

Пример 8. Расчет мачты в геометрически нелинейной постановке

Цели и задачи:

- составить расчетную схему мачты;
- показать моделирование геометрической нелинейности.

Исходные данные:

Схема мачты и ее закрепление показаны на рис.8.1.

Металлическая мачта высотой 40 м.

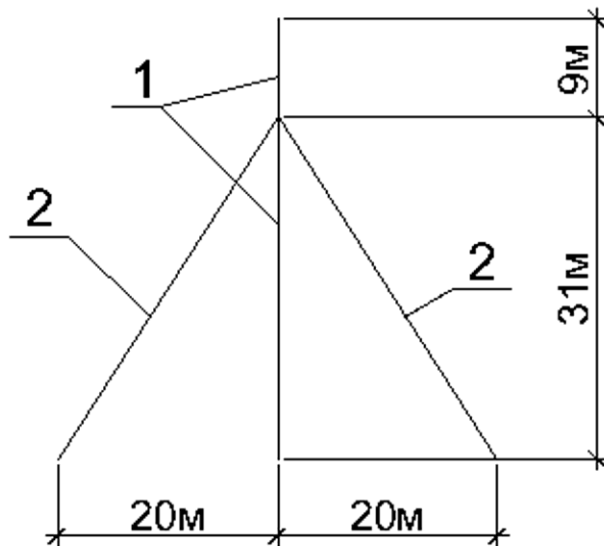
Сечения элементов мачты:

- стойка - три трубы 133 x 5;
- растяжки - канат, профиль - 20.

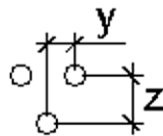
Состояние расчетной схемы анализируется по истечении 365 и 730 дней.

Нагрузки:

- загрузка 1 – собственный вес; сосредоточенная сила $P = 0.15$ т, приложенная на два верхних узла;
- загрузка 2 – ветровая нагрузка, II ветровой район, тип местности А.



1 - три трубы 133x5
2 - канат $\varnothing 20$





$y = 100$ см
 $z = 173,205$ см

Рис.8.1. Схема мачты

Для того чтобы начать работу с ПК ЛИРА-САПР®, выполните следующую команду Windows:
Пуск ⇒ Программы (Все программы) ⇒ LIRA SAPR ⇒ ЛИРА-САПР 2015 ⇒ ЛИРА-САПР 2015.

Этап 1. Создание новой задачи

- Для создания новой задачи откройте меню **Приложения** и выберите пункт **Новый** (кнопка  на панели быстрого доступа).
- В появившемся диалоговом окне **Описание схемы** (рис.8.2) задайте следующие параметры:
 - имя создаваемой задачи – **Пример8**;
 - в раскрывающемся списке **Признак схемы** выберите строку **2 – Три степени свободы в узле (перемещения X,Z,Uy) X0Z**.
- После этого щелкните по кнопке  – **Подтвердить**.

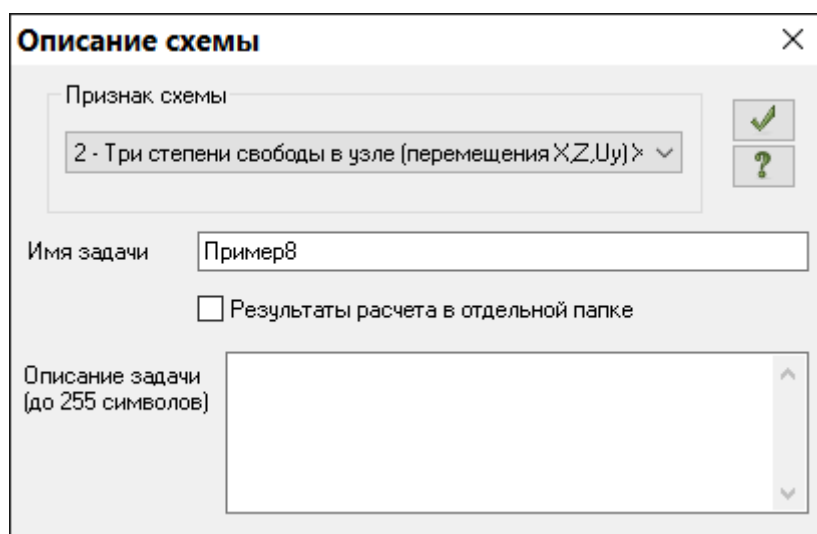




Рис.8.2. Диалоговое окно **Описание схемы**





Диалоговое окно **Описание схемы** также можно открыть с уже выбранным признаком схемы. Для этого в меню **Приложения** в раскрывающемся списке пункта **Новый** выберите команду  – **Второй признак схемы (Три степени свободы в узле)** или на панели

быстрого доступа в раскрывающемся списке **Новый** выберите команду  – **Второй признак схемы (Три степени свободы в узле)**. После этого нужно задать только имя задачи.

Установка флажка **Результаты расчета в отдельной папке** в диалоговом окне **Описание схемы** дает возможность сохранять все результаты расчета для конкретной задачи в отдельной папке с именем, которое совпадает с именем задачи. Данная папка создается в каталоге хранения результатов расчета. Это удобно в том случае, если нужно найти результаты расчета для конкретной задачи и последующей передаче файлов результатов расчета или просмотра и анализа этих файлов с помощью проводника или других файловых менеджеров.

Этап 2. Создание геометрической схемы мачты

- Вызовите диалоговое окно **Создание плоских фрагментов и сетей** щелчком по кнопке  – **Генерация регулярных фрагментов** (панель **Создание** на вкладке **Создание и редактирование**).
- В этом диалоговом окне задайте:
 - Шаг вдоль второй оси:

L(м)	N
1	40.
 - Остальные параметры принимаются по умолчанию (рис.8.3).
- После этого щелкните по кнопке  – **Применить**.

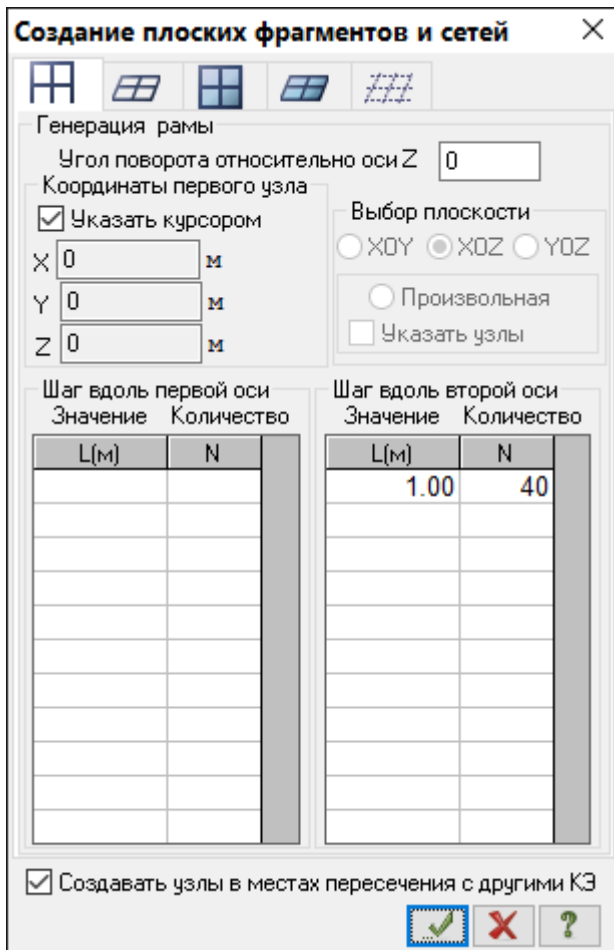




Рис.8.3. Диалоговое окно **Создание плоских фрагментов и сетей**

Добавление узлов

- Вызовите диалоговое окно **Добавить узел** щелчком по кнопке  – **Добавить узел** (панель **Создание** на вкладке **Создание и редактирование**).
- В этом диалоговом окне задайте координаты левого нижнего узла (рис.8.4):
 - X(м) Y(м) Z(м)

-20	0	0.
-----	---	----
- Щелкните по кнопке  – **Применить**.

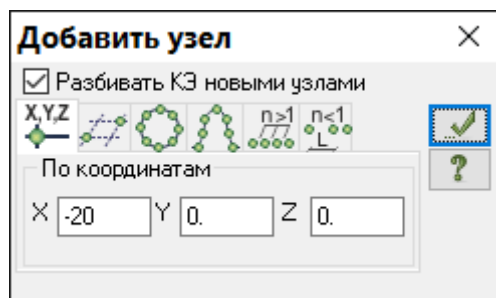





Рис.8.4. Диалоговое окно **Добавить узел**

- Затем введите координаты правого нижнего узла:
- **X(м) Y(м) Z(м)**
20 0 0.
- Щелкните по кнопке  – **Применить**.

Вывод на экран номеров узлов

- Щелкните по кнопке  – **Флаги рисования** на панели инструментов **Панель выбора** (по умолчанию находится в нижней области рабочего окна).
- В диалоговом окне **Показать** перейдите на вторую закладку **Узлы** и установите флажок **Номера узлов**.
- Щелкните по кнопке  – **Перерисовать**.

Добавление стержневых элементов

- В диалоговом окне **Добавить узел** перейдите на закладку **Разделить на N равных частей**.
- В поле ввода введите значение **N = 20** (рис.8.5).
- При установленном флажке **Соединить узлы стержнями** укажите последовательно курсором узлы № 42 и № 32, затем узлы № 43 и № 32 (при этом между ними протягивается резиновая нить).

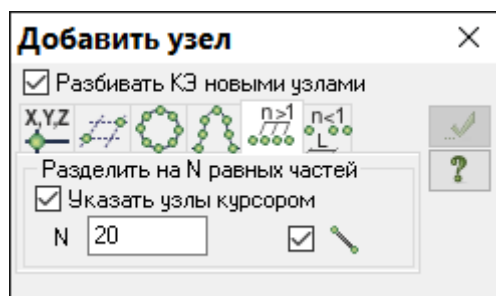


Рис.8.5. Диалоговое окно **Добавить узел**

На рис.8.6 представлена полученная схема.

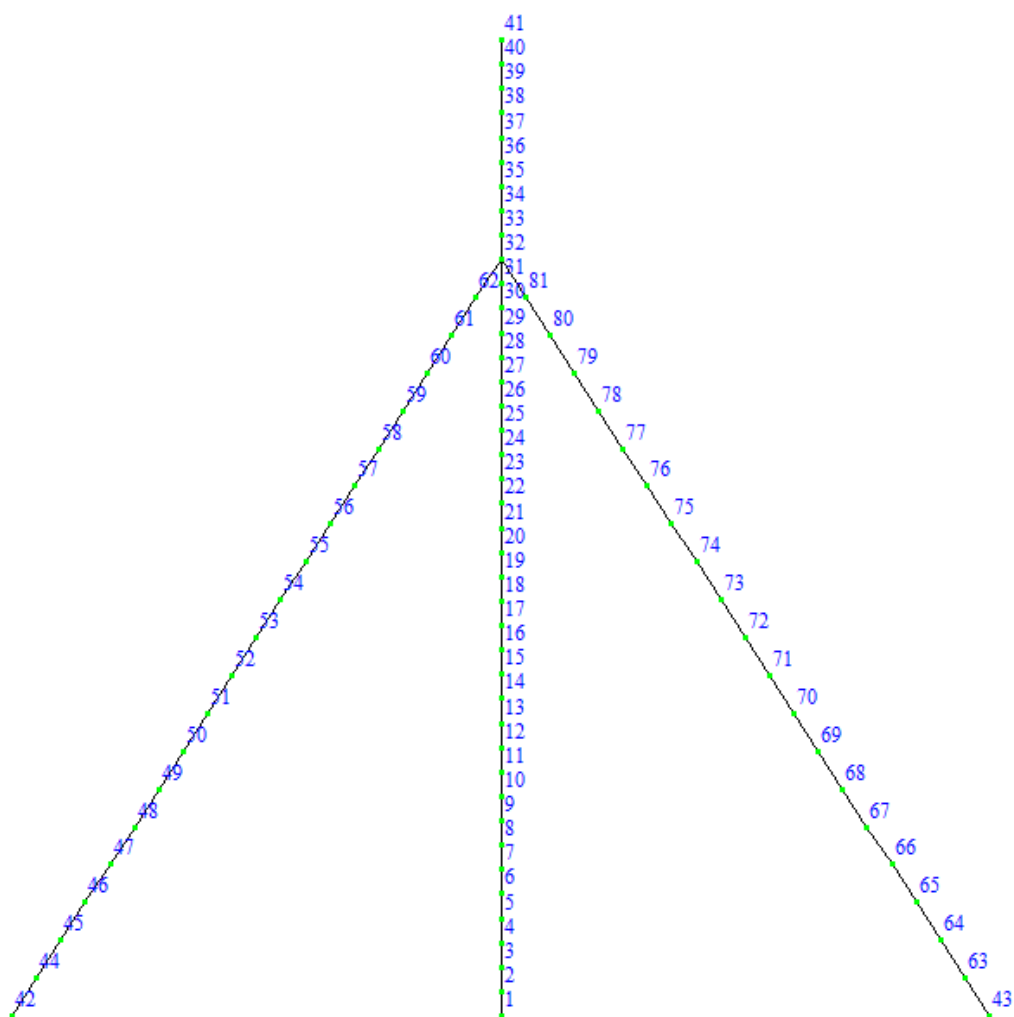





Рис.8.6. Расчетная схема с нумерацией узлов

[Сохранение информации о расчетной схеме](#)



- Для сохранения информации о расчетной схеме откройте меню **Приложения** и выберите пункт  **Сохранить** (кнопка  на панели быстрого доступа).
- В появившемся диалоговом окне **Сохранить как** задайте:
 - имя задачи – **Пример8**;
 - папку, в которую будет сохранена эта задача (по умолчанию выбирается папка – **Data**).
- Щелкните по кнопке **Сохранить**.

Этап 3. Задание граничных условий

Выделение узлов № 42 и 43

- Щелкните по кнопке  – **Отметка узлов** в раскрывающемся списке **Отметка узлов** на панели инструментов **Панель выбора**.
- С помощью курсора выделите узлы № 42 (нижний левый) и №43 (нижний правый) (узлы окрашиваются в красный цвет).

Задание граничных условий в узлах № 42 и 43

- Щелчком по кнопке  – **Связи** (панель **Жесткости и связи** на вкладке **Создание и редактирование**) вызовите диалоговое окно **Связи в узлах** (рис.8.7).
- В этом окне, с помощью установки флажков, отметьте направления, по которым запрещены перемещения узлов (**X, Z**).
- После этого щелкните по кнопке  – **Применить** (узлы окрашиваются в синий цвет).

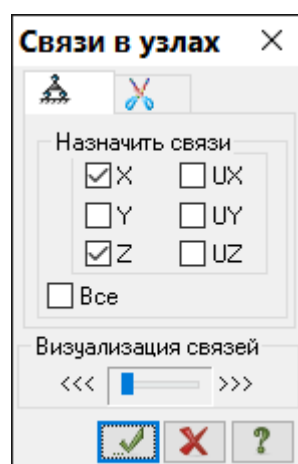







Рис.8.7. Диалоговое окно **Связи в узлах**

Задание граничных условий в узле № 1

- Выделите узел № 1.
- В диалоговом окне **Связи в узлах** отметьте направления, по которым запрещено перемещение узла (**X, Z, UY**). Для этого необходимо установить еще и флажок по направлению **UY**.
- Щелкните по кнопке  – **Применить**.
- Щелкните по кнопке  – **Отметка узлов** в раскрывающемся списке **Отметка узлов** на панели инструментов **Панель выбора**, чтобы снять активность с операции выделения узлов.

Этап 4. Смена типа конечных элементов

- Щелкните по кнопке  – **Отметка элементов** в раскрывающемся списке **Отметка элементов** на панели инструментов **Панель выбора**.
- С помощью курсора выделите все элементы схемы.
- Щелчком по кнопке  – **Смена типа КЭ** (панель **Схема** на вкладке **Расширенное редактирование**) вызовите диалоговое окно **Смена типа конечного элемента** (рис.8.8).
- В этом окне в списке типов конечных элементов выделите строку **Тип 310 – геометрически нелинейный универсальный пространственный стержневой КЭ (нить)**.
- Щелкните по кнопке  – **Применить**.

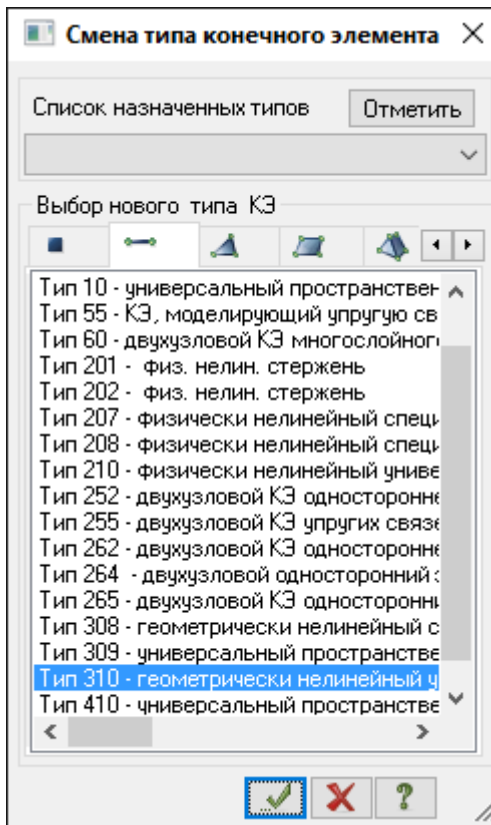



Рис.8.8. Диалоговое окно **Смена типа конечного элемента**

Этап 5. Задание жесткостных параметров элементам мачты

Формирование типов жесткости

- Щелчком по кнопке  – **Жесткости и материалы элементов** (панель **Жесткости и связи** на вкладке **Создание и редактирование**) вызовите диалоговое окно **Жесткости и материалы** (рис.8.9,а).
- В этом окне щелкните по кнопке **Добавить** и в появившемся окне **Добавить жесткость** (библиотеке жесткостных характеристик) щелкните по второй закладке **База металлических сечений** (рис.8.9,б).
- Выберите двойным щелчком мыши на элементе графического списка тип сечения **Три трубы**.

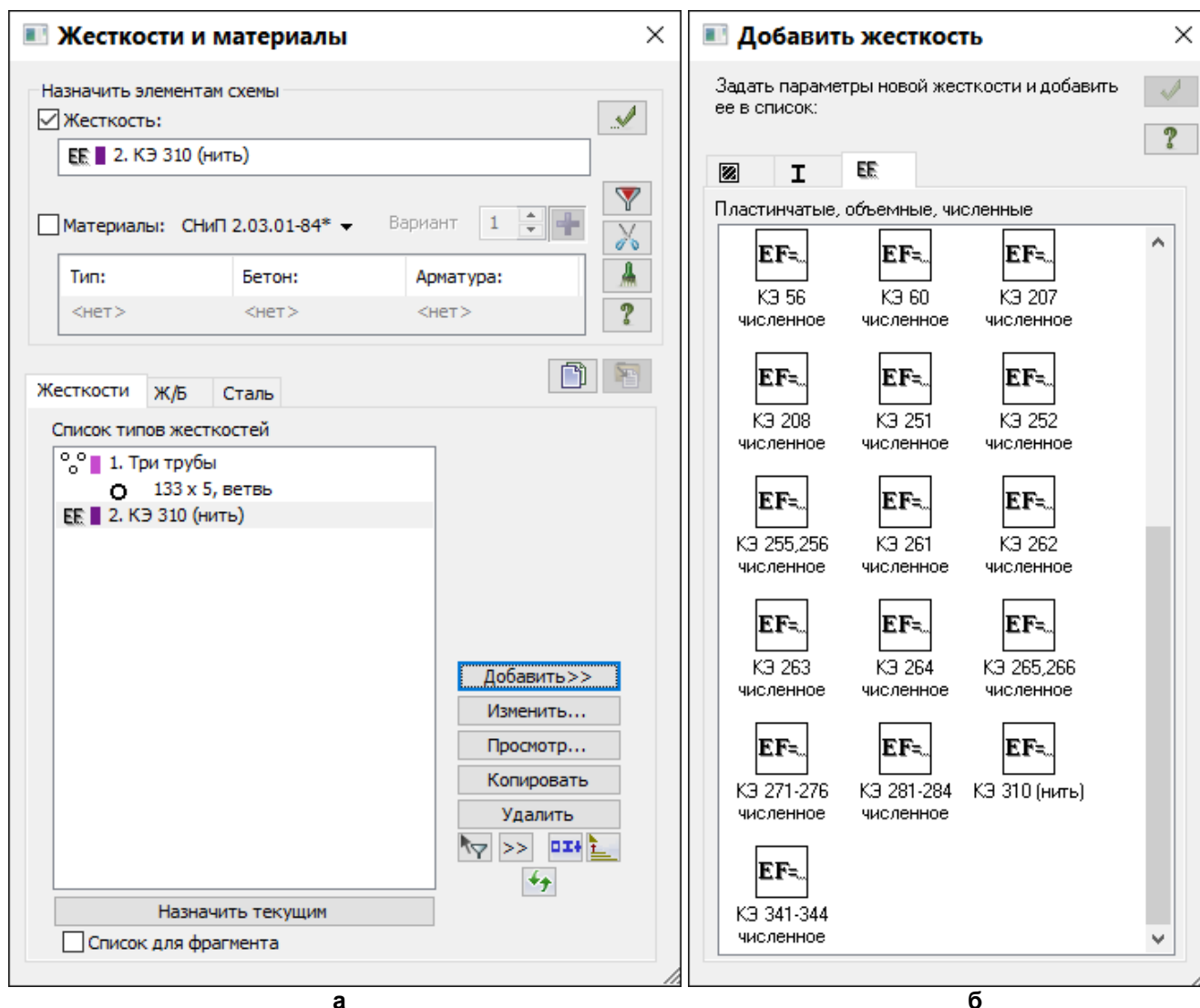


Рис.8.9. Диалоговые окна: а – Жесткости и материалы, б – Добавить жесткость

- В диалоговом окне **Стальное сечение** выделите курсором строку **ветвь** и задайте параметры сечения ветви (рис.8.10):
 - в раскрывающемся списке – **Профиль** сначала выберите позицию – **Труба бесшовная горячекатаная**;
 - после этого в следующем списке выберите строку профиля – **133 х 5**.
- Далее щелкните по кнопке **Стыковка**.

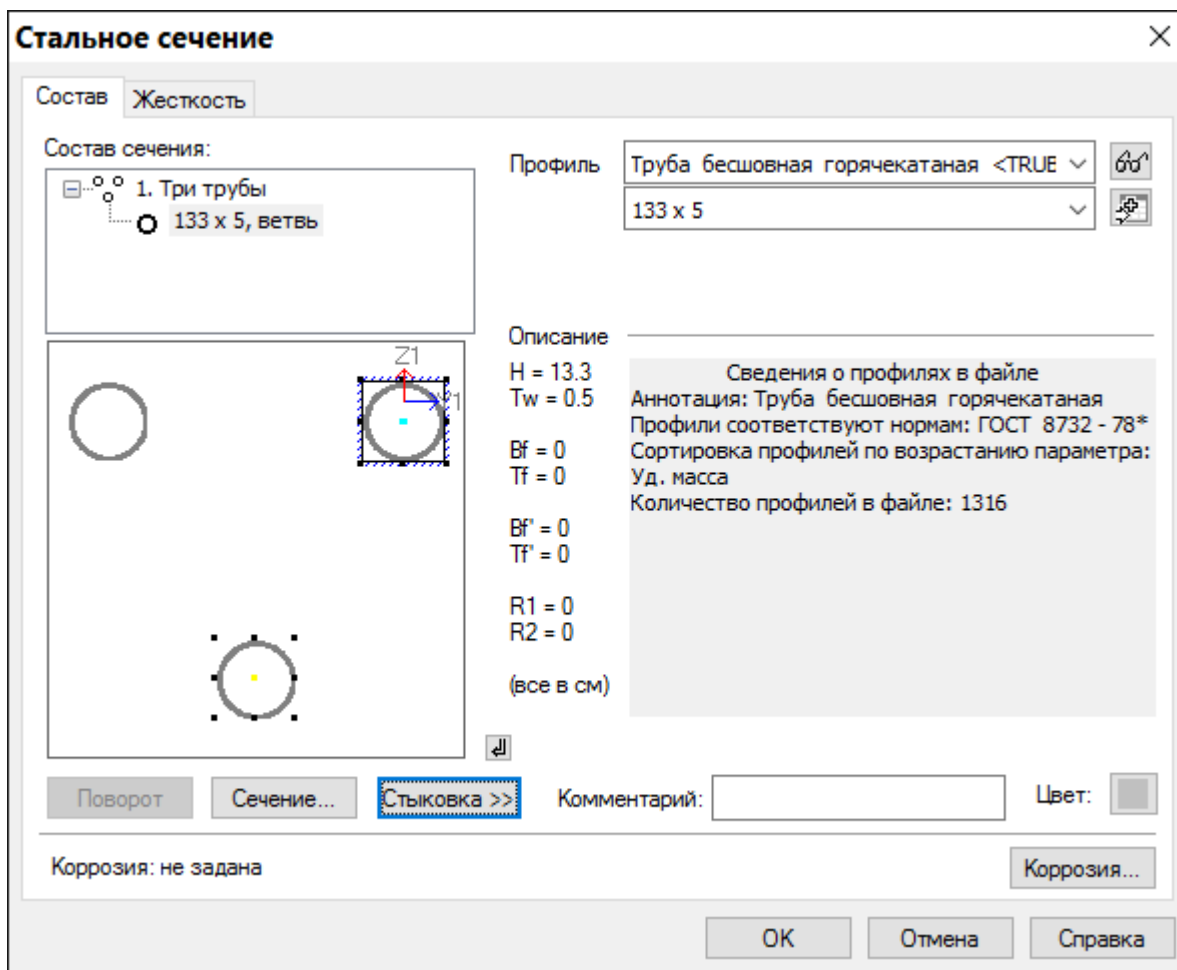


Рис.8.10. Диалоговое окно **Стальное сечение**

- В диалоговом окне **Стыковка** (рис.8.11) введите значение $Y = 100$ см (значение Z при установленном флажке **Равносторонний треугольник** вычисляется автоматически).
- Для ввода данных щелкните по кнопке **ОК**.

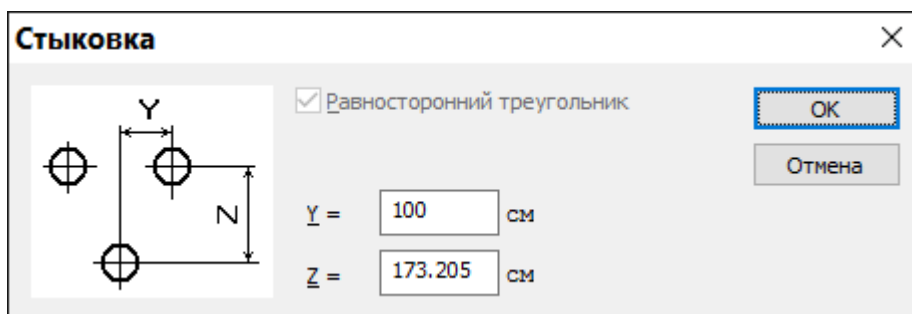


Рис.8.11. Диалоговое окно **Стыковка**

- Затем в диалоговом окне **Стальное сечение** щелкните по кнопке **ОК**.
- Далее в диалоговом окне **Добавить жесткость** перейдите на третью закладку численного описания жесткости.
- Выберите тип сечения **КЭ 310 (нить)**.
- В новом диалоговом окне **Численное описание КЭ 310 (нить)** включите радио-кнопку **Сортамент** (рис.8.12).

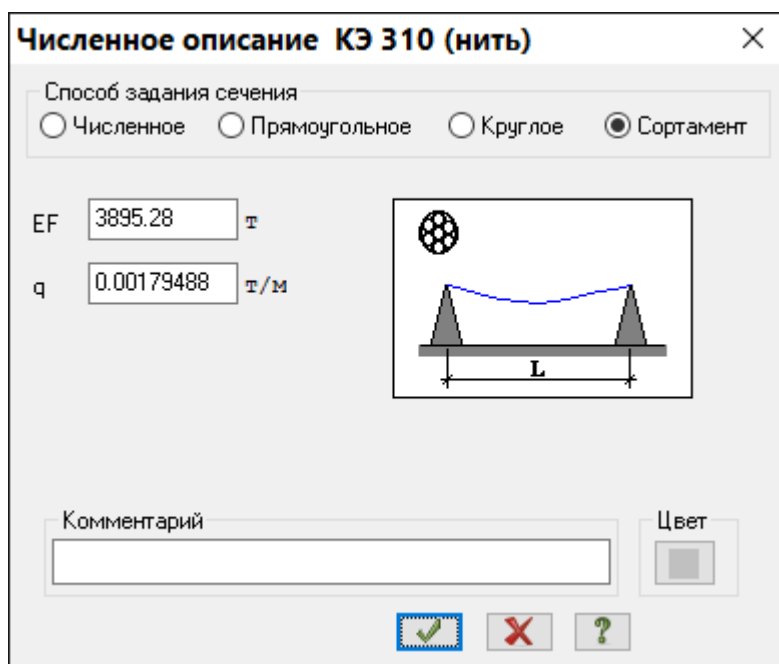


Рис.8.12. Диалоговое окно Численное описание КЭ 310 (нить)

- В появившемся диалоговом окне **Стальное сечение** (рис.8.13) задайте параметры сечения **Канат**:
 - в раскрывающемся списке – **Профиль** сначала выберите позицию – **Канат одинарной свивки типа ТК конструкции 1х37(1+6+12+18)**;
 - после этого в следующем списке выберите строку профиля – **20**.
- Для ввода данных щелкните по кнопке **ОК**.

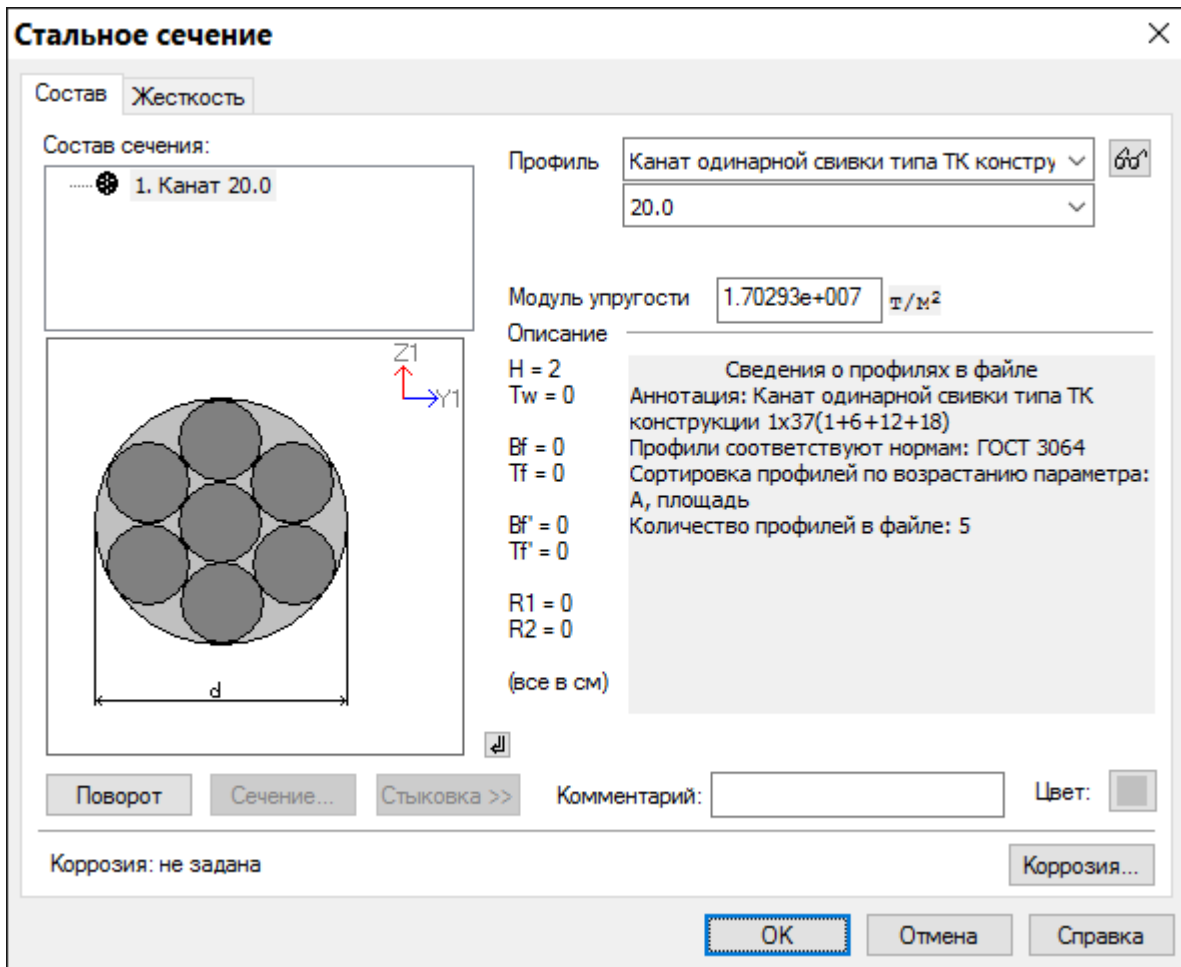





Рис.8.13. Диалоговое окно **Стальное сечение**




В диалоговое окно **Численное описание КЭ 310 (нить)** в поля EF и q будут внесены автоматически вычисленные значения осевой жесткости (EF) и погонного веса (q).

- После этого в диалоговом окне **Численное описание КЭ 310 (нить)** щелкните по кнопке **Подтвердить**. ✓
- Для того чтобы скрыть библиотеку жесткостных характеристик, в диалоговом окне **Жесткости и материалы** щелкните по кнопке **Добавить**.

Назначение жесткостей элементам мачты

- При активной кнопке  – **Отметка элементов** с помощью курсора выделите все элементы схемы.
- В диалоговом окне **Жесткости и материалы** щелкните по кнопке  – **Применить**.
- После этого в диалоговом окне **Жесткости и материалы** в списке типов жесткостей выделите курсором тип жесткости **1.Три трубы**.
- Щелкните по кнопке **Назначить текущим** (при этом выбранный тип жесткости записывается в строке редактирования **Жесткость** поля **Назначить элементам схемы**. Можно назначить текущий тип жесткости двойным щелчком на строке списка).
- После этого щелкните по кнопке  – **Отметка вертикальных стержней** на панели инструментов **Панель выбора**.
- С помощью курсора выделите все вертикальные элементы схемы.

- Затем в диалоговом окне **Жесткости и материалы** щелкните по кнопке  – **Применить**.
- На экране появляется диалоговое окно **Предупреждение** (рис.8.14), в котором щелкните по кнопке **Да**.

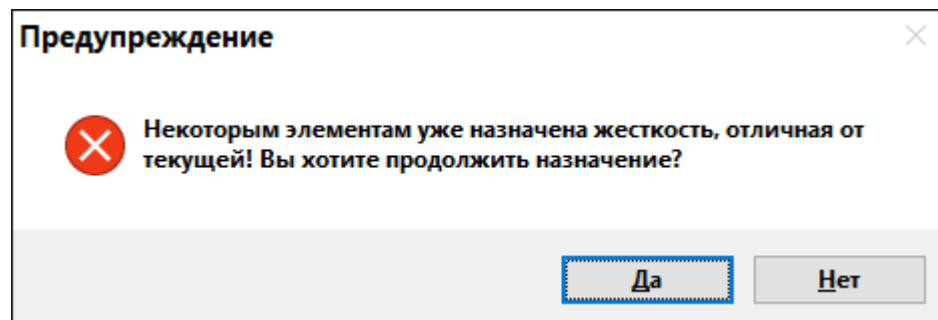




Рис.8.14. Диалоговое окно **Предупреждение**

Этап 6. Задание нагрузок

Формирование загрузки № 1

- Щелчком по кнопке  – **Добавить собственный вес** (панель **Нагрузки** на вкладке **Создание и редактирование**) вызовите диалоговое окно **Добавить собственный вес** (рис.8.15).
- В этом окне, при включенной радио-кнопке **все элементы схемы**, в поле **Коефф. надежности по нагрузке** задайте коэффициент равен **1.05** (так как в системе **РС-САПР** (Редактируемый сортамент) погонный вес элементов задан нормативным, то его нужно преобразовать в расчетный
- Щелкните по кнопке  – **Применить** (всем элементам конструкции автоматически назначается равномерно распределенная нагрузка, равная погонному весу элементов).

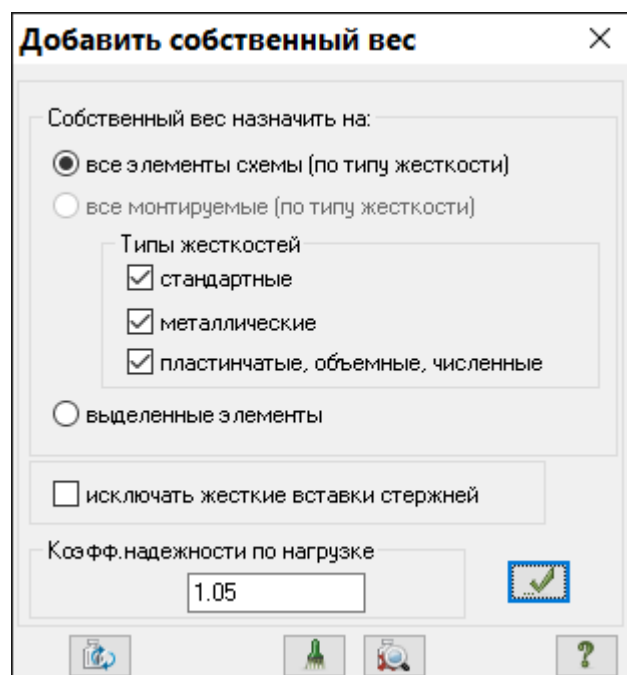




Рис.8.15. Диалоговое окно **Добавить собственный вес**

- Щелкните по кнопке  – **Отметка узлов** в раскрывающемся списке **Отметка узлов** на панели инструментов **Панель выбора**.

- С помощью курсора выделите узлы № 40 и №41.
- Вызовите диалоговое окно **Задание нагрузок** (рис.8.16) выбрав команду  – **Нагрузка на узлы** в раскрывающемся списке **Нагрузки на узлы и элементы** (панель **Нагрузки** на вкладке **Создание и редактирование**).
- В этом окне по умолчанию указана система координат **Глобальная**, направление – вдоль оси **Z**.

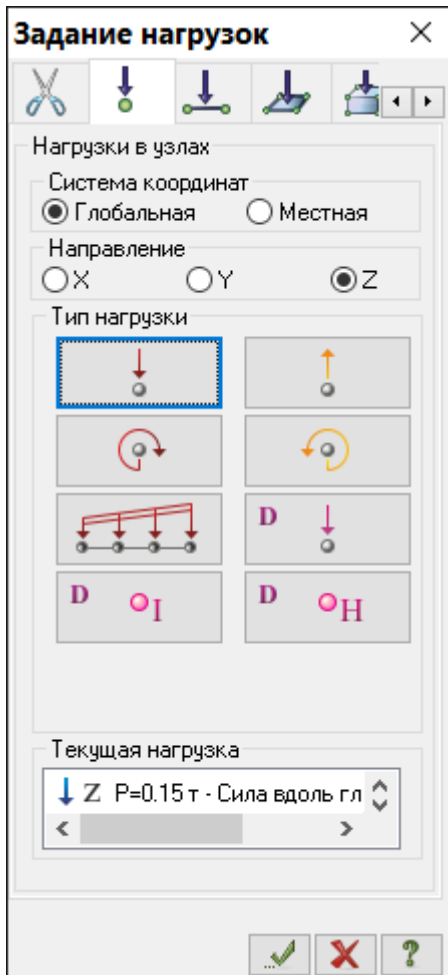



Рис.8.16. Диалоговое окно **Задание нагрузок**

- Щелчком по кнопке сосредоточенной силы вызовите диалоговое окно **Параметры нагрузки**.
- В этом окне задайте величину нагрузки **P = 0.15 т** (рис.8.17).
- Щелкните по кнопке  – **Подтвердить**.

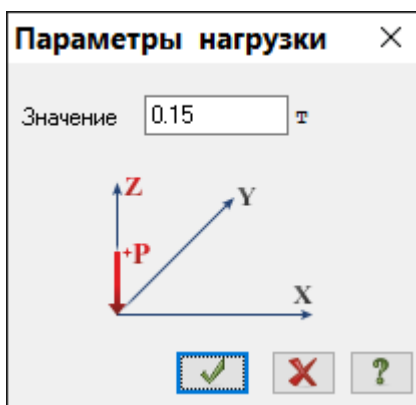






Рис.8.17. Диалоговое окно **Параметры нагрузки**

Вывод на экран номеров элементов

- В диалоговом окне **Показать** перейдите на первую закладку **Элементы** и установите флажок **Номера элементов**.
- Щелкните по кнопке  – **Перерисовать**.

Формирование загрузки № 2

- Смените номер текущего загрузки щелчком по кнопке  – **Следующее загрузка** в строке состояния (находится в нижней области рабочего окна).
- Щелчком по кнопке  – **ПолиФильтр** на панели инструментов **Панель выбора** вызовите диалоговое окно **ПолиФильтр** (рис.8.18).
- В этом окне перейдите на вторую закладку **Фильтр для элементов**.
- Далее установите флажок **По номерам КЭ** и в соответствующем поле введите номера элементов **1–10**.
- После этого щелкните по кнопке  – **Применить**.

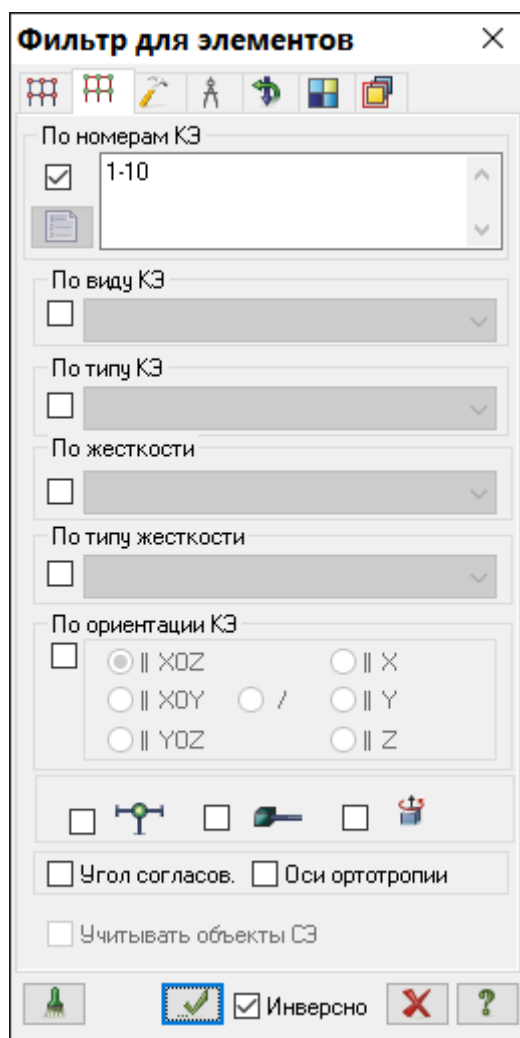


Рис.8.18. Диалоговое окно **Фильтр для элементов**

- В диалоговом окне **Задание нагрузок** перейдите на третью закладку **Нагрузки на стержни**.
- Затем включите радио-кнопку **X** для задания направление воздействия нагрузки (рис.8.19).

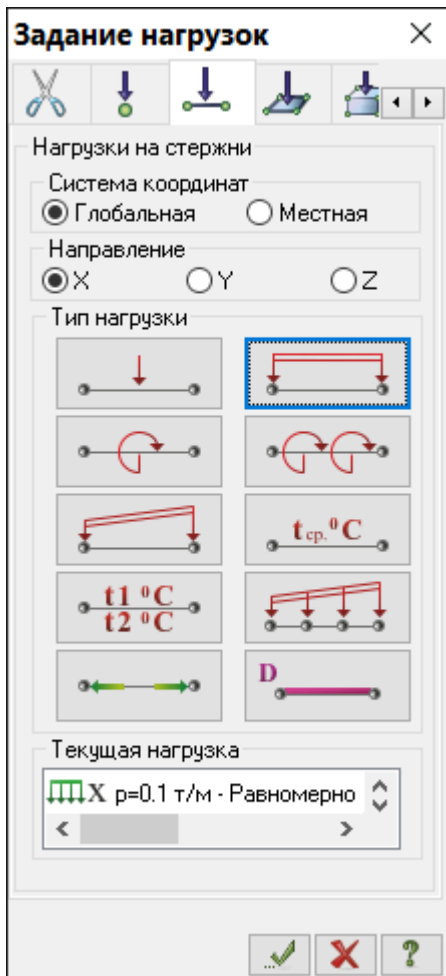





Рис.8.19. Диалоговое окно **Задание нагрузок**

- Щелчком по кнопке равномерно распределенной нагрузки вызовите диалоговое окно **Параметры**.
- В этом окне задайте интенсивность нагрузки $p = 0.1$ т/м.
- Щелкните по кнопке  – **Подтвердить**.
- После этого в диалоговом окне **Фильтр для элементов** введите номера элементов **11 – 20**.
- Щелкните по кнопке  – **Применить**.
- Далее в диалоговом окне **Задание нагрузок** щелчком по кнопке трапецевидной нагрузки на группу стержней вызовите диалоговое окно **Неравномерная нагрузка** (рис.8.20).
- В этом окне задайте значение нагрузки в начале и в конце ее приложения: $p_1 = 0.1$ т/м, $p_2 = 0.12$ т/м.
- Для указания направления изменения величины нагрузки включите радио-кнопку **Вдоль оси Z**.
- Щелкните по кнопке  – **Подтвердить**.

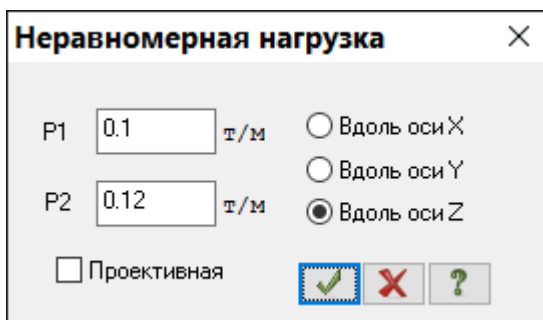







Рис.8.20. Диалоговое окно **Неравномерная нагрузка**

- После этого в диалоговом окне **Фильтр для элементов** введите номера элементов **21 – 40**.
- Щелкните по кнопке  – **Применить**.
- Далее в диалоговом окне **Задание нагрузок** щелчком по кнопке трапецевидной нагрузки на группу стержней вызовите диалоговое окно **Неравномерная нагрузка**.
- В этом окне задайте значение нагрузки в начале и в конце ее приложения: $p_1 = 0.12$ т/м, $p_2 = 0.15$ т/м, включите радио-кнопку **Вдоль оси Z**.
- Щелкните по кнопке  – **Подтвердить**.

Этап 7. Моделирование нелинейных загрузений с учетом ползучести бетона

- Щелчком по кнопке  – **Шаговый метод** (панель **Нелинейность** на вкладке **Расчет**) вызовите диалоговое окно **Моделирование нелинейных загрузений конструкции** (рис.8.21).
- В этом окне для создания последовательности приложения нагрузок щелкните по кнопке  – **Добавить** (в левой части окна в поле **История** добавляется первая история нагружений и автоматически выделяется строка загрузения обозначенная знаком вопроса).
- Далее для первого загрузения задайте следующие параметры:
 - № загрузения – 1;
 - в раскрывающемся списке **Метод расчета** выберите строку **(4) Автоматический выбор шага для геометрически и физически нелинейных задач**;
 - в раскрывающемся списке **Печать** выберите строку **Перемещения и усилия после каждого шага**;
 - в раскрывающемся списке **Вывод промежуточных результатов** выберите строку **Выводить все**.
- После этого, для того чтобы добавить строку задания параметров второго загрузения, при выделенной строке первого загрузения щелкните по кнопке  – **Добавить**.
- Далее для второго загрузения задайте следующие параметры:
 - № загрузения – 2;
 - в раскрывающемся списке **Метод расчета** выберите строку **(4) Автоматический выбор шага для геометрически и физически нелинейных задач**;
 - в раскрывающемся списке **Печать** выберите строку **Перемещения и усилия после каждого шага**;
 - в раскрывающемся списке **Вывод промежуточных результатов** выберите строку **Выводить все**.

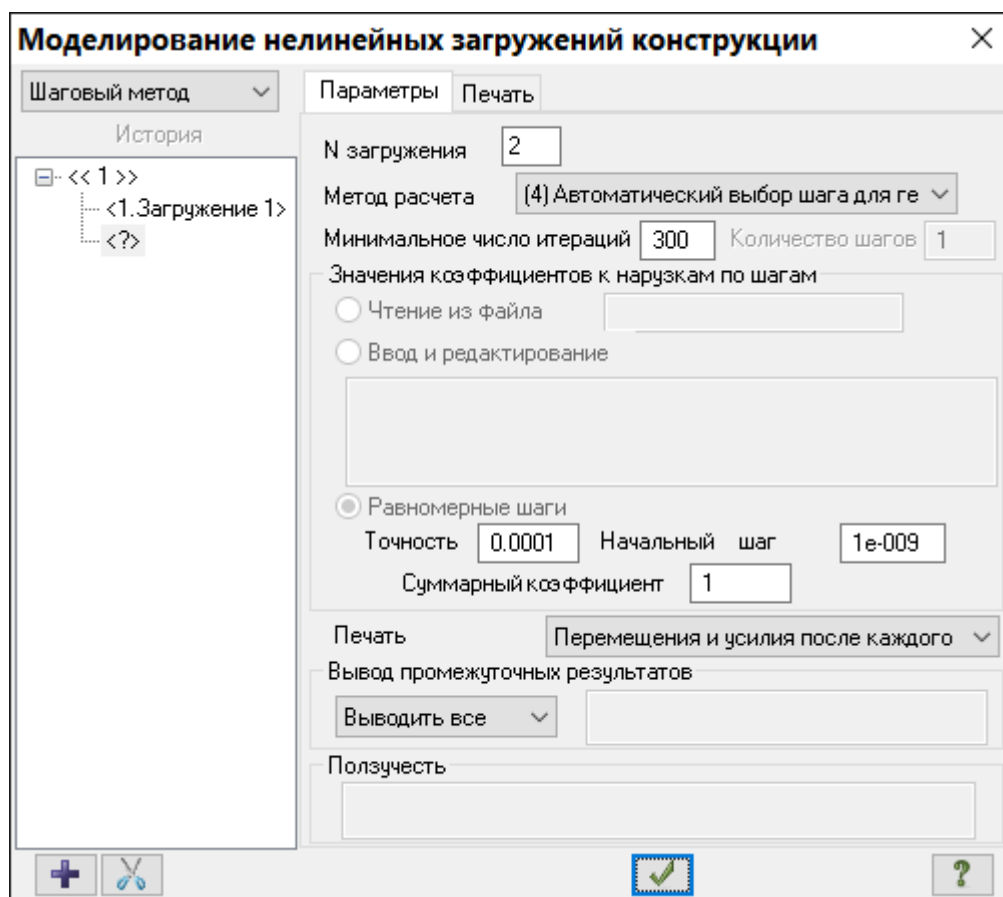




Рис.8.21. Диалоговое окно **Моделирование нелинейных нагружений конструкции**

- Для ввода данных щелкните по кнопке  – **Подтвердить**.

Этап 8. Геометрически нелинейный расчет мачты

- Запустите задачу на расчет щелчком по кнопке  – **Выполнить полный расчет** (панель **Расчет** на вкладке **Расчет**).

Этап 9. Просмотр и анализ результатов расчета



После расчета задачи, просмотр и анализ результатов геометрически нелинейного расчета осуществляется на вкладке **Анализ**.

- В режиме просмотра результатов расчета по умолчанию расчетная схема отображается с учетом перемещений узлов (рис.8.22). Для отображения схемы без учета перемещений узлов щелкните по



кнопке – **Исходная схема** (панель **Деформации** на вкладке **Анализ**).

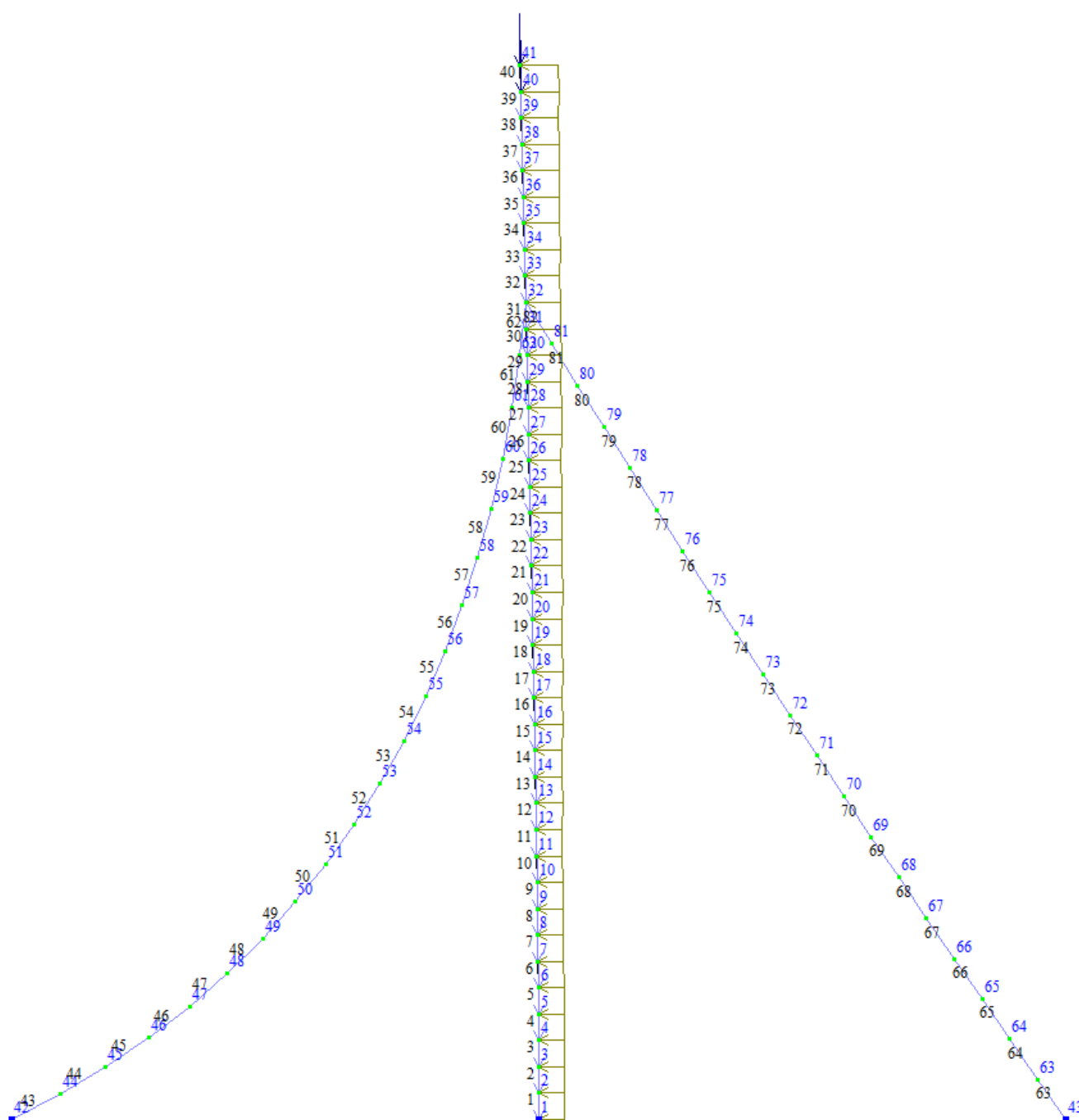







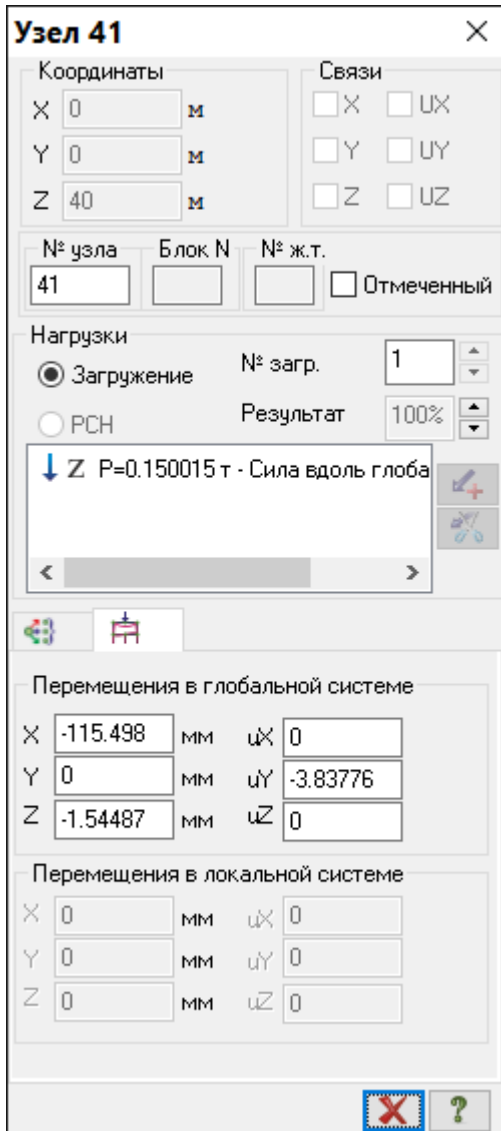
Рис.8.22. Расчетная схема с учетом перемещений узлов

Вывод на экран мозаик перемещений и усилий

- Чтобы вывести на экран мозаику перемещений по направлению X, выберите команду  – **Мозаика перемещений в глобальной системе** в раскрывающемся списке **Мозаика/изополя** и после этого щелкните по кнопке  – **Мозаика перемещений по X** (панель **Деформации** на вкладке **Анализ**).
- Для вывода мозаики усилия N, выберите команду  – **Мозаика усилий в стержнях** в раскрывающемся списке **Эпюры/мозаика** и после этого щелкните по кнопке  – **Мозаика N** (панель **Усилия в стержнях** на вкладке **Анализ**).

Вывод информации о выбранном узле

- Для просмотра информации о перемещениях в одном из узлов, щелкните по кнопке  – **Информация об узле или элементе** на панели инструментов **Панель выбора**.
- Укажите курсором на узел № 41. Открывается диалоговое окно **Узел 41** (рис.8.23), которое содержит № узла, № загрузки и величину нагрузки на заданный узел, значения перемещений узла в глобальной системе координат.
- Для просмотра промежуточных результатов переключите счетчик **Результат**.



Узел 41 [X]

Координаты

X 0 м

Y 0 м

Z 40 м

Связи

X UX

Y UY

Z UZ

№ узла 41

Блок N

№ ж.т.

Отмеченный

Нагрузки

Загрузка № загр. 1

РСН Результат 100%

↓ Z P=0.150015 т · Сила вдоль глоба

← →

← →

Перемещения в глобальной системе

X -115.498 мм uX 0

Y 0 мм uY -3.83776

Z -1.54487 мм uZ 0

Перемещения в локальной системе

X 0 мм uX 0

Y 0 мм uY 0

Z 0 мм uZ 0

[X] [?]

Рис.8.23. Диалоговое окно **Информация об узле № 41**

Вывод информации о выбранном элементе

➤ Укажите курсором на элемент № 1. Открывается диалоговое окно **Элемент 1** (рис.8.24).

Рис.8.24. Диалоговое окно **Информация об элементе № 1**



Окно содержит номер элемента, номера его узлов на схеме, номер блока, в который входит рассматриваемый элемент, указатель отметки элемента на схеме, тип жесткости, библиотечный тип конечного элемента, количество расчетных сечений, длину и координаты центра тяжести элемента в глобальной системе координат, скроллинг номеров загрузок, скроллинг номеров сечений, скроллинг промежуточных результатов. Окно содержит следующие закладки:

- список заданных нагрузок;
- параметры коэффициентов постели;
- параметры жестких вставок;
- наличие и направление шарниров;
- угол вращения местных осей;
- значения усилий в сечении стержня в текущем загрузении.

Установленный флажок **Эпюры** позволяет получить эпюры усилий и перемещений в текущем стержневом элементе, отображаемые в окне **Эпюры усилий**.

Щелчок по кнопке с наименованием эпюры в окне **Эпюры усилий** позволяет убрать или добавить соответствующую эпюру.

- Для отображения эпюр усилий и перемещений, в этом окне установите флажок **Эпюры**. Открывается диалоговое окно **Эпюры усилий** (рис.8.25).

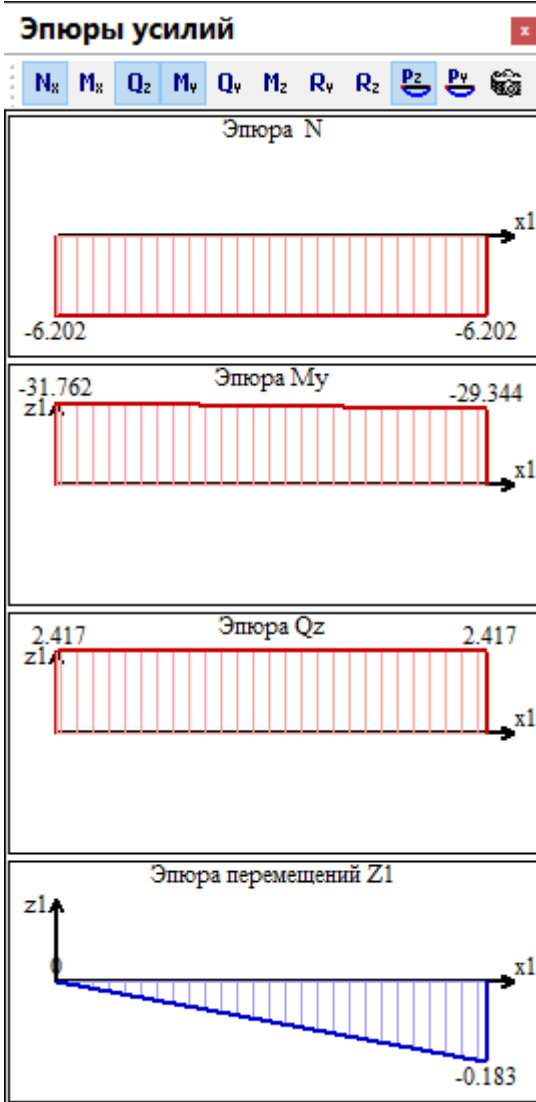




Рис.8.25. Диалоговое окно **Эпюры усилий**

[Формирование и просмотр таблиц результатов расчета](#)

- Для вывода на экран протокола решения, выберите команду  – **Стандартные таблицы** в раскрывающемся списке **Документация** (панель **Таблицы** на вкладке **Анализ**).
- После этого в диалоговом окне **Стандартные таблицы** (рис.8.26) выделите строку **Протокол решения**.
- Щелкните по кнопке  – **Применить**.

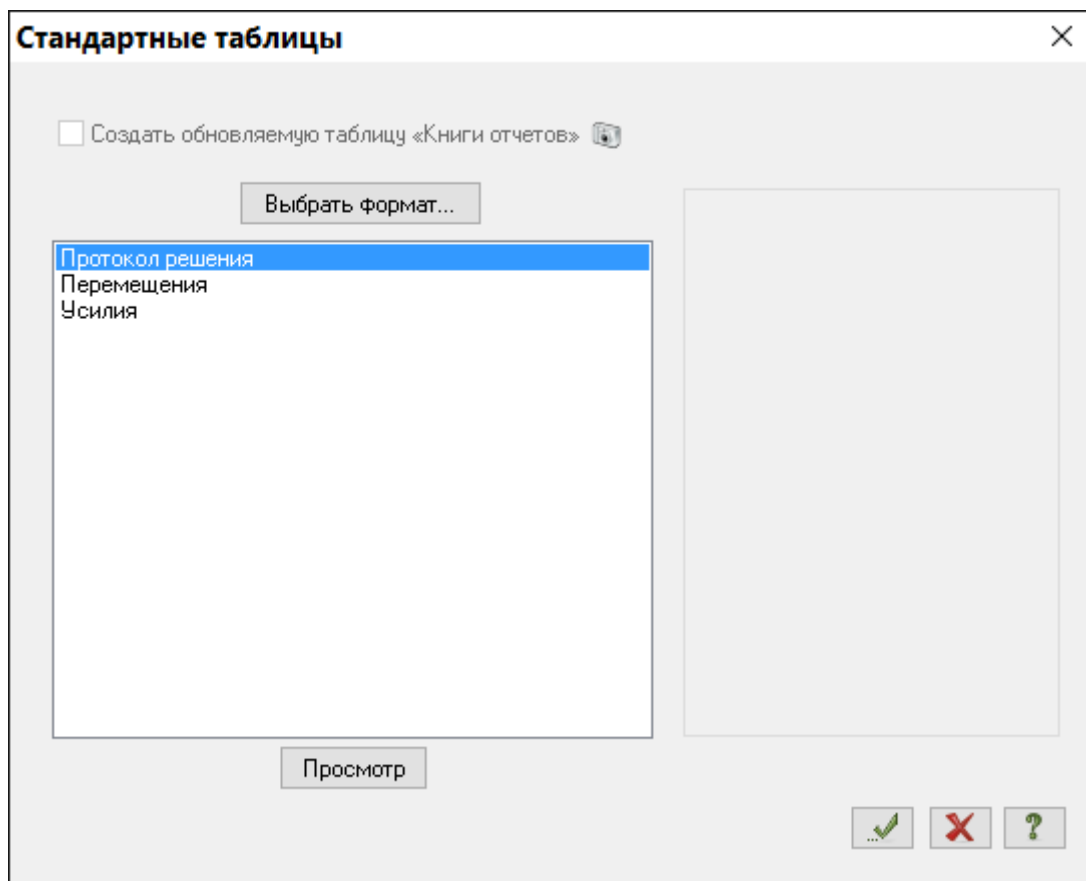


Рис.8.26. Диалоговое окно **Стандартные таблицы**