

Моделирование нелинейных свойств конструкций

Линейные и нелинейные расчеты

Линейный расчет



$$K V = F$$
$$K = \text{const}$$

Нелинейный расчет



$$K(V) V = F$$
$$K \neq \text{const}$$

Виды нелинейностей

1. Геометрическая нелинейность – нелинейная зависимость между деформациями и перемещениями.

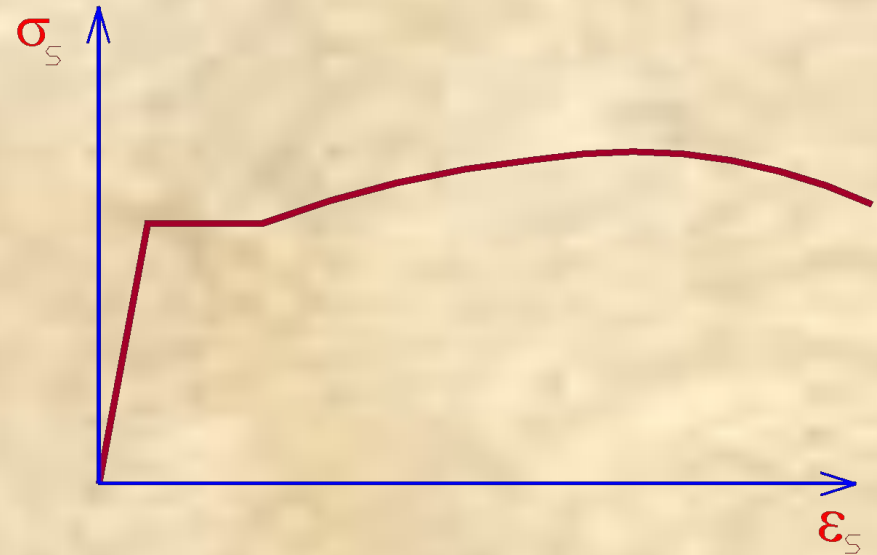
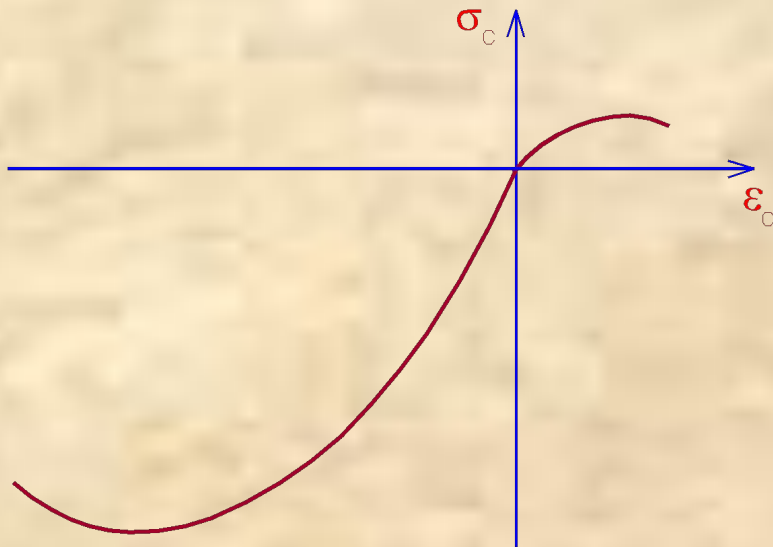
2. Физическая нелинейность – нелинейная зависимость между деформациями (перемещениями) и напряжениями (усилиями).

Выделяют две разновидности физической нелинейности:

нелинейность работы материала

бетон

мягкая сталь



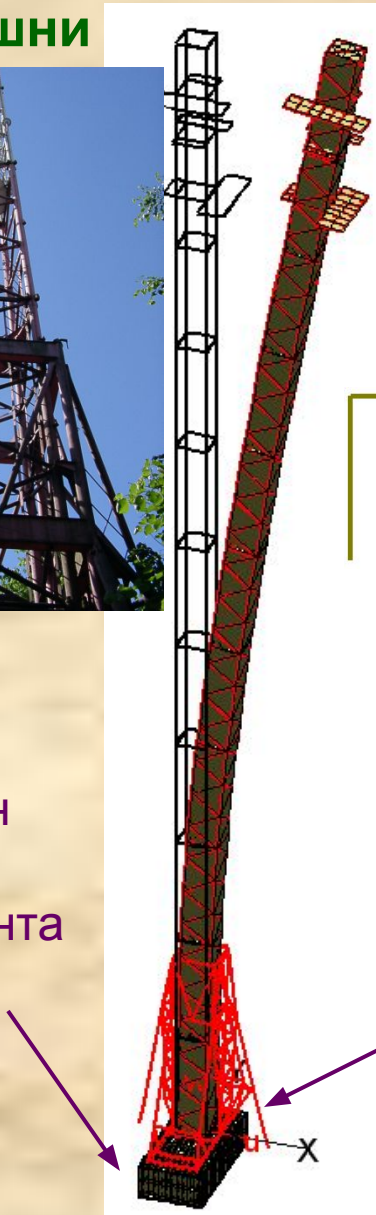
конструктивная нелинейность - односторонняя работа элементов, опор, узловых сопряжений, зазоры в связях и т.д.

Учет геометрической и конструктивной нелинейности в задачах статики, динамики и устойчивости

Башни

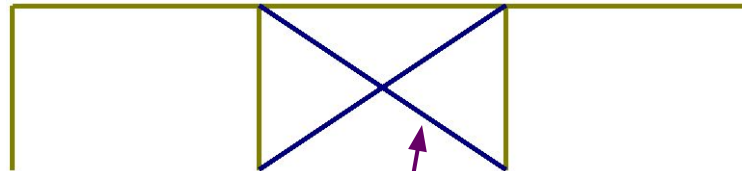


Возможен отрыв фундамента от земли

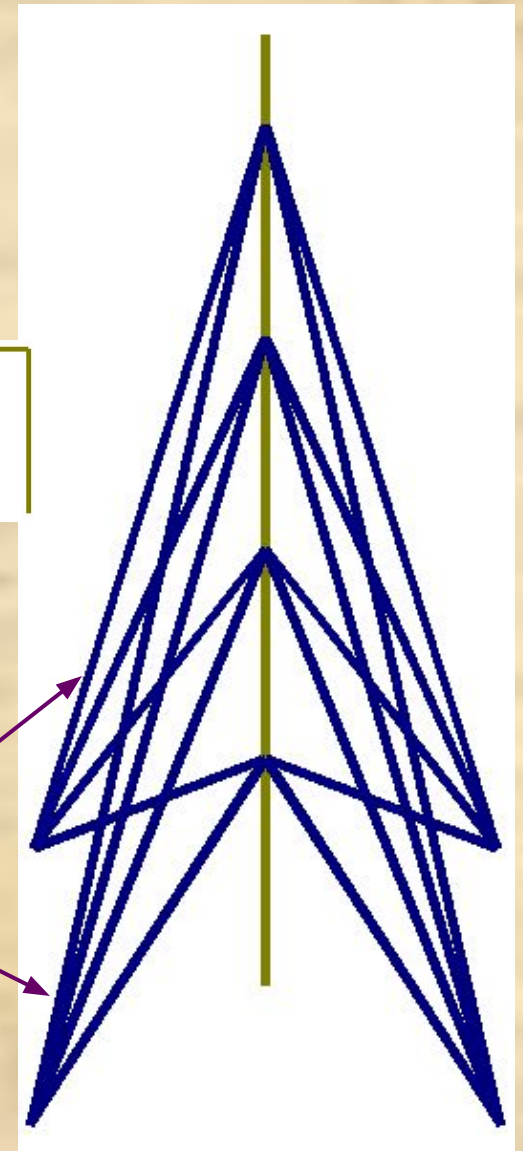


Мачты на оттяжках

Гибкие крестовые связи

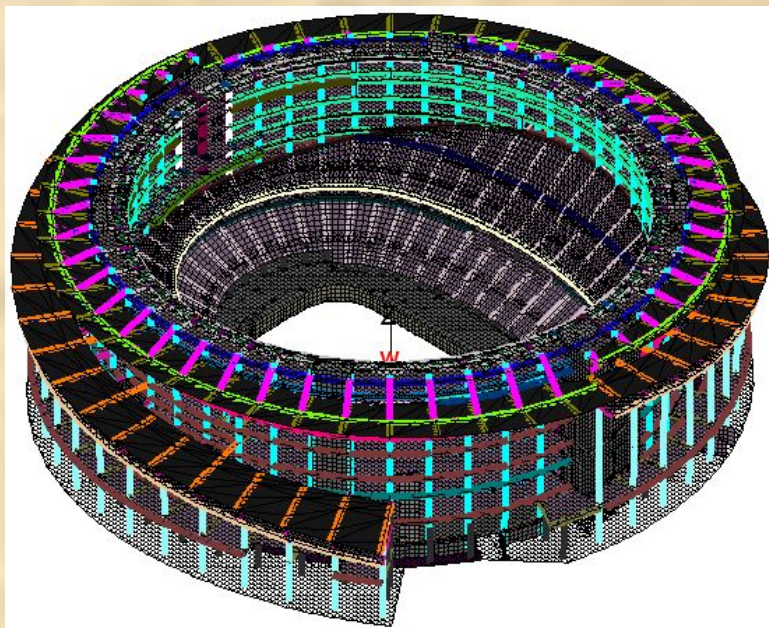


Гибкие элементы, не работающие на сжатие

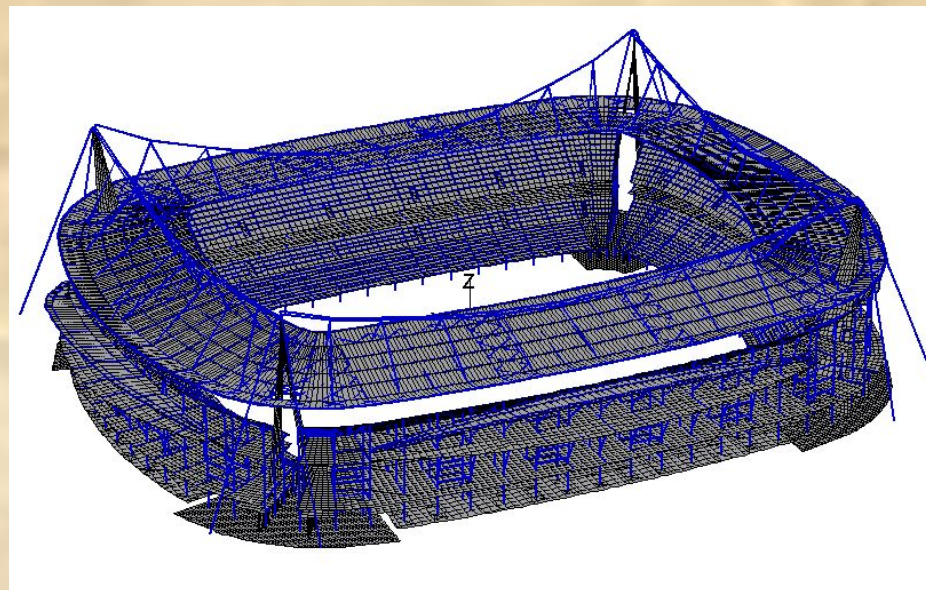


Большепролетные сооружения, стадионы

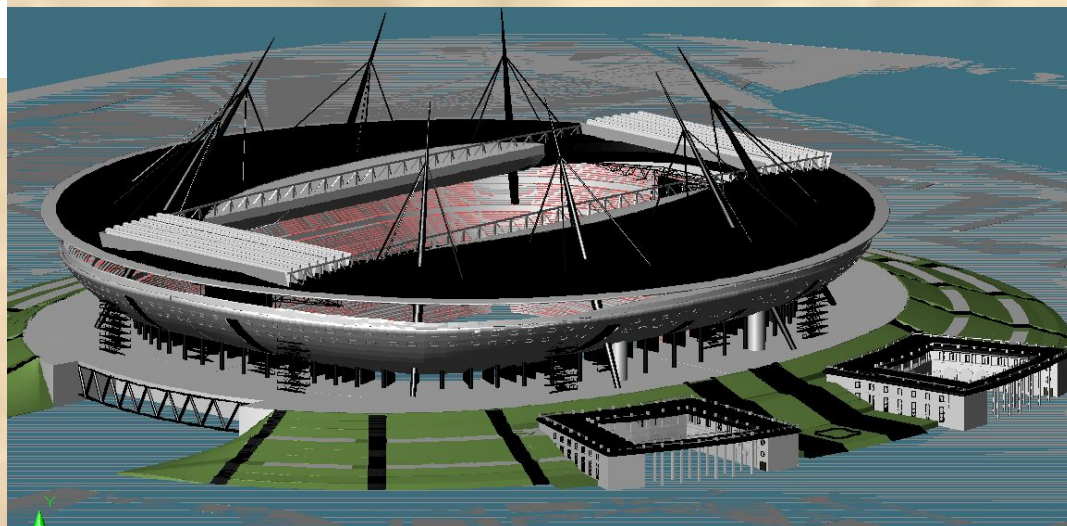
Ледовый дворец на Ходынском поле, Москва



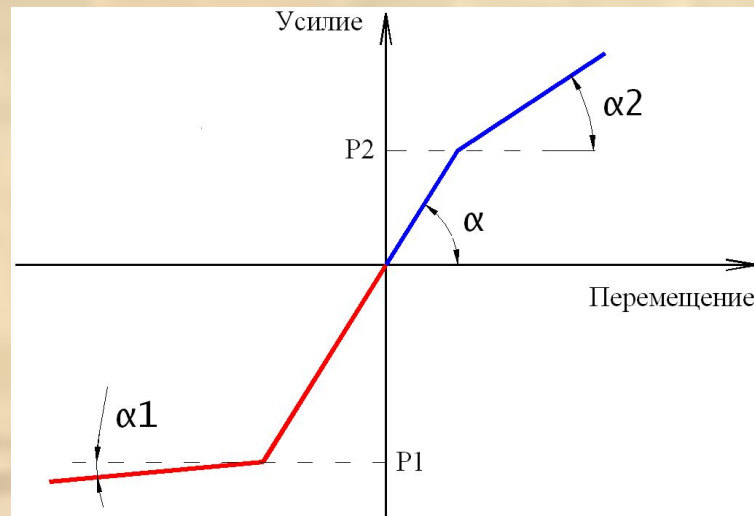
Стадион «Локомотив», Москва



Стадион «Зенит», С.-Петербург



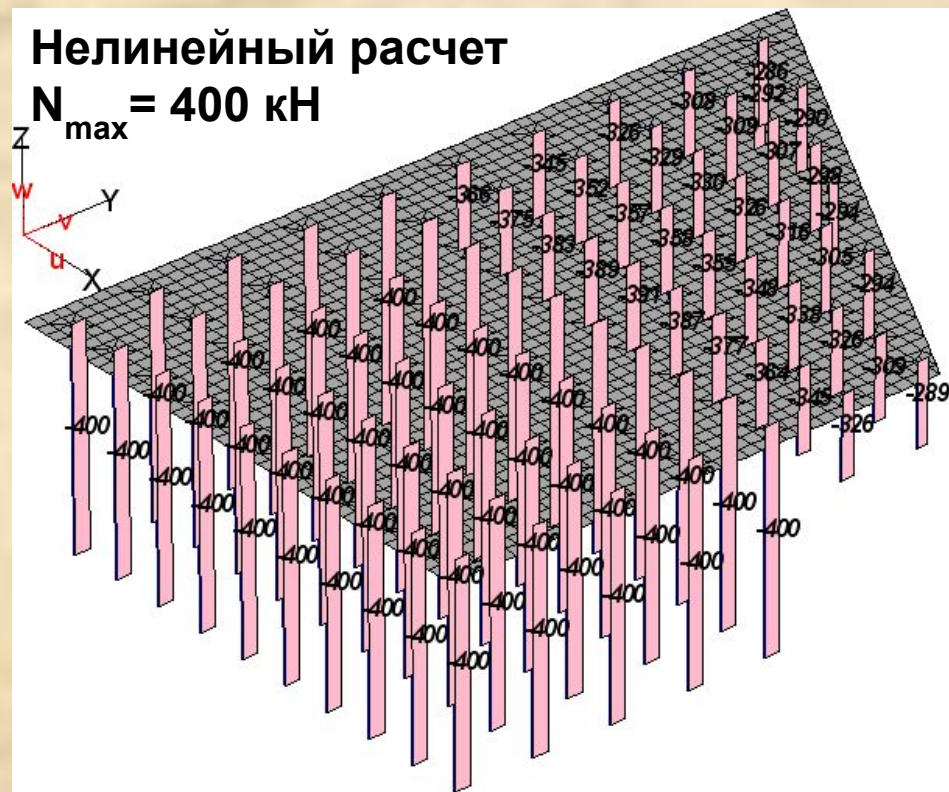
Нелинейные шарниры



Моделирование комбинированного свайно-плитного фундамента

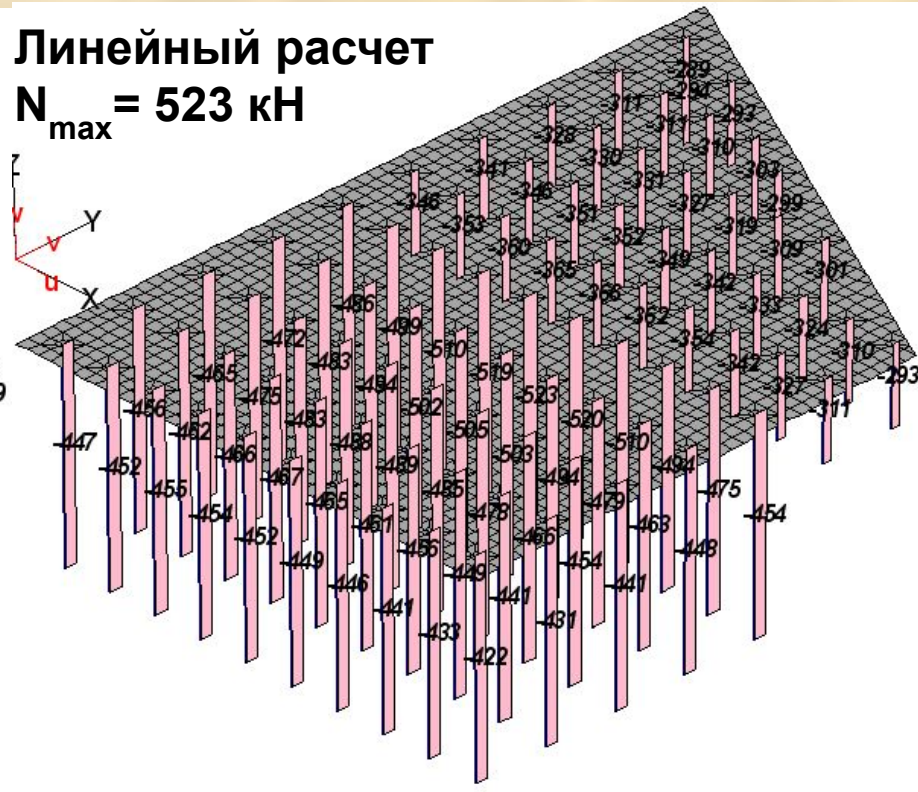
Нелинейный расчет

$N_{\max} = 400$ кН

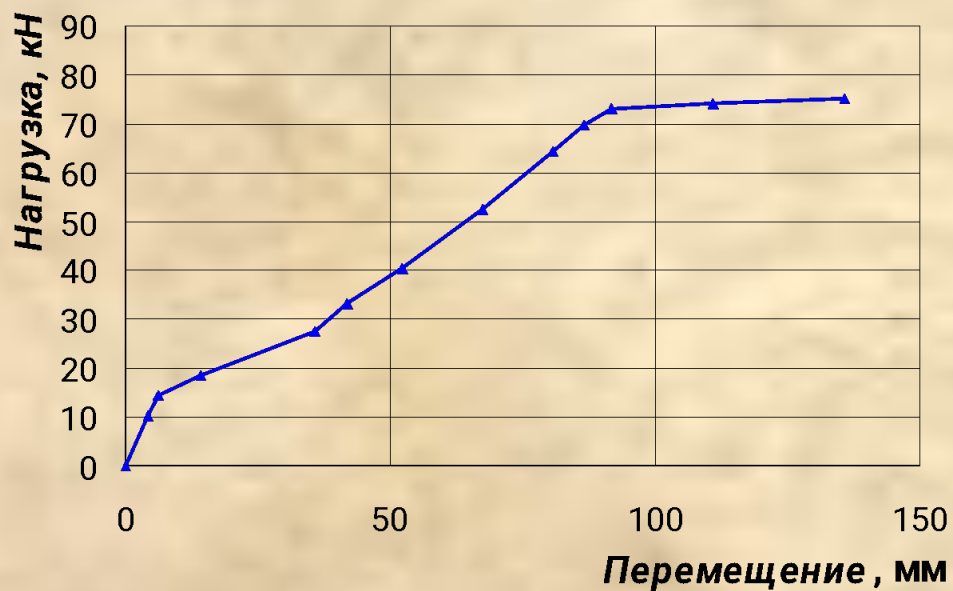
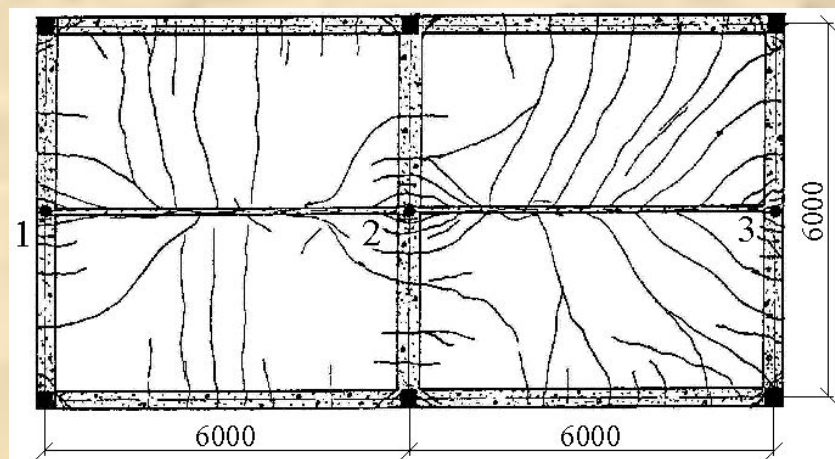
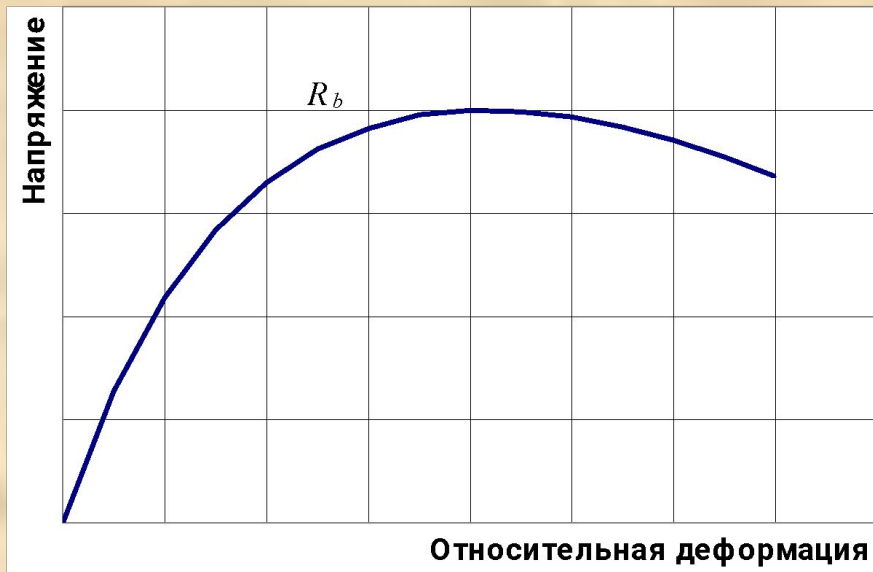


Линейный расчет

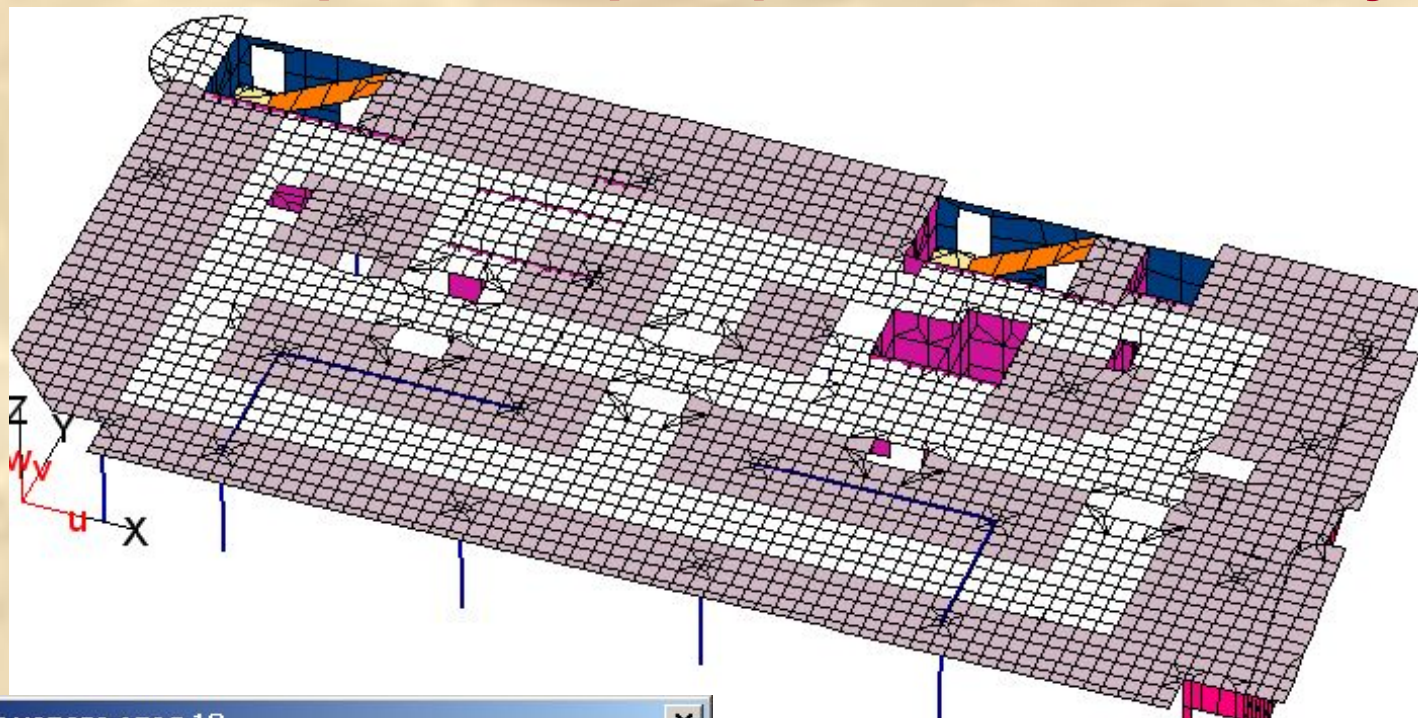
$N_{\max} = 523$ кН



Нелинейные материалы – бетон, сталь, железобетон



Нелинейный расчет при чрезвычайных ситуациях



Материал нового слоя 18

Бетон

Номер мат. 15

H	0.015	Rbt	1550
E	3e+007	Rb	18500
Mue	0.2	eps_bt	0.00015
Rho	2.4	eps_b	0.0035

Материалов 28 Ссылка 39396

Материал слоя 3

Арматурный слой

Номер мат. 17

H	1e-008	G	0
E	2e+008	Rho	7.85
As.x	0.000905	Alpha	0
As.y	0.000905	Rs	390000

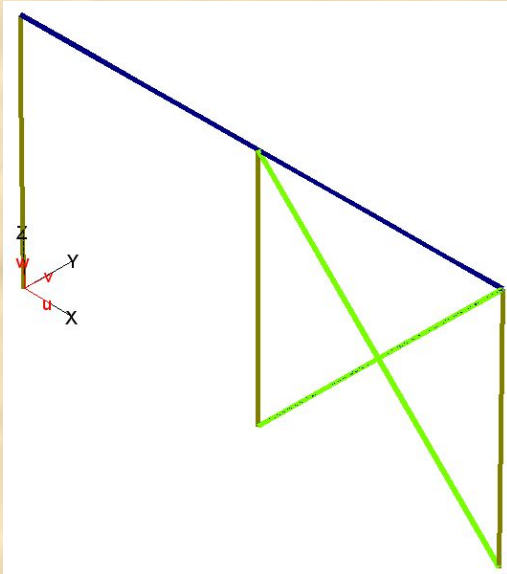
Материалов 3 Ссылка 4596

Упражнение №1 по моделированию нелинейных свойств конструкций

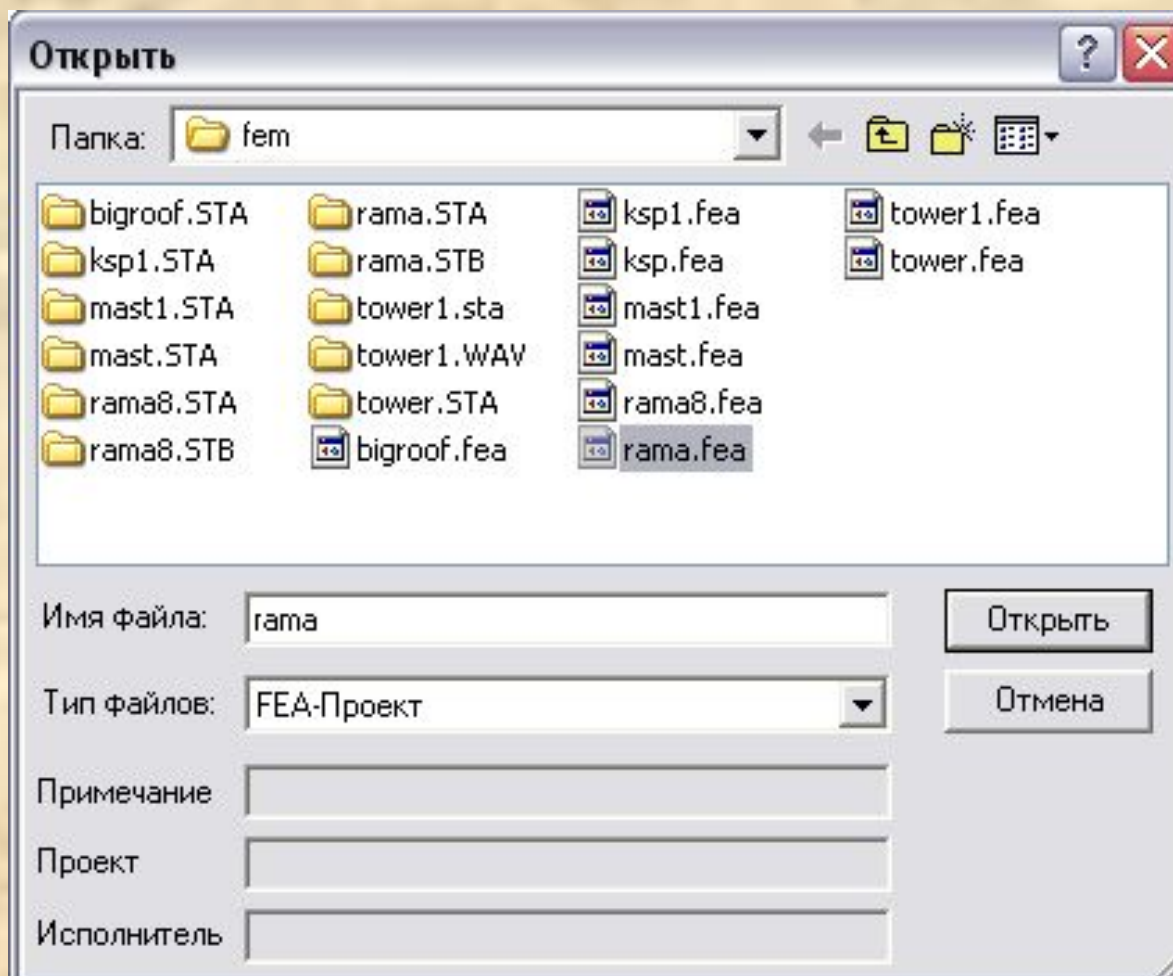
Имеется расчетная модель рамы с гибкими связями, не работающими на сжатие (rama.fea).

Требуется:

- 1) Произвести статический линейный расчет рамы;
- 2) Установить шарниры, в т.ч. односторонние, моделирующие работу связей только на растяжение;
- 3) Произвести статический нелинейный расчет рамы;
- 4) Сравнить результаты расчета (усилия в элементах рамы).



Шаг 1. Загружаем расчетную модель рамы со связями `rama.fea`.



Шаг 2. Производим статический линейный расчет рамы.

Параметры расчёта

Тип расчета

- Статический расчет
- Собственные колебания
 - Сейсмический режим
- Устойчивость
- Формирование матриц

Итерационный расчет

Учёт нелинейности ... Нет

Точность

Количество собственных форм

Диапазон искомых собств. значений

Значение от до

КЭ-модель

Элементы

- Гибридный 1
- Гибридный 2
- Перемещений
- Модификация матриц жесткости для балок-стенок

- Осреднение с весами
- Согласованные нагрузки
- Согласованные массы
- Изменение геометрии для эксцентриситетов

Выход результатов

- Графический интерфейс
- Реакции
- Усилия в оболочках
- Напряжения в объемных элементах

Многопоточный расчёт

Проект: Рама

Примечание: Рама с гибкими связями

Исполнитель: Юрий

OK Отменить Помощь

Настройки ?

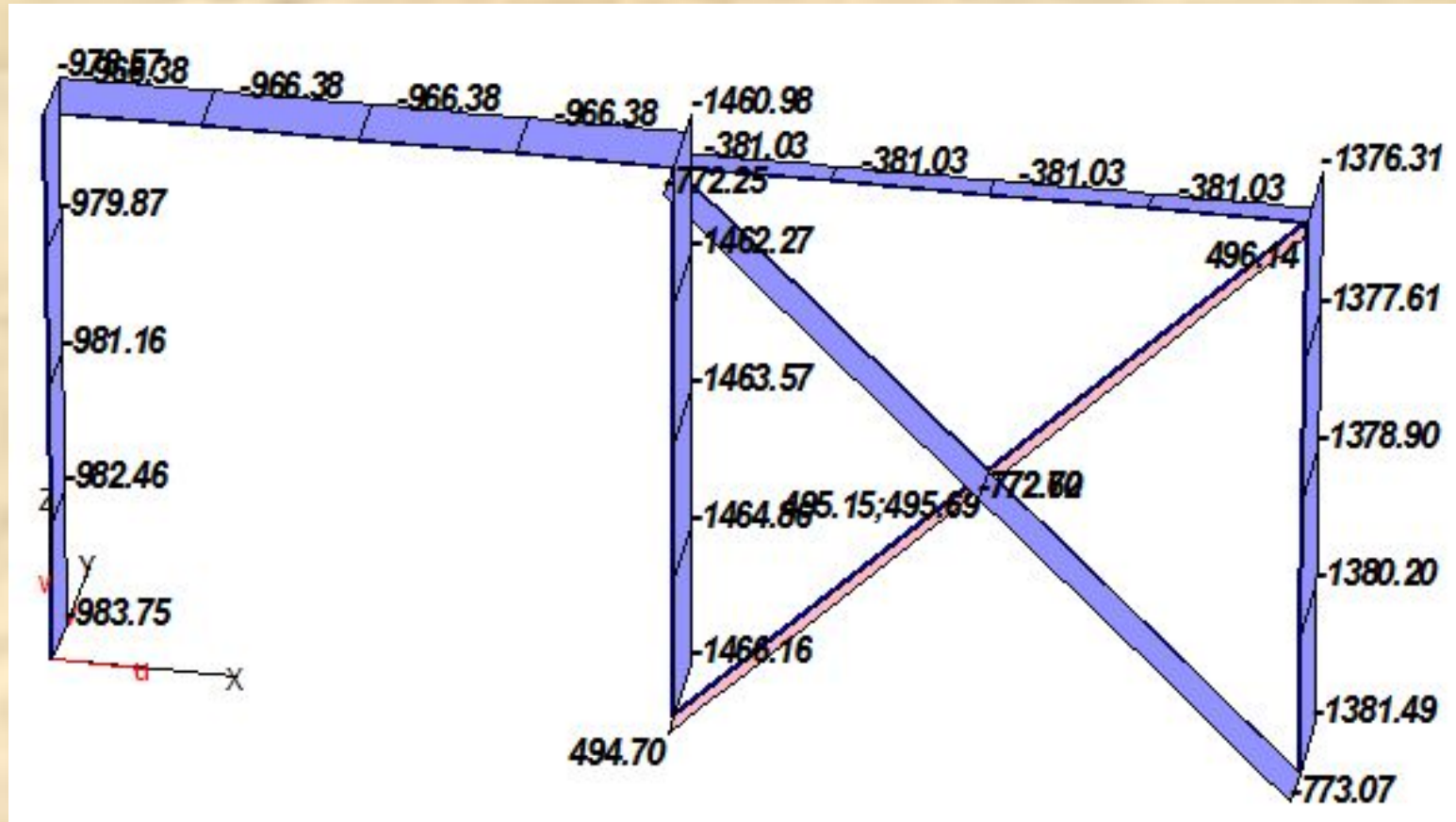
- Общие
- Тип решателя
- Нормы РФ
- Панели инструментов

Выбор типа решателя

- Разреженный
- Фронтальный

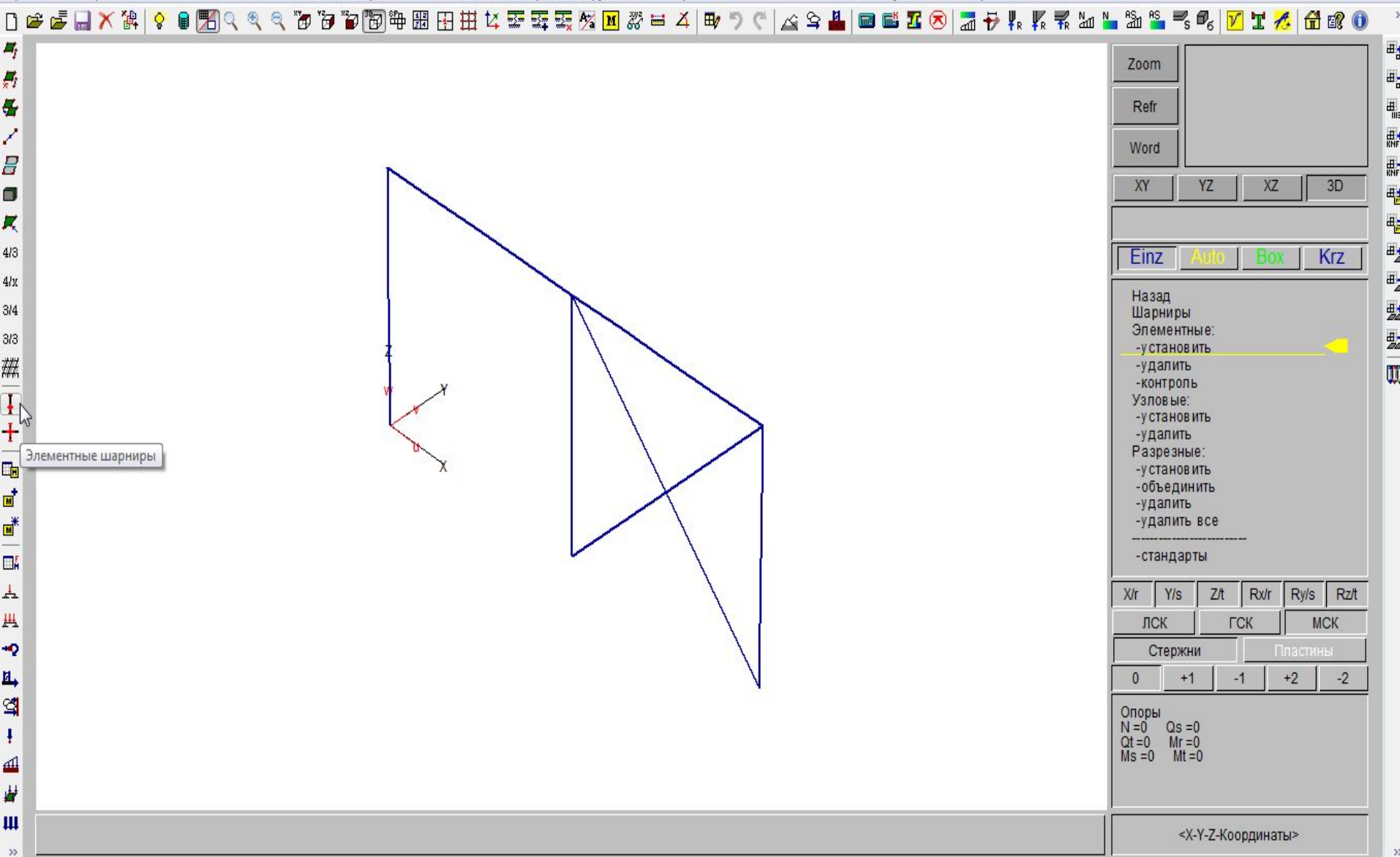
OK Отменить

Шаг 3. Оцениваем усилия в элементах рамы (связи работают и на сжатие, и на растяжение).



Шаг 4. Устанавливаем шарниры на элементы рамы.

Проекты Растр Вставка Полный Виды uvw-Задать Фрагмент Позиции Геометрия Нагрузки Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?



The screenshot displays a structural analysis software interface. The main workspace shows a 3D wireframe model of a frame structure. A local coordinate system (X, Y, Z) is visible at the bottom left of the model. The software's menu bar includes options like 'Проекты', 'Растр', 'Вставка', 'Полный', 'Виды', 'uvw-Задать', 'Фрагмент', 'Позиции', 'Геометрия', 'Нагрузки', 'Редактировать', 'Расчет', 'Комбинации', 'Результаты', and 'Настройки'. A toolbar with various icons is located below the menu bar. On the right side, a properties panel is open for 'Elemental Hinges' (Элементные шарниры). The panel contains several sections: 'Zoom', 'Refr', 'Word', and view orientation buttons (XY, YZ, XZ, 3D); a section with 'Einz', 'Auto', 'Box', and 'Krz' buttons; a list of actions for 'Назад', 'Шарниры', 'Элементные', 'Узловые', and 'Разрезные'; a section with coordinate system buttons (X/r, Y/s, Z/t, Rx/r, Ry/s, Rz/t); a section with 'ЛСК', 'ГСК', and 'МСК' buttons; a section with 'Стержни' and 'Пластины' buttons; a section with numerical values (0, +1, -1, +2, -2); and a section with 'Опоры' and their respective values (N=0, Qs=0, Qt=0, Mr=0, Ms=0, Mt=0). At the bottom of the panel, it indicates '<X-Y-Z-Координаты>'. A tooltip 'Элементные шарниры' is visible over the 'Elemental Hinges' icon in the left sidebar.

Элементные шарниры

Zoom

Refr

Word

XY YZ XZ 3D

Einz Auto Box Krz

Назад
Шарниры
Элементные:
-установить
-удалить
-контроль
Узловые:
-установить
-удалить
Разрезные:
-установить
-объединить
-удалить
-удалить все

-стандарты

X/r Y/s Z/t Rx/r Ry/s Rz/t

ЛСК ГСК МСК

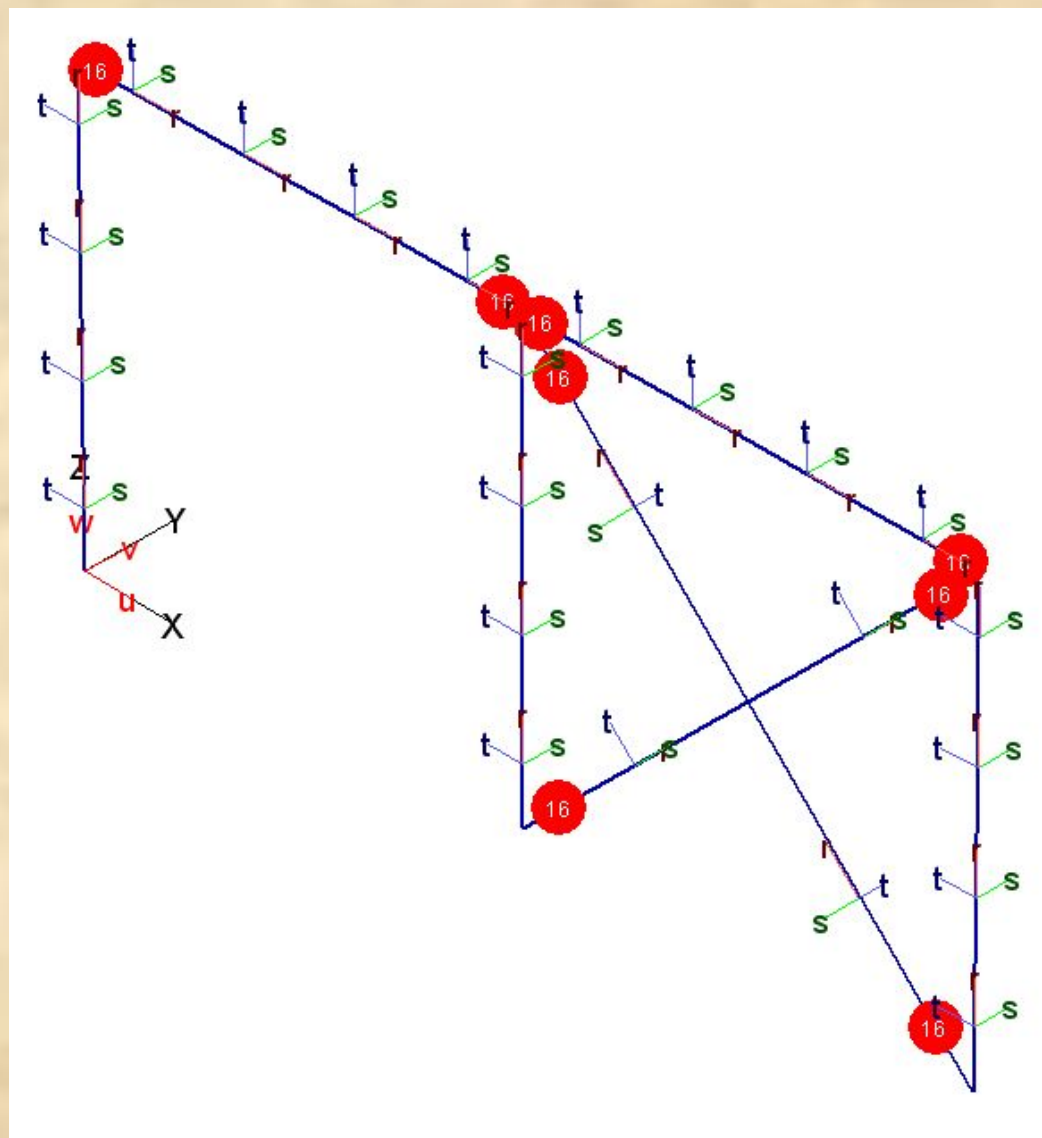
Стержни Пластины

0 +1 -1 +2 -2

Опоры
N=0 Qs=0
Qt=0 Mr=0
Ms=0 Mt=0

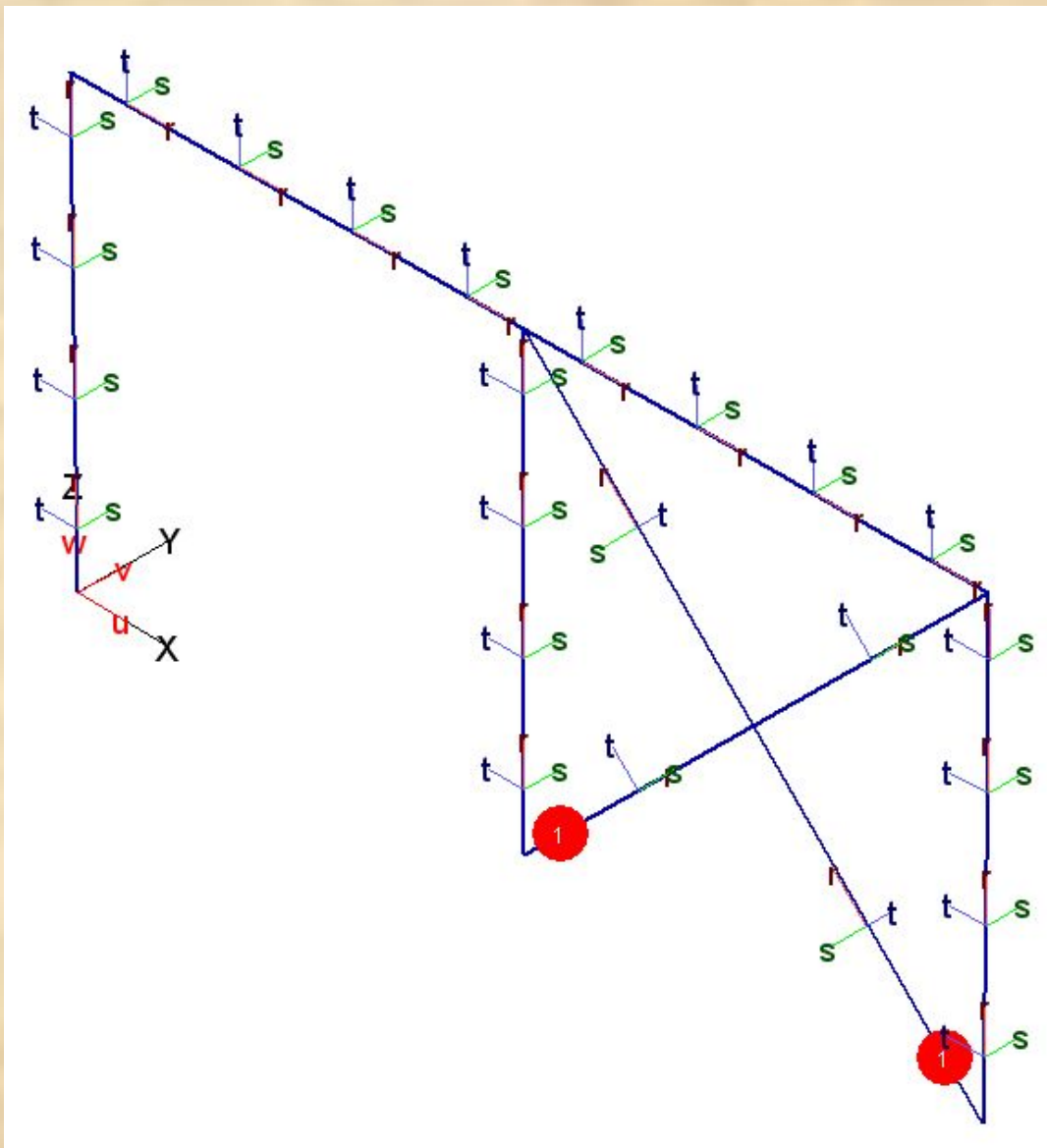
<X-Y-Z-Координаты>

Задаем двухсторонние шарниры в местной системе координат от поворота вокруг оси s .



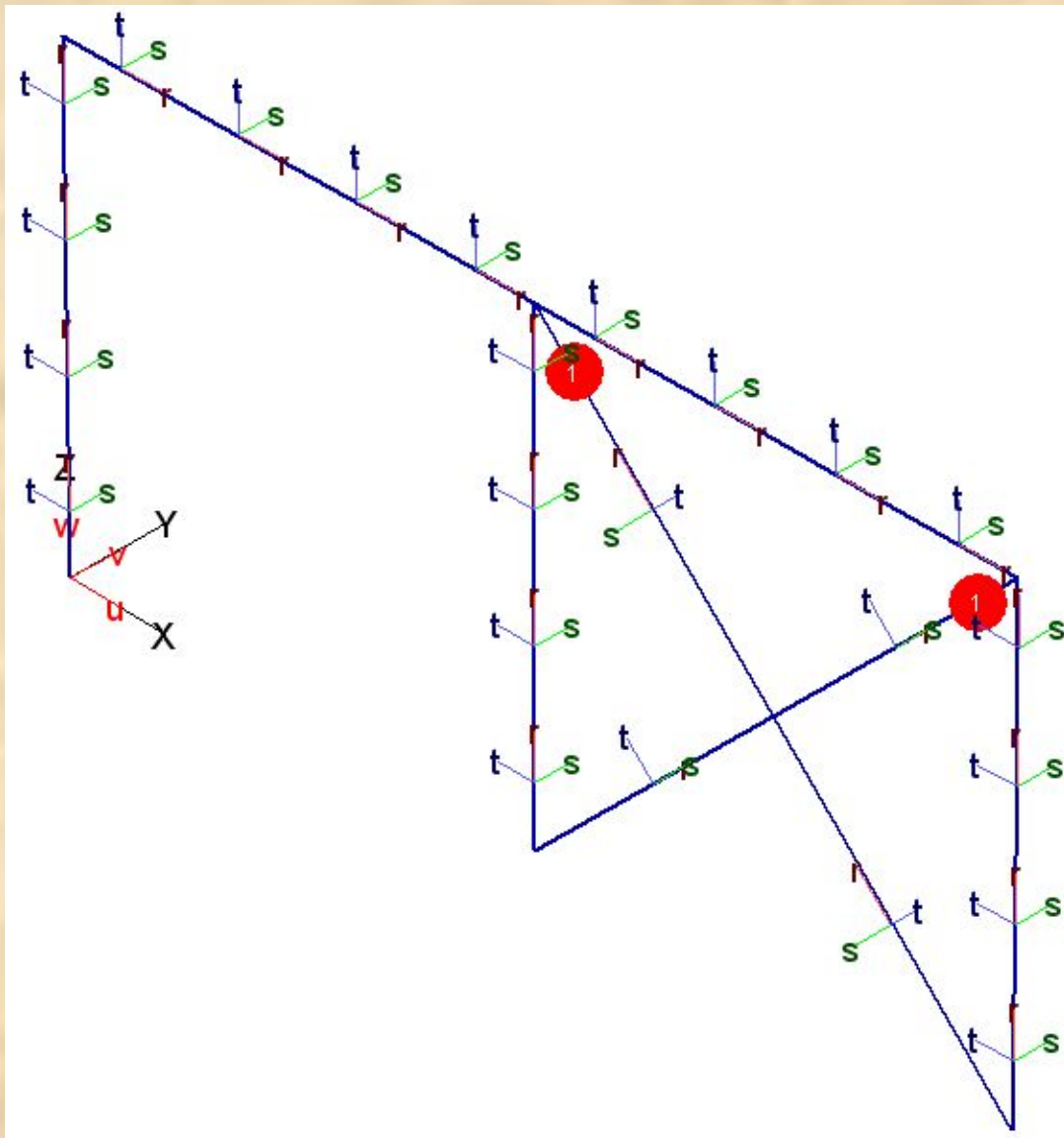
X/r	Y/s	Z/t	Rx/r	Ry/s	Rz/t
ЛСК		ГСК		МСК	
Стержни			Пластины		
0	+1	-1	+2	-2	

Задаем односторонние шарниры в местной системе координат от перемещения вдоль оси r (+1).



X/r	Y/s	Z/t	Rx/r	Ry/s	Rz/t
ЛСК		ГСК		МСК	
Стержни			Пластины		
0	+1	-1	+2	-2	

Задаем односторонние шарниры в местной системе координат от перемещения вдоль оси r (-1).



X/r	Y/s	Z/t	Rx/r	Ry/s	Rz/t
ЛСК		ГСК		МСК	
Стержни			Пластины		
0	+1	-1	+2	-2	

Шаг 5. Производим статический расчет рамы со связями (конструктивная нелинейность).

The image shows a software interface for structural analysis, specifically for static calculation of a frame with connections. The main window is titled "Параметры расчёта" (Calculation Parameters). It contains several sections:

- Тип расчета** (Calculation Type):
 - Статический расчет (Static calculation)
 - Собственные колебания (Eigen vibrations)
 - Сейсмический режим (Seismic mode) [Параметры...]
 - Устойчивость (Stability)
 - Формирование матриц (Matrix formation)
- Итерационный расчет** (Iterative calculation):
 - Учёт нелинейности... (Account for nonlinearity...) [Да]
 - Точность (Accuracy) []
 - Количество собственных форм (Number of eigenforms) []
 - Диапазон искомых собств. значений (Range of sought eigenvalues) [] до []
 - Значение от [] до []
- КЭ-модель** (FE model):
 - Элементы** (Elements):
 - Гибридный 1 (Hybrid 1)
 - Гибридный 2 (Hybrid 2)
 - Перемещений (Displacements)
 - Модификация матриц жесткости для балок-стенок (Modification of stiffness matrices for beams-walls)
 - Осреднение с весами (Weighted averaging)
 - Согласованные нагрузки (Compatible loads)
 - Согласованные массы (Compatible masses)
 - Изменение геометрии для эксцентриситетов (Geometry change for eccentricities)

- Вывод результатов** (Output results):
- Графический интерфейс (Graphic interface)
- Реакции (Reactions)
- Усилия в оболочках (Efforts in shells)
- Напряжения в объемных элементах (Stresses in volume elements)
- Многопоточный расчёт (Multithreaded calculation)
- Проект** (Project):
- Проект: Рама (Project: Frame)
- Примечание: Рама с гибкими связями (Note: Frame with flexible connections)
- Исполнитель: Юрий (Executor: Yuriy)

Buttons: ОК, Отменить, Помощь.

Параметры нелинейного расчёта (Nonlinear calculation parameters):

- Односторонние элементы типа "трос" (One-sided elements of type "cable")
- Односторонние опоры (One-sided supports)
- Односторонние и нелинейные шарниры (One-sided and nonlinear hinges)
- Геометрическая нелинейность (Geometric nonlinearity)
- Учёт конечных вращений для пластин (Account for finite rotations for plates):
 - всегда (always)
 - автоматически (automatically)
- Метод решения (Solution method):
 - итерационный Ньютона-Рафсона (iterative Newton-Raphson)
 - шагово- итерационный (stepwise iterative)
 - поиск решений в закритической области (search for solutions in the post-critical region)
- Точность (Accuracy): 1e-008
- Количество итераций (Number of iterations): 1000
- Начальный шаг по нагрузке (Initial step by load) []

Buttons: ОК, Отменить.

Выбор типа решателя (Solver type selection):

- Разреженный (Sparse)
- Фронтальный (Frontal)

Buttons: ОК, Отменить.

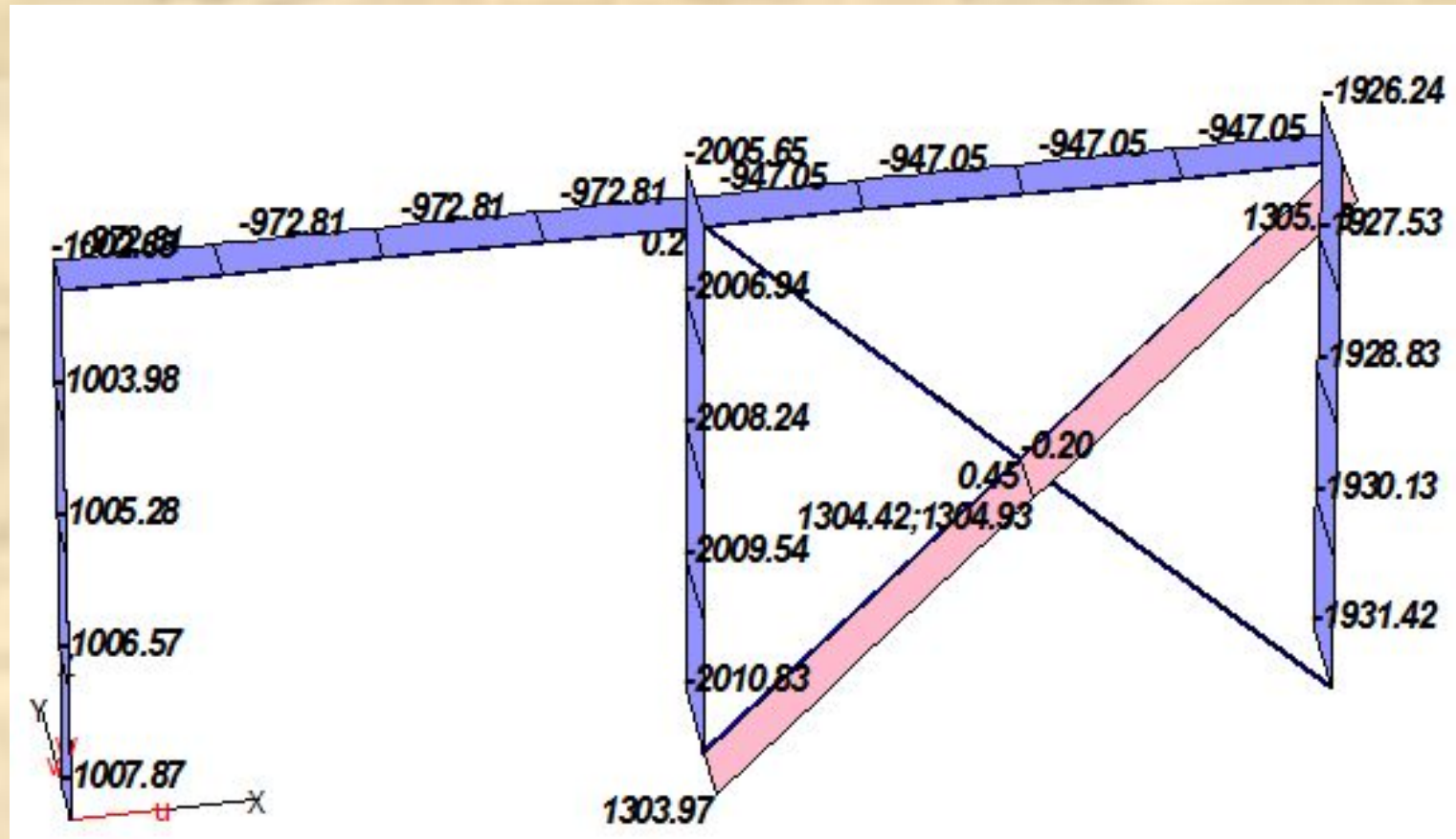
Задание и корректировка комбинаций (Assignment and correction of combinations):

Комбинации	Массы	Доп. на устойчивость
	НГ-1	НГ-2
К-1	1	1

Настройки ? (Settings ?):

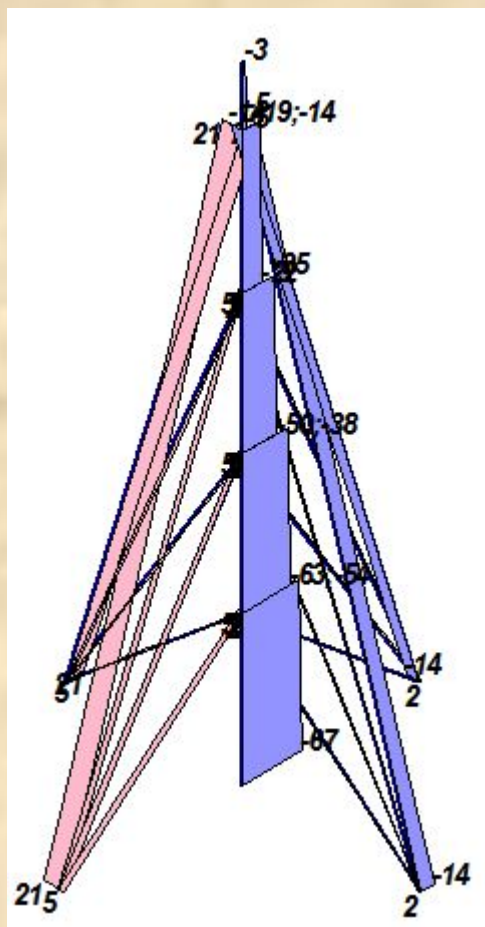
- Общие (General)
- Тип решателя (Solver type)
- Нормы РФ (Russian standards)
- Панели инструментов (Toolbars)

Шаг 6. Оцениваем усилия в элементах рамы (связи работают только на растяжение).

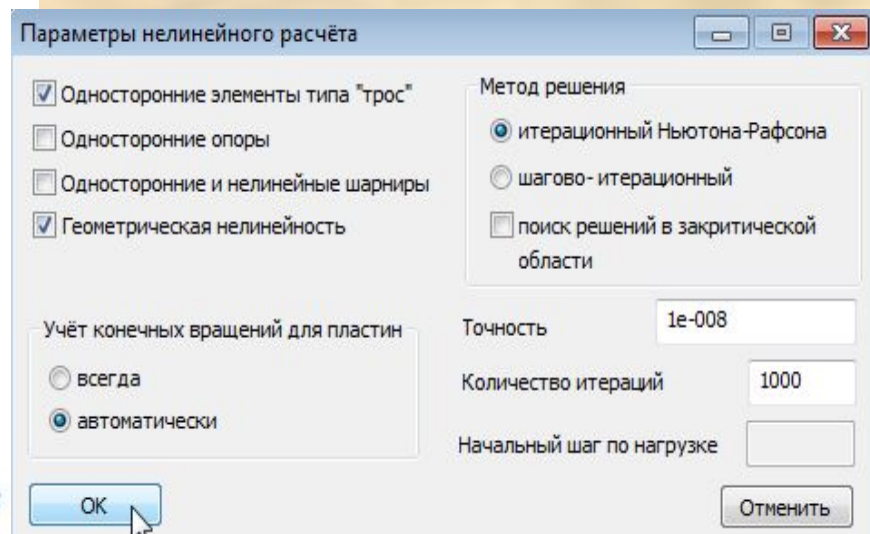
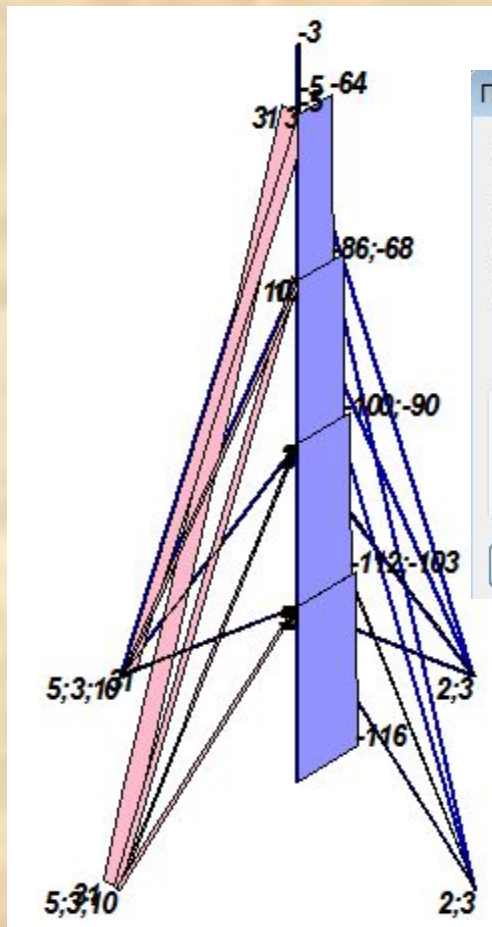


Расчет мачты на оттяжках

Линейный расчет



Нелинейный расчет

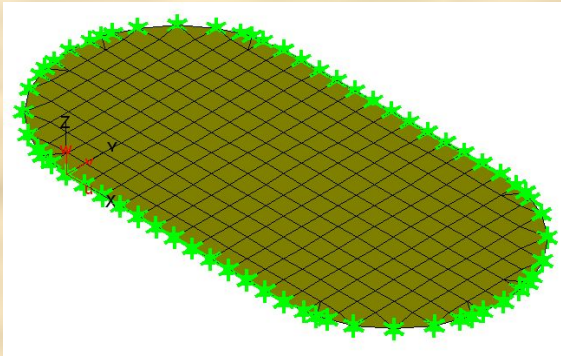


Оттяжки работают как
на растяжение, так и
на сжатие, что
неверно

Оттяжки работают
только на растяжение

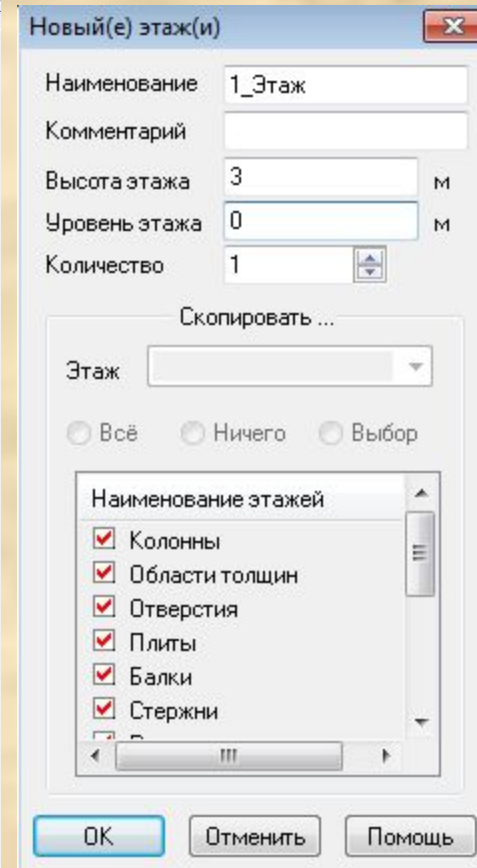
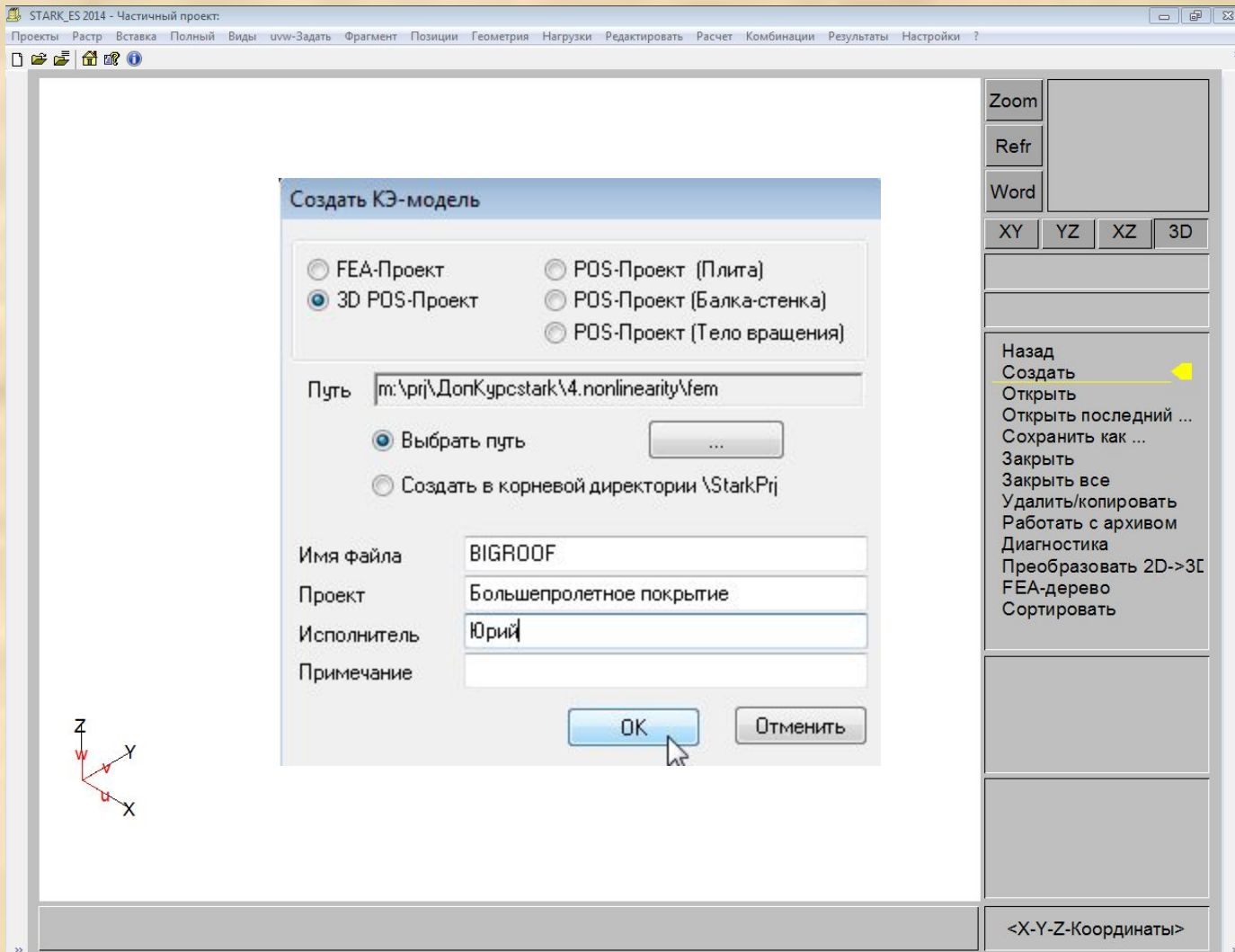
Упражнение №2 по моделированию нелинейных свойств конструкций

Требуется:

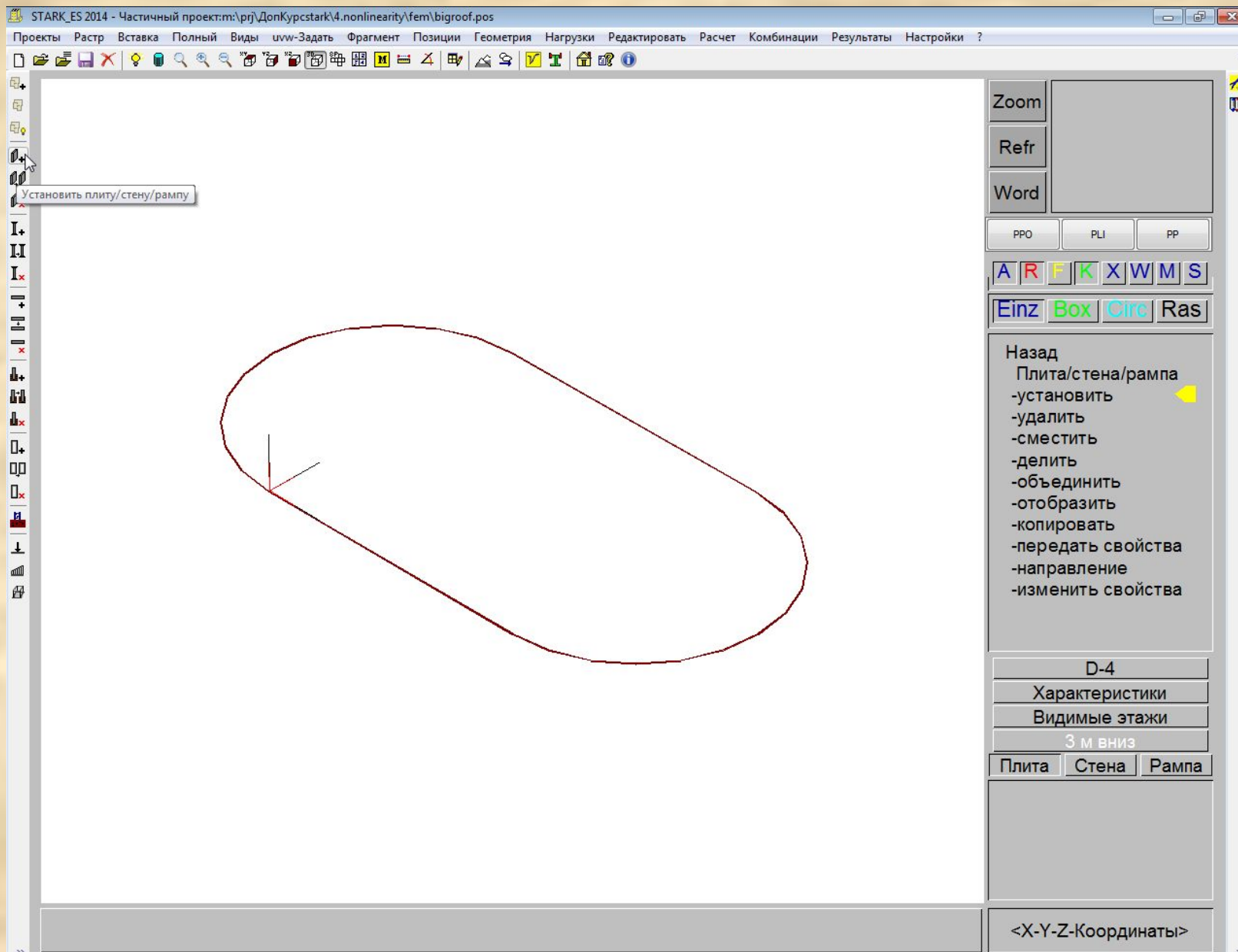


- 1) Построить расчетную модель большепролетного покрытия;
- 2) Произвести статический линейный расчет покрытия;
- 3) Произвести статический нелинейный расчет покрытия;
- 4) Сравнить результаты линейного и нелинейного расчета (перемещения и пр.).

Шаг 1. Создаем новый позиционный проект.



Шаг 2. Описываем геометрию покрытия через установку и объединение плит (24x12 м).



Шаг 3. Производим генерацию конечно-элементной сетки через полный проект.

STARK_ES 2014 - Полный проект:m:\prj\ДонКупсstar\4.nonlinearity\fem\leer

Проекты Растр Вставка Вставки Исключить Частичный Виды uvw-Задать Фрагмент Редактировать Слияние ?

LEER

bigroof.pos

Генерация сетки

- Суммирование номеров нагружений
- Генерация опор для стен/колонн
- Генерация упругого основания
- Генерация линейных опор
- При генерации балок учитывать наибольшую (наименьшую) толщину примыкающей плиты
- Генерация эксцентриситетов для стен

Способ учёта работы колонны и плиты

- Совместную работу не учитывать
- Кинематическая гипотеза
- Статическая гипотеза

Максимальный угол (в градусах)

Конечного элемента

Конечного элемента у колонны

Если максимальный угол < 90 градусов ,то генерируется сетка из треугольников

След колонн

- Создавать
- Не создавать
- Как в свойствах колонн

Формирование плоскостей осреднения (KNFL)

- По позициям
- По жесткостям(по номерам материалов)
- След колонн/свай в отдельную KNFL

Назад
Отметить все ЧП
Отметить
Снять отметку
Параметры КЭ-сетки
Показать шаблон
Генерация КЭ-сетки
Генерация из 4-узл.КЭ

OK Отменить Помощь

Шаг 4. Редактируем материал и толщину оболочки.

STARK_ES 2014 - Частичный проект:m:\prj\ДонКучрстark\4.nonlinearity\фem\bigroof.fea (FEA-проект)

Проекты Растр Вставка Полный Виды uvw-Задать Фрагмент Позиции Геометрия Нагрузки Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

Zoom Refr Word XY YZ XZ 3D

Имена материалов

Бетон	Арматурный слой	Слоистый
Изотропный		Ортотропный(пластины)
Номер мат.	1	Новый
H	0.005	Снижение
E	2.06e+008	Стандарт
Mue	0.3	Материалов
Rho	8.24	Ссылоч 272

Назад
Материалы
-установить
-удалить
-редактировать
-сечения ЖБК
-произвольн. сечения
-сортамент профилей
-преобразовать вес
-стандарты

<X-Y-Z-Координаты>

OK Отмена

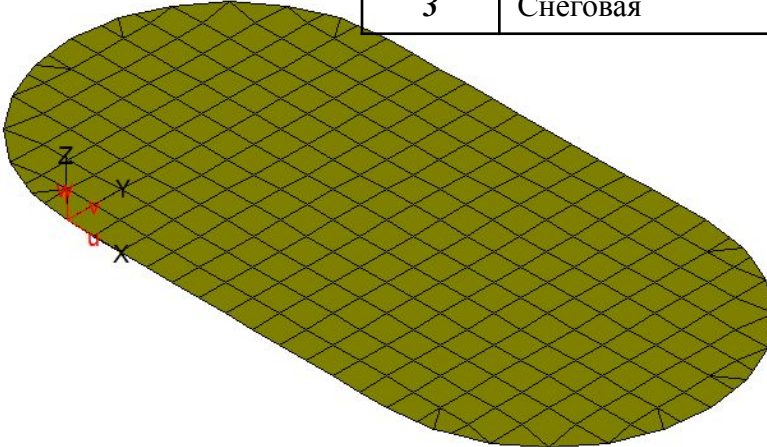
Шаг 5. Загружаем покрытие равномерно-распределенной нагрузкой (нагружения 2 и 3).

STARK_ES 2014 - Частичный проект:m:\prj\ДопКурстарк\4.nonlinearity\fem\bigroof.fea (FEA-проект)

Проекты Растр Вставка Полный Виды uvw-Задать Фрагмент Позиции Геометрия Нагрузки Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

Нагружение = 3
Qz/t = -1.800

№ нагрузж	Вид нагрузки	Расчетные значения нагрузок
1	Собственный вес конструкций	82.4 кН/м ³
2	Вес кровли	0.5 кН/м ²
3	Снеговая	1.8 кН/м ²



Назад
Равном. распредел.:
-установить
-удалить
-показать

Qx/r Qy/s Qz/t
МСК ГСК Проекц.
◀ Нагружение 3 ▶

<X-Y-Z-Координаты>

Шаг 6. Устанавливаем опоры по контуру оболочки (X, Y, Z).

STARK_ES 2014 - Частичный проект:m:\prj\ДонКучcstark\4.nonlinearity\фem\bigroof.fea (FEA-проект)

Проекты Растр Вставка Полный Виды uvw-Задать Фрагмент Позиции Геометрия Нагрузки Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

Установить узловые опоры

Zoom Refr Word XY YZ XZ 3D

Einz Auto Box Krz

Назад
Узловые опоры:
-установить
-удалить

X	Y	Z	Rx	Ry	Rz
ЛСК			ГСК		
Раст.		Сжатие		Сж.+Р.	

Опоры
X=3e+007 Y=3e+007
Z=3e+007

<X-Y-Z-Координаты>

Выберите узлы для установки опорных закреплений

Шаг 7. Производим статический линейный расчет покрытия.

Параметры расчёта

Тип расчета

- Статический расчет
- Собственные колебания
 - Сейсмический режим Параметры ...
- Устойчивость
- Формирование матриц

Итерационный расчет

Нет

Точность

Количество собственных форм

Диапазон искомых собств. значений

Значение от до

КЭ-модель

Элементы

- Гибридный 1
- Гибридный 2
- Перемещений
- Модификация матриц жесткости для балок-стенок


- Осреднение с весами
- Согласованные нагрузки
- Согласованные массы
- Изменение геометрии для эксцентриситетов

Проект

Примечание

Исполнитель

Настройки ?

- Общие
- Тип решателя 
- Нормы РФ
- Панели инструментов

Выбор типа решателя

- Разреженный
- Фронтальный

Шаг 8. Оцениваем перемещение и усилия в элементах оболочки.

STARK_ES 2014 - Частичный проект:m:\proj\ДонКурцstark\4.nonlinearity\fem\bigroof.fea (FEA-проект)

Проекты Растр Вставка Полный Виды uvw-Задать Фрагмент Позиции Геометрия Нагрузки Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

Перемещения узлов

Refr

Word

XY YZ XZ 3D

Einz Auto Box Krz

Назад
Таблицы
Графика
Тип результатов

Козф. Сист. Frame Ver
Iso Fl S W
Ux Uy Uz Rx Ry Rz
Rtot Utot
◀ Комбинация 1 ▶

Max перемещение = 250260 мм в узле 147

<X-Y-Z-Координаты>

Шаг 9. Производим статический нелинейный расчет гибкого большепролетного покрытия (геометрическая нелинейность).

Панель параметров расчета, состоящая из двух диалоговых окон: "Параметры расчёта" и "Параметры нелинейного расчёта".

Панель "Параметры расчёта":

- Тип расчета:** Статический расчет (выбран), Собственные колебания, Устойчивость, Формирование матриц.
- Итерационный расчет:** Учёт нелинейности ... Да. Точность, Количество собственных форм, Диапазон искомых собств. значений, Значение от до.
- КЭ-модель:** Элементы: Гибридный 1 (выбран), Гибридный 2, Перемещений, Модификация матриц жесткости для балок-стенок. Среднее с весами, Согласованные нагрузки, Согласованные массы, Изменение геометрии для эксцентриситетов.
- Диагностика:** Проверка точности решения, Проверка ортогональности, Расширенная диагностика модели.
- Вывод результатов:** Графический интерфейс, Реакции, Усилия в оболочках, Напряжения в объемных элементах, Многопоточный расчёт.
- Проект:** Большепролетное покрытие. Исполнитель: Юрий.

Панель "Параметры нелинейного расчёта":

- Метод решения:** шагово-итерационный (выбран), итерационный Ньютона-Рафсона, поиск решений в закритической области.
- Учёт конечных вращений для пластин:** автоматически (выбран), всегда.
- Точность:** 1e-008. Количество итераций: 2000. Начальный шаг по нагрузке: 0.0005.

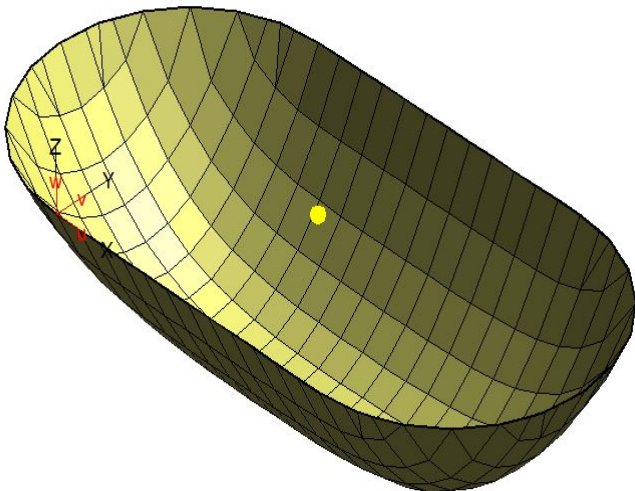
В центре панели отображается сетка гибкого большепролетного покрытия. В нижнем правом углу панели "Параметры нелинейного расчёта" находится кнопка "OK".

Задание и корректировка комбинаций

Комбинации	Массы			Доп. на устойчивость		
	НГ-1	НГ-2	НГ-3			
К-1	1	1	1			

Шаг 10. Оцениваем перемещения и усилия в элементах оболочки.

Проекты Растр Вставка Полный Виды uvw-Задать Фрагмент Позиции Геометрия Нагрузки Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

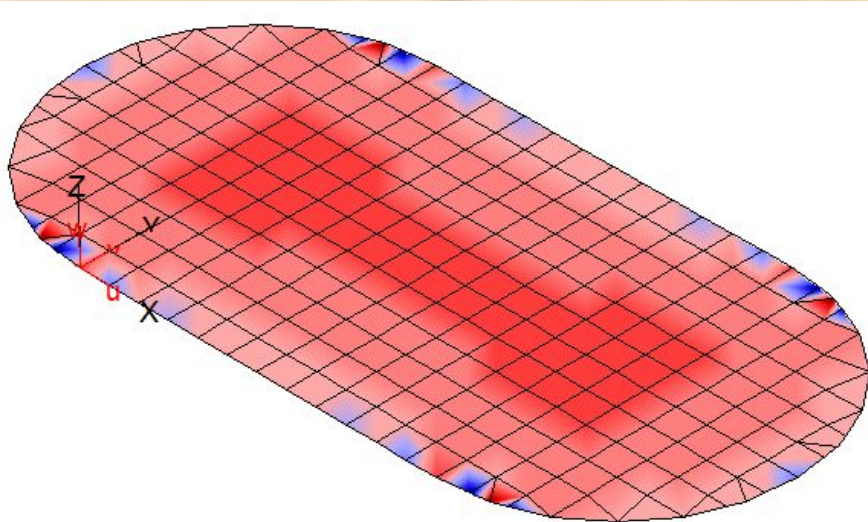


Zoom
Refr
Word
XY YZ XZ 3D
EinZ Auto Box Krz
Назад
Таблицы
Графика
Тип результатов
Козф. Сист. Frame Ver
Iso FI S W
Ux Uy Uz Rx Ry Rz
Rtot Utot
Комбинация 1
Max перемещение = 131.029 мм в узле 147
<X-Y-Z-Координаты>

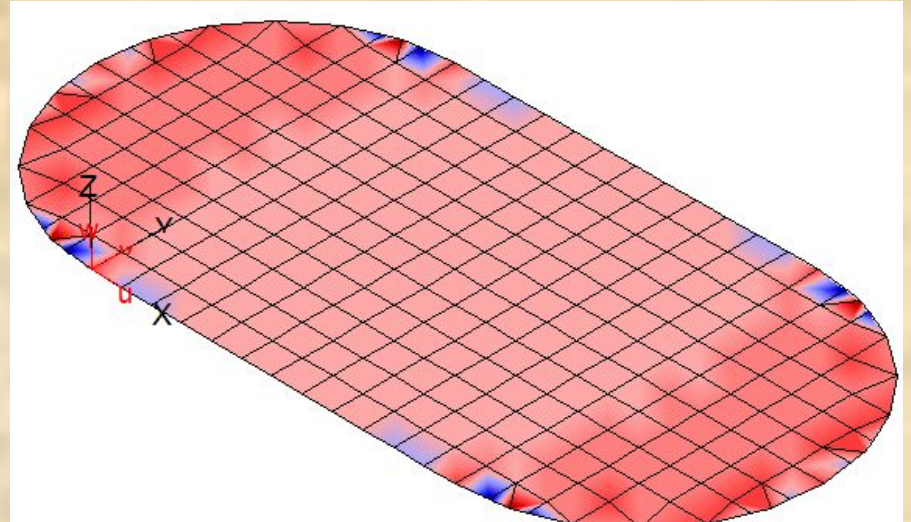
Шаг 11. Сопоставляем результаты линейного и нелинейного расчета.

Линейный расчет

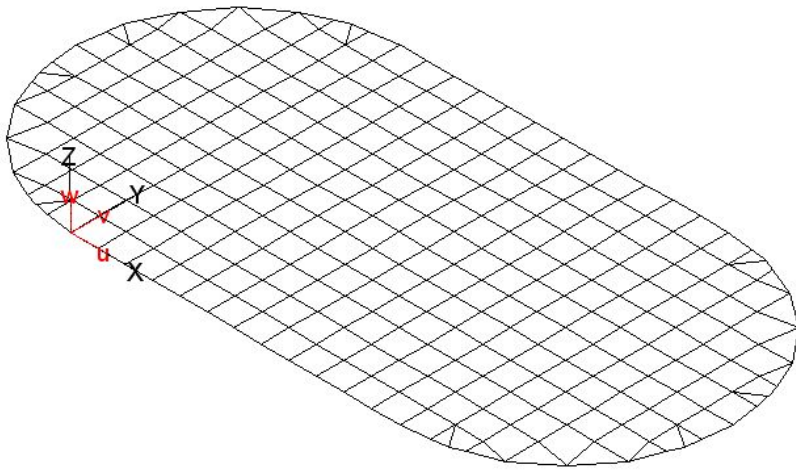
Нелинейный расчет



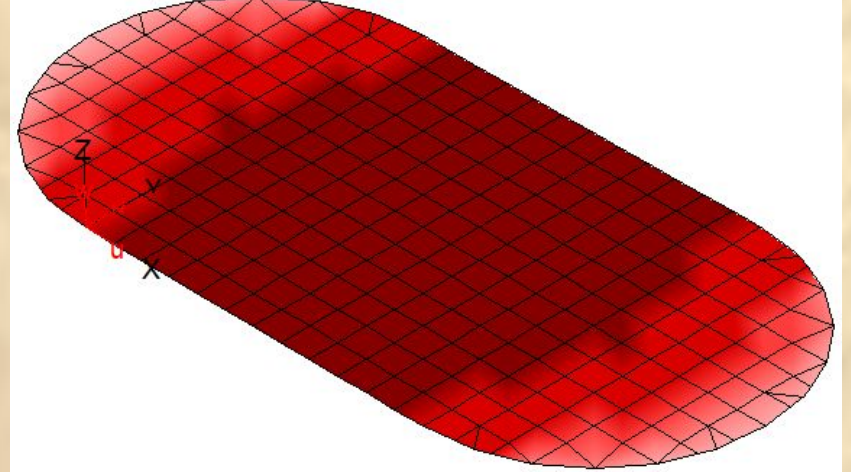
Min $M_r = -11.1646$ кНм/м, Max $M_r = 43.17$ кНм/м



Min $M_r = -0.0195634$ кНм/м, Max $M_r = 0.061279$ кНм/м



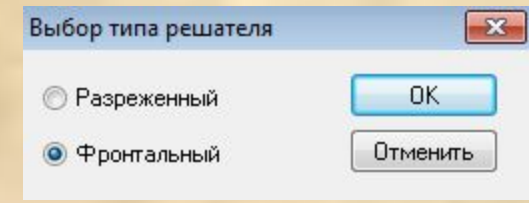
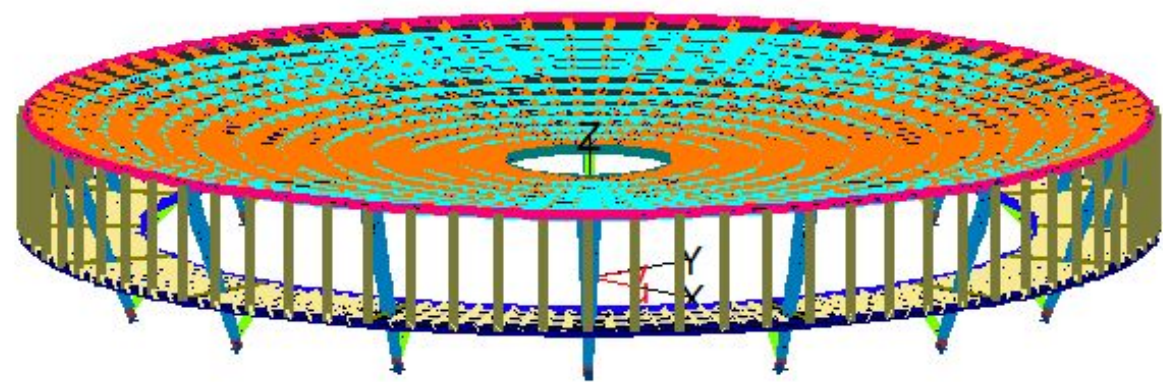
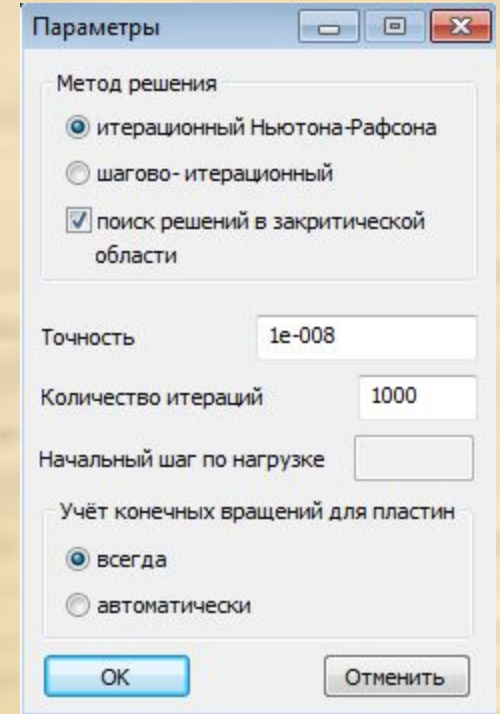
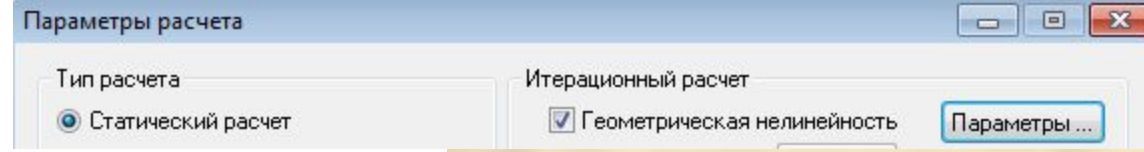
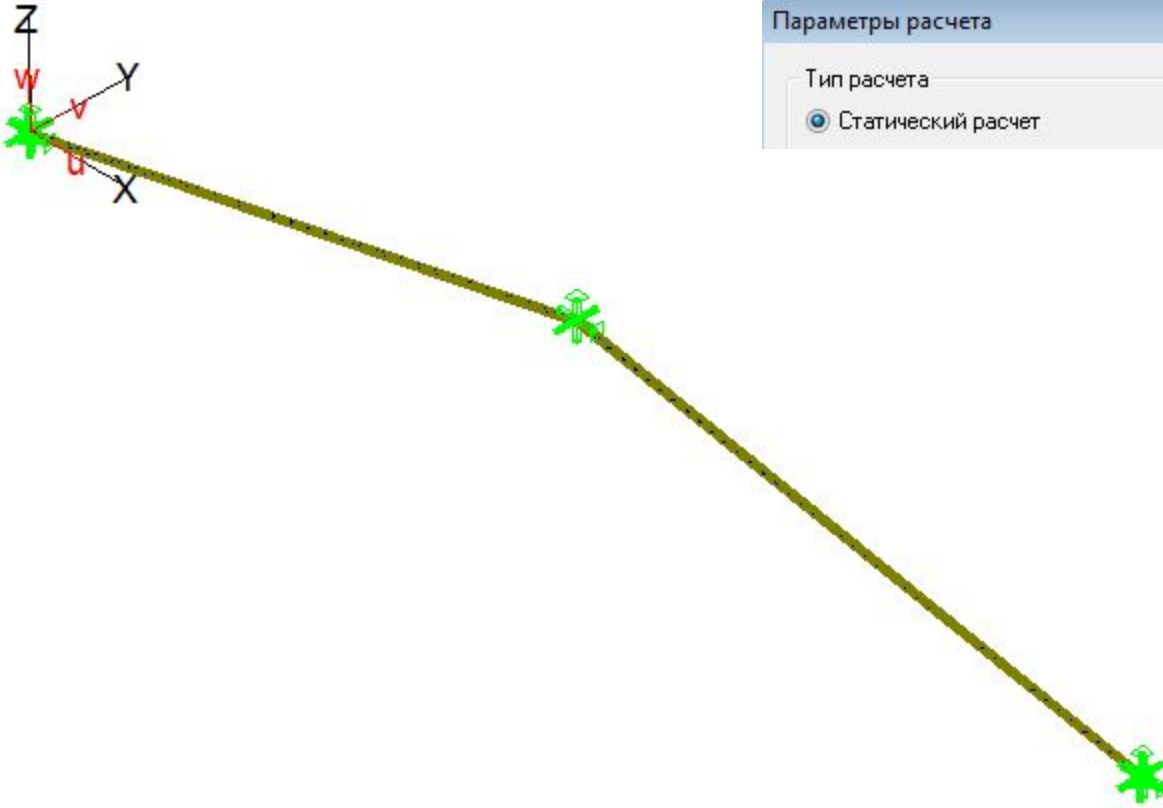
Min $S_r = 0$ кН/м², Max $S_r = 0$ кН/м²



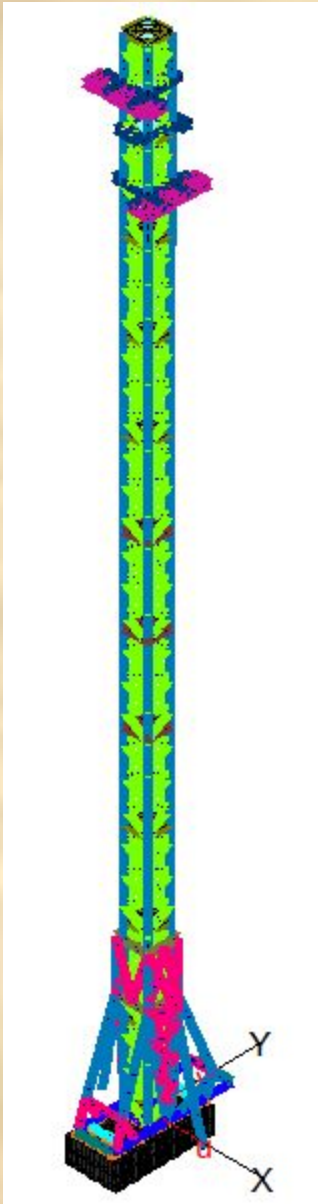
Min $S_r = 14352.6$ кН/м², Max $S_r = 48027.8$ кН/м²

Параметр	Значение		
	Линейный расчет	Нелинейный расчет	%
Мах перемещение оболочки, мм	250260	131	190430
Мах M_r , кНм/м	43,17	0,06	81525
Мах S_r , кПа	0	48028	-

Для ряда задач найти корректное решение можно только при помощи Фронтального решателя.



Упражнение №3 по моделированию нелинейных свойств конструкций

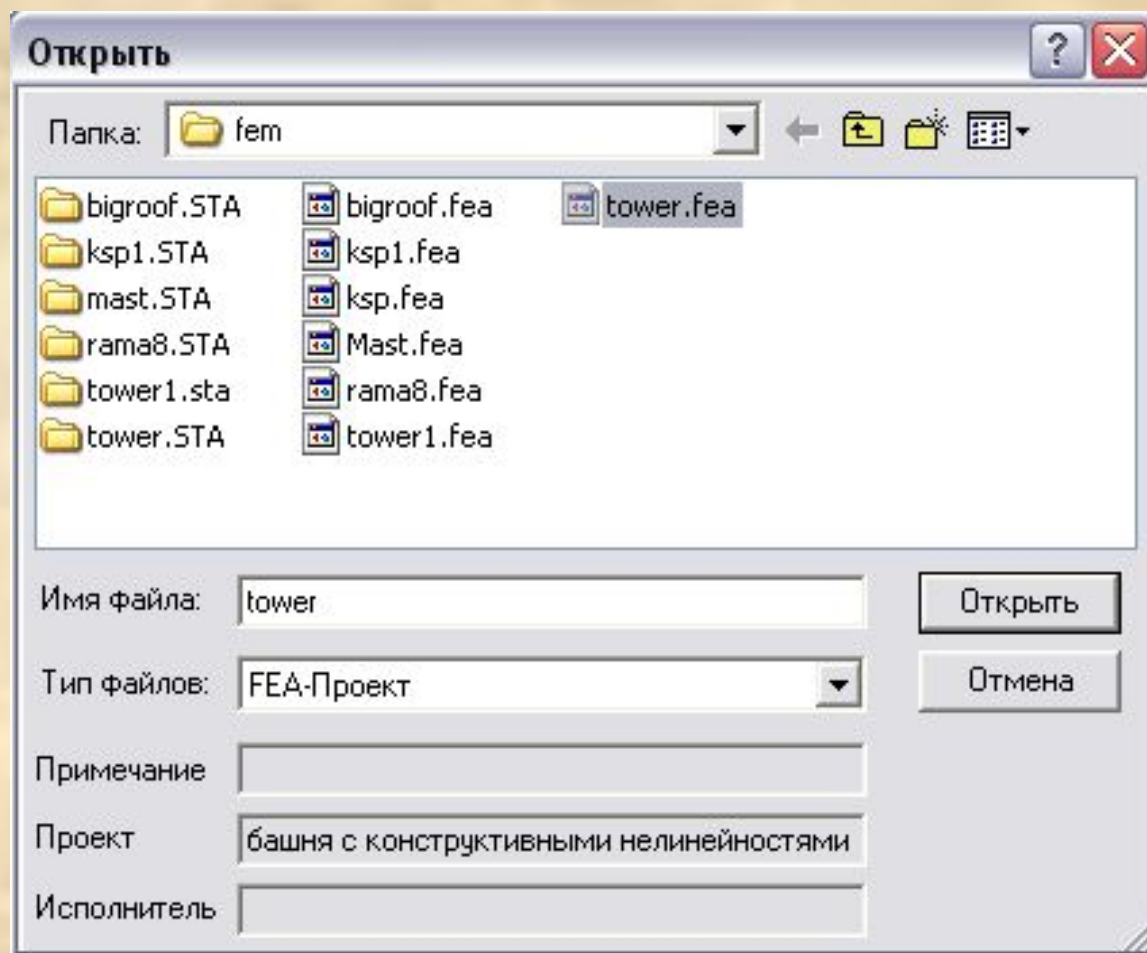


Имеется расчетная модель башни с нелинейными свойствами конструкций (`tower.fea`).

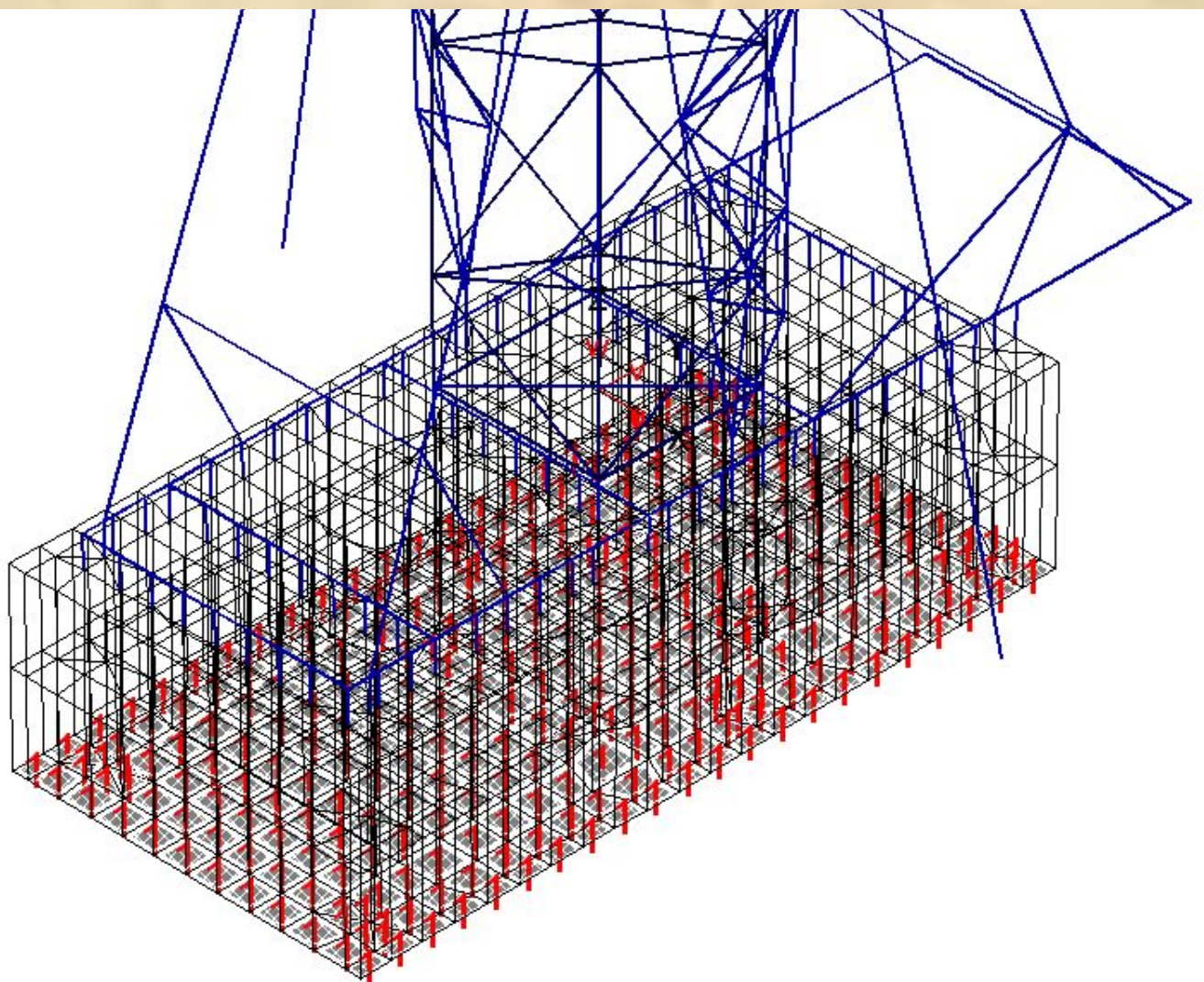
Требуется:

- 1) Произвести статический линейный расчет башни;
- 2) Установить одностороннее упругое основание для возможности учета отрыва фундамента башни от основания;
- 3) Установить односторонние шарниры, моделирующие работу гибких подкосов только на растяжение;
- 4) Произвести статический нелинейный расчет башни;
- 5) Произвести расчет собственных форм колебаний башни;
- 6) Произвести расчет деформированных колебаний башни;
- 7) Сравнить результаты расчета.

Шаг 1. Загружаем расчетную модель башни [tower.fea](#).



Шаг 2. Задаем одностороннее упругое основание (только на сжатие).



Стержни	Пластины
Полоса	Клин
E, nue	c1, c2 E, nue, h1
E, nue, H2	0 +1 -1
◀ Новое основание ▶	
Основание № 1 c1 = 5.44e+003 c2 = 0 ISide = 1	
<X-Y-Z-Координаты>	

Шаг 3. Производим статический линейный расчет башни.

Параметры расчёта

Тип расчета

- Статический расчет
- Собственные колебания
 - Сейсмический режим
- Устойчивость
- Формирование матриц

Итерационный расчет

Нет

Точность

Количество собственных форм

Диапазон искомых собств. значений

Значение от до

КЭ-модель

Элементы

- Гибридный 1
- Гибридный 2
- Перемещений
- Модификация матриц жесткости для балок-стенок

- Осреднение с весами
- Согласованные нагрузки
- Согласованные массы
- Изменение геометрии для эксцентриситетов

Выходные данные

- Проверка точности решения
- Проверка ортогональности
- Расширенная диагностика модели

Вывод результатов

- Графический интерфейс
- Реакции
- Усилия в оболочках
- Напряжения в объемных элементах

Многопоточный расчёт

Проект: Башня сотовой связи

Примечание: Башня с конструктивными нелинейностями

Исполнитель: Юрий

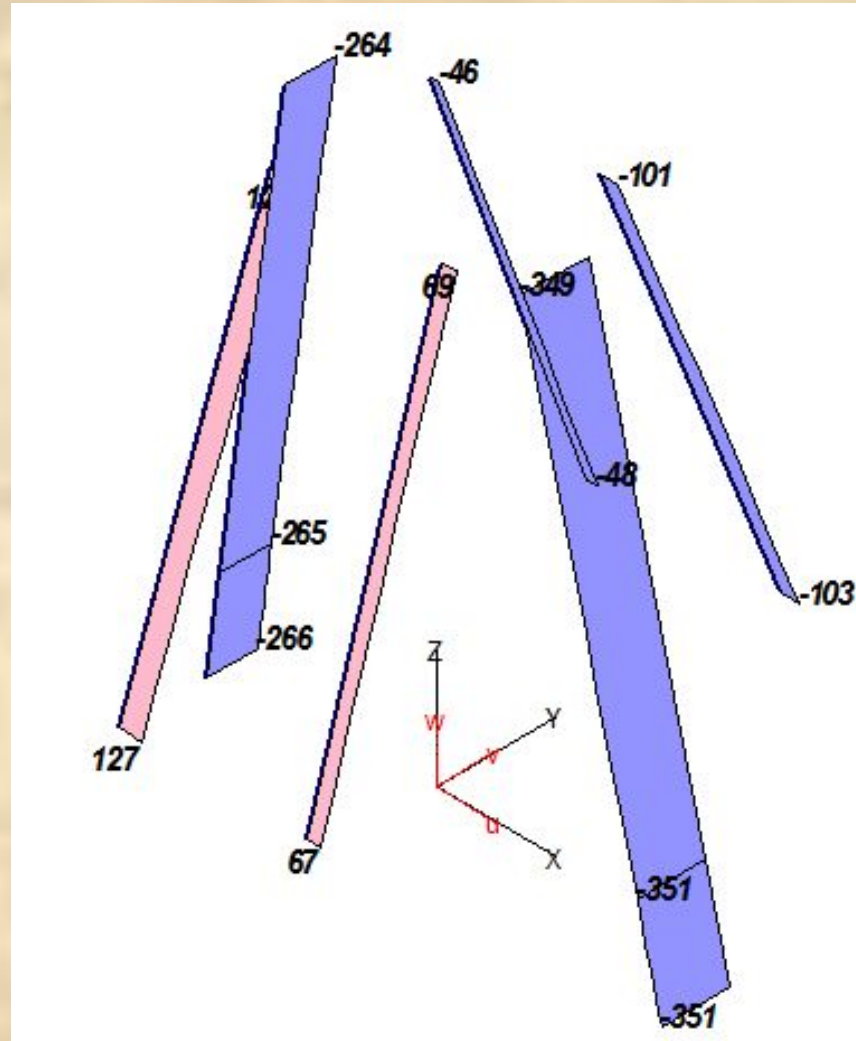
Настройки ?

- Общие
- Тип решателя
- Нормы РФ
- Панели инструментов

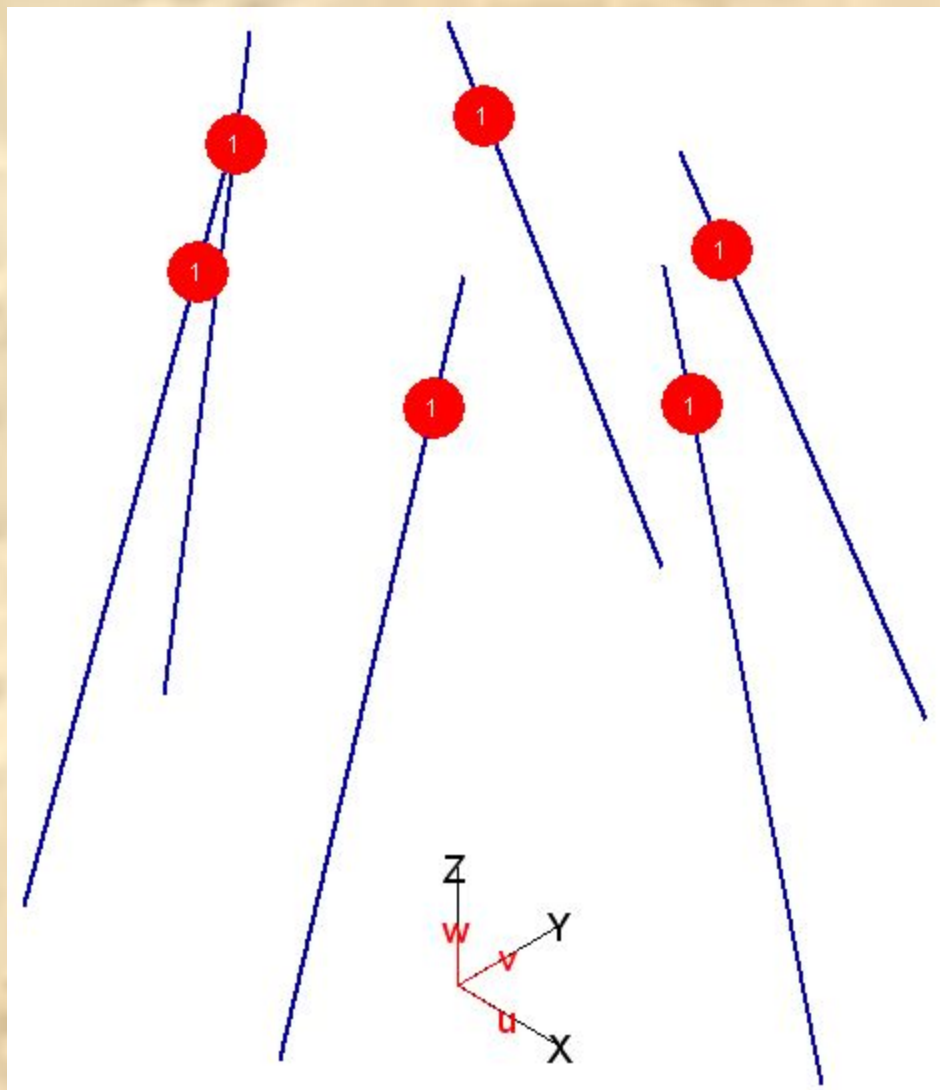
Выбор типа решателя

- Разреженный
- Фронтальный

Шаг 4. Оцениваем усилия в элементах башни (подкосы работают и на сжатие, и на растяжение).



Шаг 5. Задаем односторонние шарниры в подкосах в местной системе координат от перемещения вдоль оси r .



X/r	Y/s	Z/t	Rx/r	Ry/s	Rz/t
ЛСК		ГСК		МСК	
Стержни			Пластины		
0	+1	-1	+2	-2	

Шаг 6. Производим статический расчет гибкой башни (геометрическая и конструктивная нелинейность).

Параметры расчёта

Тип расчета

- Статический расчет
- Собственные колебания
 - Сейсмический режим
- Устойчивость
- Формирование матриц

Диагностика

- Проверка точности решения
- Проверка ортогональности
- Расширенная диагностика модели

Вывод результатов

- Графический интерфейс
- Реакции
- Усилия в оболочках
- Напряжения в объемных элементах
- Многопоточный расчёт

Итерационный расчет

Учёт нелинейности ...

Точность

Количество собственных форм

Диапазон искомых собств. значений

Значение от до

КЭ-модель

Элементы

- Гибридный 1
- Гибридный 2
- Перемещений
- Модификация матриц жесткости для балок-стенок
- Осреднение с весами
- Согласованные нагрузки
- Согласованные массы
- Изменение геометрии для эксцентриситетов

Проект: Башня сотовой связи

Примечание: Башня с конструктивными нелинейностями

Исполнитель: Юрий

Параметры нелинейного расчёта

- Односторонние элементы типа "трос"
- Односторонние опоры
- Односторонние и нелинейные шарниры
- Геометрическая нелинейность

Учёт конечных вращений для пластин

- всегда
- автоматически

Метод решения

- итерационный Ньютона-Рафсона
- шагово-итерационный
- поиск решений в закритической области

Точность:

Количество итераций:

Началь

Настройки ?

- Общие
- Тип решателя
- Нормы РФ
- Панели инструментов

Задание и корректировка комбинаций

Комбинации | Массы | Доп. на устойчивость

	НГ-1	НГ-2	НГ-3	НГ-4	НГ-5
К-1	1	1	1	1	0
К-2	1	1	1	0	1

Выбор типа решателя

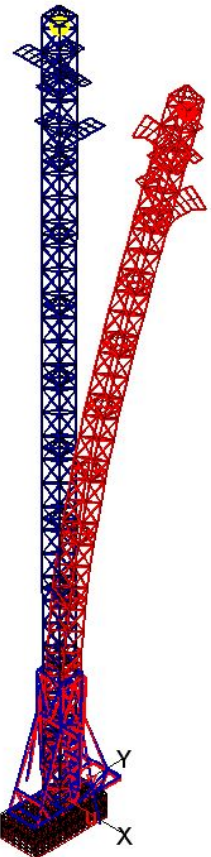
- Разреженный
- Фронтальный

$M = M_0 \pm N\delta$

Шаг 7. Оцениваем перемещения и усилия в элементах башни.

Проекты Растр Вставка Полный Виды **uvw-Задать** Фрагмент Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

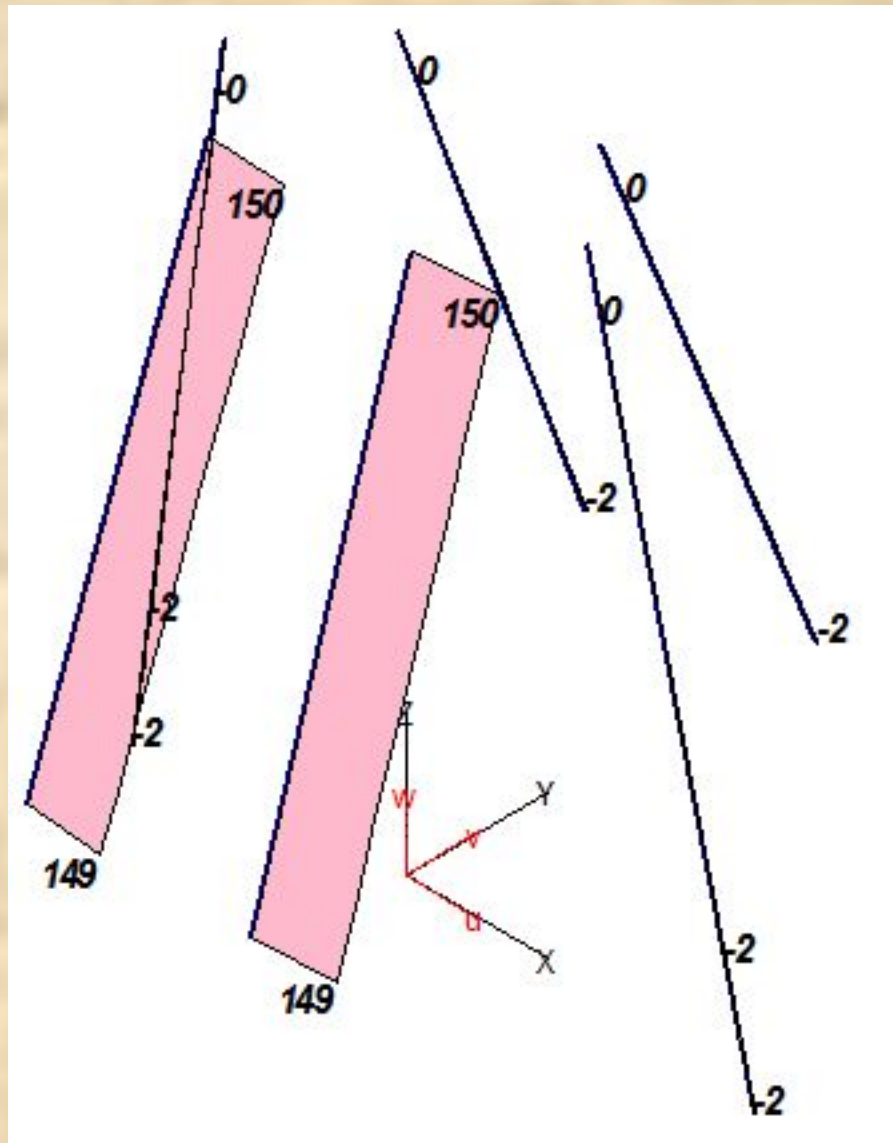
☐ 📄 ✂ 📏 📐 📊 📈 📉 📋 📌 📍 📎 📏 📐 📊 📈 📉 📋 📌 📍 📎



Zoom
Refr
Print
XY YZ XZ 3D
Einz Auto Box Krz
Назад
Таблицы
Графика
Тип результатов
Коэф. Сист. Frame Ver
Iso FI S W
Ux Uy Uz Rx Ry Rz
Rtot Utot
◀ Комбинация 1 ▶
<X-Y-Z-Координаты>

Мах перемещение = 394.154 мм в узле 147

Подкосы работают только на растяжение.



Шаг 8. Определяем формы и частоты собственных колебаний башни (колебаний относительно недеформированного состояния без учета геометрической и конструктивной нелинейности).

Параметры расчёта

Тип расчета

Статический расчет

Собственные колебания

Сейсмический режим

Устойчивость

Формирование матриц

Итерационный расчет

Учёт нелинейности ...

Точность: 1e-006

Количество собственных форм: 6

Диапазон искомых собств. значений: Более Гц

Значение от: 0.00 до

КЭ-модель

Элементы

Гибридный 1

Гибридный 2

Перемещений

Модификация матриц жесткости для балок-стенок

Осреднение с весами

Согласованные нагрузки

Согласованные массы

Изменение геометрии для эксцентриситетов

Многопоточный расчёт:

Проект: Башня сотовой связи

Примечание: Башня с конструктивными нелинейностями

Исполнитель: Юрий

OK Отменить Помощь

Настройки ?

Общие

Тип решателя

Нормы РФ

Панели инструментов

Выбор типа решателя

Разреженный

Фронтальный

OK Отменить

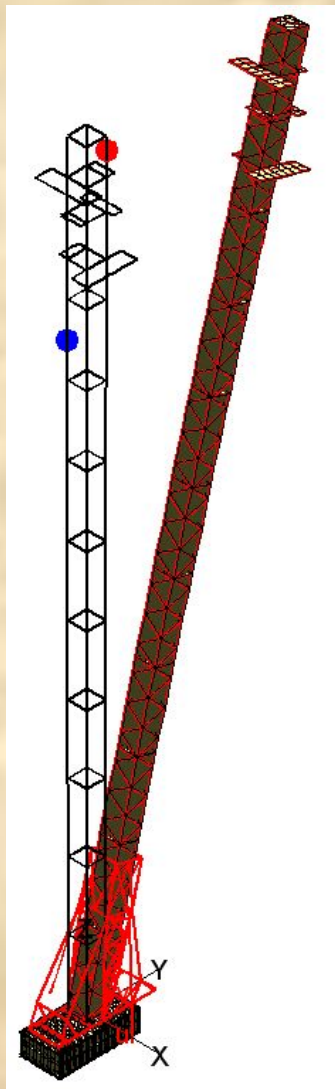
Задание и корректировка комбинаций

Комбинации Массы Доп. на устойчивость

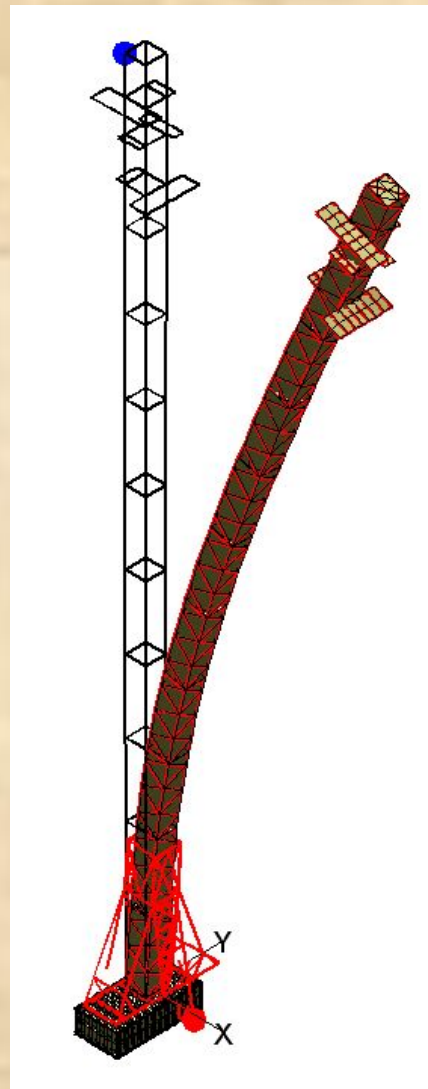
	НГ-1	НГ-2	НГ-3	НГ-
К-1	0.1	0.1	0.1	0

Шаг 9. Выполняем анализ форм колебаний.

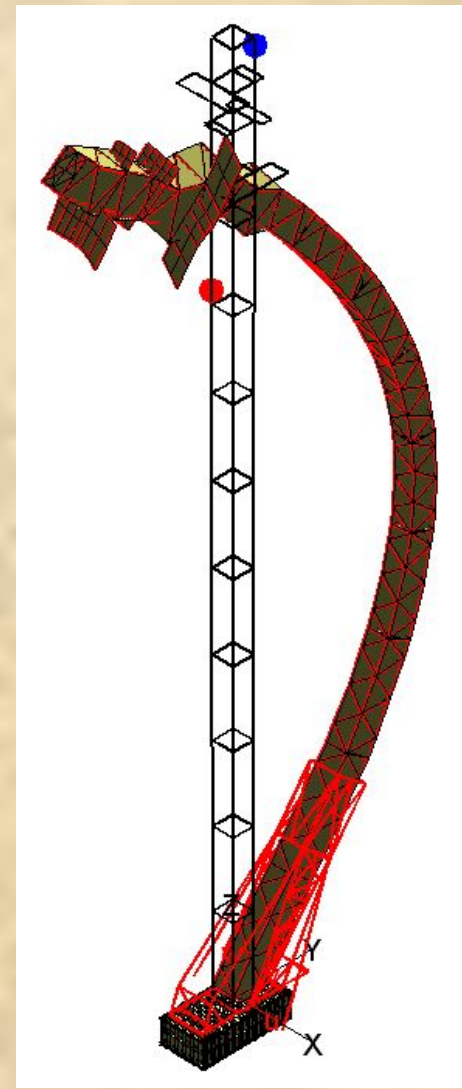
Форма 1



Форма 2



Форма 3

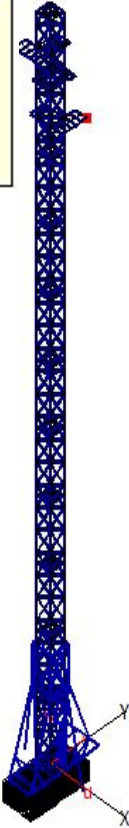


Шаг 10. Выводим и оцениваем периоды и частоты собственных форм колебания башни.

Проекты Растр Вставка Полный Виды uvw-Задать Фрагмент Позиции Геометрия Нагрузки Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

Таблицы
Графика
Тип результатов

Собственные частоты			
Форма	ω рад/с	f Гц	T с
1	0.62	0.10	10.18
2	1.90	0.30	3.30
3	8.25	1.31	0.76
4	11.60	1.85	0.54
5	12.77	2.03	0.49
6	20.66	3.29	0.30



Zoom
Refr
Word
XY YZ XZ 3D
Einz Auto Box Krz
Назад
Таблицы
Графика
Тип результатов
Отметить
Отменить
Вывести
<X-Y-Z-Координаты>

Отметьте узлы, которые нужно включить в группу

Шаг 11. Определяем формы и частоты деформированных колебаний башни (колебаний относительно деформированного состояния с учетом геометрической и конструктивной нелинейности).

Параметры расчета

Тип расчета

- Статический расчет
- Устойчивость
- Собственные колебания
- Спектральный сдвиг
- "Деформированные" колебания
- "Нелинейная" устойчивость
- "Нелинейный" спектральный сдвиг

Итерационный расчет

- Теория II порядка
- Трос
- Односторонние опоры
- Односторонние шарниры
- Превышение итераций
- Прерывание итераций

Точность 0.0001

- Однопоточный расчет
- Оптимизация
- Закрепление узлов

Задание стандартов ...

Вывод результатов

- Усилия
- Реакции
- Невязки

Итерации 200

Точность 1e-006

Количество собственных форм 6

Проект башня с конструктивными нелинейностями

Примечание

Исполнитель uzeg

OK Отменить Помощь

Настройки ?

- Общие
- Тип решателя
- Нормы РФ
- Панели инструментов

Выбор типа решателя

- Разреженный
- Фронтальный

OK Отменить

Задание и корректировка комбинаций

Комбинации Массы Доп. на устойчивость

	НГ-1	НГ-2	НГ-3	НГ-
K-1	0.1	0.1	0.1	0

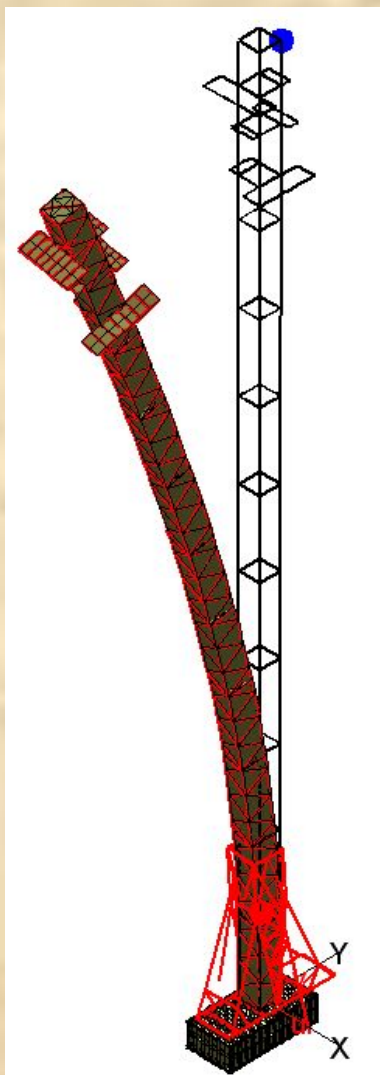
Задание и корректировка комбинаций

Комбинации Массы Доп. на устойчивость

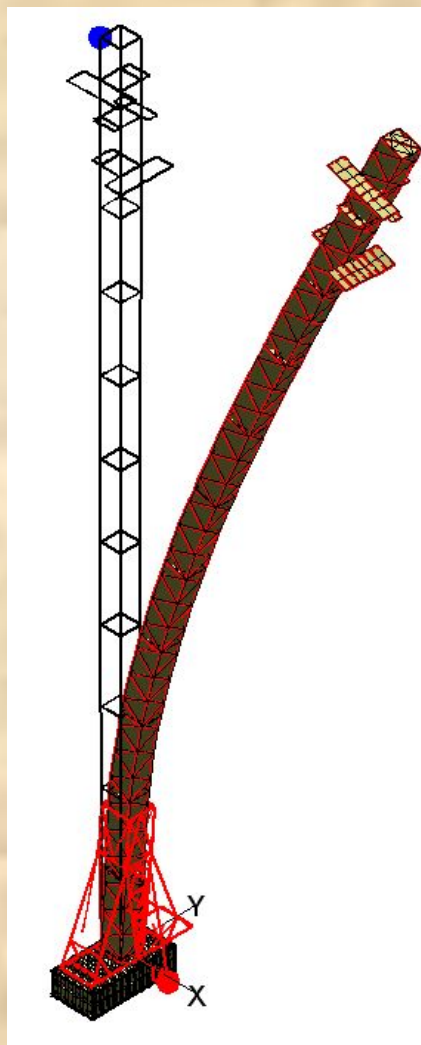
	НГ-1	НГ-2	НГ-3	НГ-4	НГ-5
K-1	1	1	1	1	0

Шаг 12. Выполняем анализ деформированных колебаний.

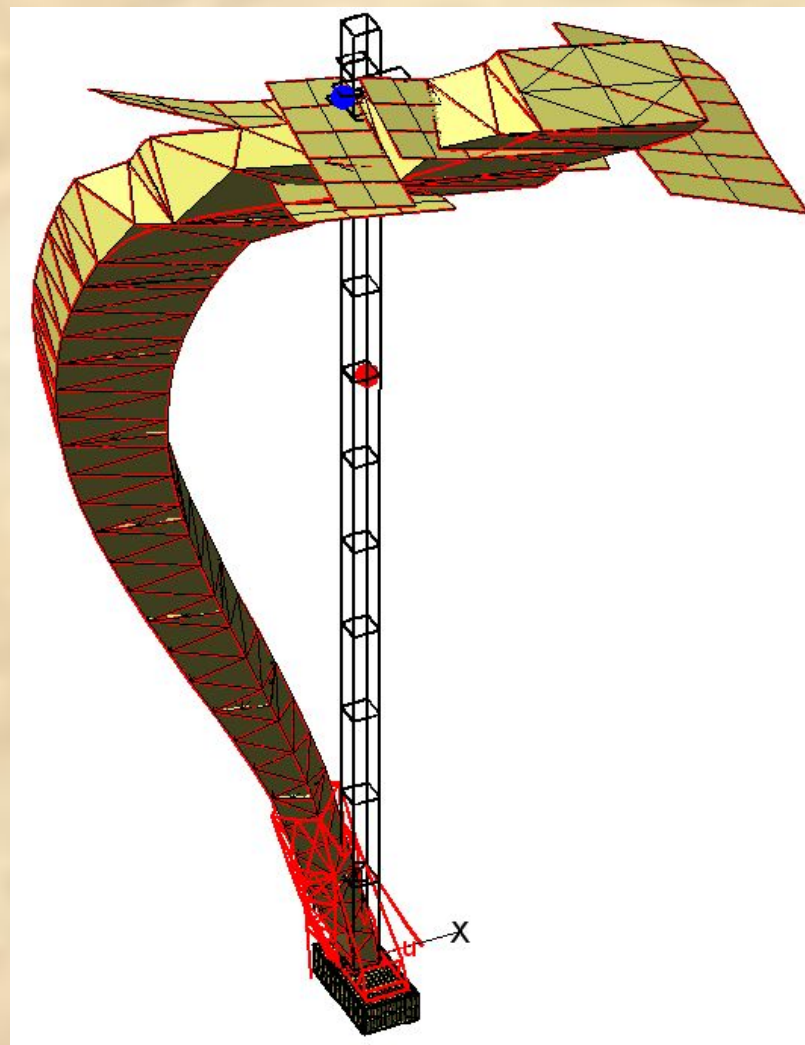
Форма 1



Форма 2



Форма 3

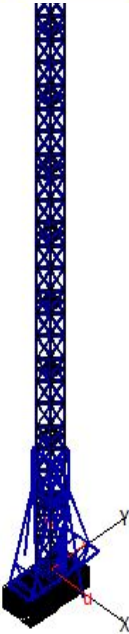


Шаг 13. Выводим и оцениваем периоды и частоты деформированных колебаний башни.

Проекты Растр Вставка Полный Виды uvw-Задать Фрагмент Позиции Геометрия Нагрузки Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

Таблицы
Графика
Тип результатов

Собственные частоты				
Комб.	Форма	ω рад/с	f Гц	T с
1	1	1.92	0.31	3.27
	2	2.00	0.32	3.14
	3	11.85	1.89	0.53
	4	13.39	2.13	0.47
	5	14.25	2.27	0.44
	6	20.71	3.30	0.30



Zoom
Refr
Word
XY YZ XZ 3D
Einz Auto Box Krz
Назад
Таблицы
Графика
Тип результатов
Отметить
Отменить
Вывести
<X-Y-Z-Координаты>

Отметьте узлы, которые нужно включить в группу

Шаг 14. Сопоставляем периоды и частоты собственных и деформированных колебаний.

№№ формы	Период, с		
	Линейный расчет	Нелинейный расчет	%
1	10.18	3.27	199
2	3.30	3.14	2
3	0.76	0.53	36
4	0.54	0.47	11
5	0.49	0.44	9
6	0.30	0.30	0