

# Технический отчет

Расчет несущей конструкции купольного здания Z10HL

Рычков С.П.

Самара 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. Исходные данные для расчёта.....	3
<b>1.1    Общее описание .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2    Применяемые материалы и ссылочные данные.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3    Единицы измерения .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4    Условия нагружения .....</b>	<b>5</b>
Статические нагрузки .....	5
Сейсмические нагрузки .....	8
<b>1.5    Расчетные сочетания нагрузок .....</b>	<b>9</b>
Основные сочетания.....	9
Особые сочетания.....	10
2. Расчёт усилий в элементах конструкции.....	10
<b>2.1    Конечно-элементная модель .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2    Нагрузки и закрепления .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3    Результаты расчета .....</b>	<b>13</b>
2.3.1 Здание без второго этажа.....	13
2.3.2 Здание со вторым этажом .....	22
3. Анализ прочности.....	29
<b>3.1    Основные сочетания .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2    Особые сочетания.....</b>	<b>30</b>
4. Сводка запасов прочности и коэффициентов использования материала.....	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	31
Список использованных источников .....	31

## ВВЕДЕНИЕ

Данный расчет выполнен для подтверждения соответствия характеристик прочности и устойчивости купольного здания Z10HL требованиям строительных норм СП 64.13330.2017 “СНиП II-25-80. Деревянные конструкции”. Расчет выполняется для двух вариантов: здания без второго этажа и здания со вторым этажом.

Цель работы:

- Задание нагрузок в соответствии с нормами СНиП;
- Построение конечно-элементных моделей проектируемых зданий;
- Выполнение расчетов устойчивости и напряженно-деформированного состояния на заданные нагрузки
- Формирование расчетных сочетаний усилий в соответствии с нормами СНиП;
- Определение запасов по прочности

## 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТА

### 1.1 Общее описание

Общий вид каркаса купольного здания Z10HL приведен на рис. 1, 2

Каркас собирается из деревянных элементов – балок вдоль меридианов; и распорок вдоль параллелей, которые соединяются с помощью деревянных нагелей. Балки ростверка и балки пола также изготавливаются из дерева.

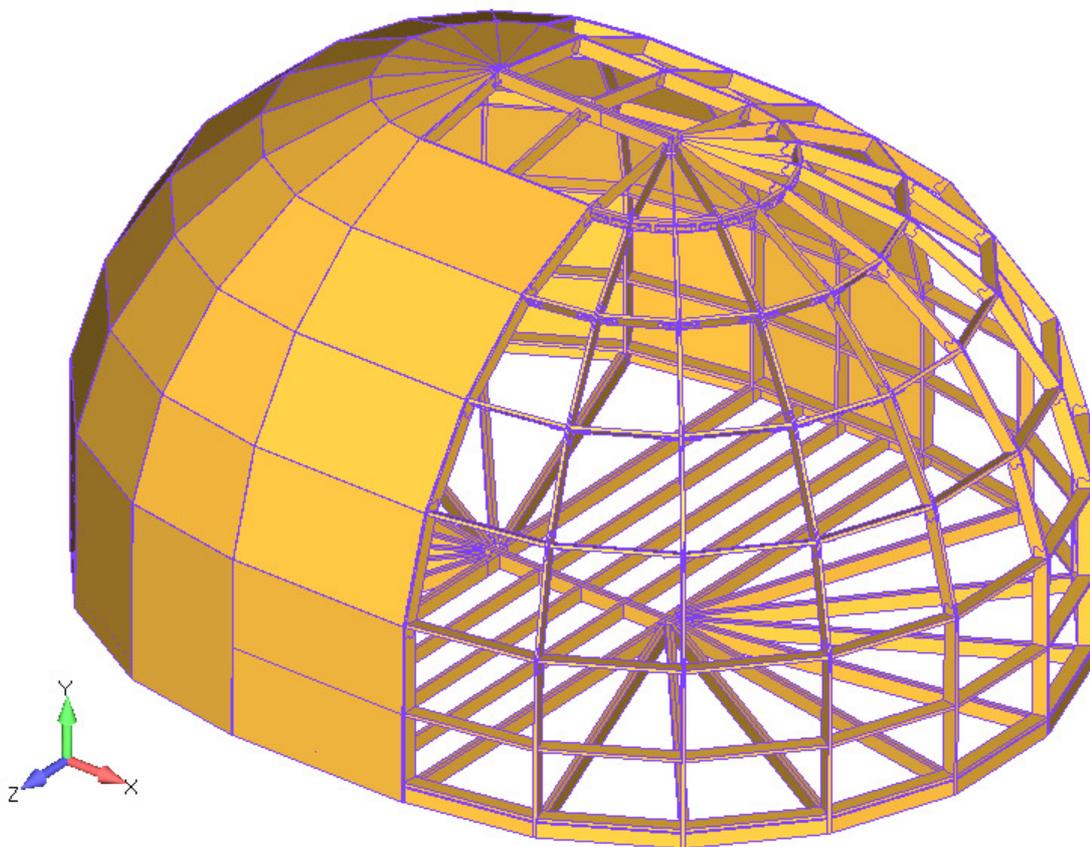


Рисунок 1. Купольное здания Z10HL без второго этажа (часть обшивки снята)

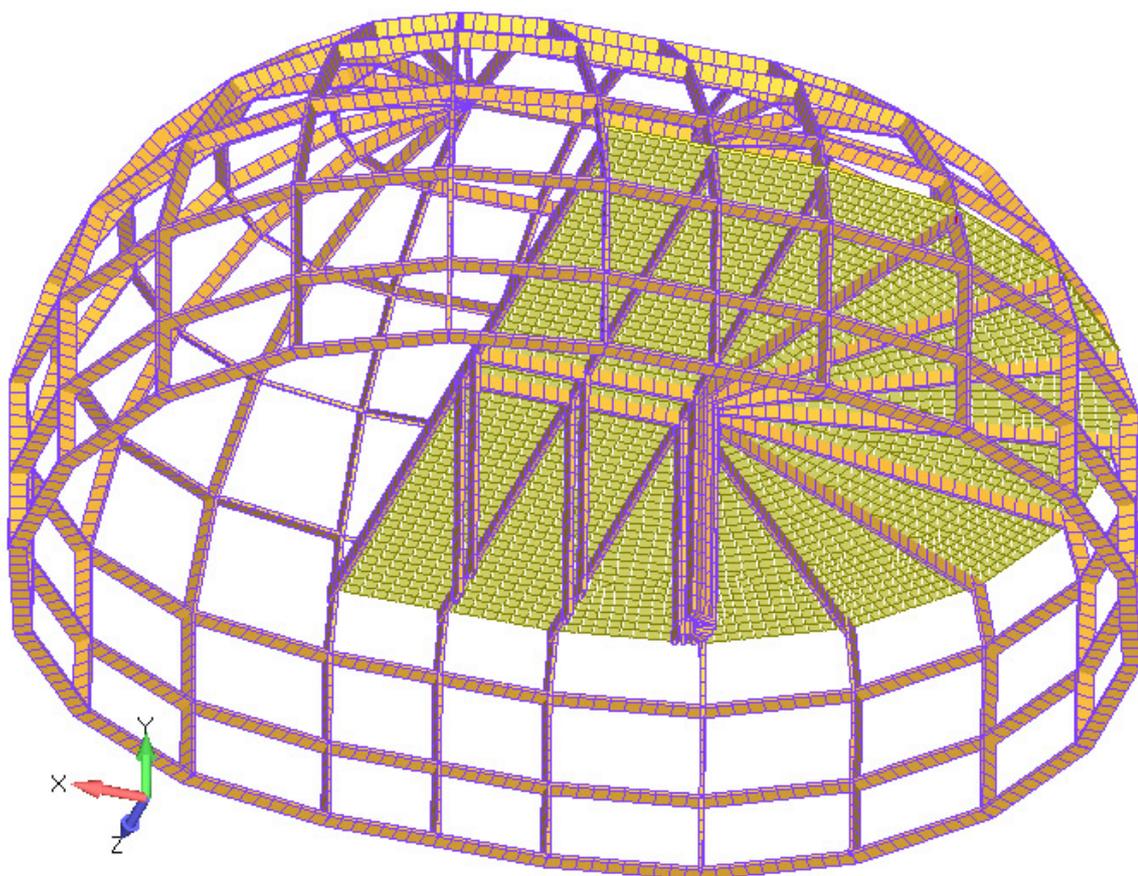


Рисунок 2. Купольное здания Z10HL со вторым этажом (обшивка снята)

Таблица 1. Весовые данные установки здания Z10

№	Наименование	Вес, кгс
1	Здание без второго этажа	8700
2	Балки и настил второго этажа	3180
	ИТОГО	11880

## 1.2 Применяемые материалы и ссылочные данные

Древесина, сорт 1, табл. 3[1]:

- $R_u^A = R_{сж}^A = 24$  МПа;
- $R_p^A = 15$  МПа;

Расчетное сопротивление определяется по формуле 1 [1]

$$R^P = R^A \cdot m_{дл} \cdot \Pi m_i$$

Коэффициент длительной прочности  $m_{дл}$  принимается по табл 4 [1]

- $m_{дл} = 0.66$  - при совместном действии постоянной и кратковременной снеговой нагрузки;

- $m_{dl} = 0.92$  - при совместном действии постоянной и сейсмической нагрузки.

Коэффициенты условий работы п.6.9 [1]:

- $m_b = 0.9$  по табл. 9;
- $m_t = 1.0$ ;
- $m_{cl} = 1.0$  по табл. 11;
- $m_{cc} = 0.85$  по табл. 13 (в запас);

$$\Pi m_i = m_b \cdot m_t \cdot m \cdot m_{cc} = 0.9 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 0.85 = 0.765$$

Расчетные сопротивления при изгибе и сжатии:

- $R_u^A = R_{сж}^A = 24 \cdot 0.66 \cdot 0.765 = 12.1$  МПа - при совместном действии постоянной и кратковременной снеговой нагрузки;
- $R_u^A = R_{сж}^A = 24 \cdot 0.92 \cdot 0.765 = 16.9$  МПа - при совместном действии постоянной и сейсмической нагрузки.

Расчетные сопротивления при растяжении:

- $R_p^A = 15 \cdot 0.66 \cdot 0.765 = 7.6$  МПа - при совместном действии постоянной и длительной временной нагрузки
- $R_p^A = 15 \cdot 0.92 \cdot 0.765 = 10.6$  МПа - при совместном действии постоянной и сейсмической нагрузки

### 1.3 Единицы измерения

В данном расчете применяются следующие единицы измерения:

- Сила – Н;
- Длина – мм;
- Напряжение – МПа;

### 1.4 Условия нагружения

Расчет выполняется для группы статических нагружений и группы сейсмических нагружений, на основе которых формируются расчетные сочетания усилий/

Статические нагрузки

1. Собственный вес здания и полезная нагрузка второго этажа (**Weight**), постоянное нагружение.

Нагрузки от собственного веса задаются ускорением вдоль вертикальной оси  $a = 9810$  мм/сек<sup>2</sup>

2. Вес нагрузки на балки пола второго этажа (**Load**), временное нагружение;

Величина полезной нагрузки принимается в соответствии с п. 8.2.2 и табл. 8.3 [2]:

$$q = P_1 \cdot \gamma_f = 0.0015 \cdot 1.3 = 0.00195 \text{ МПа,}$$

Здесь  $P_1 = 0.0015$  МПа – нормативное значение равномерно распределенной нагрузки;

$\gamma_f = 1.3$  – коэффициент надежности по нагрузке.

Итоговый вес полезной нагрузки  $Q = S \cdot q = 5.9e^7 \cdot 1.95e^{-3} = 115$  кН = 11.72 тс

3. Снеговая нагрузка, кратковременное нагружение;

Нормативное значение снеговой нагрузки, п.10 [2]

$$S_0 = 0.7 \cdot c_e \cdot c_t \cdot \mu \cdot S_g$$

Здесь

$c_e \cdot = 0.85$  – коэффициент сноса снега для купольных зданий;

$c_t \cdot = 1.0$  – термический коэффициент;

$\mu$  – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, принимаемый в соответствии с 10.4 [2];

$S_g = 5.6$  кН/м<sup>2</sup> – вес снегового покрова на 1 м<sup>2</sup> для снегового района VIII.

Расчетное значение снеговой нагрузки:

$$S = S_0 \cdot \gamma_f,$$

$\gamma_f = 1.4$  – коэффициент надежности по снеговой нагрузке

Распределение снеговой нагрузки на куполе принимается в трех вариантах в соответствии с Г.13 [2], рис. 3. После предварительных расчетов в рассмотрении оставлено два варианта **Snow 1** и **Snow 2**

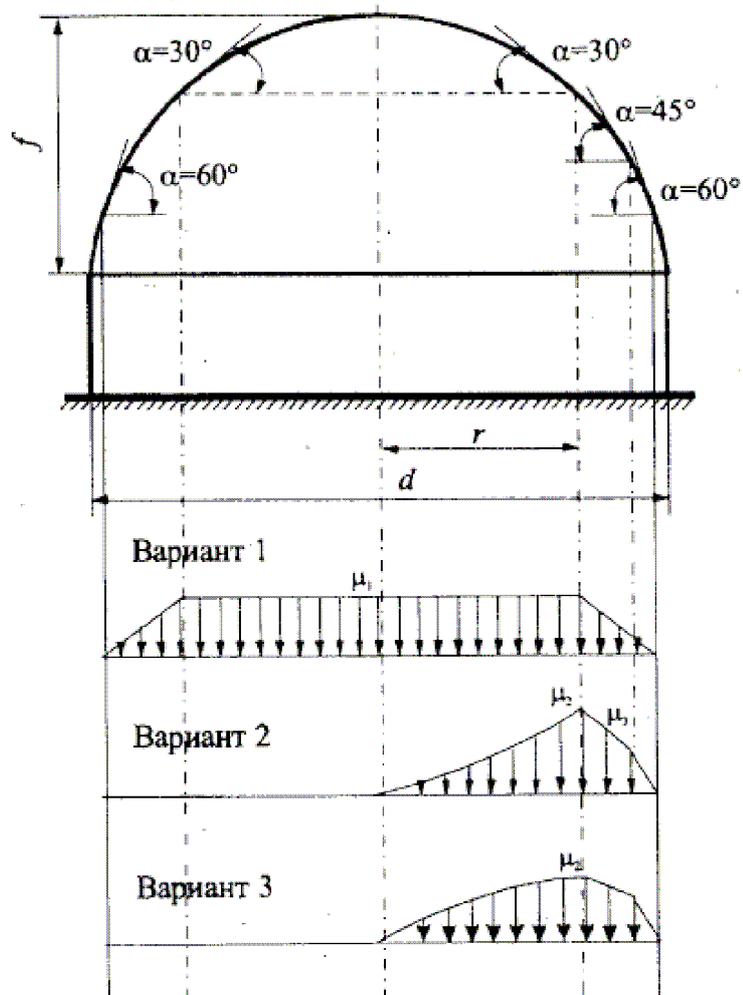


Рисунок 3. Варианты распределения снеговой нагрузки, действующей на купол здания,  $\text{кН/м}^2$

4. Ветровая нагрузка, кратковременное нагружение:

Нормативное значение ветровой нагрузки принимается по п.11 [2] для ветрового района VII.

Удельная нормативная ветровая нагрузка

$$w_0 = 0.85 \text{ кПа}$$

$\gamma_f = 1.4$  – коэффициент надежности по ветровой нагрузке.

Распределение ветровой нагрузки на куполе показано на рис. 4.

Распределение ветровой нагрузки на куполе принимается в двух вариантах - ветер по оси X (**Wind X**) и ветер по оси Z (**Wind Z**).

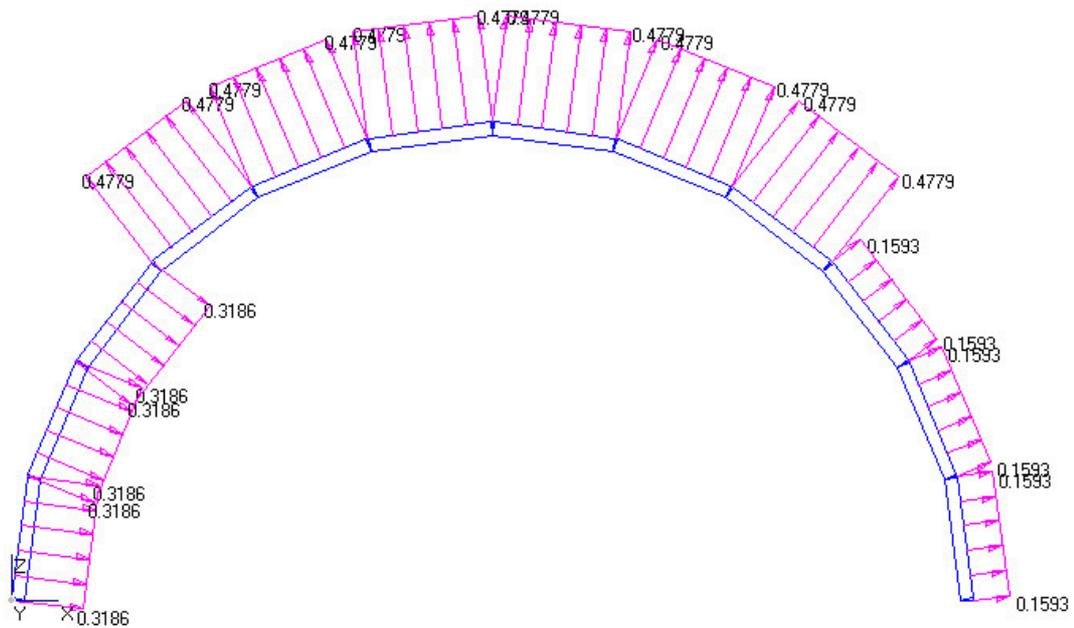


Рисунок 4. Расчетная ветровая нагрузка, действующая на купол здания, кН/м<sup>2</sup>

### Сейсмические нагрузки

- Горизонтальное воздействие по оси X (**Quake X**)
- Вертикальное воздействие по оси Y (**Quake Y**)
- Горизонтальное воздействие по оси Z (**Quake Z**)

Параметры сейсмической нагрузки принимаются максимально тяжелыми, что идет в запас:

- Расчетная сейсмичность района: 9 баллов;
- Категория грунта III;
- Расчетная сейсмичность площадки строительства: 10 баллов;

Расчетная сейсмическая нагрузка по направлению обобщенной координаты с номером  $j$ , приложенная к узлу  $k$  расчетной модели и соответствующая  $i$ -й форме собственных колебаний зданий или сооружений, определяется по формуле:

$$S_{ik}^j = K_0 \cdot K_1 \cdot S_{0ik}^j$$

- $K_0 = 0.8$  - коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность, принимаемый по таблице 3 [3];
- $K_1 = 0.15$  - коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений, принимаемый по таблице 4 [3];

$S_{0ik}^j$  - значение сейсмической нагрузки для  $i$ -й формы собственных колебаний здания или сооружения, определяемое в предположении упругого деформирования конструкций по формуле:

$$S_{0ik}^j = m_k^j \cdot A \cdot K_\psi \cdot \beta_i \cdot \eta_{ik}^j$$

Здесь

$m_k^j$  - масса здания или момент инерции соответствующей массы здания, отнесенные к узлу  $k$  по обобщенной координате  $j$ ;

- $K_\psi = 1.3$  - коэффициент, учитывающий способность здания к рассеиванию энергии колебаний при горизонтальном воздействии, принимаемый по таблице 5.

- $A = 8 \text{ м/сек}^2$  - значение ускорения в уровне основания;

$\eta_{ik}^j$  - коэффициент, зависящий от формы деформации здания при его собственных колебаниях по  $i$ -й форме;

$\beta_i$  - коэффициент динамичности, соответствующий периоду колебаний по  $i$ -й собственной форме, принимаемый в соответствии с п. 5.6 [3], для грунта категории III, рисунок 5.

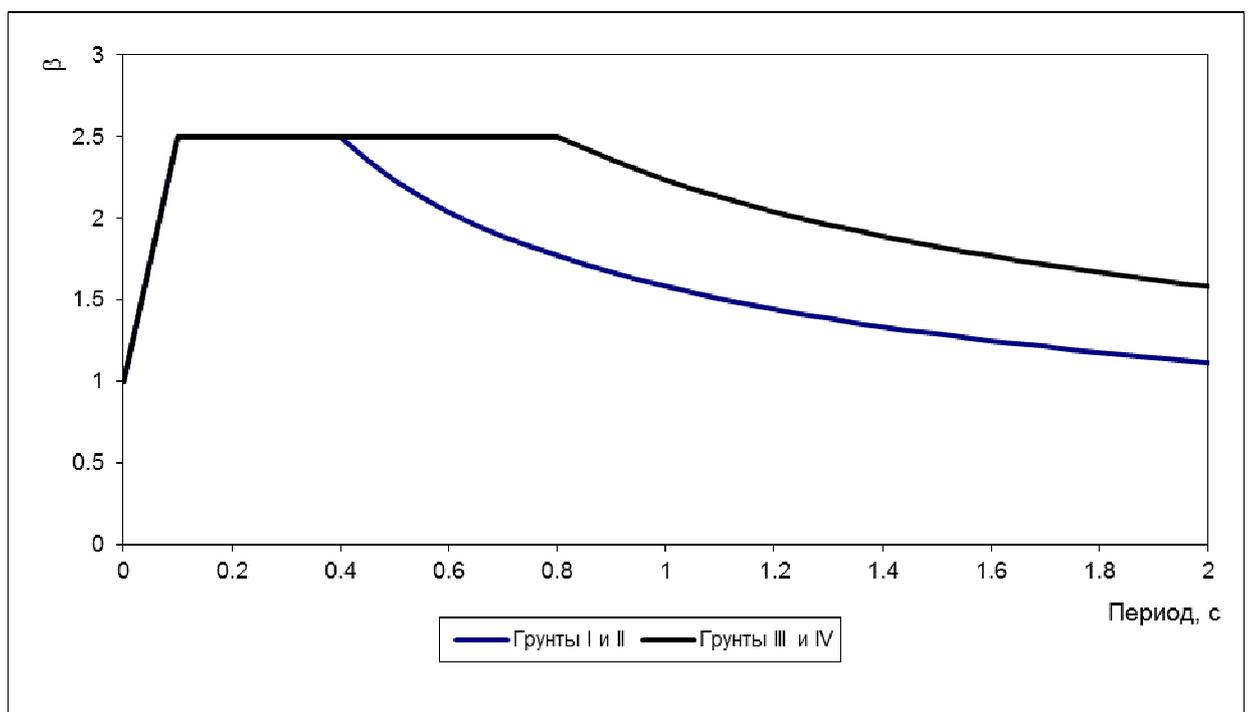


Рисунок 5. Спектрограмма коэффициентов динамичности

### 1.5 Расчетные сочетания нагрузок

Коэффициенты в сочетаниях нагрузок принимаются в соответствии с п. 6.2, 6.3, 6.4 [2] и п. 5.1 [3]

Основные сочетания

1. Weight + Load + Snow 1
2. Weight + Load + Snow 2
3. Weight + Load + Snow 1+ 0.9\*Wind X
4. Weight + Load + Snow 2+ 0.9\*Wind X
5. Weight + Load + Snow 1+ 0.9\*Wind Z
6. Weight + Load + Snow 2+ 0.9\*Wind Z

## Особые сочетания

1.  $Quake X + 0.9 * Weight + 0.8 * Load + 0.5 * Snow 1$
2.  $Quake X + 0.9 * Weight + 0.8 * Load + 0.5 * Snow 2$
3.  $Quake Y + 0.9 * Weight + 0.8 * Load + 0.5 * Snow 1$
4.  $Quake Y + 0.9 * Weight + 0.8 * Load + 0.5 * Snow 2$
5.  $Quake Z + 0.9 * Weight + 0.8 * Load + 0.5 * Snow 1$
6.  $Quake Z + 0.9 * Weight + 0.8 * Load + 0.5 * Snow 2$
7.  $Quake X + 0.75 * Quake Y + 0.9 * Weight + 0.8 * Load + 0.5 * Snow 1$
8.  $Quake X + 0.75 * Quake Y + 0.9 * Weight + 0.8 * Load + 0.5 * Snow 2$
9.  $Quake Z + 0.75 * Quake Y + 0.9 * Weight + 0.8 * Load + 0.5 * Snow 1$
10.  $Quake Z + 0.75 * Quake Y + 0.9 * Weight + 0.8 * Load + 0.5 * Snow 2$

## 2. РАСЧЁТ УСИЛИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ

### 2.1 Конечно-элементная модель

Определение напряженно-деформированного состояния элементов конструкции выполнено методом конечных элементов с использованием программы NASTRAN. Расчетная схема конечно-элементной модели здания Z10HL показана на рис. 6-9.

Балки и распорки каркаса, стойки и балки пола моделируются элементами типа *Beam* соответствующего сечения. Узлы стыка балок и распорок полагаются шарнирными.

Обшивка кровли и покрытие пола моделируются элементами *Plate*. У элементов обшивки кровли задана жесткость на изгиб, уменьшенная в 10 раз, поэтому они практически воспринимают нагрузку только в своей плоскости, что идет в запас.

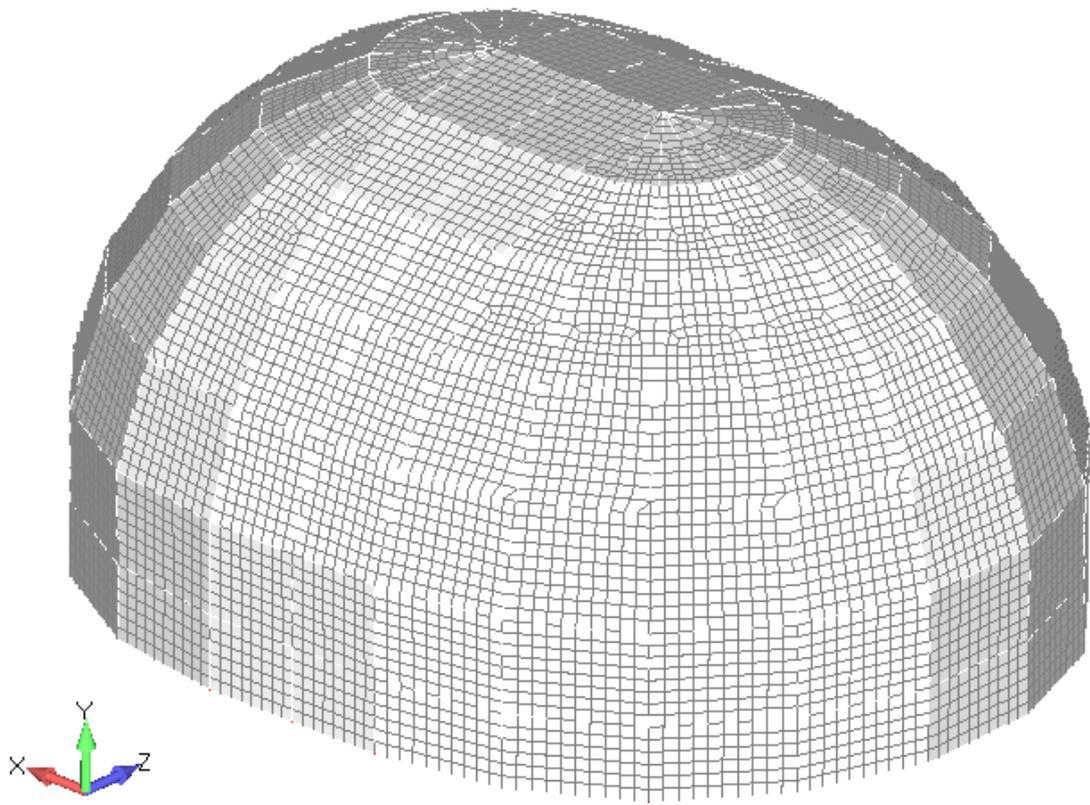


Рисунок 6. Конечно-элементная модель Z10HL

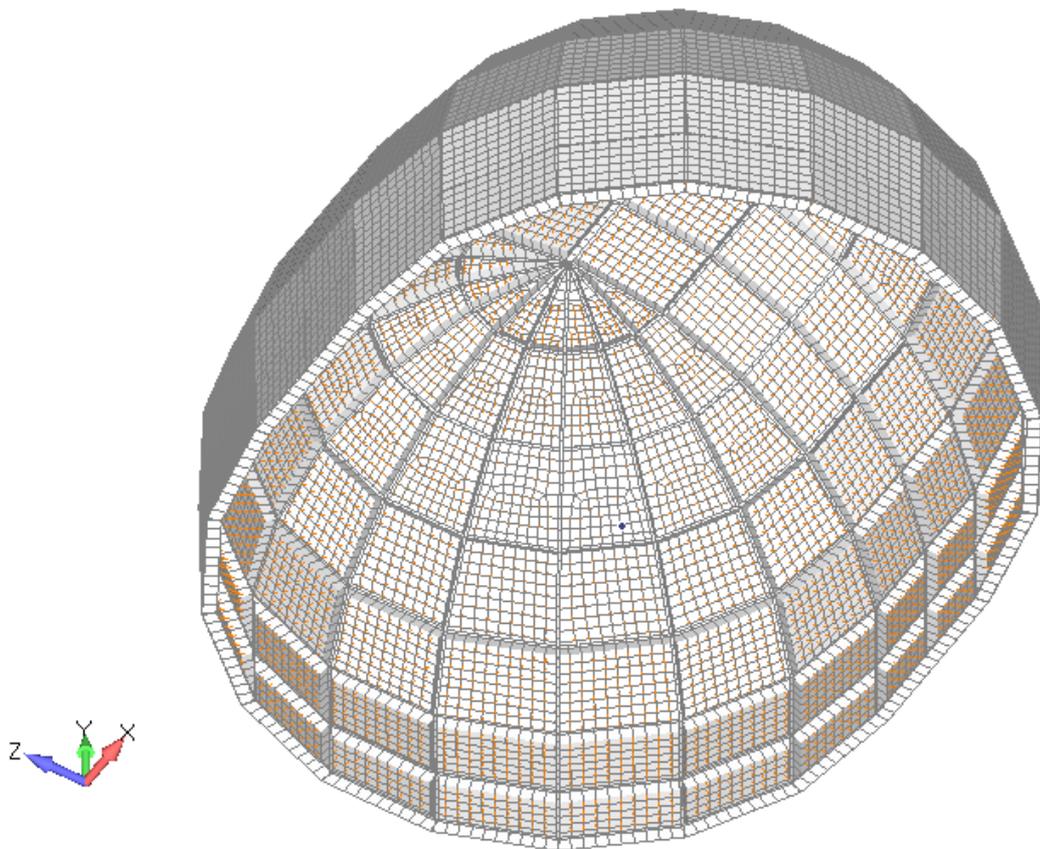


Рисунок 7. Конечно-элементная модель Z10HL (пол второго этажа не показан)

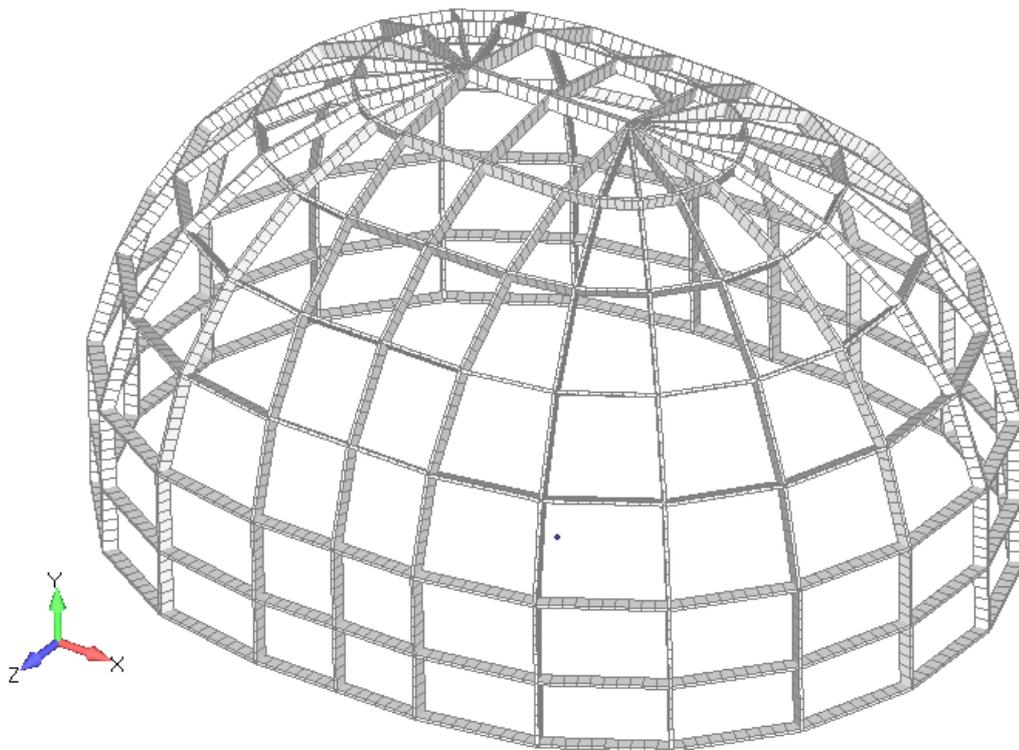


Рисунок 8. Конечно-элементная модель Z10HL (покрытие и пол второго этажа не показаны)

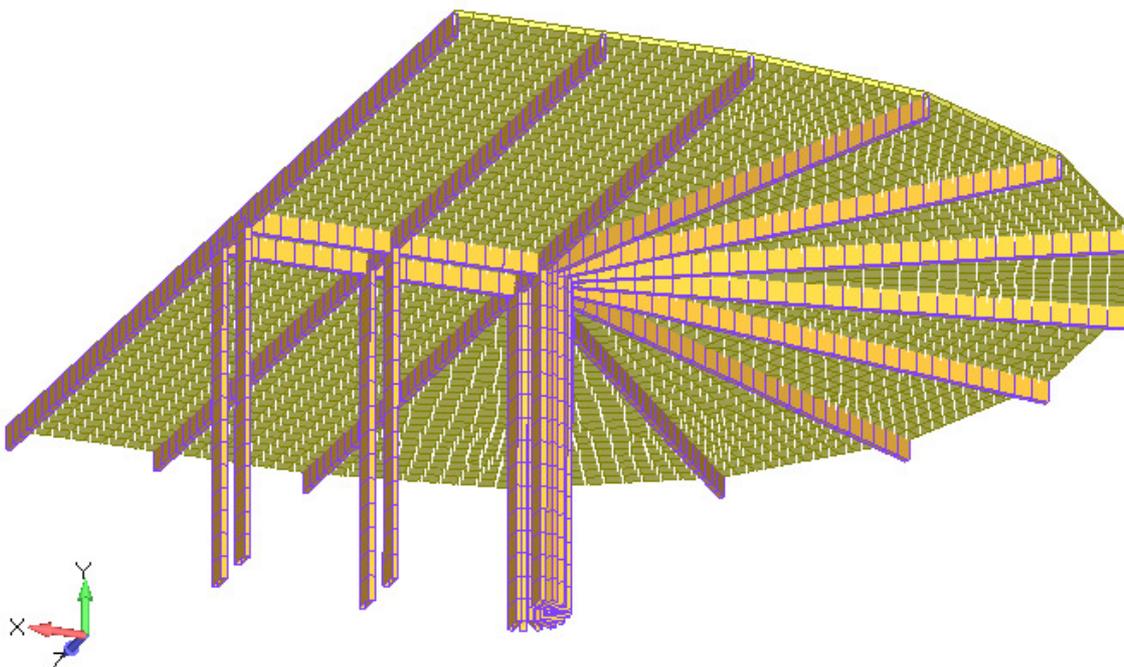


Рисунок 9. Конечно-элементная модель балок пола и покрытия второго этажа Z10HL

## 2.2 Нагрузки и крепления

Статические нагрузки от веса (**Weight**) задаются в виде ускорения  $g=9810$  мм/сек<sup>2</sup> по оси координат Z. Нагрузки **Load**, **Snow** и **Wind** задаются в виде сил, распределенных по площади.

Сейсмические нагрузки задаются спектрограммой коэффициентов динамичности, см. рис. 4, амплитудой  $A$  и коэффициентами  $K_1, K_2, K_\psi$ .

Здание шарнирно закрепляется в точках опирания на сваи.

## 2.3 Результаты расчета

### 2.3.1 Здание без второго этажа

Результаты расчета, используемые для анализа прочности отдельных конструктивных элементов, показаны на рисунках 10-24.

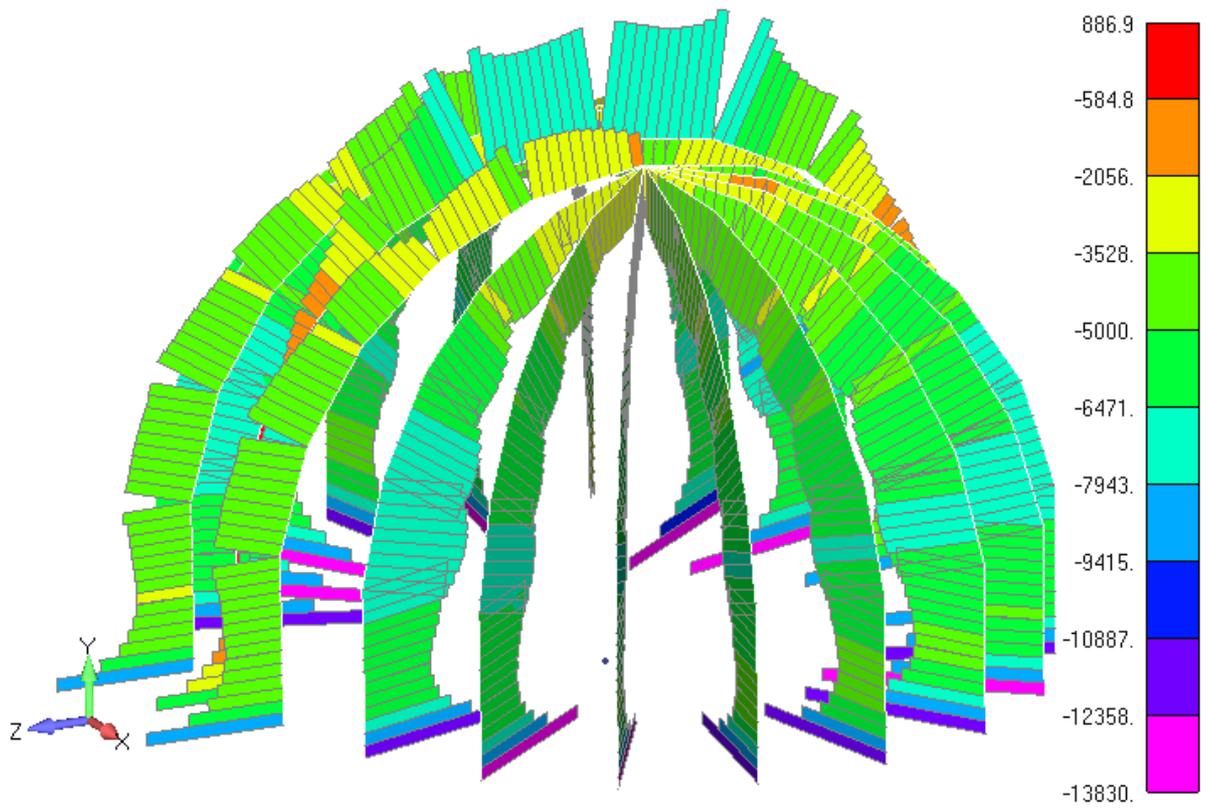


Рисунок 10. Осевые силы в балках, Н. Сочетание Weight + Load + Snow1

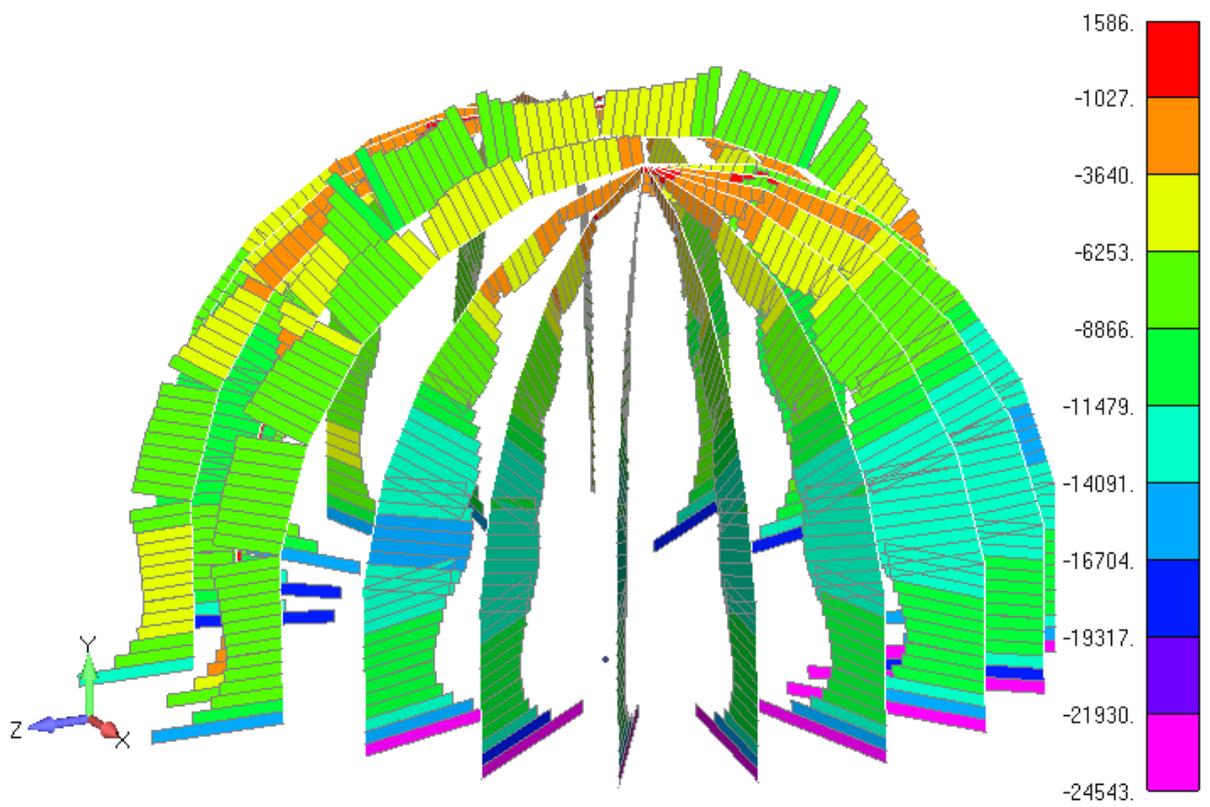


Рисунок 11. Осевые силы в балках, Н. Сочетание Weight + Load + Snow1

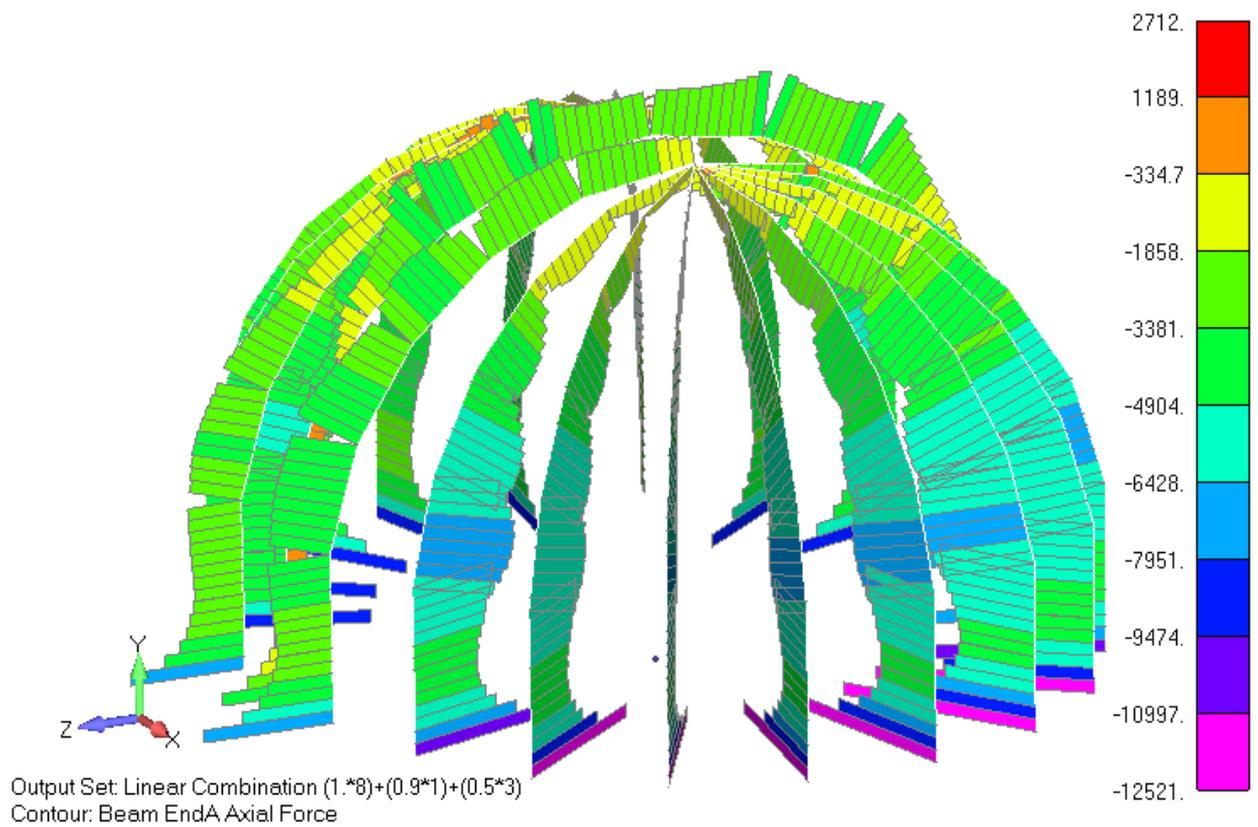


Рисунок 12. Осевые силы в балках, Н. Сочетание Quake Z + 0.9\*Weight + 0.8\*Load + 0.5\*Snow2

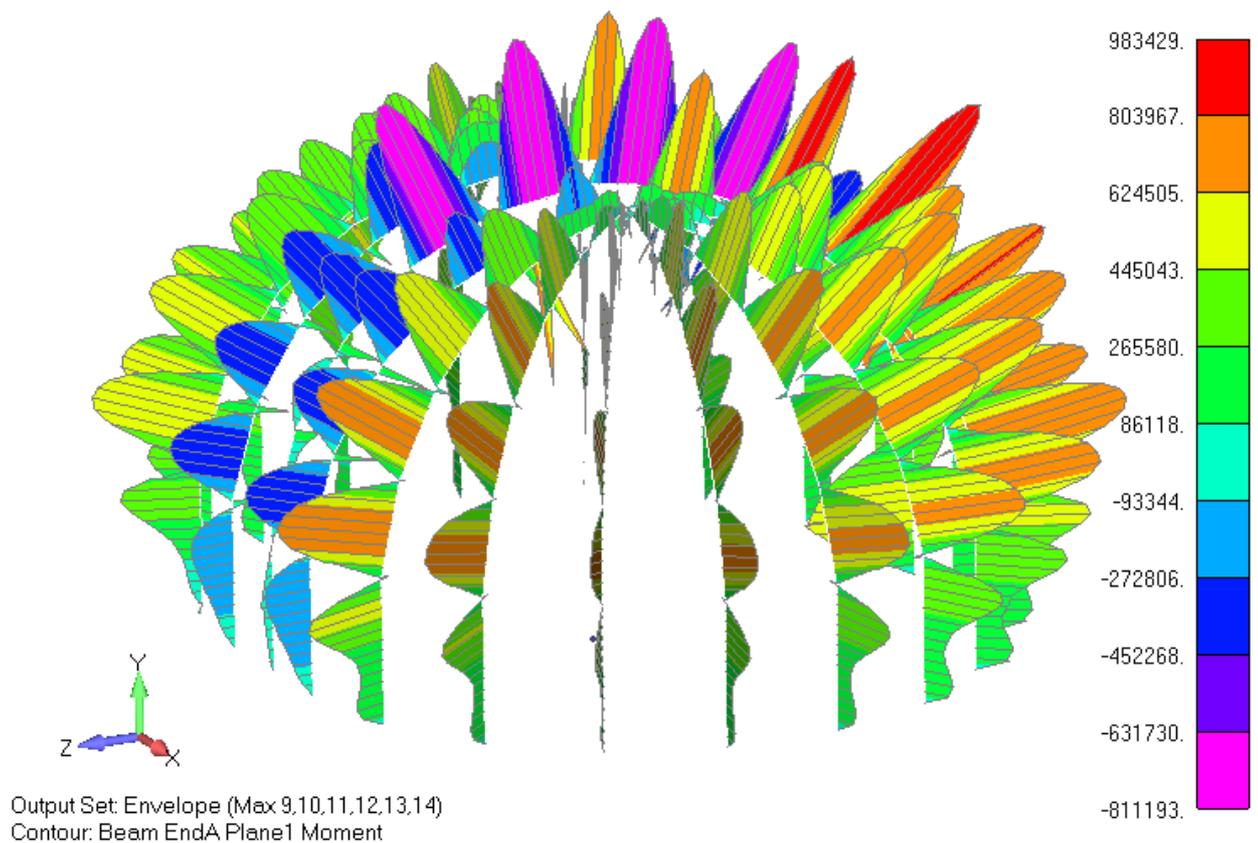


Рисунок 13. Огибающая максимальных изгибающих моментов в балках, Н\*мм. Основные сочетания

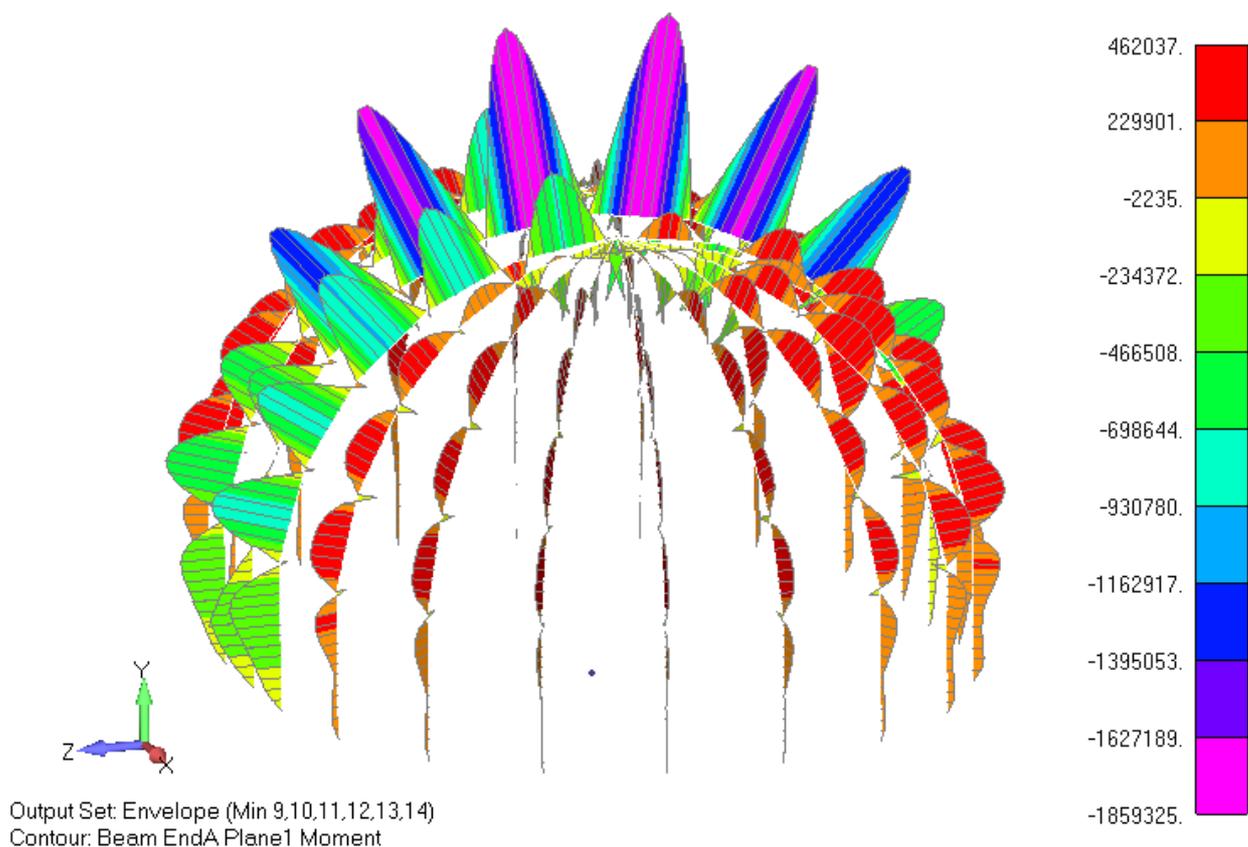


Рисунок 14. Огибающая минимальных изгибающих моментов в балках, Н\*мм. Основные сочетания

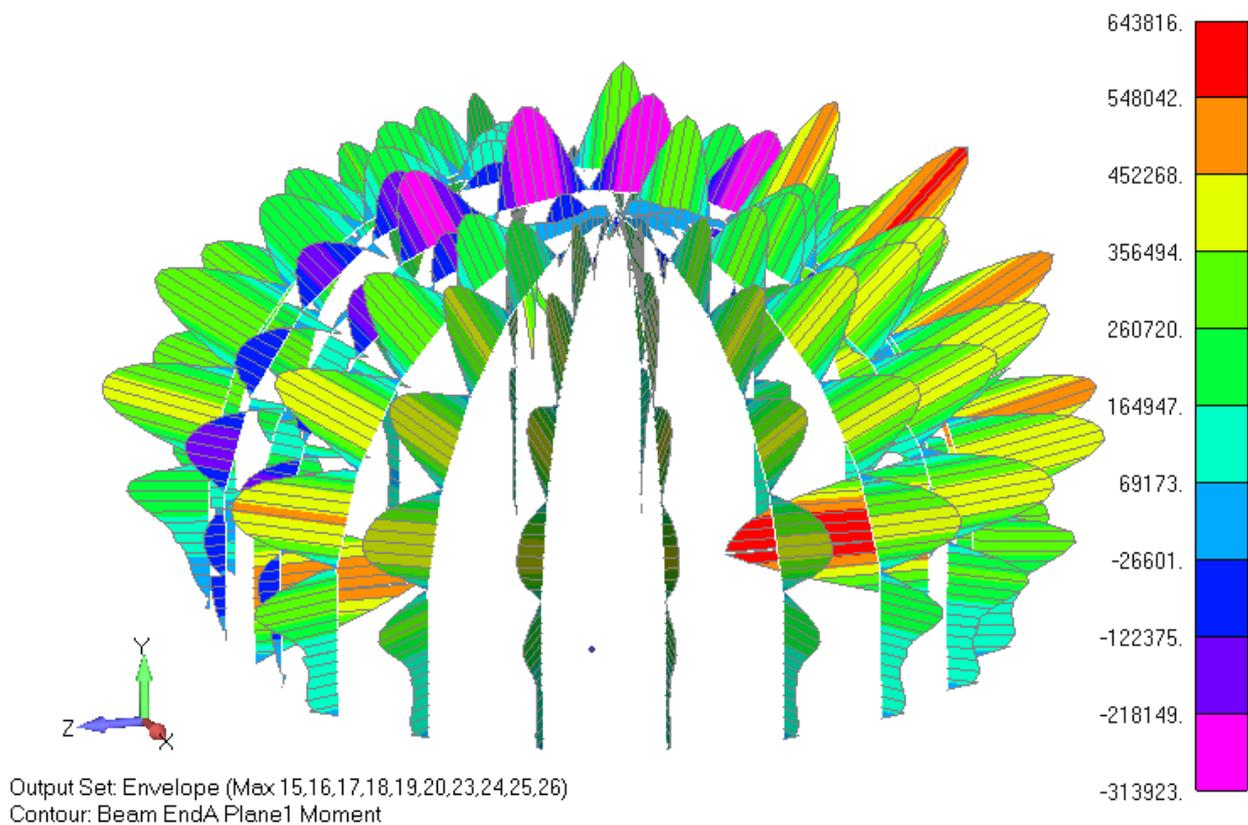


Рисунок 15. Огибающая максимальных изгибающих моментов в балках, Н\*мм. Особые сочетания

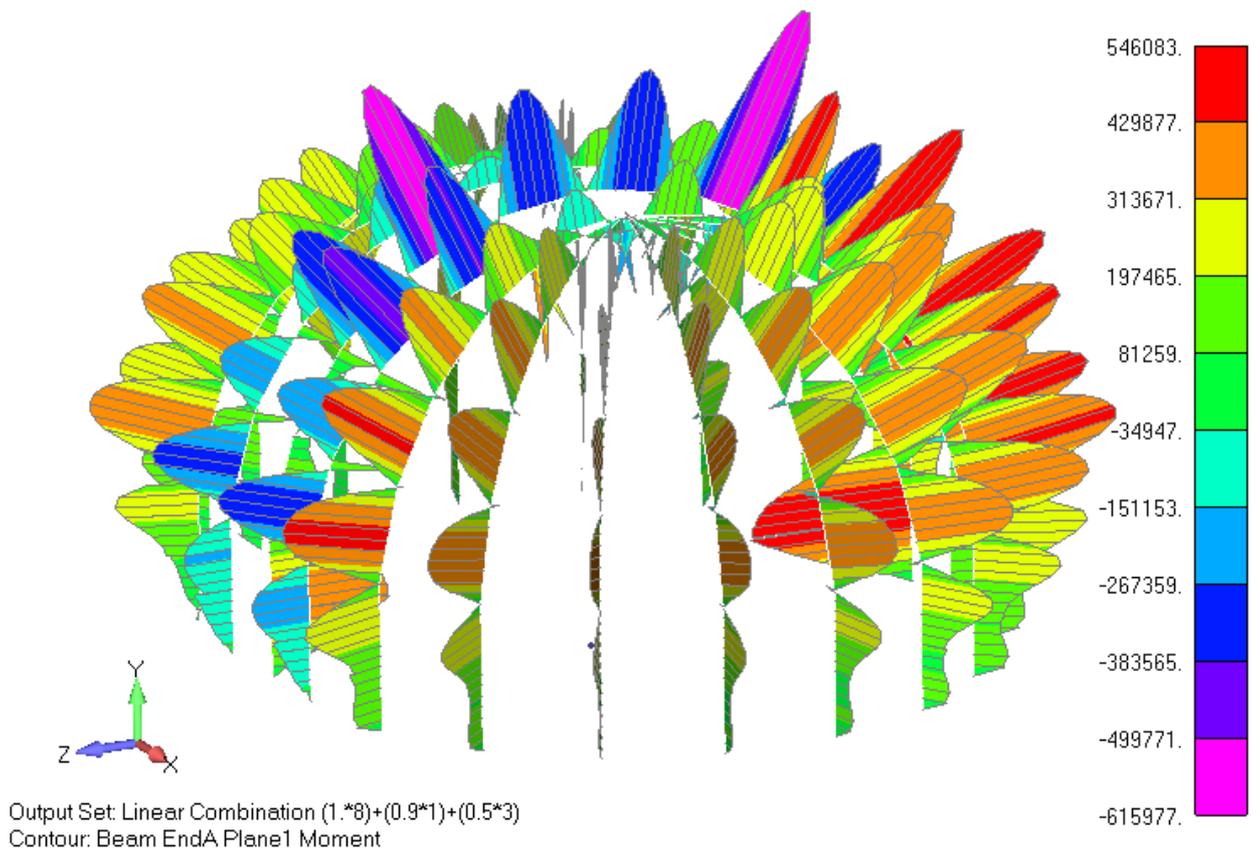


Рисунок 16. Огибающая минимальных изгибающих моментов в балках, Н\*мм. Особые сочетания

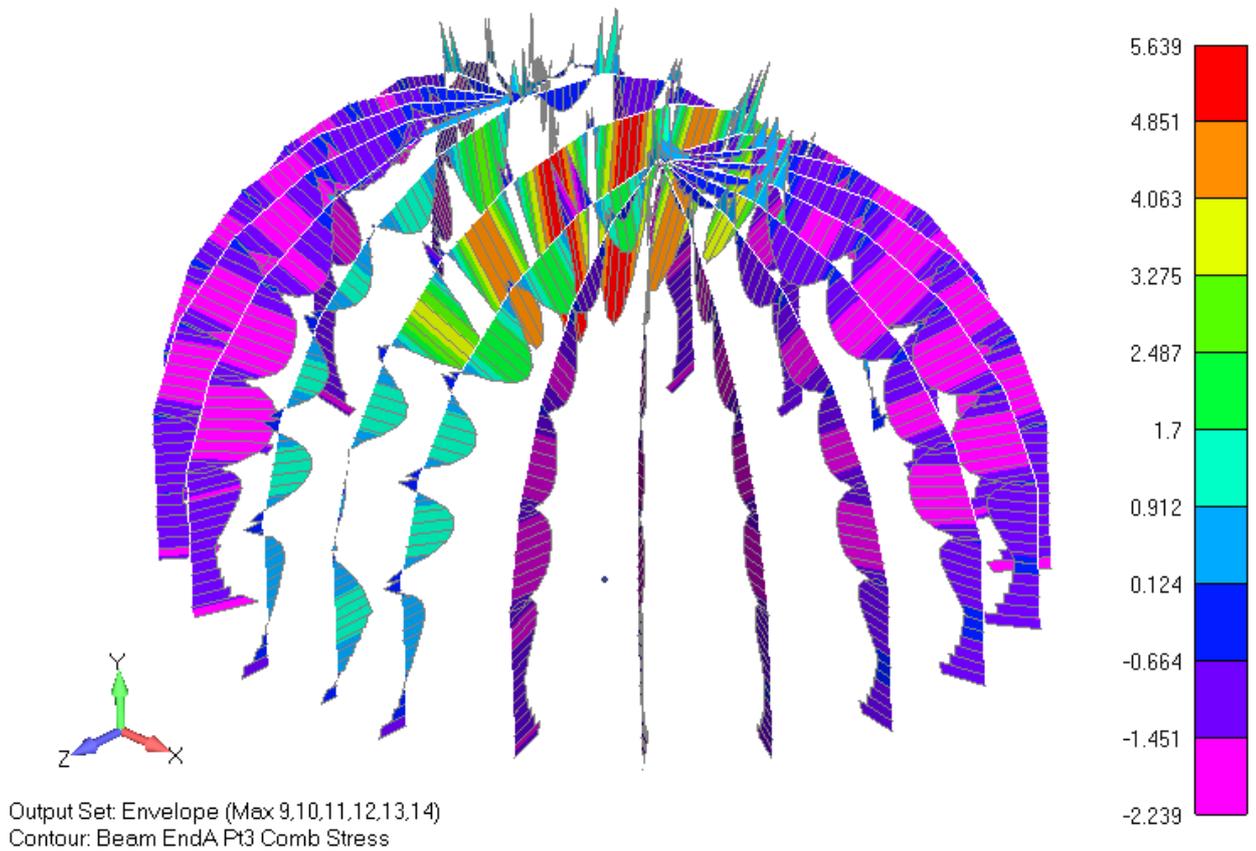


Рисунок 17. Огибающая максимальных напряжений в балках, МПа. Основные сочетания

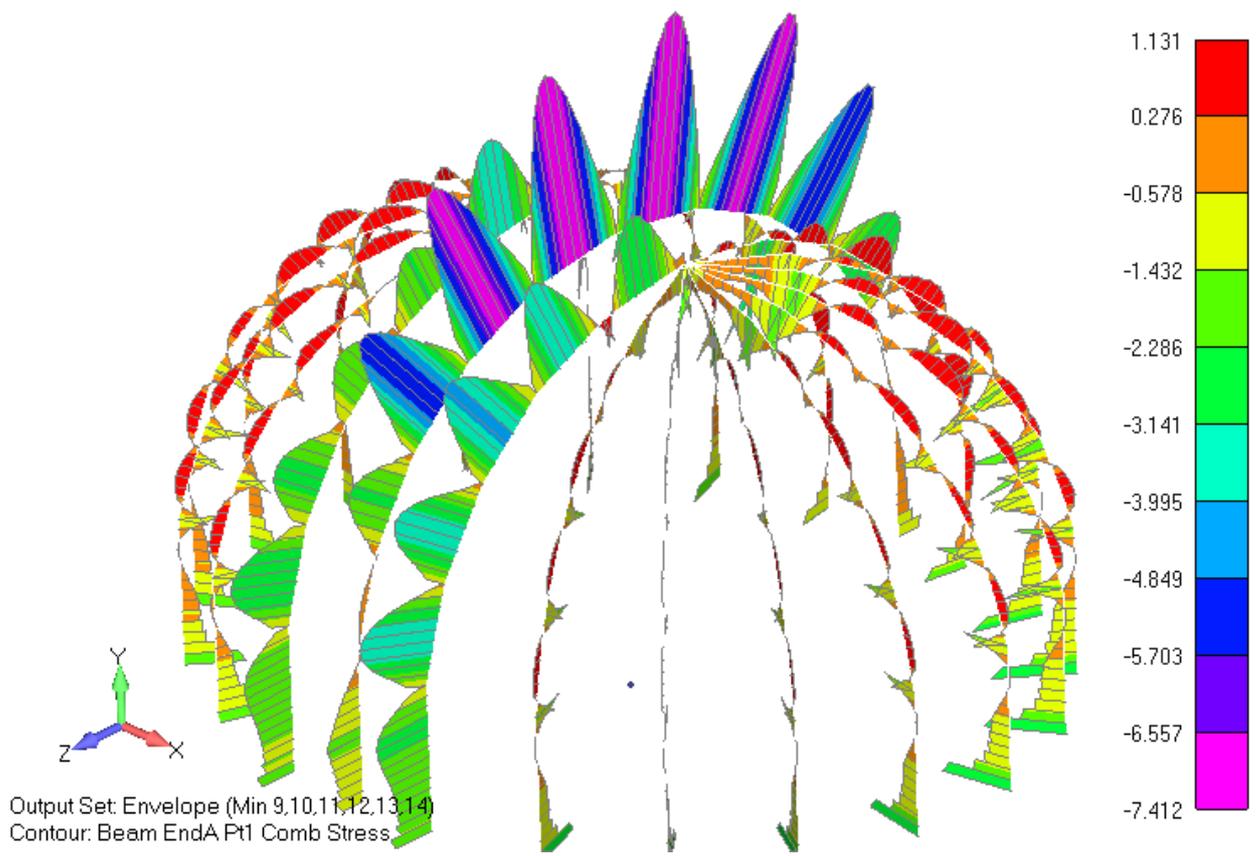


Рисунок 18. Огибающая минимальных напряжений в балках в верхней и нижней точка сечения, МПа. Основные сочетания

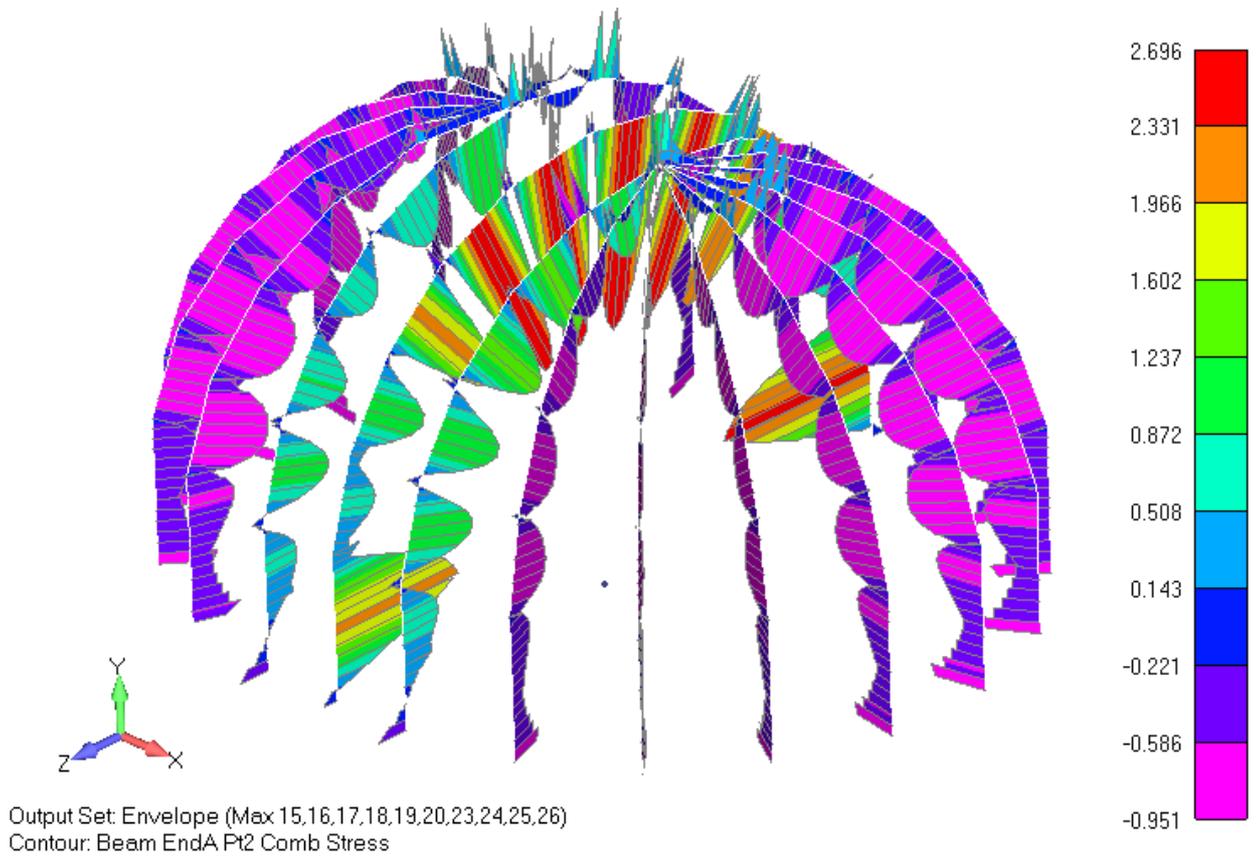


Рисунок 19. Огибающая максимальных напряжений в балках, МПа. Особые сочетания



Рисунок 20. Огибающая минимальных напряжений в балках, МПа. Особые сочетания

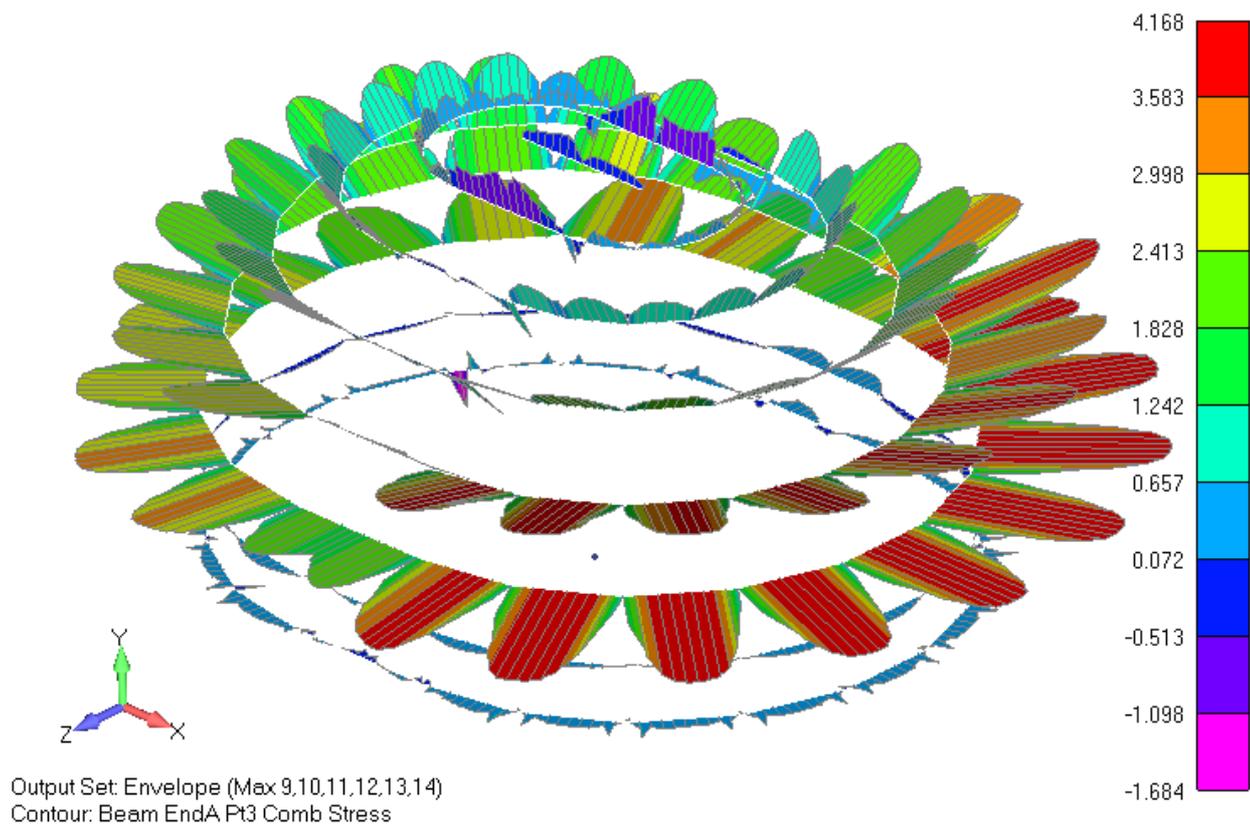


Рисунок 21. Огибающая максимальных напряжений в распорках, МПа. Основные сочетания

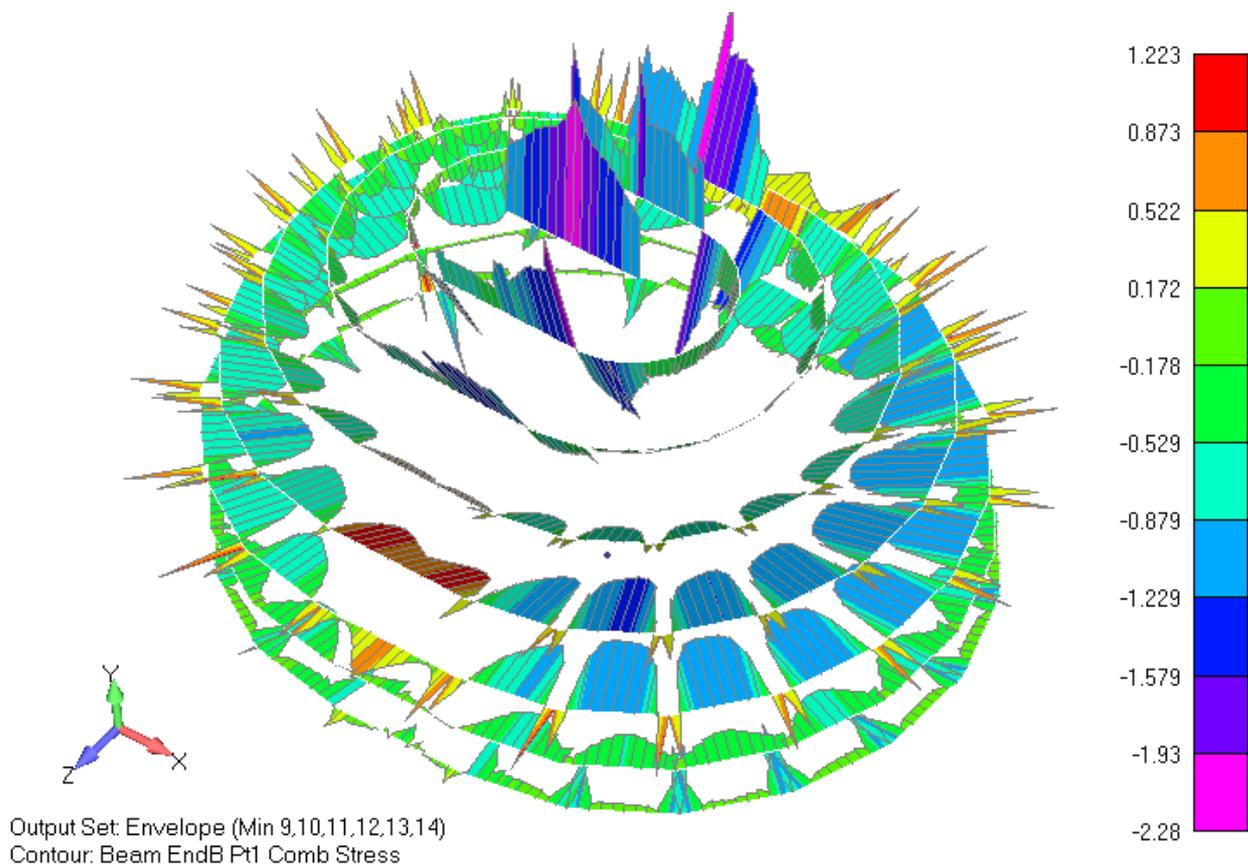


Рисунок 22. Огибающая минимальных напряжений в распорках, МПа. Основные сочетания

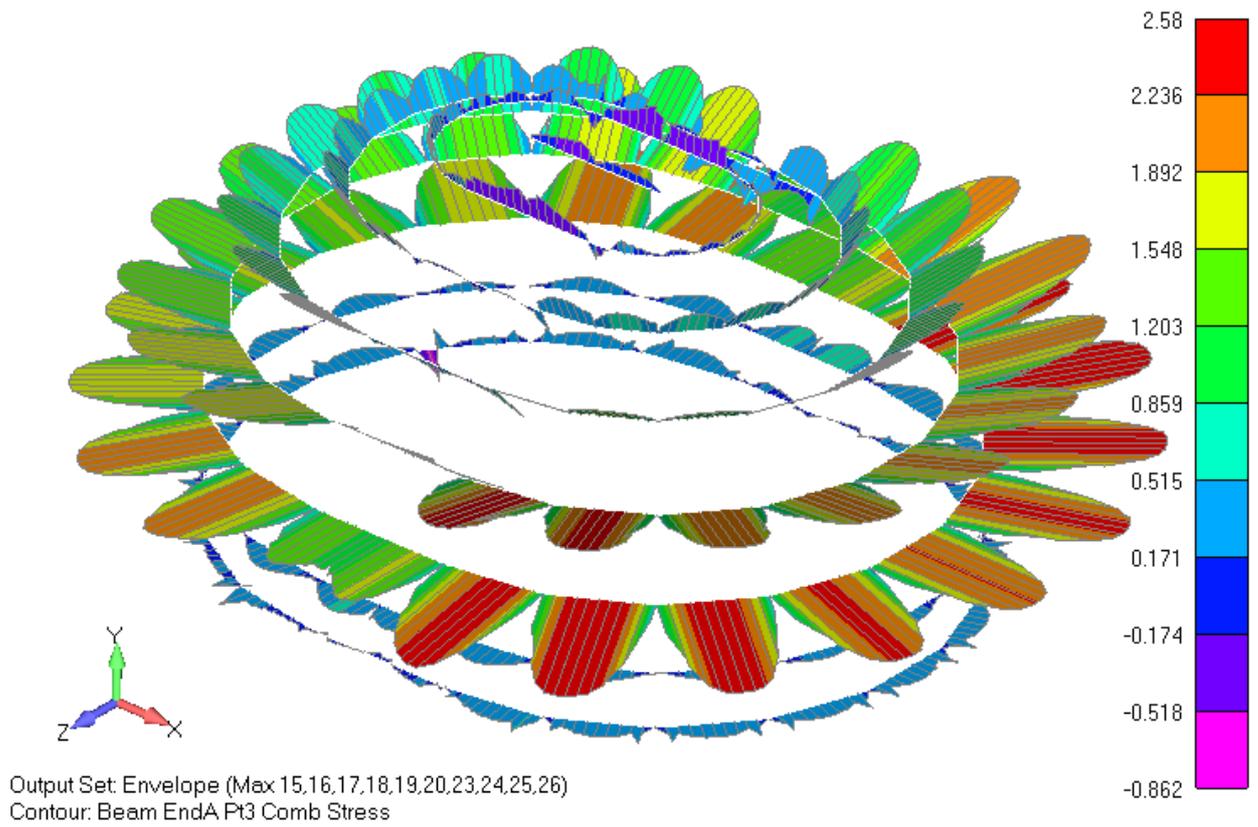


Рисунок 23. Огибающая максимальных напряжений в распорках, МПа. Особые сочетания

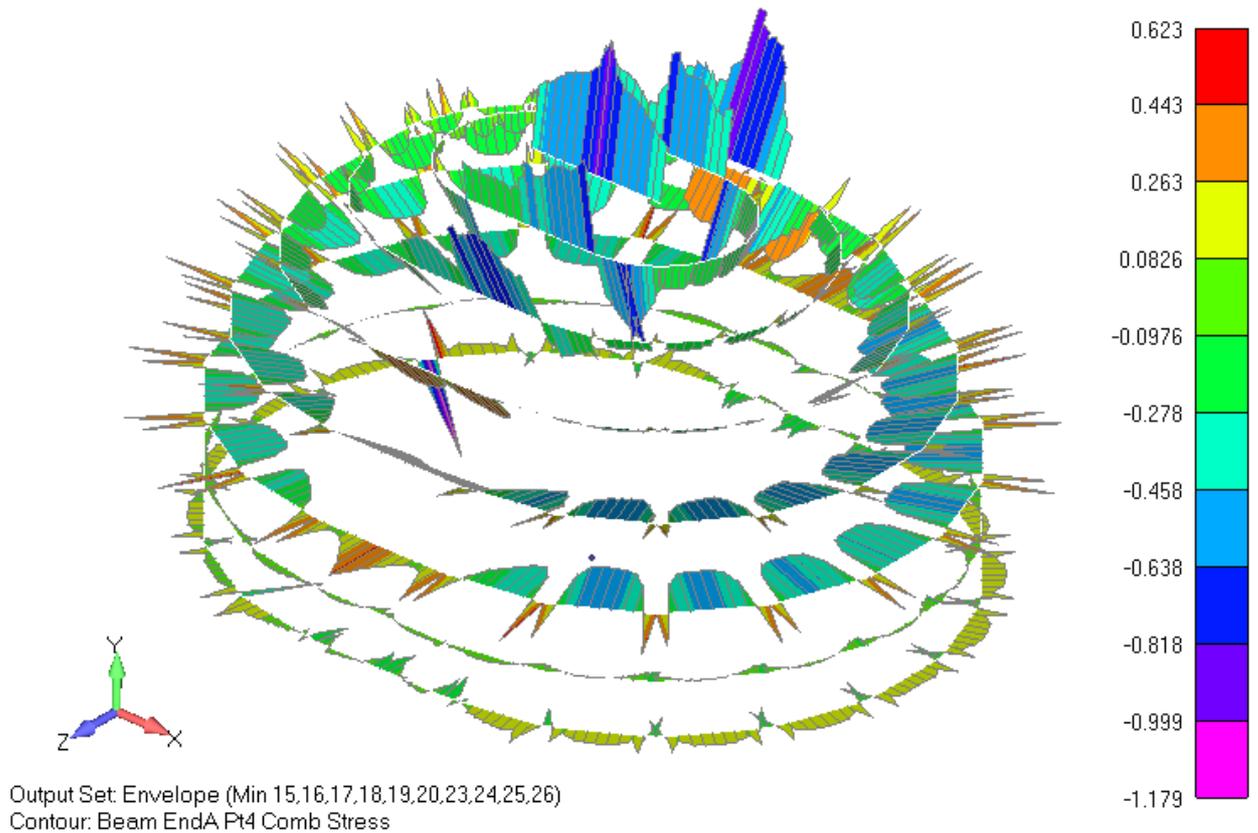


Рисунок 24. Огибающая минимальных напряжений в распорках, МПа. Особые сочетания

### 2.3.2 Здание со вторым этажом

Результаты расчета, используемые для анализа прочности отдельных конструктивных элементов, показаны на рисунках 25-38.

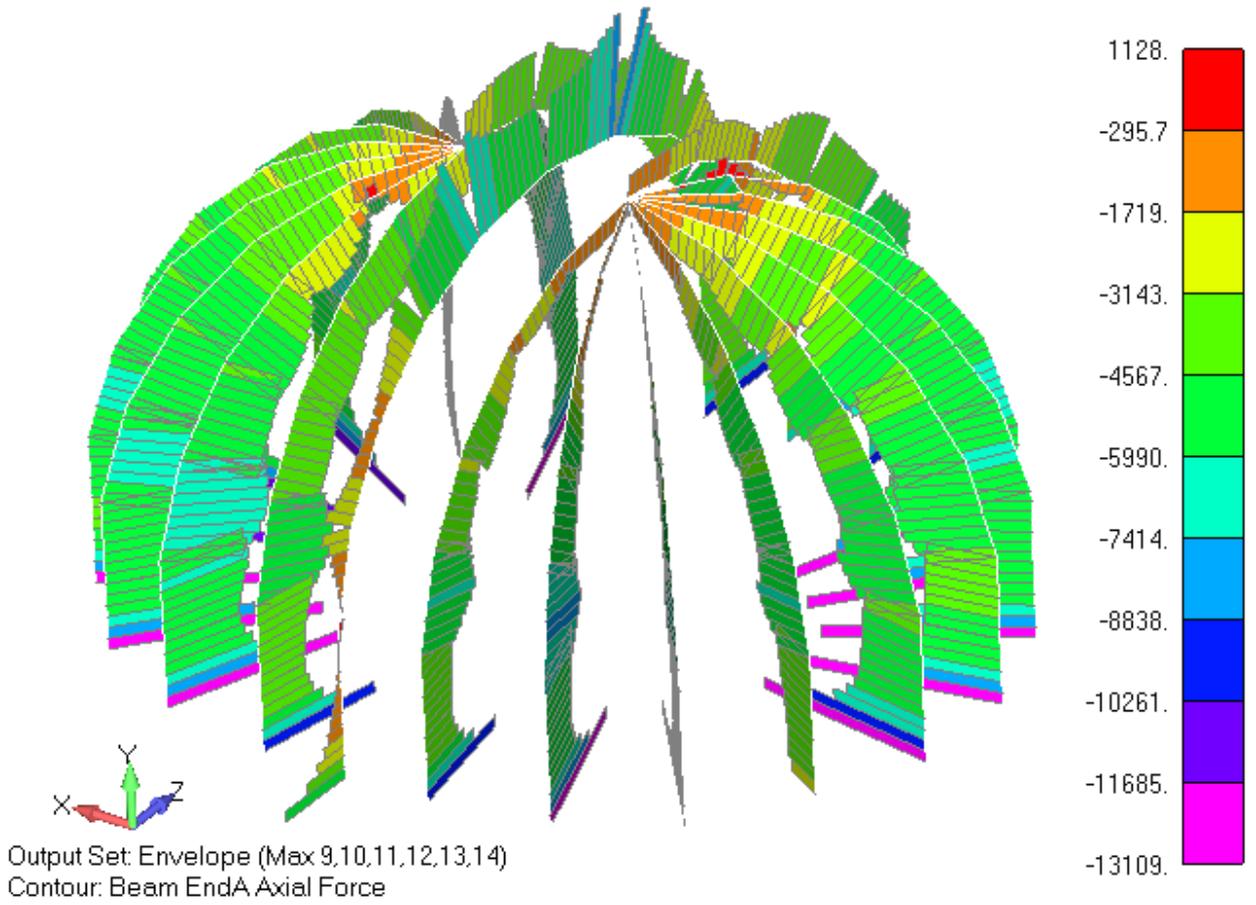


Рисунок 25. Огибающая максимальных осевых сил в балках, Н. Основные сочетания



Рисунок 26. Огибающая минимальных осевых сил в балках, Н. Основные сочетания

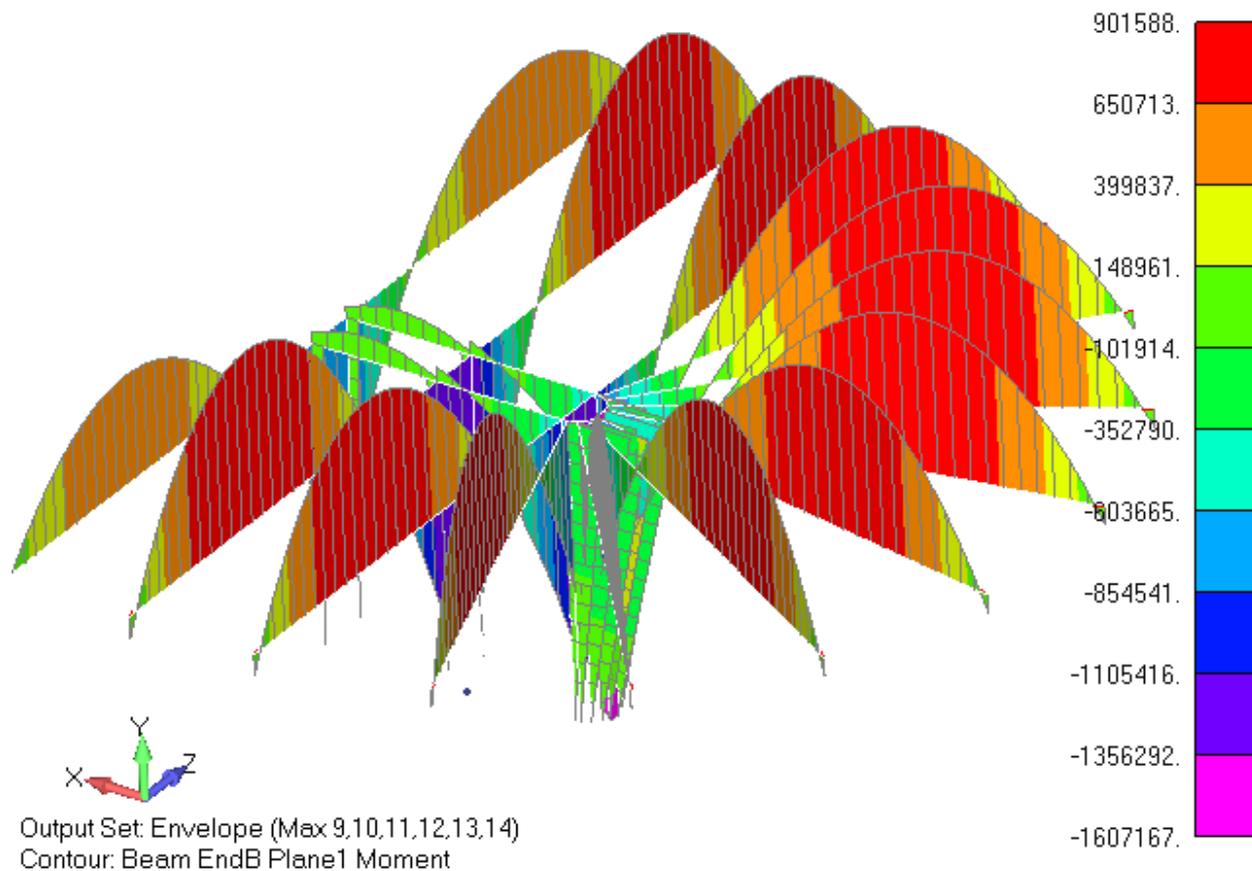


Рисунок 27. Огибающая максимальных изгибающих моментов в балках второго этажа, Н\*мм. Основные сочетания

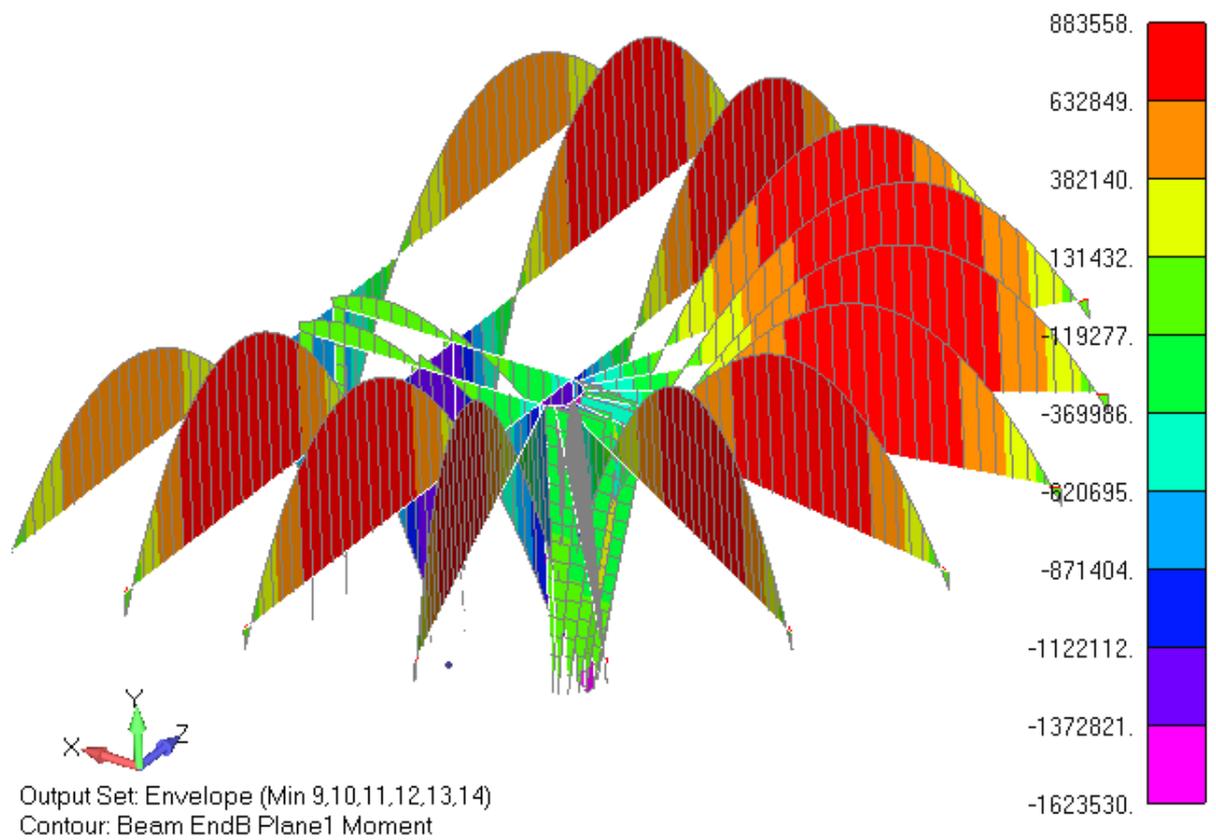


Рисунок 28. Огибающая минимальных изгибающих моментов в балках второго этажа, Н\*мм.  
Основные сочетания

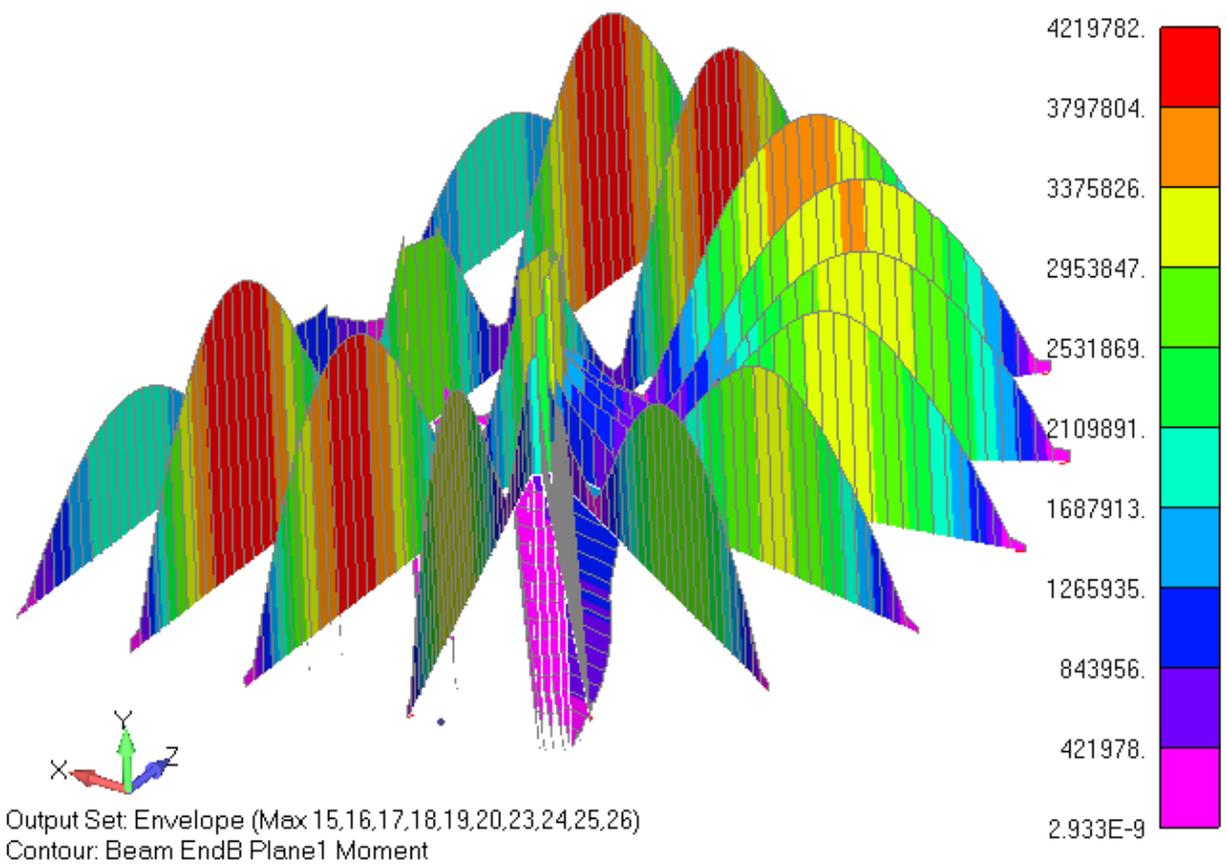


Рисунок 29. Огибающая максимальных изгибающих моментов в балках второго этажа, Н\*мм.  
Особые сочетания

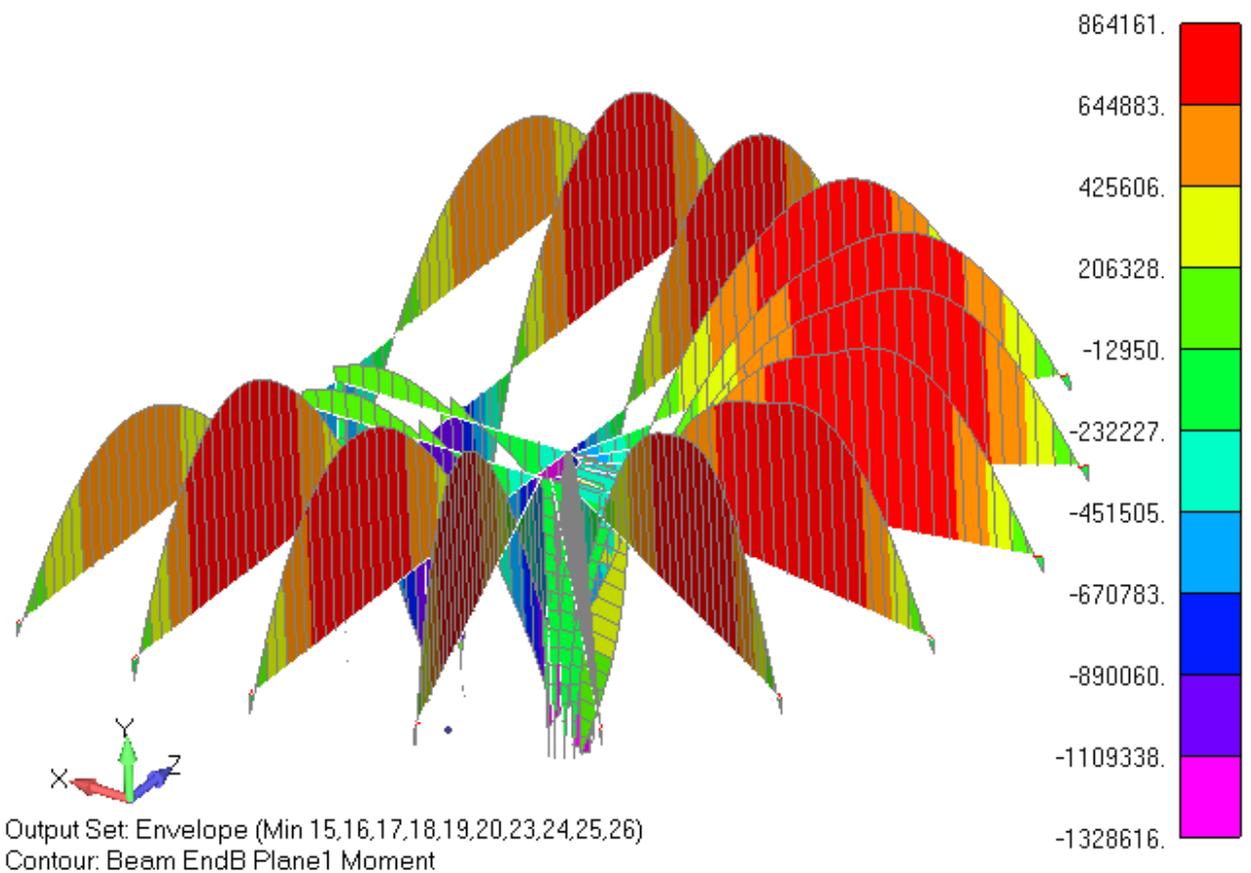


Рисунок 30. Огибающая минимальных изгибающих моментов в балках второго этажа, Н\*мм.  
 Особые сочетания

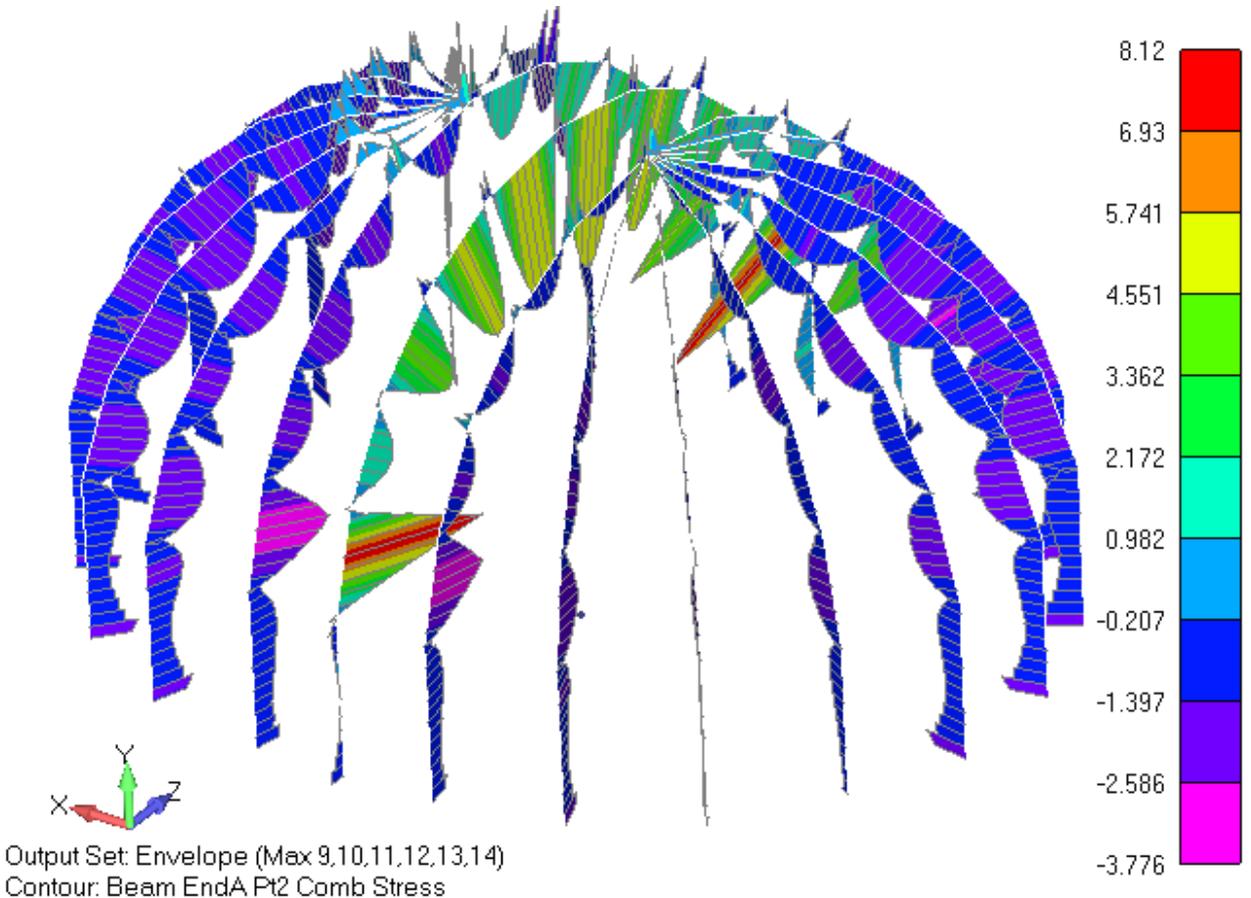


Рисунок 31. Огибающая максимальных напряжений в балках, МПа. Основные сочетания



Рисунок 32. Огибающая минимальных напряжений в балках, МПа. Основные сочетания

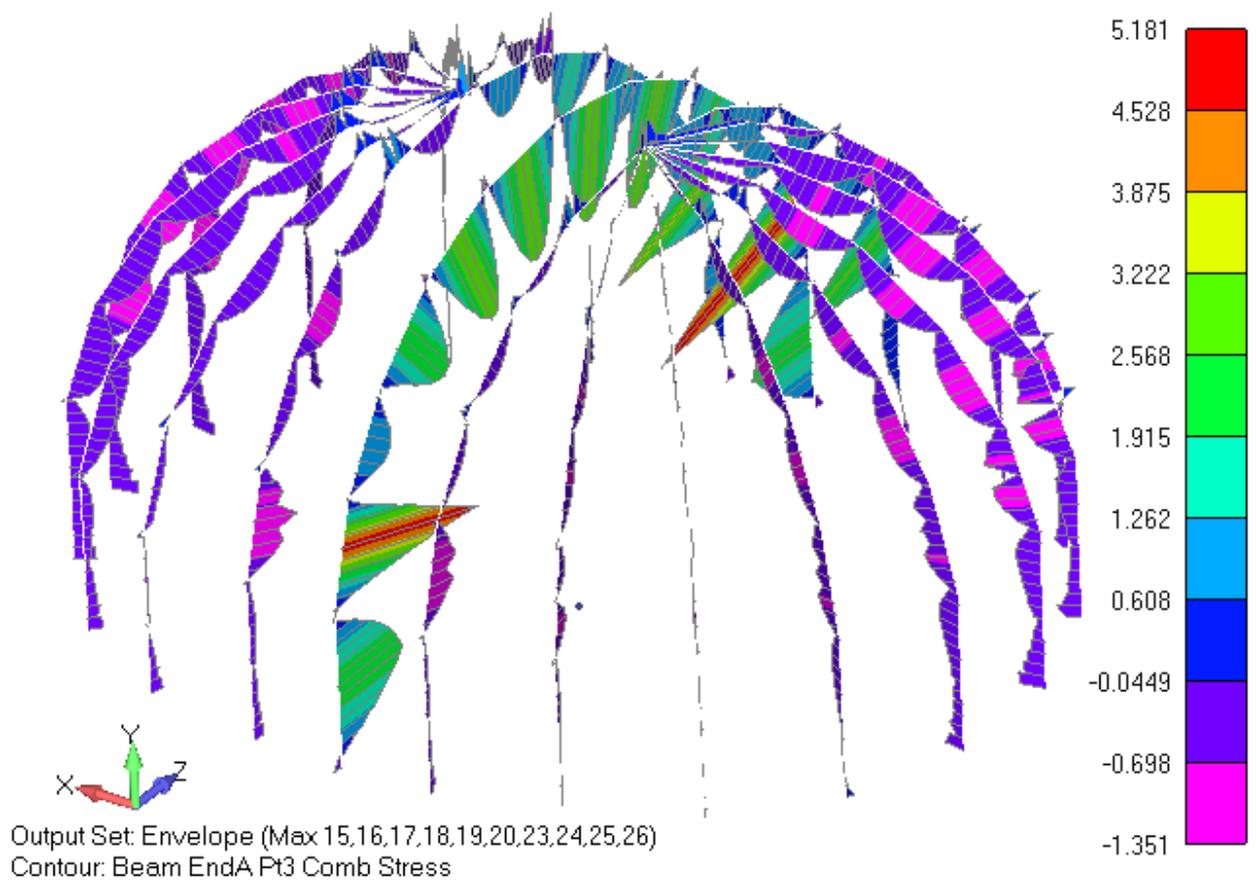


Рисунок 33. Огибающая максимальных напряжений в балках, МПа. Особые сочетания



Рисунок 34. Огибающая минимальных напряжений в балках, МПа. Особые сочетания

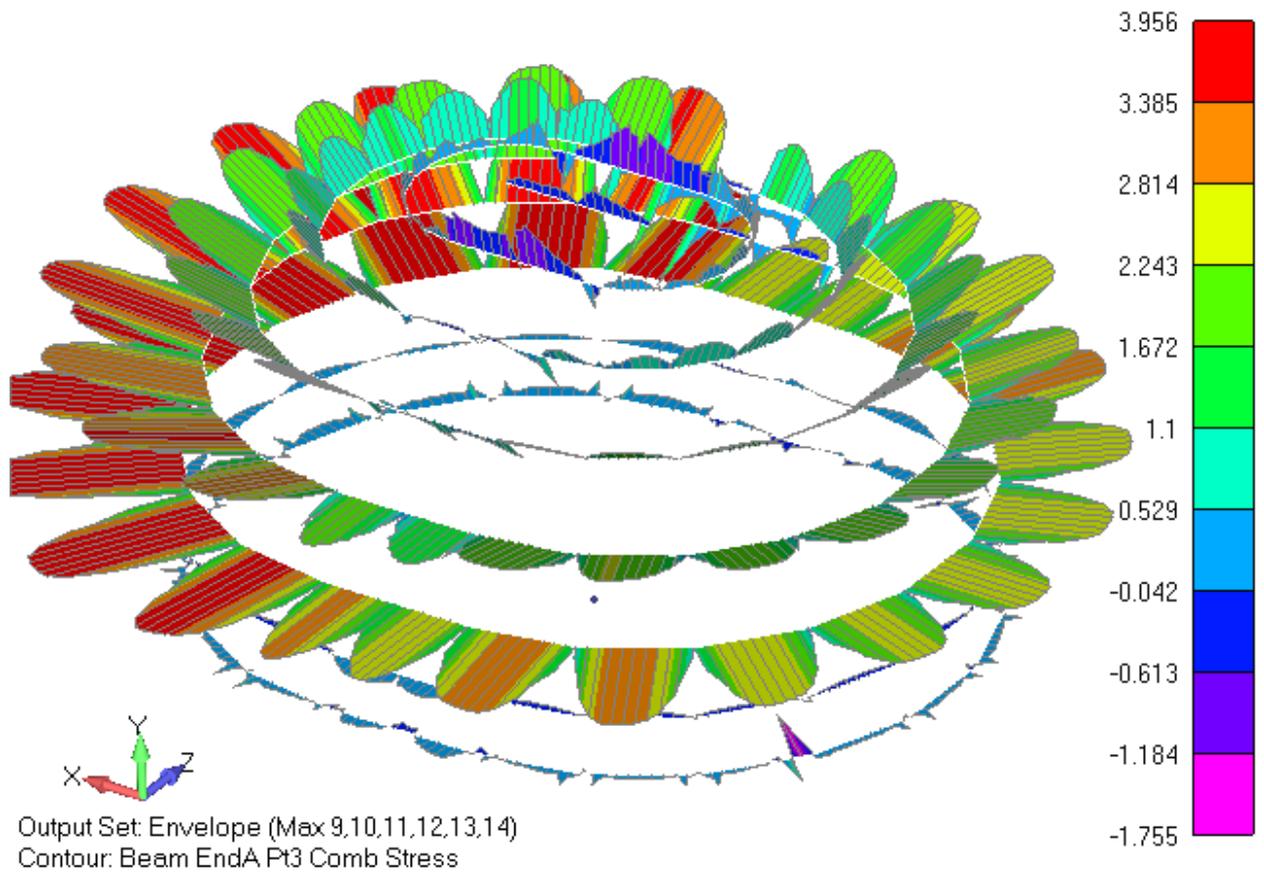


Рисунок 35. Огибающая максимальных напряжений в распорках, МПа. Основные сочетания

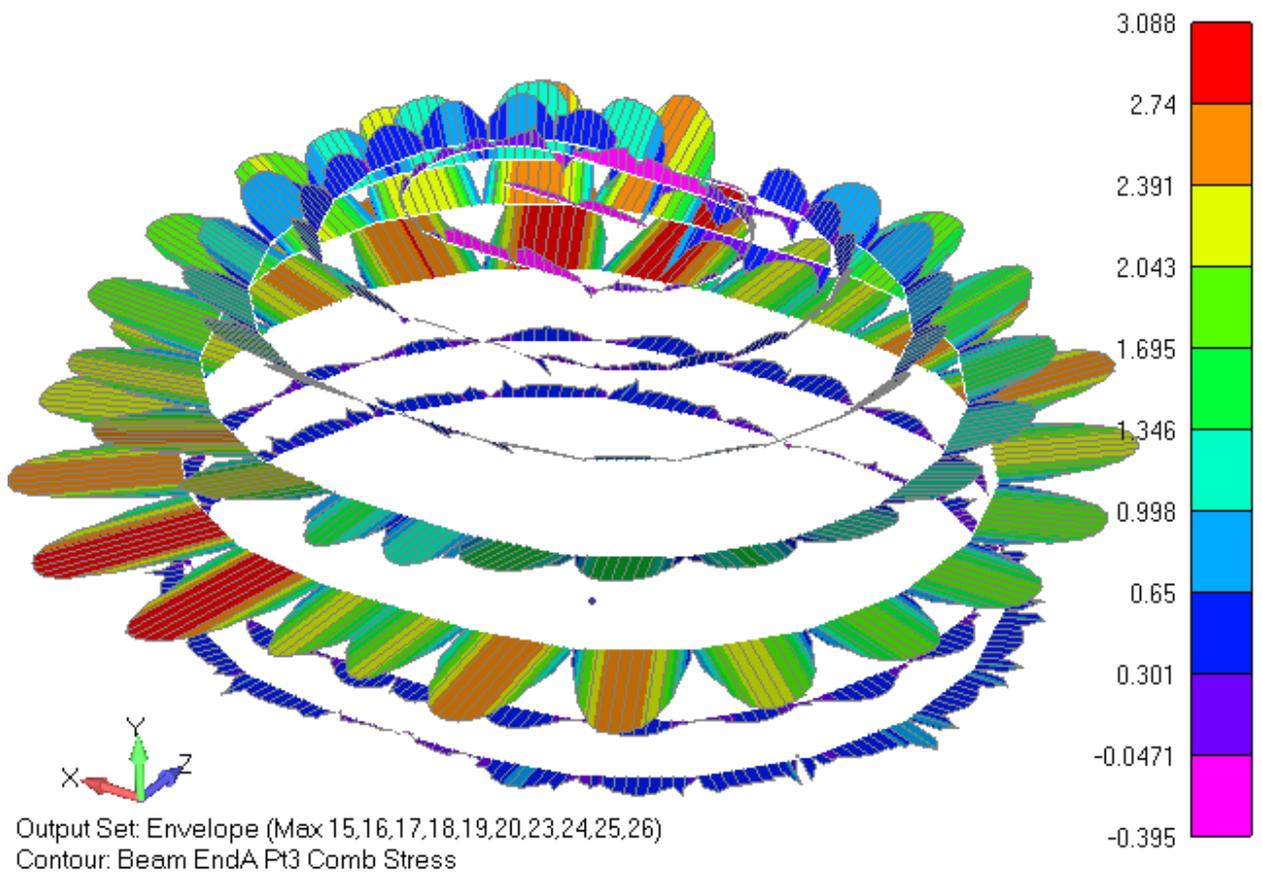


Рисунок 36. Огибающая максимальных напряжений в распорках, МПа. Особые сочетания

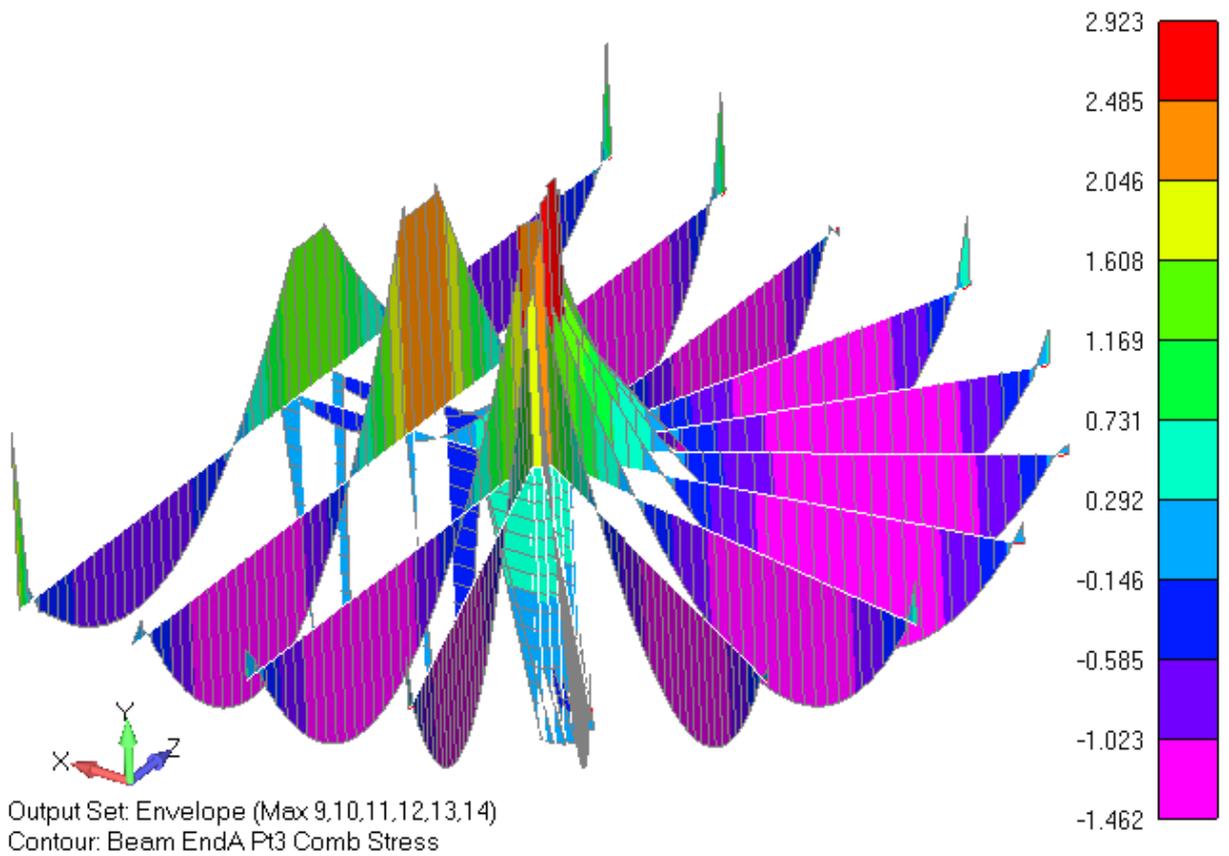


Рисунок 37. Огибающая максимальных напряжений в балках второго этажа, МПа. Основные сочетания

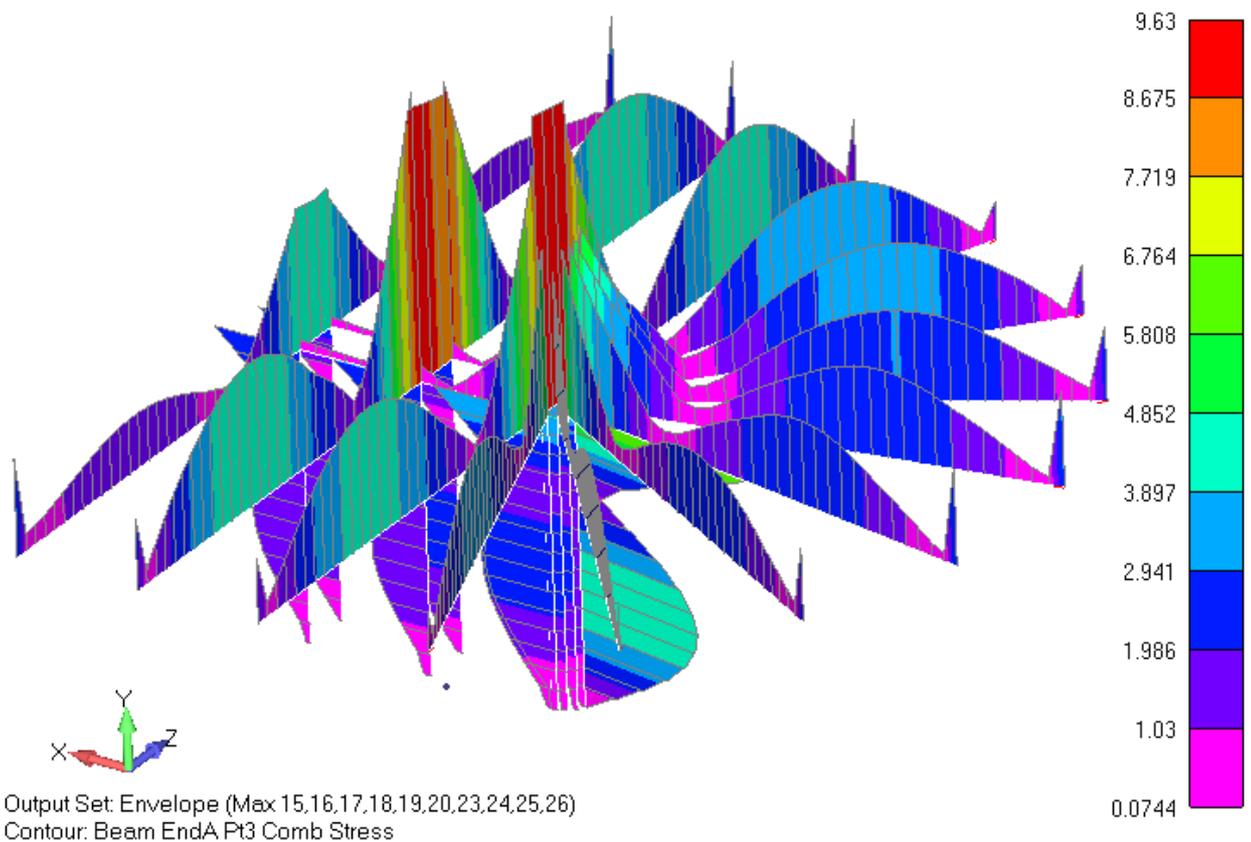


Рисунок 38. Огибающая максимальных напряжений в балках второго этажа, МПа. Особые сочетания

### 3. АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ

#### 3.1 Основные сочетания

Расчетные сопротивления при изгибе и сжатии:

- $R_u^A = R_{сж}^A = 12.1$  МПа - при совместном действии постоянной и длительной временной нагрузки

Расчетные сопротивления при растяжении:

- $R_p^A = 7.6$  МПа - при совместном действии постоянной и длительной временной нагрузки

#### Балки каркаса, сечение 195\*45 мм

Наибольшие напряжения в балках:

- $\sigma_{сж} = \sigma_u = 8.56$  МПа, рис. 32.
- Коэффициент запаса  $R_{сж}^A / \sigma_u = 12.1/8.56 = 1.41$
- Коэффициент использования материала  $\sigma_u / R_{сж}^A = 8.56/12.1 = 0.71$

#### Распорки, сечение 195\*45 мм

Наибольшие напряжения в распорках:

- $\sigma_{раст} = 3.96$  МПа, рис. 35.

- Коэффициент запаса  $R_p^A / \sigma_{расм} = 7.6/3.96 = 1.92$
- Коэффициент использования материала  $\sigma_{расм} / R_p^A = 3.96/7.6 = 0.52$

### Балки пола второго этажа, сечение 200\*100 мм

Наибольшие напряжения:

- $\sigma_{раст} = 2.93$  МПа, рис. 37.
- Коэффициент запаса  $R_p^A / \sigma_{расм} = 10.6/2.93 = 3.6$
- Коэффициент использования материала  $\sigma_{расм} / R_p^A = 2.93/10.6 = 0.28$

### 3.2 Особые сочетания

Расчетные сопротивления при изгибе и сжатии:

- $R_u^A = R_{сж}^A = 16.9$  МПа - при совместном действии постоянной и сейсмической нагрузки

Расчетные сопротивления при растяжении:

- $R_p^A = 10.6$  МПа - при совместном действии постоянной и сейсмической нагрузки

### Балки каркаса

Наибольшие напряжения в балках:

- $\sigma_{сж} = 4.29$  МПа, рис. 34.
- $\sigma_u = 5.18$  МПа, рис. 33.
- Коэффициент запаса  $R_{сж}^A / \sigma_u = 16.9/5.18 = 3.26$
- Коэффициент использования материала  $\sigma_u / R_{сж}^A = 5.18/16.9 = 0.31$

### Распорки

Наибольшие напряжения в распорках:

- $\sigma_{раст} = 3.09$  МПа, рис. 36.
- Коэффициент запаса  $R_p^A / \sigma_{расм} = 10.6/3.09 = 3.43$
- Коэффициент использования материала  $\sigma_{расм} / R_p^A = 3.09/10.6 = 0.29$

### Балки пола второго этажа

Наибольшие напряжения:

- $\sigma_{расм} = 9.63$  МПа, рис. 38.
- Коэффициент запаса  $R_{расм}^A / \sigma_{расм} = 10.6/9.63 = 1.1$
- Коэффициент использования материала  $\sigma_{расм} / R_{расм}^A = 9.63/10.6 = 0.91$

#### 4. СВОДКА ЗАПАСОВ ПРОЧНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛА

Таблица 2

№ п/п	Наименование	Минимальный запас прочности, $\eta$	Максимальный коэффициент использования
1	Балки каркаса	1.41	0.71
2	Распорки	1.92	0.52
2	Балки пола второго этажа	1.1	0.91

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет на экстремальные условия эксплуатации показал, что купольное здание Z10HL удовлетворяет требованиям строительных норм СП 64.13330.2017 "СНиП II-25-80. Деревянные конструкции" Требуемый запас прочности обеспечен,  $\eta \geq 1$ .

Наибольшее влияние на напряженное состояние каркаса оказывают снеговые нагрузки. При расчете принята максимально возможная снеговая нагрузка - расчетное значение веса снегового покрова  $S_g = 5.6 \text{ кН/м}^2 = 570 \text{ кг/м}^2$ , снеговой район VIII.

Исходя из минимального запаса прочности  $\eta=1.41$  при основных сочетаниях, можно сделать вывод, что допустимое расчетное значение веса снегового покрова для здания составляет не менее  $S_g = 800 \text{ кг/м}^2$ .

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СП 64.13330.2017 СНиП II-25-80. Деревянные конструкции
2. СП 20.13330.2011 СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия
3. СП 14.13330.2014 СНиП II-7-81\*. Строительство в сейсмических районах