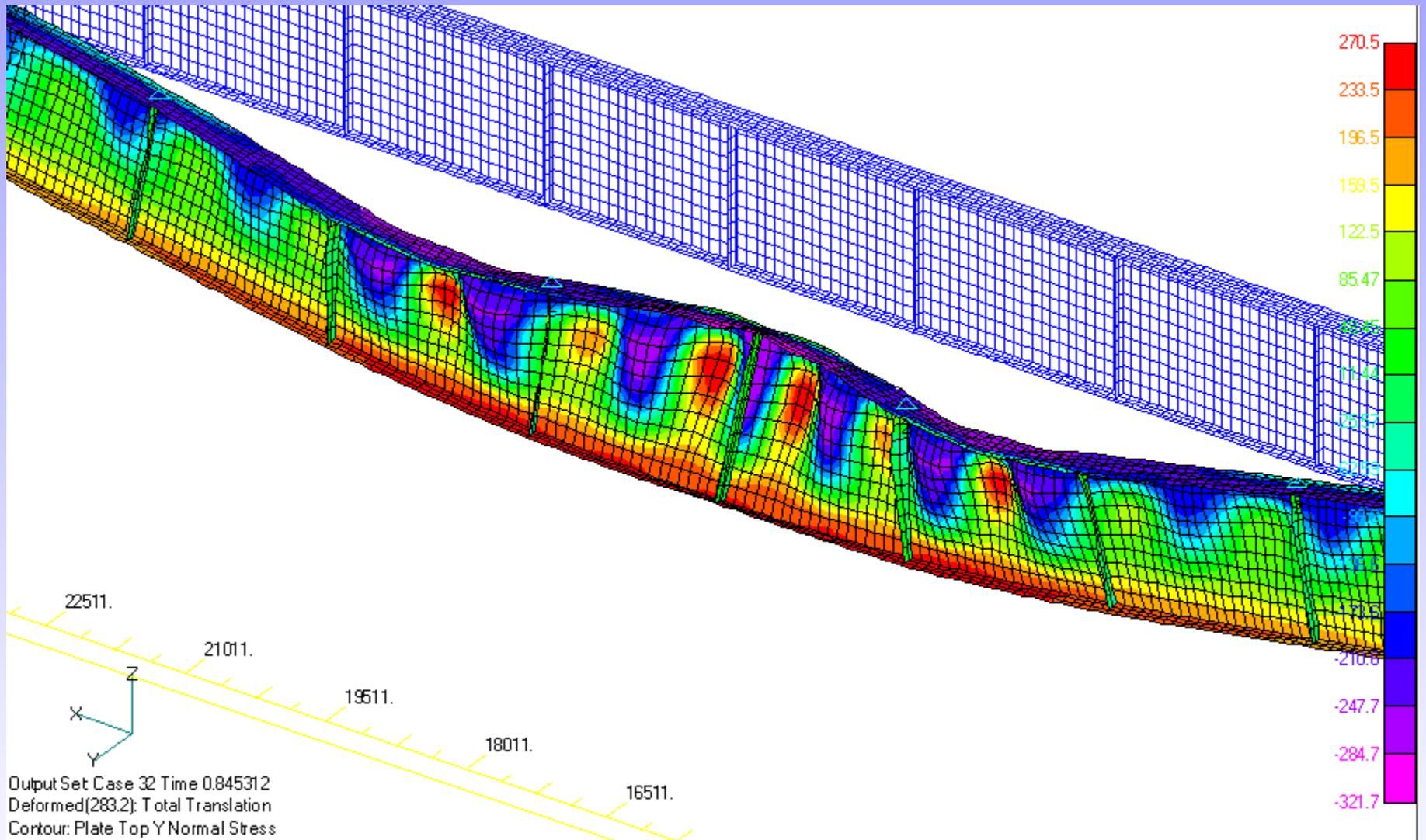
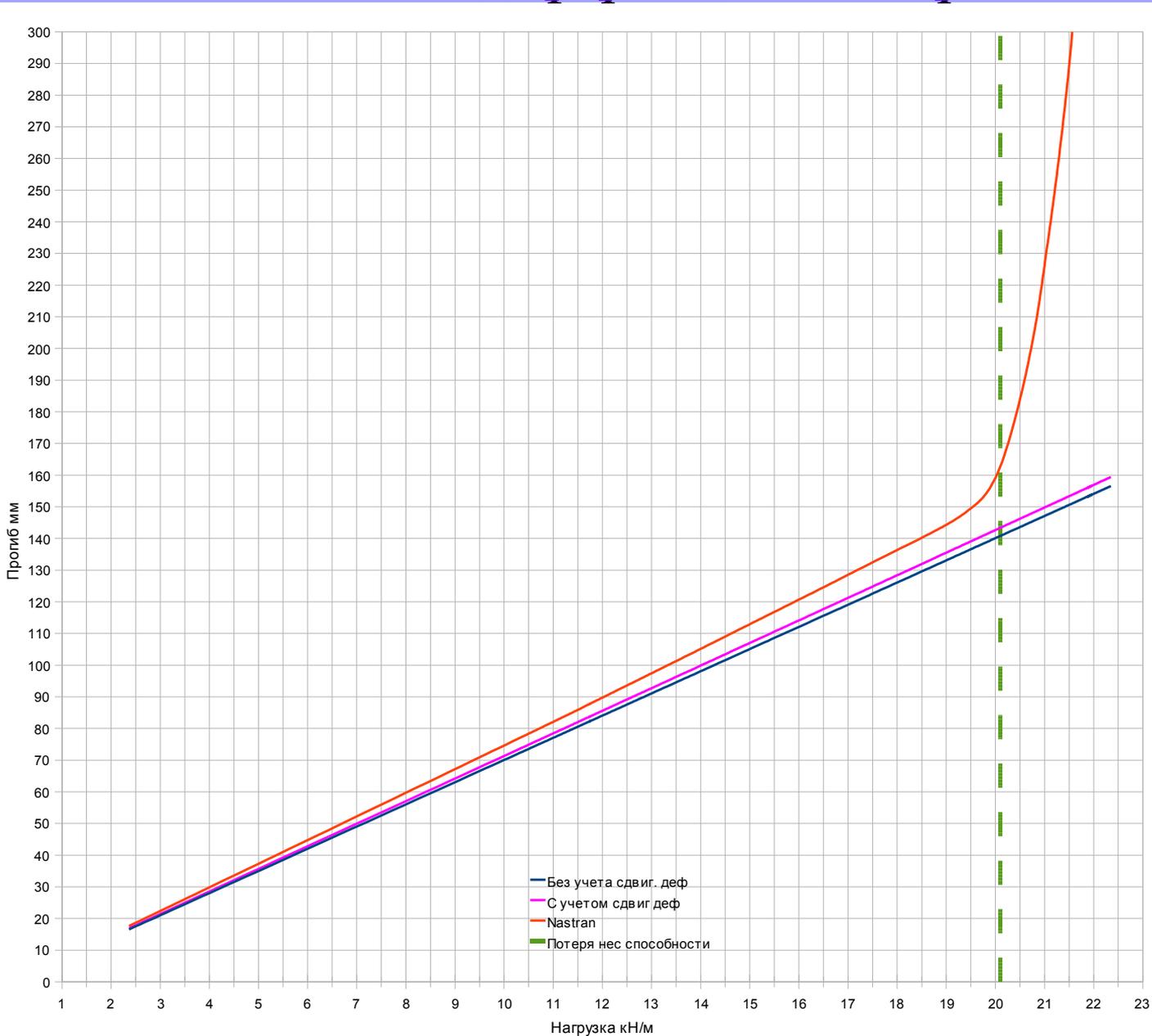


Рис. 6. Напряженно-деформированное состояние в момент потери устойчивости для моделей закрепления 1 и 2 стенки при нагрузке  $0,489062 \cdot 23,65 = 11,57$  кН/м или  $11,57/18,19 = 0,64$  от расчетной нагрузки.

# Определение несущей способности тестовой балки путем выполнения нелинейного деформационного расчета в Nastran



# Определение несущей способности тестовой балки путем выполнения нелинейного деформационного расчета в Nastran



# Выводы по результатам тестовых расчетов балки с гибкой стенкой

Предельная нагрузка, определенная по СНиП II-23-81\*

$$q_{\text{СНиП}} = qMu/M = 18,19 * 2231 / 2046 = 19,83 \text{ кН/м}$$

Предельная нагрузка, рассчитанная в Nastran

$$q_{\text{Nastran}} = 20,1 \text{ кН/м}$$

$$\text{Разница } 100 * (20,1 - 19,83) / 19,83 = 1,36 \%$$

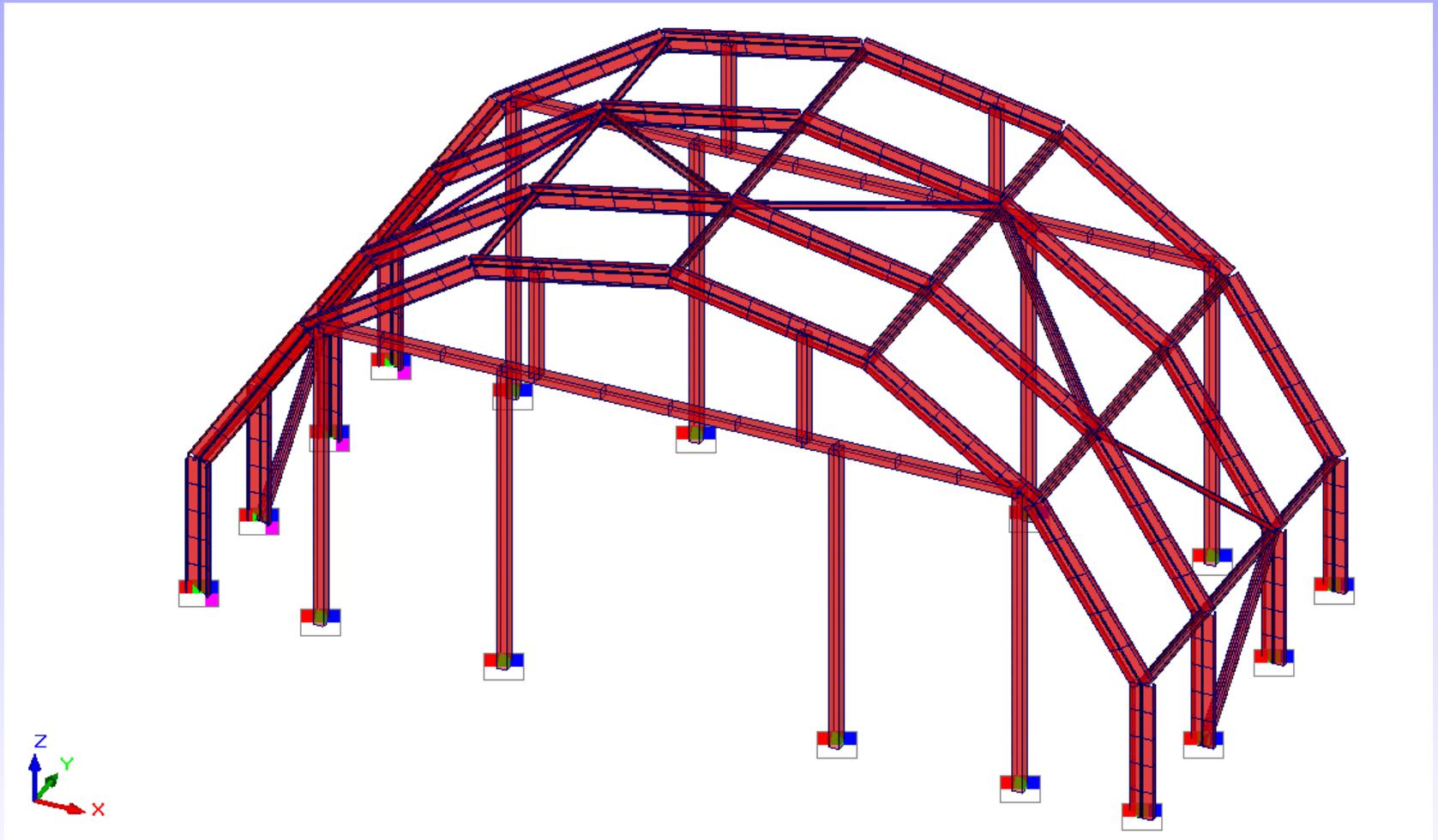
# Пример 5. Расчет арочника на основе тонкостенных оцинкованных профилей



# Узлы сопряжения элементов, предложенные заказчиком.



# Расчётная модель Scad на основе СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ



# Коэффициенты использования по прочности

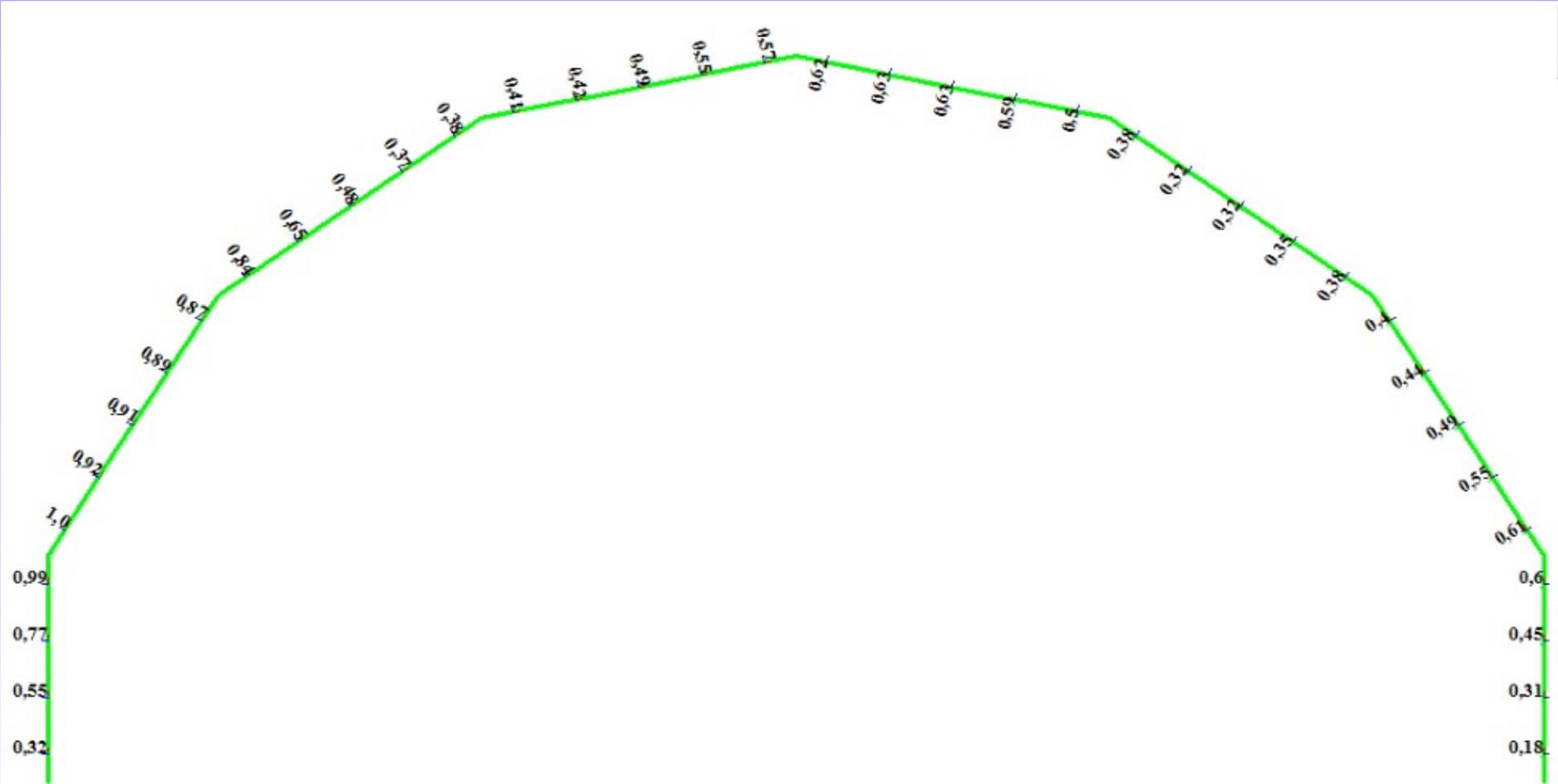
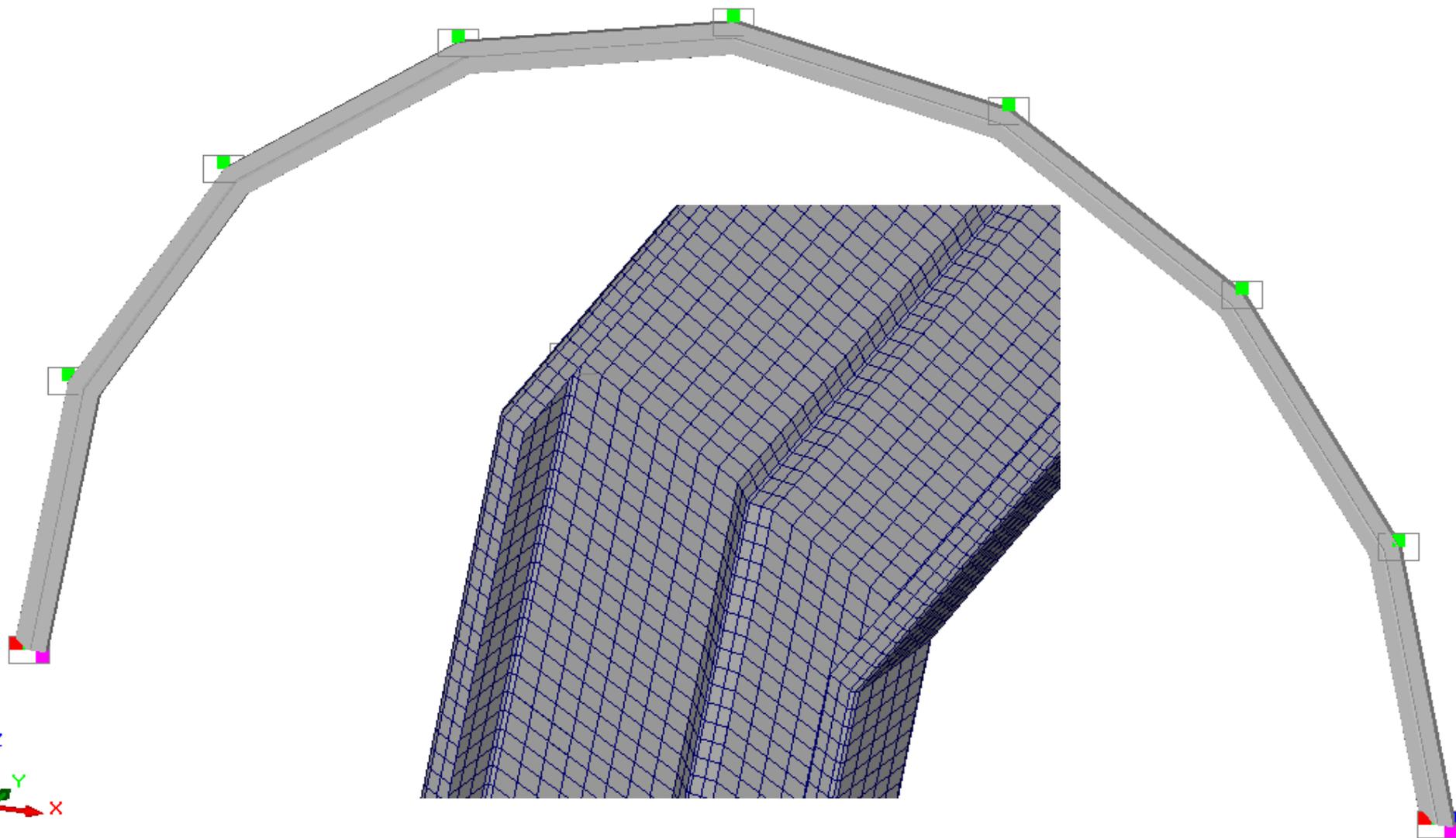


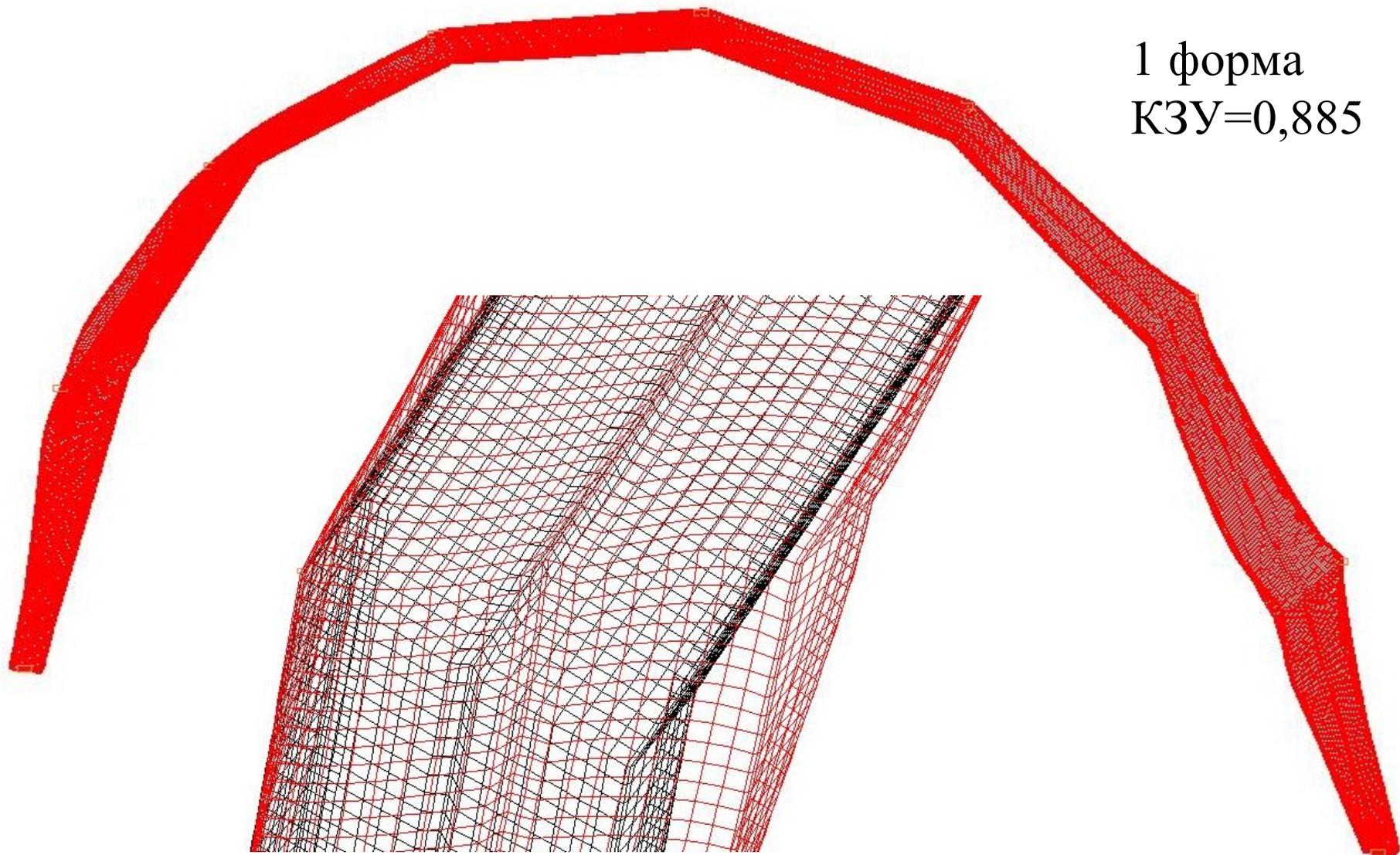
Рис. 2.2.15. Несущая способность по прочности ( $\gamma_c=0,75$ ).



# Оболочечная модель Scad вариант закреплений 1

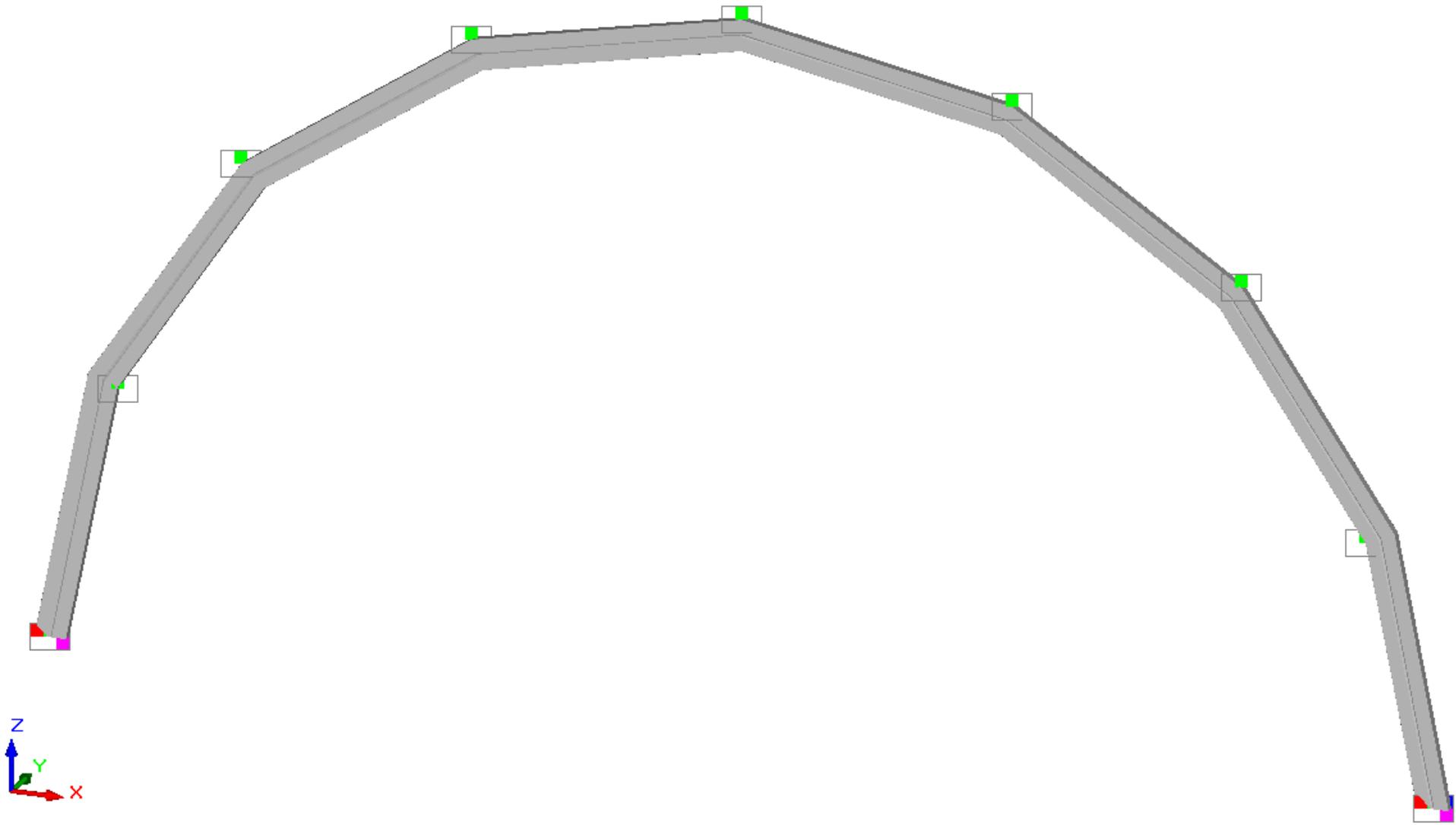


# Оболочечная модель Scad вариант закреплений 1

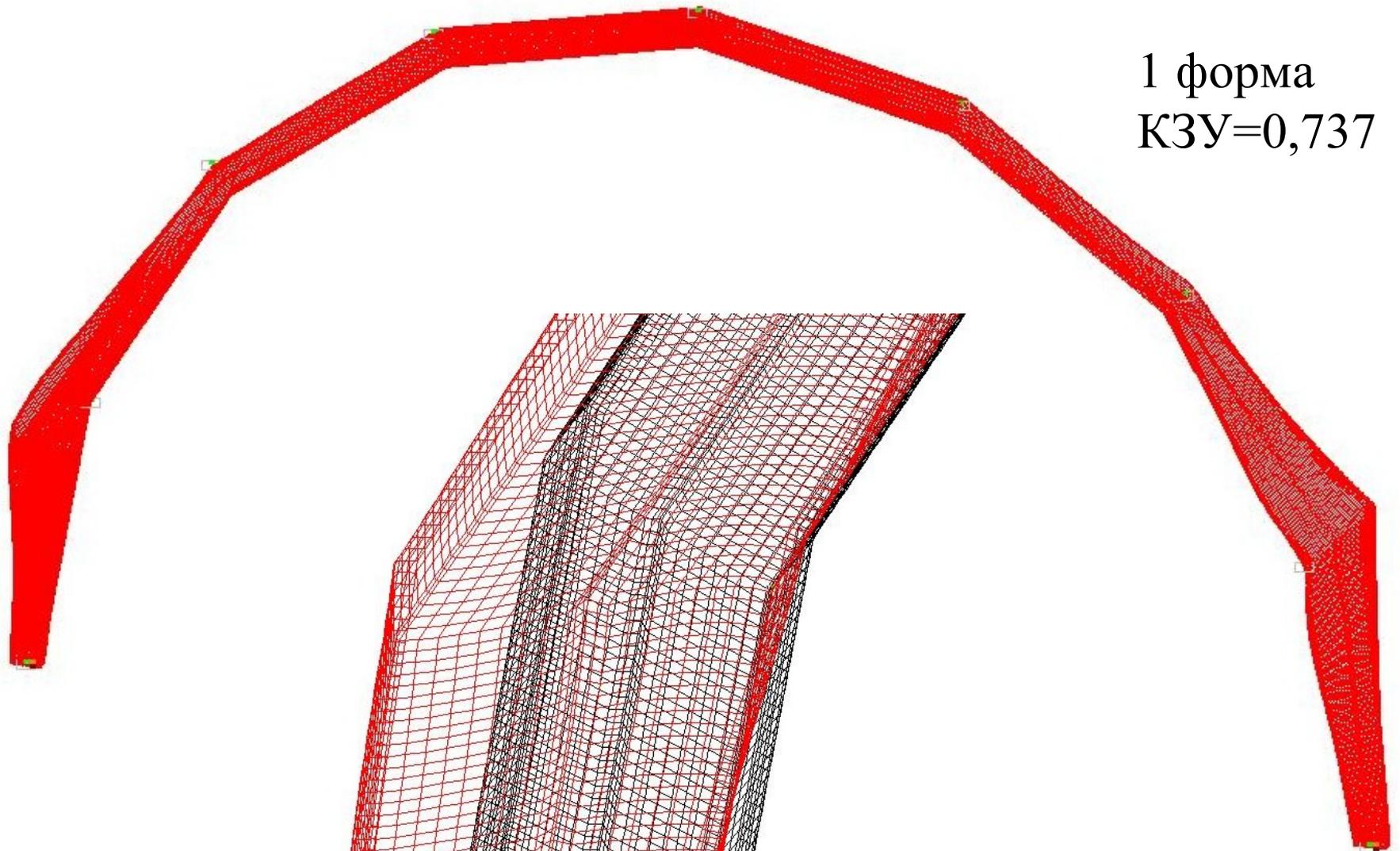


1 форма  
 $K3Y=0,885$

# Оболочечная модель Scad вариант закреплений 2.

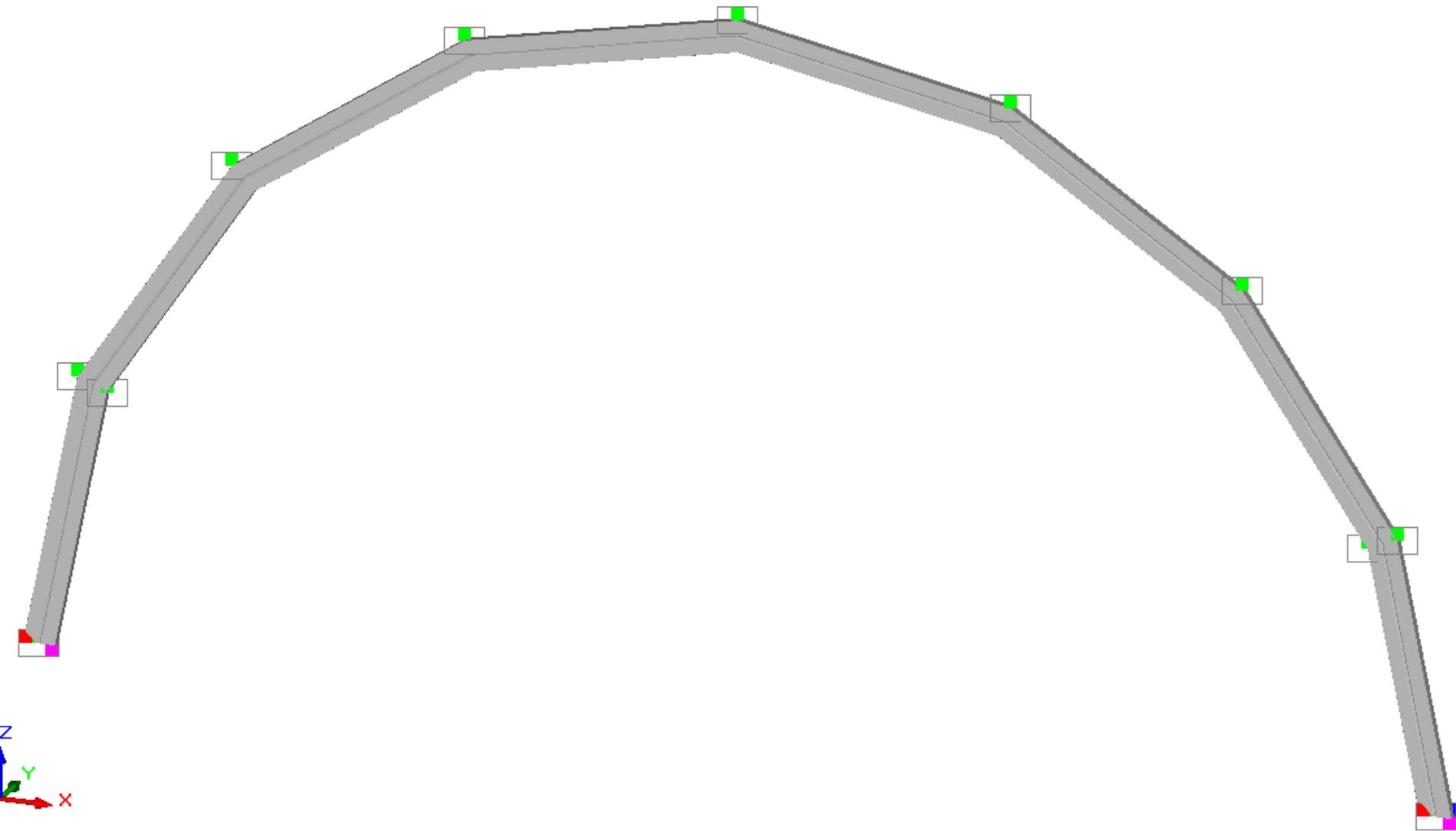


# Оболочечная модель Scad вариант закреплений 2

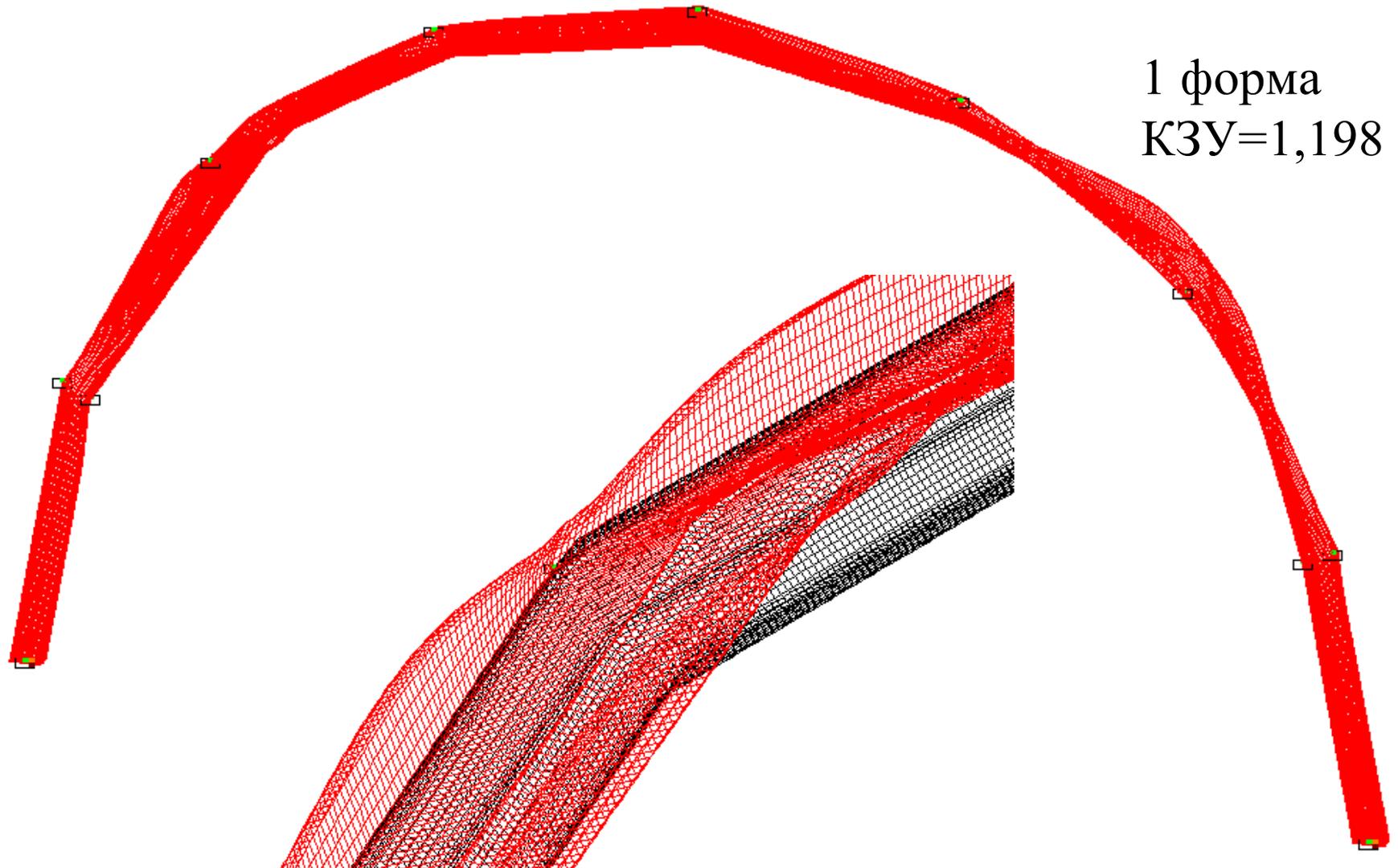


# Оболочечная модель Scad

## вариант закреплений 3

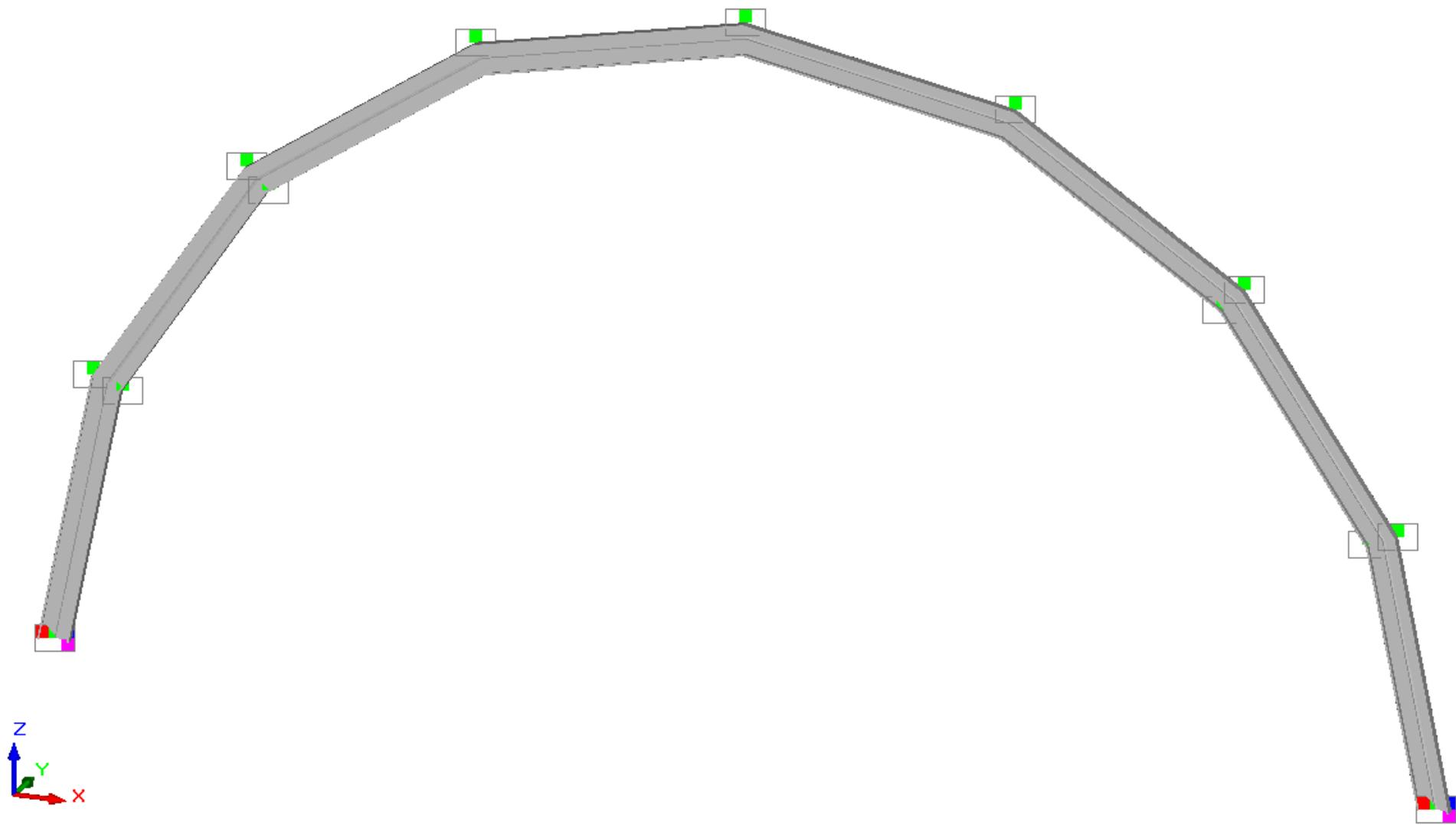


# Оболочечная модель Scad вариант закреплений 3

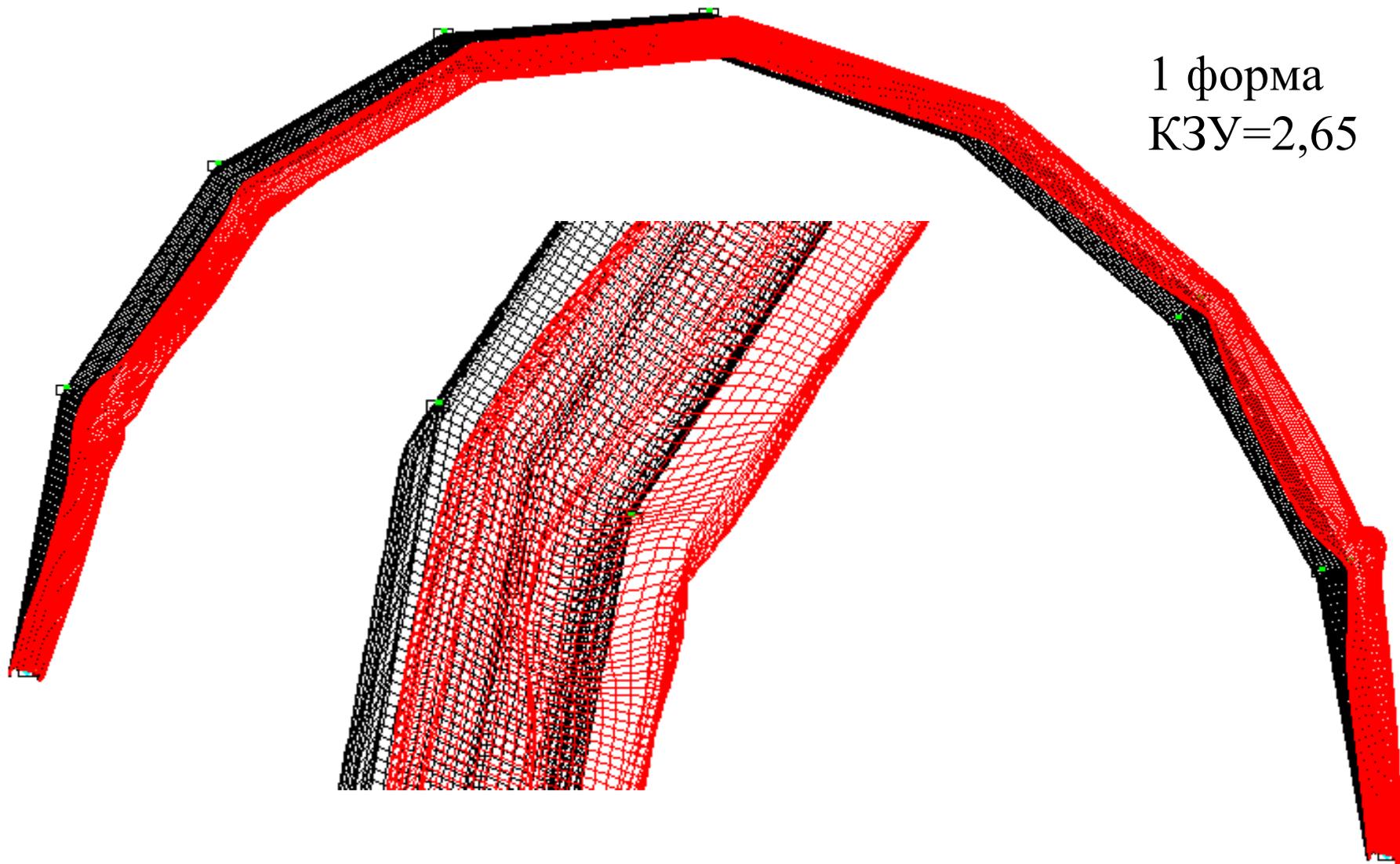


# Оболочечная модель Scad

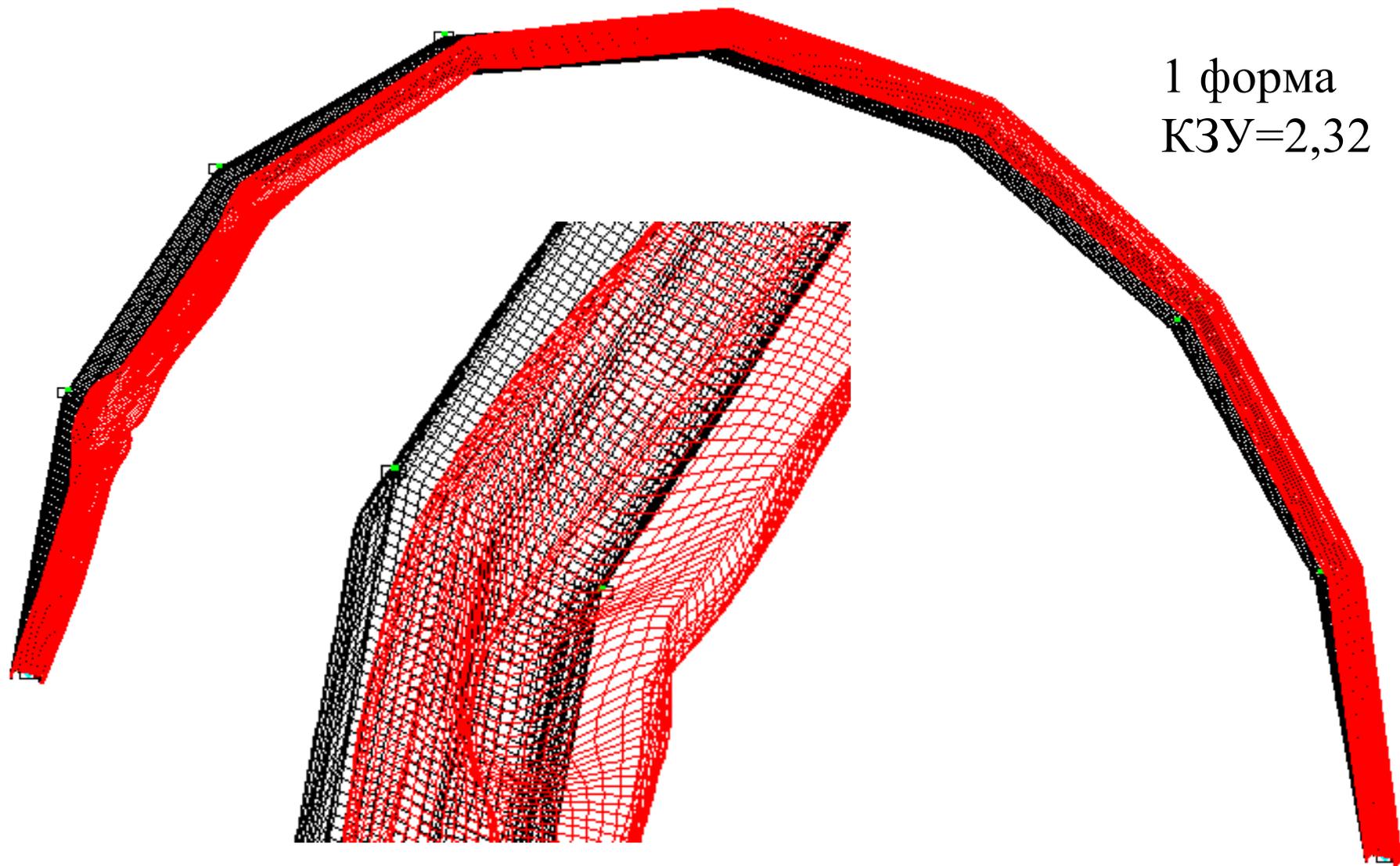
## вариант закреплений 4



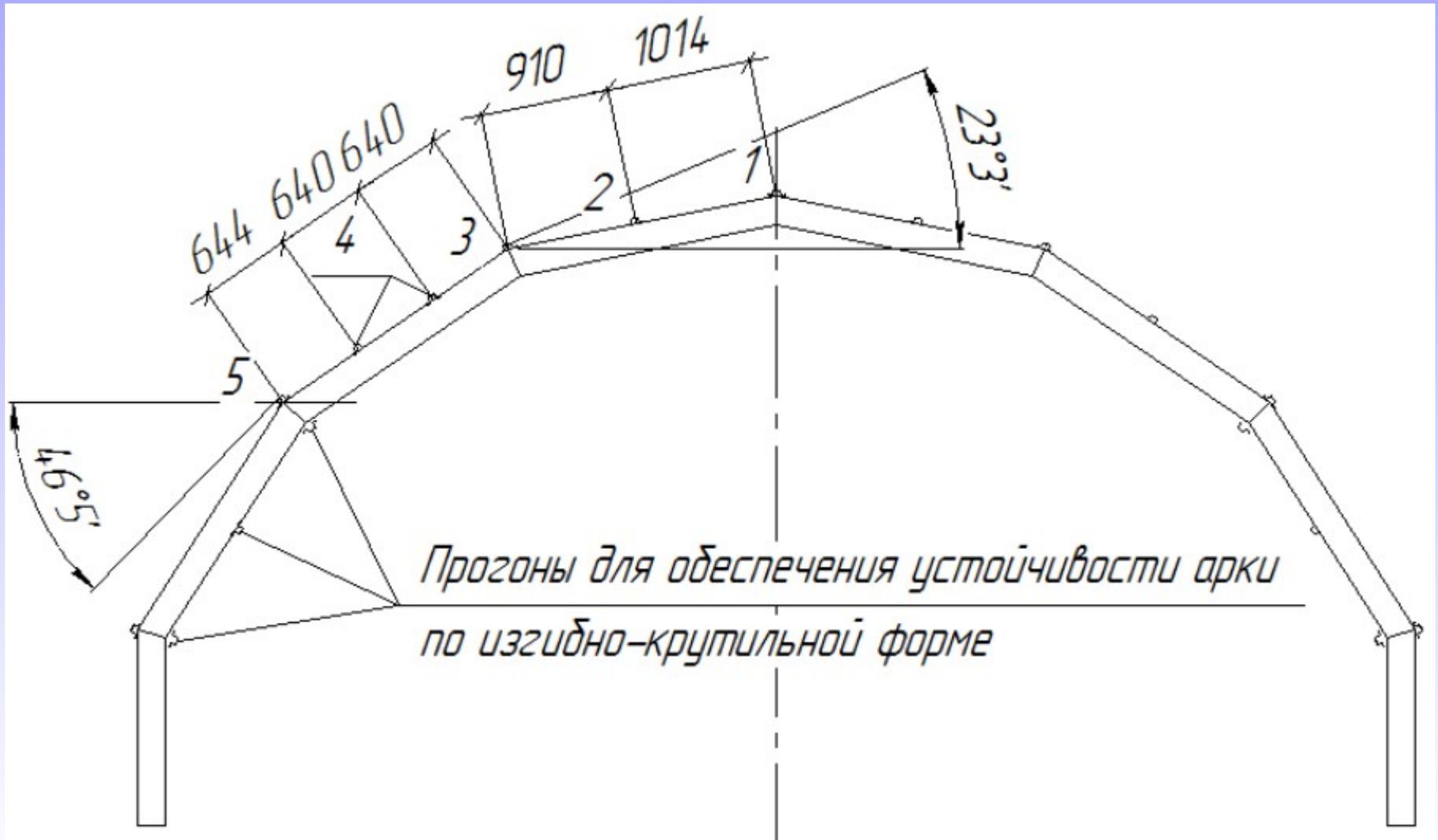
# Оболочечная модель Scad вариант закреплений 4. Симметричная нагрузка



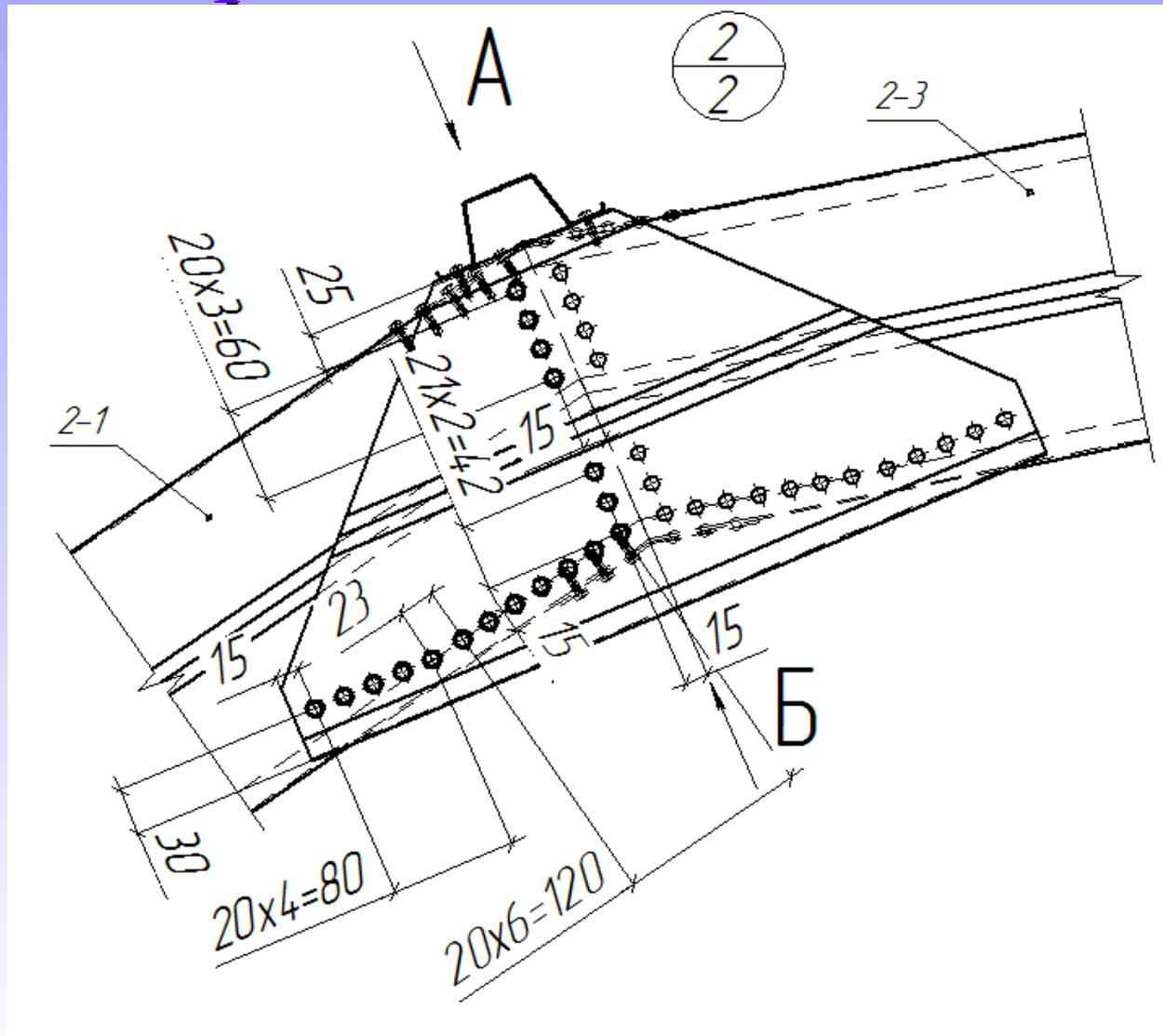
# Оболочечная модель Scad вариант закреплений 4. Несимметричная нагрузка



# Проектное решение по размещению прогонов и связей



# Проектное решение узла сопряжения элементов



# Поверочный нелинейный деформационный расчет в программе Nastran.

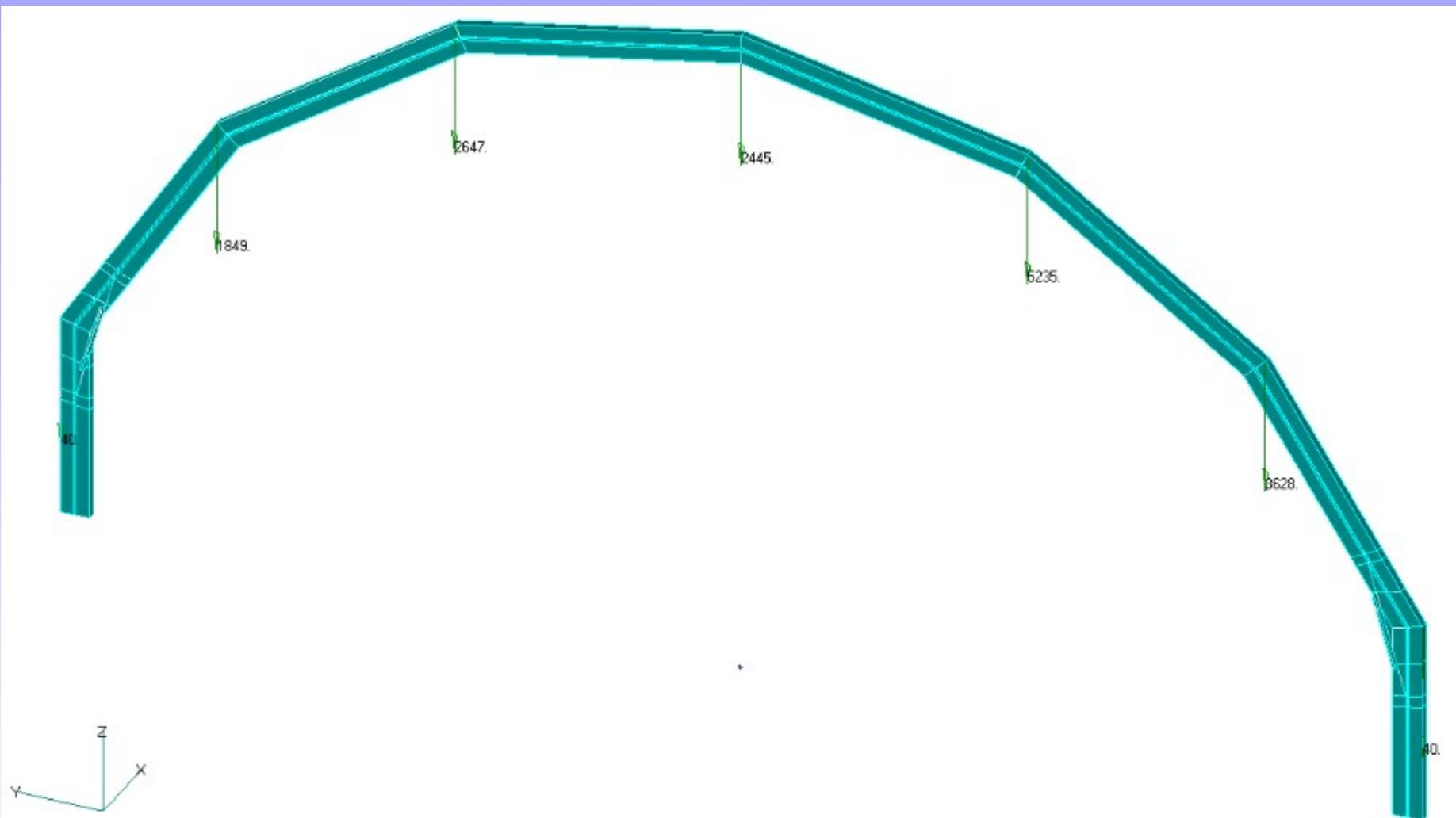
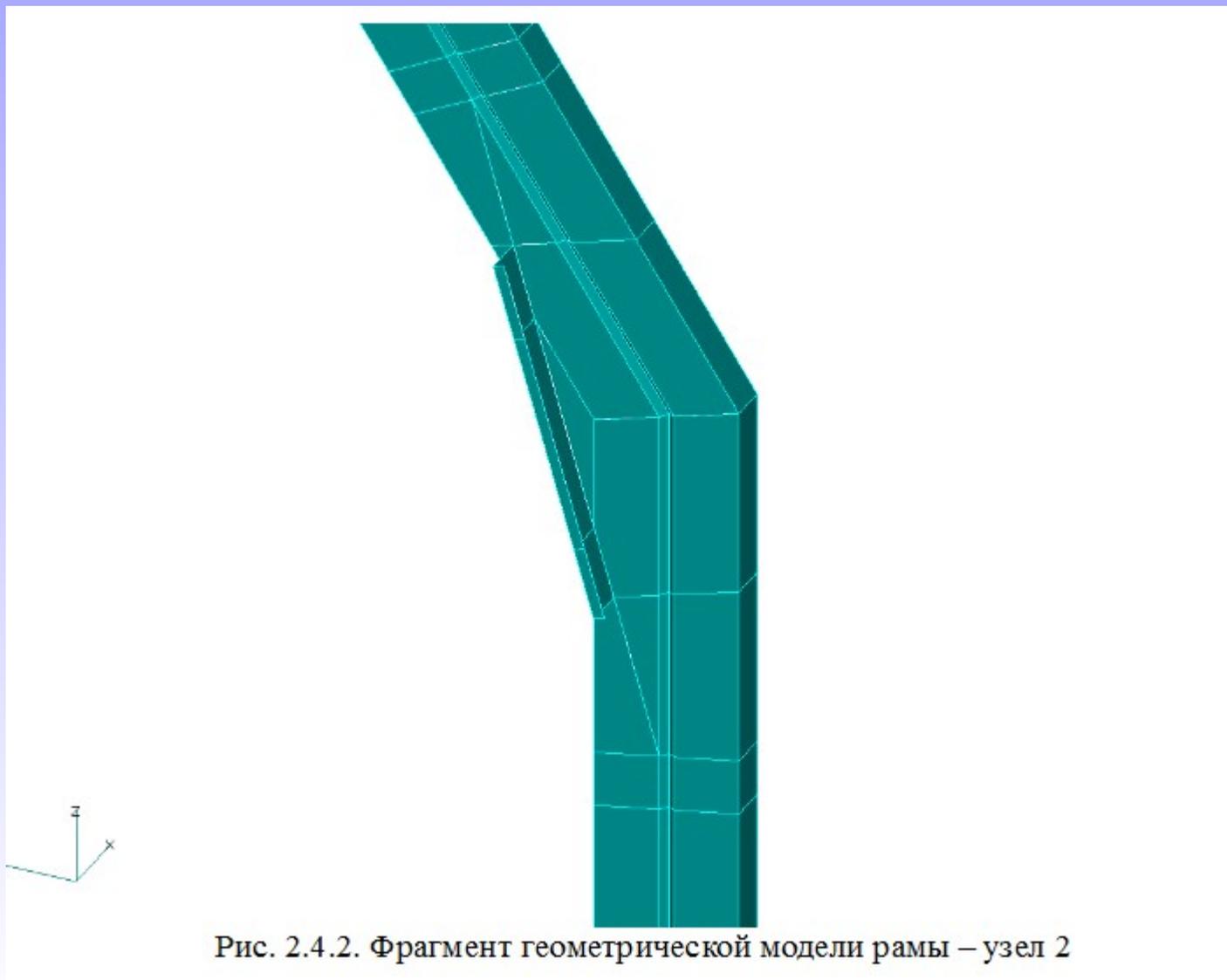


Рис. 2.4.1. Общий вид геометрической модели рамы с нагрузками

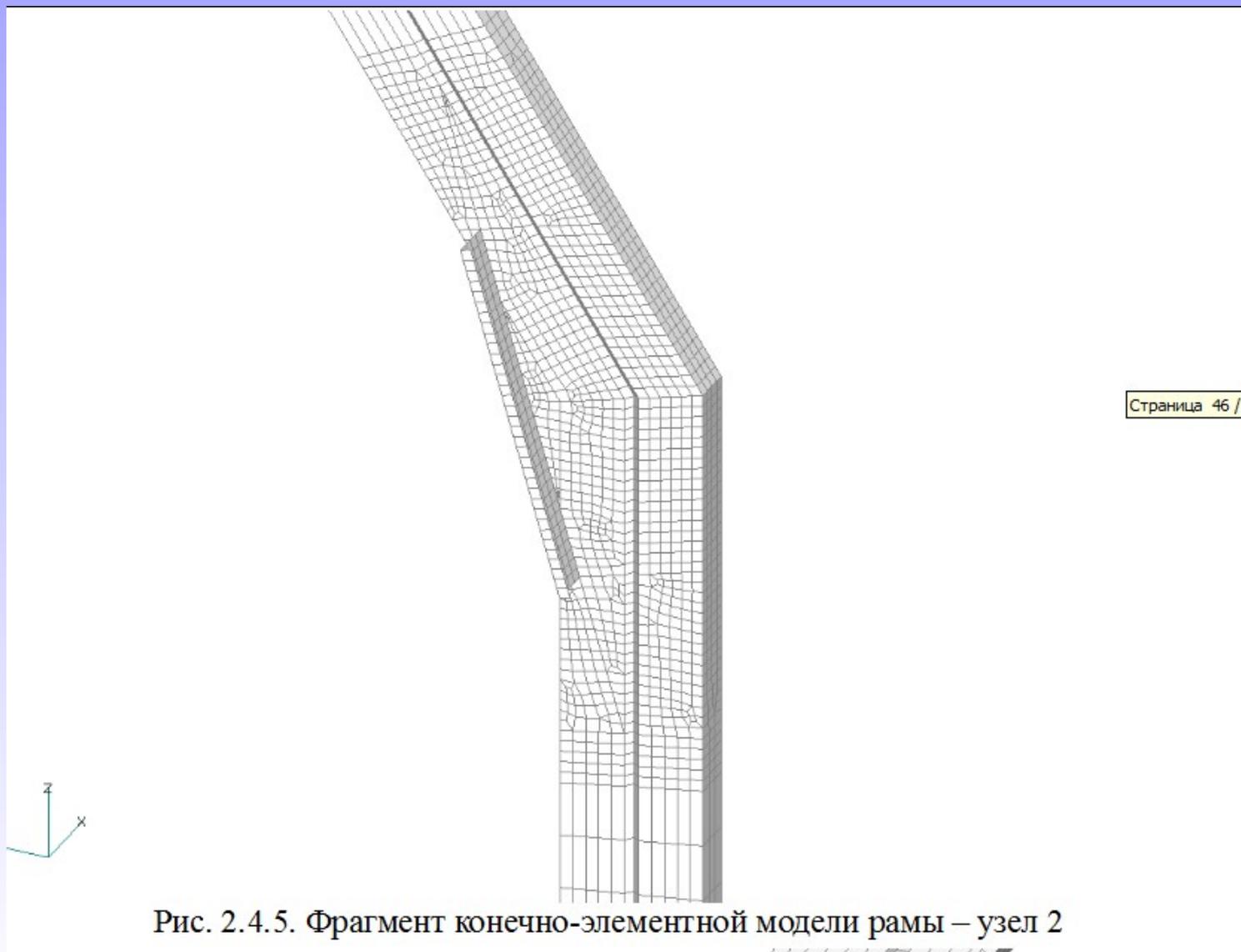
# Поверочный нелинейный деформационный расчет в программе Nastran.



# Поверочный нелинейный деформационный расчет в программе Nastran.



# Поверочный нелинейный деформационный расчет в программе Nastran.



# Поверочный нелинейный деформационный расчет в программе Nastran.

V4  
L3  
C1

Output Sol: Case 15 Time 0.7125  
Deformed(B9.05): Total Translation  
Contour: Plate Top VonMises Stress

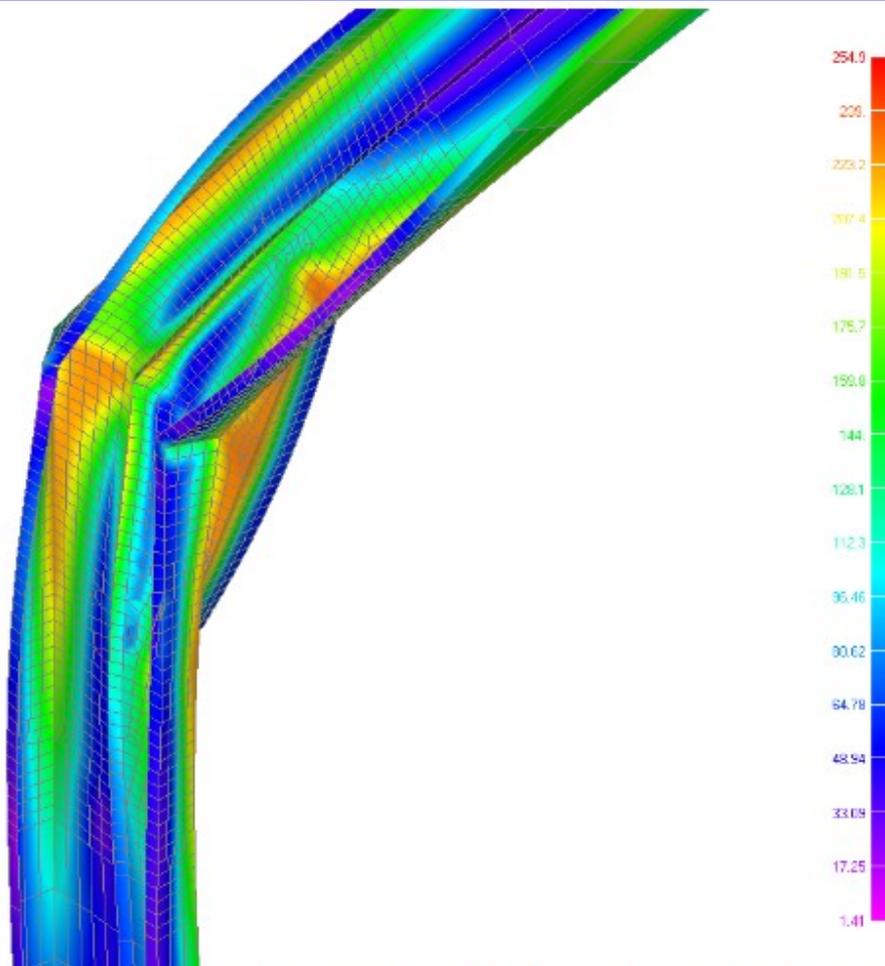
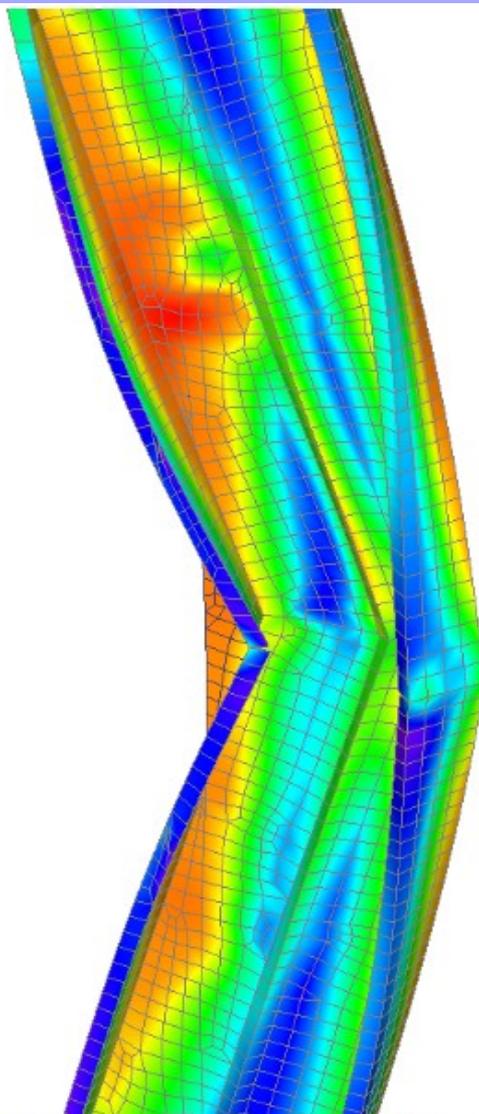


Рис. 2.4.7. Деформации и эквивалентные напряжения правого узла. Коэффициент увеличения деформаций  $p=10$

# Поверочный нелинейный деформационный расчет в программе Nastran.

V4  
L3  
C1



Несущая способность конструкции арки при действии несимметричной комбинации нагрузок равна 107 %.



Output Set: Case 15 Time 0.7125  
Deformed(69.05): Total Translation  
Contour: Plate Top VonMises Stress

Рис. 2.4.8. Деформации и эквивалентные напряжения левого узла. Коэффициент увеличения деформаций  $p=10$

# Поверочный нелинейный деформационный расчет в программе Nastran.

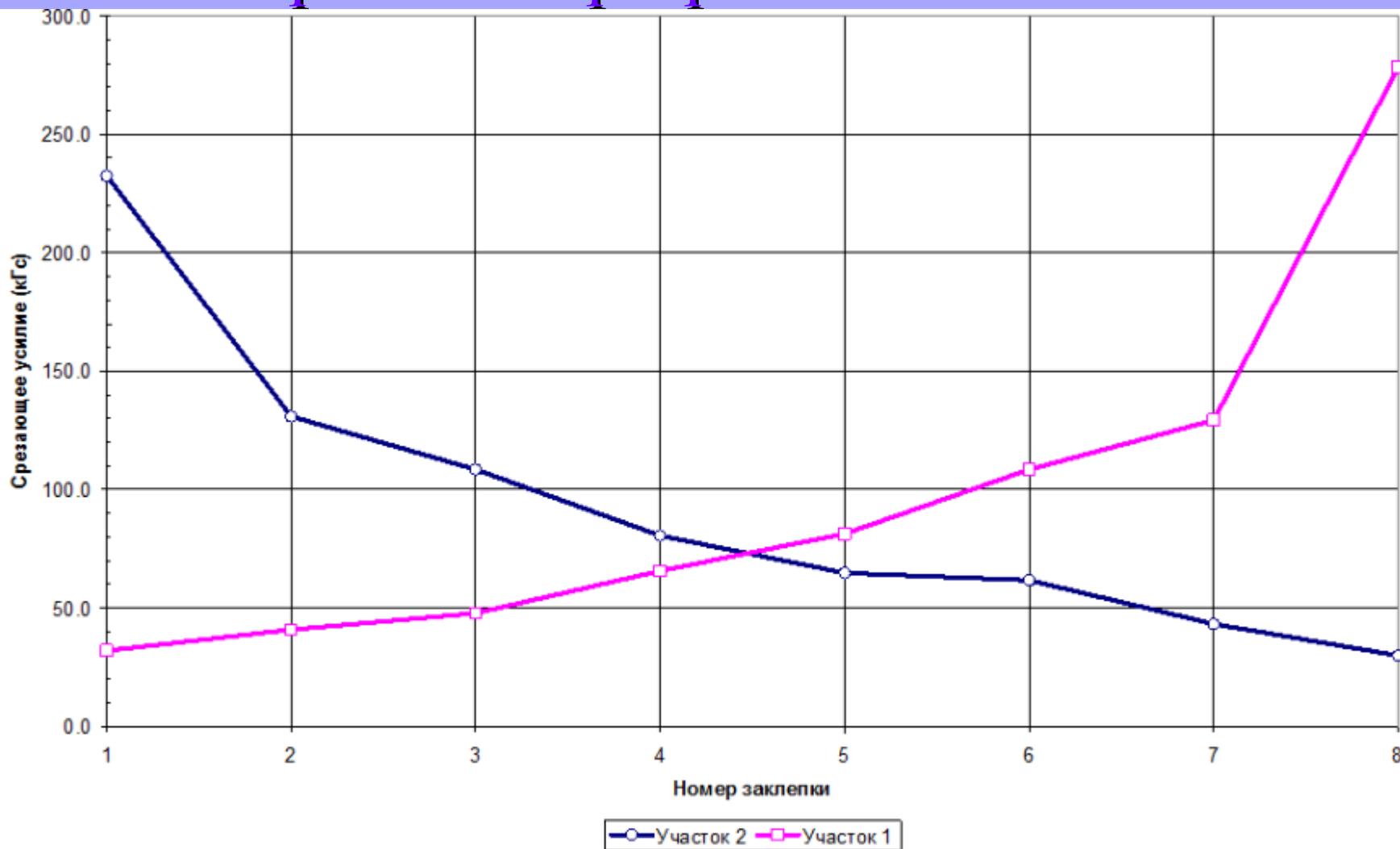
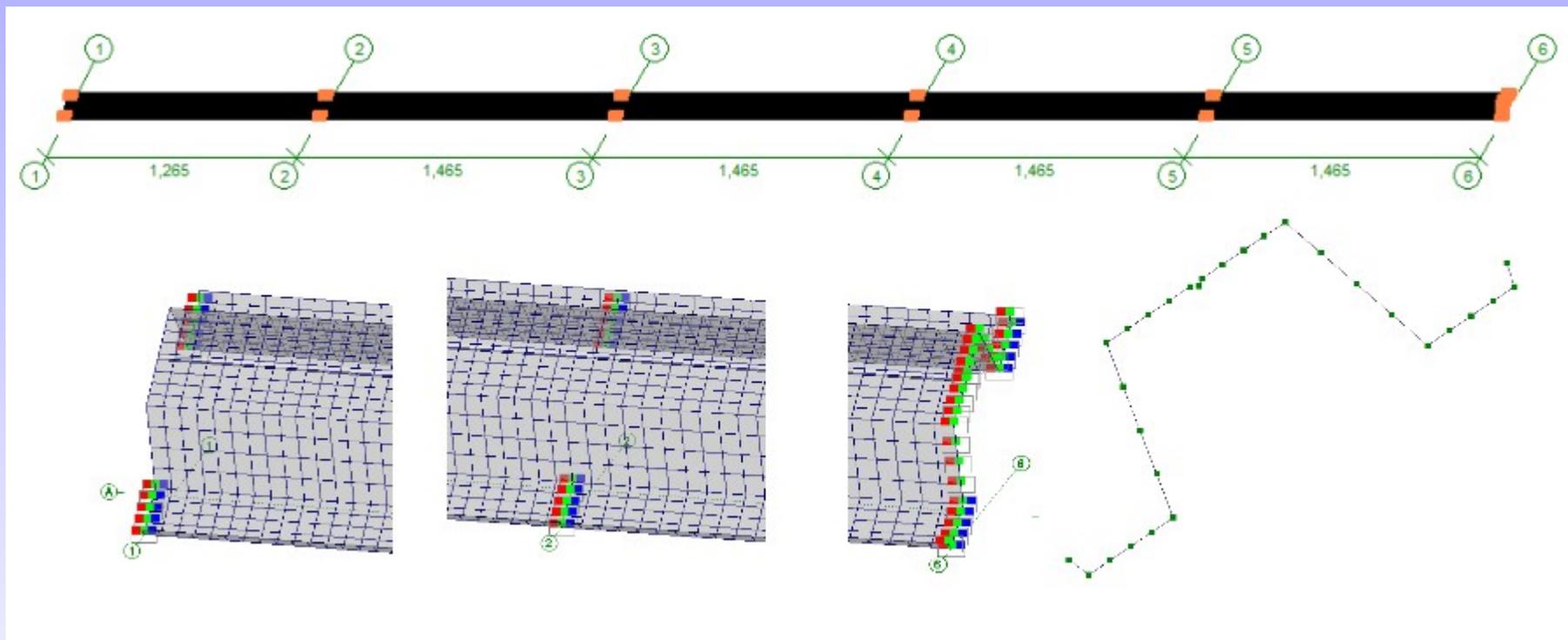


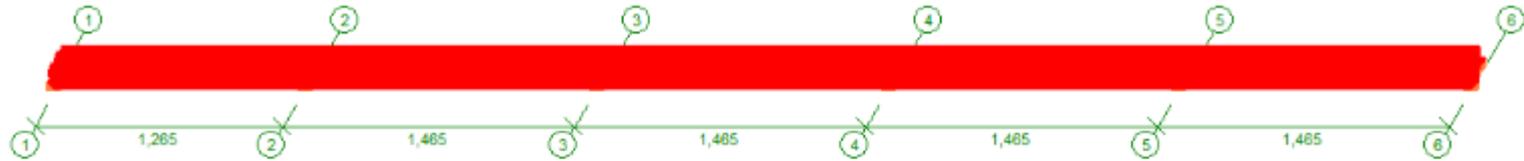
Рис. 2.4.11. Срезающие усилия в заклепках вдоль пояса накладки в узле 2. Порядок следования заклепок – сверху вниз

# Расчет несущей способности прогонов в Scad

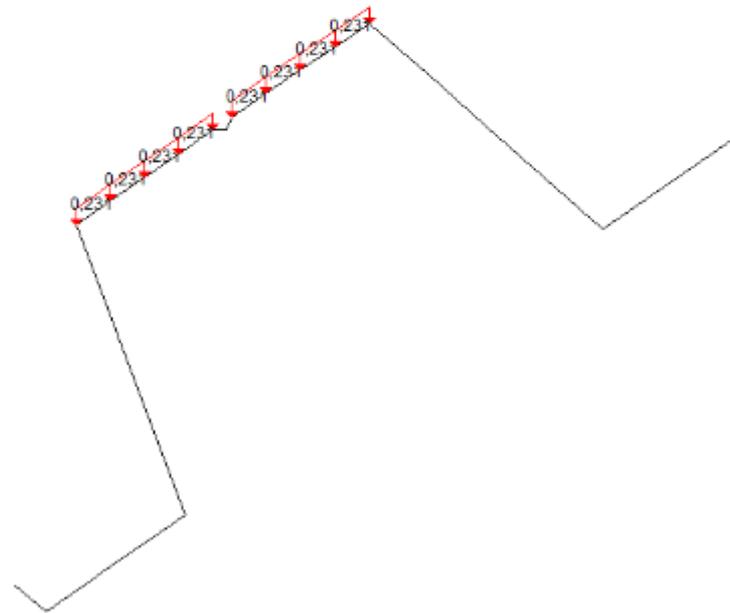
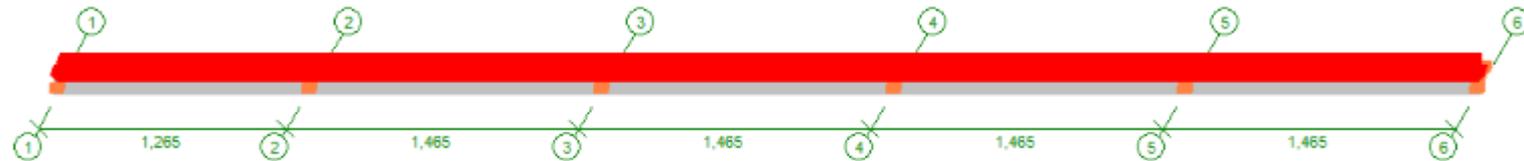


# Расчет несущей способности прогонов в Scad

Загрузка 1. Собственный вес, интенсивность  $0,065 \text{ кН/м}^2$



Загрузка 2. Постоянные, интенсивность  $0,023 \text{ кН/м}^2$



Загрузка 3. Снеговая, интенсивность  $33,56 \text{ кН/м}^2$ .

# Расчет несущей способности прогонов в Scad

Изополя эквивалентных напряжений по 4 теории прочности.

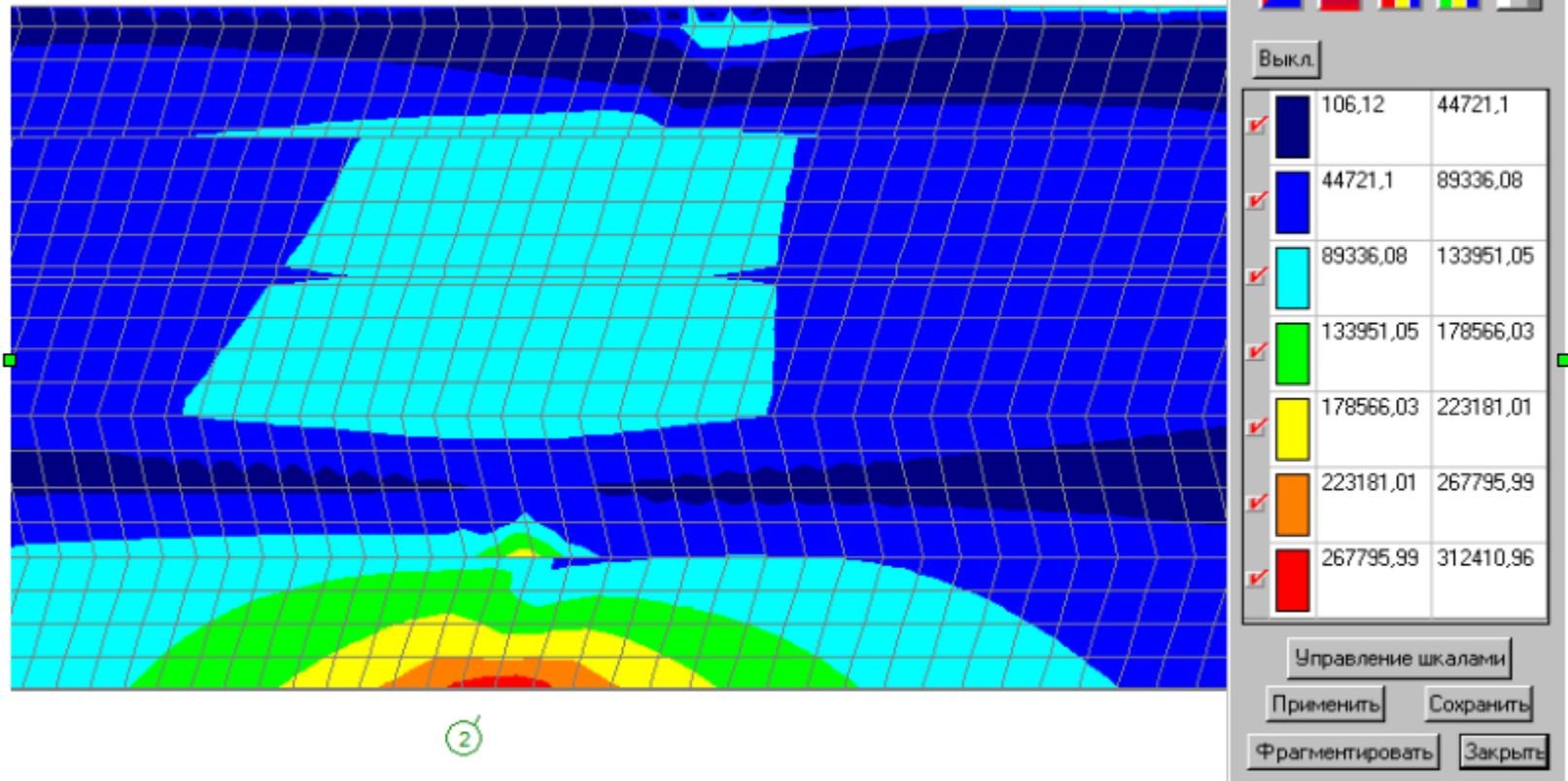


Рис. 2.1.8. Результаты расчета напряжений в опорной зоне по оси 2, комбинация L1+L2+L3.

# Расчет несущей способности прогонов в Scad

1 форма потери устойчивости, КЗУ=5,82

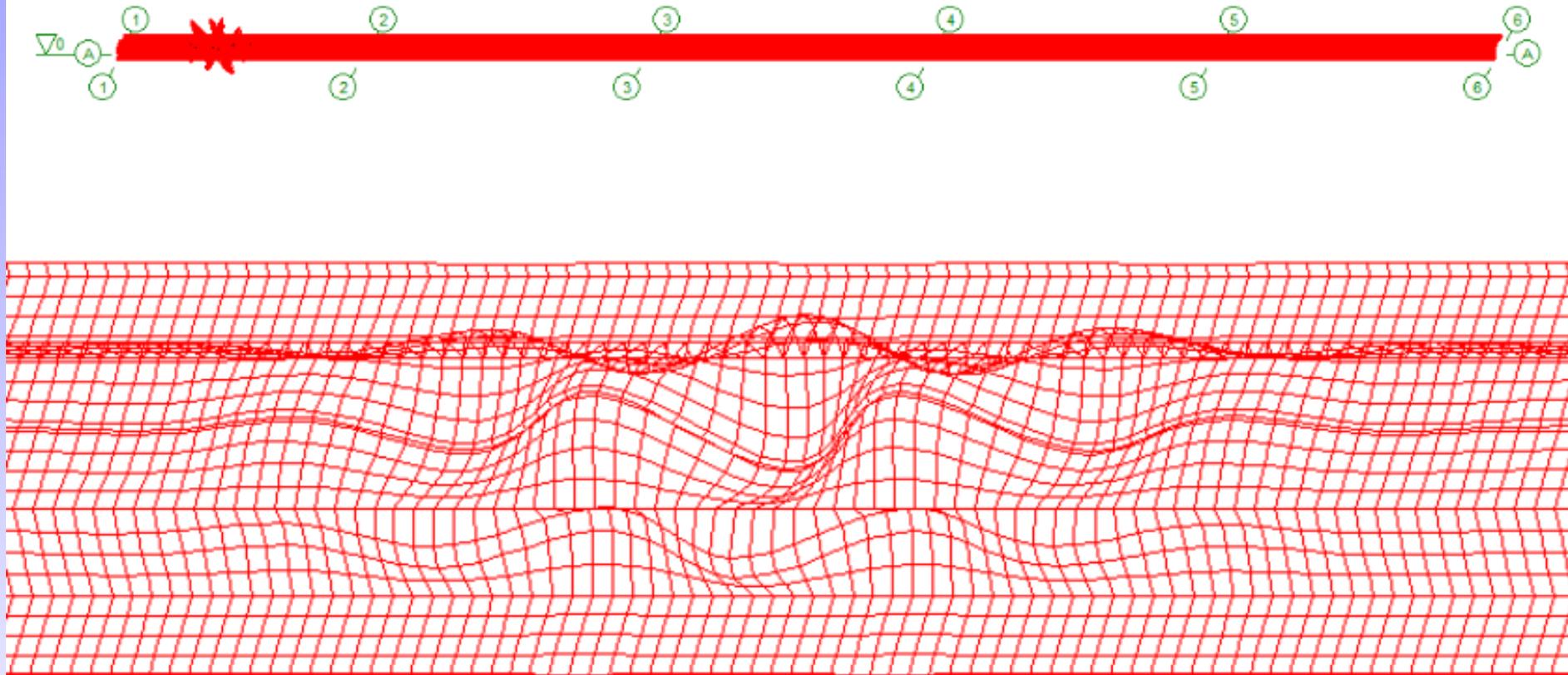


Рис. 2.1.10. Результаты расчета на устойчивость,  
КЗУ — коэффициент запаса устойчивости.

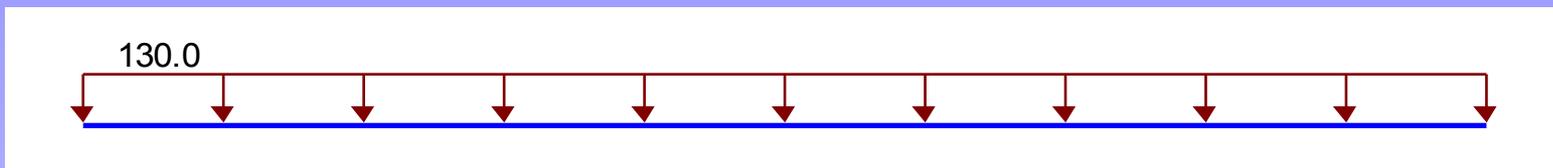
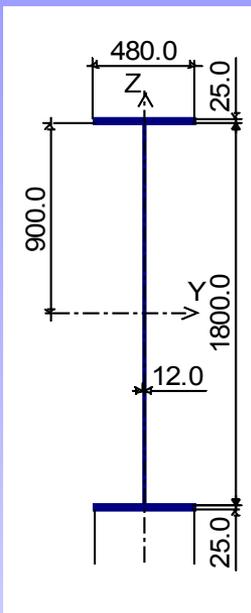
## Выдержки из пособия к СНиП II-23-81\*

- П. 7.6. Стенки балок, в которых действуют все компоненты напряженного состояния ( $\sigma$ ,  $\tau$  и  $\sigma_{loc}$ ), рассчитываются в предположении упругой работы материала. В стенках балок, в которых отсутствуют местные напряжения ( $\sigma_{loc}=0$ ), допускается учет развития пластических деформаций при выполнении условий, указанных в п. 7.5 СНиП II-23-81\*.
- П. 7.8 .Устойчивость стенок балок проверяется с учетом их частичного защемления в поясах, степень которого при упругой работе балки зависит от соотношения жесткостей пояса и стенки. Эффект защемления стенки поперечными ребрами жесткости не учитывается, и в местах их постановки принимается шарнирное опирание кромок.

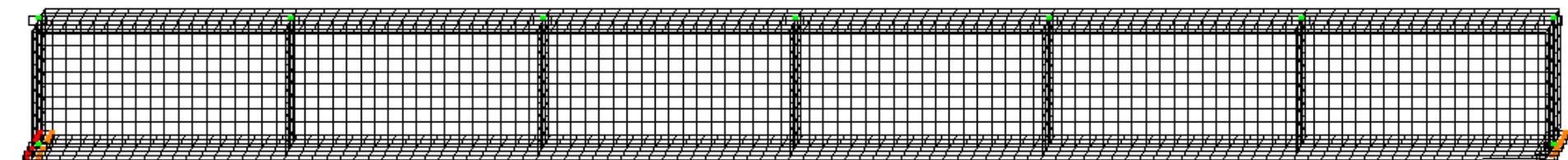
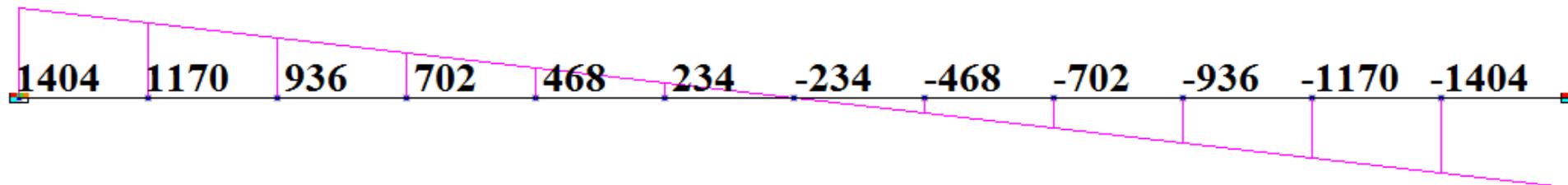
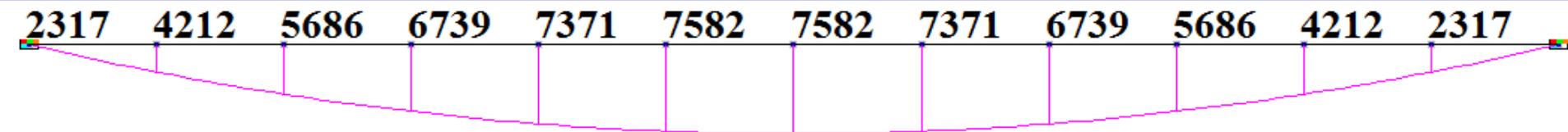
- П. 7.8. Формула (75) СНиП II-23-81\*  $\sigma_{cr} = \frac{c_{cr} R_y}{\bar{\lambda}_w^2}$  дает

минимальное значение критических напряжений при чистом изгибе, которые соответствуют отношению длины отсека к его высоте  $a/h_{ef}=0,667$ . Если отношение  $a/h_{ef}$  не кратно 0,667, то критические напряжения будут выше.

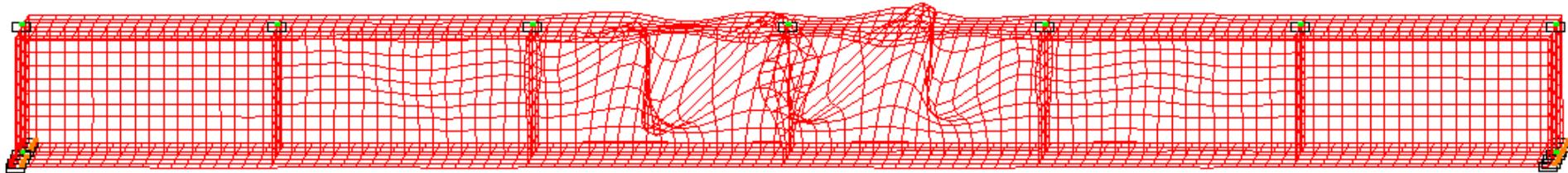
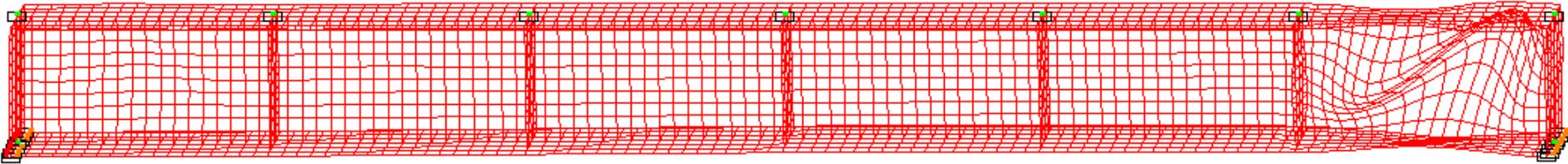
# Расчет тестовой однопролетной шарнирно опертой балки.



Решалась однопролетная балка пролетом 21.6 м. Нагрузка 130 кН/м. Коэффициент использования по моменту 1.53.



# Формы потери устойчивости

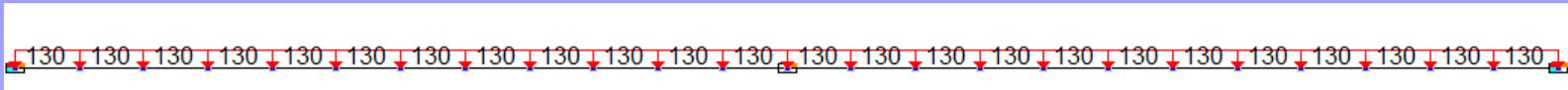
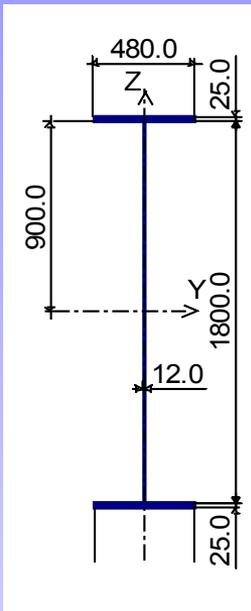


# Сравнение со СНиП II-23-81\*

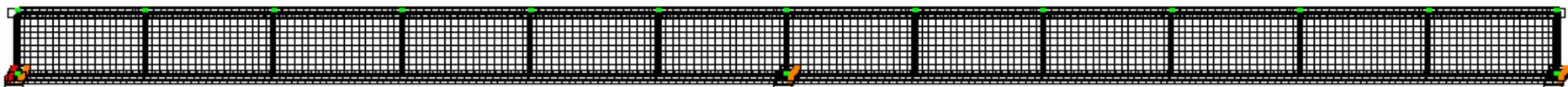
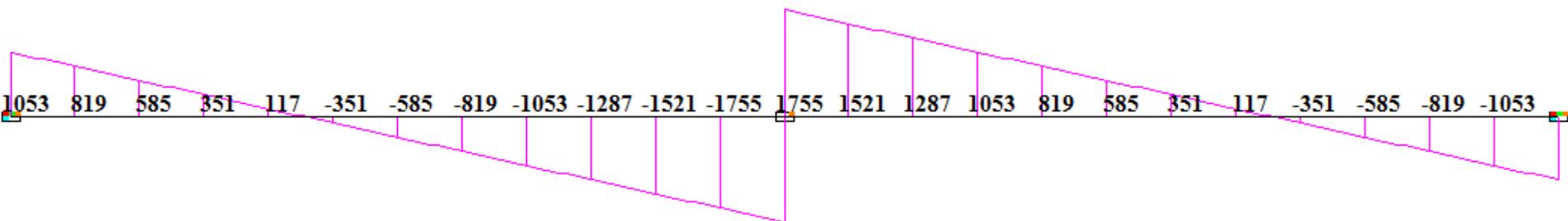
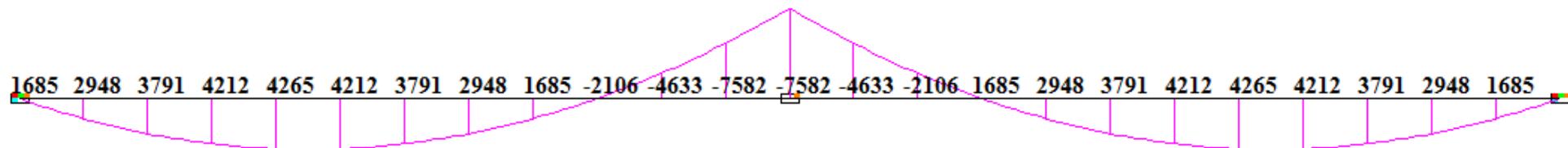
Отсек в центре													
$h_{ef}$ мм	$t_w$ мм	$\bar{\lambda}_w$	$\sigma_{cr}$ при $\beta=беск$	$\sigma_{cr}$ при $\beta=0,8$	$\tau_{cr}$	$M$ кНм	$Q$ кН	$\sigma$ кН/см <sup>2</sup>	$\tau$ кН/см <sup>2</sup>	КЗУ СНиП $\beta=беск$	КЗУ СНиП $\beta=0,8$	КЗУ Scad	Разница со СНиП %
1800	10	6,14	22,57	21,72	4,52	7476,3	117	27,08	0,65	0,827	0,797	0,791	-0,72
1800	12	5,12	32,5	30,37	6,51	7476,3	117	26,06	0,54	1,240	1,160	1,150	-0,85
1800	14	4,39	44,24	39,73	8,86	7476,3	117	25,12	0,46	1,754	1,576	1,550	-1,7
1800	16	3,84	57,78	48,96	11,57	7476,3	117	24,24	0,41	2,376	2,015	1,970	-2,28
1800	18	3,41	73,13	61,8	14,64	7476,3	117	23,42	0,36	3,114	2,633	2,390	-10,19

Отсек в крайний													
$h_{ef}$ мм	$t_w$ мм	$\bar{\lambda}_w$	$\sigma_{cr}$ при $\beta=беск$	$\sigma_{cr}$ при $\beta=0,8$	$\tau_{cr}$	$M$ кНм	$Q$ кН	$\sigma$ кН/см <sup>2</sup>	$\tau$ кН/см <sup>2</sup>	КЗУ СНиП $\beta=беск$	КЗУ СНиП $\beta=0,8$	КЗУ Scad	Разница со СНиП %
1800	10	6,14	22,57	21,72	4,52	1158,3	1287	4,2	7,15	0,628	0,627	0,681	7,86
1800	12	5,12	32,5	30,37	6,51	1158,3	1287	4,04	5,96	1,082	1,081	1,110	2,48
1800	14	4,39	44,24	39,73	8,86	1158,3	1287	3,89	5,11	1,715	1,710	1,630	-5,2
1800	16	3,84	57,78	48,96	11,57	1158,3	1287	3,76	4,47	2,553	2,540	2,210	-15,54
1800	18	3,41	73,13	61,8	14,64	1158,3	1287	3,63	3,97	3,627	3,603	2,870	-26,36

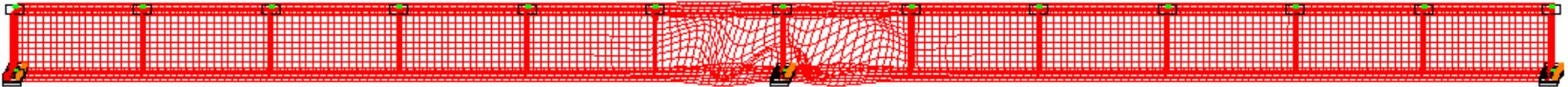
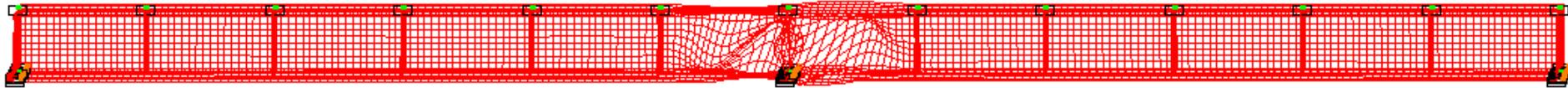
# Расчет тестовой двухпролетной шарнирно опертой балки.



Решалась двухпролетная балка пролетом 21.6 м. Нагрузка 130 кН/м.  
Коэффициент использования по моменту 1.53.



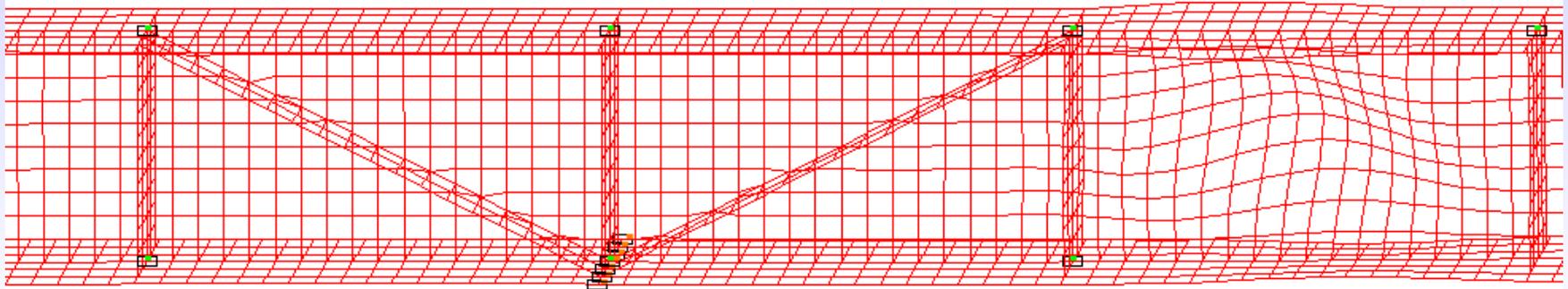
# Формы потери устойчивости



# Сравнение со СНиП

Отсек в центре														
$h_{ef}$ мм	$t_w$ мм	$R_y$ кН/см <sup>2</sup>	$\bar{\lambda}_w$	$\sigma_{cr}$ при $\beta=\text{беск}$	$\sigma_{cr}$ при $\beta=0,8$	$\tau_{cr}$	$M$ кНм	$Q$ кН	$\sigma$ кН/см <sup>2</sup>	$\tau$ кН/см <sup>2</sup>	КЗУ СНиП $\beta=\text{беск}$	КЗУ СНиП $\beta=0,8$	КЗУ Scad	Разница со СНиП %
1800	10	24	6,14	22,57	21,72	4,52	6107,4	1638	22,12	9,1	0,447	0,443	0,464	4,48
1800	12	24	5,12	32,5	30,37	6,51	6107,4	1638	21,29	7,58	0,748	0,735	0,736	0,08
1800	14	24	4,39	44,24	39,73	8,86	6107,4	1638	20,52	6,5	1,152	1,115	1,067	-4,45
1800	16	24	3,84	57,78	48,96	11,57	6107,4	1638	19,8	5,69	1,669	1,571	1,452	-8,2
1800	18	24	3,41	73,13	61,8	14,64	6107,4	1638	19,13	5,06	2,309	2,157	1,885	-14,41

Установка диагонального ребра в данном случае делает возможным применение стенки толщиной 12 мм, с КЗУ=1,33. По СНиП выполнить проверку устойчивости отсека с учетом диагонального ребра - НЕВОЗМОЖНО!



# Исследование возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей

Согласно п. 5.7 и 5.3. [пособия к СНиП II-23-81\*] требования по проверке устойчивости центрально-сжатых стержней установлены в СНиП II-23-81\* на основе расчета внецентренно-сжатых стержней с учетом влияния формы сечения, начального искривления оси, случайного эксцентриситета сжимающей силы.

При решении поставленной задачи был рассмотрен внецентренно-сжатый стержень, схема которого приведена на рис. 1, а. При этом решение выполнялось в предположении малости перемещений по деформированной схеме с учетом пластических деформаций, а значение расчетной несущей способности принято равным предельному значению сжимающей силы  $N_u$ , которая может быть воспринята элементом (рис. 1, б). Форма изогнутой оси принималась по полуволне синусоиды.

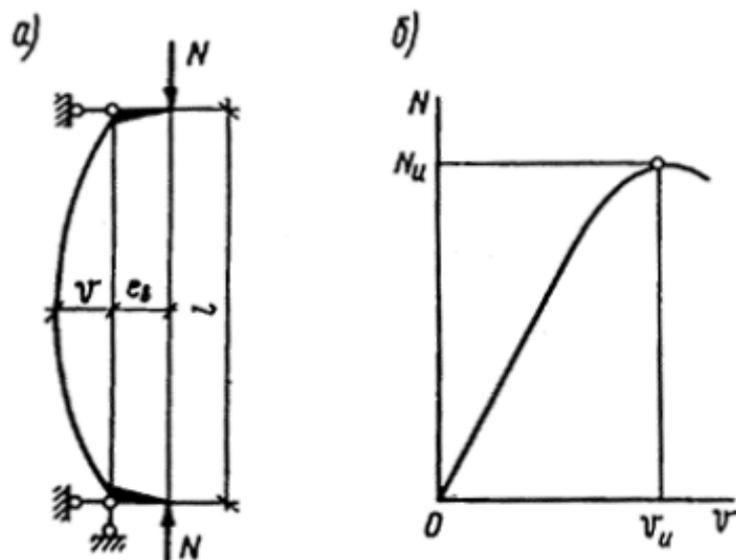


Рис. 1. К расчету сжатых стержней

а - расчетная схема; б - кривая состояния равновесия

## Исследование возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей

При вычислении значений коэффициентов  $\varphi$  типы поперечных сечений сжатых элементов принимались в соответствии с табл. 73 СНиП П-23-81\*, а начальные несовершенства  $e_b$  - по формуле (19) [пособия к СНиП П-23-81\*] 
$$e_b = \frac{i}{20} + \frac{l}{750},$$

где  $i$  - радиус инерции сечения;

$l$  - расчетная длина элемента.

При нормировании коэффициентов  $\varphi$  определялась также критическая сила упругих идеальных стержней по методу Эйлера. Окончательные значения коэффициентов  $\varphi$  принимались наименьшими из двух: вычисленных с учетом начальных несовершенств или по методу Эйлера с

введением коэффициента надежности  $\gamma_e = 1,3 \left( \varphi = \frac{N_c}{A R_y \gamma_e} = \frac{\pi^2}{1,3 \lambda^2} \right)$ . Это было сделано для

ограничения прогибов сжатых стержней при относительно больших гибкостях, когда влияние начальных несовершенств, определяемых по формуле (19), становилось несущественным.

Полученные таким образом значения коэффициентов  $\varphi$  для различных форм поперечных сечений были осреднены и аппроксимированы с помощью формул (8)-(10) СНиП П-23-81\*, на основании которых для различных значений расчетных сопротивлений  $R_y$  была составлена табл. 72 СНиП П-23-81\*. Здесь следует отметить, что в Eurocode все сечения разбиты на 4 типа (прямоугольник, тавр, двутавр, кольцо) и для каждого приведены коэффициенты влияния формы при определении  $\varphi$ . Согласно таблице 4.1 работы [справочник Кузнецова] для прямоугольного сечения коэффициент влияния формы  $K_c=1$ , для двутаврового при эксцентриситете в плоскости наибольшей жесткости  $K_c=0,984$ . В таблице 6 СП 53-102-2004 выделено три типа кривых потери устойчивости.

# Исследование возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей

Для выполнения тестовых расчетов с целью гарантированного исключения потери устойчивости стенки или полок за основу взяты параметры сечения колонного двутавра 20К2 по СТО АСЧМ 20-93 из стали С245. Потеря устойчивости исследовалась в двух плоскостях. Расчеты выполнялись с применением следующих расчетных моделей и программного обеспечения:

1. Стержневая модель с расчетом в линейно-упругой постановке в программе Scad версия 11.3. Указанный расчет соответствует расчету по методу Эйлера упругих идеальных стержней.
2. Оболочечная модель с расчетом в линейно-упругой постановке в программе MSC.Visual Nastran for Windows версия 2004 (далее Nastran). Указанный расчет также соответствует расчету по методу Эйлера упругих идеальных стержней. Проведенные тестовые расчеты показали независимость критической силы от величины эксцентриситета, что согласуется с расчетами приводимыми в литературе по строительной механике при решении задачи потери устойчивости стержня в линейно-упругой постановке.
3. Оболочечная модель расчетом в нелинейной постановке в программе Nastran. Нагрузка приложена с учетом эксцентриситета согласно схеме на рис. 1. Модель материала — нелинейный упруго-пластический общего вида, соответствующий унифицированной диаграмме работы стали приведенной в п. 4.4 работы [справочник Кузнецова т. 1.]. Моделирование нагрузок — в виде нелинейного статического нагружения с итерационным пошаговым приращением нагрузки.

# Исследование возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей

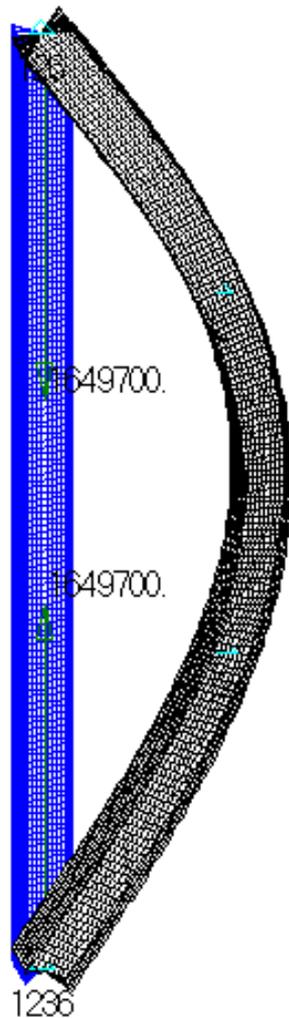


Рис. 4 Общий вид расчетных оболочечных моделей, рассчитываемой в линейно-упругой постановке в программе Nastran и и соответствующие им формы потери устойчивости.

# Исследование возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей

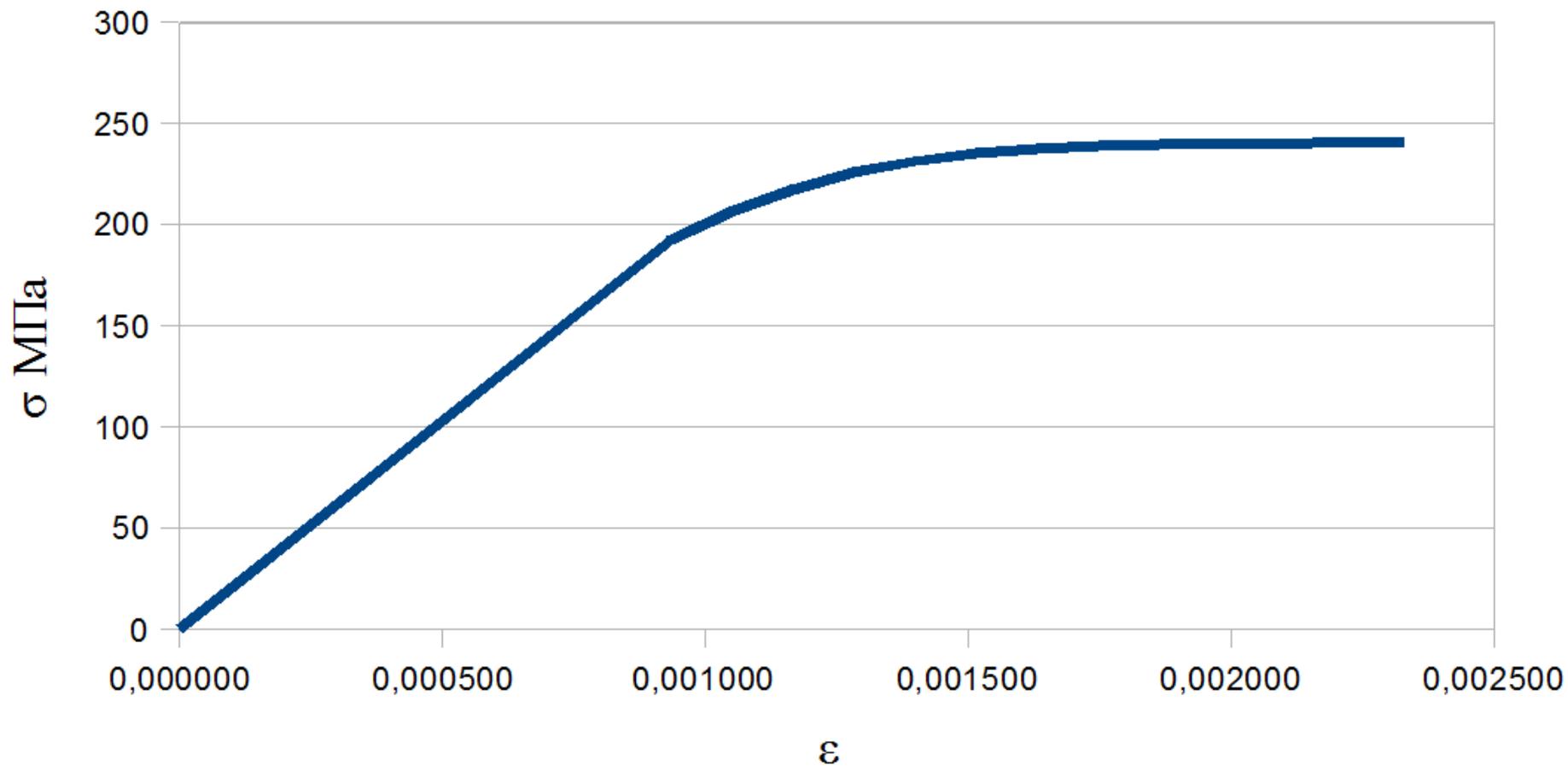
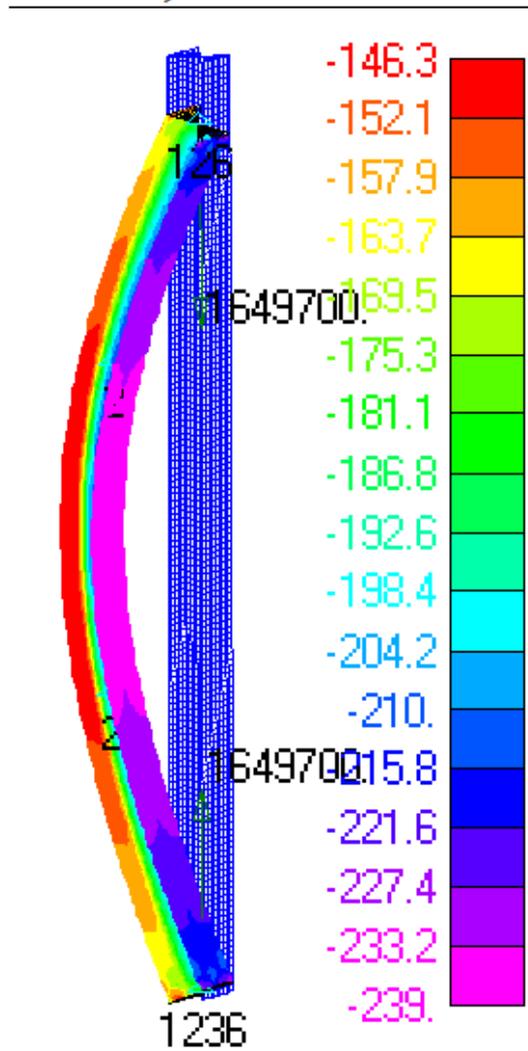


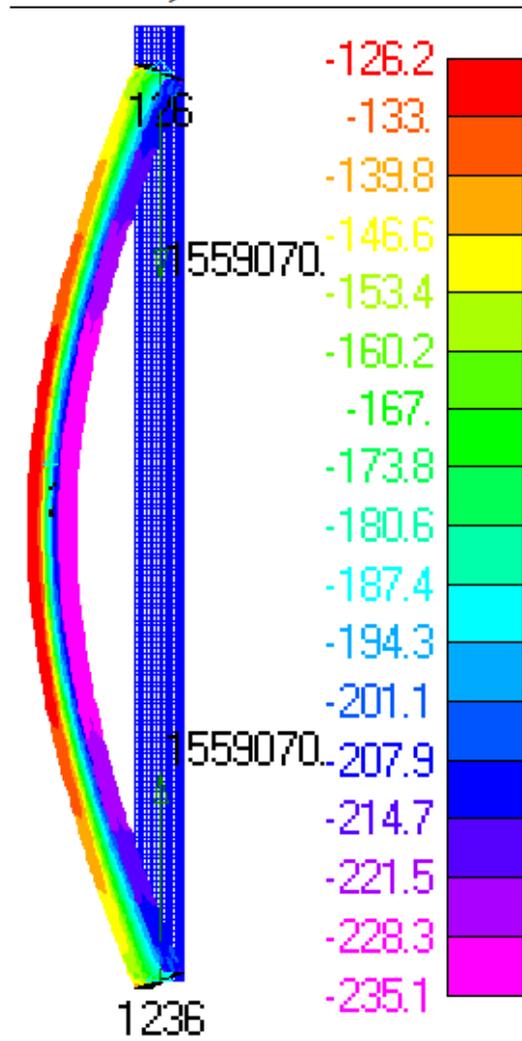
Рис. 3. Диаграмма  $\sigma$ - $\epsilon$  для стали С245.

# Исследование возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей

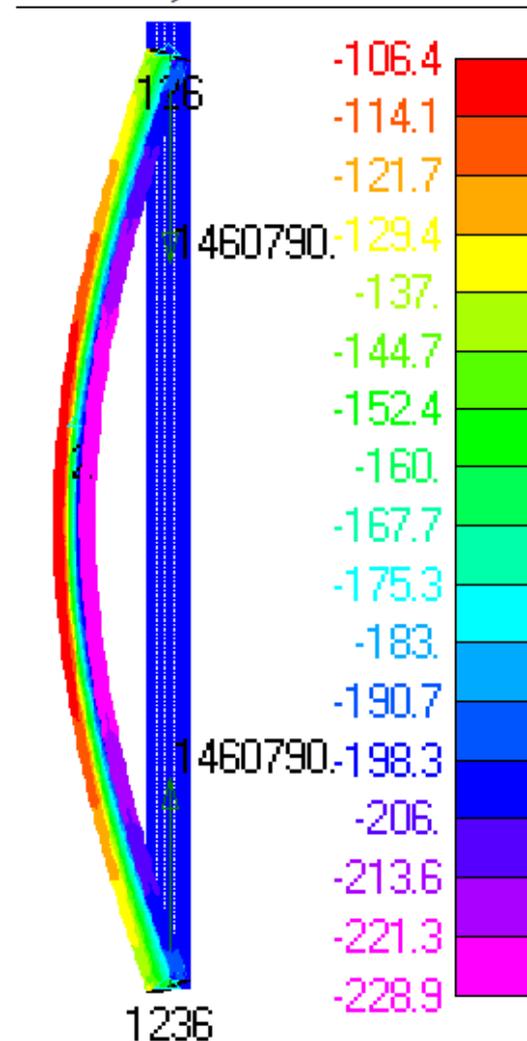
$\lambda=50, N_{cr}=1214 \text{ кН}$



$\lambda=60, N_{cr}=1143 \text{ кН}$

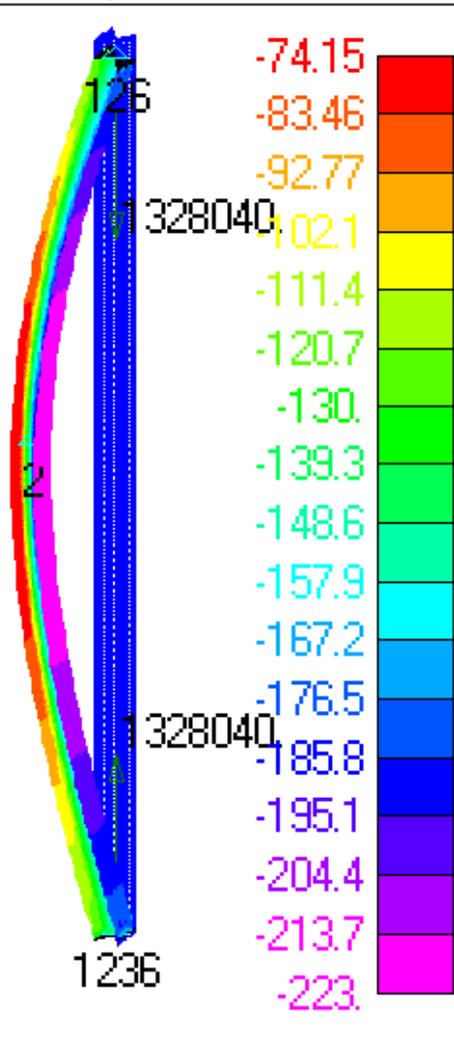


$\lambda=70, N_{cr}=1059 \text{ кН}$

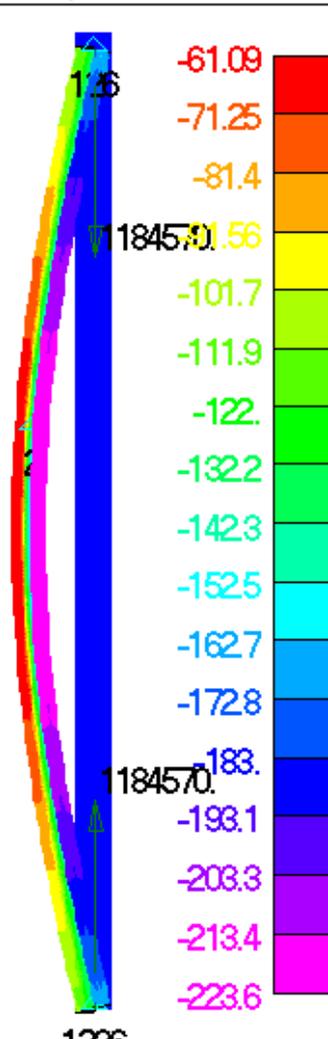


# Исследование возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей

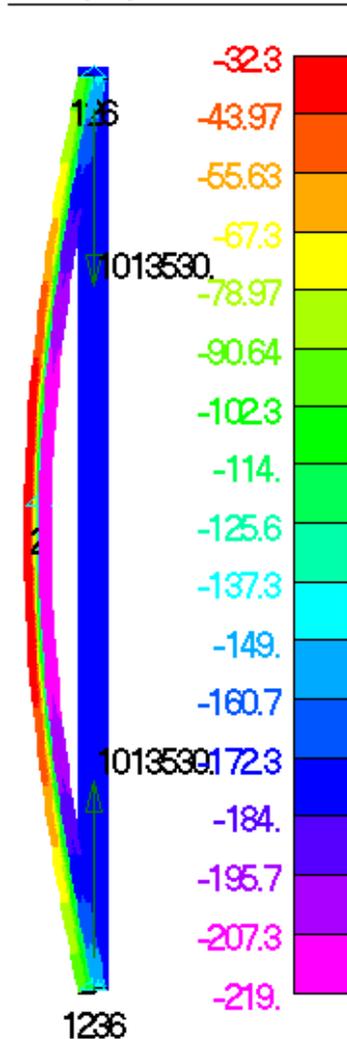
$\lambda=80, N_{cr}=975 \text{ кН}$



$\lambda=90, N_{cr}=892 \text{ кН}$

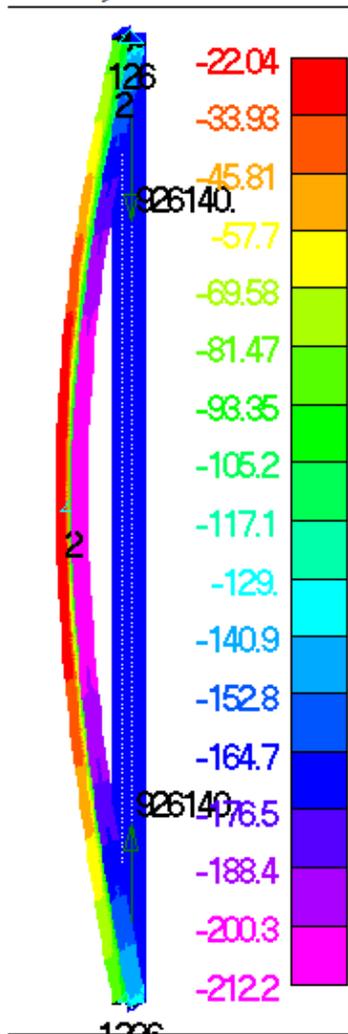


$\lambda=102,9, N_{cr}=781 \text{ кН}$

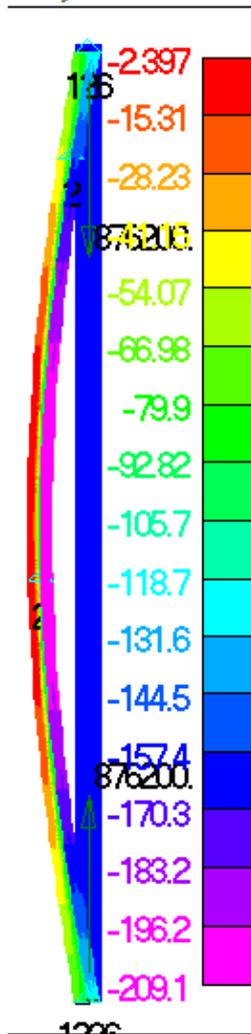


# Исследование возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей

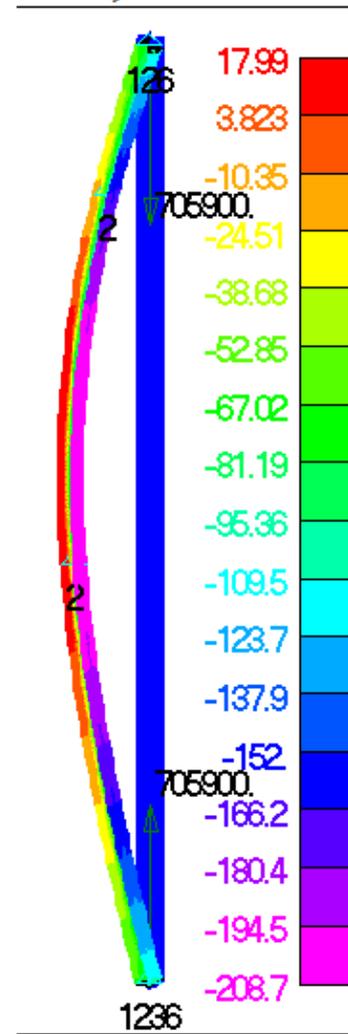
$\lambda=110, N_{cr}=718$  кН



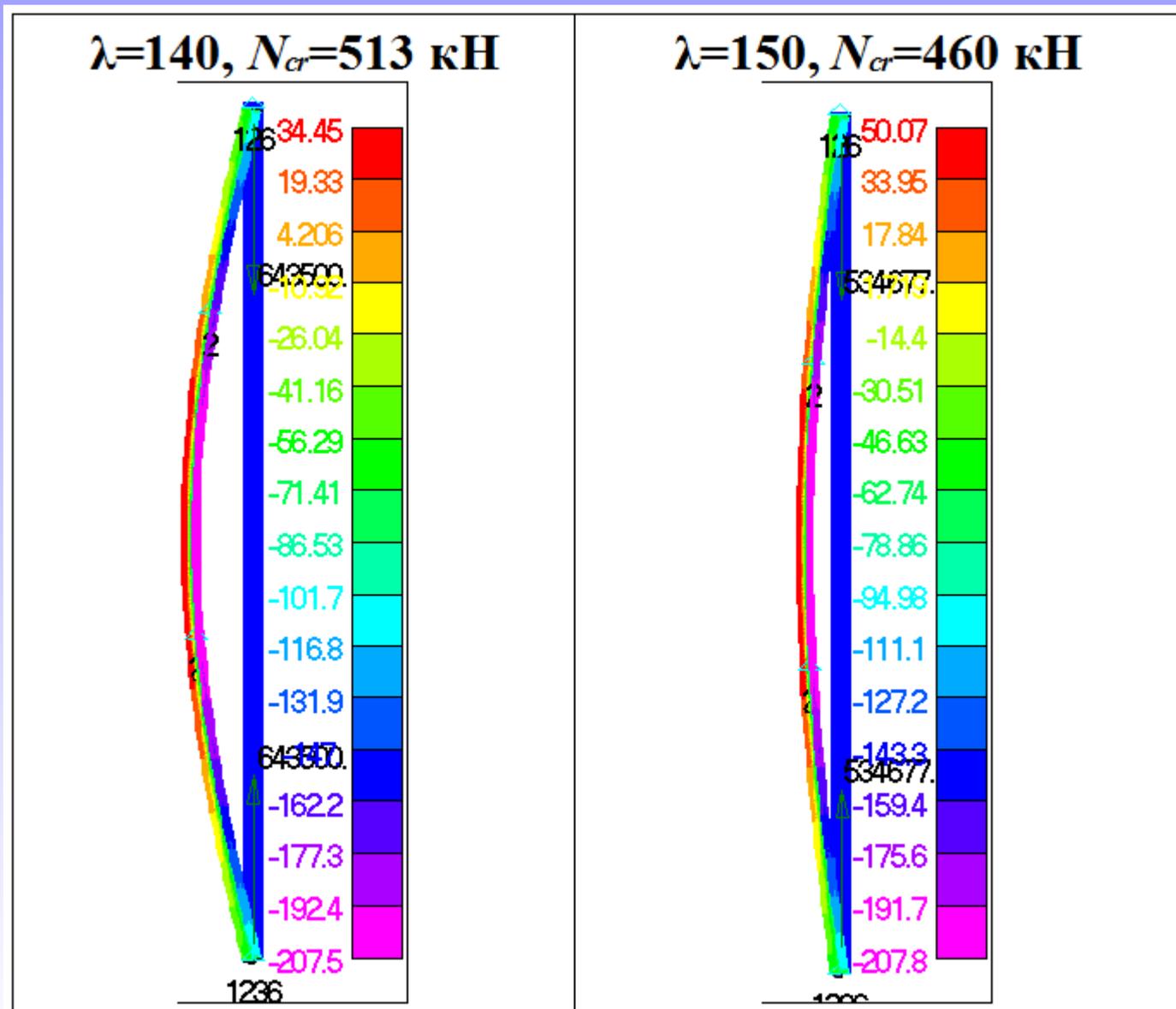
$\lambda=120, N_{cr}=641$  кН



$\lambda=130, N_{cr}=574$  кН



# Исследование возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей



# Исследование возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей

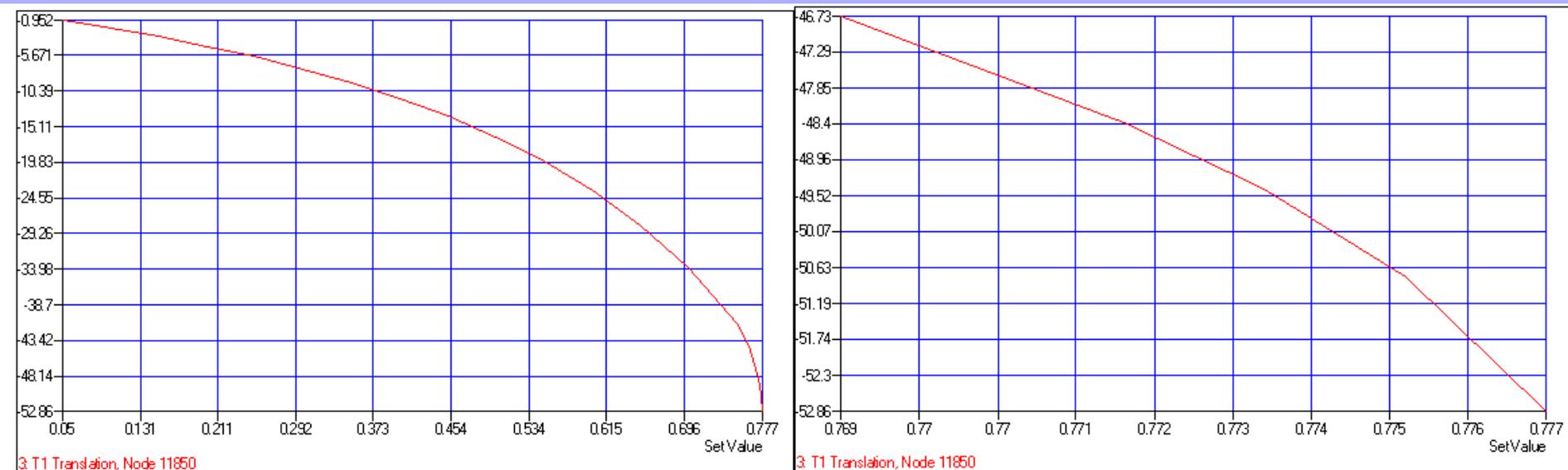


Рис. 5. Горизонтальные перемещения одного из узлов расположенных в средней части по высоте модели на заключительных итерациях при выполнении нелинейного расчета в программе Nastran, для модели с  $\lambda=110$ . Соответственно  $N_{cr}=0,775*926140=717758,5\text{H}=718\text{ кН}$

# Исследование возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей

$\lambda$	$R_y$ МПа	$\varphi$	$i$ см	$l_{ef}$ см	$A$ см <sup>2</sup>	$e_b$ см	N <sub>cr</sub> — лев столбец, отношение к N <sub>cr</sub> по СНиП — прав столбец						
							СНиП	Эйлер/1,3		Nastran/1,3		Nastran нелин	
150	240	0,276	8,62	1292,7	62,08	2,15	411	432	1,049	436	1,061	460	1,119
140	240	0,315	8,62	1206,52	62,08	2,04	469	495	1,057	500	1,068	513	1,094
130	240	0,364	8,62	1120,34	62,08	1,92	543	574	1,058	580	1,068	574	1,056
120	240	0,419	8,62	1034,16	62,08	1,81	624	674	1,081	679	1,089	641	1,027
110	240	0,478	8,62	947,98	62,08	1,69	712	802	1,126	807	1,133	718	1,007
102,9	240	0,523	8,62	886,79	62,08	1,61	780	917	1,176	925	1,186	781	1,001
90	240	0,612	8,62	775,62	62,08	1,47	911	1199	1,315	1205	1,322	892	0,979
80	240	0,686	8,62	689,44	62,08	1,35	1022	1517	1,485	1511	1,479	975	0,955
70	240	0,754	8,62	603,26	62,08	1,24	1124	1981	1,763	1966	1,749	1059	0,943
60	240	0,805	8,62	517,08	62,08	1,12	1199	2697	2,249	2649	2,209	1143	0,953
50	240	0,852	8,62	430,9	62,08	1,01	1269	3884	3,061	3762	2,965	1214	0,957

- СНиП — критическая сила определенная по формуле (7) СНиП II-23-81\*  $N_{cr} = \varphi A R_y$ ;
- Эйлер/1,3 — критическая сила, рассчитанная по формуле Эйлера с делением на 1,3;
- Nastran/1,3 — критическая сила, рассчитанная в Nastran на оболочечной модели в линейно-упругой постановке с делением на 1,3;
- Nastran нелин — критическая сила, рассчитанная в Nastran путем выполнения нелинейного деформационного анализа.

## Выводы по результатам исследования возможности расчета на устойчивость центрально-сжатых элементов с применением оболочечных моделей

1. При  $\lambda > 130 > \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{тц}}}$  критическая сила общей потери устойчивости при решении задачи в линейной постановке с определением критической силы по формуле Эйлера, на стержневой и оболочечной модели с делением на 1,3 отличается от СНиП на 6-7%
2. В диапазоне рабочих гибкостей колонн от 80 до 120 расчет в линейной постановке дает погрешность от 70 до 30 % (без учета коэффициента 1,3). В указанном диапазоне нелинейный деформационный анализ дает совпадение со СНиП в пределах 5 %, что является достаточным для инженерных расчетов.
3. При  $\lambda = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{тц}}}$ , критическая сила определенная на оболочечной модели путем нелинейного деформационного анализа полностью совпадает с критической силой определенной по СНиП.
4. Таким образом при гибкостях более 130 расчет на устойчивость при центральном сжатии с применением оболочечной модели следует выполнять в линейной постановке с применением коэффициента надежности 1,3.
5. При гибкостях от 110 до 130 оболочечные модели для расчета устойчивости при центральном сжатии можно применять только выполняя нелинейный деформационный расчет, при этом дополнительные коэффициенты надежности нужно принимать не более 5%.
6. При гибкостях менее 110 оболочечные модели для расчета устойчивости при центральном сжатии можно применять только выполняя нелинейный деформационный расчет, при этом дополнительные коэффициенты надежности не нужны.

# Область применения моделей на основе оболочечных элементов при расчетах металлоконструкций

- подробный и наглядный анализ напряженно-деформированного состояния;
- точный расчет на устойчивость в пределах упругих деформаций, что особенно важно при расчетах устойчивости рам на основе сварных двутавров переменного сечения;
- гораздо большие возможности выполнения различных видов нелинейного анализа, включая нелинейный деформационный анализ и как следствие выявление и более полное использование имеющихся резервов по несущей способности по сравнению со стержневыми моделями;
- в отдельных случаях, например при построении расчетной модели рамы на основе двутавров переменного сечения оболочечную модель оказывается построить быстрее чем её стержневую аппроксимацию элементами постоянного сечения;
- оболочечные модели с применением нелинейного деформационного расчета можно применять для построения таблиц коэффициентов  $\varphi$ ,  $\varphi_e$ ,  $\varphi_b$  для профилей отличных от нормированных в СНиП.

**Спасибо за внимание.**