

РАЗДЕЛ 1. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ.

1.1 МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ.

Пример расчета стержневой системы методом конечных элементов.

Выполним методом конечных элементов расчет системы, изображенной на рис. 1.1. МКЭ - метод, ориентированный на использование ЭВМ. Объем вычислений при реализации этого метода, как правило, значительно превышает объем вычислений, который приходится проделывать при расчете систем с использованием классических методов строительной механики. Поэтому использование МКЭ при расчетах вручную имеет смысл только в учебных целях для лучшего усвоения учащимися процедуры метода.

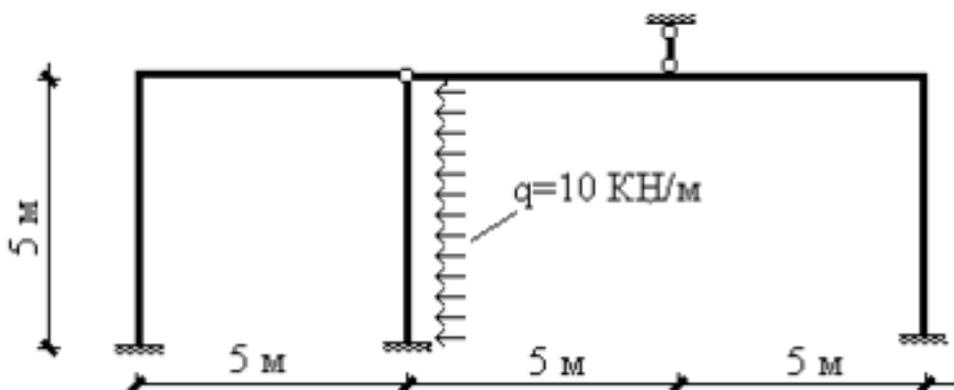


Рис. 1.1. Исходная стержневая система

Сечения всех стержней системы заданы одинаковыми и характеризуется жесткостью на растяжение - сжатие $EF=106 \text{ кН}$ и жесткостью на изгиб $EI=40 \times 106 \text{ кНм}^2$. Как известно, при силовых воздействиях распределение усилий в стержневых системах зависит от распределения жесткостей, а не от их абсолютных величин. Поэтому, для удобства расчетов будем задавать $EF=1 \text{ кН}$ и $EI=40 \text{ кНм}^2$. Полученные в результате расчета усилия от этого не изменятся, а полученные в результате расчета перемещения нужно будет уменьшить в 106 раз.

Заменим исходную стержневую систему конечно-элементной моделью, узлы и элементы пронумеруем (рис. 1.2).

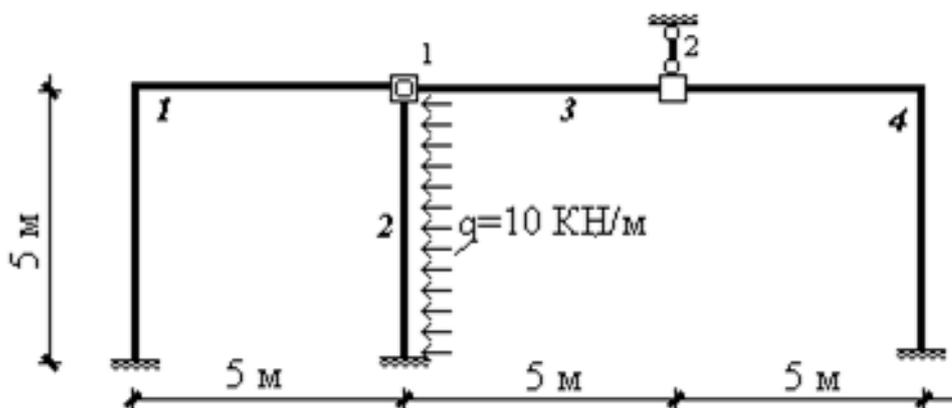


Рис. 1.2. Конечно-элементная модель

Перейдем от исходной нагрузки к узловой. Закрепим узлы конечно-элементной схемы от смещений, найдем реакции во введенных связях и построим эпюру изгибающего момента в стержнях системы, т.е. решим задачу 1 (рис. 1.3). Поскольку внешняя нагрузка действует только на элемент 2, достаточно рассмотреть только этот элемент (рис. 1.4). Воспользовавшись табличным решением, построим эпюру изгибающего момента и определим усилия, действующие со стороны элемента на узел (рис. 1.4). На стержнях остальных элементов эпюра моментов будет отсутствовать.

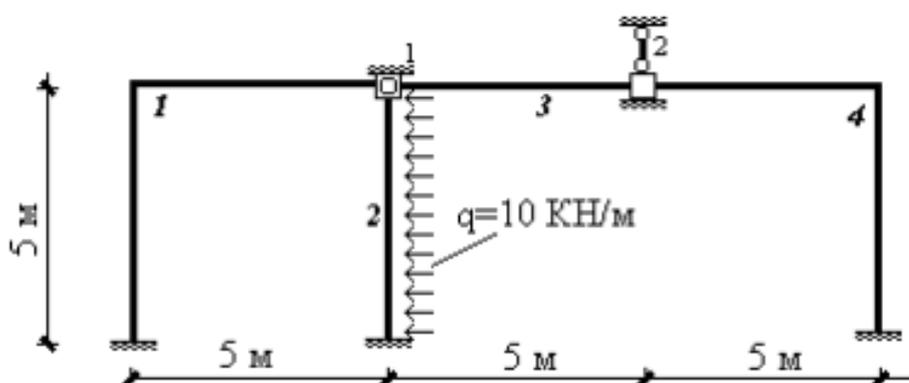


Рис. 1.3. Закрепление узлов

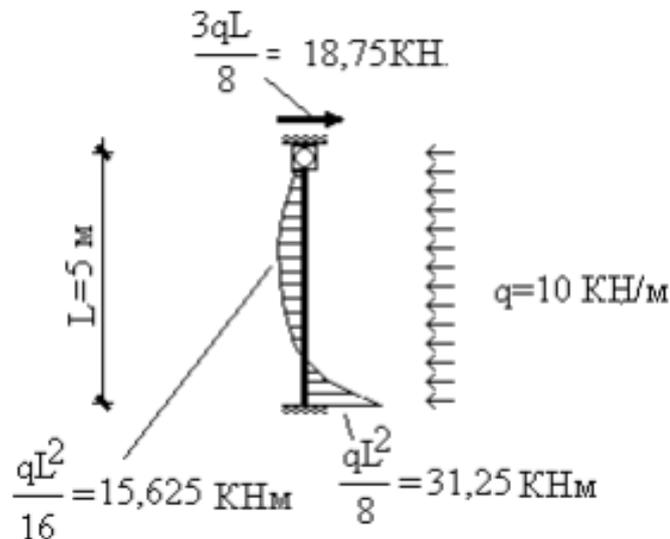


Рис. 1.4. Приведение нагрузки к узловой

Во введенных связях будет действовать только одна реакция - горизонтальное усилие в узле 1, равное 18,75 кН.

Перейдем теперь к решению задачи 2. Узловая нагрузка определяется как реакции во введенных связях в задаче 1, взятые с обратным знаком. В нашем случае в качестве нагрузки будет фигурировать только горизонтальное усилие в узле 1 (рис. 1.5).

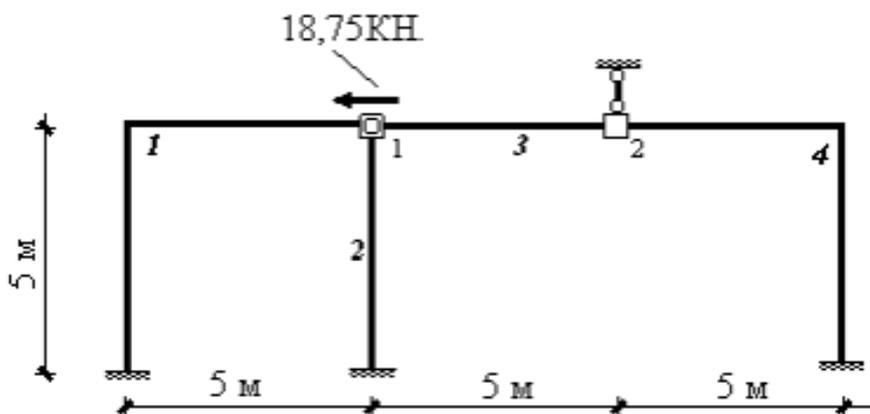


Рис. 1.5. Расчетная схема с узловой нагрузкой

Следовательно, вектор внешней нагрузки P будет следующим:

$$P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ P_{12} \\ P_{22} \\ P_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -18,75 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Теперь построим матрицы жесткости всех элементов системы. Построенные матрицы жесткости в глобальной системе координат:

$$K^{(1)} = K_{11}^{(1)} = \begin{pmatrix} 0,1732 & 0,02951 \\ 0,02951 & 0,1141 \end{pmatrix},$$

$$K^{(2)} = K_{11}^{(2)} = \begin{pmatrix} 0,96 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{pmatrix},$$

$$K^{(3)} = \left(\begin{array}{cc|cc} K_{11}^{(3)} & & K_{12}^{(3)} & \\ & & & K_{22}^{(3)} \end{array} \right) =$$

$$\left(\begin{array}{cc|ccc} 0,2 & 0 & -0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0,96 & 0 & -0,96 & 4,8 \\ \hline -0,2 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & -0,96 & 0 & 0,96 & -4,8 \\ 0 & 4,8 & 0 & -4,8 & 24 \end{array} \right). \quad (1.2)$$

$$K^{(4)} = K_{22}^{(4)} =$$

$$\begin{pmatrix} 0,1778 & -0,01229 & 0,1762 \\ -0,01229 & 0,1778 & 0,6514 \\ 0,1762 & 0,6514 & 6,663 \end{pmatrix}.$$

Следующим шагом является формирование глобальной матрицы жесткости:

$$\begin{aligned}
K &= \left(\begin{array}{c|c} K_{11} & K_{12} \\ \hline K_{21} & K_{22} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} K_{11}^{(1)} + K_{11}^{(2)} + K_{11}^{(3)} & K_{12}^{(3)} \\ \hline K_{21}^{(3)} & K_{22}^{(3)} + K_{22}^{(4)} \end{array} \right) = \\
&\left(\begin{array}{cc|ccc} 0,17320,96 + 0,2 & 0,02951 + 0 + 0 & -0,2 & 0 & 0 \\ 0,02951 + 0 + 0 & 0,1141 + 0,2 + 0,96 & 0 & -0,96 & 4,8 \\ \hline -0,2 & 0 & 0,2 + 0,1778 & 0 - 0,01229 & 0 + 0,1762 \\ 0 & -0,96 & 0 - 0,01229 & 0,96 + 0,1778 & -4,8 + 0,6514 \\ 0 & 4,8 & 0 + 0,1762 & -4,8 + 0,6514 & 24 + 6,663 \end{array} \right) = \quad (1.3) \\
&\left(\begin{array}{cc|ccc} 1,3332 & 0,02951 & -0,2 & 0 & 0 \\ 0,02951 & 1,2741 & 0 & -0,96 & 4,8 \\ \hline -0,2 & 0 & 0,3778 & -0,01229 & 0,1762 \\ 0 & -0,96 & -0,01229 & 1,1378 & -4,1486 \\ 0 & 4,8 & 0,1762 & -4,1486 & 30,663 \end{array} \right).
\end{aligned}$$

Составим теперь систему разрешающих уравнений метода конечных элементов:

$$\begin{aligned}
&\left(\begin{array}{cc|ccc} 1,3332 & 0,02951 & -0,2 & 0 & 0 \\ 0,02951 & 1,2741 & 0 & -0,96 & 4,8 \\ \hline -0,2 & 0 & 0,3778 & -0,01229 & 0,1762 \\ 0 & -0,96 & -0,01229 & 1,1378 & -4,1486 \\ 0 & 4,8 & 0,1762 & -4,1486 & 30,663 \end{array} \right) \begin{pmatrix} u_{11} \\ u_{12} \\ u_{21} \\ u_{22} \\ u_{23} \end{pmatrix} = \\
&\begin{pmatrix} -18,75 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (1.4)
\end{aligned}$$

Решив полученную систему линейных алгебраических уравнений, получим вектор узловых перемещений:

$$U = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -15,286 \\ 0,437 \\ -8,802 \\ 0 \\ -0,022 \end{pmatrix}. \quad (1.5)$$

Напомним, что истинные перемещения в системе будут в 106 раз меньше полученных.

Далее, необходимо определить усилия, действующие на каждый элемент системы со стороны узлов, для чего воспользуемся следующей формулой:

$$\begin{aligned}
 R^{(1)} &= \begin{pmatrix} R_{11}^{(1)} \\ R_{21}^{(1)} \end{pmatrix} = K^{(1)} \cdot U^{(1)} = K^{(1)} \cdot U_1 \\
 &= \begin{pmatrix} 0,1732 & 0,02951 \\ 0,02951 & 0,1141 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -15,286 \\ 0,437 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} -2,635 \\ -0,401 \end{pmatrix},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R^{(2)} &= \begin{pmatrix} R_{11}^{(2)} \\ R_{21}^{(2)} \end{pmatrix} = K^{(2)} \cdot U^{(1)} = K^{(2)} \cdot U_1 \\
 &= \begin{pmatrix} 0,96 & 0 \\ 0 & 0,2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -15,286 \\ 0,437 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} -14,675 \\ -0,087 \end{pmatrix},
 \end{aligned}$$

$$R^{(3)} = \begin{pmatrix} R_1^{(3)} \\ R_2^{(3)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11}^{(3)} \\ R_{21}^{(3)} \\ R_{12}^{(3)} \\ R_{22}^{(3)} \\ R_{32}^{(3)} \end{pmatrix} = K^{(3)} \cdot U^{(3)}$$

$$= K^{(3)} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix}$$

$$= \left(\begin{array}{cc|ccc} 0,2 & 0 & -0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0,96 & 0 & -0,96 & 4,8 \\ \hline -0,2 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & -0,96 & 0 & 0,96 & -4,8 \\ 0 & 4,8 & 0 & -4,8 & 24 \end{array} \right)$$

$$\cdot \begin{pmatrix} -15,286 \\ 0,437 \\ -8,802 \\ 0 \\ -0,022 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1,441 \\ 0,314 \\ 1,441 \\ -0,314 \\ 1,57 \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned}
 R^{(4)} &= \begin{pmatrix} R_{12}^{(4)} \\ R_{22}^{(4)} \\ R_{32}^{(4)} \end{pmatrix} = K^{(4)} \cdot U^{(2)} = K^{(4)} \cdot U_2 \\
 &= \begin{pmatrix} 0,1778 & -0,01229 & 0,1762 \\ -0,01229 & 0,1778 & 0,6514 \\ 0,1762 & 0,6514 & 6,663 \end{pmatrix} \\
 &\cdot \begin{pmatrix} -8,082 \\ 0 \\ -0,022 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1,441 \\ 0,085 \\ -1,57 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

Компоненты полученных векторов представляют собой усилия, действующие на узлы элементов. На данном этапе следует выполнить промежуточную проверку равновесия элементов и узлов под действием этих сил и внешней узловой нагрузки (рис. 1.6).

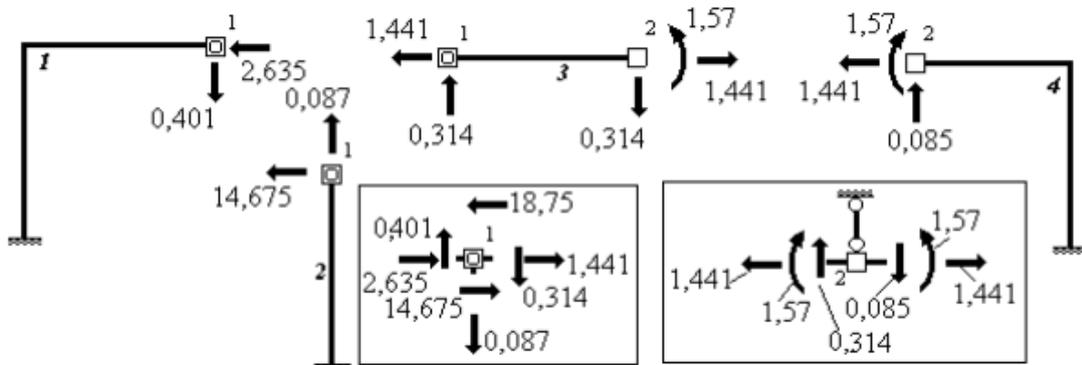


Рис. 1.6. Проверка равновесия узлов и элементов

Теперь, зная приложенные к узлам элементов усилия (рис. 1.6), построить эпюру изгибающих моментов в стержнях системы не составит труда (рис. 1.7). На этом решение задачи на действие только узловой нагрузки (задачи 2) заканчивается. Для построения окончательной эпюры моментов необходимо сложить решение этой задачи 2 и решение задачи 1 (рис. 1.8).

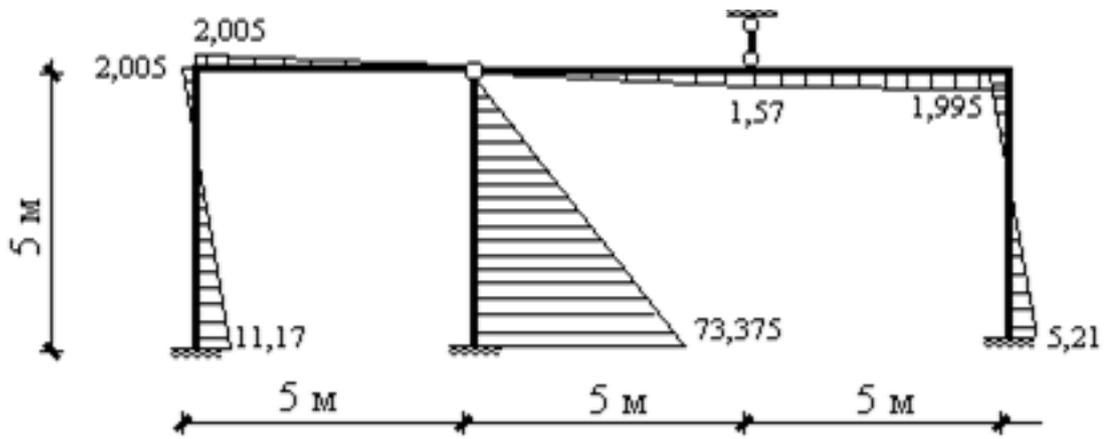


Рис. 1.7. Эюра изгибающего момента M

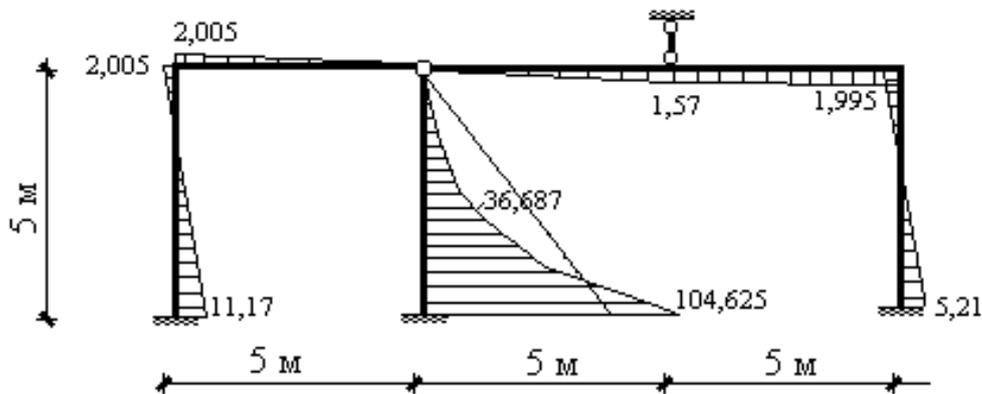


Рис. 1.8. Окончательная эюра изгибающего момента $M_{ок}$

Далее, остается построить эюры поперечного и продольных усилий, а также выполнить статическую и деформационную проверки. Данные шаги расчета выполняем самостоятельно, так как они уже изучены в курсе классической строительной механики.

РАЗДЕЛ 2. ПРИМЕНЕНИЕ МКЭ ПРИ РАСЧЕТАХ В ПК.

2.2 Расчет пространственной стержневой системы на силовое, тепловое, кинематическое воздействия.

Пример 1. Расчетная схема и характер внешней нагрузки представлены на рис. 1.

1.
 - Рама имеет вертикальную продольную плоскость симметрии;
 - все элементы рамы выполнены из железобетона (тяжелый бетон класса В30);
 - все элементы имеют одинаковое прямоугольное сечение 150x150 мм;
 - все стойки рамы закреплены к опорной горизонтальной поверхности жесткой заделкой;
- сопряжения всех промежуточных узлов элементов рамы жесткое.

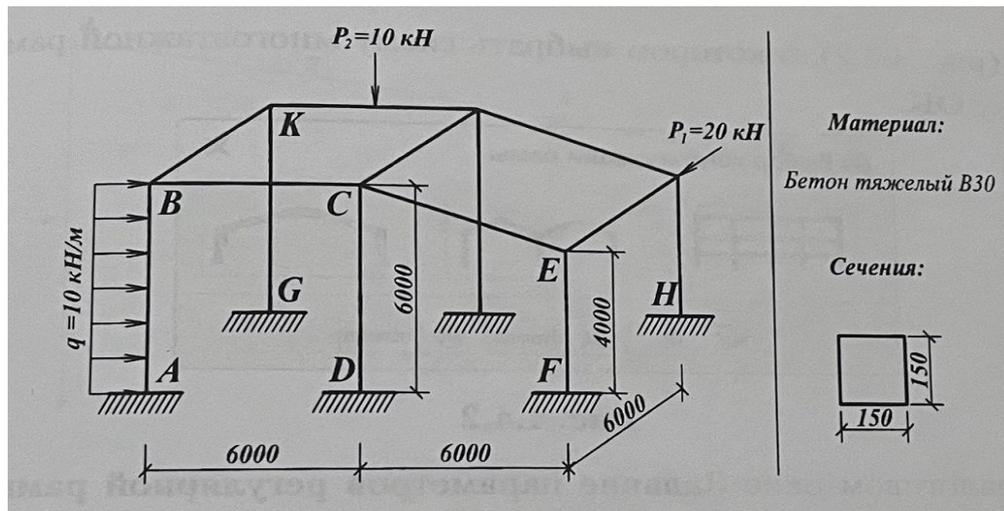


Рис. 2.1. Пространственная рама

Для предложенной схемы нагруженной рамы с помощью системы SCAD необходимо решить следующие задачи:

- сформировать ее расчетную пространственную стержневую конечно-элементную модель;
- получить компоненты напряженно-деформированного состояния модели;

Алгоритм решения задачи

Запуск вычислительного комплекса

Для запуска вычислительного комплекса выбрать ярлык **SCAD**.

Создание нового проекта

Создать новый проект, выбрав тип схемы **5 – Система общего вида**.

Построение пространственной стержневой модели конструкции

Формирование плоской схемы фрагмента рамы

Установить курсор на вкладке **Схема** и нажать левую клавишу мыши. В поле инструментальной панели нажать кнопку **Генерация прототипа рамы**



, после чего на экране появится диалоговое окно **Выбор конфигурации рамы** (рис. 2), в котором выбрать схему многоэтажной рамы и нажать кнопку **ОК**.

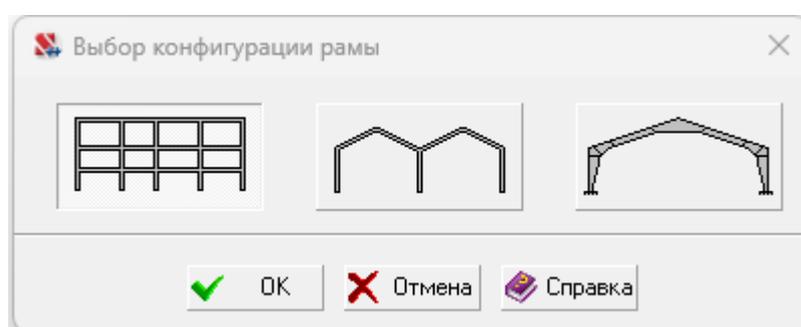


Рис. 2.2. Выбор конфигурации рамы

В диалоговом окне **Задание параметров регулярной рамы** ввести геометрические параметры начальной схемы: в левой части пролеты (**6, 2,**), в правой – этажи (**6, 1**) поперечника. Выключить режим **Автоматическая установка связей**, в результате диалоговое окно будет иметь вид, представленный на рис. 3. Теперь нажать кнопку **ОК**. Отобразить нумерацию узлов и элементов, нажав кнопки **Номера узлов** и **Номера элементов** на панели **Фильтры отображения**. В результате в графическом поле окна программы отображается начальная схема рамы (рис. 4).

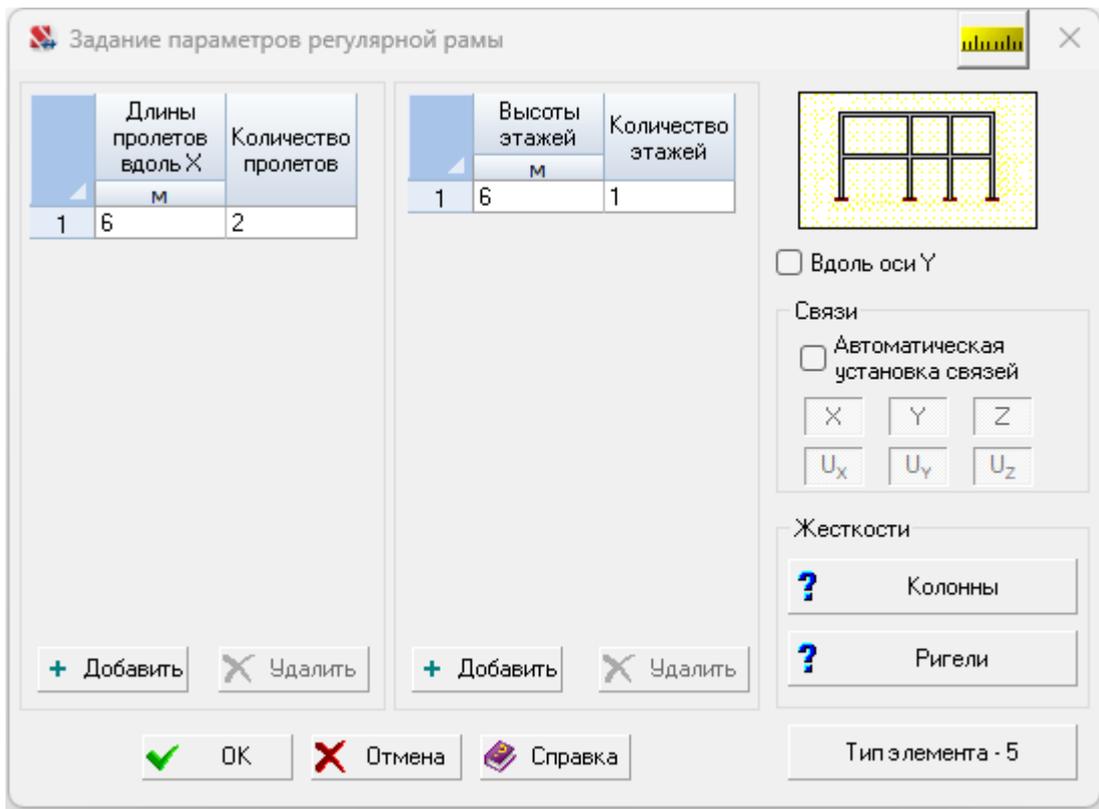


Рис. 2.3. Задание параметров рамы

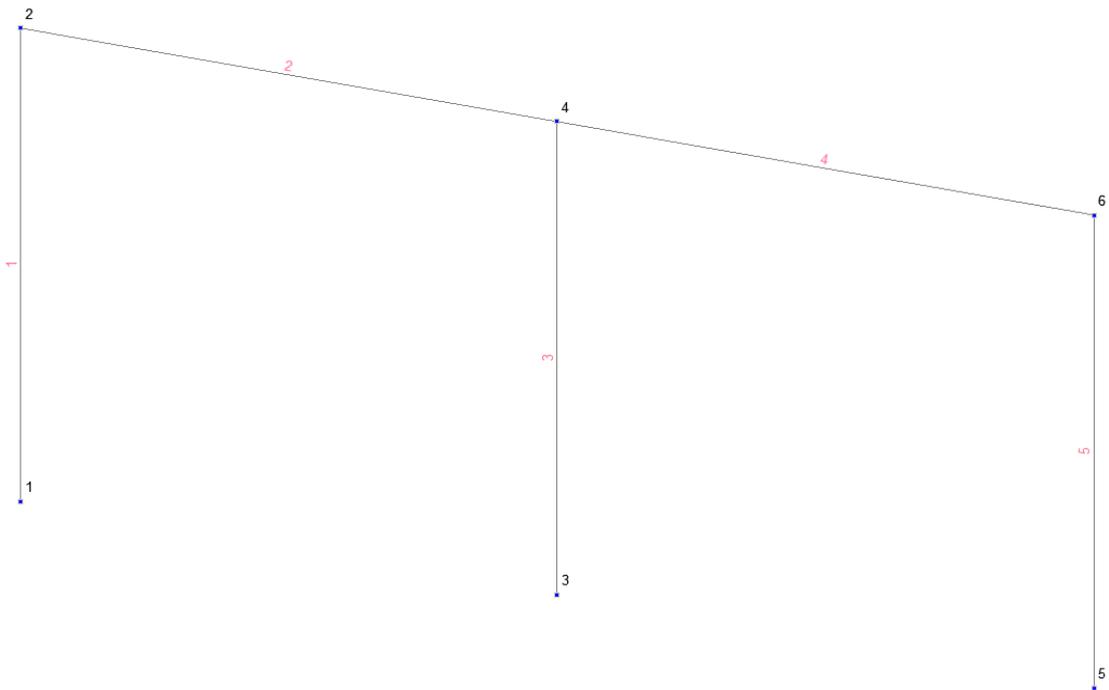


Рис. 2.4. Начальная схема рамы

Корректирование схемы

Перенести узел 6. Для этого раскрыть вкладку **Узлы и Элементы**. Активировать кнопку **Узлы** , нажать кнопку **Перенос узлов**  и в раскрывшемся

наборе нажать $dZ = -2$ (рис. 5). Отметить на схеме узел 6, и нажать кнопку **Подтверждение**  (рис. 6).

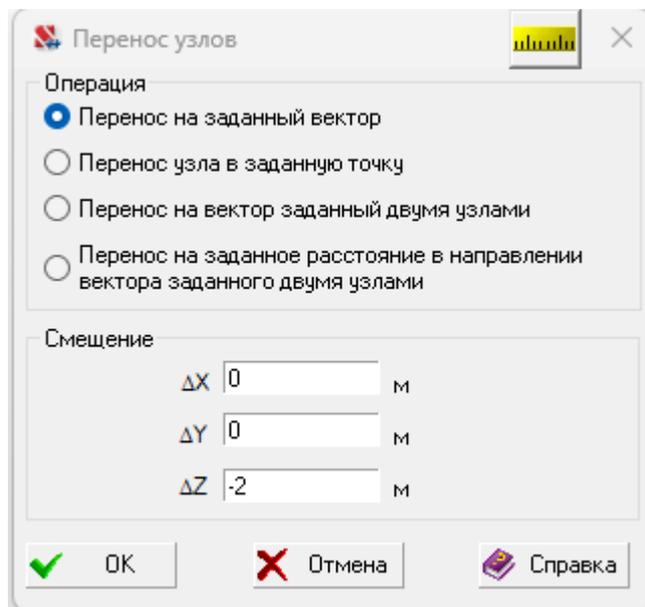


Рис. 2.5. Перенос узлов

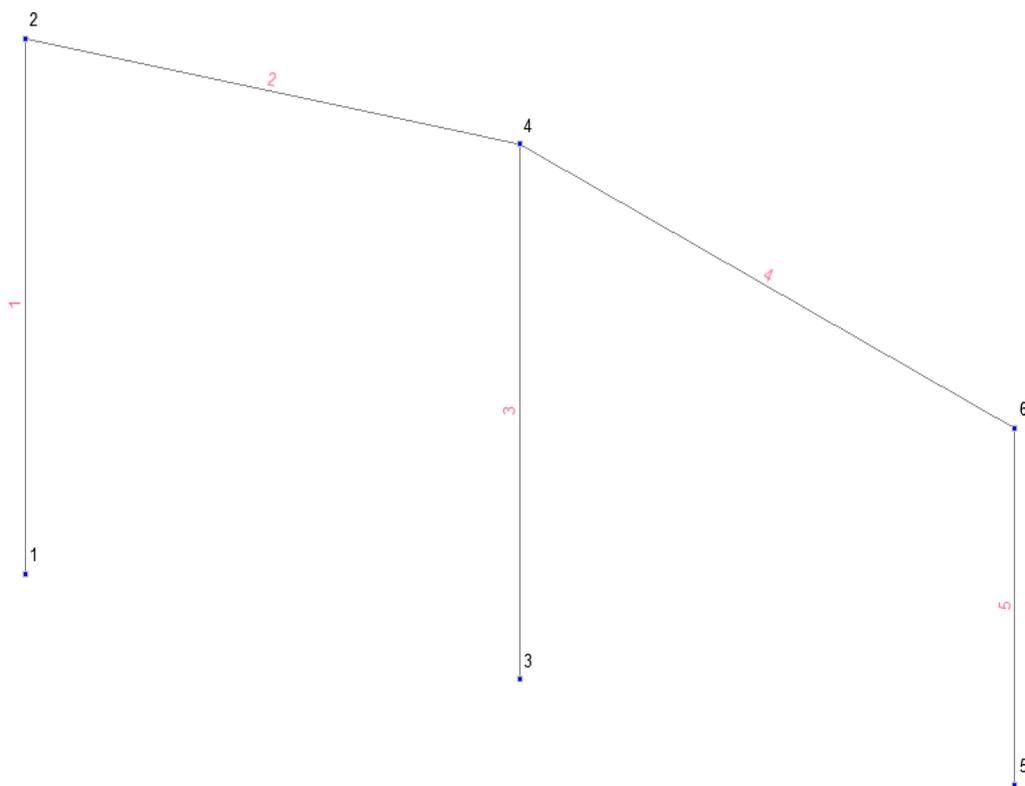


Рис. 2.6. Результат переноса узла 6

Построение пространственной схемы

Для формирования пространственной схемы рамы перейти во вкладку **Схема**. Нажать кнопку **Дублирование вдоль оси Y** . На экране появляется окно **Схема продольного каркаса**. Ввести данные о пролетах: **Длины пролетов (6)**, **Количество пролетов (1)**. Нажать кнопку **ОК** (рис. 7). Лишние элементы 11, 13 и 15 следует удалить при помощи команды **Удаление элементов** .

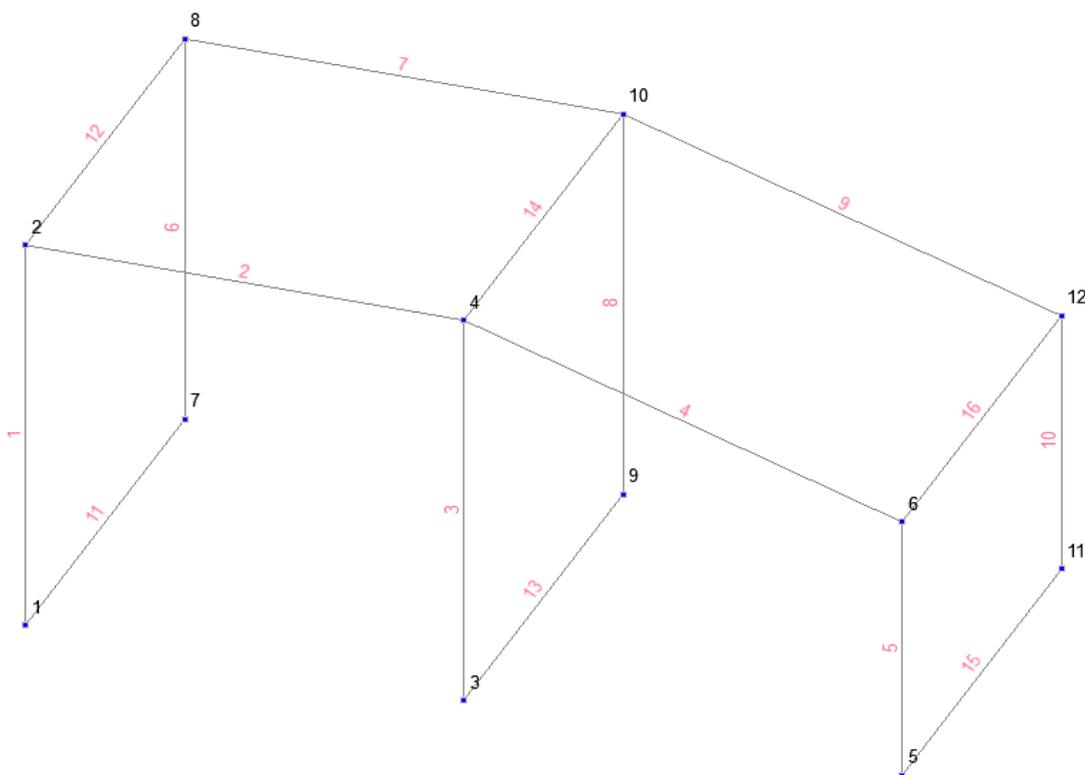


Рис. 2.7. Расчетная пространственная схема

Назначение жесткостей элементов

Сформировать первый тип жесткости стержней. Для этого во вкладке **Назначения** нажать кнопку **Назначение жесткостей стержням** . В окне **Жесткости стержневых элементов** установить переключатель **Параметрические сечения** и перейти во вкладку **Параметрические сечения**, где заполнить информацию о материале (**Бетон тяжелый В30**), сечении (сплошное прямоугольное) и его размерах ($b = 150$ мм; $h = 150$ мм). Для проверки введенных величин активировать кнопку **Характеристики сечения**, а потом нажать кнопку **ОК**.

Первый тип жесткости назначить всем элементам рамы. Для этого нажать кнопку **Инvertировать выбор элементов** . Далее нажать кнопку **Подтверждение** .

Результат назначения жесткостей элементам при активированном фильтре **Удаление линий невидимого контура**  (рис. 8).

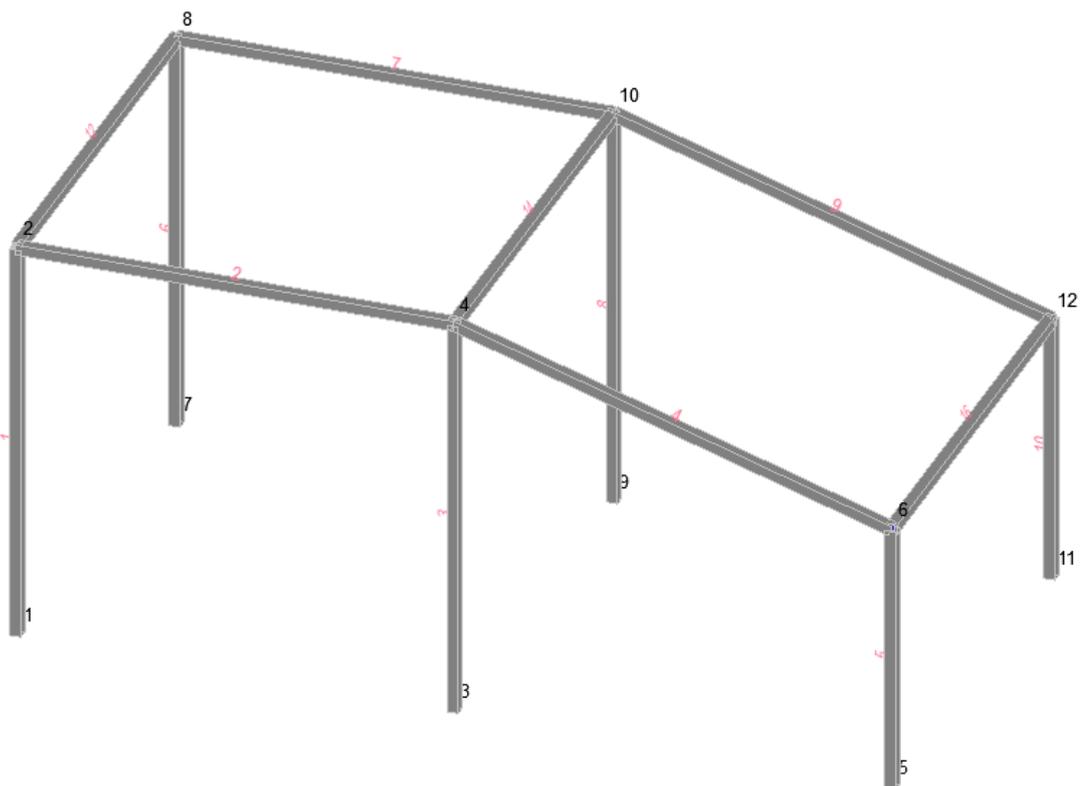


Рис. 2.8. Результат назначения жесткостей

Установка связей в опорных узлах

Для наложения связей во вкладке **Назначение** инструментальной панели с помощью кнопки **Установка связей в узлах**  вызвать диалоговое окно **Связи**. В режиме **Вид операции** – **Полная замена** в разделе **Направления связей** нажать кнопку **Установить все** и кнопку **ОК**. Выделить курсором на схеме узлы с номерами 1, 3, 5, 7, 9, 11 и нажать кнопку **ОК**. После этих операций соответствующие узлы будут присоединены к опорной поверхности жестко-закрепленными в трех плоскостях.

Задание нагрузок

1. Задание горизонтальной узловой сосредоточенной силы P_1 : во вкладке **Загружения** кнопкой **Узловые нагрузки**  активировать окно **Ввод узловых нагрузок**. В разделе **Силы** ввести по направлению **Y**, значение 20 и нажать кнопку **ОК**. На схеме отметить узел 12 и нажать кнопку **Подтверждение**  инструментальной панели.

2. Задание вертикальной сосредоточенной силы P_2 : во вкладке **Загружения** кнопкой **Нагрузки на стержни**  активировать окно **Задание нагрузок на стержневые элементы**. В разделе **Вид нагрузки** выбрать **Сосредоточенная**. Затем в разделе **Силы** по направлению **Z** ввести значение силы 10 кН, расстояние **A1** (до точки приложения) – 3 м, и нажать кнопку **ОК**. На схеме отметить элемент 7 и нажать кнопку **Подтверждение**  инструментальной панели.

3. Задание вертикальной распределенной нагрузки q на стержень 1: во вкладке **Загружения** кнопкой **Нагрузки на стержни**  активировать окно **Задание нагрузок на стержневые элементы**. В разделе **Вид нагрузки** выбрать **Распределенная**. Затем в разделе **Силы** активировать направление **X** ввести значение нагрузки (-10) кН/м. Нажать кнопку **ОК**. На схеме отметить элемент 1 и нажать кнопку **Подтверждение**  инструментальной панели.

Отображение нагрузок на схеме настраивается фильтрами панели **Фильтры отображения**: **Узловые нагрузки** , **Распределенные нагрузки** , **Сосредоточенные нагрузки** , **Значения нагрузок** .

Записать созданное загружение в проект. Для этого нажать кнопку **Сохранить/Добавить загружение**  инструментальной панели. В диалоговом окне **Сохранить загружение** ввести имя загружения **Загружение 1** и нажать кнопку **ОК**.

После выполнения всех перечисленных пунктов получить расчетную модель рамы с номерами узлов и элементов, установленными связями в опорах и загрузками (рис. 9).

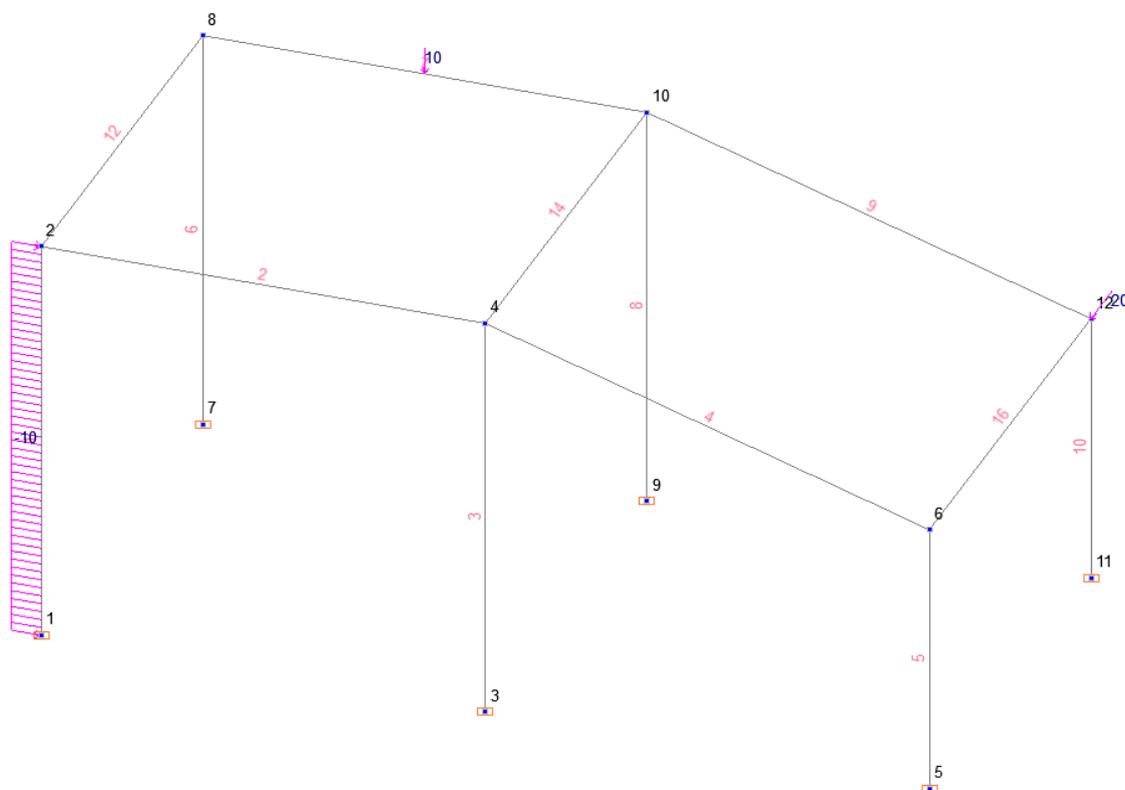


Рис. 2.9. Расчетная модель с нагрузками

Статический расчет

После создания расчетной модели сооружения следует выполнить его статический расчет. Для этого войти в дерево проекта, раскрывая вкладку **Управление** и нажимая кнопку **Выйти в экран управления проектом** . В дереве проекта активировать пункт **Линейный** раздела **РАСЧЕТ**. В диалоговом окне после ознакомления с содержанием окна **Параметры расчета** нажать кнопку **ОК**.

На экране появится окно сообщения SCAD с вопросом, **Проект был модифицирован. Сохранить изменения?** В ответ нажать кнопку **Да**.

После окончания расчетов просмотреть информацию, размещающуюся в окне **Протокол выполнения расчета** (рис. 10), для этого использовать линейку прокрутки.

15:36:38 ВНИМАНИЕ: Дана сумма внешних нагрузок
без учета приложенных непосредственно на связи
15:36:38 Вычисление перемещений.
15:36:38 Потенциальная энергия (Тм)
15:36:38 1 - 16.5746
15:36:38 Сортировка перемещений
15:36:38 Контроль решения
15:36:38 Вычисление усилий
15:36:38 Сортировка усилий и напряжений
15:36:39 ЗАДАНИЕ ВЫПОЛНЕНО
Затраченное время : 0:00:01 (1 min)

Рис. 2.10. Протокол выполнения расчета

Если в протоколе подтверждается правильность выполнения расчета словами **Задание выполнено** и нет замечаний, то нажатием кнопки **Заккрыть окно расчета**  перейти в дерево проекта для анализа результатов расчета.

Просмотр результатов расчета

В разделе **РЕЗУЛЬТАТЫ** дерева проекта установить курсор в пункт **Графический анализ** и активировать окно постпроцессора, где отображаются результаты расчета рамы: деформированная схема, эпюры усилий и т.п.

Посмотреть деформированную схему рамы на фоне недеформированной. Для этого во вкладке **Перемещения** нажать кнопку **Совместное отображение исходной и деформированной схемы**  и **Вывод значений перемещений в узлах** . Величины перемещений узлов по направлениям системы координат можно узнать, выбрав из списка направление (X, Y или Z). Для удобства чтения схемы деформаций отобразить на ней номера узлов одноименной кнопкой панели **Фильтры отображения**. В результате схема деформаций с оцифровкой перемещений узлов по **X** (см) будет выглядеть, как на рис. 11.

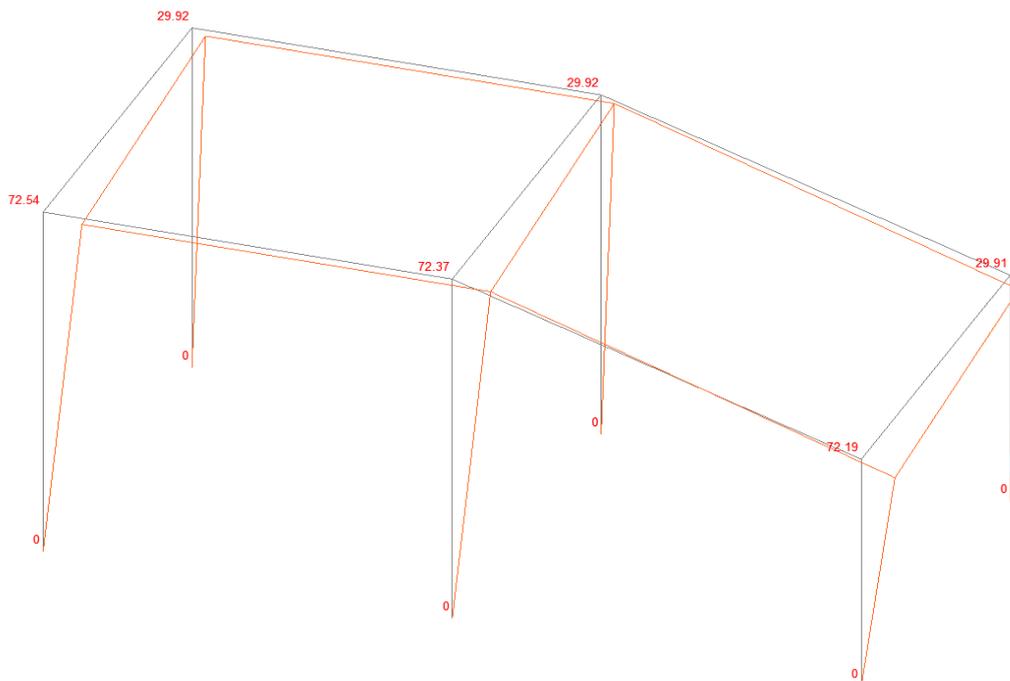


Рис. 2.11. Деформированная схема рамы

Для получения на экране изображения эпюры изгибающих моментов в стержнях рамы во вкладке **Эпюры усилий** из списка **Выбор вида усилия** выбрать M_y и нажать кнопку **Эпюры усилий** . Значения ординат эпюр можно узнать при помощи фильтра **Оцифровка изополей/изолиний** . В результате эпюры моментов M_y , M_z и продольных усилий N представлены на рис. 12-14.

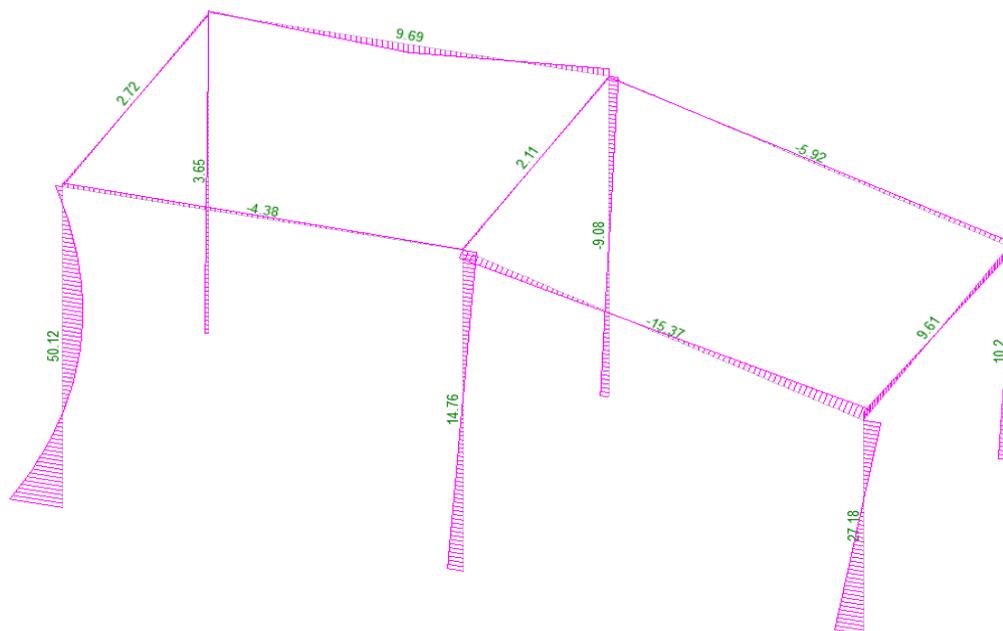


Рис. 2.12. Эпюра изгибающего момента M_y (кН*м)

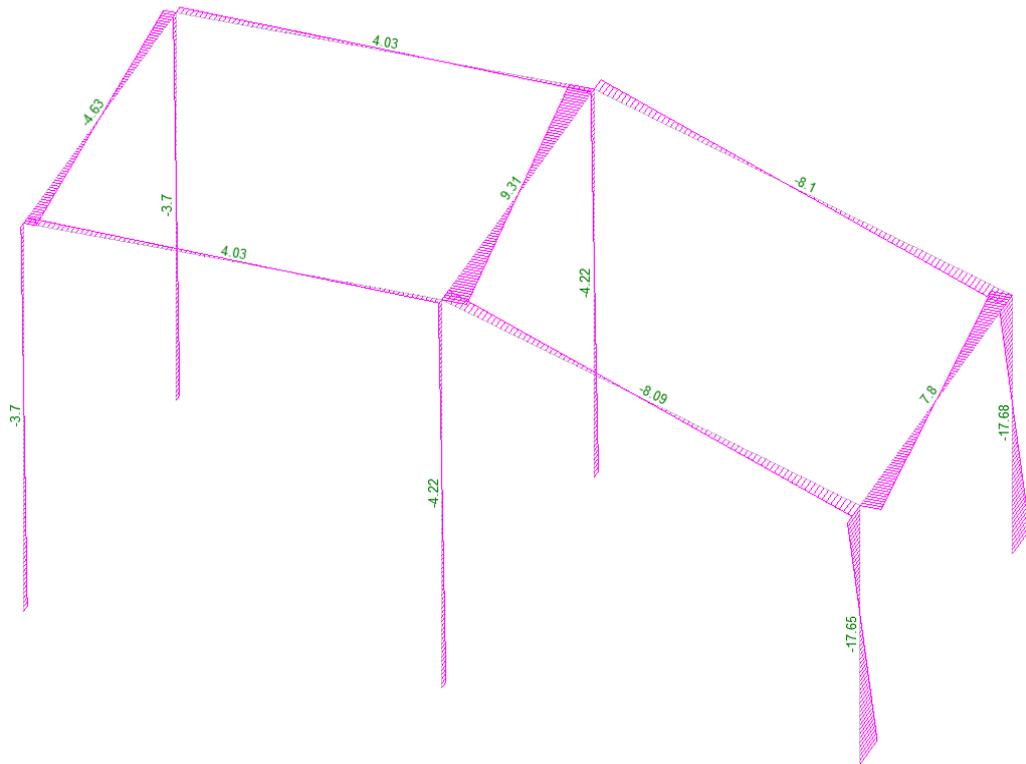


Рис. 2.13. Эюра изгибающего момента M_z ($\text{kH}\cdot\text{м}$)

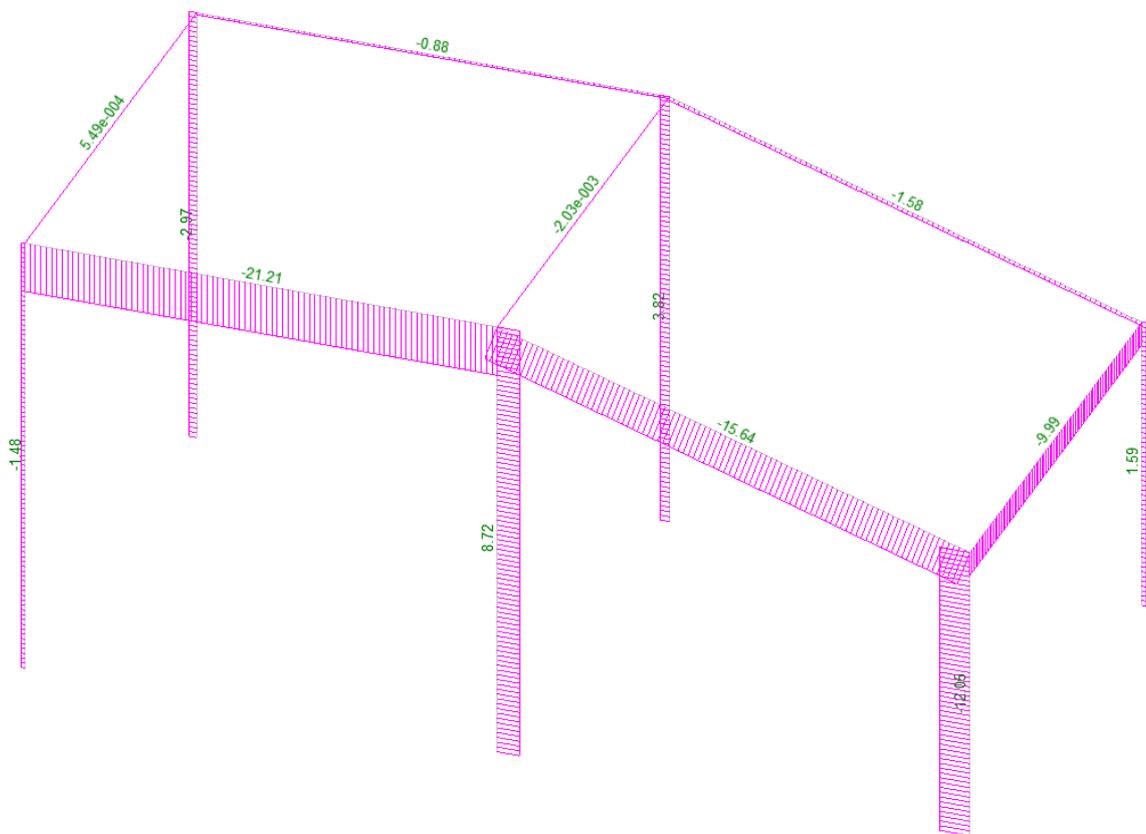


Рис. 2.14. Эюра продольных усилий N (kH)

Пример 2. Симметричная статически неопределимая рама.

Произвести расчет на тепловое и кинематическое воздействие при заданных нагрузках: $t=20^\circ\text{C}$, $C=0,03\text{ м}$.

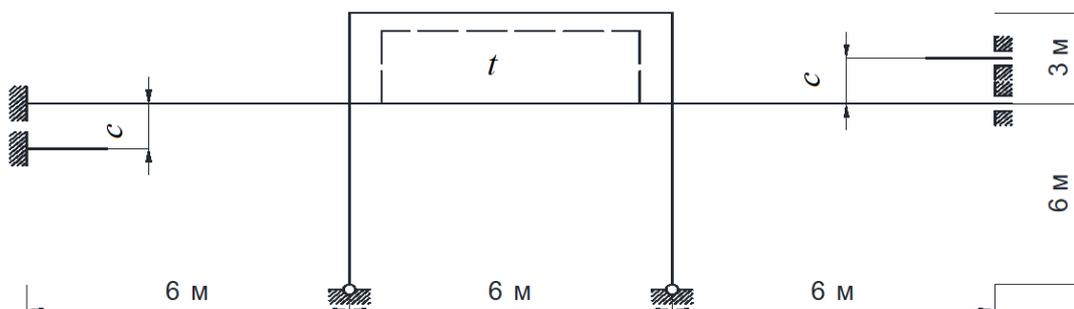


Рис. 2.15. Статически неопределимая рама

Создаем Новый проект (см. Пример 1), заходим во вкладку **Расчетная схема, Узлы и элементы, Узлы**. Вводим узлы (Ошибка! Источник ссылки не найден.) в плоскости XOZ: 1 (0;0;0), 2 (6; 0; 0), 2 (12; 0; 0), 2 (18; 0; 0).

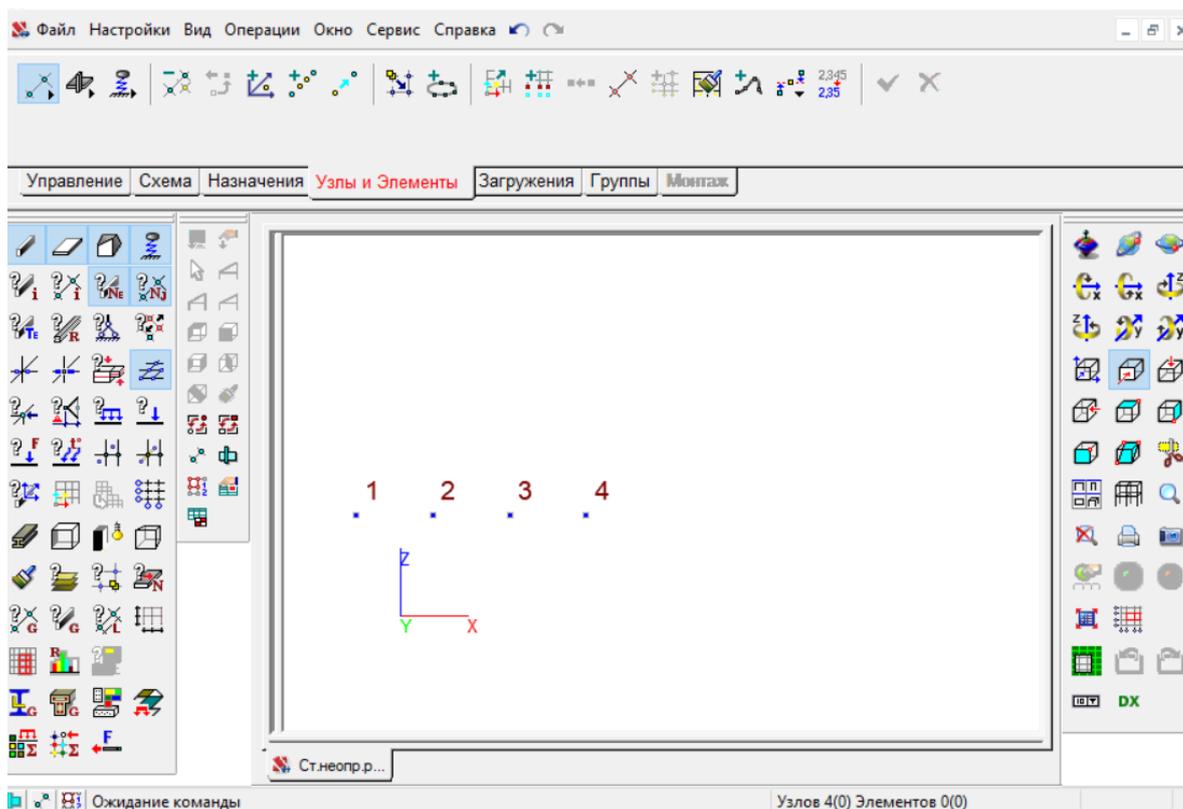


Рис. 2.16. Ввод узлов 1 – 4

Далее используем команду Ввод узлов на заданном расстоянии от отмеченных . Заполняем приращение по вертикали $\Delta Z = 6\text{м}$, количество – 1. Выделяем курсором узлы или обводим рамкой. Чтобы перейти в режим рамки, нажимаем на рабочее поле правой кнопкой мыши и в появившемся окне (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**) выбираем рамку. И нажимаем зеленую галочку или клавишу «Enter».

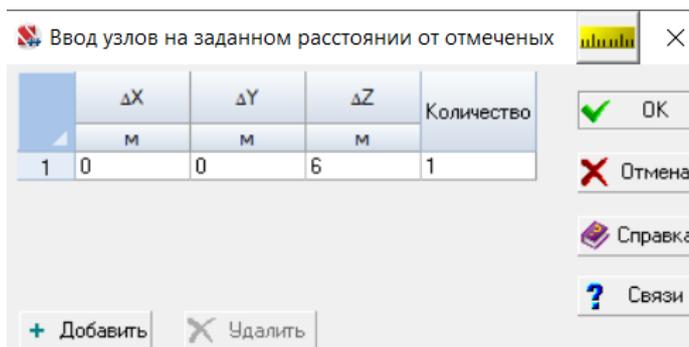


Рис. 2.17. Ввод узлов на заданном расстоянии от отмеченных

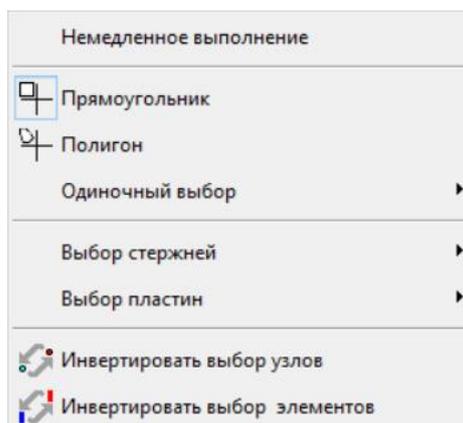


Рис. 2.18. Способы выделения объектов

Повторяем все действия с вводом узлов на заданном расстоянии, только теперь приращение составляет $\Delta Z = 3\text{м}$. Получаем «поле» узлов. Соединяем узлы в соответствии с заданной расчетной схемой (слева направо, снизу вверх) (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Чтобы «избавиться» от «лишних» узлов, воспользуемся Упаковкой схемы.

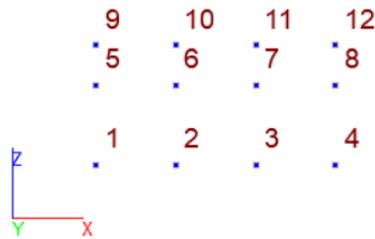


Рис. 2.19. «Поле» узлов

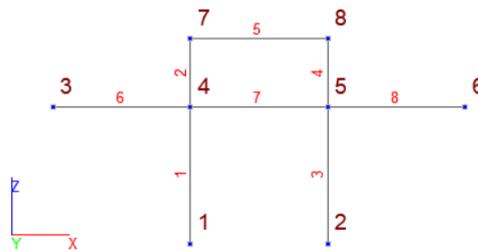


Рис. 2.20. Расчетная схема с номерами узлов и элементов

Переходим к назначению жесткостей стержней и связей в узлах (Вкладка **Назначения**). Жесткости стержней оставим те же, что и в прошлом примере (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Назначение связей рассмотрим далее (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

Связи назначены (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Обратите внимание, что разные типы связей по-разному обозначены, что облегчает работу и помогает найти ошибку, если таковая имеет место. Переходим к нагрузкам – вкладка **Загрузки** – температурные нагрузки . Но перед заданием теплового воздействия уточним направления местных осей стержней – значок  на панели фильтров. Для большей ясности нажмем команду  - **Восстановить исходное положение схемы.**

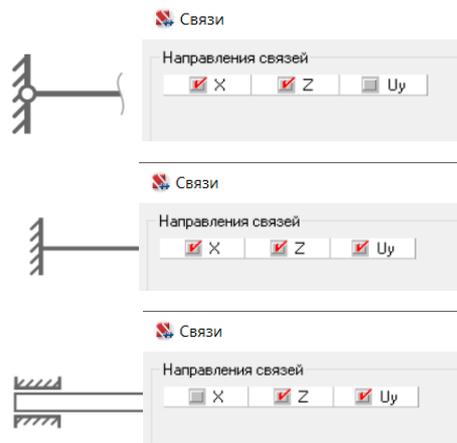


Рис. 2.21. Типы опор и соответствующее назначение связей в ПК

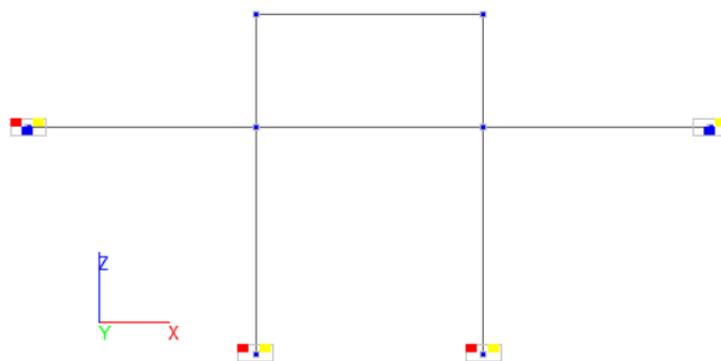


Рис. 2.22. Расчетная схема с назначенными связями

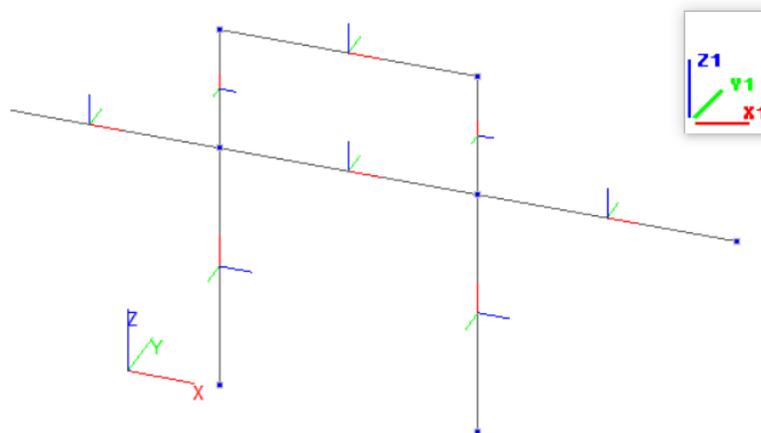


Рис. 2.23. Местные оси элементов

В соответствии с заданием температура будет изменяться от 0° до 20° (для стержня №2) и от 20° до 0° (для стержней №4 и №5) по оси Z1. Высота сечения вдоль оси Z1 равна: $H=200$ мм.

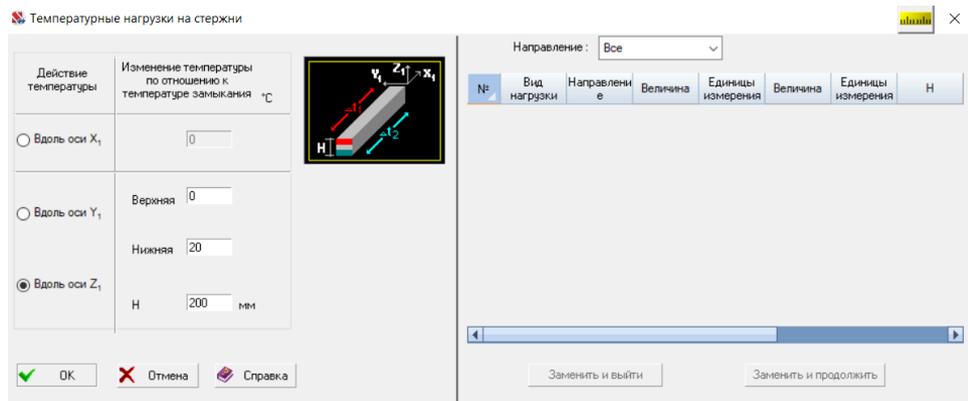


Рис. 2.24. Задание теплового воздействия для стержня №7

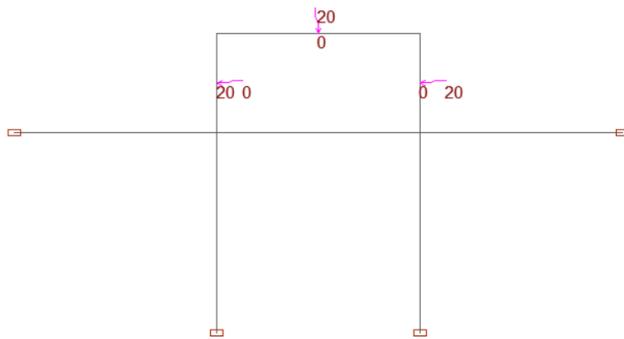


Рис. 2.25. Отображение теплового воздействия на расчетной схеме

Сохраняем загрузку  .

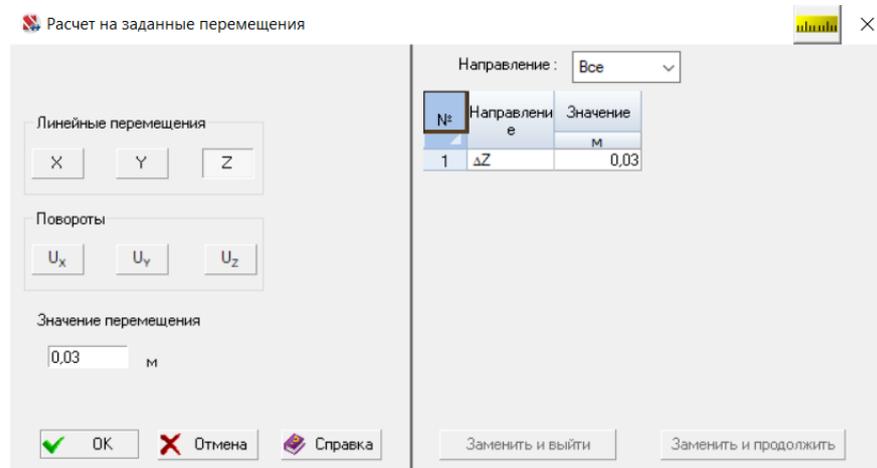


Рис. 2.26. Нагрузка вида «заданное перемещение»

Выделяем узлы, в которых будет задана «осадка» опор, нажимаем зеленую галочку, «ок» или «Enter». Для отображения нагрузки на расчетной схеме нажимаем команды   на панели фильтров.

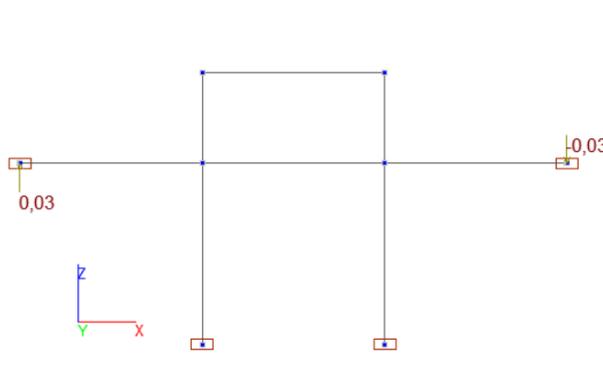


Рис. 2.27. Нагрузка вида "заданное перемещение" на расчетной схеме

Сохраняем загрузку . Итого, получаем два загрузжения (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

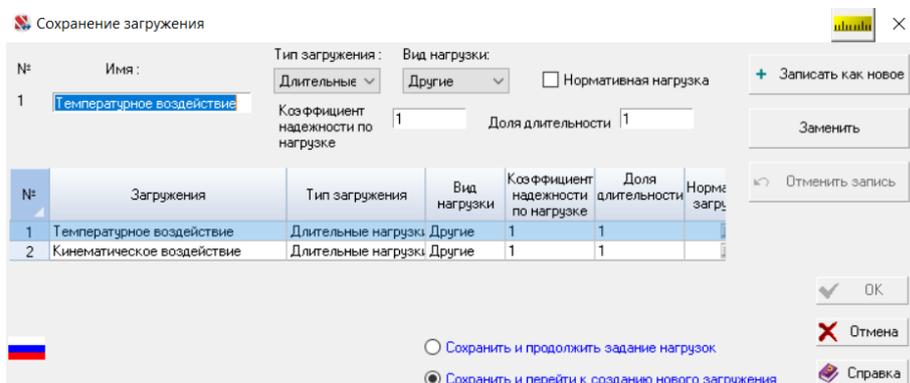


Рис. 2.28. Сохранение загрузки

Переходим в Дерево управления проектом  во вкладку **Расчет**, Линейный расчет. Просматриваем Протокол расчета на наличие ошибок. Если их нет, закрываем Протокол расчета. Открываем вкладку **Результаты расчета – графический анализ**. Первое, что нас интересует, это Перемещения. Нажимаем совместное отображение исходной и деформированной схемы , а также вывод значений перемещений в узлах  и чуть правее, в окошке, выбираем значение перемещений по осям, угловое или суммарное значение перемещений.

Деформированная схема и суммарные значения перемещений в мм приведены на рисунках (**Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Эпюры изгибающих моментов (вкладка **Эпюры**) приведены на рисунках (**Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.**).

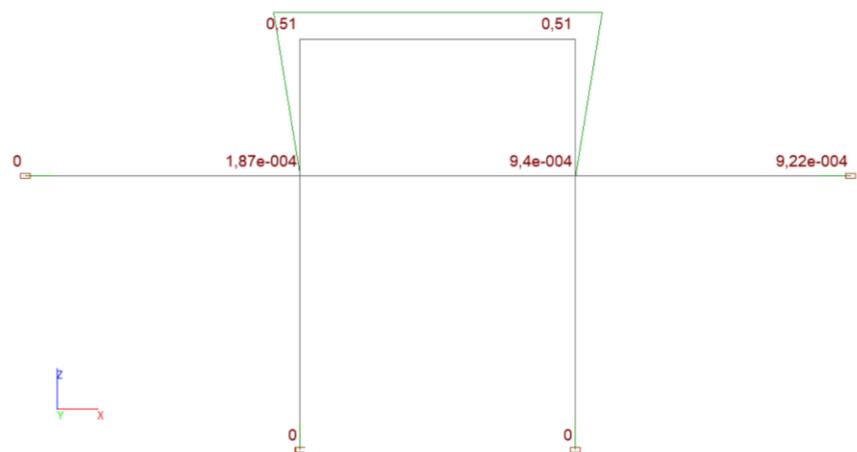


Рис. 2.29. Деформированная схема при температурном воздействии

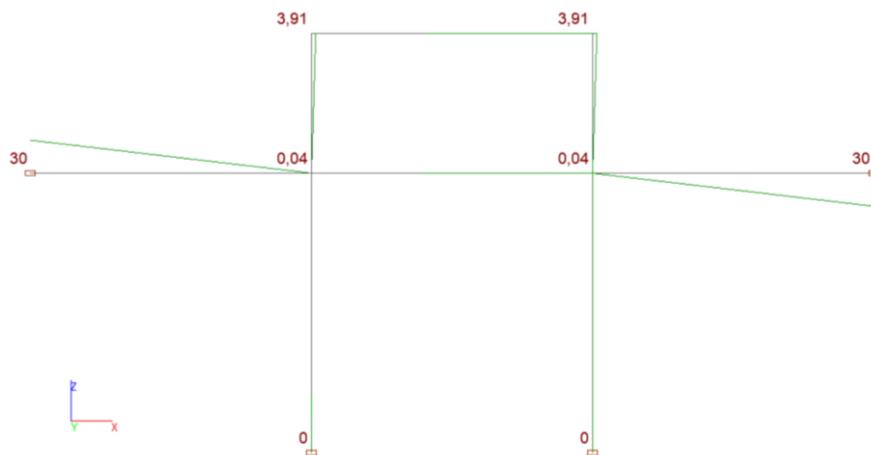


Рис. 2.30. Деформированная схема при кинематическом воздействии

Переходим к вкладке **Эпюры усилий**.

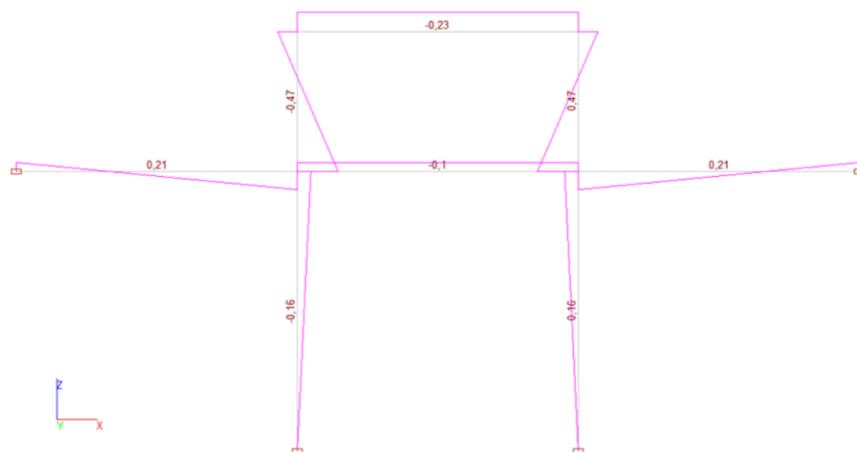


Рис. 2.31. Эпюра изгибающих моментов при температурном воздействии

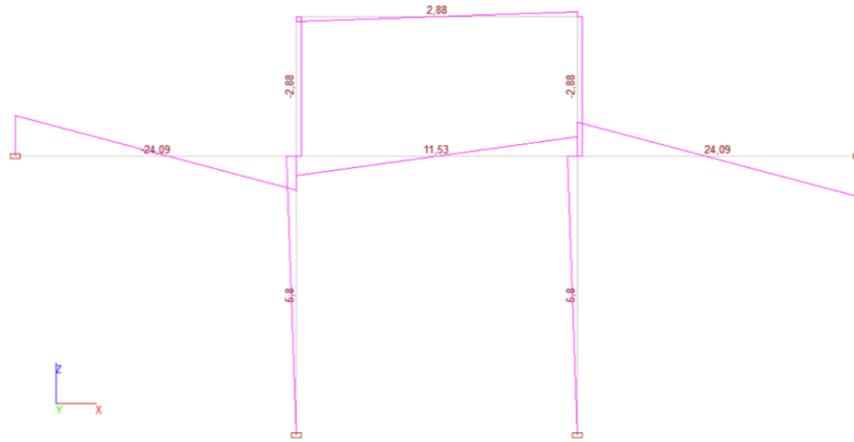


Рис. 2.32. Эпюра изгибающих моментов при кинематическом воздействии

2.3 Железобетонный каркас из сборных элементов.

Исходные данные

Геометрическая схема сборной рамы каркаса, сечения элементов приведены на рис. 3.1. Бетон В30.

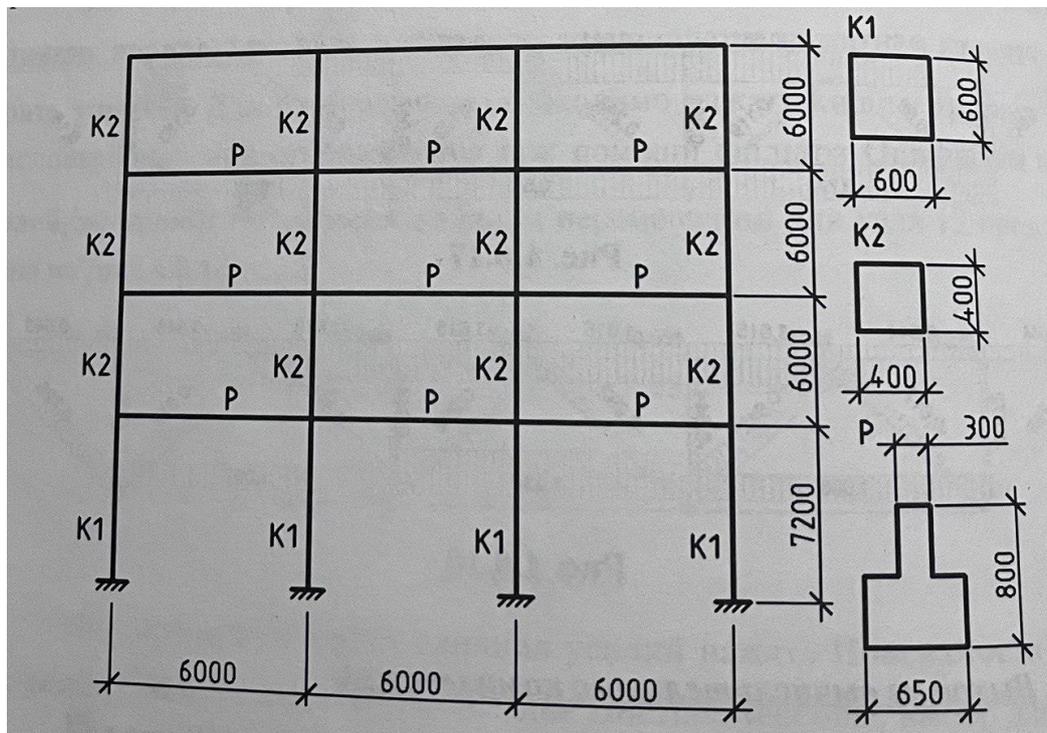


Рис. 3.1. ЖБ каркас

Расчетные нагрузки, действующие на раму: постоянная от вышележащих конструкций 26 кН/м, полезная временная длительная 62,6 кН/м. Варианты приложения временных длительных нагрузок показаны на рис. 2.

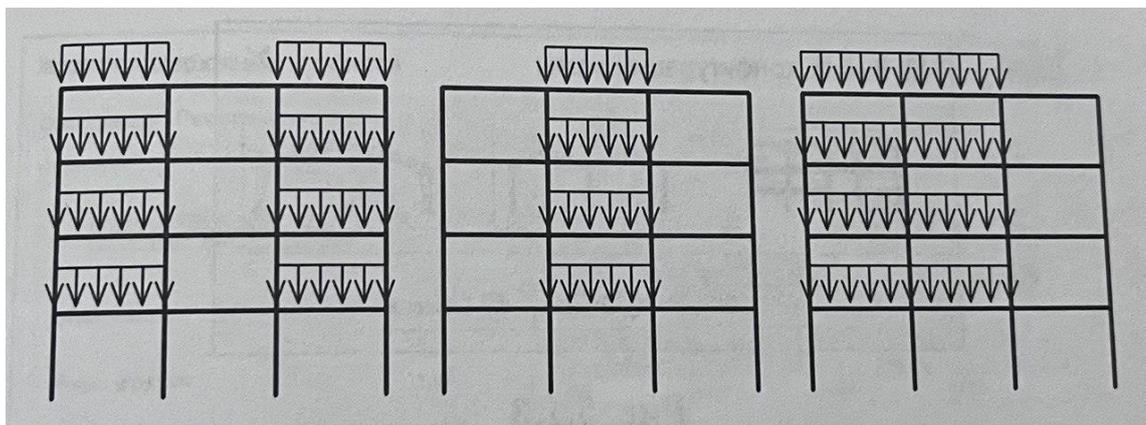


Рис. 3.2. Варианты приложения временных нагрузок

Задача

Для предложенной схемы нагруженной рамы с помощью системы SCAD необходимо решить следующие задачи:

- сформировать расчетную плоскую стержневую конечно-элементную модель;
- определить напряженно-деформированное состояние модели от заданных нагрузок;
- получить определенные компоненты напряженно-деформированного состояния модели;
- выполнить армирование элементов при помощи постпроцессора;

Алгоритм решения задачи

Создание нового проекта

Создать новый проект, выбрав тип схемы **2 – Плоская рама**.

Построение плоской стержневой модели конструкции

Формирование стержневой части фермы

Для создания схемы стержневой части фермы перейти во вкладку **Схема** и нажать кнопку **Генерация прототипа рамы** . На экране появляется диалоговое окно **Выбор конфигурации рамы**, которое показано на рис. 2. Оставить по умолчанию установленный тип рамы. Нажать кнопку **ОК**.

В диалоговом окне **Задание параметров регулярной рамы** ввести параметры геометрической схемы: в левой части – для пролетов, в правой – для этажей (рис. 3.3). В разделе **Связи** включить режим **Автоматическая установка связей**, проверить установку связей.

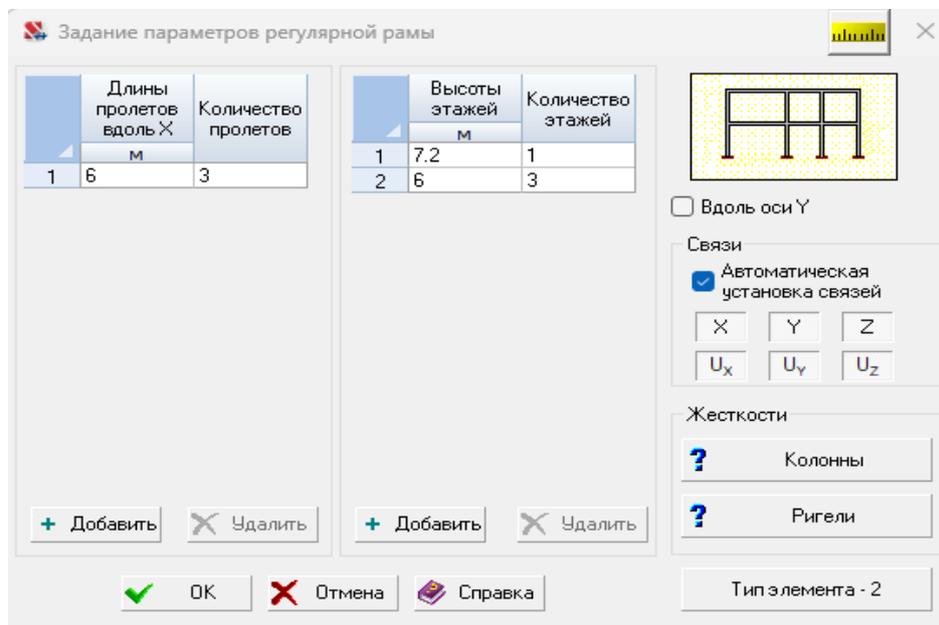


Рис. 3.3. Задание параметров каркаса

Поскольку сечение всех ригелей одинаковое, следует их задать нажатием на кнопку **Ригели**. В окне **Жесткости** выбрать **Параметрические сечения**, перейти в одноименную вкладку, заполнить поля в соответствии с условиями (рис. 3.4) и нажать **ОК** в этом и предыдущем окне.

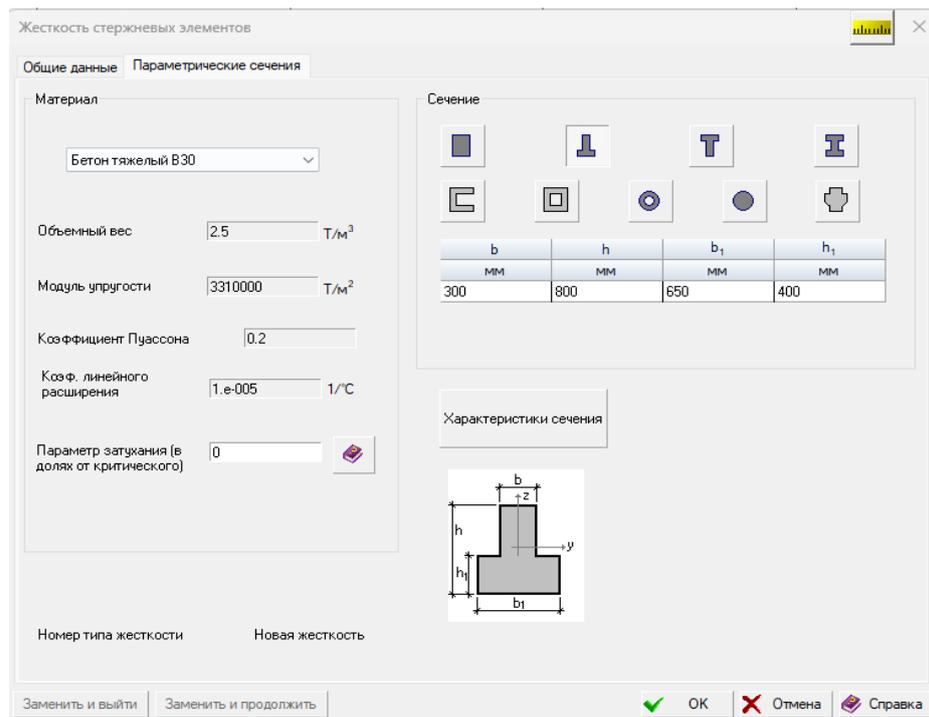


Рис. 3.4. Задание жесткости ригелей

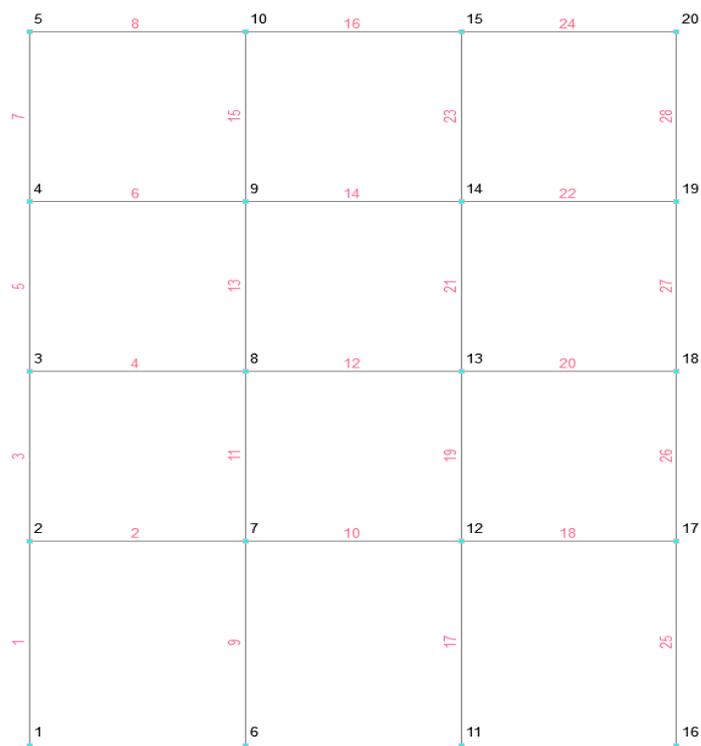


Рис. 3.5. Искомая стержневая рама

Назначение жесткостей колоннам

Для назначения жесткостей вертикальным стержням зайти во вкладку **Назначения** главной панели инструментов. Выбрать **Назначение жесткостей**

стержням . В окне **Жесткости стержневых элементов** установить переключатель **Параметрические сечения** и задать параметры во вкладке *Параметрические сечения*. В ниспадающем списке раздела *Материал* выбрать **Бетон тяжелый В30**. Выбрать тип поперечного сечения (сплошное прямоугольное), ввести размеры $b = 600$ и $h = 600$ (мм). Далее нажать **ОК**.

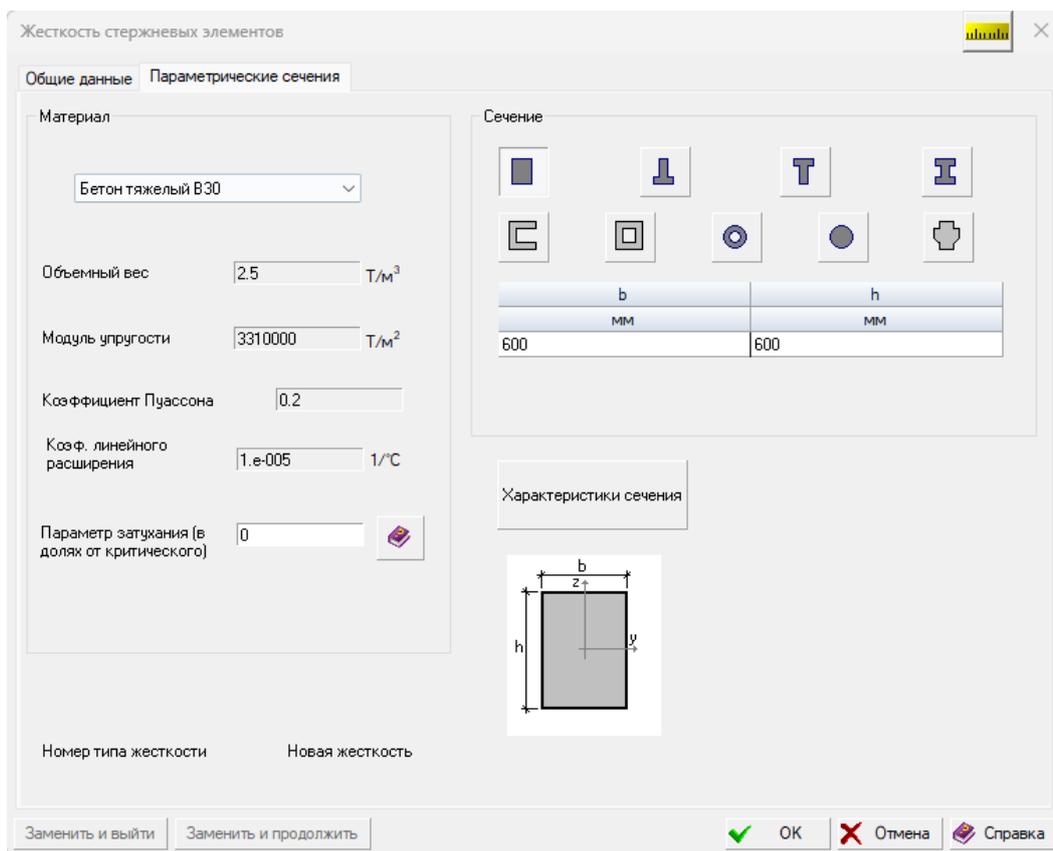


Рис. 3.6. Задание жесткости колонн первого этажа

Теперь назначить заданную жесткость элементам схемы. Для этого курсором отметить на схеме все вертикальные стержни первого этажа и нажать кнопку **Подтверждение** . В результате элементам верхнего пояса и стойкам присвоится жесткость первого типа.

Для назначения третьего типа жесткости вертикальным элементам верхних этажей задать параметры сечения: $b = 400$ и $h = 400$ (мм). Отметить верхние колонны на схеме и нажать кнопку **Подтверждение**  инструментальной панели.

Задание жестких вставок

Для учета жесткости монолитных стыков необходимо установить жесткие вставки (рис. 3.7).

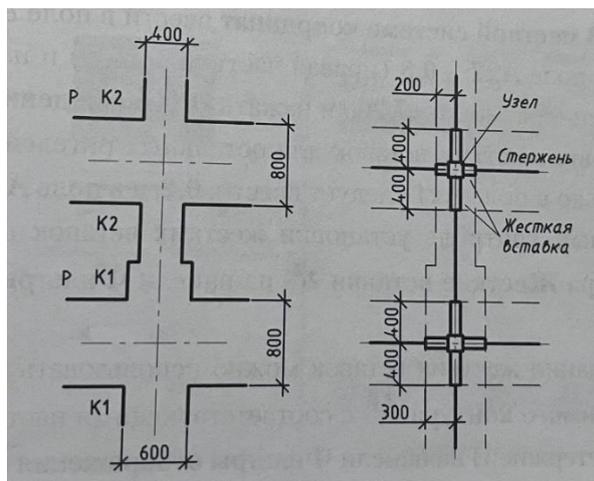


Рис. 3.7. Узлы сопряжения

1. Установка жестких вставок для колонн. На вкладке **Назначения** выбрать **Установка/Удаление жестких вставок** . В разделе **В местной системе координат** ввести в поле **Ax1: 0.4** (нижняя часть колонны), в поле **Ax2: -0.4** (верхняя часть колонны) и нажать **ОК** (рис. 3.8).

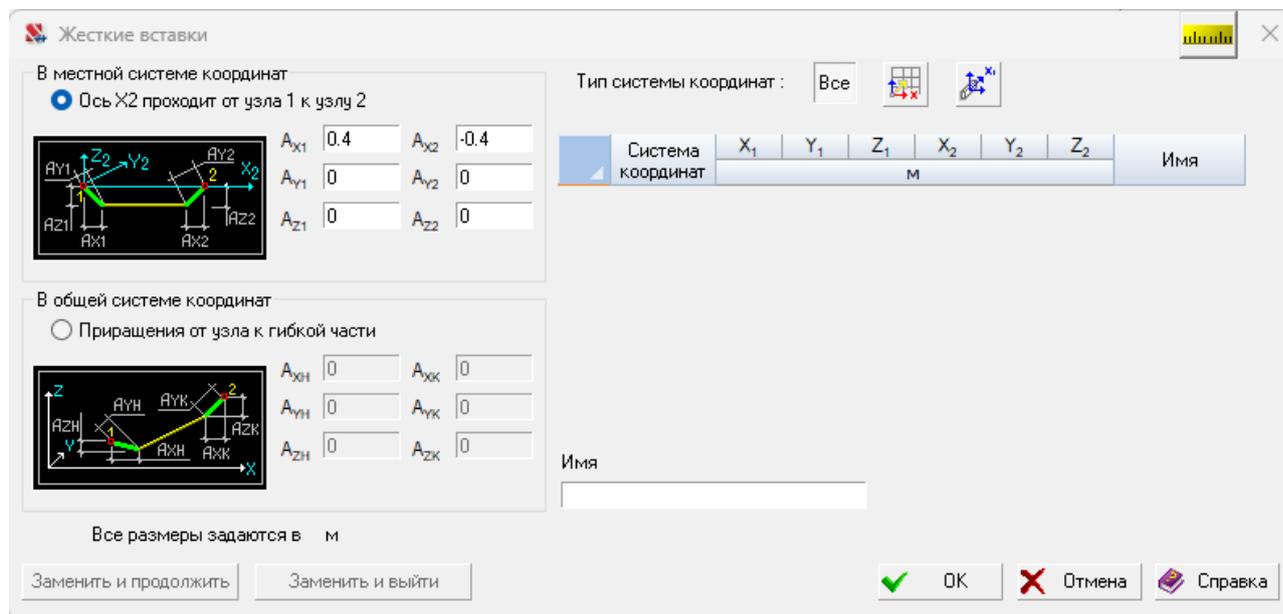


Рис. 3.8. Создание жестких вставок

Отметить все колонны и нажать **Подтверждение** .

2. Установка жестких вставок для ригелей перекрытия первого этажа. На вкладке **Назначения** выбрать **Установка/Удаление жестких вставок** .

В разделе **В местной системе координат** ввести в поле **Ax1: 0.3** (левая часть ригеля), в поле **Ax2: -0.3** (правая часть ригеля) и нажать **ОК**. Отметить все ригели на отметке +7,200 и нажать **Подтверждение** .

3. Установка жестких вставок для остальных ригелей производится аналогично, только в поле **Ax1** следует ввести **0.2**, а в поле **Ax2: -0.2**.

Визуальный контроль установки жестких вставок производится с помощью фильтра **Жесткие вставки**  на панели **Фильтры отображения** (рис. 3.9).

После задания жестких вставок можно использовать команду **Удаление линий невидимого контура**  с соответствующими настройками (Показывать профиль стержней) на панели **Фильтры отображения**.

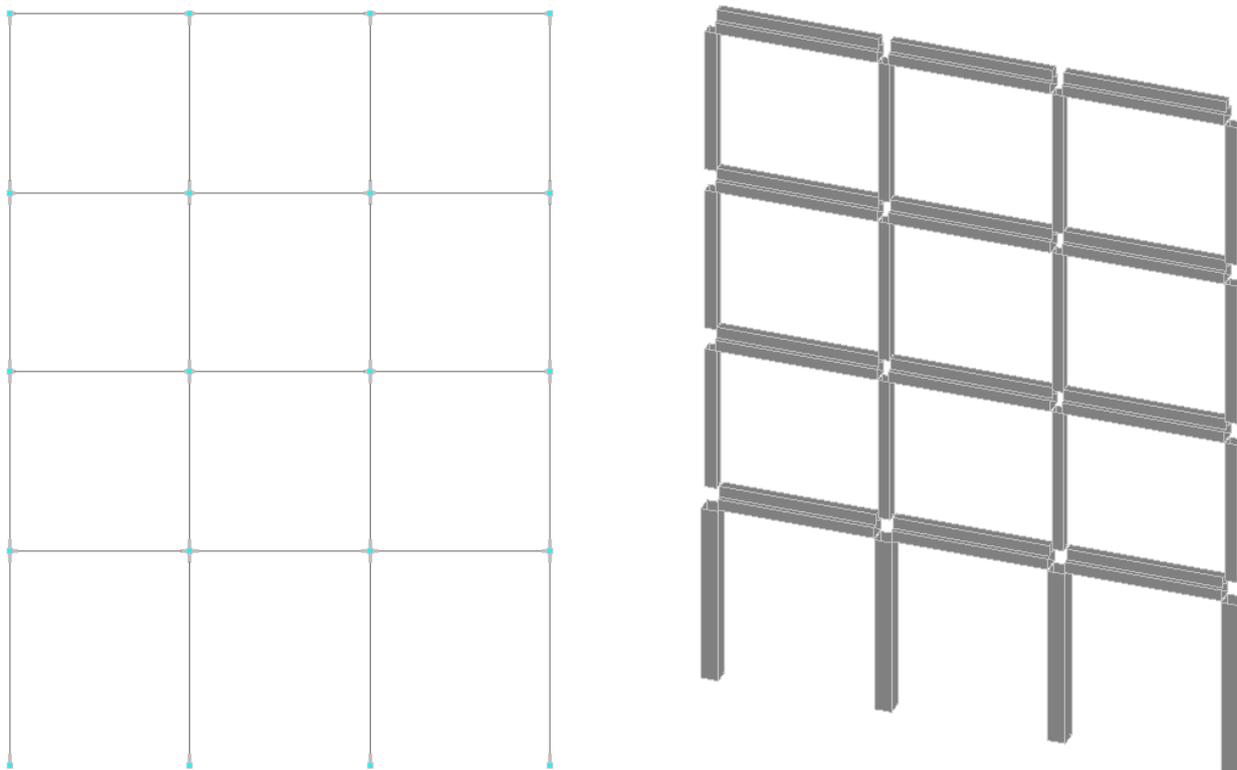


Рис. 3.9. Отображение жестких вставок

Задание нагрузок на раму

1. Задание постоянной нагрузки на раму: во вкладке **Загружения** кнопкой **Нагрузки на стержни**  вызвать одноименное диалоговое окно. В раз-

деле Система координат указать Общая система координат. Вид нагрузки Распределенная. Направление действия нагрузки – Силы, Z. Значение нагрузки P – 26 кН/м. Нажать кнопку ОК диалогового окна (рис. 3.10). Выделить на схеме все горизонтальные элементы и нажать кнопку **Подтверждение**  инструментальной панели.

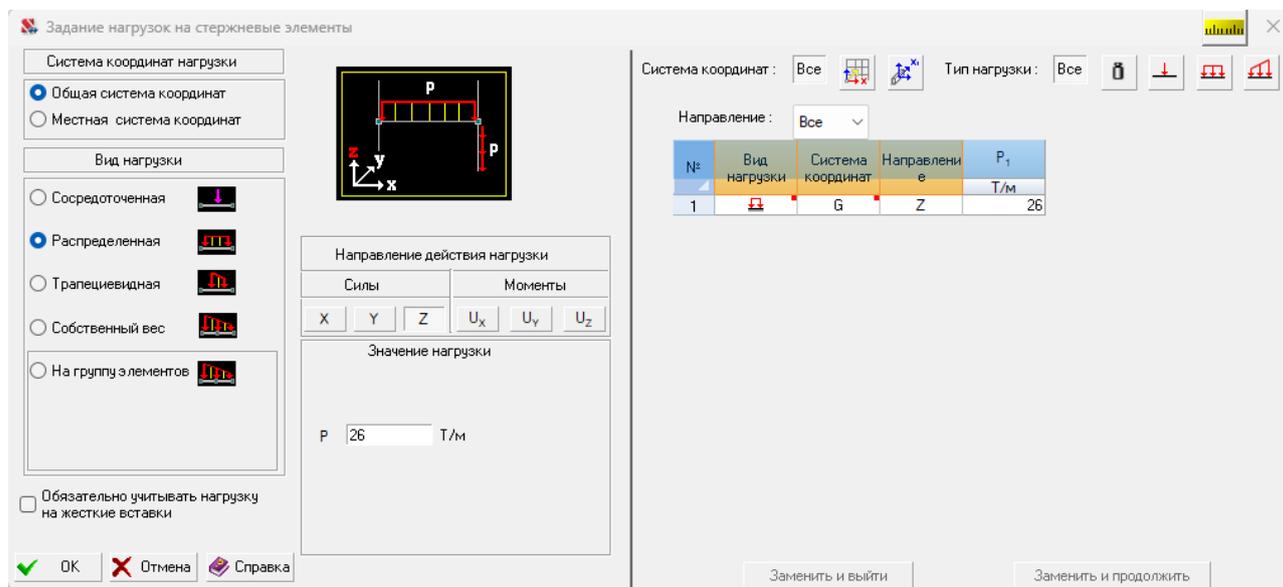


Рис. 3.10. Задание распределенной нагрузки

Записать заданное загрузение. Для этого нажать кнопку **Сохранить/Добавить загрузение**  инструментальной панели. В диалоговом окне *Сохранение загрузения* ввести имя загрузения (**Постоянная нагрузка**) выбрать *Вид нагрузки* **Другие**.

2. Загрузение собственным весом выполнить нажатием кнопки **Собственный вес** , расположенной во вкладке **Загрузения**. Программа запросит коэффициент включения собственного веса, следует установить значение **1** и нажать **ОК**.

Записать созданное загрузение под названием **Собственный вес**. *Тип загрузения* **Постоянные нагрузки**, *Вид загрузения* – **Вес бетонных** (более 1,6...), *Коэффициент надежности по нагрузке* – **1,1**. Нажать кнопку **Записать как новое**, отметить опцию **Сохранить и перейти к созданию нового загрузения** и нажать кнопку **ОК**.

3. Задание временной нагрузки на раму по первому варианту (рис. 3.2): во вкладке **Загружения** кнопкой **Нагрузки на стержни**  вызвать одноименное диалоговое окно. Указать *Значение нагрузки* $P = 62,6$ кН/м. Нажать кнопку **ОК**. Выделить на схеме горизонтальные элементы в крайних пролетах и нажать кнопку **Подтверждение**  инструментальной панели.

Записать созданное загружение под названием **Временная вариант 1**. Указать *Тип загружения* – **Кратковременные нагрузки**, *Вид загружения* – **Полные нагрузки на перекрытия жилых...**, *Коэффициент надежности по нагрузке* – **1,3**. Нажать кнопку **Записать как новое**, отметить опцию **Сохранить и перейти к созданию нового загружения** и нажать кнопку **ОК**.

4. Задание временной нагрузки на раму по второму варианту производится аналогично п. 3, следует выделить на схеме горизонтальные элементы в среднем пролете.

Записать созданное загружение под названием **Временная вариант 2**.

5. Задание временной нагрузки на раму по третьему варианту производится аналогично п. 3, следует выделить на схеме горизонтальные элементы в левом и среднем пролетах.

Записать созданное загружение под названием **Временная вариант 3**.

Задание расчетных сочетаний усилий

Во вкладке **Управление** нажать кнопку **Выйти в экран управления проектом** . Раскрыть содержимое пункта **Специальные исходные данные** (нажатием на знак «+») раздела **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ** дерева проекта. Активировать пункт **Расчетные сочетания усилий и перемещений**.

Поскольку временные нагрузки являются взаимоисключающими, следует указать, что они **Участвуют в групповых операциях** путем установки флажков в колонне **Взаимоисключения**. Для нагрузок **3, 4, 5**. В разделе **Связи загружений** нажать кнопку **Взаимозаключение**. В появившемся окне расставить

флажки как на рис. 3.11 (все нагрузки исключают друг друга) и нажать **ОК**, поставить флажки в столбце **Активное нагружение** и нажать **ОК**.

Закончить работу с окном нажатием кнопки **ОК**.

Статический расчет

После создания расчетной модели сооружения выполнить его статический расчет. Активировать пункт **Линейный** раздела **РАСЧЕТ** дерева проекта. В диалоговом окне **Параметры расчета** убрать галочку с **Не учитывать равномерно-распределенные нагрузки на жестких вставках стержневых элементов** и нажать кнопку **ОК**.

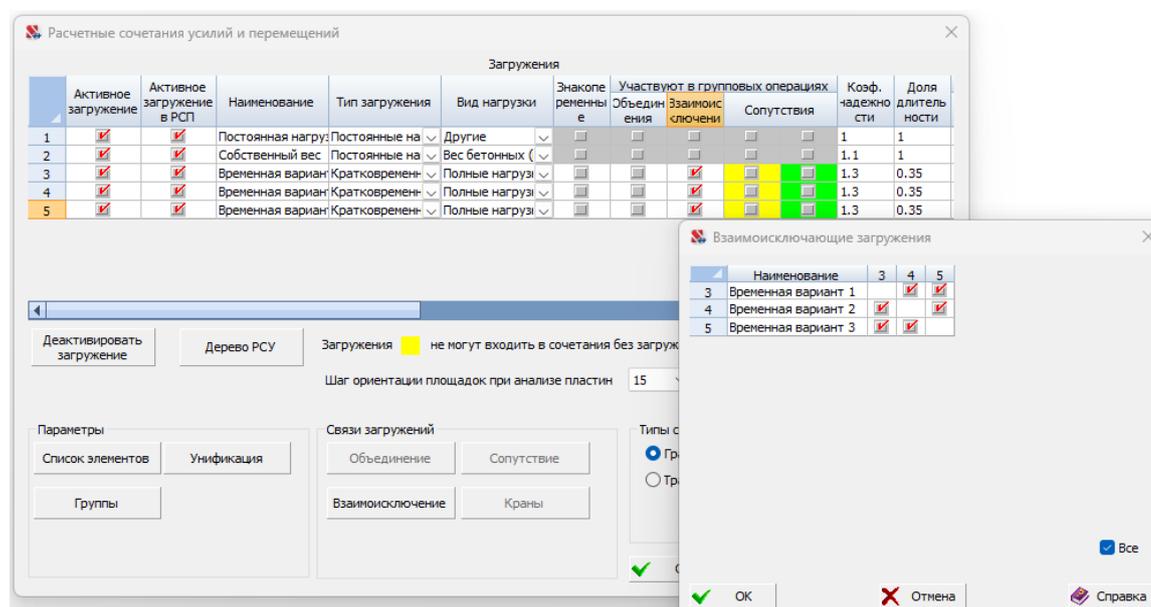


Рис. 3.11. Расчетные сочетания усилий и перемещений

После выполнения всех расчетов просмотреть информацию в окне **Протокол выполнения расчета** (рис. 3.12). Если в протоколе подтверждается правильность выполнения расчета (**Задание выполнено**) и нет замечаний (**Геометрически изменяемая система** и пр.), то нажатием кнопки **Заккрыть окно расчета**  перейти в дерево проекта для анализа результатов расчета.

```

14:06:46 1 - 7.60846
14:06:46 2 - 8.41132
14:06:46 3 - 21.9562
14:06:46 4 - 10.9674
14:06:46 5 - 27.8339
14:06:46 Сортировка перемещений
14:06:46 Контроль решения
14:06:47 Вычисление усилий
14:06:47 Сортировка усилий и напряжений
14:06:47 Выбор расчетных сочетаний усилий по СП 20.13330.2016, изменение 1,2,3
14:06:47 Выбор расчетных сочетаний перемещений по СП 20.13330.2016, изменение 1,2,3
14:06:47 Выбор расчетных сочетаний прогибов в стержнях по СП 20.13330.2016, изменение 1,2,3
14:06:47 ЗАДАНИЕ ВЫПОЛНЕНО

```

Рис. 3.12. Протокол расчета

Просмотр результатов расчета

В разделе **РЕЗУЛЬТАТЫ** дерева проекта установить курсор в пункт **Графический анализ** и активировать окно постпроцессора. Анализ деформированной схемы производится с помощью вкладки **Деформации**. Нажать кнопку **Отображение деформированной схемы**  и **Вывод значений перемещений в узлах** , в результате на экране отобразится изображение, представленное на рис. 3.13 – деформации от **Постоянной нагрузки** по направлению ост **Z** (см).

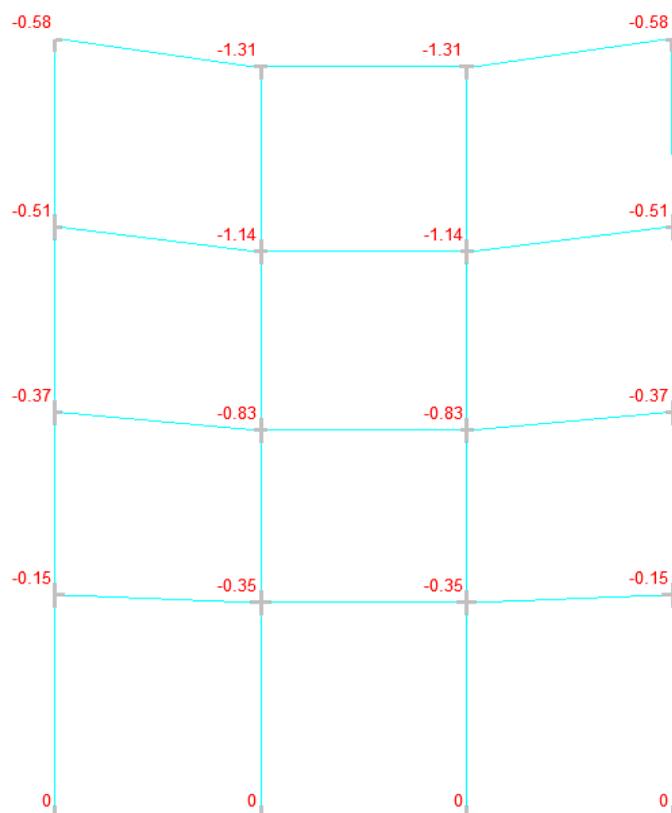


Рис. 3.13. Перемещения узлов от постоянной нагрузки

Во вкладке **Эпюры усилий** из списка **Выбор вида усилия** выбрать **M**, из списка **Выбор загрузки** – **L5 Временная вариант 3**. Нажать кнопку **Эпюры усилий**  инструментальной панели и получить эпюру изгибающих моментов M_y (кН*м). Отображение числовых значений производится с помощью фильтра **Оцифровка изополей/изолиний**  (рис. 3.14). Для получения значений максимальных усилий в стержнях нажать кнопку **Цветовая индикация положительных значений усилий**  или **Цветовая индикация отрицательных значений усилий** . Аналогично можно вывести на экран эпюры остальных внутренних усилий (N , Q), выбрав их из ниспадающего списка **Выбор вида усилия**.

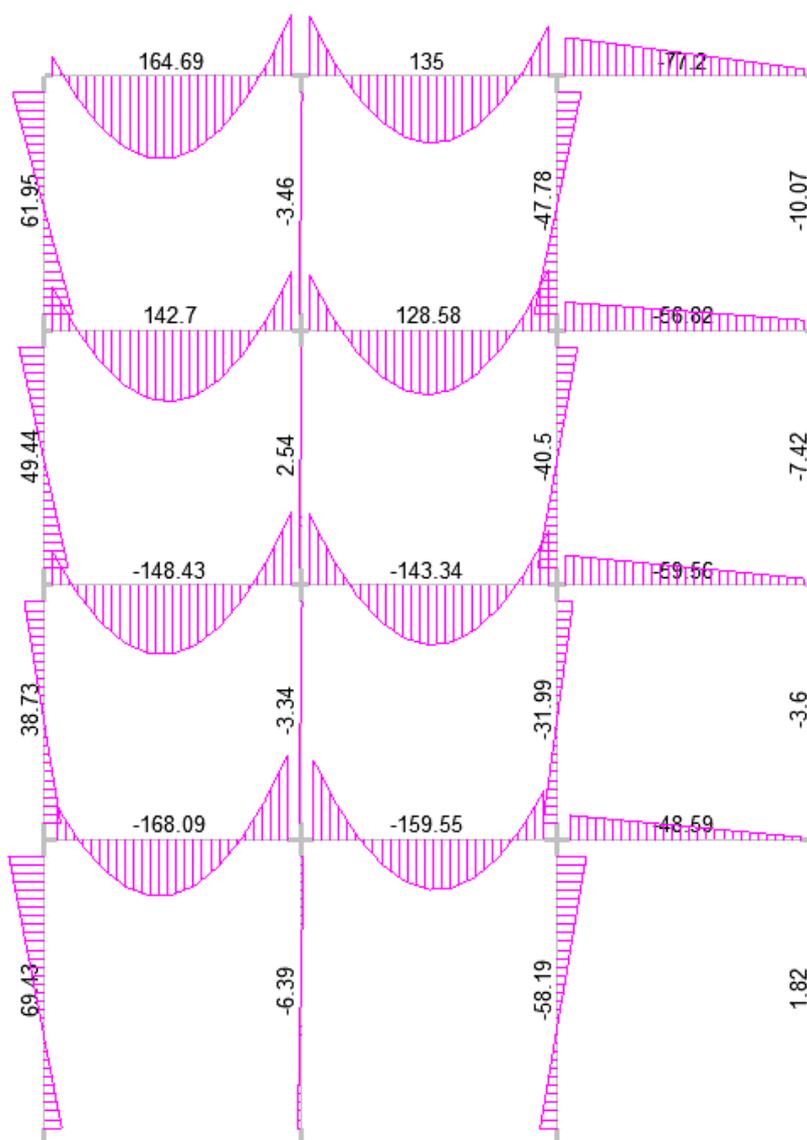


Рис. 3.14. Эпюра изгибающего момента M_y (кН*м)

Просмотр результатов статического расчета

Перед использованием постпроцессора необходимо создать расчетную схему, приложить нагрузки и вычислить Расчетные сочетания усилий.

В режиме **Графический анализ** перейти во вкладку **Железобетон** и выбрать **Ввод данных** . Подбор арматуры в стержневых элементах выполняется для **Групп армирования стержней** или **Конструктивных элементов армирования стержней**. В группу армирования стержней могут входить конечные элементы, для которых будет использован один модуль армирования при подборе арматуры. При этом следует заметить, что каждый конечный элемент, входящий в группу, рассматривается как отдельный конструктивный элемент.

Конструктивный элемент моделирует физически однородный элемент конструкции (балку, участок ступенчатой колонны, пояс фермы и т.д.). В качестве конструктивного элемента рассматривается непрерывная цепочка конечных элементов. При этом геометрическая длина конструктивного элемента равна сумме длин конечных элементов, его образующих.

В данном примере используем группы армирования стержней. Вызвать команду **Создание групп армирования стержней** . Выделить на схеме колонны первого этажа и нажать кнопку **Подтверждение** . В открывшемся окне ввести необходимые данные во вкладках **Общие параметры** и **Бетон** (рис. 3.15 и 3.16). В данных вкладках вводится информация, содержащаяся в нормативных документах, которые используются для расчета.

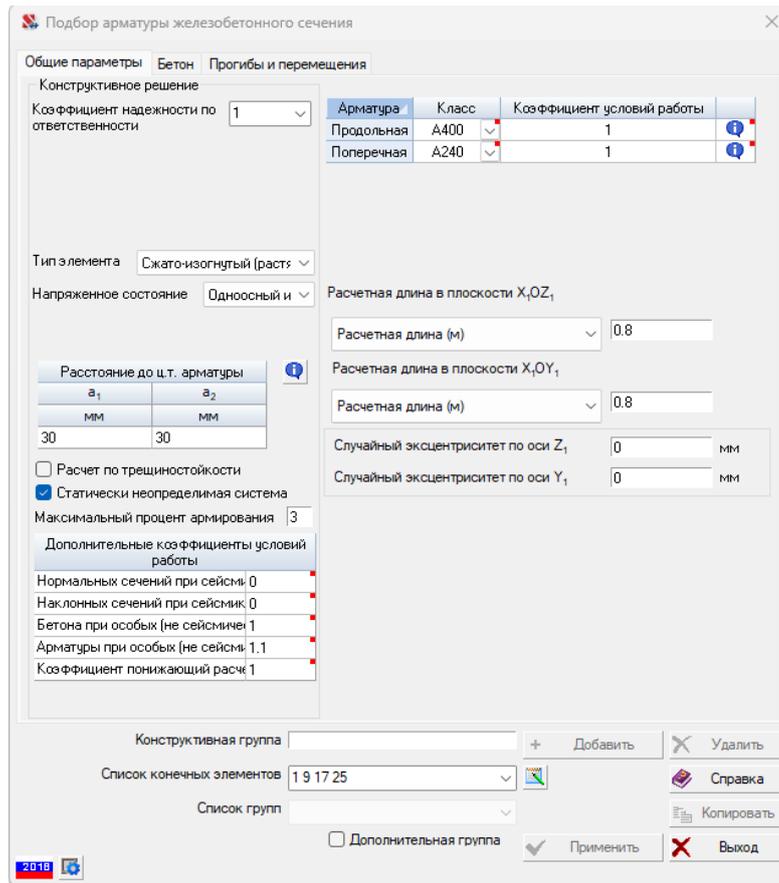


Рис. 3.15. Общие параметры Колонны 1-й этаж

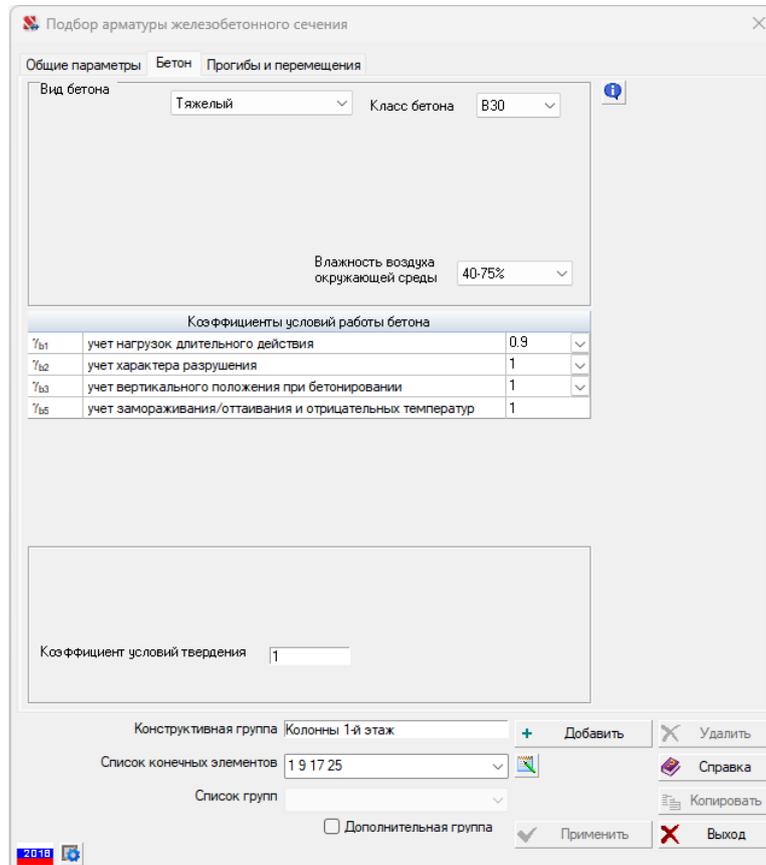


Рис. 3.16. Вкладка **Бетон** Колонны 1-й этаж

Далее в поле **Конструктивная группа** ввести **Колонны 1-ый этаж**, нажать **Добавить** и **Выход**. В появившемся информационном окне программы нажать **Да**.

Аналогично создать группу из колонн остальных этажей. Имя конструктивной группы **Колонны 2-4 этажи**.

Далее выделить на схеме все ригели и нажать **Подтверждение**. В открывшемся окне ввести данные, соответствующие рис. 3.17 - 3.19 и сохранить группу под именем **Ригели**.

The screenshot shows the 'Подбор арматуры железобетонного сечения' dialog box with the 'Общие параметры' tab selected. The 'Конструктивное решение' section includes a dropdown for 'Конструктивное решение' set to '1', a dropdown for 'Тип элемента' set to 'Изгибаемый', and a dropdown for 'Напряженное состояние' set to 'Одноосный и'. Below this is a table for 'Расстояние до ц.т. арматуры' with columns 'a₁' and 'a₂' (both in mm) and values '30' and '30'. There are checkboxes for 'Расчет по трещиностойкости' and 'Статически неопределимая система', both checked. A dropdown for 'Максимальный процент армирования' is set to '3'. A section for 'Дополнительные коэффициенты условий работы' contains a list of coefficients: 'Нормальных сечений при сейсмич' (0), 'Наклонных сечений при сейсмич' (0), 'Бетона при особях (не сейсмиче' (1), 'Арматуры при особях (не сейсмич' (1.1), and 'Коэффициент понижающий расч' (1). At the bottom, there are fields for 'Конструктивная группа', 'Список конечных элементов' (2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24), and 'Список групп'. Buttons for '+ Добавить', 'Удалить', 'Справка', 'Копировать', 'Применить', and 'Выход' are visible.

Арматура	Класс	Кoeffициент условий работы	Диаметр
Продольная	A400	1	18
Поперечная	A240	1	

Расстояние до ц.т. арматуры	a ₁	a ₂
мм	мм	мм
	30	30

Рис. 3.17. Общие параметры Ригели

Для подбора арматуры перейти в режим **Подбор арматуры**  и нажать **Подбор арматуры** . После выполнения расчета станет активной панель с результатами подбора арматуры (рис. 3.20).

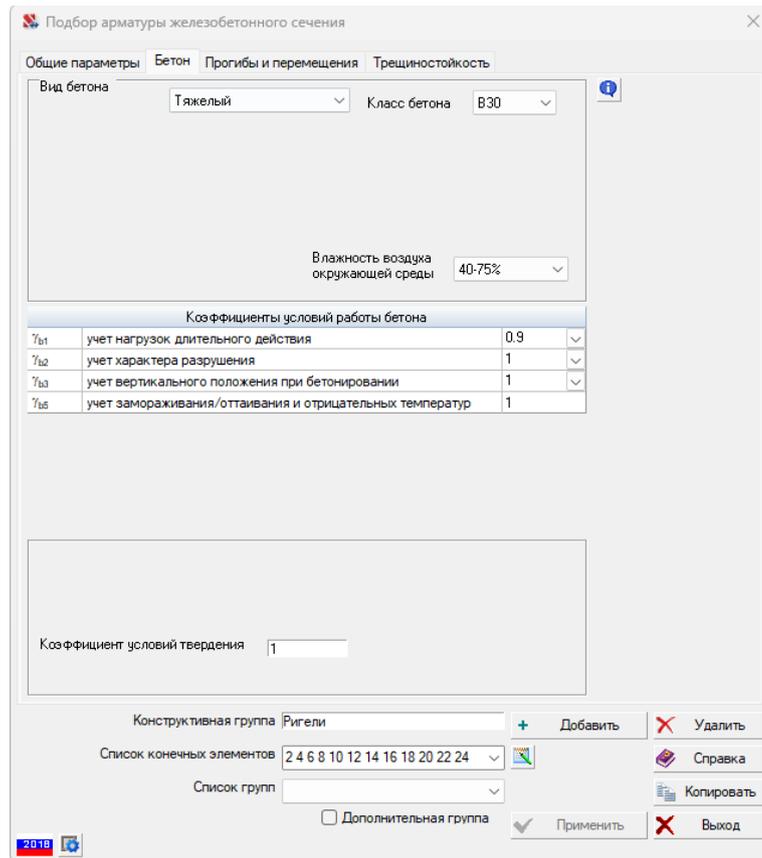


Рис. 3.18. Вкладка **Бетон Ригели**

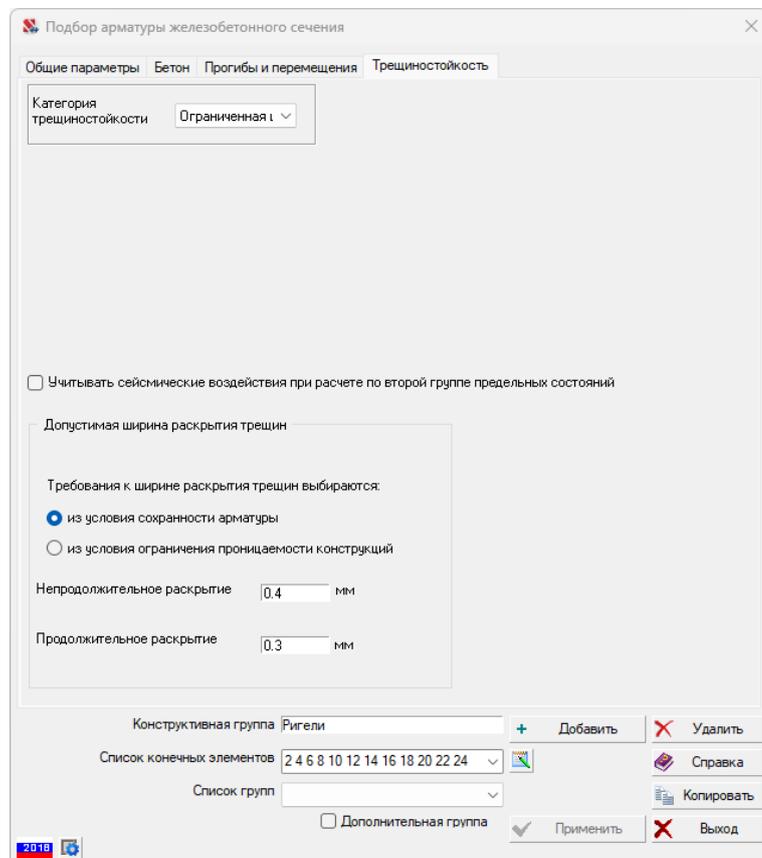


Рис. 3.19. Вкладка **Трещиностойкость Ригели**



Рис. 3.20. Панель с результатами подбора арматуры

Из первого ниспадающего списка необходимо выбрать конструктивный элемент или группу элементов, результаты расчета которой необходимо проанализировать. Из второго списка выбирается вид результата расчета. В стержневых элементах возможно отображение результатов армирования в виде Эпюр армирования стержней или Цветового отображения эпюр армирования. Например, на рис. 3.21 отображены результаты армирования ригелей в виде цветового отображения армирования. Результаты показывают необходимое количество арматуры (см^2) для сечения стержневого элемента.

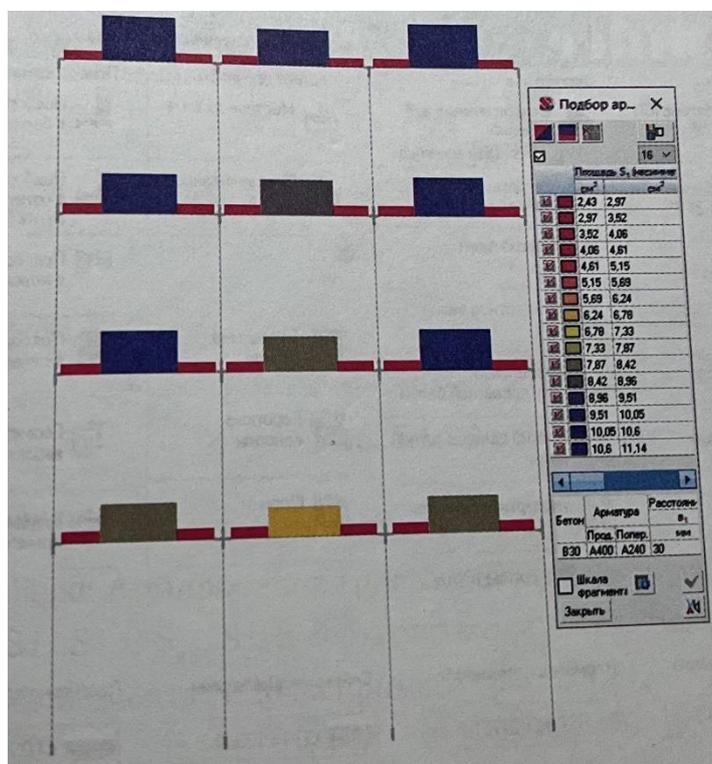


Рис. 3.21. Цветное отображение арматуры

2.4 Ребристо-кольцевой деревянный купол с блоками жесткости.

Исходные данные

Геометрические параметры и основные размеры купола представлены на рис. 4.1.

▪ Каркас купола образован двенадцатью меридиональными ребрами-арками, двумя кольцами прогонов и ромбическими блоками жесткости, расположенными в шахматном порядке;

▪ Каждое меридиональное ребро образовано тремя прямолинейными элементами;

▪ Сверху и снизу каркас опирается на опорные кольца;

▪ Материал элементов купола: древесина (лиственница: объемный вес – 6,5 кН/м³, модуль упругости – $1e+07$ кН/м², коэффициент Пуассона – 0,5);

▪ Материал опорных колец – сталь;

▪ Диаметр верхнего опорного кольца – 400 мм;

▪ Меридиональные ребра-арки закрепляются к опорной горизонтальной поверхности сферическими шарнирно-неподвижными опорами;

▪ Примыкание кольцевых прогонов и блоков жесткости к меридиональным ребрам – шарнирное. Примыкание меридиональных ребер к опорным кольцам – шарнирное;

▪ На купол действует нагрузка от собственного веса элементов, а также распределенная по длине ребер снеговая нагрузка (рис. 4.2);

▪ Элементы каркаса имеют прямоугольное сечение 15х30 см; верхнее опорное кольцо – 1,2х30 см; нижнее кольцо – 30х1,6 см.

Задача

▪ Подготовить схему меридиональной полуарки в программе AutoCAD для последующего экспорта в ПК SCAD;

▪ Создать пространственную стержневую модель купола;

▪ Определить параметры НДС модели от заданных нагрузок; визуализировать результаты расчета.

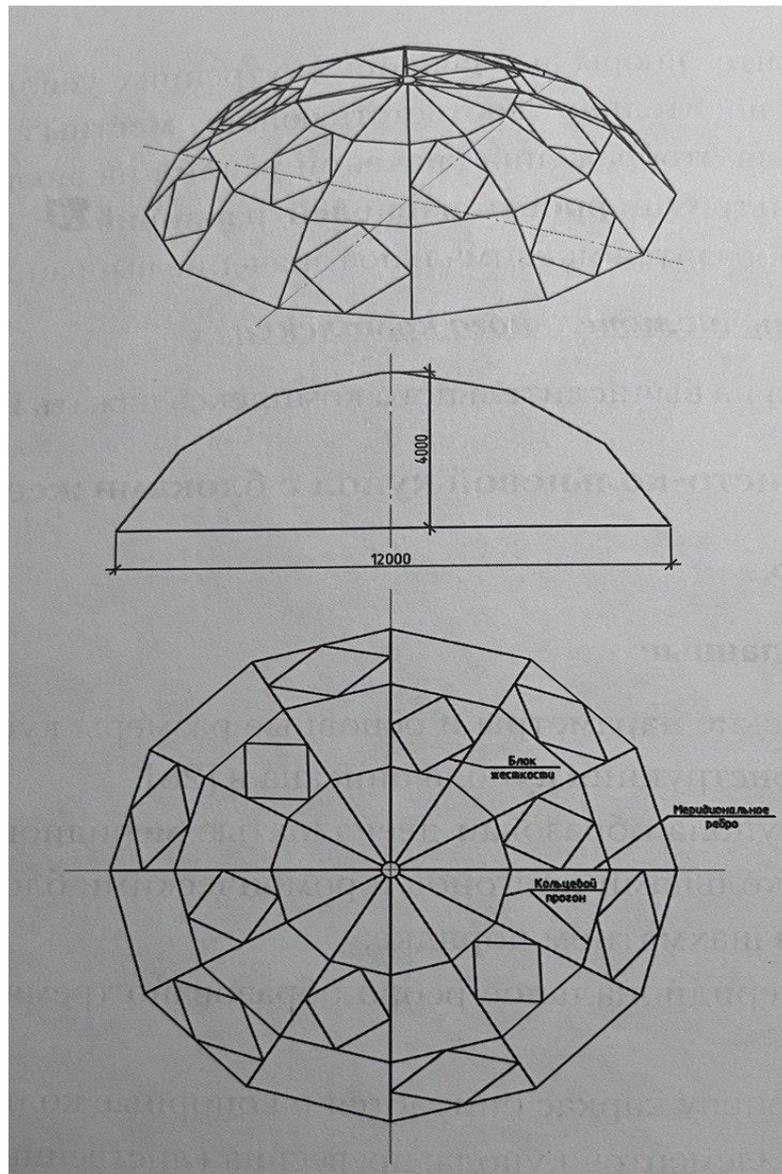


Рис. 4.1. Геометрические характеристики купола

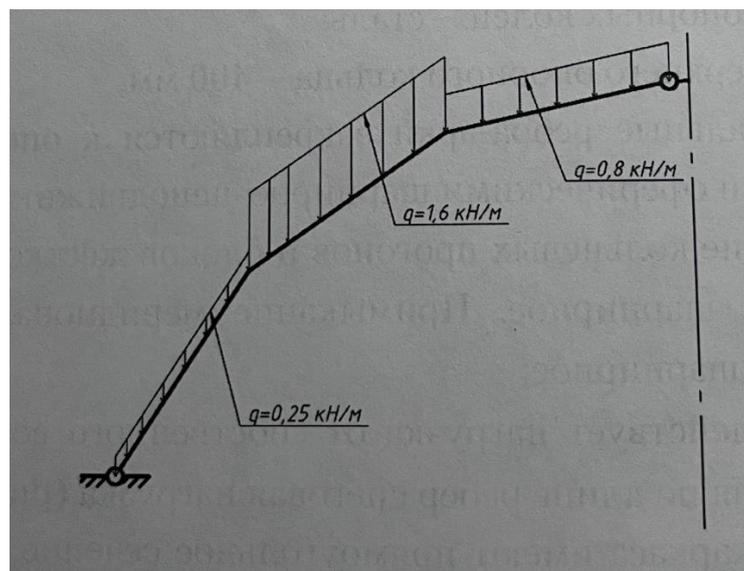


Рис. 4.2. Снеговая нагрузка

Алгоритм решения

Подготовка схемы меридиональной полуарки в AutoCAD

После запуска AutoCAD в программе необходимо начертить меридиональную полуарку рассматриваемого купола (рис. 4.3).

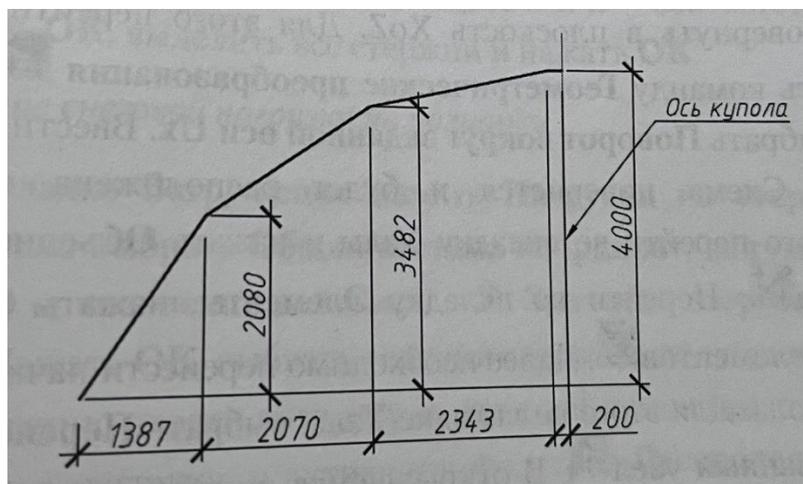


Рис. 4.3. Геометрические параметры полуарки

После создания чертежа его необходимо сохранить в формате *.dxf. Для этого необходимо в главной панели выбрать **Файл...Сохранить как**. В открывшемся окне ввести имя файла. Далее из списка **Files of type** выбрать **AutoCAD...DXF (*.dxf)**. При этом необходимо оставить только те элементы, которые необходимо экспортировать в SCAD (доп. элементы удалить). Закрыть AutoCAD.

Импорт геометрии в ПК SCAD

Запустить комплекс SCAD. В открывшемся окне на главной панели выбрать **Опции...Единицы измерения**. В открывшемся окне во вкладке **Входные** установить *м, см, кН*.

Для импорта геометрии нажать **Проект...Импорт...DXF, DWG**. В открывшемся окне выбрать файл **Купол.dxf**. В нижней части окна установить единицы измерения заданные в AutoCAD – *мм*. Нажать **ОК**. Откроется дерево проекта. Из папки **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ** выбрать режим **Расчетная схема**.

Откроется рабочая область программы с импортированной геометрией. При этом отрезки будут представлены стержневыми элементами, а в начале и в конце каждого отрезка генерируются узлы.

Моделирование купола

Поскольку по умолчанию рабочая плоскость в AutoCAD XoY , то после импорта в ПК SCAD схема также расположена в плоскости XoY . Схему необходимо повернуть в плоскость XoZ . Для этого перейти во вкладку **Схема**, вызвать команду **Геометрические преобразования** . В открывшемся окне выбрать **Поворот вокруг заданной оси Ux**. Ввести значение **90**. Нажать **ОК**. Схема повернется и будет расположена в плоскости XoZ . После этого перейти во вкладку **Узлы** и нажать **Объединение совпадающих узлов** . Перейти во вкладку **Элементы**, нажать **Объединение совпадающих элементов** . Далее необходимо перенести начало координат в вершину купола. Для этого во вкладке **Узлы** выбрать **Перенос начала координат в указанный узел** . В открывшемся окне активировать перенос начала координат в указанный узел, нажать **ОК**, выбрать на схеме верхний узел полуарки и нажать **ОК**. После активации фильтра **Отображение общей системы координат**  схема примет вид, показанный на рис. 4.4.

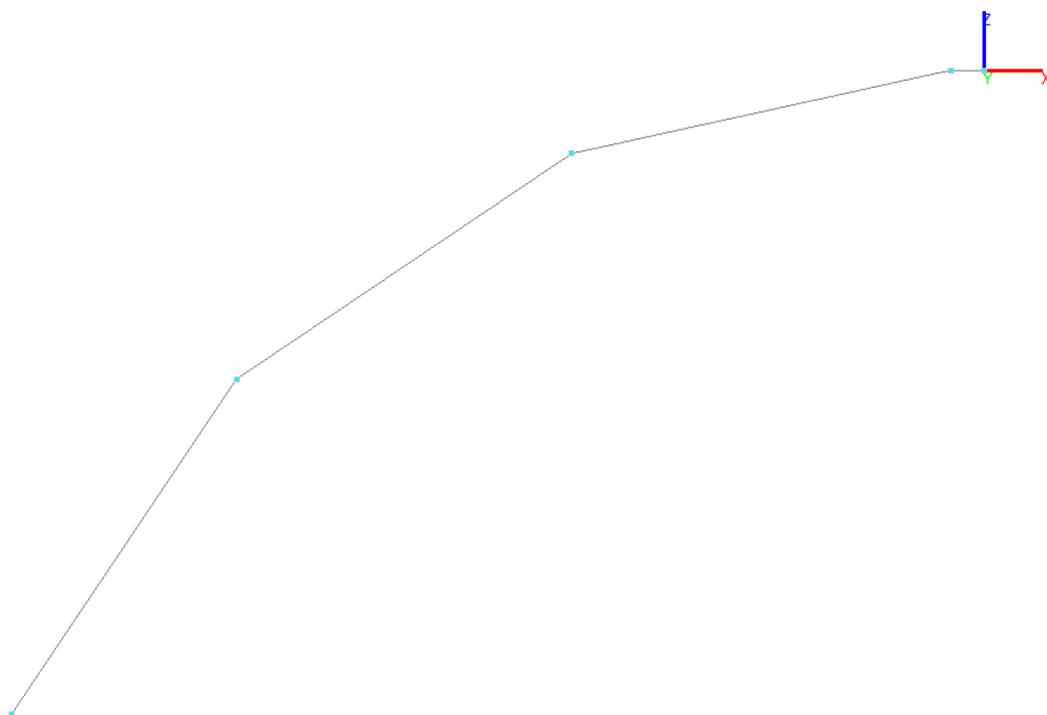


Рис. 4.4. Расчетная схема полуарки

Назначение жесткости меридиональной полуарке

Во вкладке **Назначения** выбрать **Назначение жесткостей стержням** . Активировать **Параметрические сечения**. Перейти в одноименную вкладку. В разделе **Материал** открывшейся вкладки **Параметрические сечения** задать следующие характеристики: **Объемный вес** (6.5 кН/м^3), **Модуль упругости** ($1e+07 \text{ кН/м}^2$), **Коэффициент Пуассона** (0.499); в разделе **Сечение** – оставить установленное по умолчанию (сплошное прямоугольное); в разделе **Параметры сечения** задать b и h – соответственно 15 см и 30 см . Нажать **ОК**, выделить все стержни и нажать **ОК**.

Задание снеговой нагрузки на полуарку

Во вкладке **Загружения** нажать **Нагрузки на стержни** . В открывшемся окне выбрать **Общая система координат**, вид нагрузки – **Распределенная**, направление действия – **Z**. Значение нагрузки – 0.8 кН/м (рис. 4.5). Нажать **ОК**, выбрать верхний стержень полуарки и нажать **ОК**.

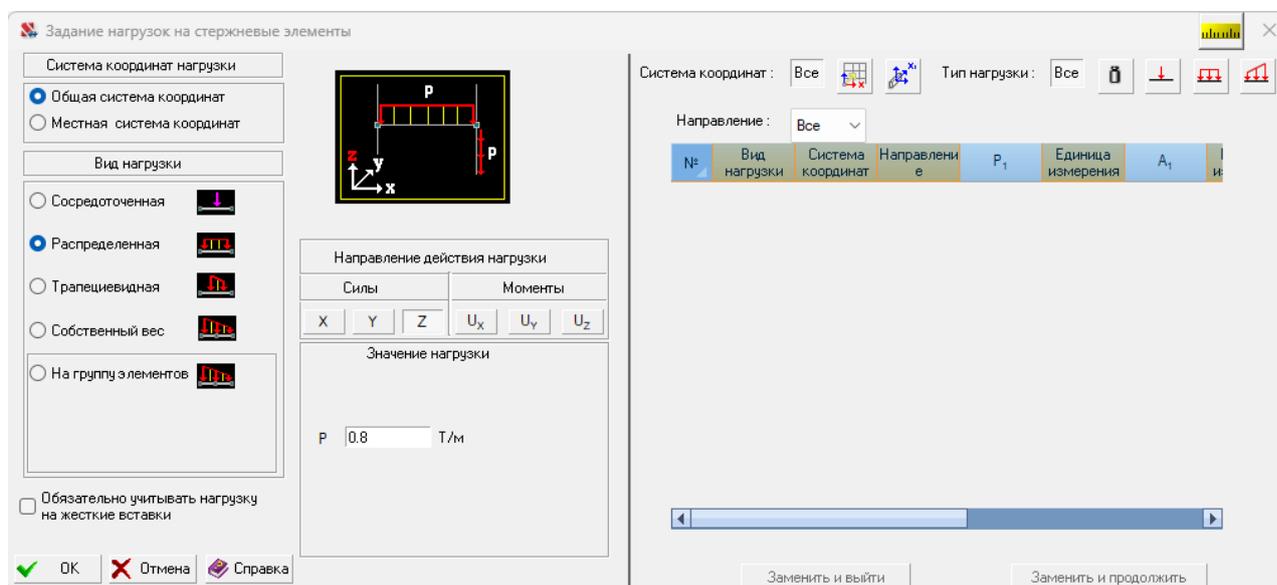


Рис. 4.5. Задание нагрузок

Аналогично ввести нагрузку на средний и нижний стержни полуарки. После ввода нагрузок и активации фильтров **Распределенные нагрузки**  и **Значения нагрузок**  схема примет вид, показанный на рис. 4.6.

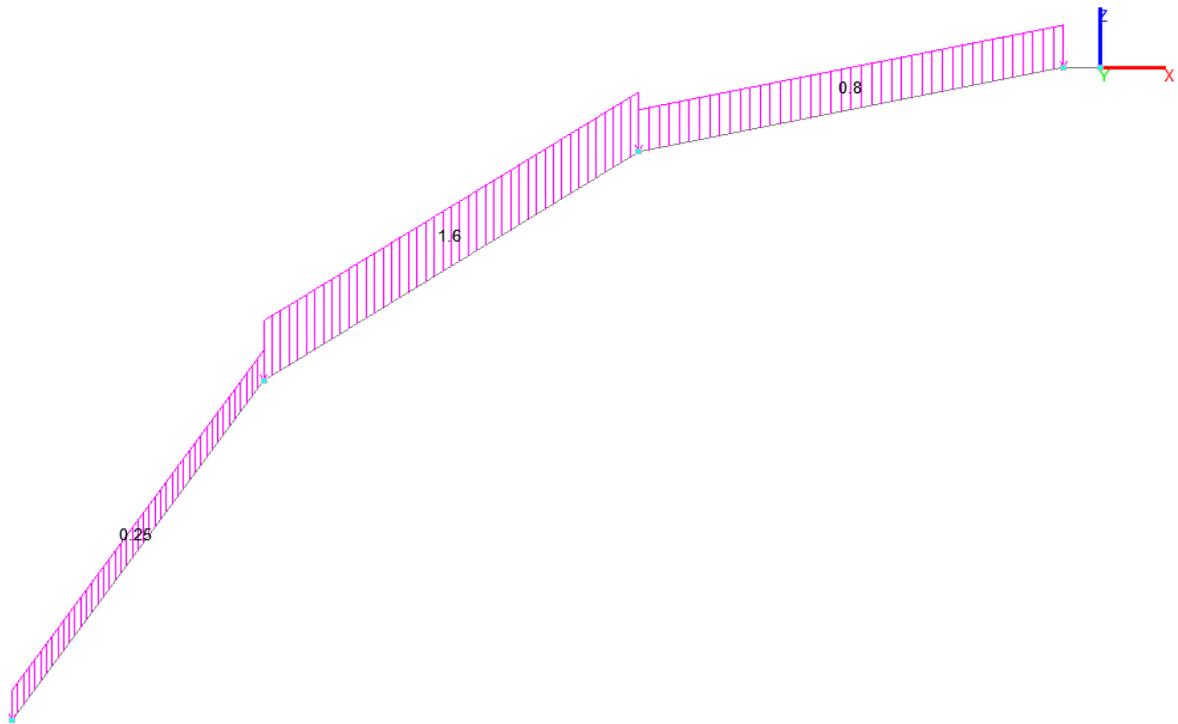


Рис. 4.6. Расчетная модель с нагрузкой

Для сохранения загрузки нажать **Сохранить/Добавить загрузку** . В открывшемся окне ввести имя загрузки **Снеговое**. Из ниспадающего списка **Тип загрузки** выбрать **Кратковременные нагрузки**, **Вид нагрузки** выбрать **Полные снеговые нагрузки...** Нажать **Записать как новое** и **ОК**.

Создание сегмента купола

Во вкладке **Схема** выбрать **Копирование схемы** . В открывшемся окне установить **Циклическая симметрия вокруг оси Z**; угол – **30**; количество – **1**. В правой части окна активировать **Копирование нагрузок**, **Удалять совпадающие узлы**, **Удалять совпадающие элементы** (рис. 4.7). Нажать **ОК**. В рабочей области отобразится фрагмент купола из двух полуарок. Перейти во вкладку **Элементы**. Выбрать **Удаление элементов** . Выбрать два коротких стержня, примыкающих к вершине купола и нажать **ОК**, удалив эти стержни. Во вкладке **Элементы** выбрать **Добавление стержней** . В открывшемся окне назначить жесткость кольцевым элементам и установить шарниры (освободить угловые связи **UY** и **UZ** в 1-ом и 2-ом узлах) и ввести элементы кольцевых прогонов. Для

удобства добавления этих элементов можно на панели визуализации выбрать Проекция на плоскость **XoY** . Аналогично добавить элементы верхнего и нижнего опорных колец, назначив им соответствующие жесткости. Схема после добавления кольцевых элементов показана на рис. 4.8.

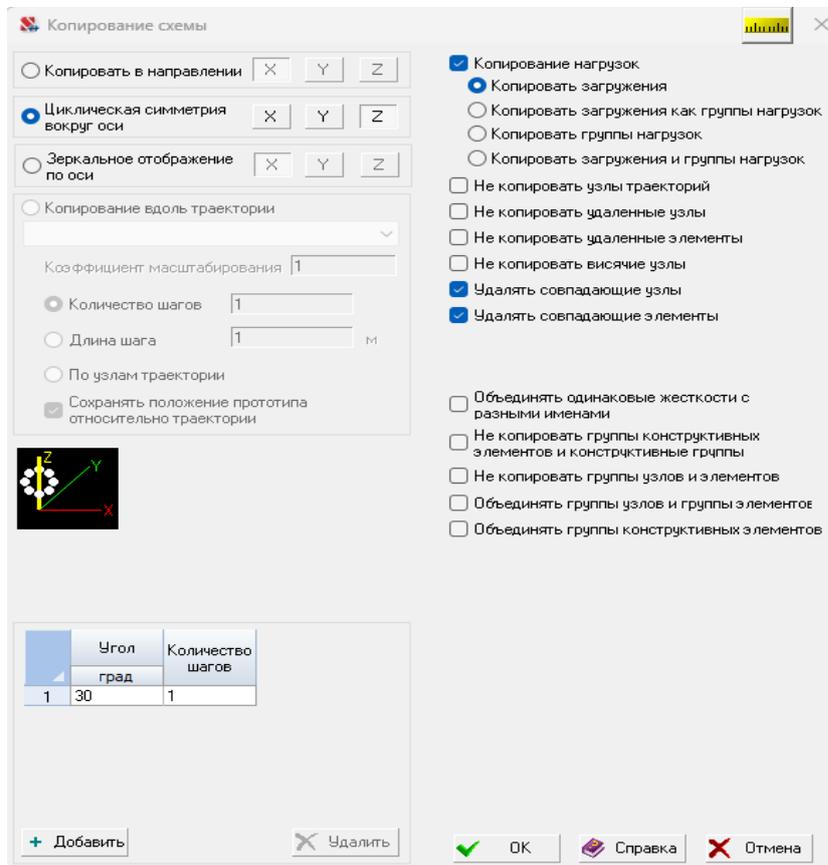


Рис. 4.7. Копирование схемы

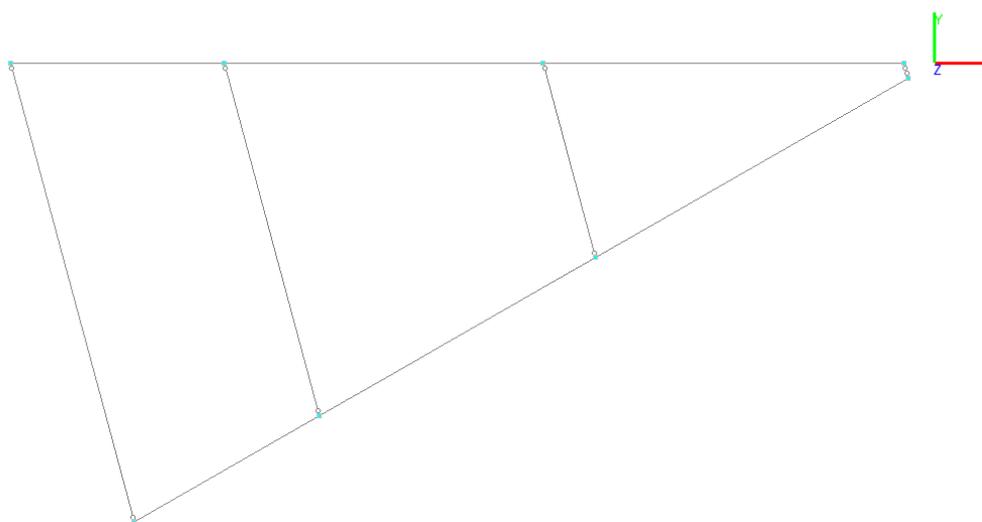


Рис. 4.8. Расчетная схема с кольцевыми прогонами

Для обеспечения шарнирного примыкания меридиональных арок к верхнему и нижнему опорным кольцам необходимо установить шарниры (освободив связи UY и UZ) в первом узле элементов полуарок, примыкающих к нижнему кольцу и во втором узле элементов полуарок, примыкающих к верхнему кольцу.

Во вкладке элементы выбрать **Разбивка стержня** . В открывшемся окне выбрать **на n равных участков – 2**. Нажать **ОК**. На схеме выбрать элементы нижнего и среднего участков полуарок и нажать **ОК**. Аналогично разбить элементы нижнего опорного кольца и кольцевых прогонов.

После выполнения всех перечисленных выше операций схема примет вид, показанный на рис. 4.9. Презентационная графика (фильтр **Удаление линий невидимого контура** ) представлена на рис. 4.10.

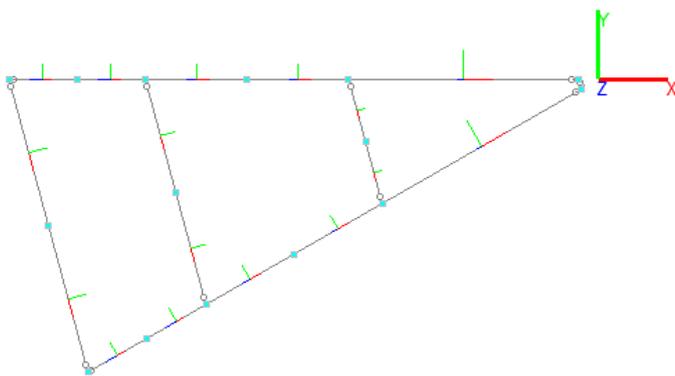


Рис. 4.9. Разбивка стержней

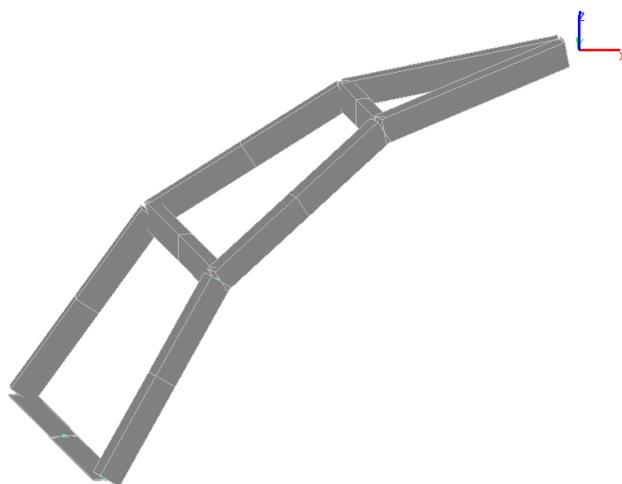


Рис. 4.10. Визуализация схемы

Копирование сегмента

Во вкладке **Схема** выбрать **Копирование схемы** . В открывшемся окне установить **Циклическая симметрия вокруг оси Z**; угол – **30**; количество – **11**. В правой части окна активировать **Копирование нагрузок**, **Удалять совпадающие узлы**, **Удалять совпадающие элементы**. Нажать **ОК**. Презентационная графика купола после копирования показана на рис. 4.11.

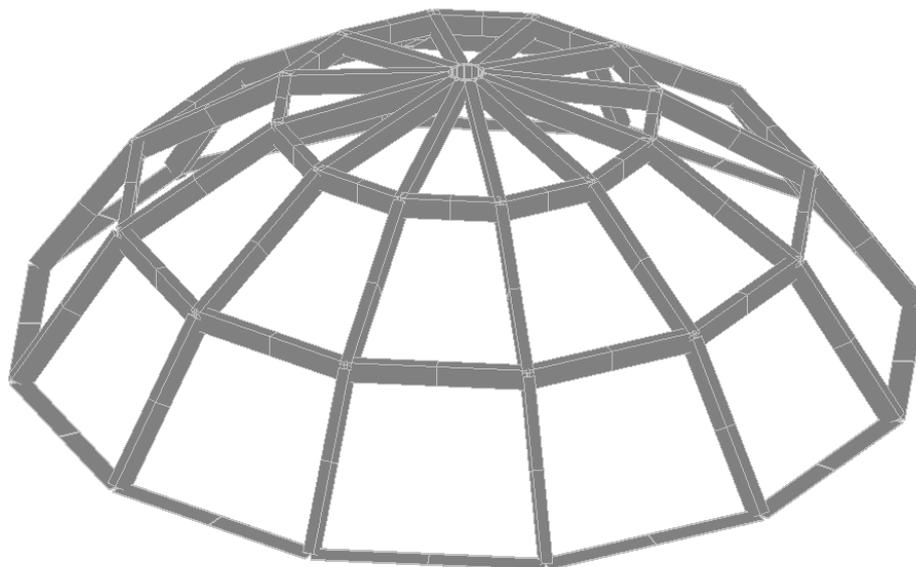


Рис. 4.11. Визуализация купола

Создание блоков жесткости

Для удобства на панели фильтров визуализации активировать **Проекция на плоскость ХоУ** . Во вкладке **Элементы** выбрать **Добавление стержней** , назначить жесткость (выбрать тип 1), установить шарниры (освободив угловые связи **UY** и **UZ**) и в соответствии с рис. 4.12 добавить блоки жесткости.

Визуализация купола после добавления блоков жесткости показана на рис. 4.13.

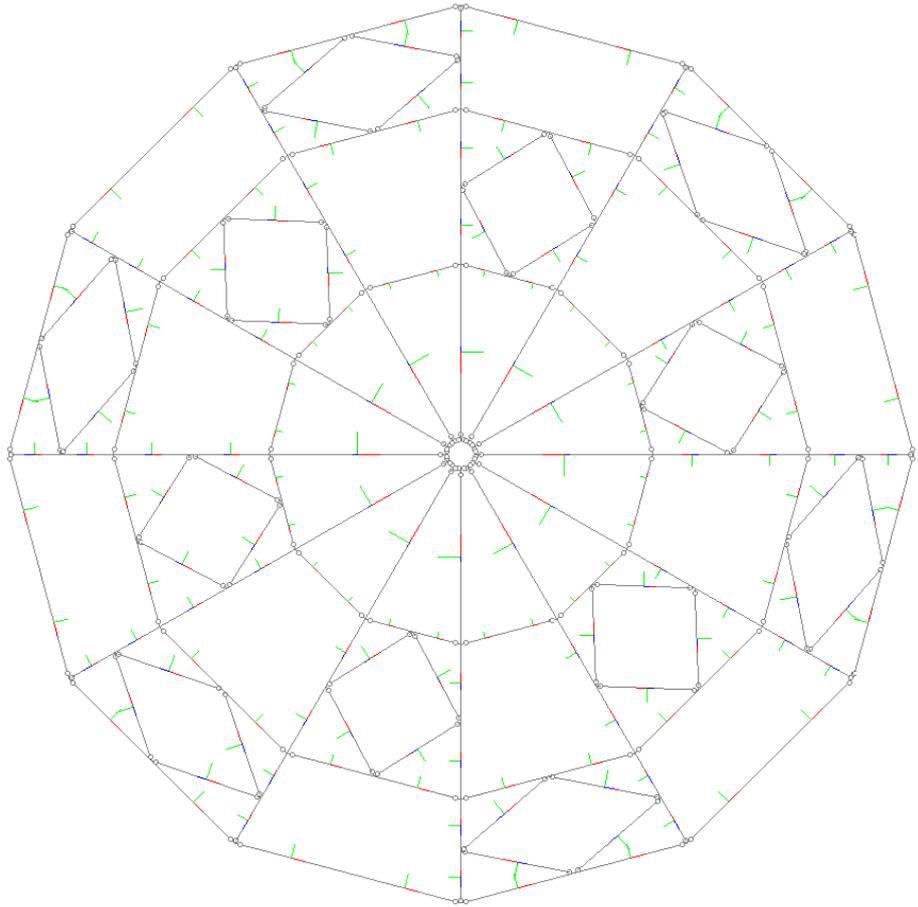


Рис. 4.12. Блоки жесткости

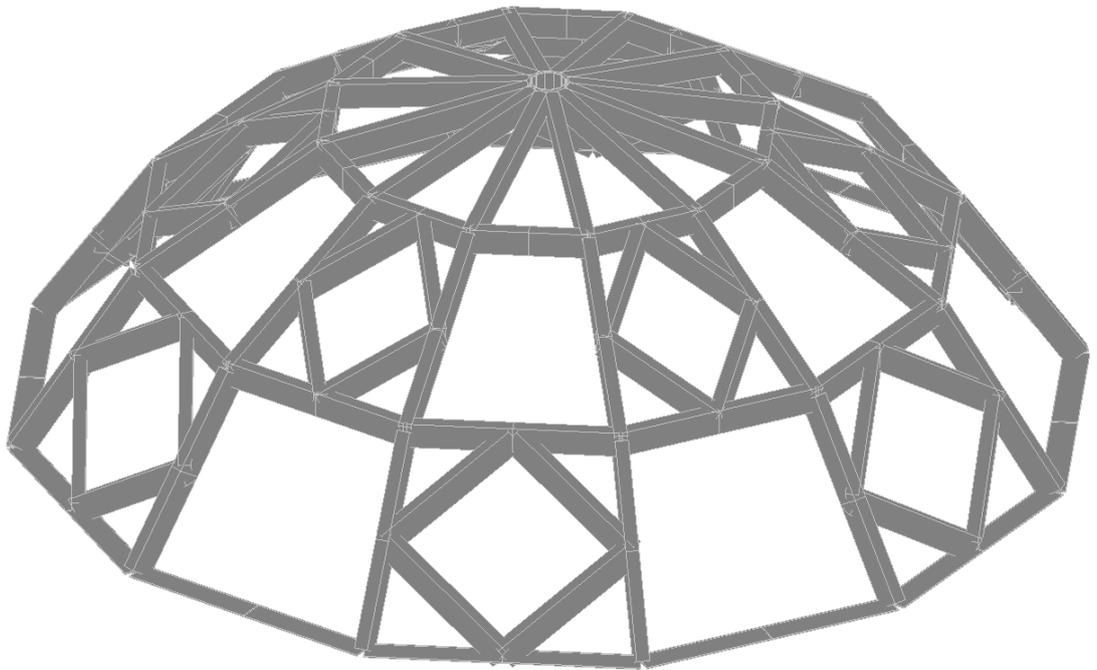


Рис. 4.13. Визуализация блоков жесткости

Назначения нагрузок от собственного веса

Во вкладке **Загрузки** активировать **Собственный вес** . Ввести коэффициент включения собственного веса - **1,1**. Нажать **ОК**. Для сохранения загрузки нажать **Сохранить/Добавить загрузку** . В открывшемся окне ввести имя загрузки **Собственный вес**, выбрать тип и вид нагрузки (постоянные, вес бетонных, железобетонных, деревянных...). Нажать **Записать как новое** и **ОК**.

Установка связей

Во вкладке **Назначение** выбрать **Установка связей в узлах** . В открывшемся окне активировать **X, Y, Z**. Нажать **ОК**, выделить нижние (опорные) узлы купола и нажать **ОК**.

Задание комбинаций нагрузжений

Во вкладке **Управление** нажать кнопку **Выйти в экран управление проектом** . Раскрыть содержимое пункта **Специальные исходные данные** раздела **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ** дерева проекта. Активировать пункт **Комбинация загрузжений**. В открывшемся окне нажать **Новая комбинация**, в столбце **Коэффициент** напротив всех загрузжений поставить **1** (рис. 4.14). Далее нажать **Запись комбинации**. Выйти из окна, нажав **ОК**.

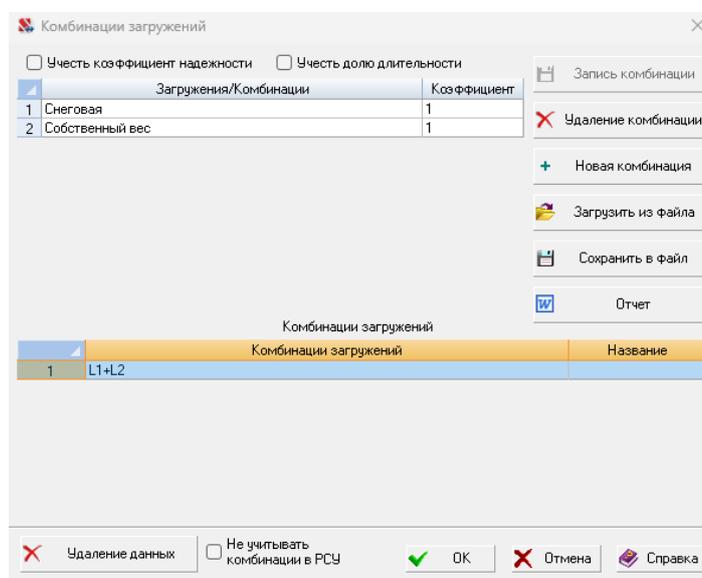


Рис. 4.14. Комбинация загрузжений

Статический расчет

Активировать пункт **Линейный** раздела **РАСЧЕТ** дерева проекта. Просмотреть протокол на правильность выполнения расчета (рис. 4.15).

```
17:03:08 Сортировка усилий и напряжений
17:03:08 Вычисление центров жесткости этажей
17:03:09 Вычисление сочетаний нагрузжений.
17:03:09 Вычисление усилий от комбинаций загрузжений
17:03:09 Сортировка усилий и напряжений от комбинаций загрузжений
17:03:09 Вычисление перемещений от комбинаций загрузжений
17:03:09 ЗАДАНИЕ ВЫПОЛНЕНО
Затраченное время : 0:00:01 ( 1 min )
```

Рис. 4.15. Протокол расчета

Анализ результатов расчета

Результаты расчета представлены на рис. 4.16-4.18.

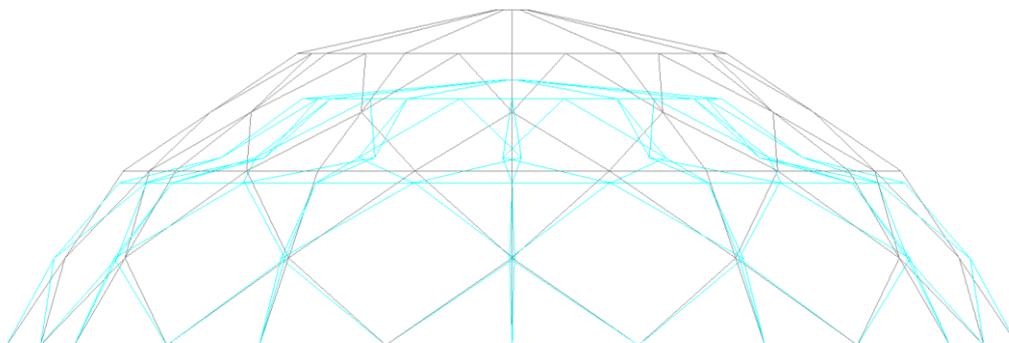


Рис. 4.16. Деформированная схема

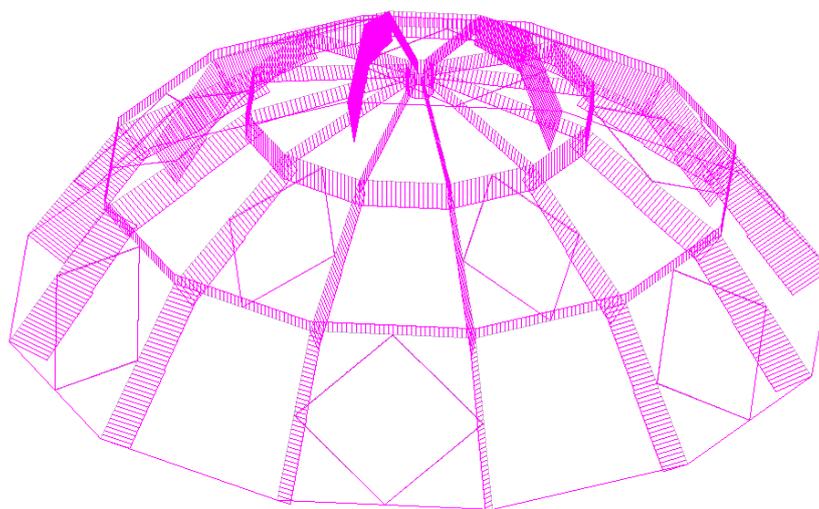


Рис. 4.17. Этюра продольных усилий N

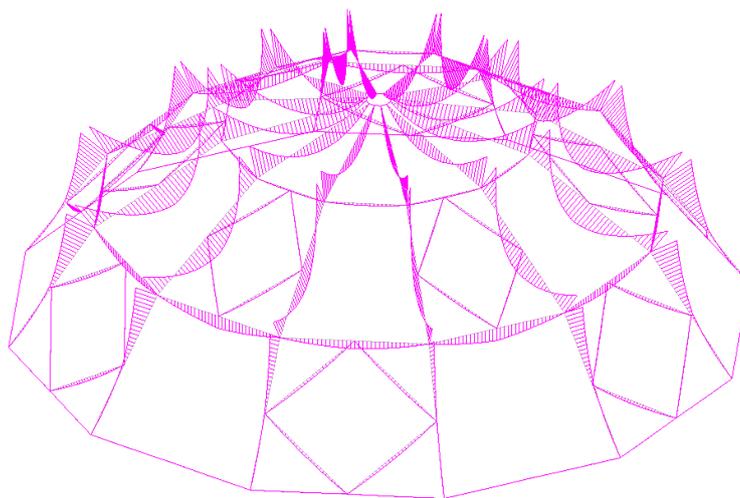


Рис. 4.18. Эюра изгибающего момента M_y

Выход из программного комплекса.

2.5 Структурное покрытие.

Исходные данные

Характер внешней нагрузки, геометрическая схема и основные размеры структуры представлены на рис. 5.1.

- Структура опирается на три шарнирно-подвижные и одну шарнирно-неподвижную опоры, в каждой из которых сходятся по четыре опорных раскоса, идущих от тела структуры;

- Крепление в узлах структуры предполагается шарнирным;

- Структура загружена сосредоточенными силами, приложенными в узлах верхнего пояса;

- Элементы структуры выполнены из одного материала (сталь обыкновенная);

- Поперечное сечение всех элементов структуры – трубчатое.

Задача

Для предложенной схемы нагруженной структуры с помощью системы SCAD необходимо:

- Сформировать ее расчетную стержневую конечно-элементную модель;

- Получить компоненты НДС модели;

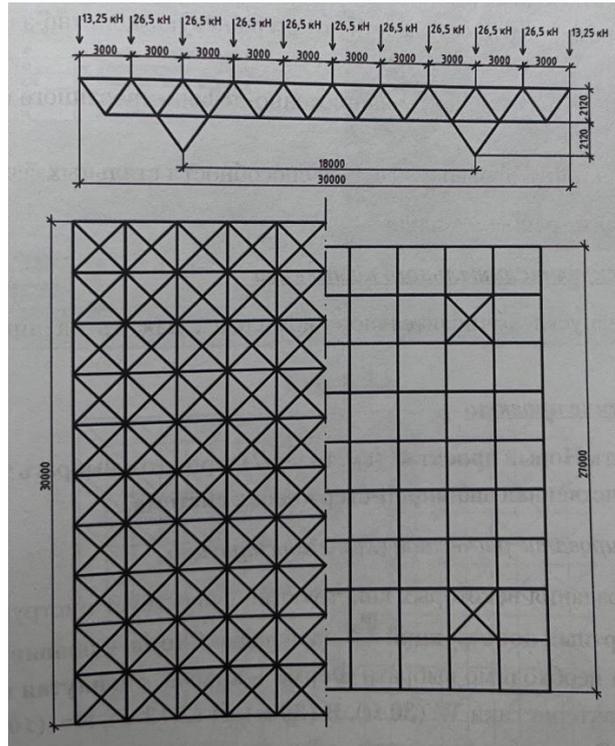


Рис. 5.1. Исходные данные

Алгоритм решения задачи

При создании нового проекта в ПК SCAD необходимо выбрать тип схемы

4 – Пространственная шарнирно-стержневая система.

Формирование расчетной схемы конструкции

Для создания некоторых конструкций существует инструмент **Создание**

стандартных конструкций  на вкладке **Схема**, в появившемся окне (рис. 5.2) необходимо выбрать **Ферма – крыша, сдвинутая на полшага**, ввести характеристики **W (30 м), В (30 м), Н (2,12 м), Nw (10), Na (10)** и нажать **ОК**. В результате получить схему, представленную на рис. 5.3.

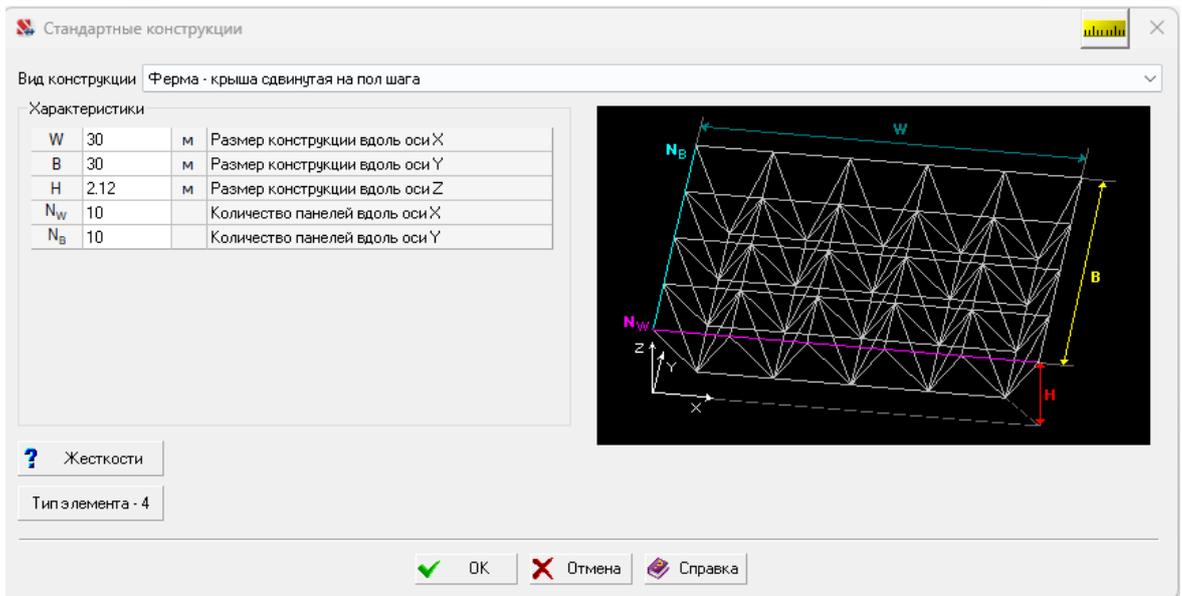


Рис. 5.2. Создание геометрии покрытия

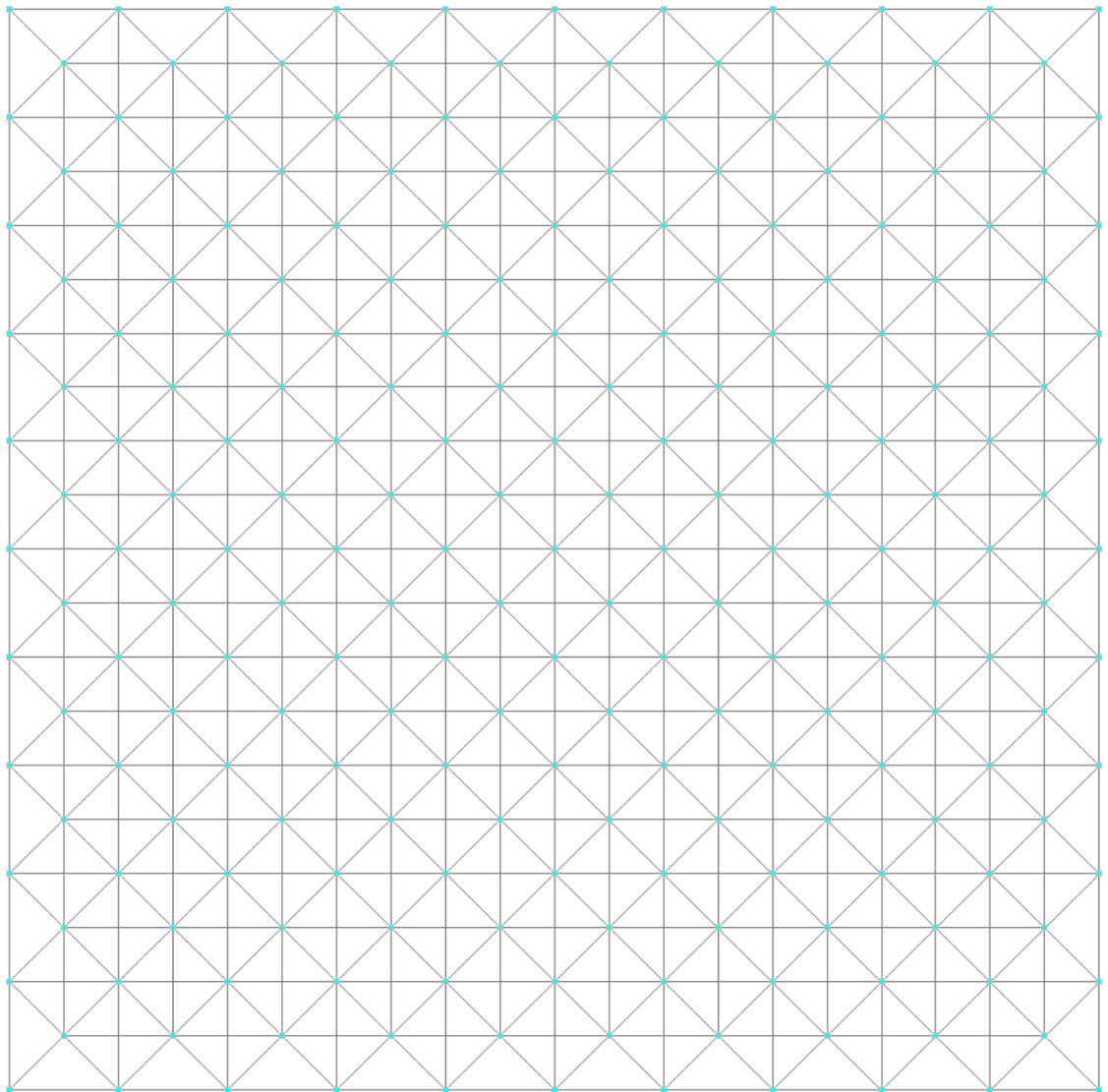


Рис. 5.3. Геометрия структурного покрытия

Корректирование схемы

Далее необходимо добавить опорные узлы. Выполнить **Ввод узлов**  и задать координаты: (6; 24; -2,12), (24; 6; -2,12), (24; 24; -2,12), (6; 6; -2,12).

Добавить опорные раскосы, соединяя стержнями узлы нижнего пояса и введенные ранее опорные узлы: узел **222** соединить с узлами **152, 154, 173, 175**; узел **223** – с узлами **35, 39, 59, 61**; узел **224** – с узлами **164, 166, 185, 187**; узел **225** – с узлами **11, 15, 47, 49**. Перед этим необходимо отметить необходимую часть схемы инструментом **Фрагментация окном**  и **Подтвердить фрагментацию** . Далее раскрыть меню **Элементы**  во вкладке **Узлы и Элементы** и в появившемся наборе кнопок нажать **Добавление стержней** , в появившемся окне нажать кнопку **ОК** (рис. 5.4).

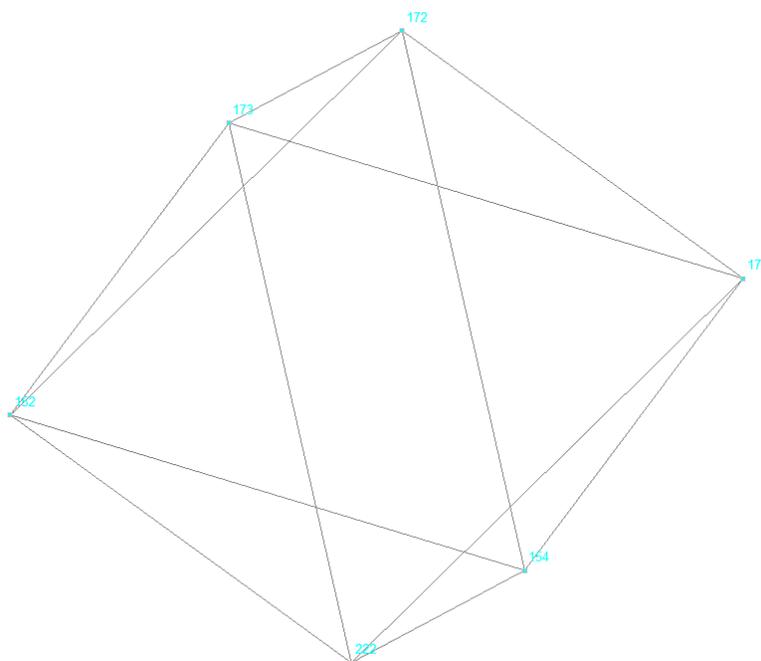


Рис. 5.4. Создание опорных раскосов

Назначение жесткостей элементам

Во вкладке **Назначение** панели инструментов нажать кнопку **Назначение жесткостей стержням** . В диалоговом окне **Жесткости стержневых элементов** выбрать **Профили металлопроката** и перейти в одноименную вкладку. Затем в древовидном каталоге найти раздел **Полный каталог профилей ГОСТ**,

в нем найти сортament **Круглые сварные трубы по Р58064-2018**. Выбрать профиль 60 x 3. В списке раздела **Материал** выбрать **Сталь обыкновенная** (рис. 5.5). Нажать **ОК**.

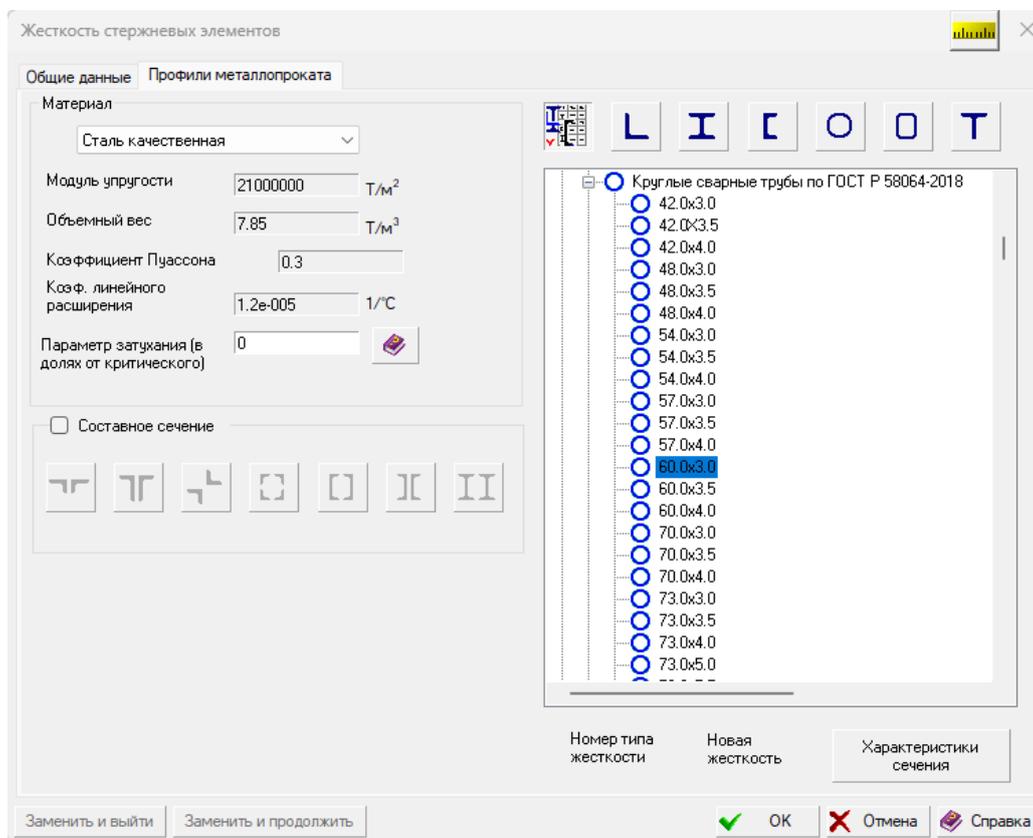


Рис. 5.5. Назначение жесткостей элементам

Элементам верхнего и нижнего поясов назначить первый тип жесткости.

Для этого на панели **Визуализация** перейти на **Вид справа** . Присвоить выбранный тип жесткости необходимым стержням нажатием кнопки **Подтверждение** .

Аналогичным образом выбрать в каталоге профиль 70 x 3 и задать раскосам второй тип жесткости. Для этого на панели **Управление выбором** активировать кнопку **Выбор наклонных стержней**  и выделить необходимые раскосы. Присвоить второй тип жесткости выделенным элементам, нажав **Подтверждение** .

Подобным же образом назначить опорным раскосам третий тип жесткости, выбрав в каталоге сечение 102 х 4. При необходимости ориентирования структуры использовать инструменты панели **Визуализация**. Завершить задание жесткостей нажатием кнопки **Подтверждение** .

Наложение связей в опорных узлах структуры

Во вкладке **Назначение** выбрать **Установка связей в узлах** , вызвать окно **Связи**. В режиме **Полная замена** активировать направление **Z** (рис. 5.6) и нажать **ОК**. Обозначить курсором на схеме узел **224** и нажать **Подтверждение** , тем самым обеспечив шарнирно-подвижное закрепление опорного узла по Z.

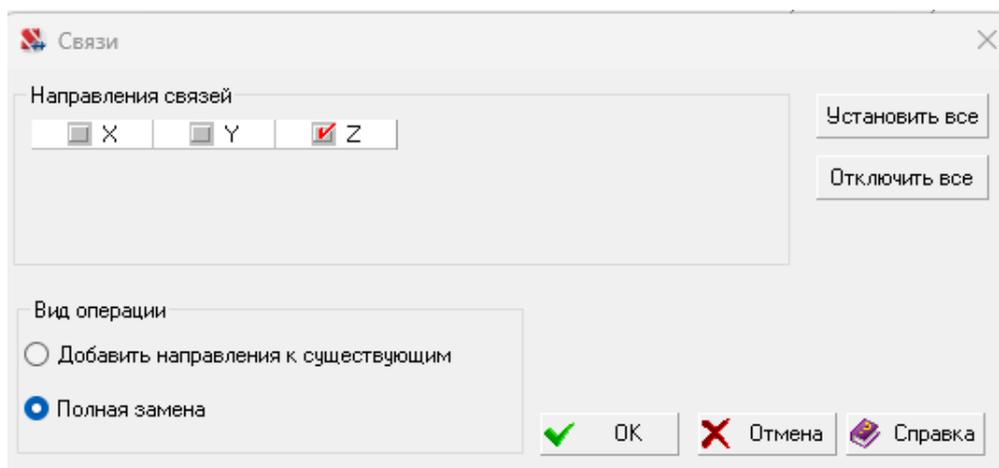


Рис. 5.6. Назначение связей

Опорный узел **225** закрепить в трех плоскостях шарнирно-неподвижной опорой. Для этого еще раз выбрать **Установка связей в узлах** , вызвать окно **Связи**. В режиме **Полная замена** активировать направление **X, Y, Z** и нажать **ОК**.

Узел **222** закрепить по **X, Z**. Узел **223** – по **Y, Z**.

Визуальный контроль правильности постановки опорных связей выполняется нажатием кнопки **Связи**  на панели **Фильтров отображения**.

Задание загружений структуры

1. Для удобства задания нагрузки на верхний пояс активировать Сечение плоскостью XOY  на панели Визуализация, отметить узел верхнего пояса и нажать **Подтвердить фрагментацию** , а затем перейти на Проекцию на плоскость XOY . Во вкладке Загружения кнопкой Узловые нагрузки  вызвать диалоговое окно. Ввести в поле Z значение 26,5 и нажать ОК (рис. 5.7).

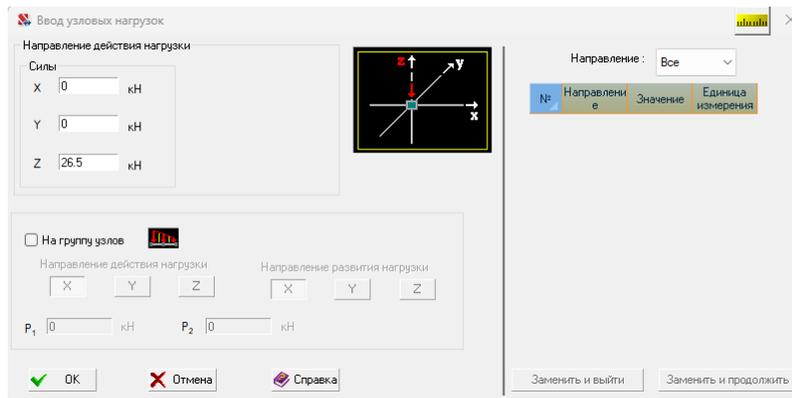


Рис. 5.7. Задание узловой нагрузки

На схеме отметить все НЕ крайние узлы верхнего пояса и завершить задание, нажав **Подтверждение** . Аналогично задать нагрузку **13,25** кН на крайние узлы, за исключение угловых, а на угловые – **6,625** кН. Визуальный контроль задания нагрузок выполняется при помощи кнопок **Узловые нагрузки**  и **Значения нагрузок**  панели **Фильтры отображения** (рис. 5.8).

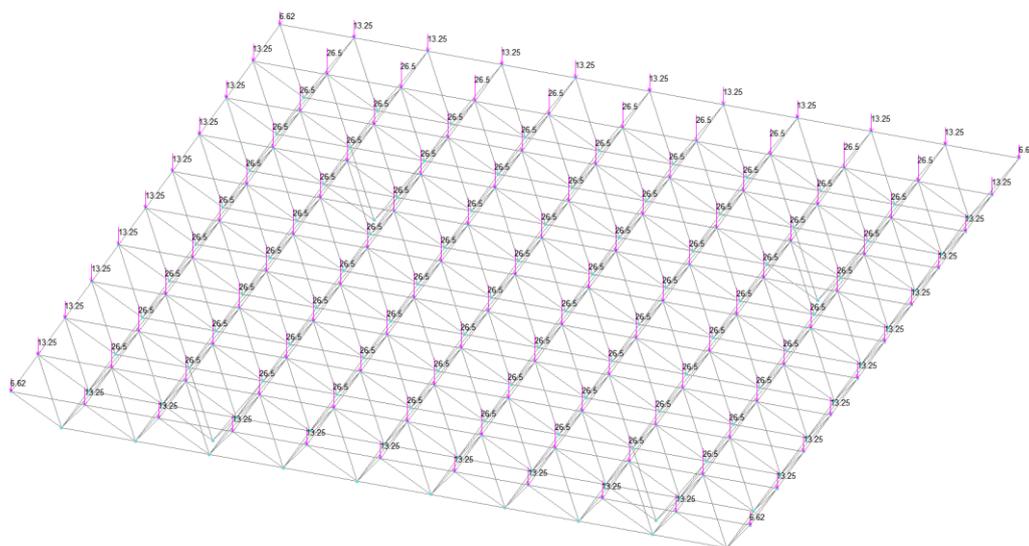


Рис. 5.8. Загруженная схема структуры

Записать созданное загрузке в проект под названием **Полезная нагрузка** (см. предыдущие примеры).

2. Задание загрузки **собственным весом** (см. предыдущие примеры).

Перенумерация узлов и элементов

Выполняется командой **Упаковка данных**  во вкладке **Управление**.

Задание расчетных сочетаний усилий

Во вкладке **Управление** нажать кнопку **Выйти в экран управление проектом** . Раскрыть содержимое пункта **Специальные исходные данные** раздела **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ** дерева проекта. Активировать пункт **Расчетные сочетания усилий и перемещений**.

1. Для загрузки **L1 Полезная нагрузка** в колонке **Тип загрузки** выбрать **Кратковременные нагрузки**, **Вид загрузки** – **Полные снеговые нагрузки**.

2. Для загрузки **L2 Собственный вес** указать **Тип загрузки** – **Постоянные нагрузки**, **Вид загрузки** – **Вес металлических конструкций**. Нажать **ОК**.

Статический расчет

После создания расчетной модели сооружения следует выполнить его статический расчет. Для этого войти в дерево проекта, раскрывая вкладку **Управление** и нажимая кнопку **Выйти в экран управления проектом** . В дереве проекта активировать пункт **Линейный** раздела **РАСЧЕТ**. В диалоговом окне после ознакомления с содержанием окна **Параметры расчета** нажать кнопку **ОК**.

На экране появится окно сообщения SCAD с вопросом, **Проект был модифицирован. Сохранить изменения?** В ответ нажать кнопку **Да**.

После окончания расчетов просмотреть информацию, размещающуюся в окне **Протокол выполнения расчета** (рис. 5.9), для этого использовать линейку прокрутки.

```
12:59:15 1 - 25.3067
12:59:15 2 - 27.4042
12:59:15 Сортировка перемещений
12:59:15 Контроль решения
12:59:15 Вычисление усилий
12:59:15 Сортировка усилий и напряжений
12:59:16 Выбор расчетных сочетаний усилий по СП 20.13330.2016, изменение 1,2,3
12:59:16 Выбор расчетных сочетаний перемещений по СП 20.13330.2016, изменение 1,2,3
12:59:16 Выбор расчетных сочетаний прогибов в стержнях по СП 20.13330.2016, изменение 1,2,3
12:59:16 ЗАДАНИЕ ВЫПОЛНЕНО
Затраченное время : 0:00:02 ( 1 min )
```

Рис. 5.9. Протокол выполнения расчета

Если в протоколе подтверждается правильность выполнения расчета словами **Задание выполнено** и нет замечаний, то нажатием кнопки **Заккрыть окно расчета**  перейти в дерево проекта для анализа результатов расчета.

Просмотр результатов расчета

В разделе **РЕЗУЛЬТАТЫ** дерева проекта установить курсор в пункт **Графический анализ** и активировать окно постпроцессора, где отображаются результаты расчета рамы: деформированная схема, эпюры усилий и т.п.

Посмотреть деформированную схему рамы на фоне недеформированной. Для этого во вкладке **Перемещения** нажать кнопку **Совместное отображение исходной и деформированной схемы**  и **Вывод значений перемещений в узлах** . Величины перемещений узлов по направлениям системы координат можно узнать, выбрав из списка направление (X, Y или Z). Для удобства чтения схемы деформаций отобразить на ней номера узлов одноименной кнопкой панели **Фильтры отображения** (рис. 5.10).

Для получения эпюры продольных сил в стержнях структуры во вкладке **Эпюры усилий** выбрать **N** в списке **Выбор вида усилия**, нажать кнопку **Цветовое отображение значений усилий**  инструментальной панели (рис. 5.11).

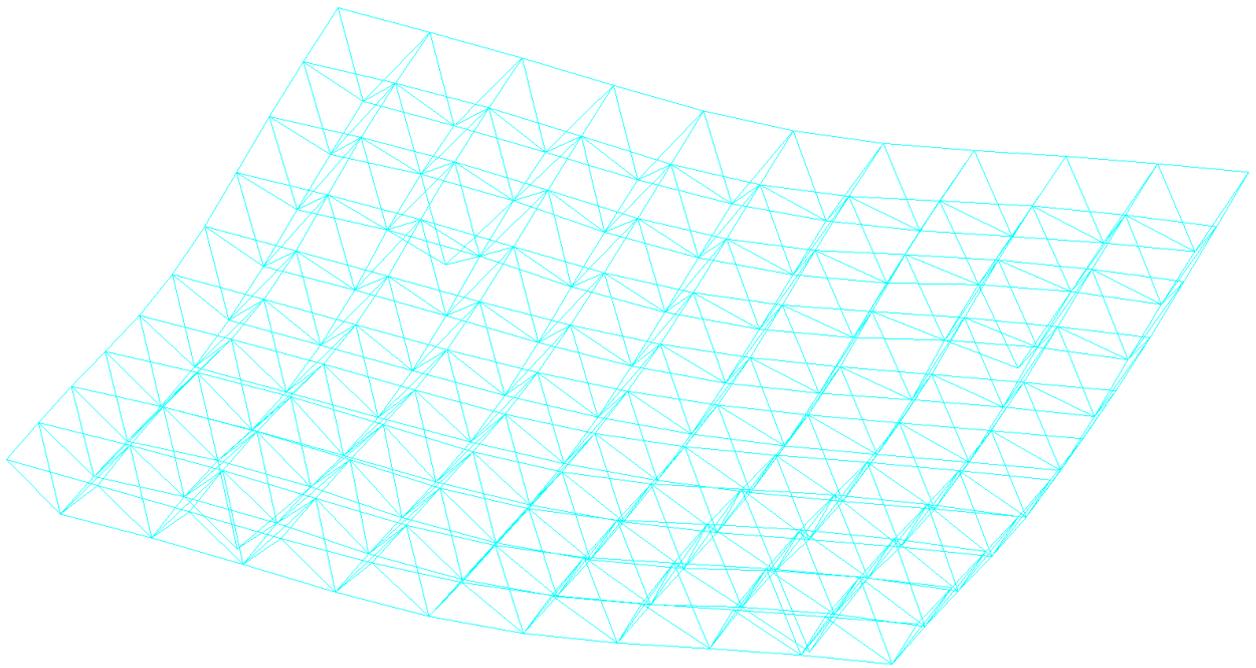


Рис. 5.10. Деформированная схема структуры

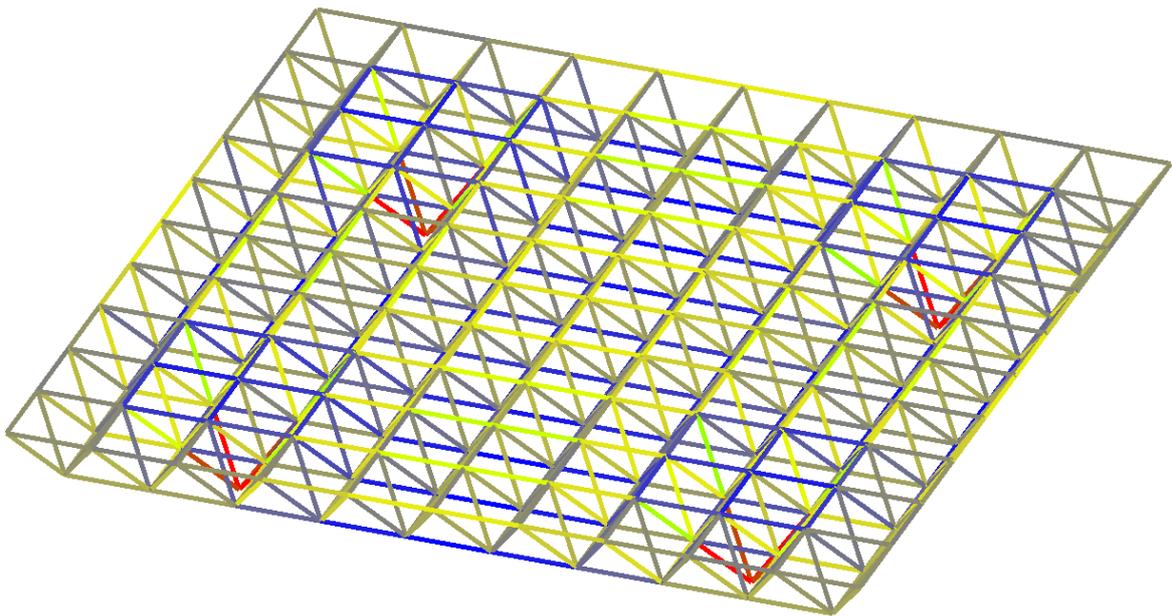


Рис. 5.11. Цветовое отображение эпюры N

Выход из программного комплекса.

2.6 Сквозная металлическая опора.

Создание КЭ-модели конструкции может быть почти всегда произведено одним из двух вариантов:

– построение геометрии модели в среде AutoCad или подобных, с последующим экспортом в расчётный программный комплекс и тщательной доработкой;

– построение геометрии модели сразу в расчётном программном комплексе, что исключает скрытые возможные ошибки первого варианта.

В данной главе будет подробно рассмотрен второй вариант.

Перед созданием модели рассмотрим задание (рис. 6.1): на схеме изображена стальная трёхгранная опора высотой 28 м, имеющая ширину грани по низу 4090 мм, ширину грани по верху 2500 мм, перелом пояса на отметке 15 м. Ниже перелома башня представляет собой трёхгранную усечённую пирамиду, выше перелома — призму. Сечения профилей выполнены из труб.

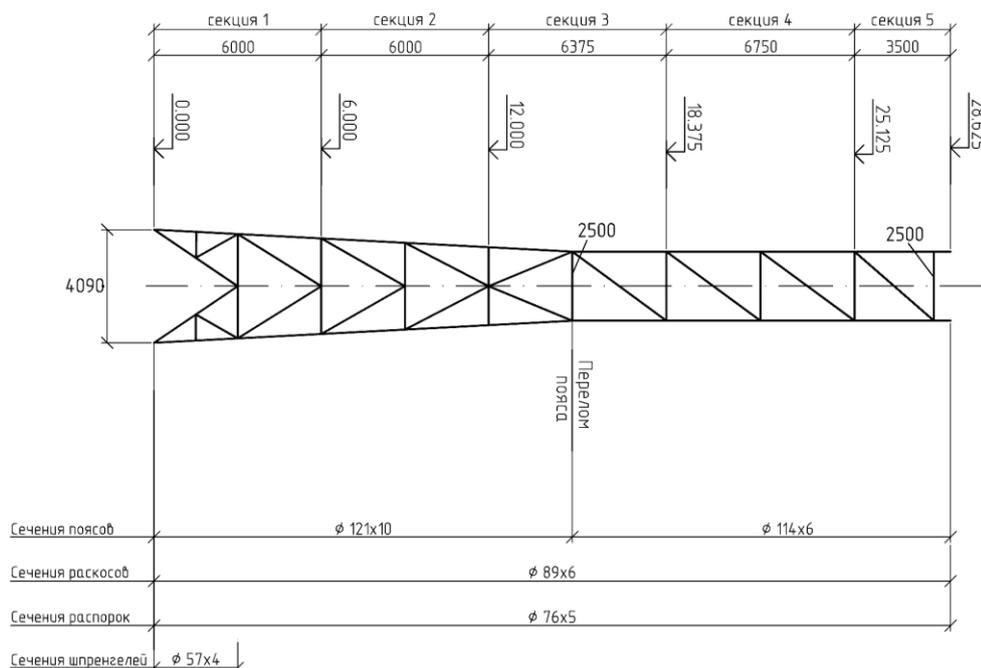


Рис. 6.1. Схема стальной решетчатой опоры

Открываем программный комплекс и в окне создания нового проекта выбираем тип схемы Система общего вида (рис. 6.2).

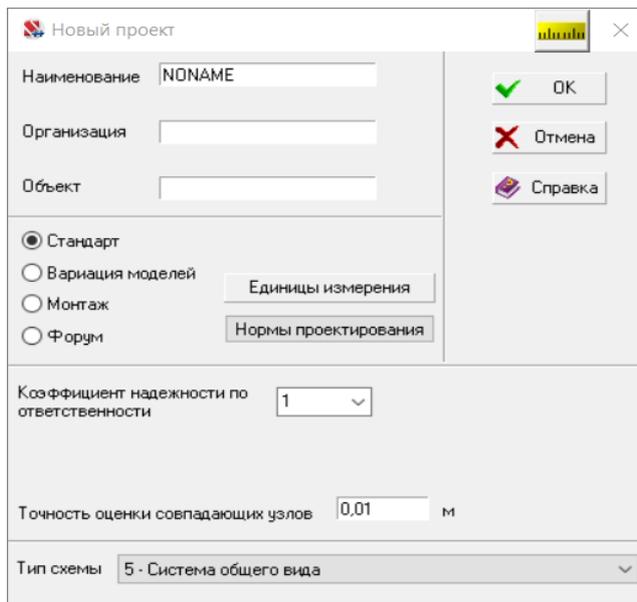


Рис. 1.2. Окно создания проекта

Создание модели начинаем с ввода узлов по дуге окружности в трёх отметках — на высоте 0 м, 15 м и 28 м. Радиус R описанной вокруг треугольника окружности со стороной a определим по известной формуле:

$$R = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

Вводим узлы в трёх отметках по высоте (рис. 6.3). Далее выбираем одну из трёх граней и все дальнейшие построения производим с ней. Когда грань будет готова, произведём операцию копирования схемы и получим полноценную трёхгранную опору.

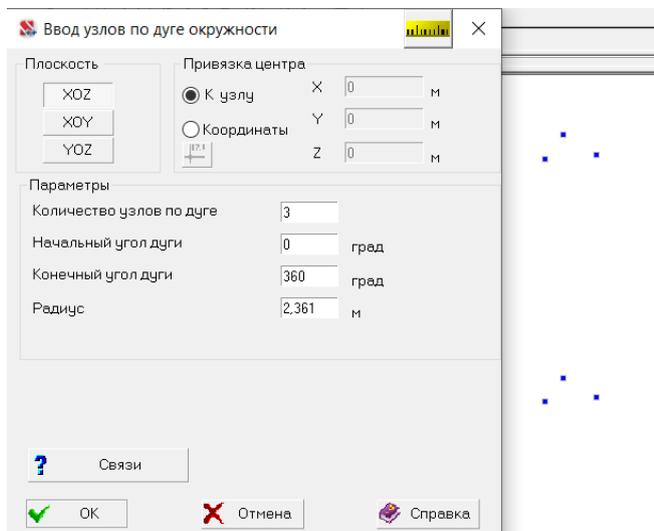


Рис. 6.3. Ввод узлов по дуге окружности

Заходим во вкладку Элементы и соединяем узлы поясами (рис. 6.4). Количество сечений (это сечения для выдачи усилий в результатах расчёта) оставляем равным трём. Ставим галочку на команде Жёсткости и параллельно вводим значения жесткостей поясам $\varnothing 121 \times 10$ и $\varnothing 114 \times 6$ по ГОСТ 8732-78 «Трубы стальные бесшовные горячедеформированные».

Отображение имён жесткостей осуществляется при помощи соответствующей команды на панели фильтров (слева от рабочего поля пиктограмма с буквой *R* — от английского *rigidity* — жёсткость) .

Далее при помощи команды Разбивка стержня  в соответствии с исходной схемой (рис. 6.1) разделим нижние пояса на 5 частей, а верхние — на 4 части (рис. 6.5).

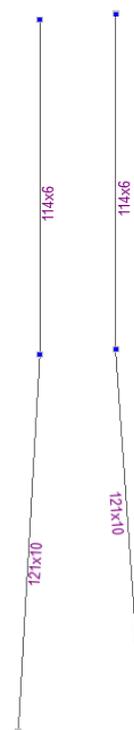
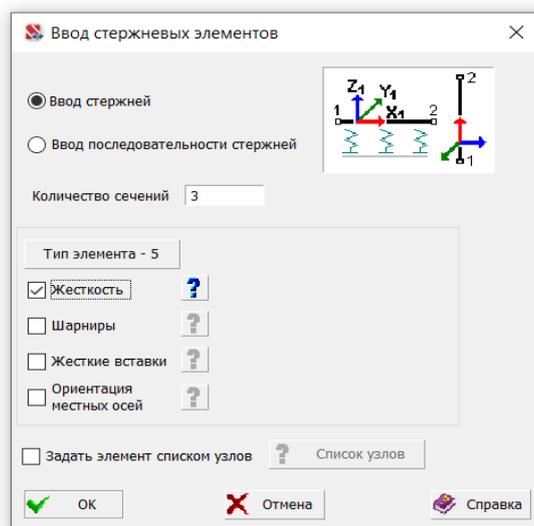


Рис. 6.4. Ввод поясов

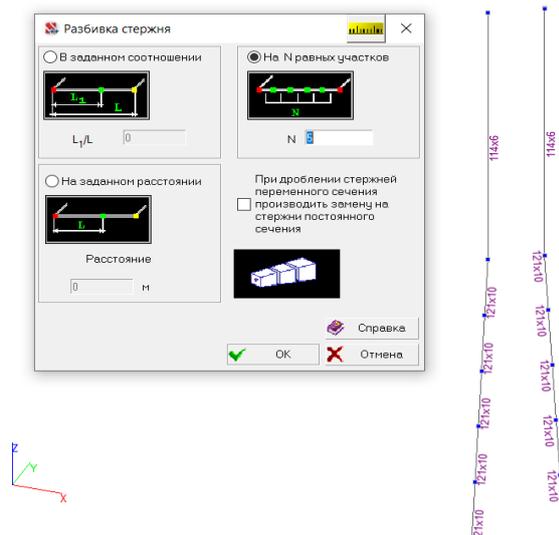


Рис. 6.5. Разбивка поясов

Соединим соответствующие узлы горизонтальными элементами — распорками. Добавим наклонные элементы — раскосы (рис. 6.6, а). На расстоянии $-0,2$ м от нижних узлов схемы введём новые узлы и поставим в них жёсткие заделки (рис. 6.6, б), а сами стержни, соединяющие новые узлы и нижние узлы грани, будут иметь квадратное сечение 20×20 см из бетона Б25.

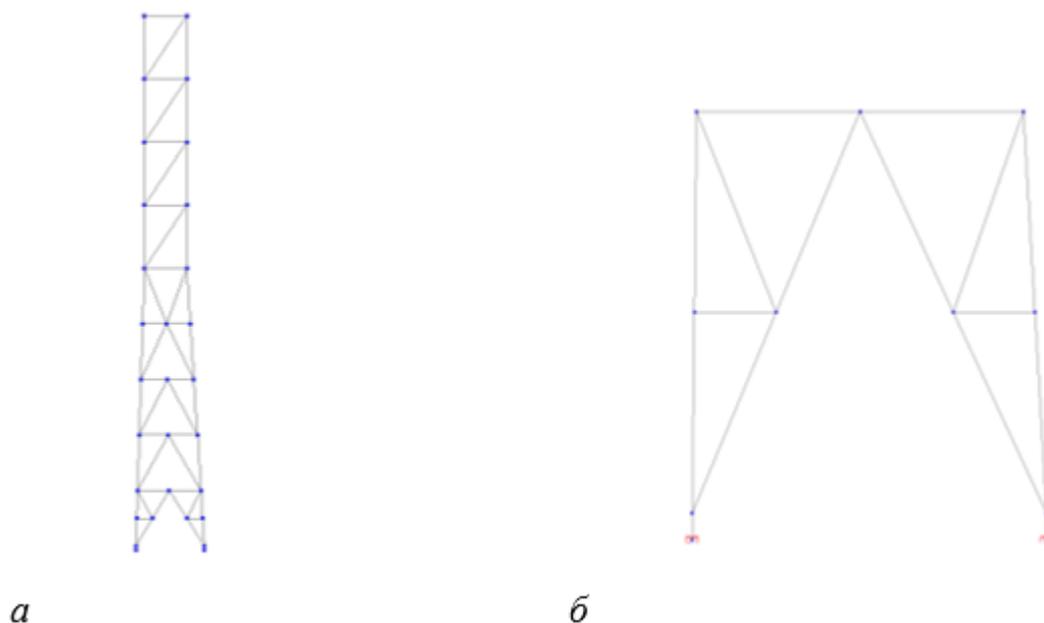


Рис. 6.6. Грань башни

а — вид грани башни

б — нижняя секция с опорами

Далее приступаем к копированию схемы. Переходим во вкладку Схема –

Копирование схемы  и заполняем появившееся окно (рис. 6.7).

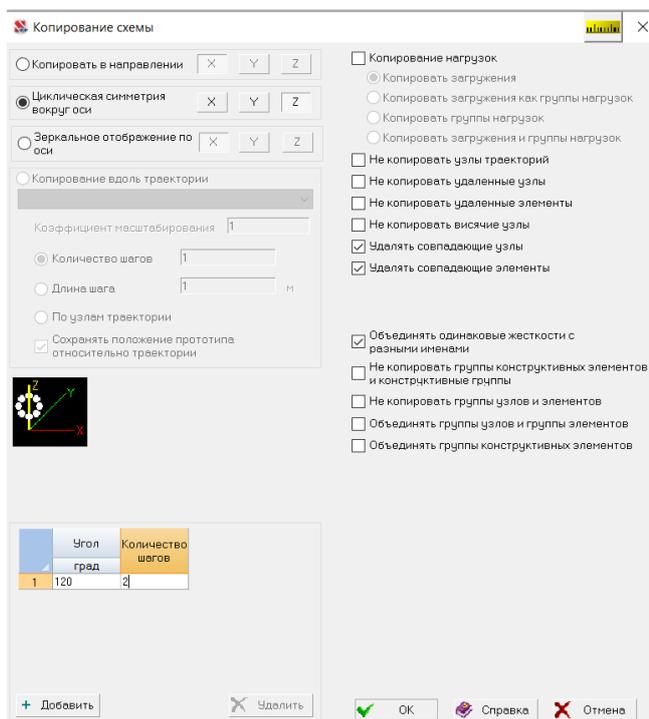


Рис. 6.7. Окно копирования схемы

Заметим, что нам нужно не копирование в линейном направлении, а копирование по кругу, поэтому выбираем Циклическую симметрию вокруг вертикальной оси z . Просим программу заранее удалять совпадающие узлы и совпадающие элементы, чтобы потом не пришлось делать это самостоятельно. Выбираем угол копирования как $360^\circ/3 = 120^\circ$ и указываем количество граней, которого нам не хватает до полной башни: $3 - 1 = 2$.

Подтверждаем копирование и получаем трёхгранную опору (рис. 6.8, а). На этом построение не окончено: необходимо добавить стержни, препятствующие изгибу элементов решётки из плоскости грани. На рис. 6.8, б они выделены красным цветом.

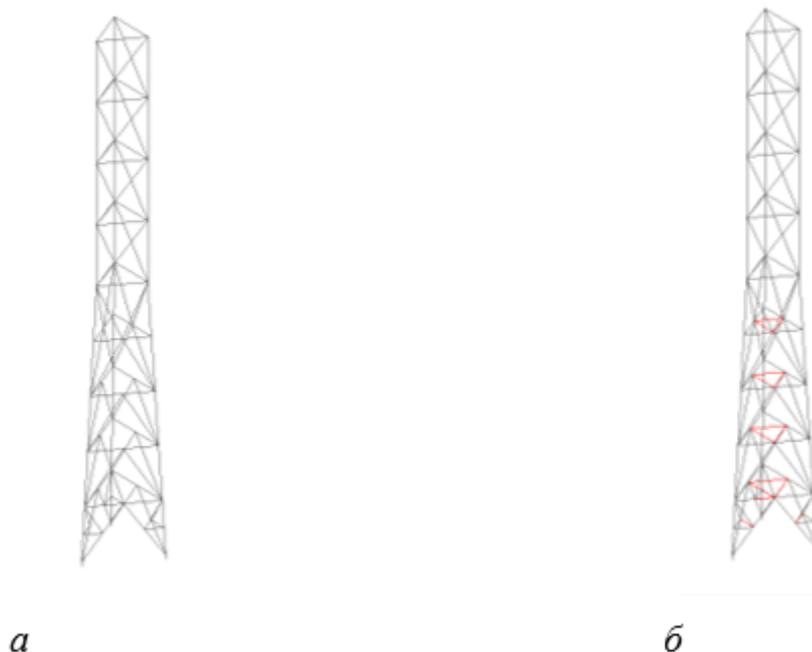


Рис. 6.8. Трёхгранная опора
а — результат копирования схемы
б — добавление элементов

Схема готова, но нам нужно её проверить: поочерёдно выбираем команды Показать совпадающие узлы, Показать совпадающие элементы. Если что-то подсветилось, выполняем объединение (для узлов — на вкладке Узлы, для элементов — на вкладке Элементы). Подсвечиваем жёсткости — сверяем с исходной схемой. Проверяем закрепления. Выполняем упаковку схемы и, наконец, переходим к нагрузкам.

СОБСТВЕННЫЙ ВЕС

Визуальный контроль необходим, но недостаточен. Лучшей проверкой правильности построения будет самый простой, линейный расчёт конструкции на статическую нагрузку (собственный вес).

Переходим во вкладку Загружения – Собственный вес (рис. 6.9). Оставляем коэффициент равным единице (мы вернёмся позже и уточним это значение), жёстких вставок в схеме нет, а галочку по поводу замены ранее назначенной нагрузки в целом можно не нажимать. Подтверждаем команду и просим

программу, выбирая соответствующую команду на панели фильтров, подсвечивать распределённую нагрузку (рис. 6.10).

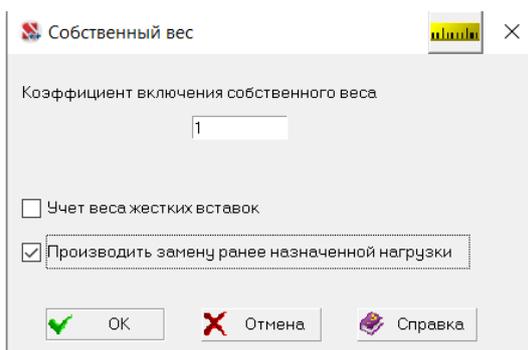


Рис. 6.9. Окно назначения собственного веса

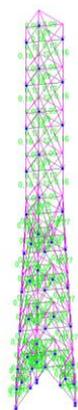


Рис. 6.10. Отображение собственного веса на схеме

Сохраняем загрузку командой с буквой *L* (от английского *load* — нагрузка) (рис. 6.11). Указываем, что данная нагрузка постоянная, и это вес металлических конструкций, далее выбираем Записать как новое — Ок.

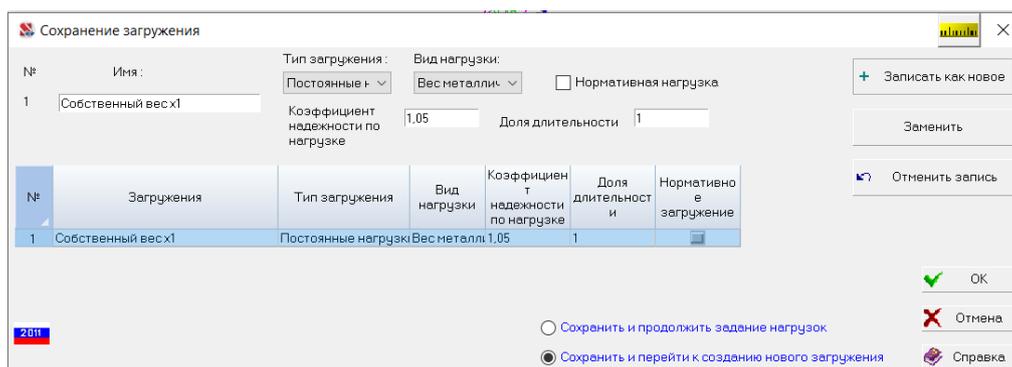


Рис. 6.11. Сохранение загрузки

Нагрузка отображается в окошке (рис. 6.12). Именно тут в столбике по порядку будут «лежать» и ждать своей очереди все сохранённые нами загрузения.

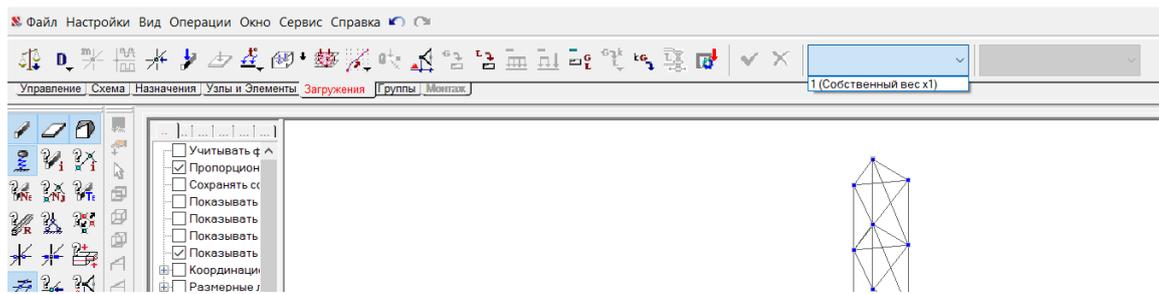


Рис. 6.12. Окно загрузений

Переходим в Управление – Выход в экран управления проектом – Линейный расчёт и изучаем протокол расчёта (рис. 6.13). Если ошибок нет (программа оповещает о них восклицательным знаком в жёлтом треугольнике), то можно искать заголовок Суммарные внешние нагрузки. Видим, что сумма всех сил по оси X равна нулю, сумма всех сил по оси Y равна нулю, сумма всех сил по оси Z равна 4,71 т.

Суммарные внешние нагрузки (Т, Тм)							
16:21:54	X	Y	Z	UX	UY	UZ	
16:21:54 1-		0	0	4.71012	0	0	0

Рис. 6.13. Протокол расчёта

Из задания на проектирование известно, что вес башни равен 7 т с учётом оборудования (по 0,1 т в каждую из трёх точек верхней площадки). Определим коэффициент, с которым необходимо будет далее учитывать собственный вес:

$$4,710 k + 0,1 \cdot 3 = 7,$$

$$k = \frac{7 - 0,3}{4,710} = 1,422.$$

Возвращаемся к окну задания собственного веса (рис. 6.9), вводим коэффициент $k = 1,422$, подтверждаем действие. Затем, не сохраняя текущее загрузение, добавляем нагрузки от оборудования — вводим узловые нагрузки (рис. 6.14) в каждую из точек (рис. 6.15, а) (значения нагрузок подсвечены соответствующей командой с панели фильтров). Помним, что в текущем загрузении есть также собственный вес (рис. 6.15, б), и сохраняем его под названием Собственный вес – заменить загрузение 1.

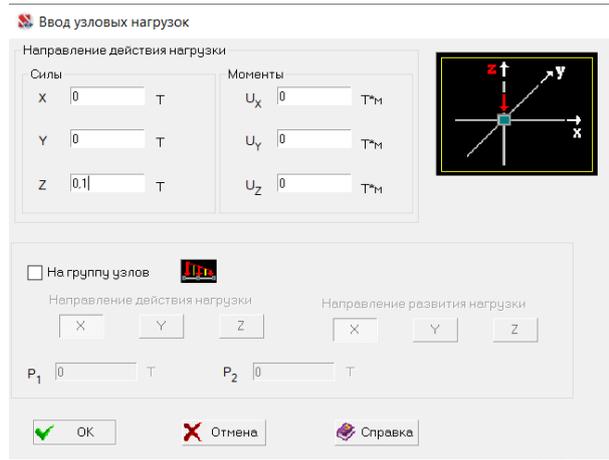


Рис. 6.14. Нагрузки от оборудования

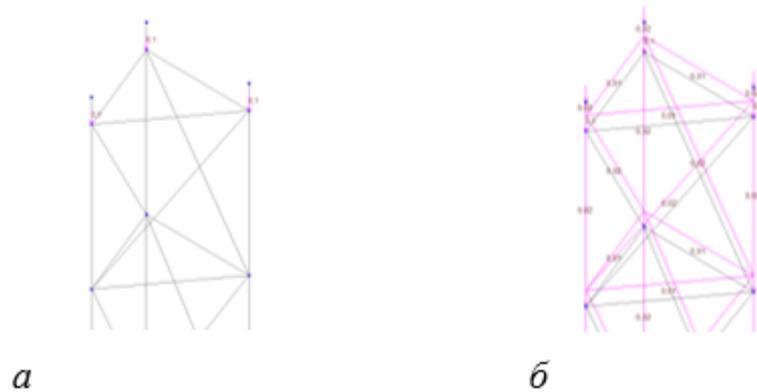


Рис. 6.15. Ввод нагрузок в каждую точку
 а — нагрузка от оборудования
 б — нагрузка от собственного веса и оборудования

Производим линейный расчёт. Суммарная нагрузка по Z составила 6,998 т, что соответствует заданию.

```

16:28:44 Распределение весов масс для загрузки: 2, активных масс: 162
      X   Y   Z   UX   UY   UZ   (Т, Т*М^2)
      6.99779 6.99779 6.99779 0 0 0
16:28:44 Определение форм колебаний для загрузки 2. Метод итерации подпространств.
16:28:45 Количество выполненных итераций - 12
16:28:45 Сумма модальных масс в процентах: Mx = 93.44  My = 93.44  Mz = 73.21
16:28:45 Вычисление инерционных характеристик динамических нагружений
16:28:45 Вычисление динамических сил. Загружение 2
i   Номер модуля динамики : 100, количество форм : 20
   Преобразование статических нагружений в массы :
   L1
   Модальный анализ
16:28:45 Накопление нагрузок.
      Суммарные внешние нагрузки (Т, Т*М)
16:28:45   X   Y   Z   UX   UY   UZ
16:28:45 1-   0  0 6.99779 0 0 0
  
```

Рис. 6.16. Протокол расчёта

В протоколе ошибки не обнаружены, переходим в Результаты расчёта – Перемещения.

Смотрим деформированные схемы перемещений: суммарное перемещение от собственного веса (рис. 6.17) происходит по вертикали. Можно вывести перемещения по осям, но схема деформирования не изменится — изменятся только значения перемещений в точках.

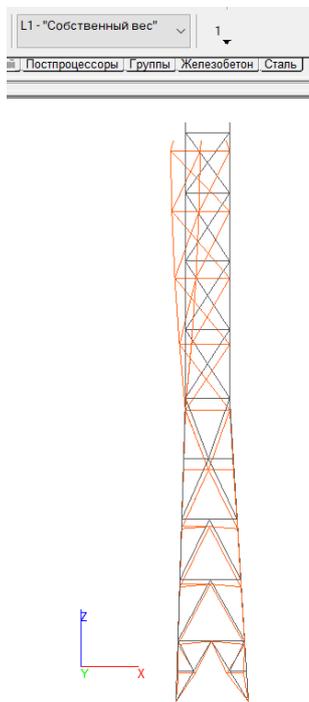


Рис. 6.17. Деформации от собственного веса

Выход из расчетного комплекса.

2.7 Балка сварная двутавровая переменного сечения из пластин.

Исходные данные

Геометрическая схема балки представлена на рис. 7.1.

▪ Балка шарнирно закреплена на опорах, расположенных на краях нижнего пояса;

▪ Соединение стенки с полками – электродуговая сварка;

▪ Элементы балки выполнены из одного материала (сталь качественная);

▪ Поперечное сечение балки переменное двутавровое.

Задача

▪ Сформировать расчетную оболочечную конечно-элементную модель;

- Определить НДС модели от заданной нагрузки (равномерно-распределенная, интенсивностью 90 кН/м);
- Отобразить компоненты НДС модели.

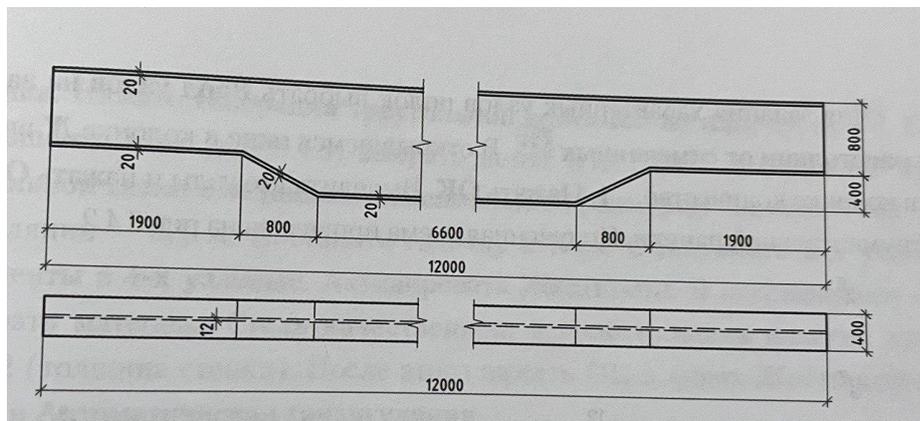


Рис. 7.1. Исходные данные для балки

Алгоритм решения задачи

Запуск вычислительного комплекса

Для запуска вычислительного комплекса выбрать ярлык **SCAD**.

Создание нового проекта

Создать новый проект, выбрав тип схемы **5 – Система общего вида**.

Формирование расчетной схемы

Для данной задачи удобно создать модель половины балки, после чего использовать инструмент копирования.

Ввод характерных узлов

Во вкладке Узлы выбрать Ввод узлов . В открывшемся окне ввести поочередно координаты характерных узлов стенки балки: **(0; 0; 0), (0; 0; 0,8), (6; 0; 0,8), (6; 0; -0,4), (2,7; 0; -0,4), (1,9; 0; 0)**.

Для задания характерных узлов полок выбрать **Ввод узлов на заданном расстоянии от отмеченных** . В открывшемся окне в колонке ДУ ввести **0,2**, в колонке количество – **1**. Нажать **ОК**. Выделить все узлы и нажать **ОК** на инструментальной панели (рис. 7.2).

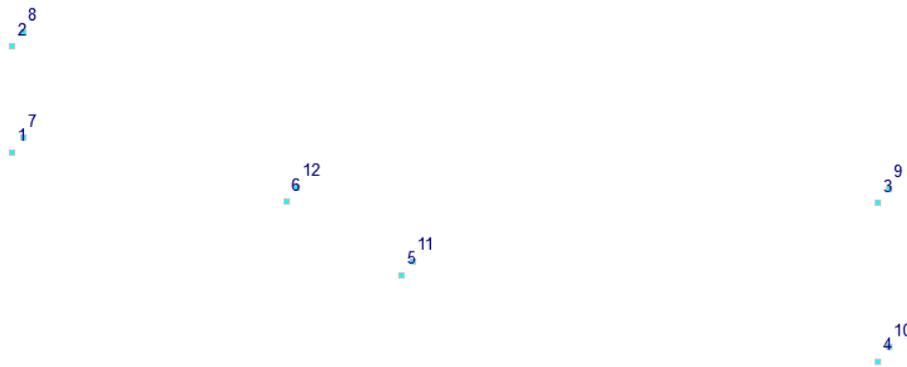


Рис. 7.2. Ввод узлов

Создание пластин

Во вкладке **Схема** активировать режим **Генерация сетки произвольной формы на плоскости** . В открывшемся наборе кнопок выбрать **Задание контура** . На схеме поочередно выбрать узлы **1, 2, 3, 4, 5, 6** (на последнем узле двойной клик левой кнопкой мыши). Заданный контур выделится толстой линией. На панели инструментов нажать **Сохранение контура триангуляции** . В открывшемся окне ввести имя контура **Стенка**. Далее нажать **Добавить контур** и **ОК**. Снова нажать **Задание контура** . На схеме поочередно выбрать узлы **2, 8, 9, 3** (на последнем узле двойной клик левой кнопкой мыши). Заданный контур выделится толстой линией. На панели инструментов нажать **Сохранение контура триангуляции** . В открывшемся окне ввести имя контура **Верхняя полка**. Далее нажать **Добавить контур** и **ОК**. Аналогично добавить три контура для нижней полки. В первый контур включить узлы **1, 7, 12, 6** (назвать контур **Нижняя полка1**), во второй контур: **6, 12, 11, 5** (**Нижняя полка2**), в третий: **5, 11, 10, 4** (**Нижняя полка3**).

Все сохраненные контуры доступны в ниспадающем списке на инструментальной панели **Генерация сетки произвольной формы на плоскости**. Для создания стенки балки из ниспадающего списка выбрать контур **Стенка**. Нажать **Генерация треугольной сетки КЭ на плоскости** . В открывшемся окне

(рис. 7.3) выбрать метод триангуляции **Создание ортогональной сетки с заданным максимальным размером элемента**, шаг триангуляции – **0,1 м**. Поставить галочку в поле **Объединять 3-х узловые элементы в 4-х узловые**. Активировать **Жесткости**. В открывшемся окне выбрать материал **Сталь качественная**, в поле толщина пластин ввести **0,012 м** (толщина стенки). После этого нажать **ОК** во всех окнах.

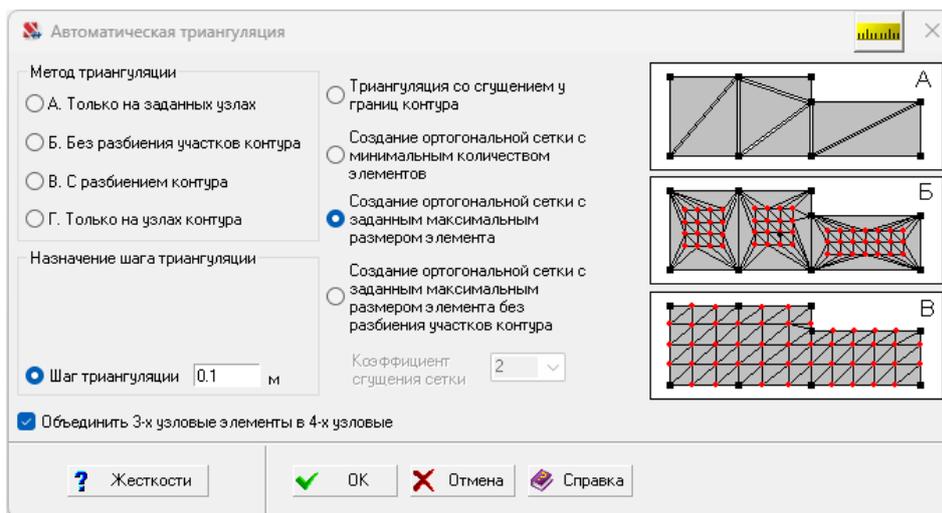


Рис. 7.3. Автоматическая триангуляция

Для установки сетки на место в расчетной схеме нажать **Установка результатов триангуляции на место в схеме** . Согласно описанному выше алгоритму сгенерировать сетки конечных элементов для полок балки (в разделе **Жесткости** задать толщину **0,02**).

После генерации всех пластин нажать правой клавишей мыши на фильтре **Удаление линий невидимого контура** , активировать **Показывать толщину пластин** и **Активация фильтра**.

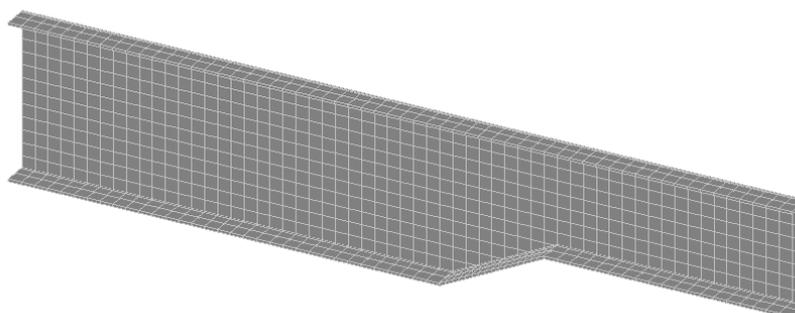


Рис. 7.4. КЭ модель половины балки

Далее на схеме необходимо выделить элементы полок (для этого нажать **Отметка элементов** ). Для удобства можно использовать клавиши панели фильтров визуализации. Во вкладке **Схема** активировать **Копирование фрагмента схемы** . В открывшемся окне выбрать копировать в направлении **Y**. В колонке шаг ввести **-0,2**; количество – **1**. Активировать **Удалять совпадающие узлы**, **Удалять совпадающие элементы**, **Копирование нагрузок**. Нажать **ОК** (рис.7.5).

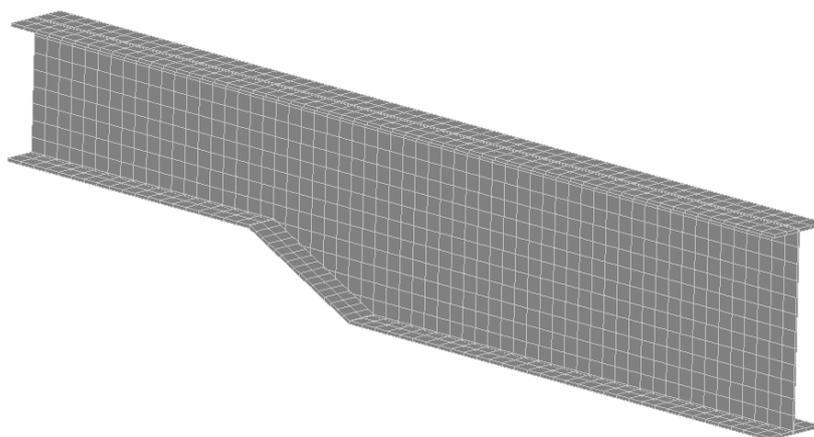


Рис. 7.5. Презентационная графика схемы

Копирование схемы

Во вкладке **Узлы** выбрать **Перенос начала координат в заданный узел** . В открывшемся окне активировать **Перенос начала координат в указанный узел**. Нажать **ОК**. На схеме выделить узел в правом нижнем углу сетки и нажать **ОК**. При активации фильтра **Общая система координат**  схема примет вид, показанный на рис. 7.6.

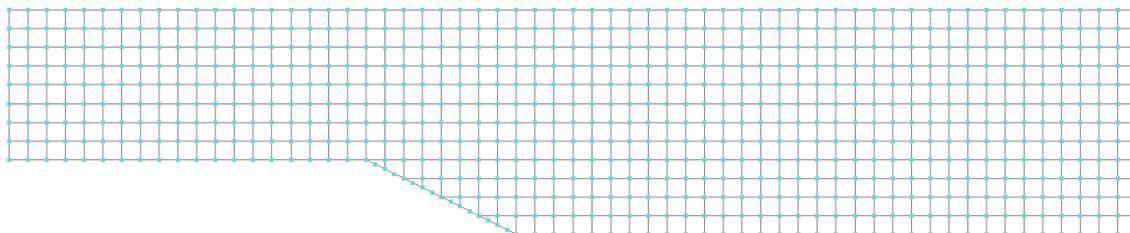


Рис. 7.6. Общая система координат

Нажать **Исходное отображение схемы**  на панели визуализации. Во вкладке **Схема** активировать **Копирование схемы** . В открывшемся окне выбрать циклическая симметрия вокруг оси **Z**. В колонку угол ввести **180**; в колонку колличество – **1**. Активировать **Удалять совпадающие узлы**, **Удалять совпадающие элементы**, **Копирование нагрузок**. Нажать **ОК** (рис. 7.7).

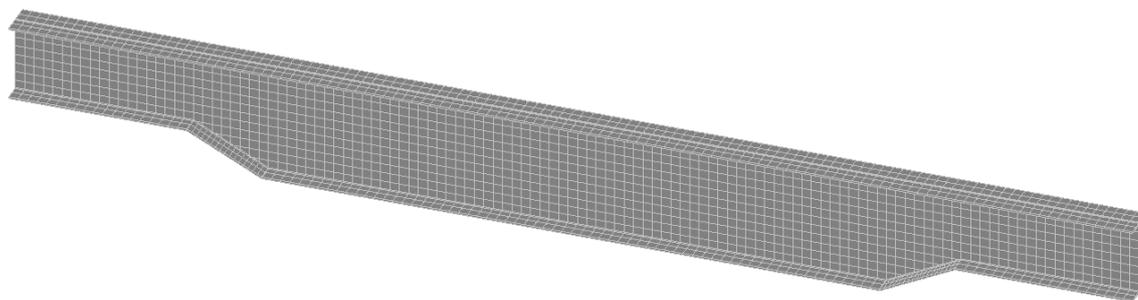


Рис. 7.7. Презентационная графика балки

Задание нагрузок

Для задания нагрузки перейти во вкладку **Загружения**, выбрать **Нагрузки на пластины** . В открывшемся окне в поле **Z** ввести **225** кН/м². Нажать **ОК**, выделить на схеме все элементы верхнего пояса балки и нажать **ОК**. Для сохранения загрузки нажать кнопку **Сохранить/Добавить загрузку**  инструментальной панели. В диалоговом окне *Сохранение загрузки* ввести имя загрузки (**Полезная нагрузка**) выбрать *Тип нагрузки* – **Кратковременные**, *Вид нагрузки* **Другие**, ввести коэффициент надежности – **1,2**, нажать **Записать как новое**. В нижней правой части окна активировать **Сохранить и перейти к созданию нового загрузки**. Нажать **ОК**.

Установка связей

Во вкладке **Назначение** выбрать **Установка связей в узлах** , вызвать окно **Связи**. В режиме **Полная замена** активировать направление **X**, **Y**, **Z**. Нажать **ОК**. На схеме выделить узлы нижнего левого края балки и нажать **ОК**. Аналогично закрепить узлы правого нижнего угла балки по направлениям **Y**, **Z**. Дополнительно закрепить все узлы верхней полки по направлению **Y**.

Изменение направлений выдачи усилий

Для возможности анализа напряжений в пластинах необходимо задать направление выдачи усилий. Во вкладке **Назначения** активировать **Переход у напряжений вдоль заданного направления для пластин** . В открывшемся окне (рис. 7.8) выбрать **Вдоль осей общей системы координат X**.

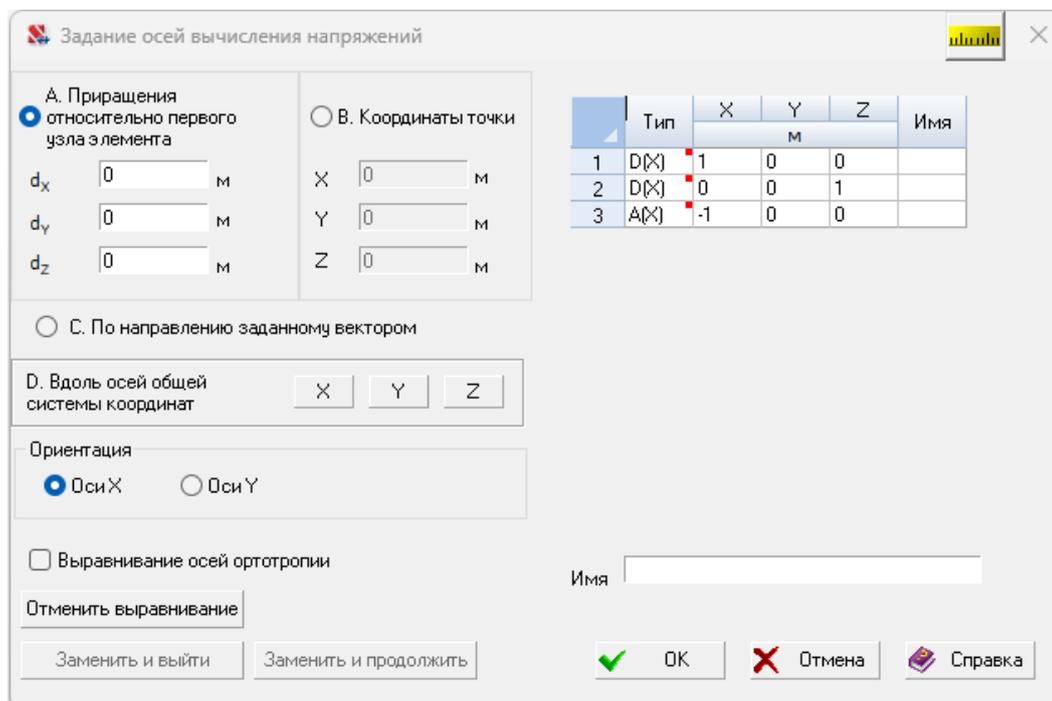


Рис. 7.8. Задание осей вычисления напряжений

Нажать ОК. Выделить на схеме все элементы стенки и горизонтальные элементы полок. Нажать Подтверждение. Для изменения направления выдачи усилий в наклонных элементах полок активировать **Переход к напряжениям вдоль заданного направления для пластин** . В открывшемся окне выбрать **С/ По направлению заданному вектором**. Нажать ОК. На схеме выбрать наклонные элементы в правой части балки. Необходимо задать вектор. На схеме выделить узлы начала и конца вектора (вектор должен располагаться в плоскости выделенных элементов в направлении оси X общей системы координат). Аналогично задается направление выдачи усилий для наклонных элементов в левой части балки. Для отображения активировать фильтр **Отображение направлений выдачи усилий** .

Статический расчет

После создания расчетной модели сооружения следует выполнить его статический расчет. Для этого войти в дерево проекта, раскрывая вкладку **Управление** и нажимая кнопку **Выйти в экран управления проектом** . В дереве проекта активировать пункт **Линейный** раздела **РАСЧЕТ**. В диалоговом окне после ознакомления с содержанием окна **Параметры расчета** нажать кнопку **ОК**.

На экране появится окно сообщения SCAD с вопросом, **Проект был модифицирован. Сохранить изменения?** В ответ нажать кнопку **Да**.

После окончания расчетов просмотреть информацию, размещающуюся в окне **Протокол выполнения расчета** (рис. 10), для этого использовать линейку прокрутки.

```
16:35:36 Сортировка усилий и напряжений
16:35:36 ЗАДАНИЕ ВЫПОЛНЕНО
Затраченное время : 0:00:03 ( 1 min )
```

Рис. 7.9. Протокол выполнения расчета

Если в протоколе подтверждается правильность выполнения расчета словами **Задание выполнено** и нет замечаний, то нажатием кнопки **Закрыть окно расчета**  перейти в дерево проекта для анализа результатов расчета.

Анализ результатов расчета

В разделе **РЕЗУЛЬТАТЫ** дерева проекта установить курсор в пункт **Графический анализ** и активировать окно постпроцессора, где отображаются результаты расчета рамы: деформированная схема, эпюры усилий и т.п.

Посмотреть деформированную схему рамы на фоне недеформированной. Для этого во вкладке **Перемещения** нажать кнопку **Совместное отображение исходной и деформированной схемы**  (рис. 7.10, 7.11).

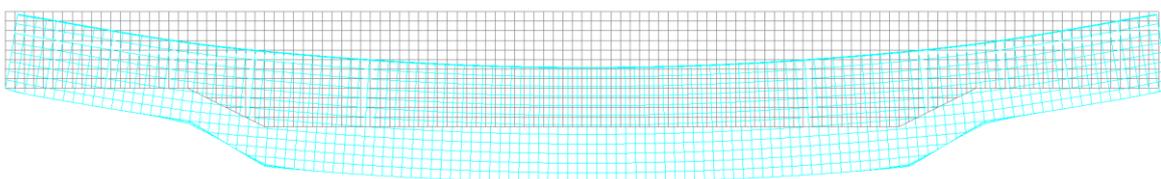


Рис. 7.10. Совместное отображение деформированной и исходной схемы

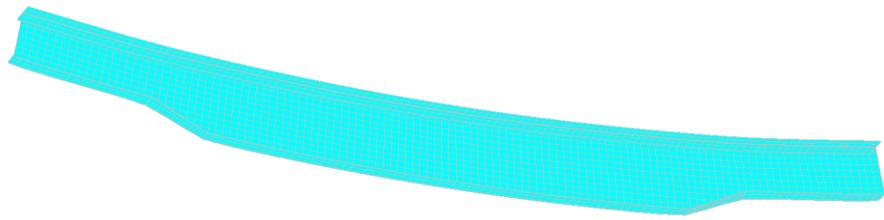


Рис. 7.11. Деформированная схема с учетом профиля

Во вкладке **Поля напряжений** из списка **Выбор вида напряжения** выбрать σ_x , нажать **Отображение изополей напряжений**  и получить картину напряжений (рис. 7.12).

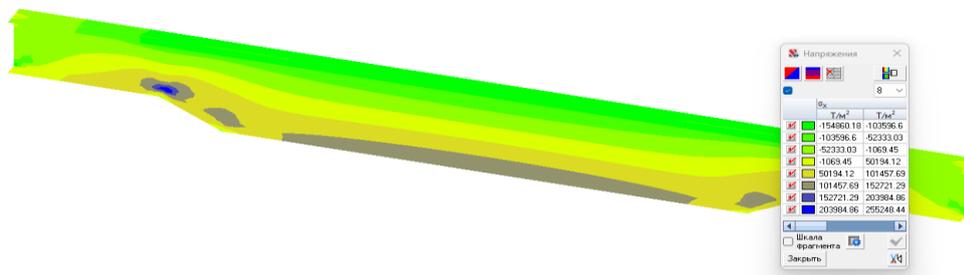


Рис. 7.12. Изополя напряжений по оси X

Выбрав на инструментальной панели **Постояние эпюр напряжений вдоль сечения**  и указав сечение, в котором необходимо отобразить напряжения, можно увидеть распределение напряжений в конкретном сечении (рис. 7.13).

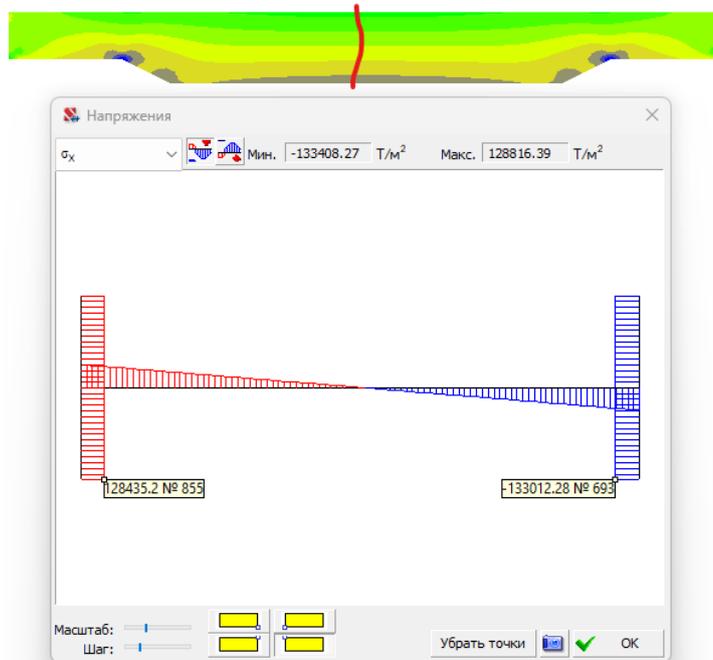


Рис. 7.13. Эпюры напряжений в середине балки

2.8 Узловое соединение из пластинчатых элементов.

Задание для расчёта: построить КЭ-модель узла соединения трубы с пластиной с заданными размерами, приложить нагрузку, произвести расчёт.

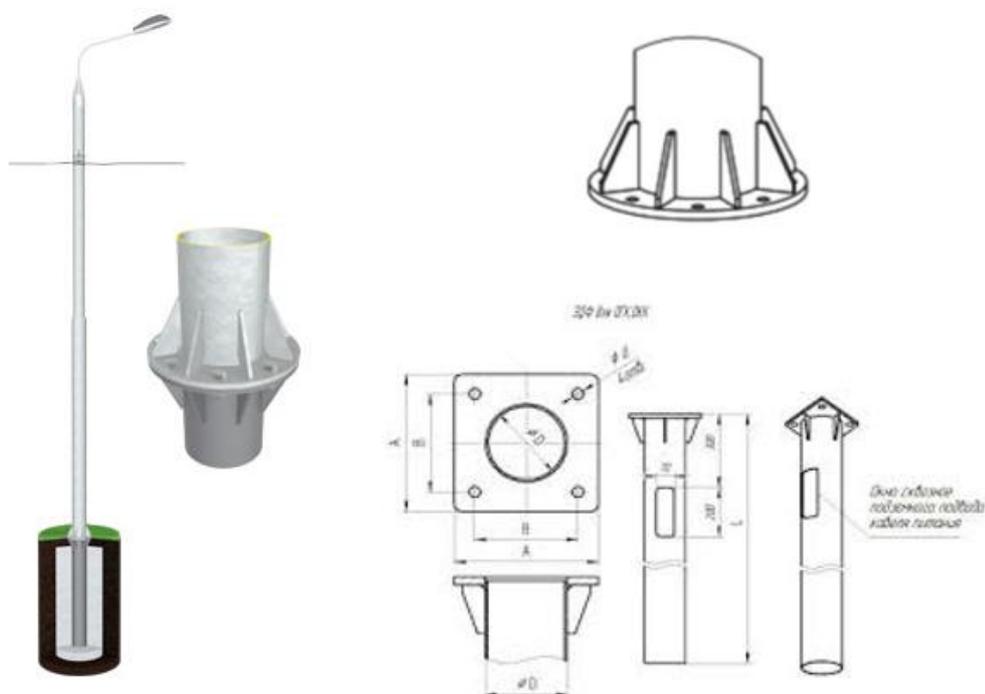


Рис. 8.1. Исходные данные

Квадратная пластина имеет размеры 1 м x 1 м, толщина 5 см. Труба имеет радиус 0,3 м, толщину 3 см, высоту 60 см. Рёбра жёсткости имеют толщину 1 см.

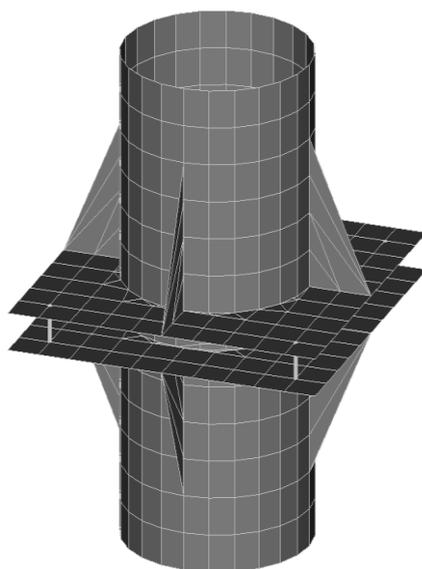


Рис. 8.2. КЭ модель трубы

Алгоритм расчёта:

1. Создаём пластину, делим на конечные элементы 10x10.
2. В плоскости пластины создаём кольцо из 24-х узлов.
3. Делаем аккуратное сопряжение элементов.
4. Из кольца создаём трубу.
5. Добавляем рёбра жёсткости.
6. Копируем схему.
7. Добавляем болты, опоры, нагрузку.

Построение КЭ-модели.

Открываем новый файл, в качестве типа схемы выбираем Систему общего вида. Варианты создания пластины:

1. Создаём большую пластину размером 1м x 1м по введённым точкам, разбиваем её на 10 частей по каждой стороне.
2. Производим генерацию пластинчатой схемы на вкладке Схема – этот способ выберем.

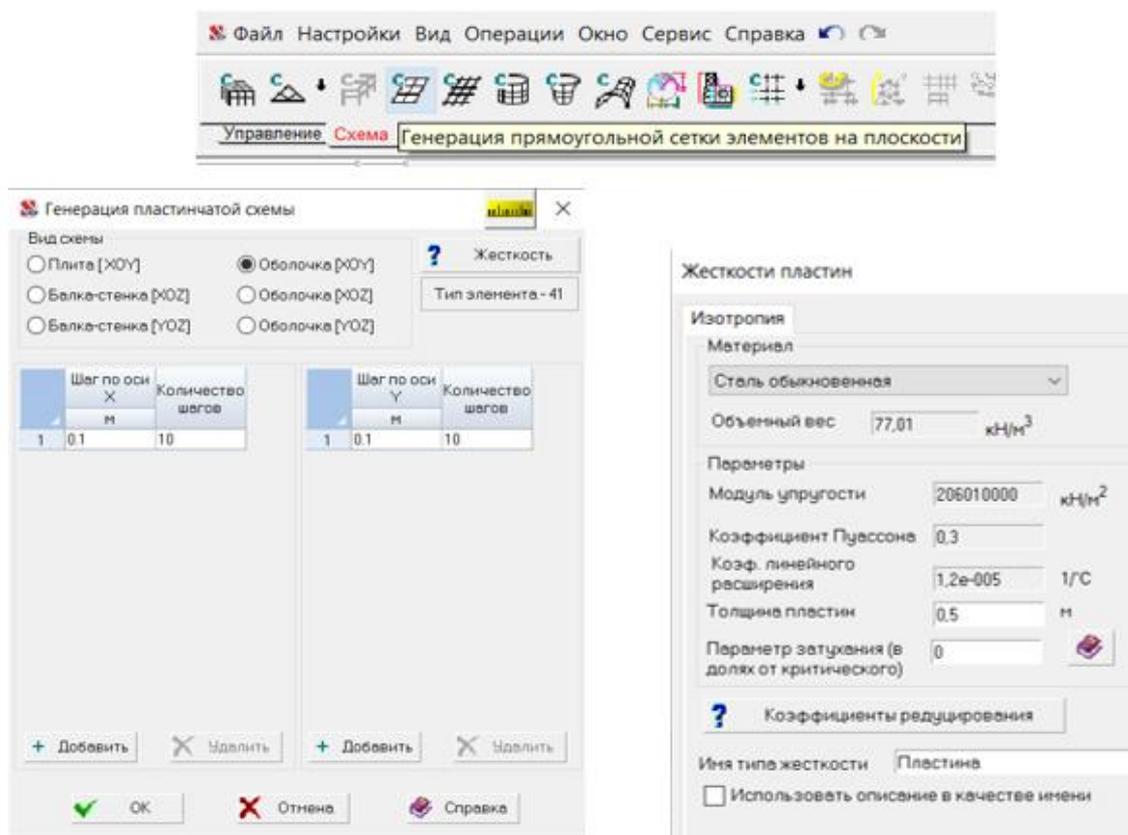


Рис. 8.3 Генерация схемы.

Получаем пластину

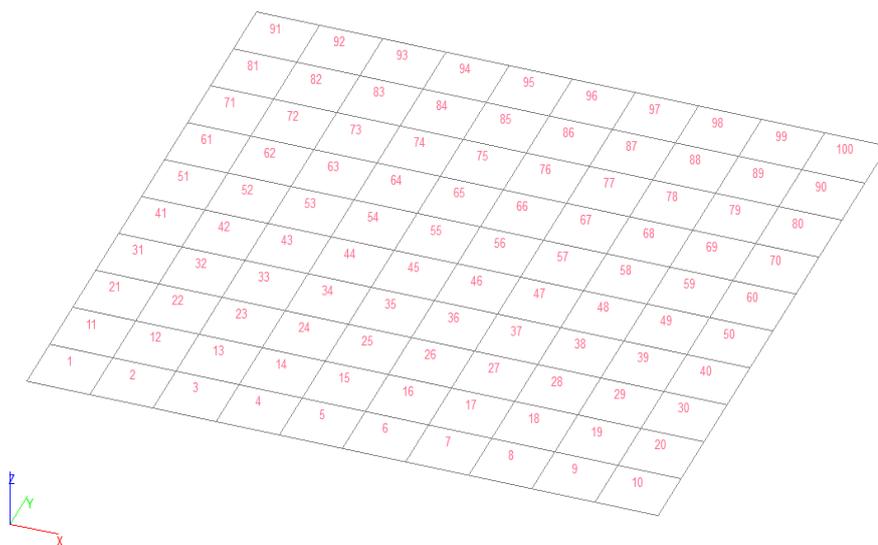


Рис. 8.4. Пластинка

Приступаем к созданию кольца. Переносим начало координат в центр пластины.

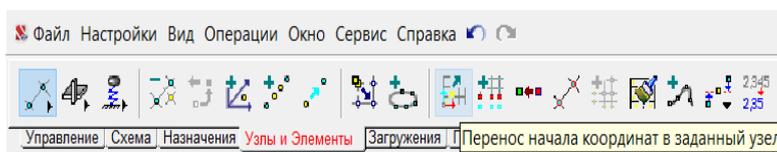


Рис. 8.5. Перенос начала координат

Вводим узлы кольца по окружности.

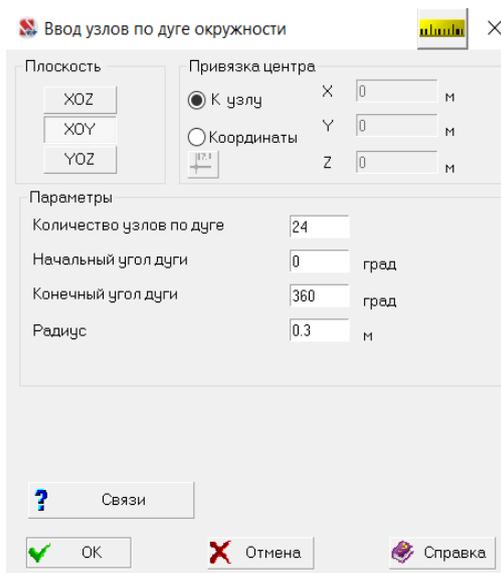


Рис. 8.6. Ввод узлов

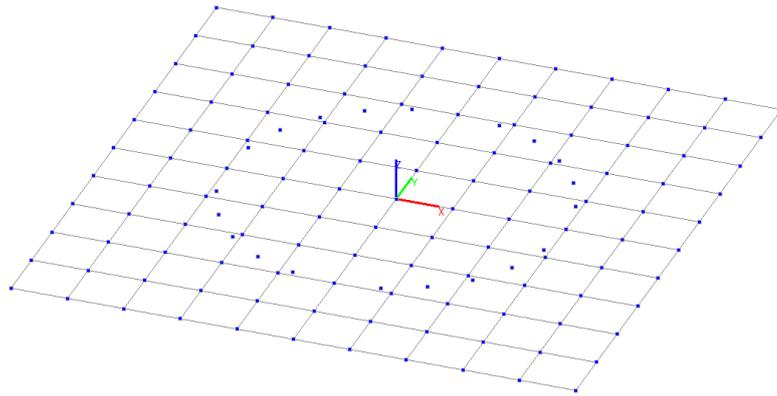


Рис. 8.7. Промежуточный результат

Удаляем лишнее, переносим узлы – так, чтобы получилось аккуратное и красивое сопряжение.

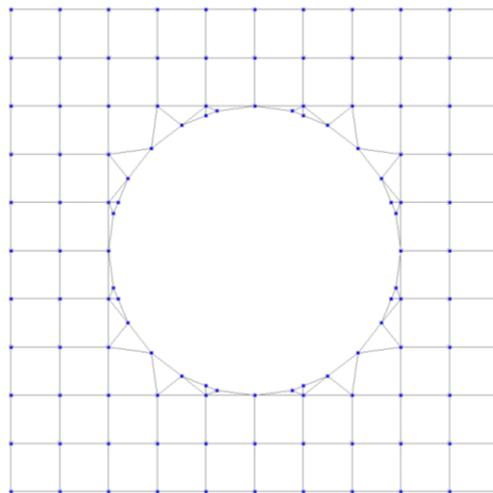


Рис. 8.8. Полученное сопряжение

Переходим к созданию трубы. Выделяем два любых соседних узла кольца – вводим узлы на расстоянии 0,1 м вверх от них.

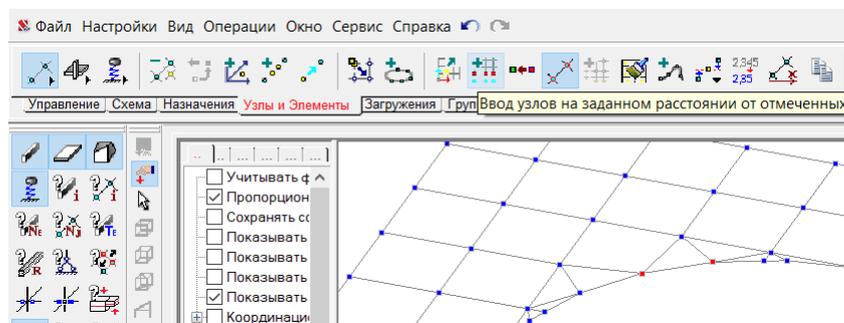


Рис. 8.9. Создание трубы

Объединяем данные четыре узла в пластину.

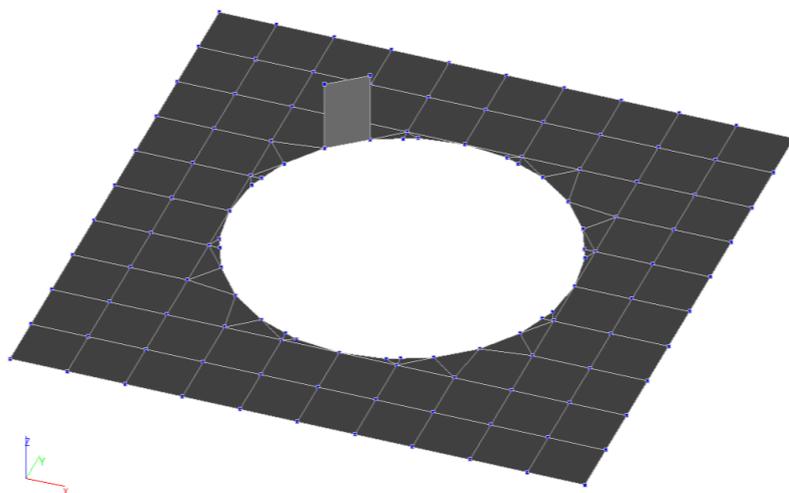


Рис. 8.10. Создание пластинки

Копируем полученный элемент кольца с назначенной жёсткостью (сталь обыкновенная, толщина 3 см) по кругу и по вертикали, чтобы высота участка трубы стала равна 0,6 м.

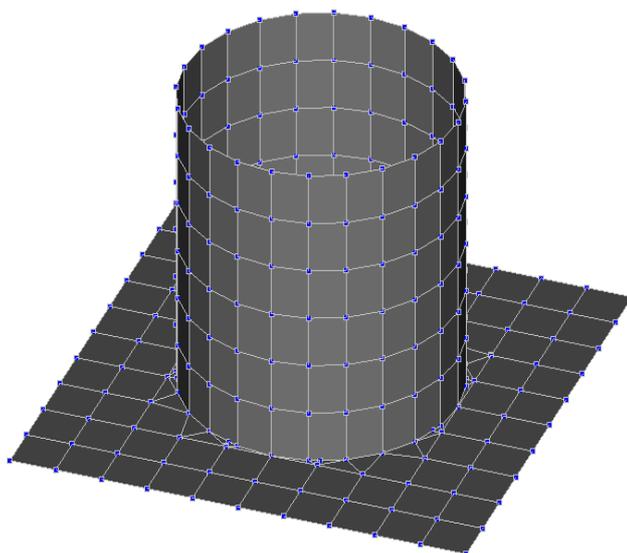


Рис. 8.11. Создание КЭ модели трубы

Добавляем рёбра жёсткости: создаём одно ребро толщиной 0,1м и копируем по кругу.

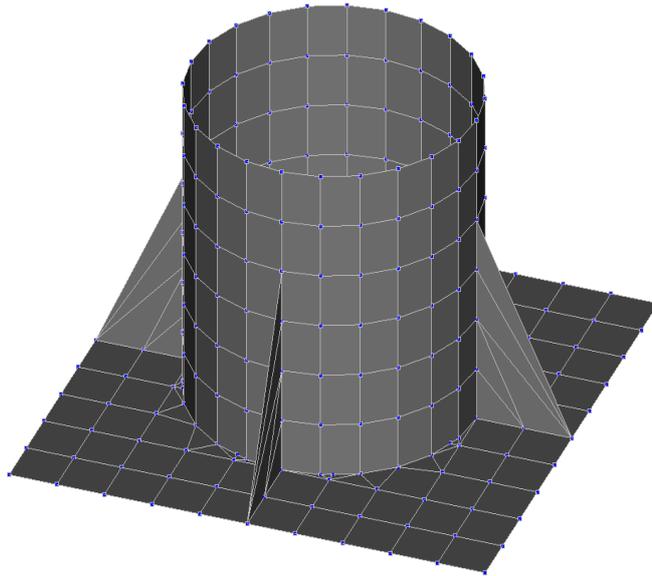


Рис. 8.12. Создание ребер жесткости

Копируем схему – Зеркальное отображение по оси X.

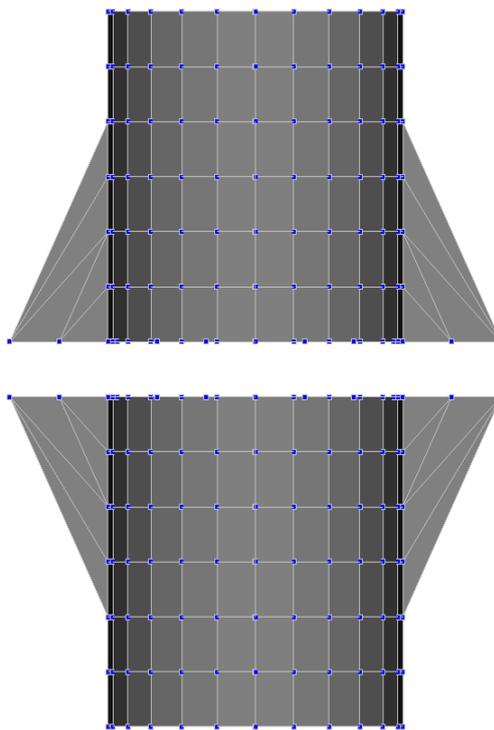


Рис. 8.13. Зеркальное отображение

Ставим жёсткие заделки в нижней плоскости и добавляем болты: круглое параметрическое сечение диаметром 1 см.

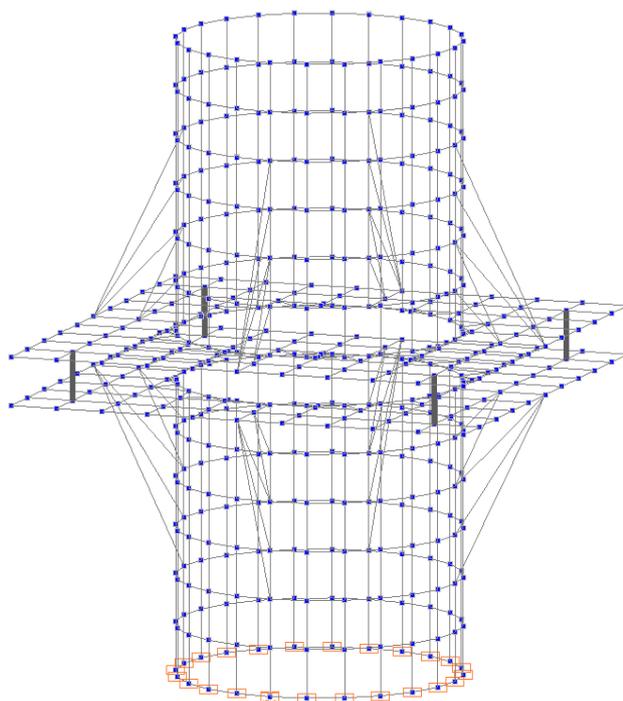


Рис. 8.14. Создание жестких вставок

Загружаем вертикальной нагрузкой (весовой) и горизонтальной нагрузкой (ветровой).

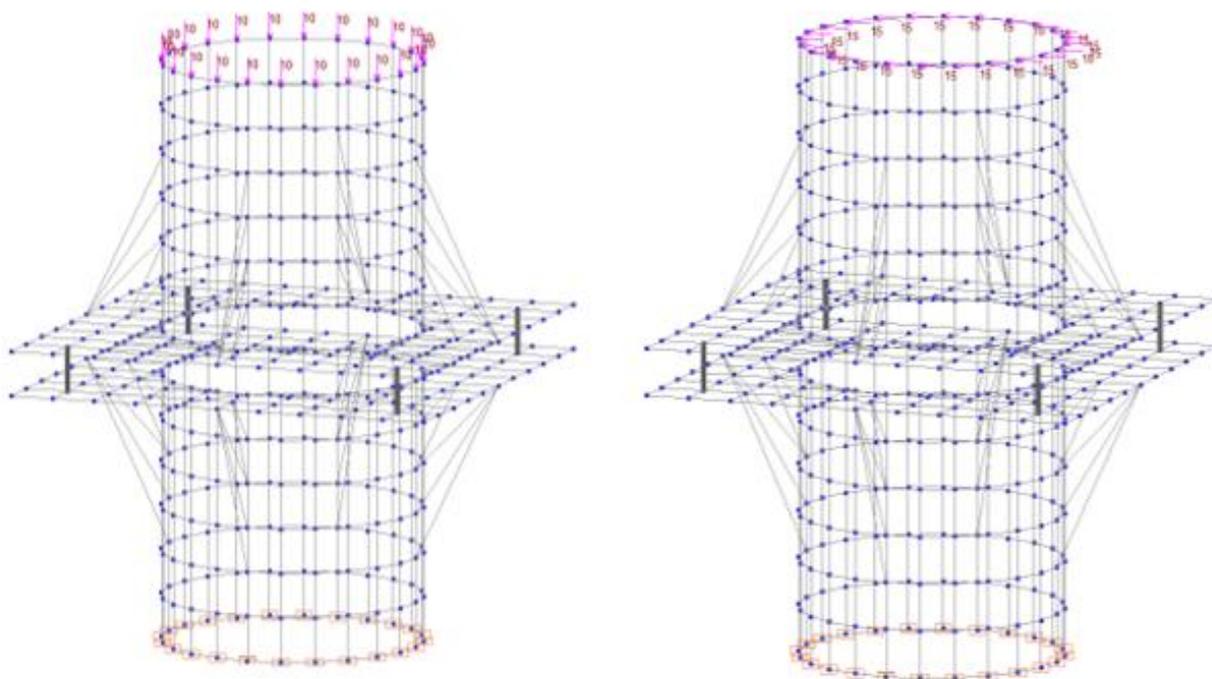


Рис. 8.15. Задание нагружения

Смотрим деформированные схемы.

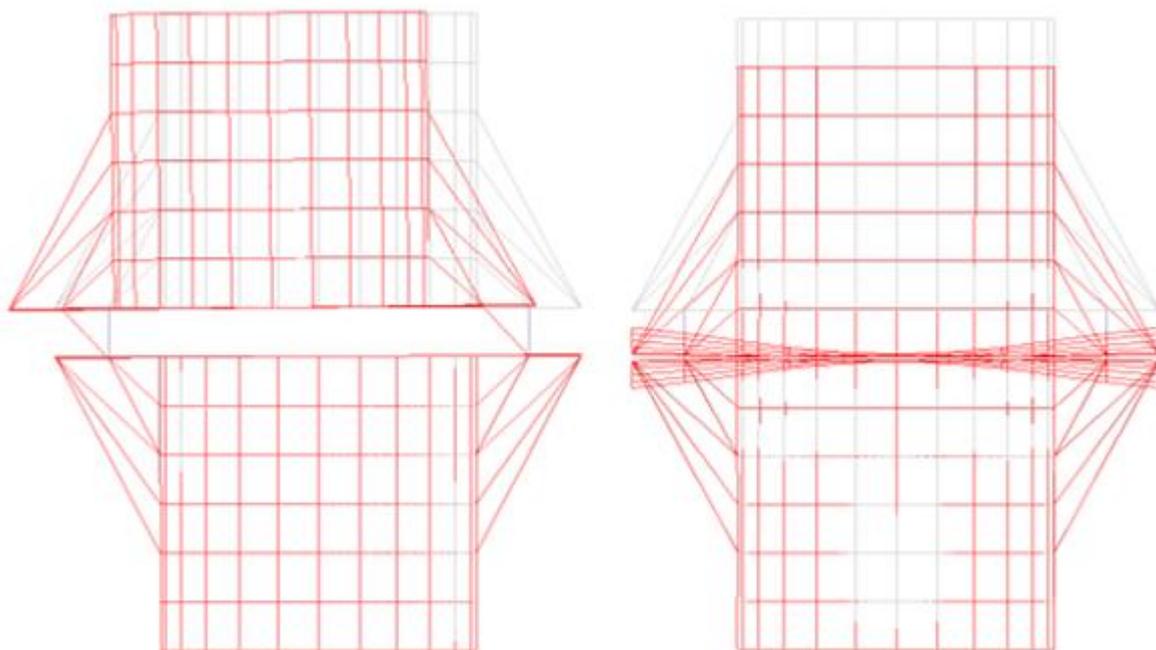


Рис. 8.16. Деформированные схемы трубы

Производим анализ работы болтов - стержневых элементов – смотрим эпюры усилий.

	N		
	кН	кН	
1	-146,25	-127,97	2
2	-127,97	-109,69	0
3	-109,69	-91,41	0
4	-91,41	-73,12	0
5	-73,12	-54,84	0
6	-54,84	-36,56	0
7	-36,56	-18,28	0
8	-18,28	0	0
9	0	18,28	0
10	18,28	36,56	0
11	36,56	54,84	0
12	54,84	73,12	0
13	73,12	91,41	0
14	91,41	109,69	0
15	109,69	127,97	0
16	127,97	146,25	2

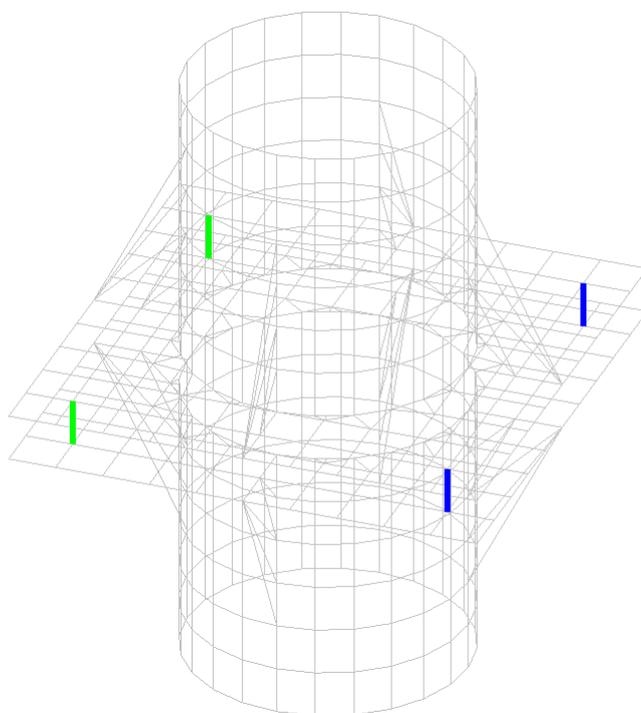


Рис. 8.17. Анализ работы болтов

Производим анализ работы пластинчатых элементов – смотрим изополя напряжений.

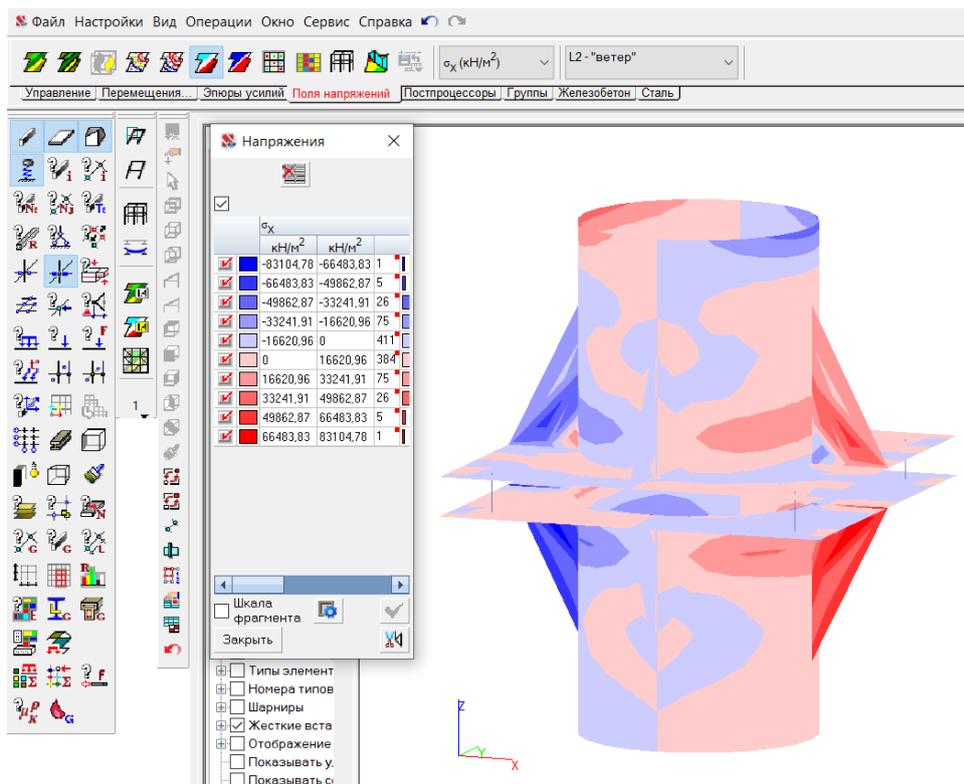


Рис. 8.18. Анализ работы пластинчатых элементов

Выход из программного комплекса SCAD.