

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.

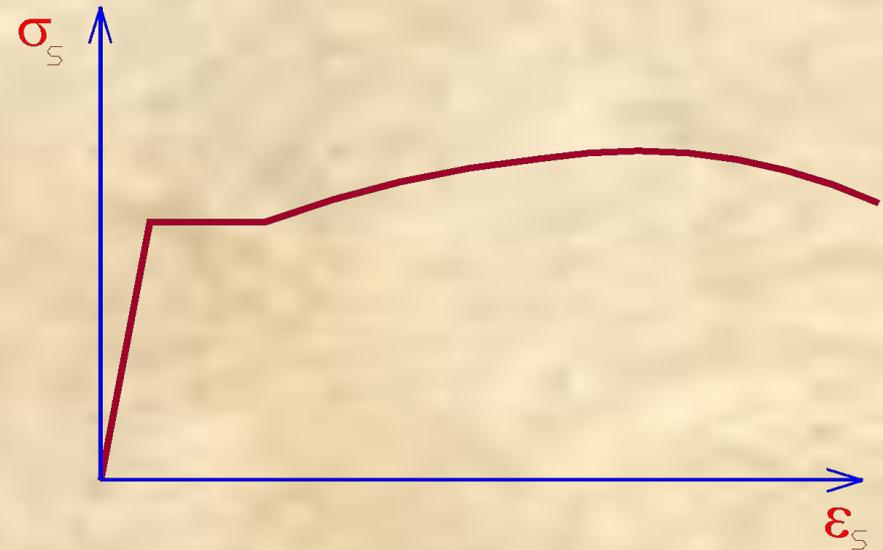
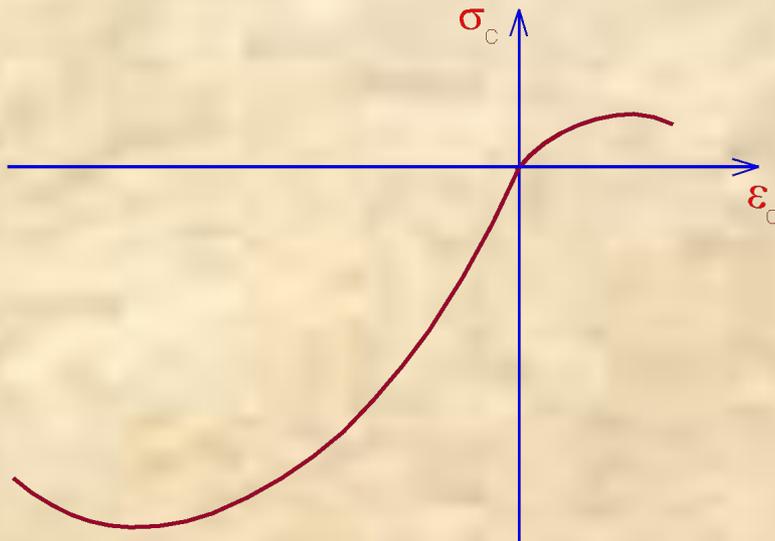
2. Физическая нелинейность – нелинейная зависимость между деформациями (перемещениями) и напряжениями (усилиями).

Выделяют две разновидности физической нелинейности:

нелинейность работы материала

бетон

мягкая сталь



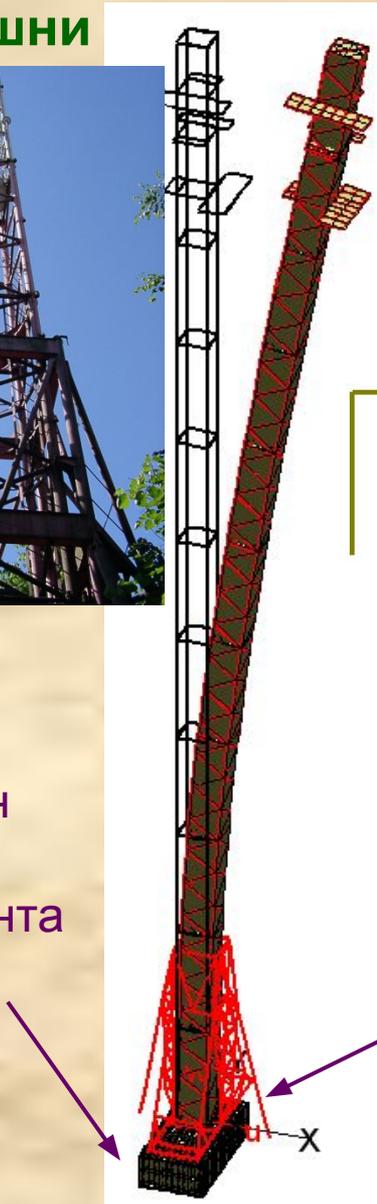
конструктивная нелинейность - односторонняя работа элементов, опор, узловых сопряжений, зазоры в связях и т.д.

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

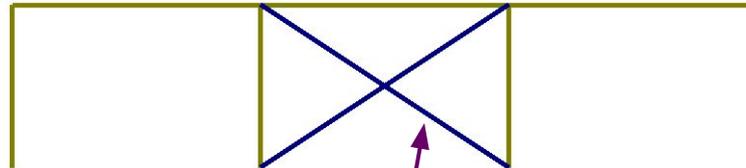
Башни



Возможен отрыв фундамента от земли

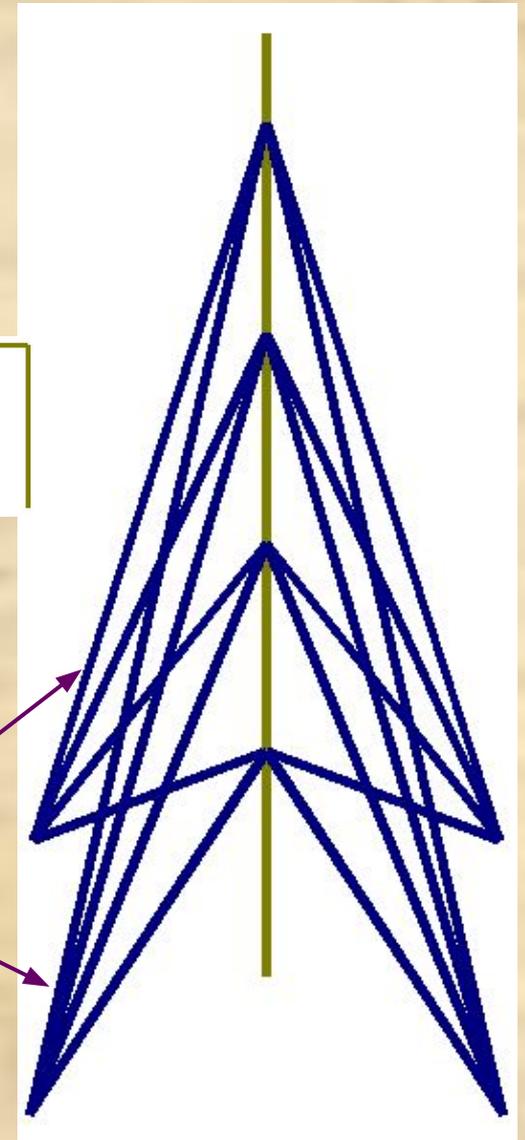


Гибкие крестовые связи



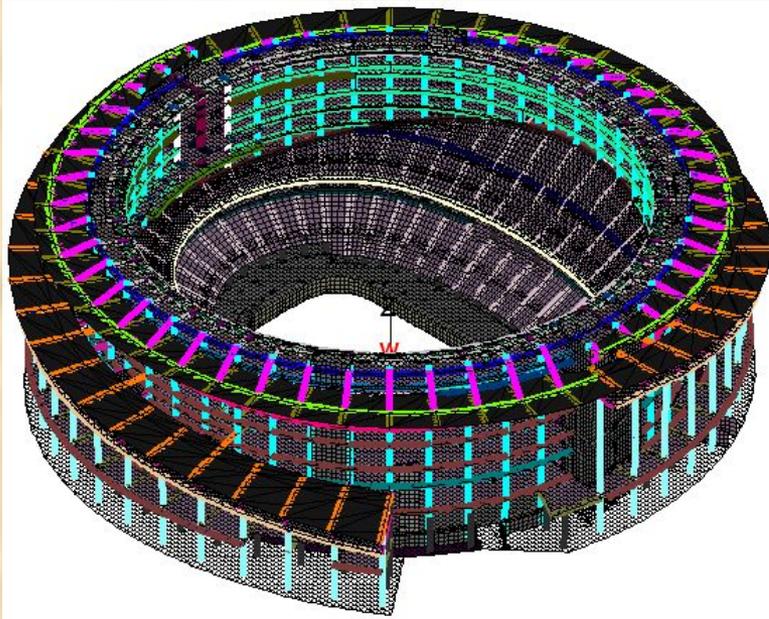
Гибкие элементы, не работающие на сжатие

Мачты на оттяжках

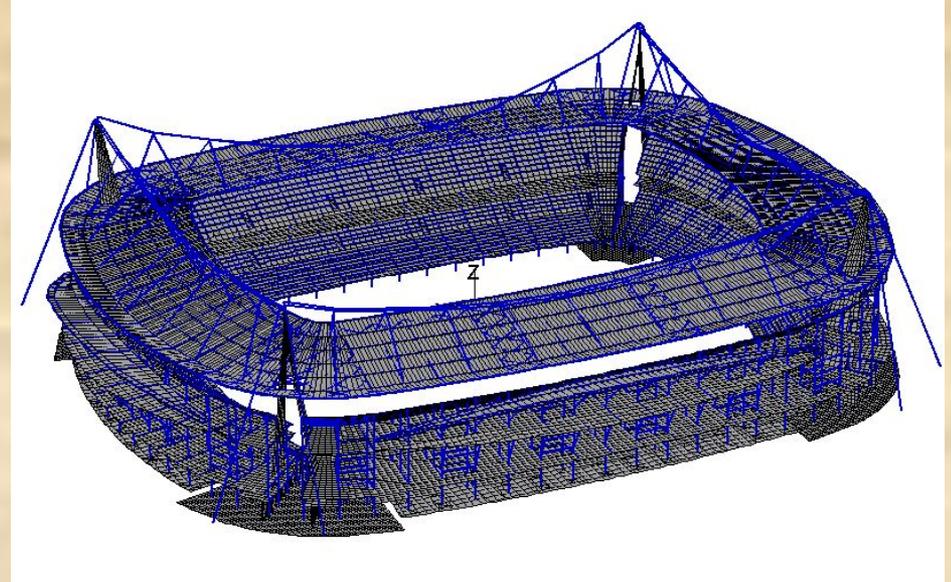


Большепролетные сооружения, стадионы

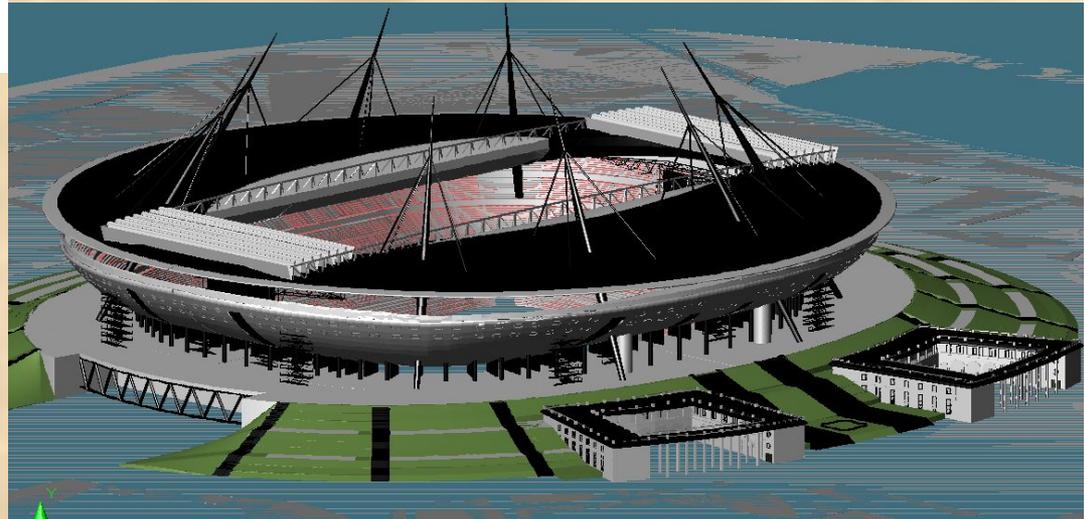
Ледовый дворец на Ходынском поле, Москва



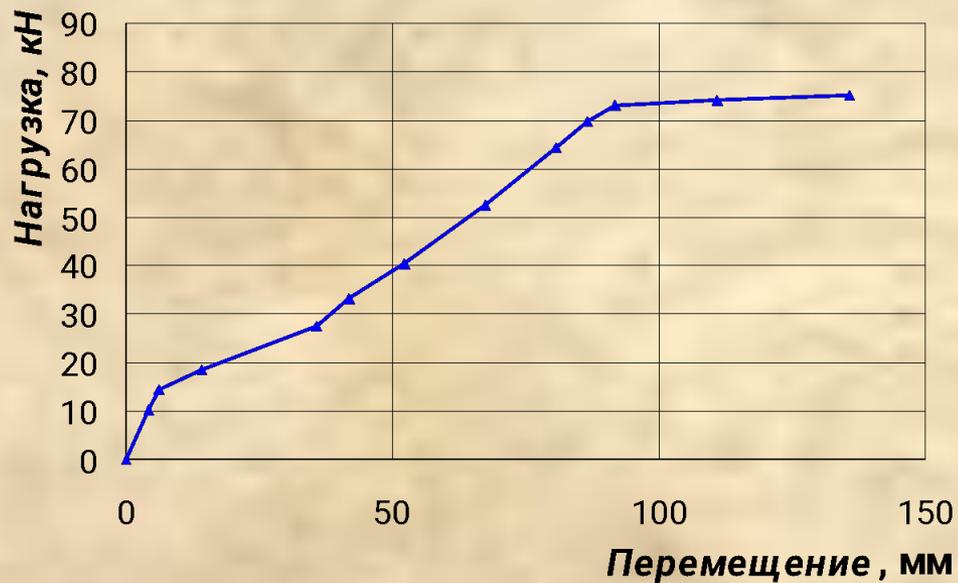
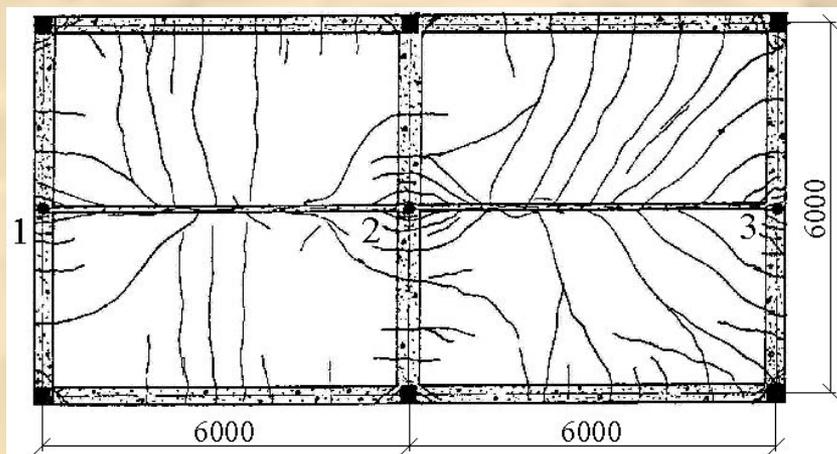
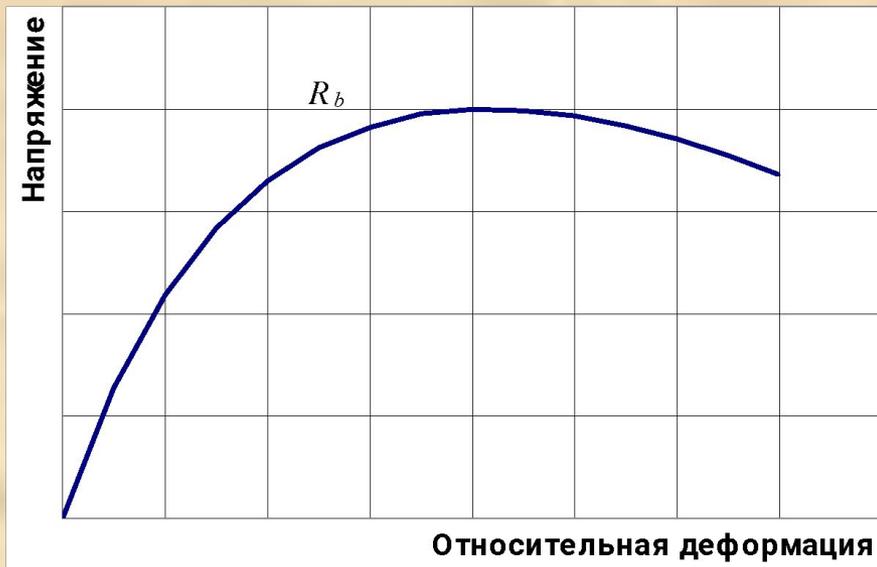
Стадион «Локомотив», Москва



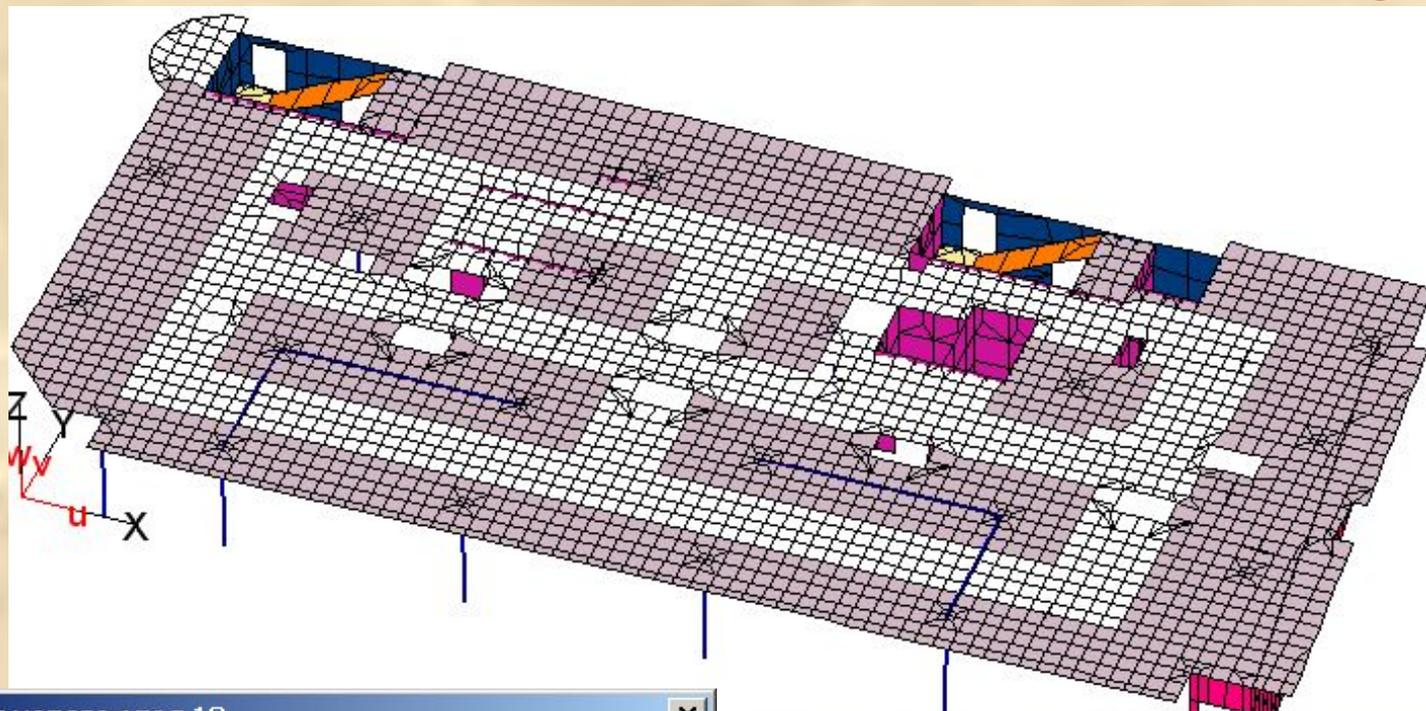
Стадион «Зенит», С.-Петербург



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

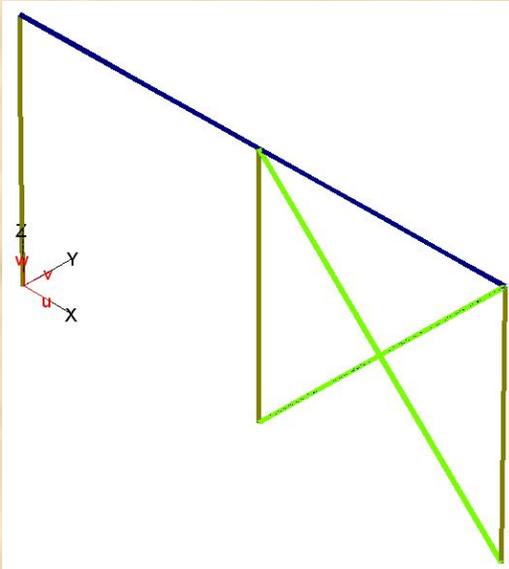
Материалов 3 Ссылка 4596

Упражнение №1 по моделированию нелинейных свойств конструкций

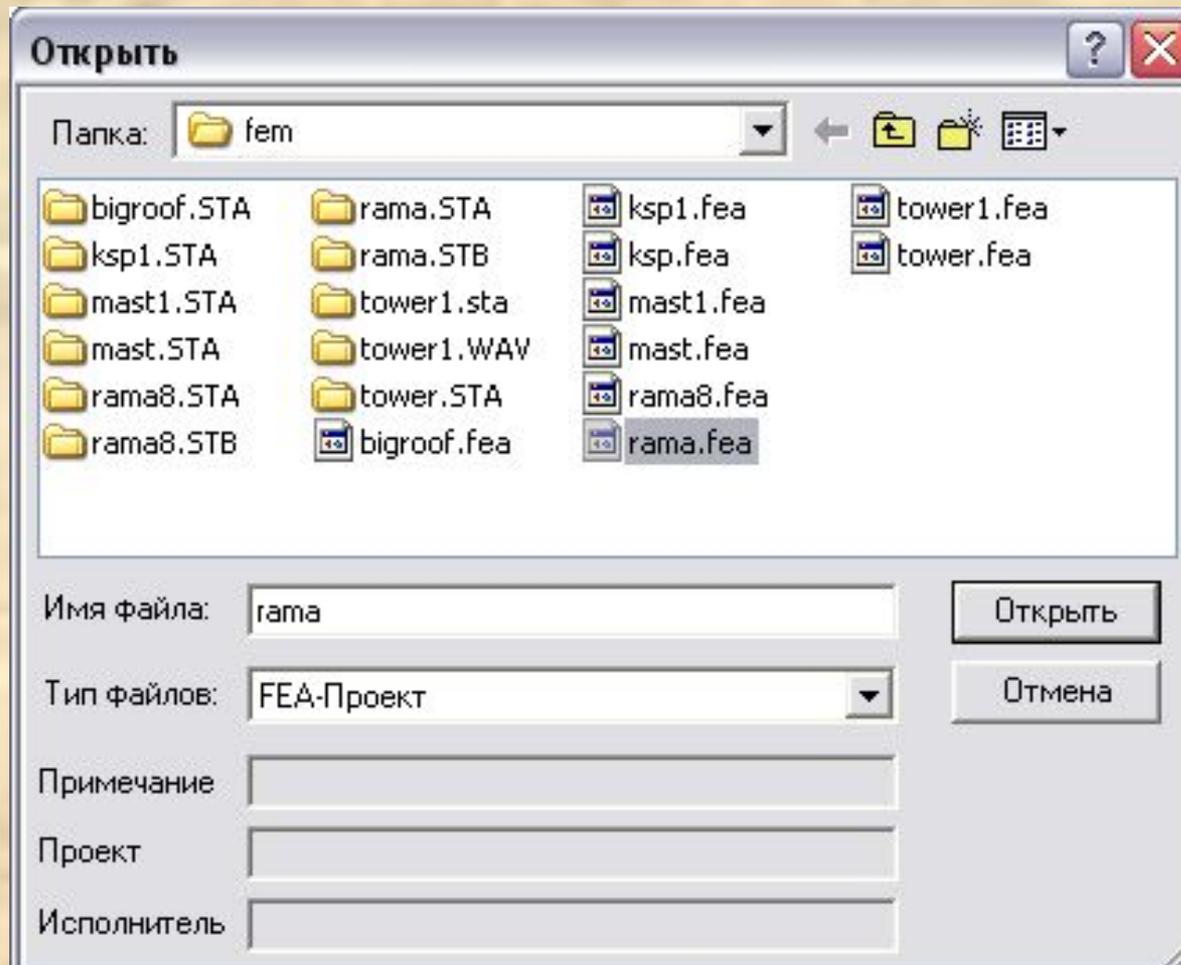
Имеется расчетная модель рамы с гибкими связями, не работающими на сжатие (rama.fea).

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 расчета

Тип расчета

- Статический расчет
- Собственные колебания
- Устойчивость
- Формирование матриц

Итерационный расчет

Точность

Количество собственных форм

Диапазон искомых собств. значений

Значение от до

Диагностика

- Проверка точности решения
- Проверка ортогональности

Вывод результатов

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

КЭ-модель

Элементы

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

- Осреднение с весами
- Согласованные нагрузки
- Согласованные массы

Проект

Примечание

Исполнитель \$\$\$\$

OK Отменить Помощь

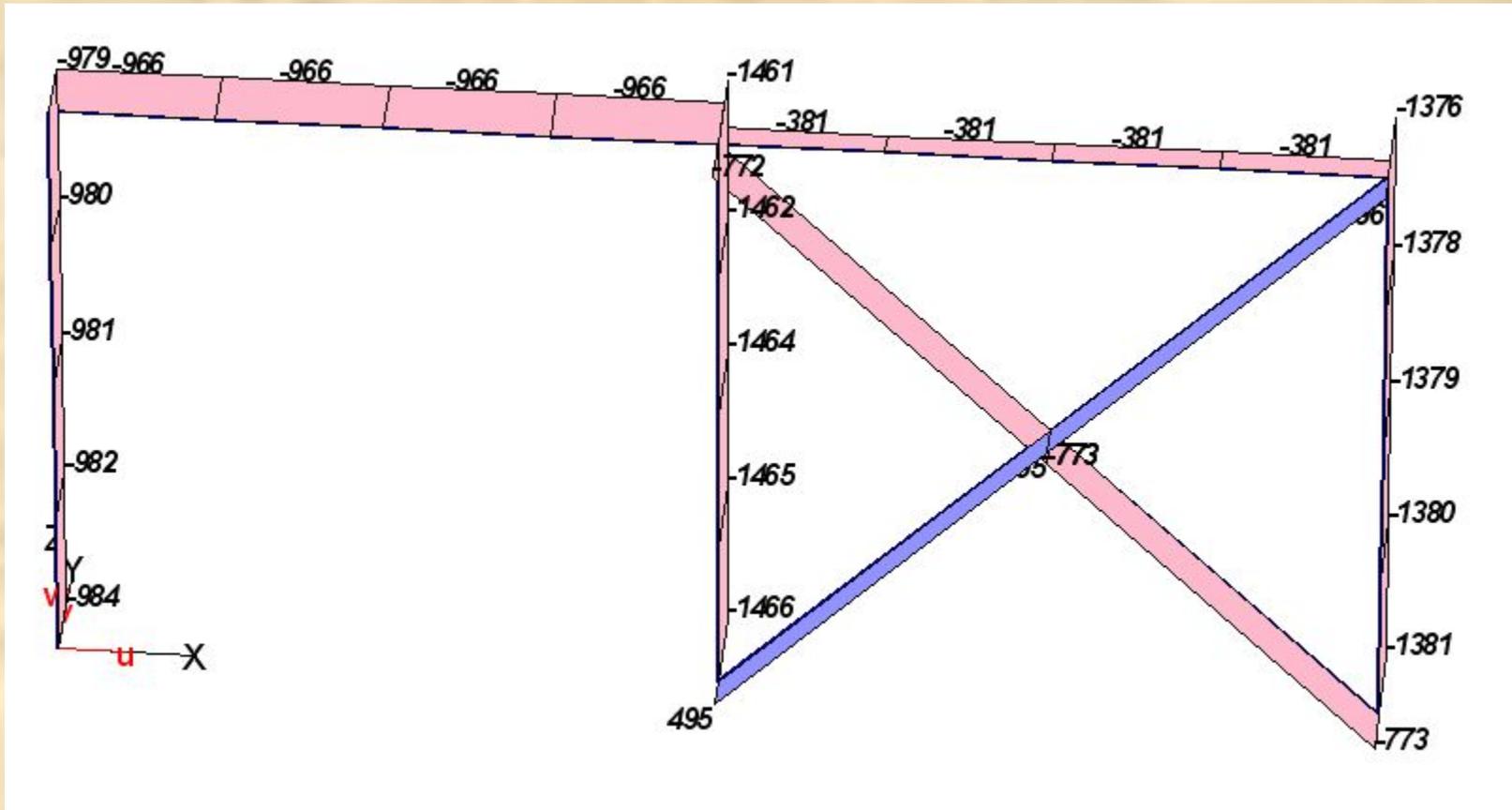
Выбор типа решателя

- Профильный
- 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 Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

- Геометрия
- Позиции
- Тела и поверхности
- Эксцентриситеты
- Материалы
- Массы
- Шарниры**
 - Шарниры
 - Элементные:
 - установить**
 - удалить
 - контроль
 - Узловые:
 - установить
 - удалить
 - Разрезные:
 - установить
 - объединить
 - удалить
 - удалить все
 - стандарты
- MCK стержней
- MCK пластин
- KNFL
- Связи
- Упругое основание
- Нагрузки
- Преднапряжение
- Подконструкции

Zoom

Refr

Print

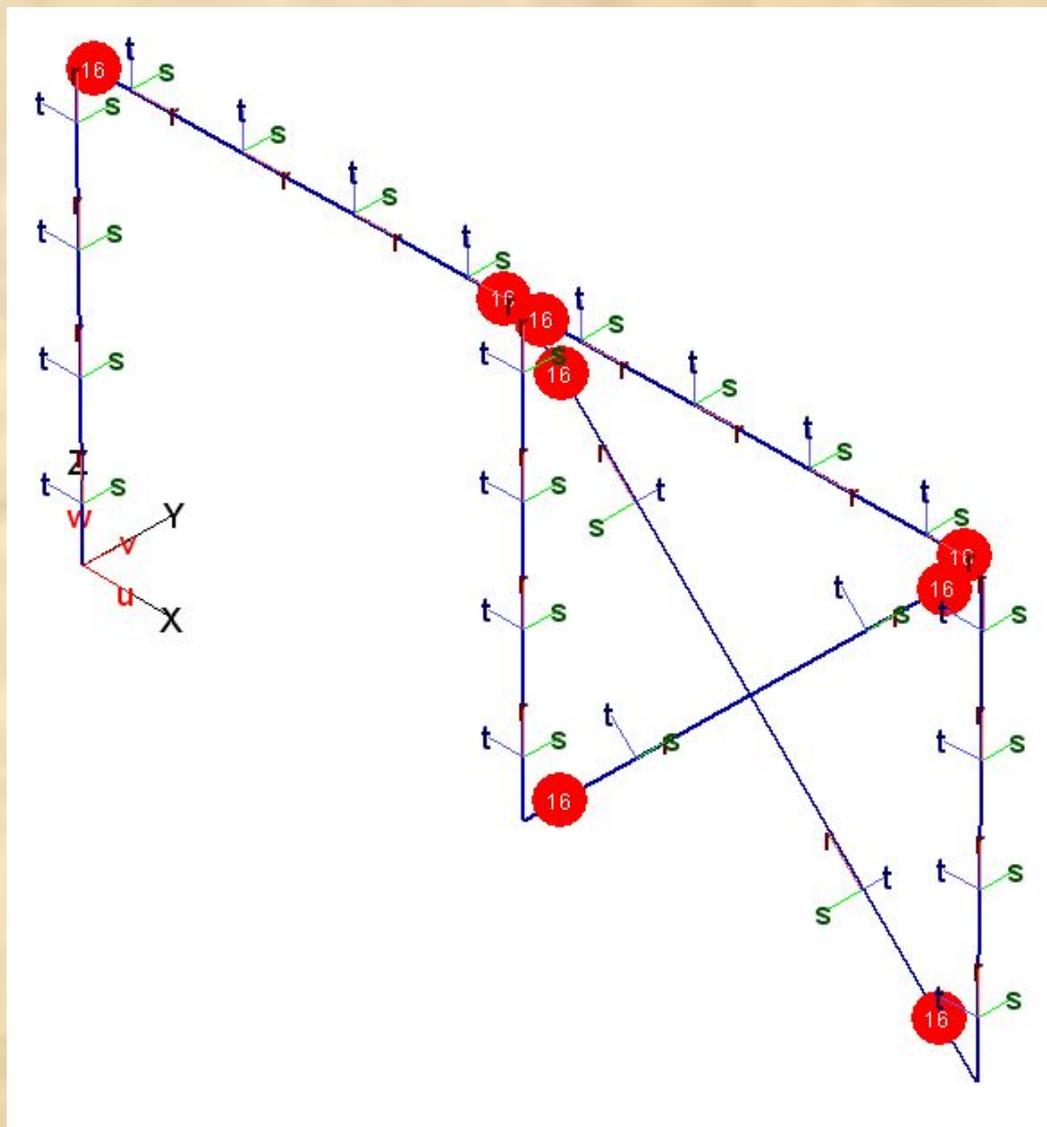
XY YZ XZ 3D

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

Max N=496.139 кН (элемент 22), Min N=-1466.16 кН (элемент 5)

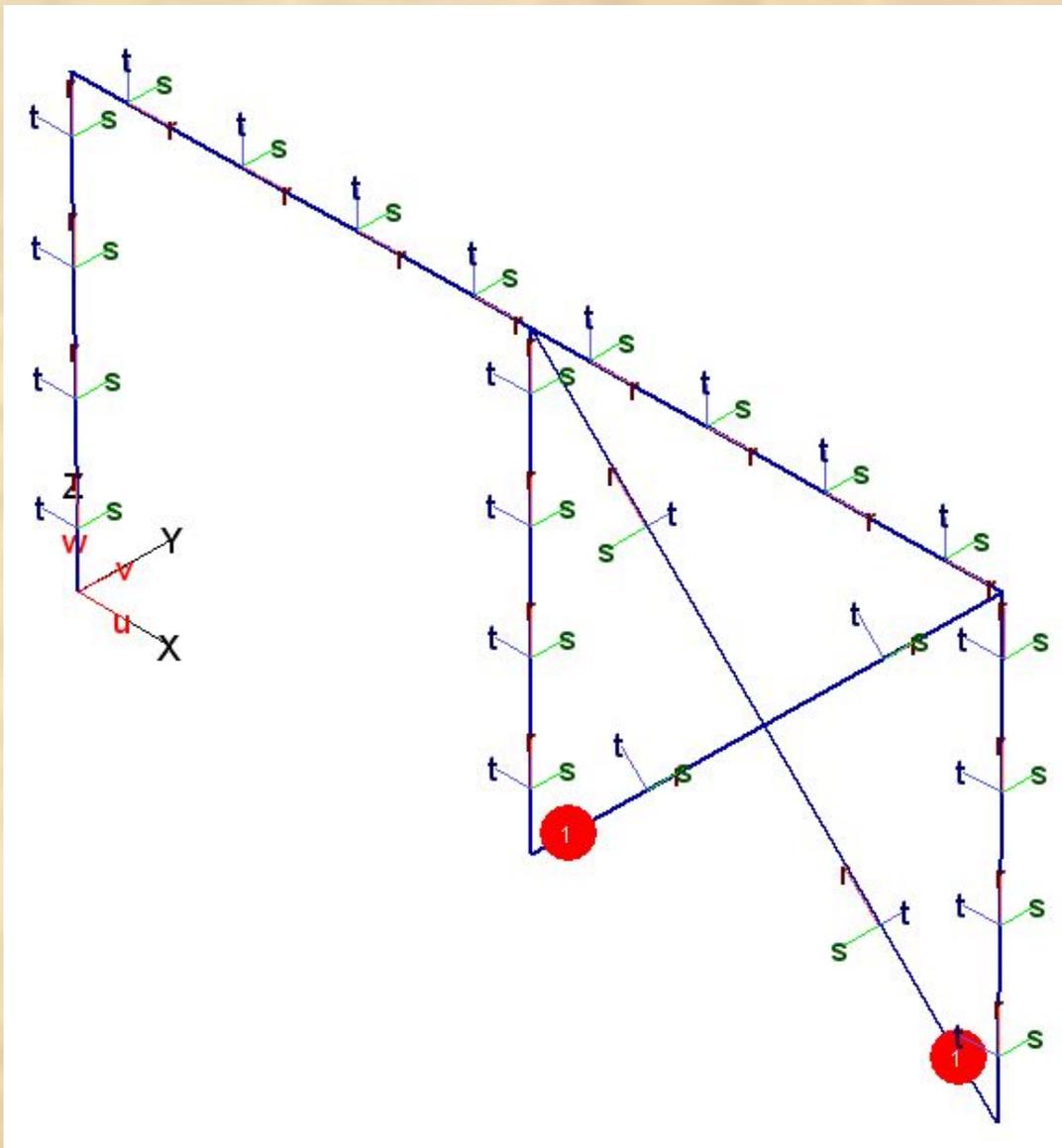
<X-Y-Z-Координаты>

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



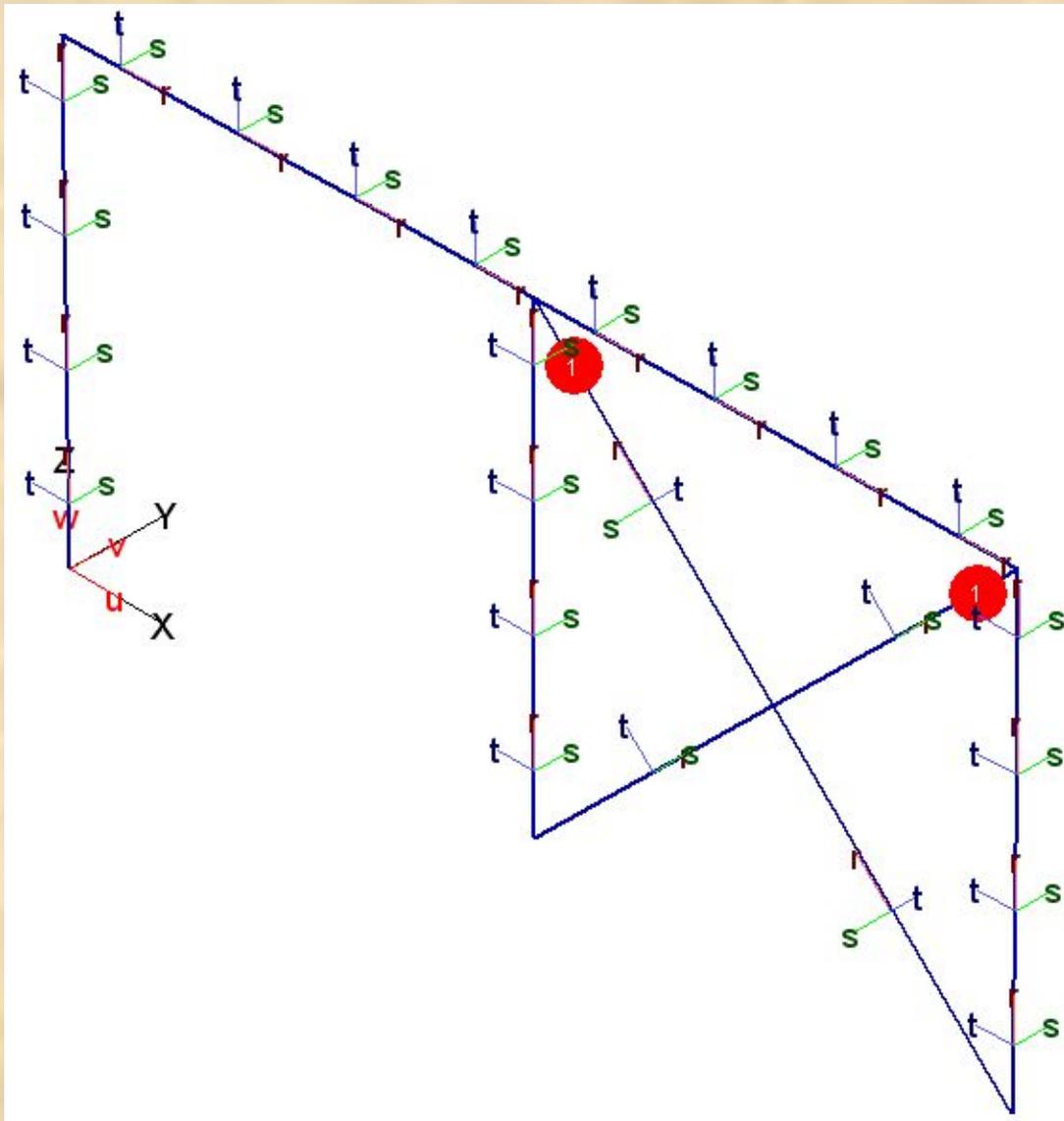
X/r	Y/s	Z/t	Rx/r	Ry/s	Rz/t
ЛСК		ГСК		МСК	
Стержни			Пластины		
0	+1	-1	+2	-2	

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).

Выбор типа расчета

Вид 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

Итерации: 100

Точность: 0.0001

Количество собственных форм: 6

Точность: 0.0001

Задание стандартов ...

Вывод результатов

- Усилия
- Реакции
- Невязки

Примечание

Проект

Исполнитель: юра

OK Отменить Помощь

Выбор типа решателя

- Профильный
- Разреженный
- Фронтальный

OK

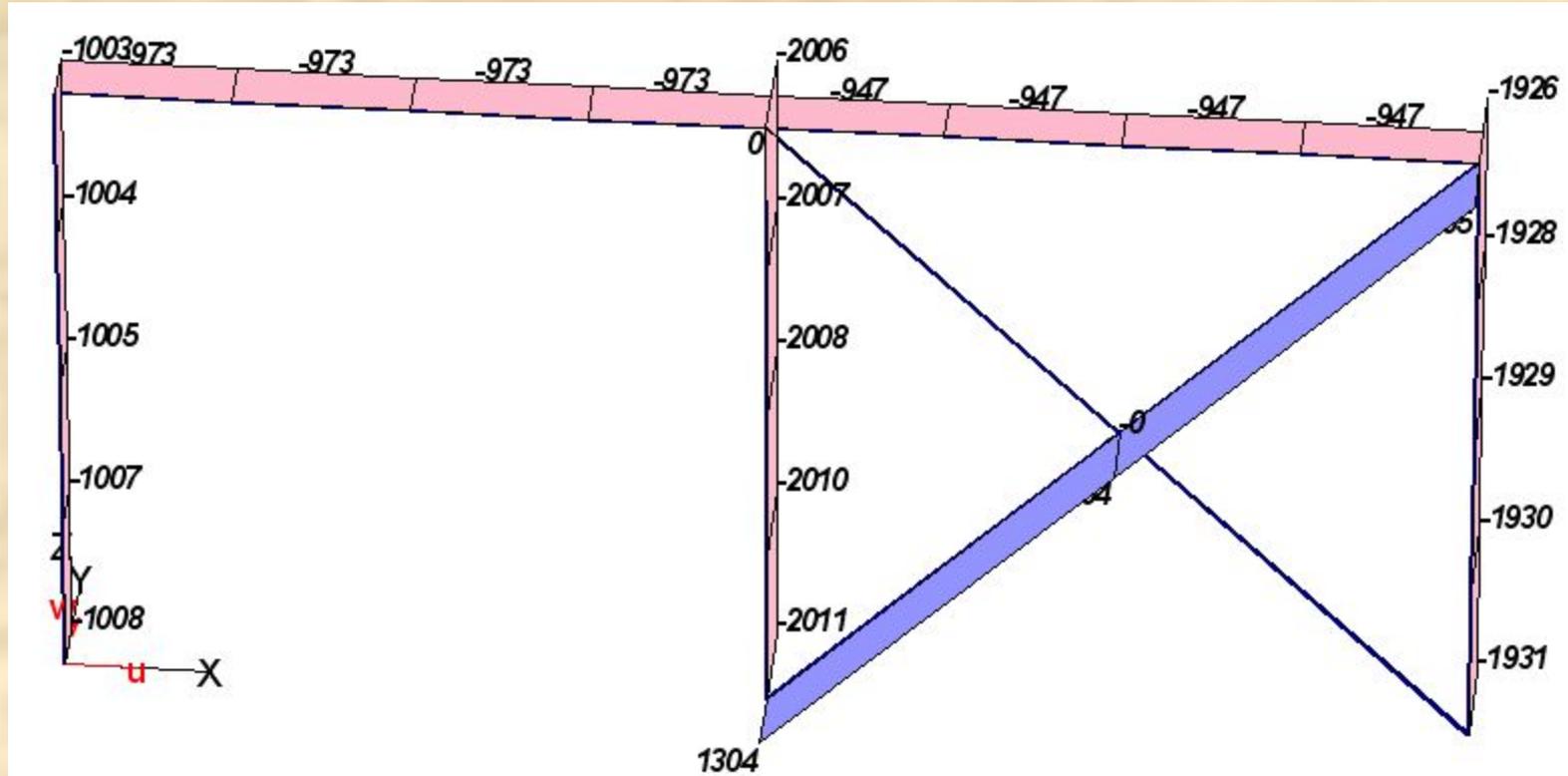
Отменить

Задание и корректировка комбинаций

Комбинации | Массы | Доп. на устойчивость

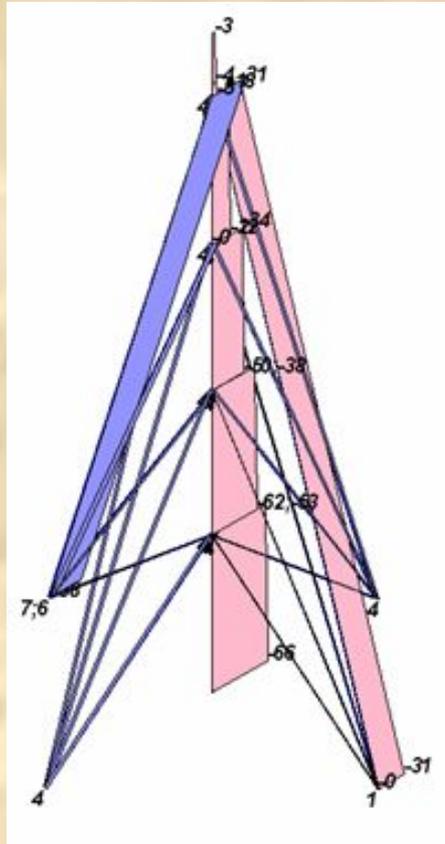
	НГ-1	НГ-2
К-1	1	1

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



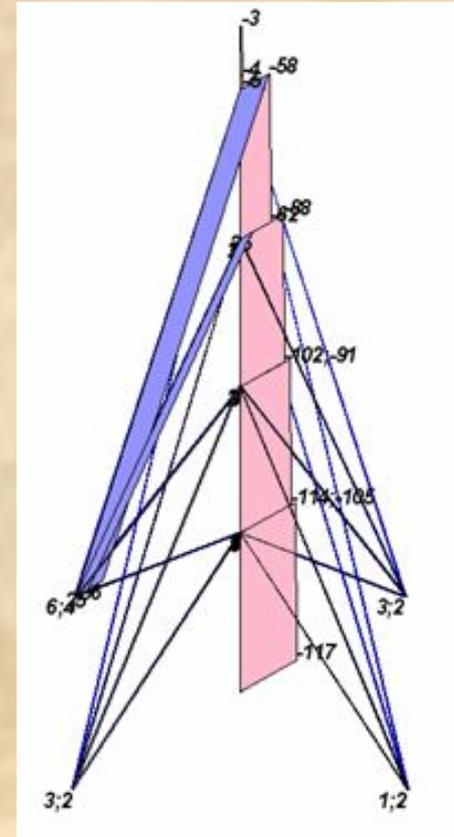
Расчет мачты на оттяжках

Линейный расчет



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

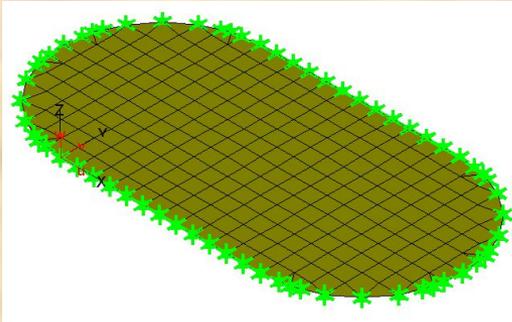
Нелинейный расчет



Оттяжки работают только на растяжение

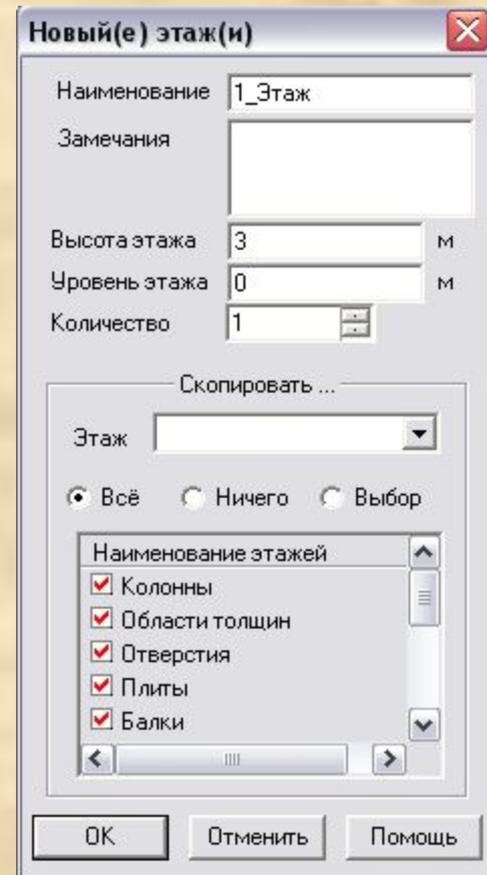
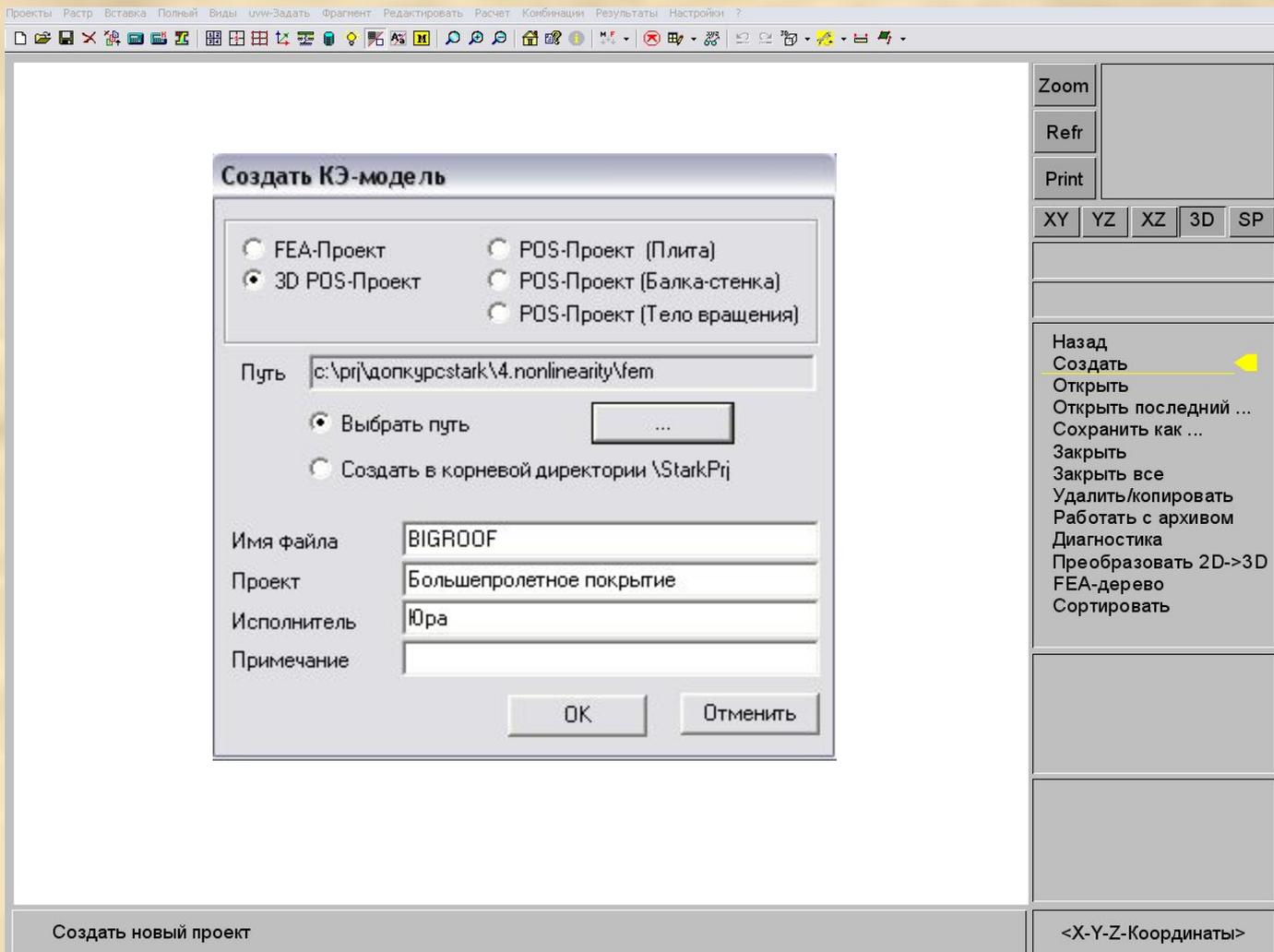
Упражнение №2 по моделированию нелинейных свойств конструкций

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).

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

Zoom
Refr
Print

PPO PLI PP

A R F K X W M S

Einz Box Circ Ras

Назад
Плита/стена/рампа
-установить
-удалить
-сместить
-делить
-объединить
-отобразить
-копировать
-передать свойства
-направление
-изменить свойства

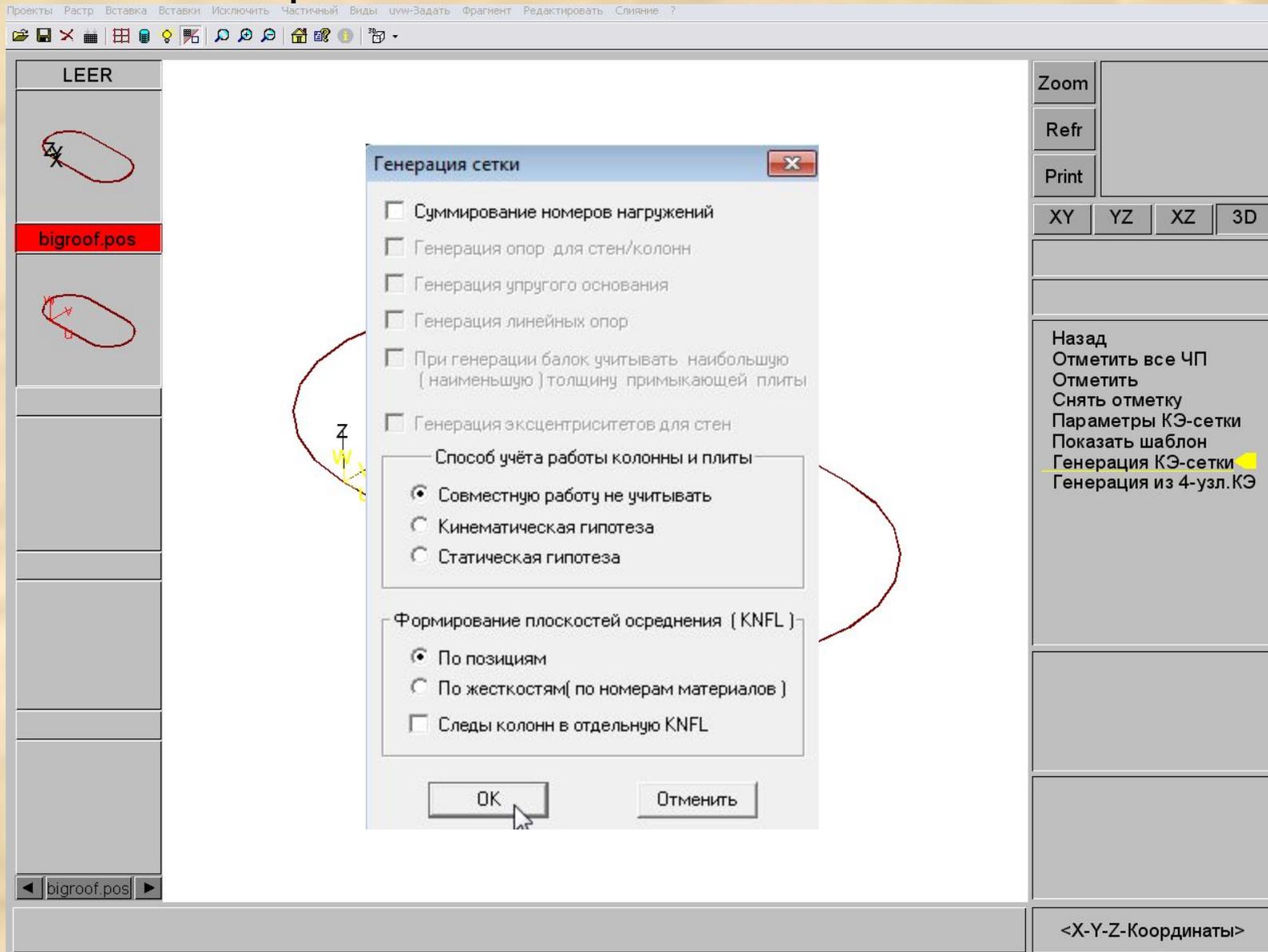
D-2
Характеристики
Видимые этажи
3 м вниз

Плита Стена Рампа

<X-Y-Z-Координаты>

Установка плит/балок-стенок/рамп из позиций

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



Шаг 4. Редактируем материал и толщину оболочки.

The screenshot shows a software interface with a menu bar at the top containing: **Проекты**, **Растр**, **Вставка**, **Толщина**, **Виды**, **uvw-Задать**, **Фрагмент**, **Редактировать**, **Расчет**, **Комбинации**, **Результаты**, **Настройки**, **?**. Below the menu bar is a toolbar with various icons for file operations, editing, and viewing.

The main workspace displays a 3D model of a shell structure with a grid of material elements. A dialog box titled **Имена материалов** is open, showing the following settings:

- Таб: **Бетон** (selected), **Арматурный слой**, **Слоистый**
- Изо: **Изотропный** (selected), **Ортотропный(пластины)**
- Номер мат.: **1** (dropdown), **Новый** (button)
- H: **0.005** (input), **Снижение** (button)
- E: **2.06e+008** (input), **Стандарт** (button)
- Mue: **0.3** (input), **Материалов** (text)
- Rho: **8.24** (input), **Ссылки** 272 (text)

Buttons at the bottom of the dialog: **OK**, **Отмена**.

The right sidebar contains a vertical menu with the following items:

- Zoom**
- Refr**
- Print**
- XY** | **YZ** | **XZ** | **3D**
- Назад**
- Материалы**
- установить**
- удалить**
- редактировать** (highlighted with a yellow arrow)
- сечения ЖБК**
- произвольн. сечения**
- сортамент профилей**
- стандарты**

At the bottom of the sidebar, there is a button labeled **<X-Y-Z-Координаты>**.

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

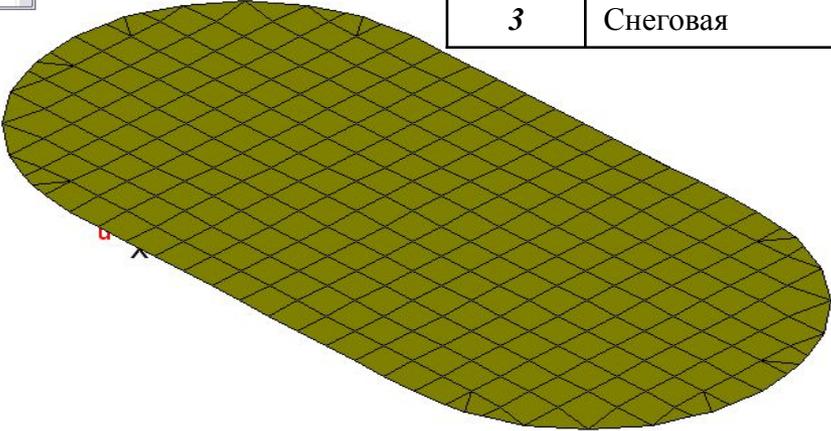
Проекты Растр Вставка **Планы** Виды **цвм-Задать** фрагмент Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

Zoom Refr Print XY YZ XZ 3D

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

№ 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

Нагружение = 2
Qz/t = -0.500



Qx/r Qy/s Qz/t
МСК ГСК Проекц.
◀ Нагружение 2 ▶

<X-Y-Z-Координаты>

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

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
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>

Установка узловых опор

Шаг 7. Производим статический линейный расчет покрытия.

Параметры расчета

Тип расчета

- Статический расчет
- Собственные колебания
- Устойчивость
- Формирование матриц

Итерационный расчет

Точность

Количество собственных форм

Диапазон искомых собств. значений до

Значение от до

Диагностика

- Проверка точности решения
- Проверка ортогональности

Вывод результатов

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

КЭ-модель

Элементы

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

- Осреднение с весами
- Согласованные нагрузки
- Согласованные массы

Проект

Примечание

Исполнитель ssss

OK Отменить Помощь

Выбор типа решателя

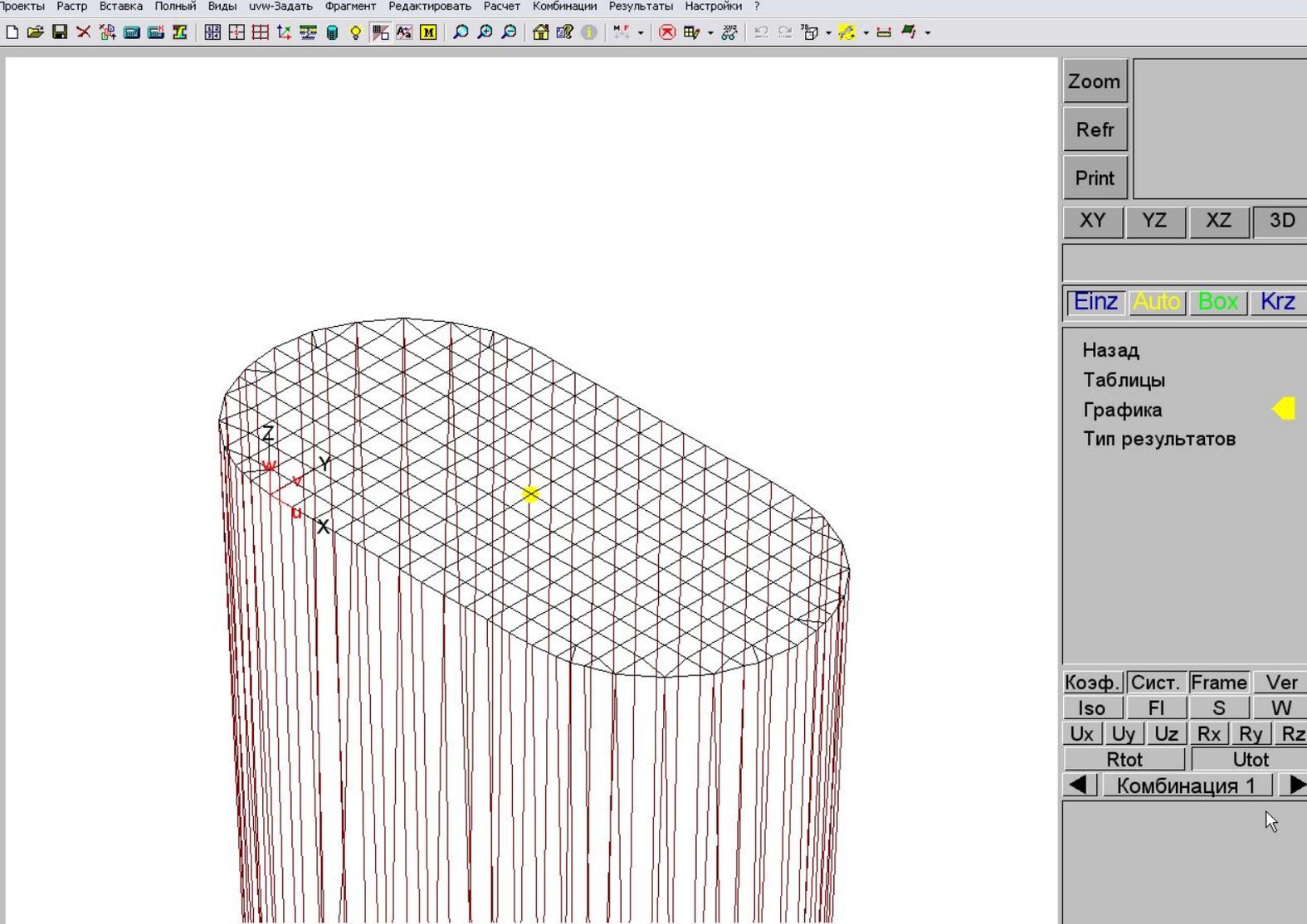
- Профильный
- Разреженный
- Фронтальный

OK

Отменить

Шаг 8. Оцениваем перемещение и усилия в элементах оболочки.

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



Zoom
Refr
Print
XY YZ XZ 3D
Einz Auto Box Krz
Назад
Таблицы
Графика
Тип результатов
Коеф. Сист. Frame Ver
Iso FI S W
Ux Uy Uz Rx Ry Rz
Rtot Utot
Комбинация 1
Мах перемещение = 249594 мм в узле 147
<X-Y-Z-Координаты>

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

Выбор типа расчета

Вид 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:

Однопоточный расчет

Оптимизация

Закрепление узлов

Задание стандартов ...

Вывод результатов

- Усилия
- Реакции
- Невязки

Итерации:

Точность:

Количество собственных форм:

Примечание: _____

Проект:

Исполнитель:

OK Отменить Помощь

Стандарты для элементов

Элементы

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

- Осреднение с весами
- Согласованные нагрузки
- Согласованные массы
- Нелинейные итерации
- Проверка по Штурму
- Инерция вращения
- Разреженный решатель
- Учёт изменения геометрии для эксцентриситетов
- Учёт конечных вращений для пластин
- Последовательное чтение / запись
- Нелинейный материал
- Расчет энергии

Число шагов нагрузки:

Оценка погрешностей

- Критерий 1
- Критерий 2
- Критерий 3
- Все критерии
- Без оценки

OK Отменить Помощь

Задание и корректировка комбинаций

Комбинации | Массы | Доп. на устойчивость

	НГ-1	НГ-2	НГ-3
К-1	1	1	1

Выбор типа решателя

- Профильный
- Разреженный
- Фронтальный

OK

Отменить

Шаг 10. Оцениваем перемещения и усилия в элементах оболочки.

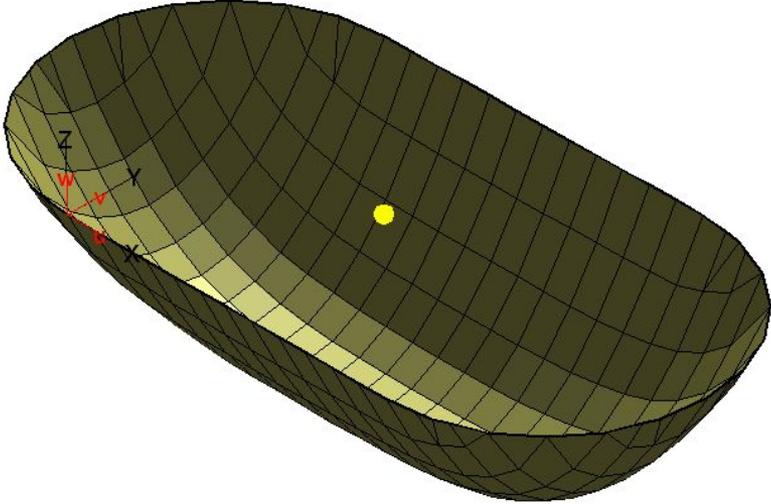
Проекты Растр Вставка Полный Виды иvw-Задать Фрагмент Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

Zoom Refr Print 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 ▶					

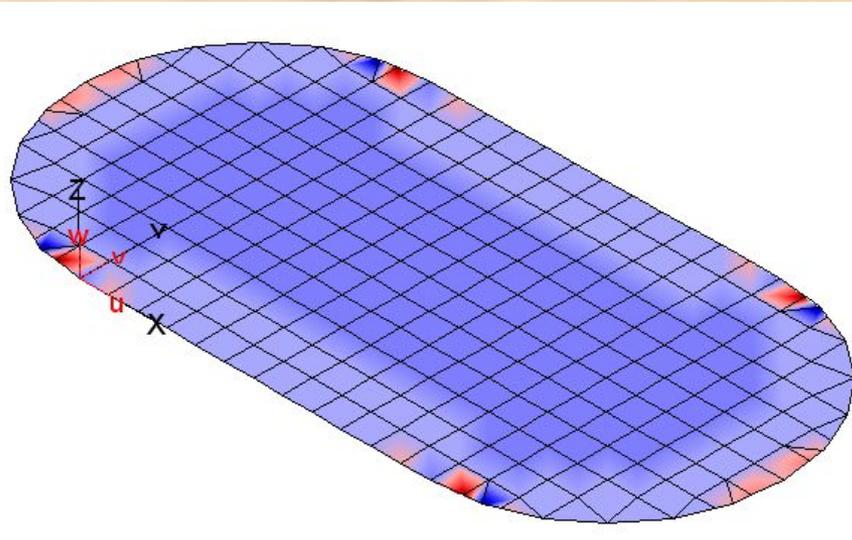


Max перемещение = 131.084 мм в узле 147

<X-Y-Z-Координаты>

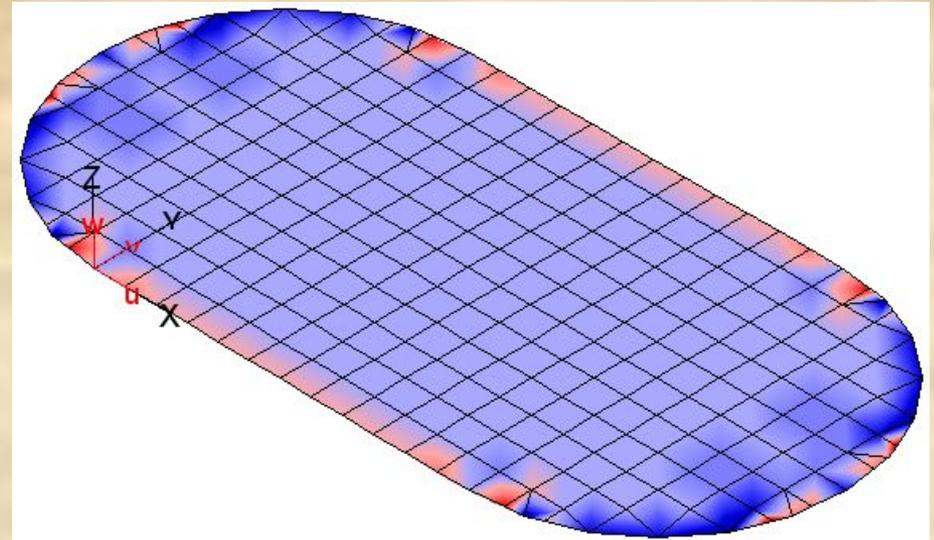
Шаг 11. Сопоставляем результаты линейного и нелинейного расчета.

Линейный расчет

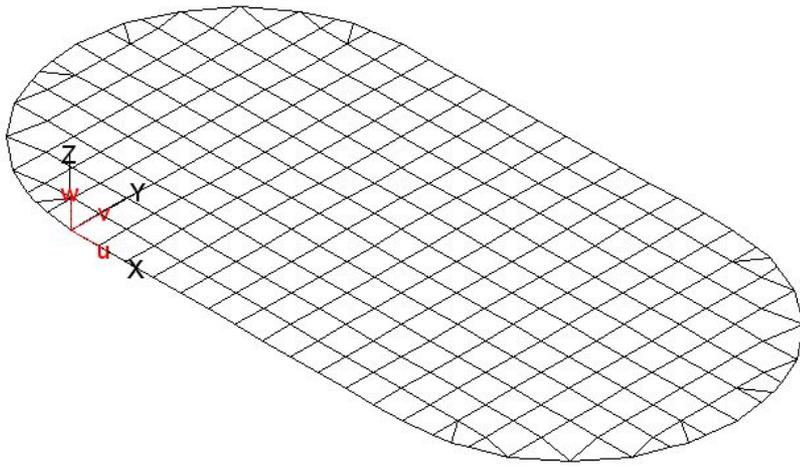


Min $M_r = -20.6182$ кНм/м, Max $M_r = 65.3456$ кНм/м

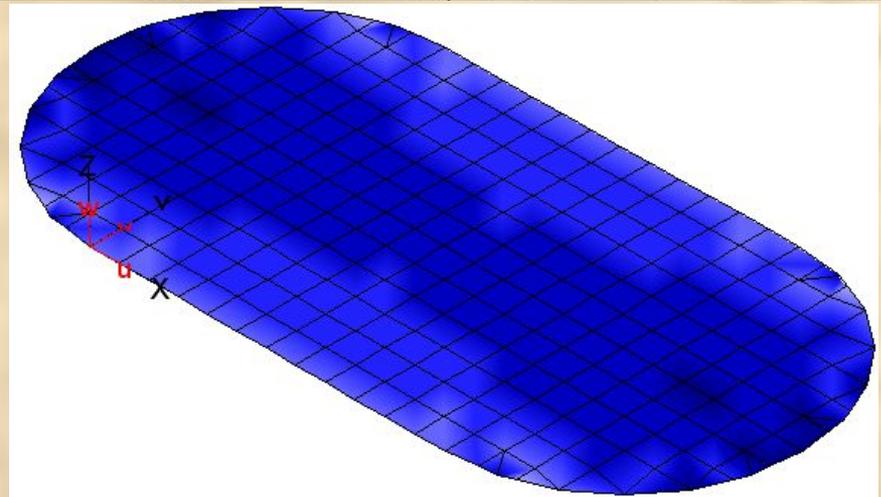
Нелинейный расчет



Min $M_r = -0.0739975$ кНм/м, Max $M_r = 0.08277$ кНм/м



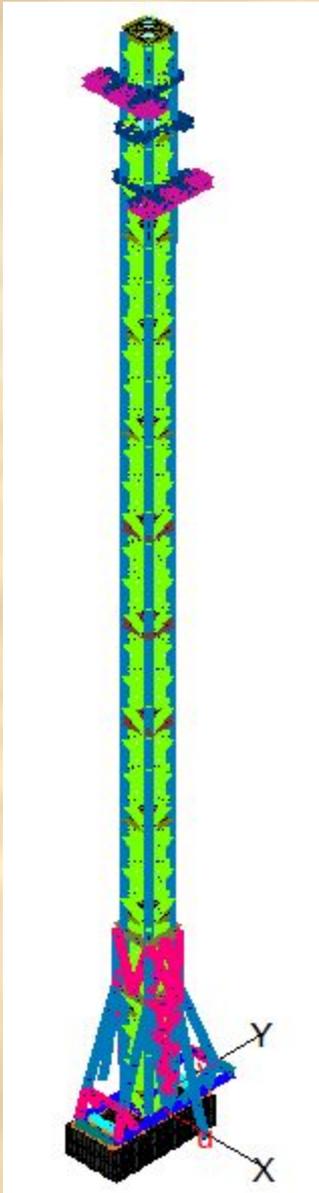
Min $S_r = 0$ кН/м², Max $S_r = 0$ кН/м²



Min $S_r = 3523.46$ кН/м², Max $S_r = 56183.7$ кН/м²

Параметр	Значение		
	Линейный расчет	Нелинейный расчет	%
Мах перемещение оболочки, мм	249594	131	190430
Мах M_r , кНм/м	65,3	0,08	81525
Мах S_r , кПа	0	56184	-

Упражнение №3 по моделированию нелинейных свойств конструкций

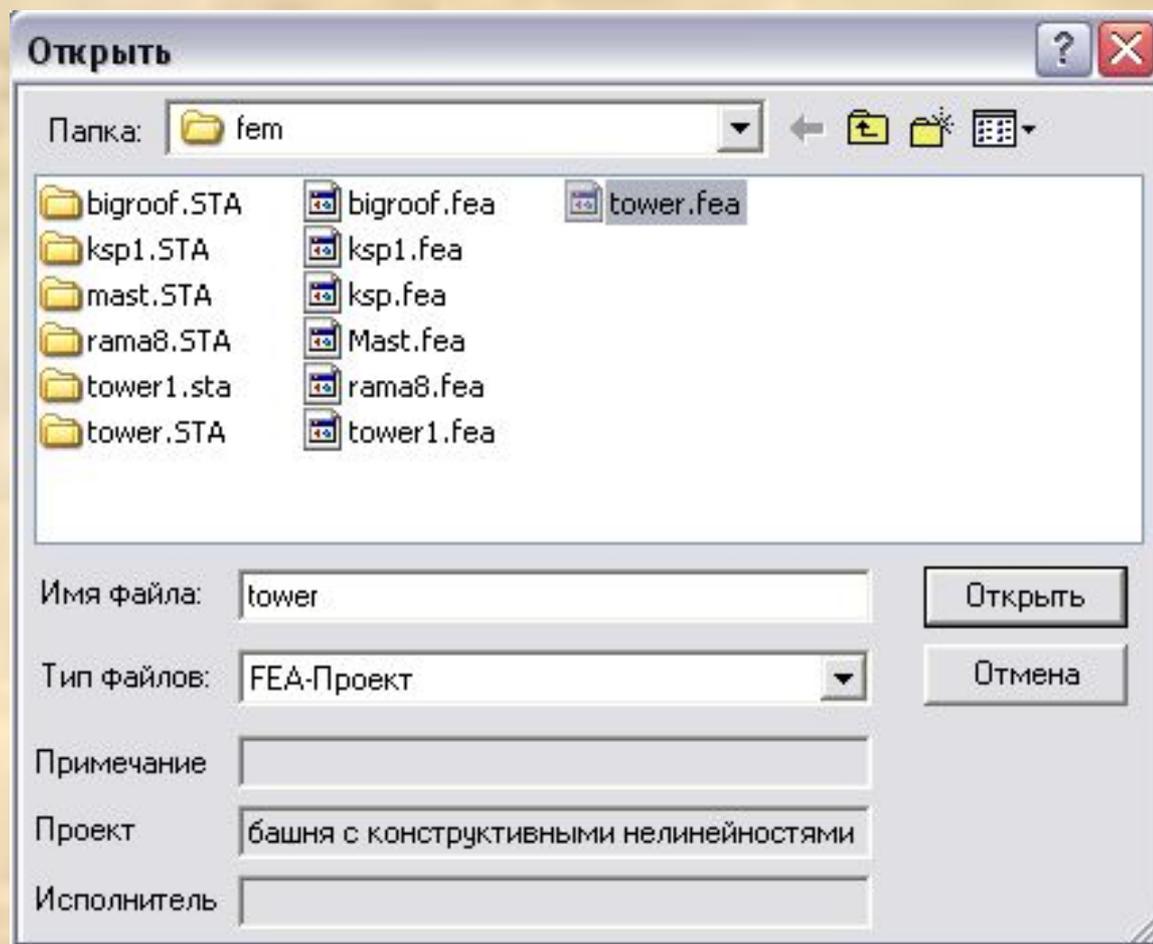


Имеется расчетная модель башни с нелинейными свойствами конструкций ([tower.fea](#)).

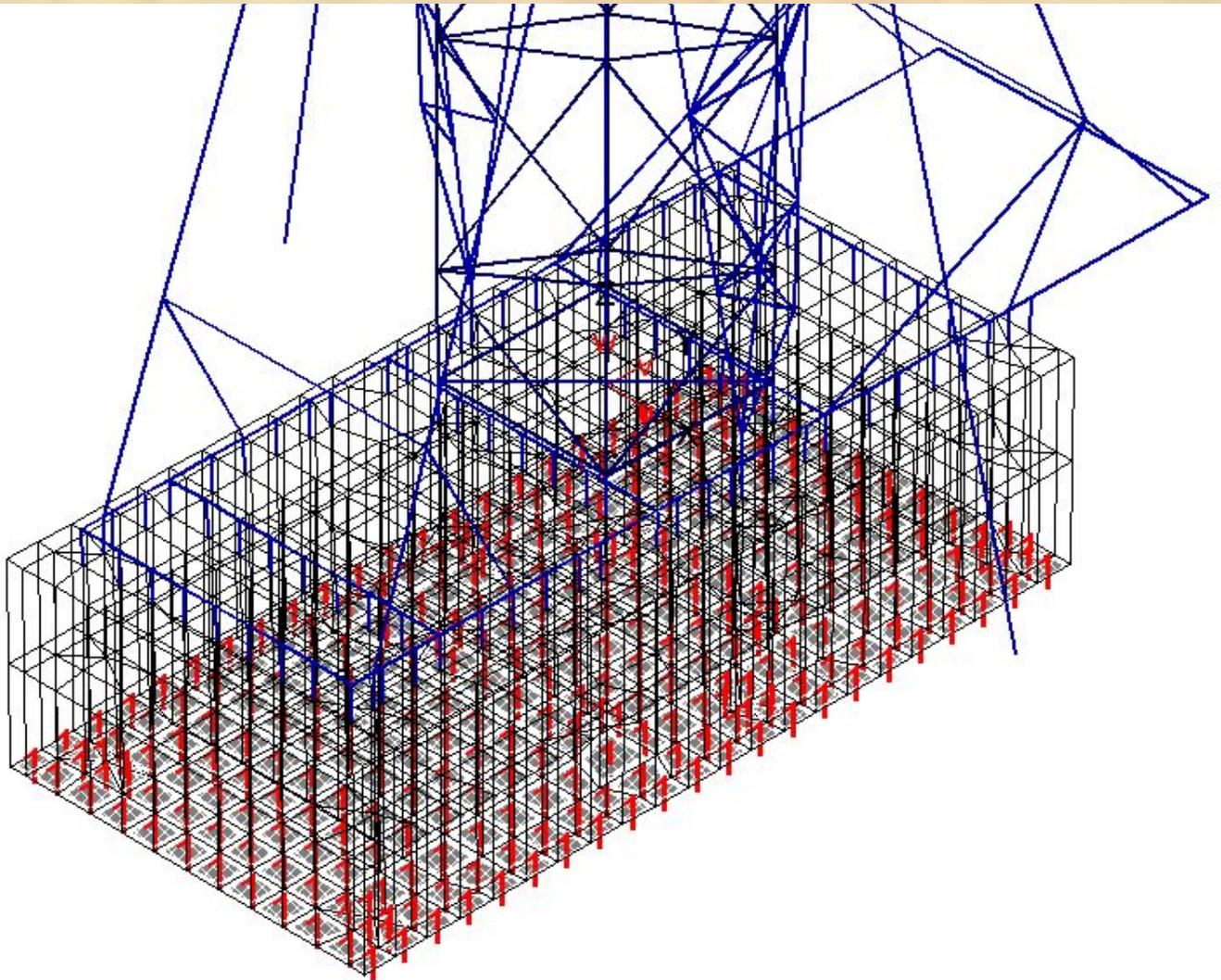
Требуется:

- 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, nuе	c1, c2	E, nuе, h1	
E, nuе, 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 расчета

Тип расчета

- Статический расчет
- Собственные колебания
- Устойчивость
- Формирование матриц

Итерационный расчет

Точность

Количество собственных форм

Диапазон искомых собств. значений до

Значение от до

Диагностика

- Проверка точности решения
- Проверка ортогональности

Вывод результатов

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

КЭ-модель

Элементы

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

- Осреднение с весами
- Согласованные нагрузки
- Согласованные массы

Проект башня с конструктивными нелинейностями

Примечание

Исполнитель ssss

OK Отменить Помощь

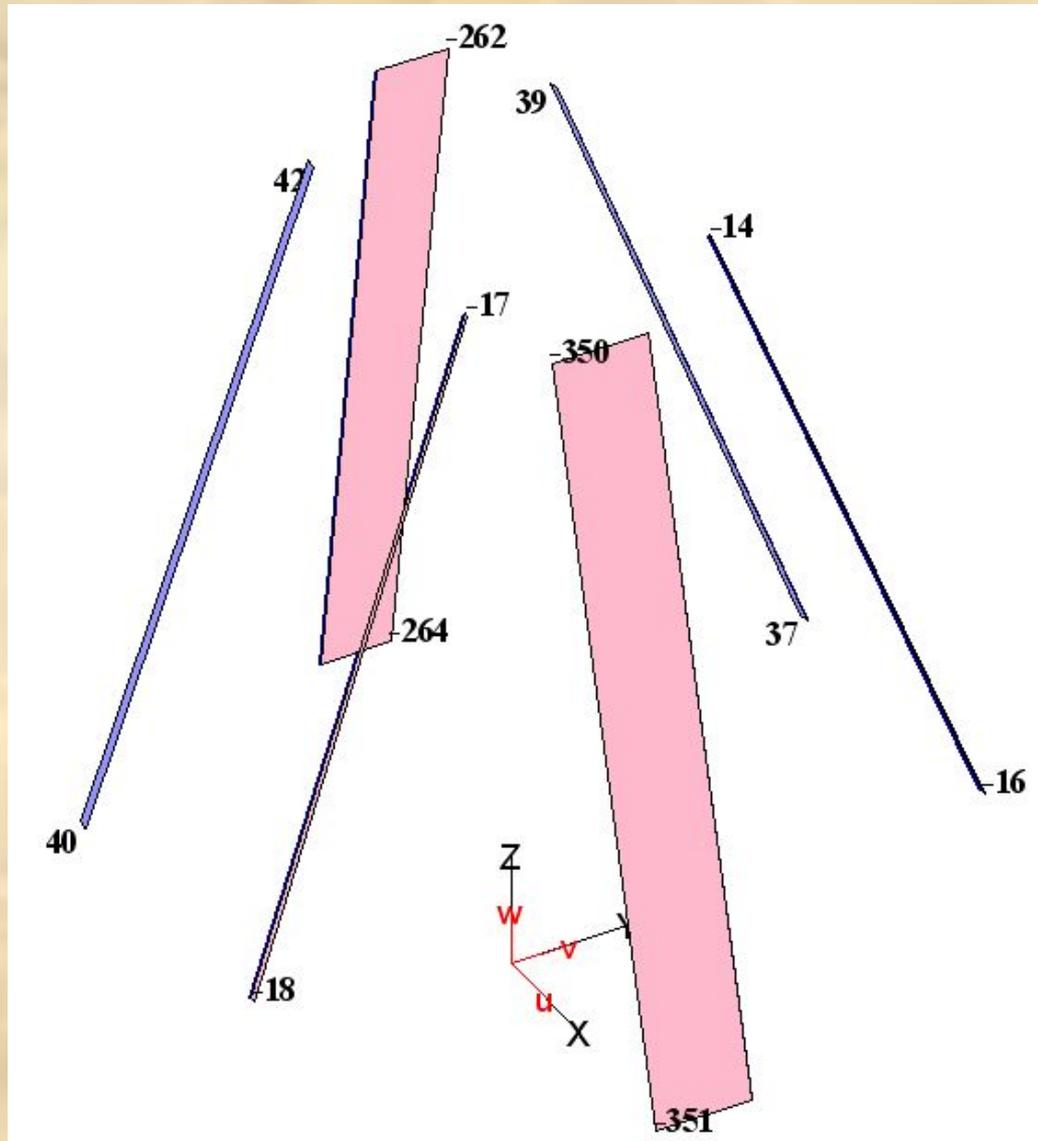
Выбор типа решателя

- Профильный
- Разреженный
- Фронтальный

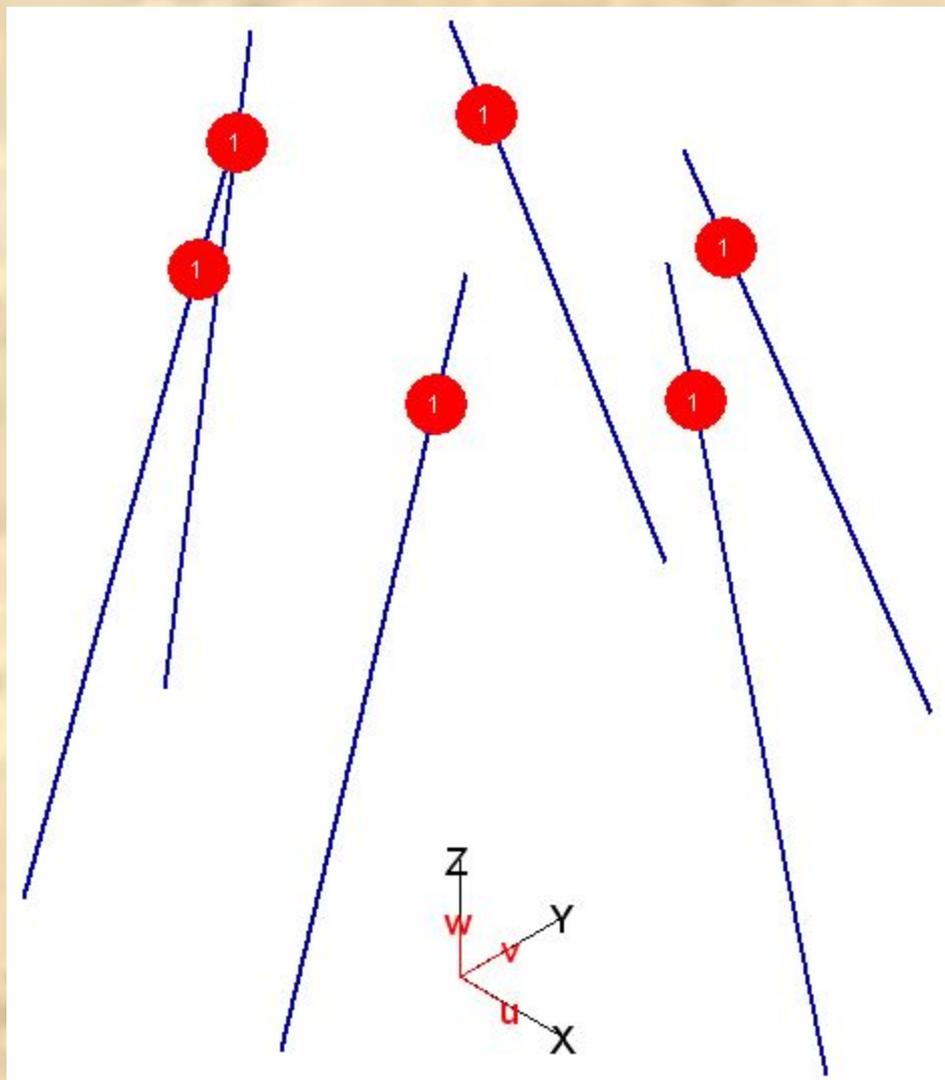
OK

Отменить

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

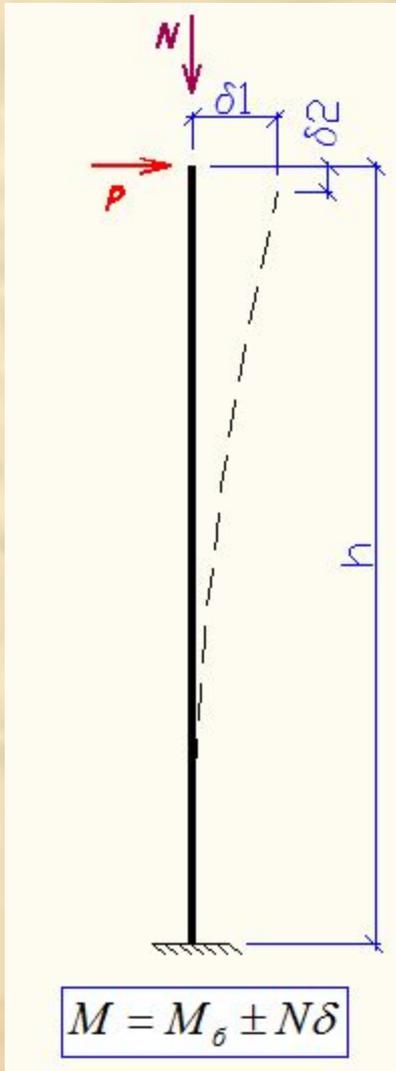


Шаг 5. Задаем односторонние шарниры в подкосах в местной системе координат от перемещения вдоль оси r .



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).



Выбор типа решателя

Профильный
Разреженный
Фронтальный

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 расчета

Вид 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

Итерации: 100
Точность: 1e-006
Количество собственных форм: 4

Точность: 0.0001

- Однопоточный расчет
- Оптимизация
- Закрепление узлов

Задание стандартов ...

Вывод результатов

- Усилия
- Реакции
- Невязки

Примечание

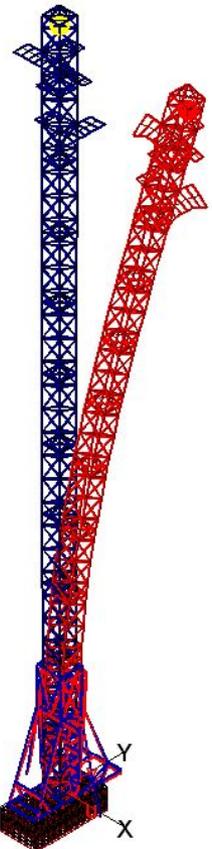
Проект: башня с конструктивными нелинейностями

Исполнитель: юра

Шаг 7. Оцениваем перемещения и усилия в элементах башни.

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

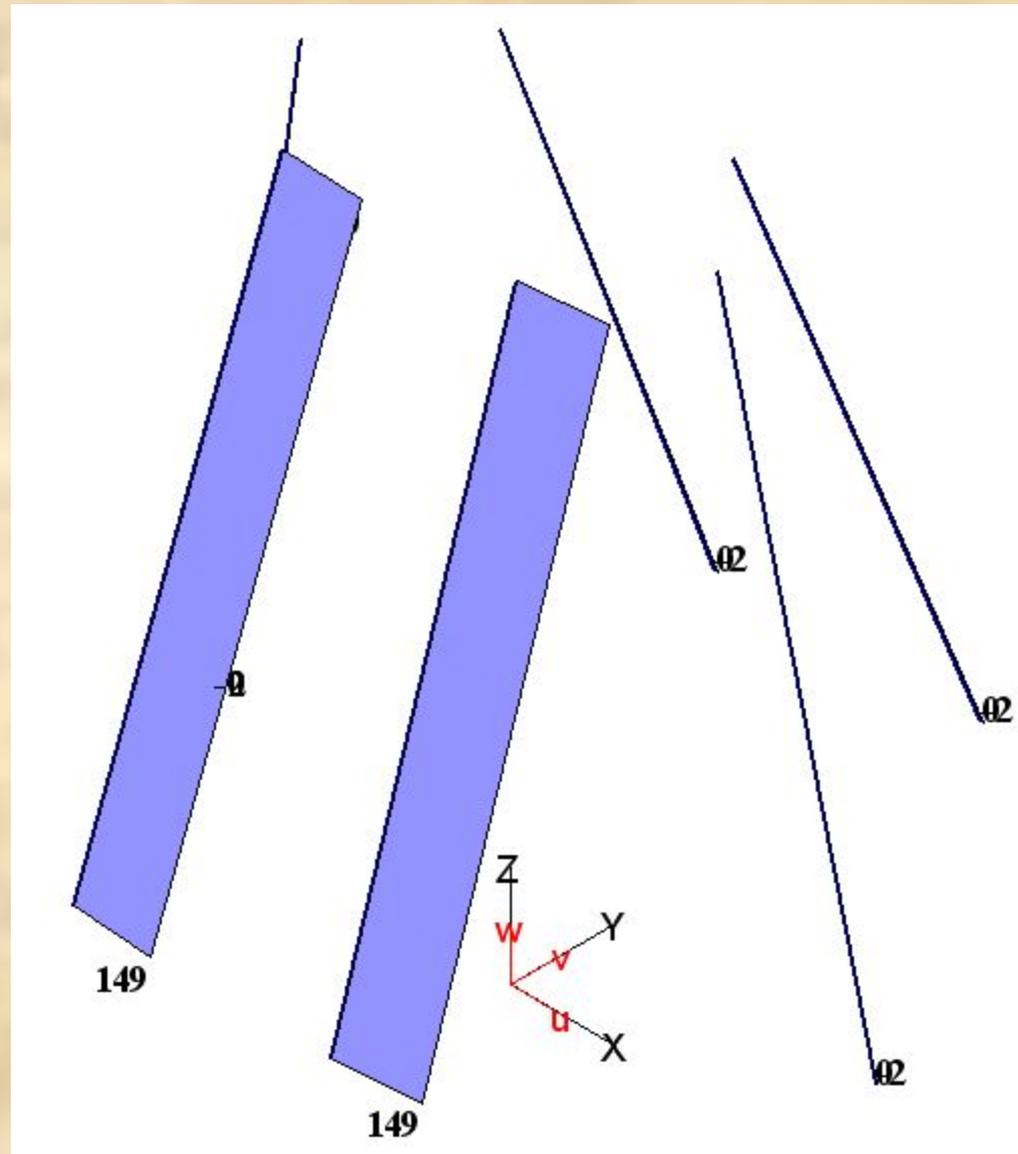
☐ 📄 ✂ 📏 📐 📊 📈 📉 📋 📌 📍 📎 📏 📐 📊 📈 📉 📋 📌 📍 📎



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 расчета

Тип расчета

- Статический расчет
- Собственные колебания
- Устойчивость
- Формирование матриц

Итерационный расчет

Точность:

Количество собственных форм:

Диапазон искомых собств. значений: от до

КЗ-модель

Элементы

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

- Осреднение с весами
- Согласованные нагрузки
- Согласованные массы

Диагностика

- Проверка точности решения
- Проверка ортогональности

Вывод результатов

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

Проект: башня с конструктивными нелинейностями

Примечание:

Исполнитель: \$\$\$\$

OK Отменить Помощь

Выбор типа решателя

- Профильный
- Разреженный
- Фронтальный

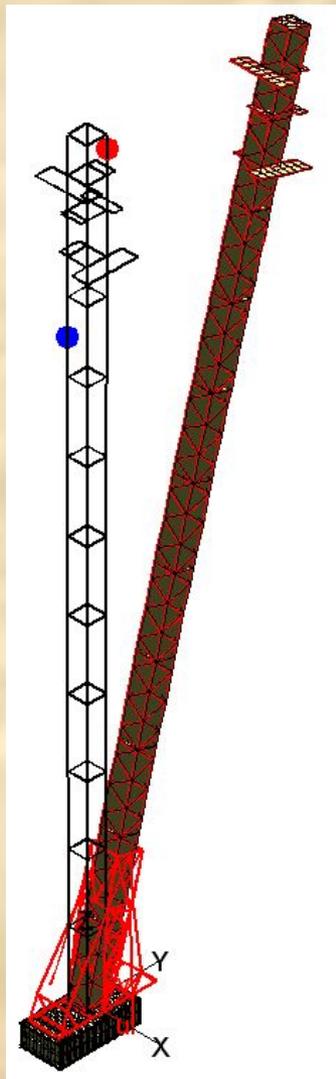
OK Отменить

Задание и корректировка комбинаций

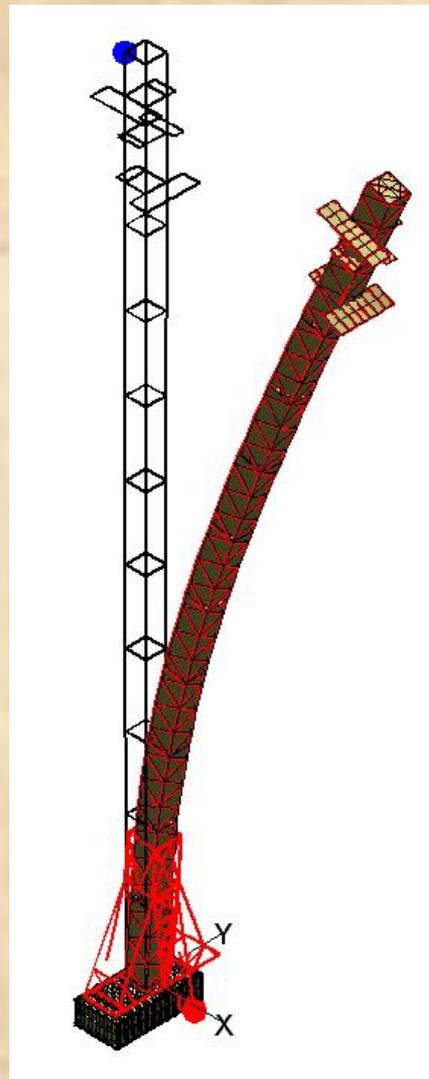
Комбинации	Массы	Доп. на устойчивость			
	НГ-1	НГ-2	НГ-3	НГ-	
К-1	0.1	0.1	0.1	0	

Шаг 9. Выполняем анализ форм колебаний.

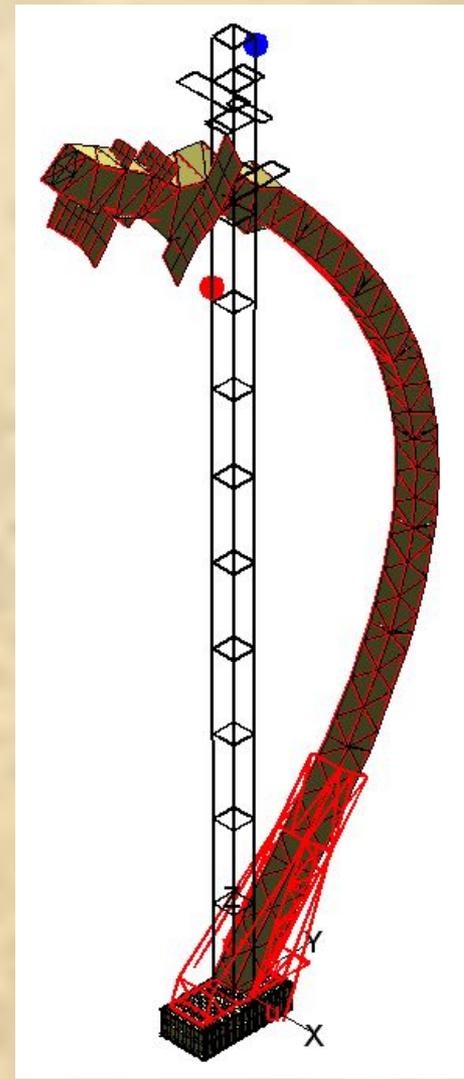
Форма 1



Форма 2



Форма 3



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

Выбор типа расчета

Вид 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

Итерации: 200

Точность: 1e-006

Количество собственных форм: 6

Точность: 0.0001

- Однопоточный расчет
- Оптимизация
- Закрепление узлов

Задание стандартов ...

Вывод результатов

- Усилия
- Реакции
- Невязки

Примечание

Проект: башня с конструктивными нелинейностями

Исполнитель: юра

OK Отменить Помощь

Выбор типа решателя

- Профильный
- Разреженный
- Фронтальный

OK

Отменить

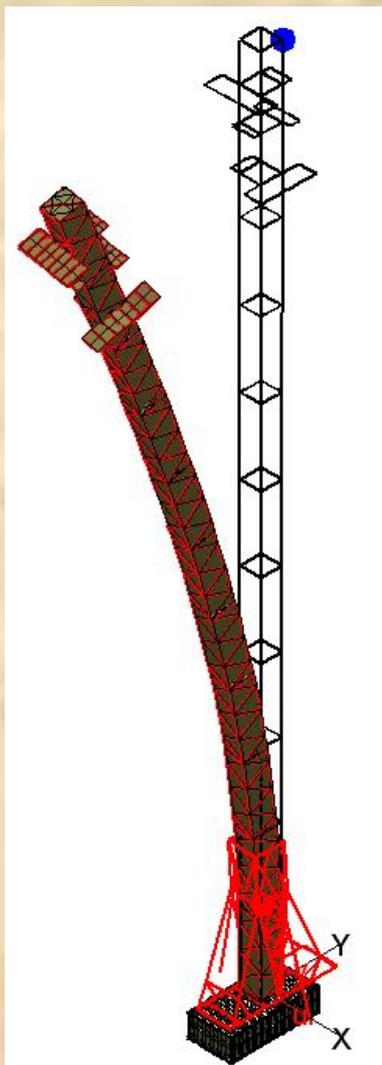
Задание и корректировка комбинаций

Комбинации | Массы | Доп. на устойчивость

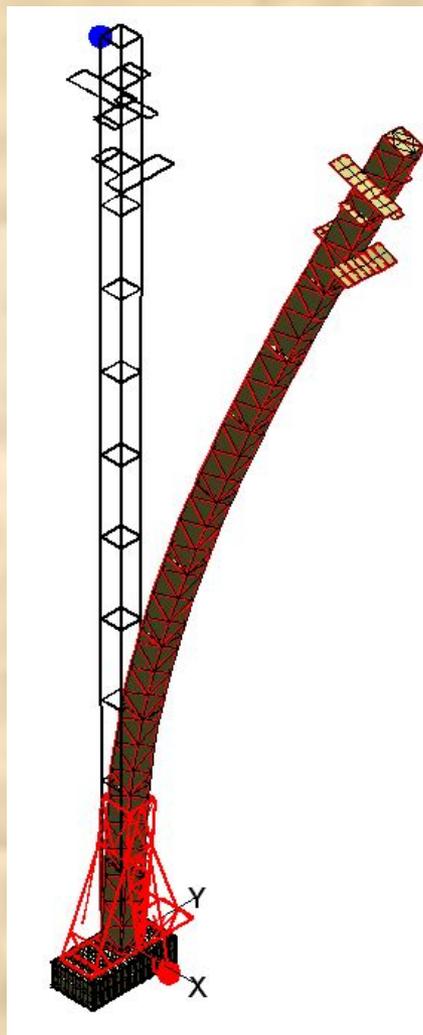
	НГ-1	НГ-2	НГ-3	НГ-4	НГ-5
К-1	1	1	1	1	0

Шаг 12. Выполняем анализ деформированных колебаний.

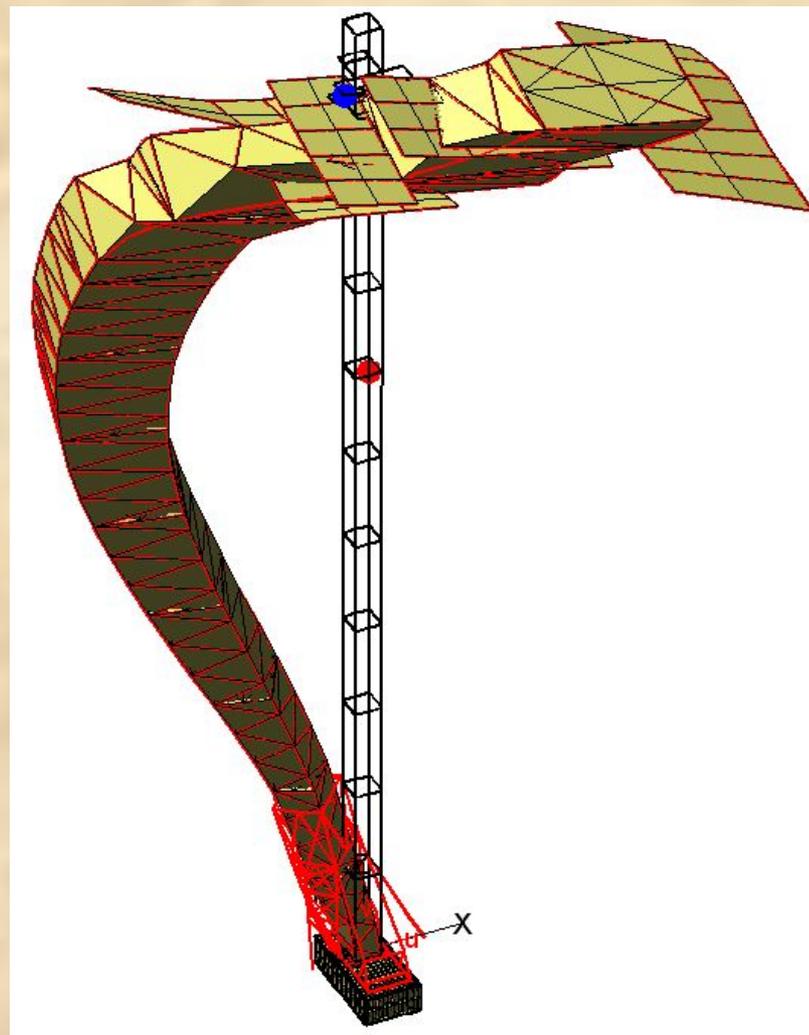
Форма 1



Форма 2



Форма 3



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

Проекты Растр Вставка Полный Види иvw-Задать Фрагмент Редактировать Расчет Комбинации Результаты Настройки ?

Zoom Refr Print XY YZ XZ 3D Einz Auto Box Krz

Назад
Таблицы
Графика
Тип результатов

Отметить
Отменить
Вывести

Отметьте узлы, которые нужно включить в группу

<X-Y-Z-Координаты>

Собственные частоты				
Комб.	Форма	ω рад/с	f Гц	T с
1	1	1.92	0.31	3.28
	2	2.00	0.32	3.14
	3	11.86	1.89	0.53
	4	13.38	2.13	0.47
	5	14.24	2.27	0.44
	6	20.71	3.30	0.30



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

№№ формы	Период, с		
	Линейный расчет	Нелинейный расчет	%
1	9,82	3,28	199
2	3,2	3,14	2
3	0,72	0,53	36
4	0,52	0,47	11
5	0,48	0,44	9
6	0,3	0,3	0