

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ "ДИП"

Программа расчета  
динамики и прочности конструкций,  
механизмов и приводов

**"Зенит-95"**

**Версия 6.6.1**

Типовые задачи

Санкт-Петербург 2010 г.

*Научно-техническое предприятие "ДИП" выражает Вам благодарность за приобретение программы Зенит-95 и надеется на дальнейшее успешное и плодотворное сотрудничество.*

## Аннотация

Предлагаемая программа предназначена для выполнения проектных и научно-исследовательских расчетов разнообразных пространственных конструкций, механизмов, приводов методом конечных элементов на персональных ЭВМ в операционной системе *Windows-95* и выше.

Программа "Зенит-95" есть результат дальнейшего развития известного пакета прикладных программ "Зенит", разработка которого началась в 1988 г., и является полностью отечественной разработкой.

Для широкого класса пространственных конструкций и деталей программа обеспечивает решение следующих задач:

- расчет деформаций и напряжений при статическом нагружении;
- расчет параметров движения, деформаций и напряжений при динамических переходных процессах;
- расчет частот и форм собственных колебаний;
- расчет амплитуд вынужденных колебаний;
- определение инерционных характеристик;
- расчёт параметров стационарных и нестационарных процессов теплопередачи.

Отличительной особенностью программы от отечественных и зарубежных аналогов, является возможность решения как традиционных для МКЭ задач, решаемых в рамках допущения о малых перемещениях, так и задач динамики сложных нелинейных механических систем, элементы которых совершают большие кинематические перемещения и одновременно испытывают упругие деформации. Программа обеспечивает *совместное рассмотрение больших кинематических перемещений и малых упругих деформаций* конечных элементов, а также изменения структуры модели во время рассматриваемого процесса. При этом обеспечена возможность задания практически любого закона изменения нагрузок и кинематических возмущений во времени.

В библиотеке элементов имеются *стержневые, объемные КЭ, пластины, целый ряд специальных элементов (гибкие нити, неудерживающие связи, твердые тела, элементы механизмов, приводов)*.

Возможен учёт физической нелинейности свойств материала как при деформации, так и при действии температуры.

Для ввода и редактирования исходных данных имеется удобный *графический редактор*.

Вывод результатов решения описанных выше задач возможен в виде графиков, таблиц и схем конструкции в исходном и смещенном в результате деформации состояниях в различные моменты времени, а также в соответствии с формами колебаний, анимация. Обеспечивается вывод напряжений в КЭ модели в виде цветной закрашки областей равных напряжений с подавлением невидимых линий.

## Содержание

1. Статика .....	5
1.1 Расчет статической прочности каркаса строительной конструкции .....	5
1.2 Нагрузка перемещающаяся по железобетонной конструкции .....	11
1.3. Прессовое соединение .....	18
1.4. Укладка слоев бетона .....	25
1.5. Расчет геометрических характеристик и коэффициентов напряжений поперечного сечения стержня .....	31
2. Динамика .....	36
2.1. Монтаж плиты .....	36
3. Теплопередача .....	49
3.1. Теплый пол .....	49
4. Гидро- пневмодинамика .....	56
4.1. Домкрат .....	57

## 1. Статика

### 1.1. Расчет статической прочности каркаса строительной конструкции

**Формулировка задачи.** Определить напряженно-деформированное состояние конструкции каркаса здания находящейся под действием ветровой и снеговой нагрузок.

**Исходные данные.**

- КЭМ каркаса здания (описание построения модели каркаса находится в п.п. 1.2.1 /1/, данные находятся в файле **КаркасЗдания.zna**);

- материал: сталь;

- ветер направлен вдоль оси ХГСК, скорость ветра  $V_{\sigma}=1$  м/с;

- снеговая нагрузка имеет единичное значение.

Расчетная схема каркаса здания представлена на рисунке 1.1.

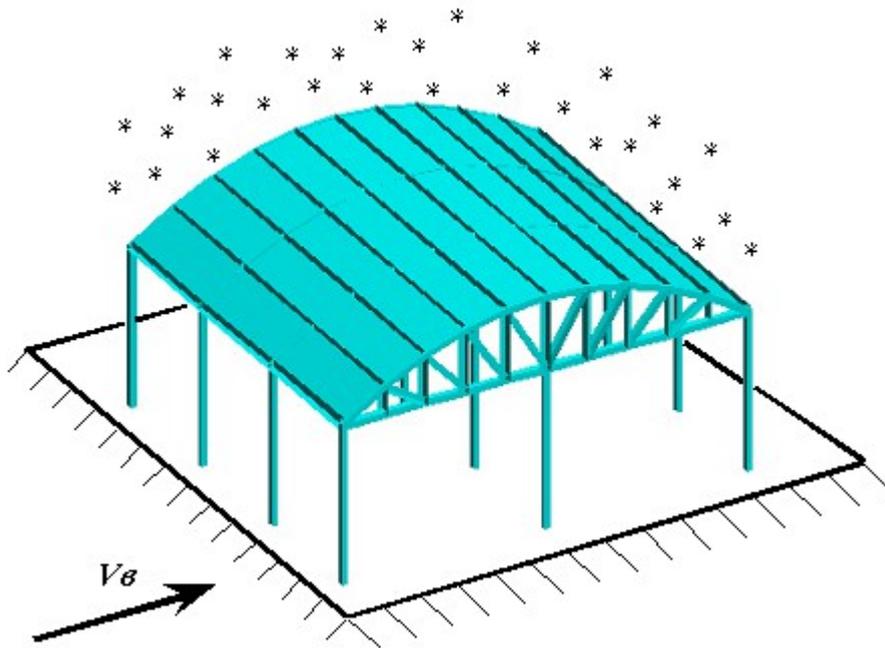


Рисунок 1.1 - Расчетная схема

**Построение модели.** Построение модели каркаса здания описано в /1/.

**Ввод свойств материала.** Так как все конструктивные элементы каркаса здания изготовлены из стали, ввод свойств этого материала в набор данных обязателен. Это возможно в связи с тем, что «по умолчанию» при отсутствии в наборе данных записи о свойствах материала программа принимает для расчетов свойства стали.

**Ввод кинематических и силовых граничных условий.** Прежде всего, необходимо жестко закрепить узлы основания каркаса, смоделировав, таким образом, заделку стоек каркаса в фундаменте здания. Для этого поворачиваем модель каркаса, так как это показано на рисунке 1.2а (используйте кнопку  на панели инструментов или мышью) и выделяем прямоугольником (команда «Рисовать»  $\hookrightarrow$  «...прямоугольник» (ускоритель клавиша *r* или кнопка  на панели инструментов)) узлы основания каркаса. Далее подаем команду «Выделить»  $\hookrightarrow$  «...все узлы внутри контура» (ускоритель клавиша *v* или кнопка  на панели инструментов). Далее подадим команду «Ред. Граф.»  $\hookrightarrow$  «ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»  $\hookrightarrow$  «Задать условия» (ускоритель – клавиша *u* или кнопка  на панели инструментов). В появившейся панели «Укажите тип условия для помеченных узлов» в области «КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ» указываем мышью на «Тип условия» «G – жесткое закрепление» и нажимаем кнопку «Ввести». Результат ввода в модель кинематических граничных условий показан на рисунке 1.2б.

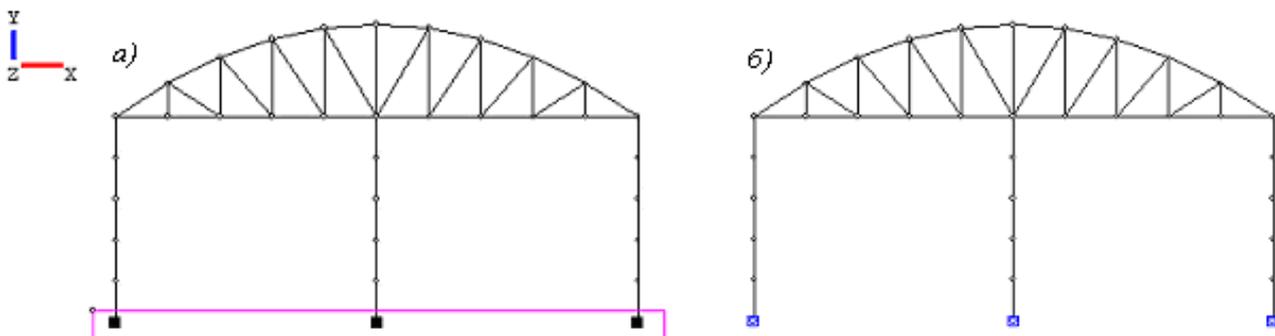


Рисунок 1.2 - Ввод кинематических граничных условий: а – выделение закрепляемых узлов; б – модель с жестко закрепленными узлами основания каркаса

Теперь нагрузим модель каркаса здания снеговой нагрузкой. Так как данный тип нагрузки действует строго в направлении, противоположном оси **OZ** ГСК, а пространственная ориентация построенной модели не соответствует этому условию, необходимо повернуть ее таким образом, чтобы ось **OZ** ГСК была направлена по нормали к основанию каркаса. Для этого, сначала, нужно пометить все узлы модели и совместить плоскость **YOZ** ГСК с плоскостью экрана – рисунок 1.3а, б. Далее вызываем панель **«Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ»**, выполнением команды **«Ред. Граф.»** ⇨ **«ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»** ⇨ **«Корректировать положение»** (ускоритель – клавиша **x** или кнопка  на панели инструментов). На этой панели в области **«Координаты ТОЧКИ»** вводим координаты центра поворота каркаса -  $x=0$ ,  $y=0$ ; в окне **«УГОЛ F, градус»** вводим угол поворота каркаса -  $90^\circ$  и нажимаем на кнопку **«Повернуть вокруг ТОЧКИ на угол F»**. Последовательность действий и их результат показан на рисунке 1.3.

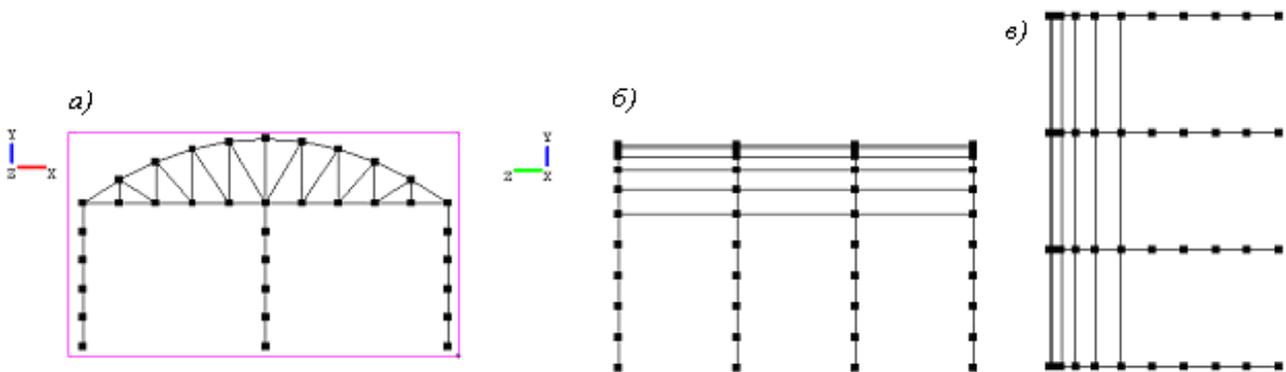


Рисунок 1.3 - Поворот модели для правильной ориентации ГСК: а – выделение всех узлов модели; б – совмещение плоскости YOZ ГСК с плоскостью экрана; в – модель повернутая на  $90^\circ$

На следующем этапе построений приступим непосредственно к вводу в набор данных снеговой нагрузки. Снеговой нагрузкой нагружается «кровля», т. е. элементы поверхности моделирующие ее. Для ввода этой нагрузки необходимо выделить узлы элементов поверхности (в нашем случае они уже выделены) и вызвать диалоговую панель **«Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов»** (ускоритель клавиша **Insert** или кнопка  на панели инструментов). В этой панели вводим запись **«2.0. Элементы поверхности»** + **«2.01. Элемент поверхности 4 узла»**. В появившейся после этого панели **«Укажите тип и параметр элемента поверхности»** нажимаем кнопку **«Снег»**, а в следующем окне **«Уточните значение параметра»** указываем величину полного нормативного значения снеговой нагрузки  $S=1 \text{ кг/м}^2$ . Подробнее о вводе величины полного нормативного значения снеговой нагрузки можно узнать, подав команду **«Справка»** (кнопка  на панели инструментов).

В следующей появившейся панели **«Ввод слоя элементов»** нажимаем кнопку **«Ввести»**. В результате в модели появится отображение снеговой нагрузки в виде темносиних контуров смещенных в направлении оси **OZ** ГСК – рисунок 1.4а.

Чаще всего величина снеговой нагрузки переменна по высоте кровли и, следовательно, возникает необходимость коррекции введенных величин. Эта операция осуществляется с выделенными узлами поверхностей нагруженных снеговой нагрузкой. Так как узлы поверхностей уже выделены, то сразу подаем команду **«Ред. Граф.»** ⇨ **«ПОМЕЧЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, операции»** ⇨ **«Коррекция параметров элементов в виде функций от X и Y»** ⇨ **«Давление снеговой нагрузки»** (ускоритель – клавиша **\***). В

появившейся панели «**Ввод и коррекция параметров КЭ**» предлагаются различные варианты распределения нагрузки. Для нашего примера выбираем квадратичное распределение с коэффициентами  $P1=1$ ,  $P2=2$  и  $P3=1$ .

При изображении без масштабирования смещение площадок постоянно по величине, а при отображении в режиме масштабирования (команда «**Отобразить.**» ↪ «... **масштабировать нагрузки**») - пропорционально величинам  $S$ , задаваемым для описываемых нагрузок. Режимы отображения снеговой нагрузки показаны на рисунке 1.4.

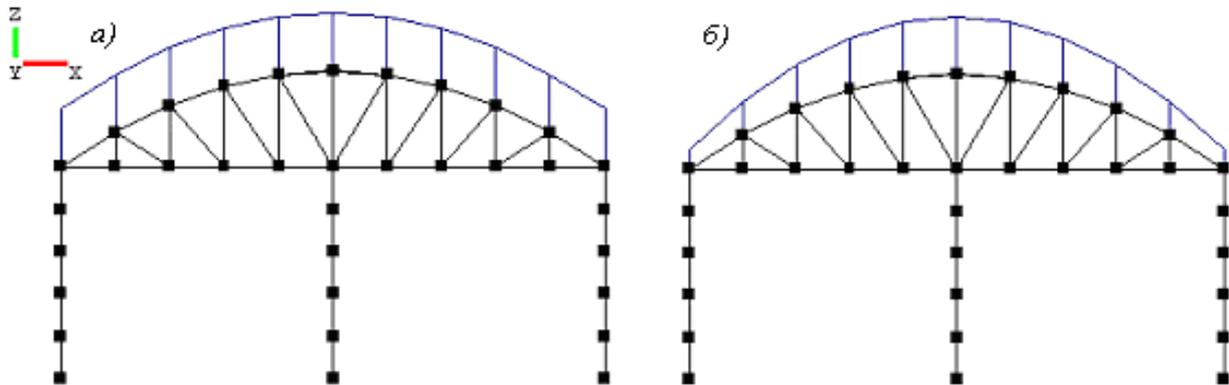


Рисунок 1.4 - Ввод снеговой нагрузки на поверхность: а – схематическое отображение снеговой нагрузки; б – отображение в режиме масштабирования

Далее нагрузим модель каркаса здания ветровой нагрузкой. Для начала в модель необходимо ввести поверхности воздействия среды, принцип ввода которых идентичен вводу снеговой нагрузки на поверхность, только в панели «**Укажите тип и параметр элемента поверхности**» нажимаем кнопку «**Действие среды**», а в окне «**Уточните значение параметра**» вводим величину давления среды  $S_{пр}=1 \text{ кз/м}^2$ . Подробнее о вводе величины давления среды можно узнать, подав команду «**Справка**» (кнопка  на панели инструментов).

В результате, в модели появится отображение поверхностей воздействия среды в виде синих стрелок, направленных по нормали к серединам элементов поверхности – рисунок 1.5а.

Ввод данных о взаимодействии стержней с ветром производится с помощью текстового редактора. Эти данные находятся в записи «**дополнительные характеристики сечений стержней**», которую необходимо поместить перед первой из записей об индексах и параметрах стержневых элементов, находящейся в наборе данных модели каркаса. Чтобы выполнить эту операцию необходимо «войти» в текстовый редактор, подав команду «**Ред. текст**». Далее, выделим запись с именем «**Верхн.обвязка**» и нажмем на кнопку «**Вставить запись перед указанной**». В появившейся панели «**Укажите тип записи**» выделяем и вводим запись «**дополнительные характеристики сечений стержней**». В следующей панели «**Дополнительные характеристики сечений стержней**» в области «**Взаимодействие с ветром**» вводим «**Приведенный коэффициент аэродинамического сопротивления  $S'_{пр}=1$** ». Подробнее о вводе приведенного коэффициента аэродинамического сопротивления можно узнать, подав команду «**Справка**» (кнопка  на панели инструментов).

Информация о дополнительных характеристиках сечений стержней графически не отображается, поэтому контроль за наличием этих данных следует осуществлять более внимательным просмотром записей находящихся в текстовом редакторе.

Теперь введем в набор данных информацию о скорости и направлении ветра, воздействующего на конструкцию каркаса. Эти данные вводятся так же с помощью текстового редактора, и соответствующая запись о ветровой нагрузке должна находиться перед записями с данными об элементах, воспринимающих эту нагрузку. Итак, выделим

любую из записей, находящуюся перед записью **«Верхн.обвязка»** с данными о параметрах стержневых элементов и нажмем на кнопку **«Вставить запись перед указанной»**. В появившейся панели **«Укажите тип записи»** выделяем и вводим запись **«направление и скорость ветра ( $V_x, V_y, V_z$ )»**. В следующей панели **«Проекция скорости ветра на оси  $XOYZ$ »** вводим **« $V_x=1$ »**, что означает наличие ветра движущегося со скоростью 1м/с в положительном направлении оси  **$OX$**  ГСК.

После завершения работы с текстовым редактором (кнопка **«Закончить работу»**) и вывода изображения модели на экран командой **«Отобразить»**  **«Вывести ИЗОБРАЖЕНИЕ»** (ускоритель клавиша **g** или кнопка  на панели инструментов) на экране появится изображение модели каркаса с текстовой и графической информацией о введенной ветровой нагрузке – рисунок 1.5б.

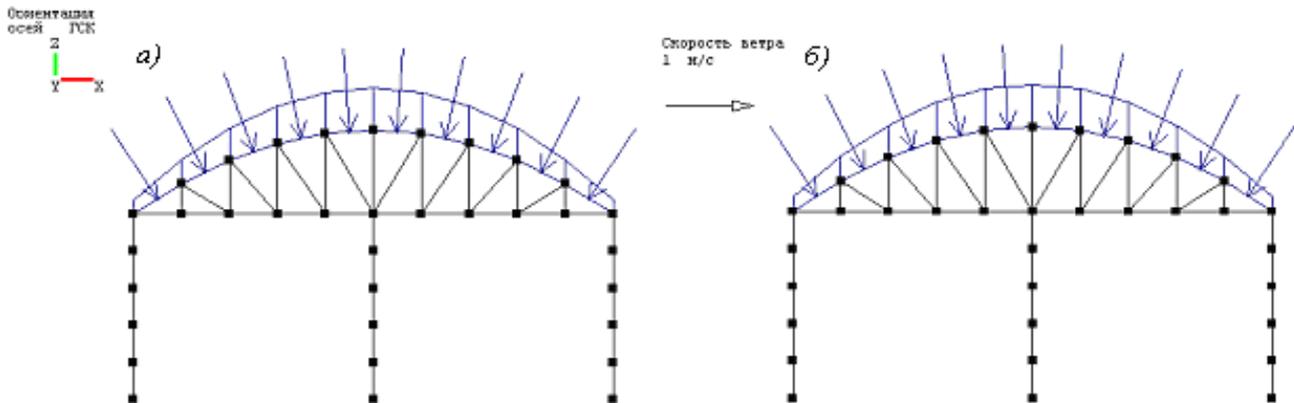


Рисунок 1.5 - Ввод ветровой нагрузки на поверхность: а – ввод поверхностей воздействия среды; б – ввод ветровой нагрузки

На последнем этапе ввода информации о нагрузках, действующих на каркас здания, осуществим ввод данных о силе тяжести. Эти данные вводятся с помощью текстового редактора и находятся в типовой записи **«Нагрузки распределенные по массе ( $A_x, A_y, A_z$ )»**. Эта запись может занимать любое положение в наборе данных, поэтому войдя в текстовый редактор сразу нажимаем кнопку **«Ввести запись в конец набора»** и в появившейся панели **«Укажите тип записи»** выделяем и вводим запись **«Нагрузки распределенные по массе ( $A_x, A_y, A_z$ )»**. В следующей панели **«Данные о распределенных нагрузках»** вводим **« $A_z= -9,81$ »** после чего «выходим» из текстового редактора, нажав кнопку **«Закончить работу»** на панели **«Редактирование набора данных в текстовом режиме»**.

В результате ввода в набор данных кинематических и силовых граничных условий модель каркаса здания при выводе изображения на экран будет выглядеть, так как это показано на рисунке 1.6. Эта модель полностью готова к расчету перемещений при статическом нагружении.

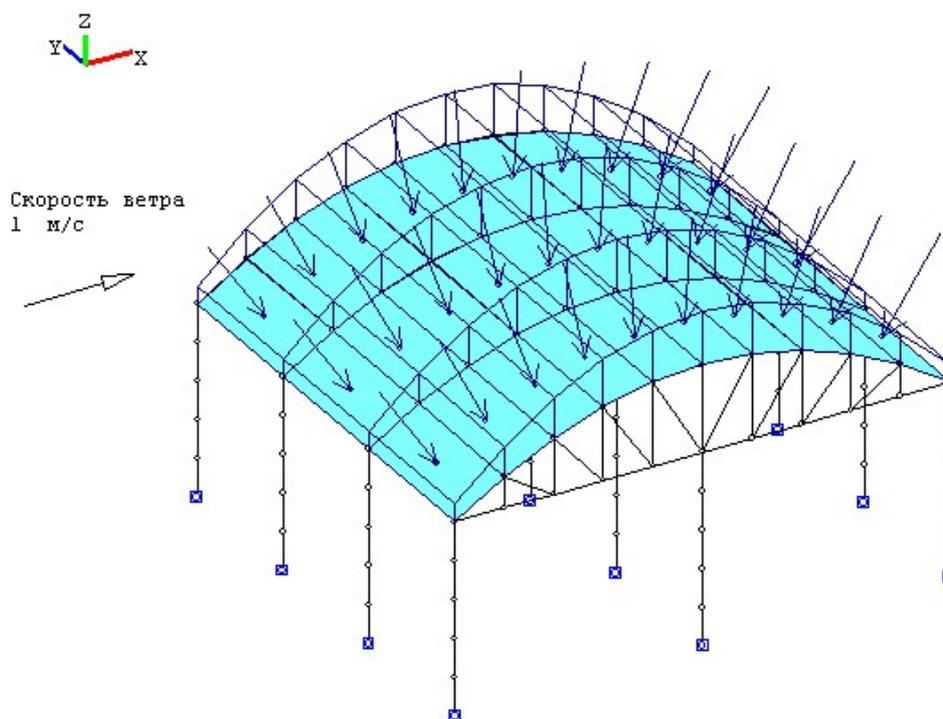


Рисунок 1.6 - Модель каркаса здания с отображением введенных силовых и кинематических граничных условий

**Вычисления.** Для выполнения вычислений необходимо подать команду **«Вычислить»**. В появившемся после подачи этой команды меню необходимо выделить запись **«Перемещения при СТАТИЧЕСКОМ нагружении»** и нажать на кнопку **«Вычислить»**.

**Просмотр результатов вычислений.** После завершения вычислений можно приступить к просмотру результатов расчета.

Для этого сначала подается команда **«Граф. просм.»**  $\hookrightarrow$  **«Выбрать перемещения»**, после подачи которой на экран выводится диалоговая панель **«Укажите тип и атрибуты отображения перемещений:»**. В области **«Тип перемещения»** этой панели устанавливаем переключатель на опцию **«- перемещения от статически приложенной нагрузки»**). В области **«Способ отображения»** устанавливаем переключатель на опцию **«- смещением точек»**. Затем в области **«Масштабный коэффициент»** устанавливаем переключатель на опцию **«- определяется программой»**.

После выбора перемещений можно приступить к просмотру результатов решения задачи.

Для просмотра распределения напряжений в конструкции необходимо подать команду **«Граф. просм.»**  $\hookrightarrow$  **«Вывести НАПРЯЖЕНИЯ, УСИЛИЯ (муар, эпюры)»** (ускоритель – клавиша **m**), которая переводит программу в режим графического отображения компонент напряжений. После подачи этой команды, на экран выводится панель **«Укажите требуемый параметр»** с перечнем наименований параметров, которые возможно вывести. Кроме вывода компонент напряжений, имеется возможность графического отображения компонент перемещений в узлах КЭМ. Для отображения перемещений модели подается команда **«Граф. просм.»**  $\hookrightarrow$  **«Показать перемещения (отм)»** (ускоритель – клавиша **q**).

На рисунке 1.7 показано распределение эквивалентных напряжений возникающих в конструкции каркаса здания. Модель показана в деформированном состоянии и в режиме объемного отображения сечений стержней, который можно установить подачей команды **«Отобразить»**  $\hookrightarrow$  **«Объемное отображение стержней»**.

Для просмотра перемещений конструкции под действием приложенных нагрузок в текстовом режиме необходимо подать команду «Текст. просм.» ↵ «**ПЕРЕМЕЩЕНИЯ в глобальной СК XOYZ**»). Перемещения выводятся только для помеченных узлов модели или для всех узлов, если ни один из них не помечен.



Модель из стержней и пластин  
 Линейная статика.  
 $S_{ii}$  - интенсивность напряжений, МПа

Уровни  $S_{ii}$

9.73e+001
8.76e+001
7.79e+001
6.81e+001
5.84e+001
4.87e+001
3.89e+001
2.92e+001
1.95e+001
9.73e+000
0.00e+000

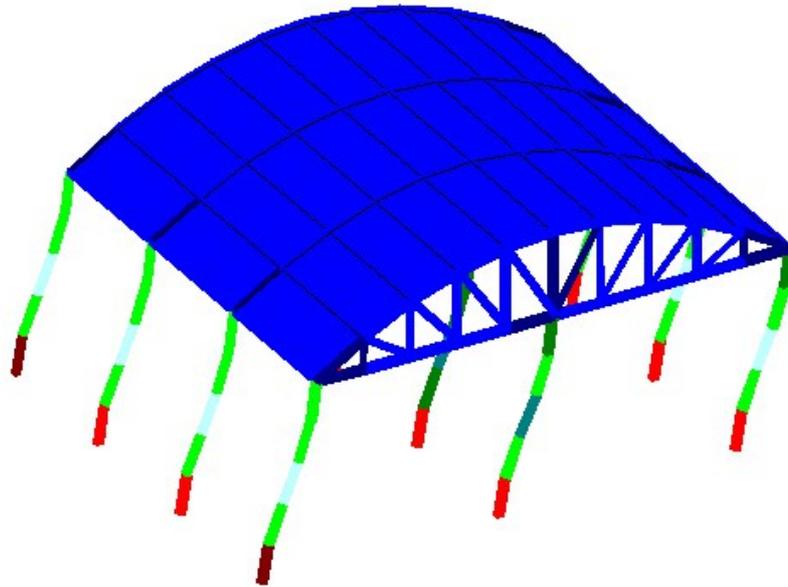


Рисунок 1.7 - Отображение эквивалентных напряжений возникающих в конструкции каркаса здания

Построенная модель находится в файле **Каркас\_Здания.ZNA**.

## 1.2 Нагрузка перемещающаяся по железобетонной конструкции

**Формулировка задачи.** Определить напряженно-деформированное состояние железобетонной конструкции в виде трёхопорной балки, находящейся под действием движущейся по ней нагрузки.

**Исходные данные.** Материал конструкции: тяжелый бетон Б60; отношение площади сечения арматуры к общей площади сечения у каждого из трех поперечных сечений балки – 0,1. Геометрические характеристики балки:  $a=b=10$  м;  $c=2$  м;  $d=0,8$  м. Подвижная нагрузка  $P=100000$  Н распределена по площадке  $1 \times 0,8$  м. Расчетная схема железобетонной конструкции представлена на рисунке 1.8.

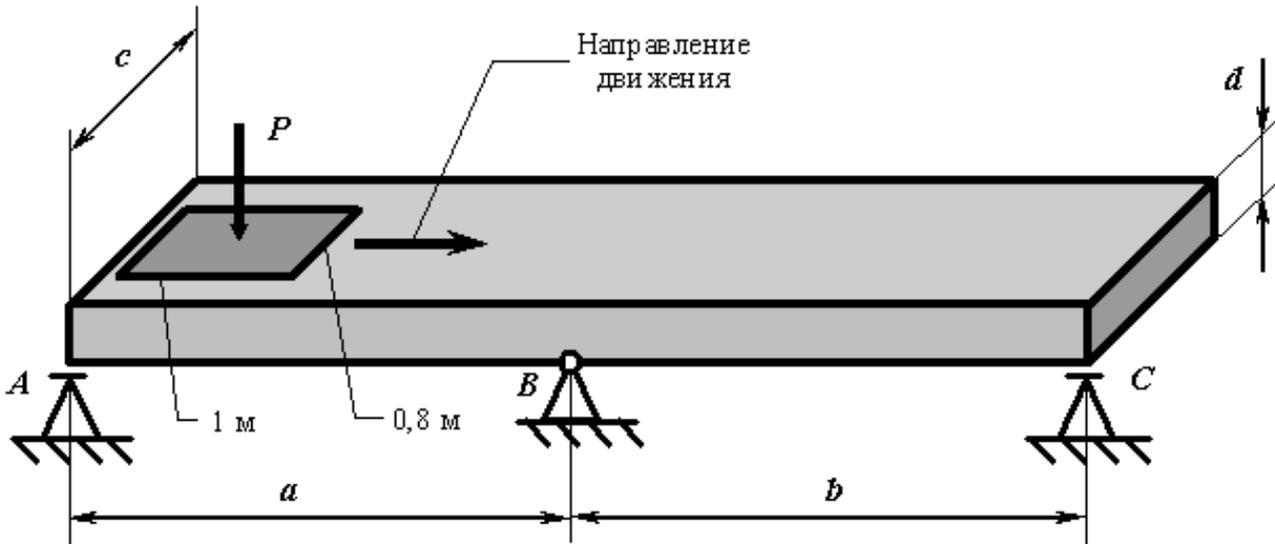


Рисунок 1.8 - Расчетная схема железобетонной конструкции

**Построение модели.** Построим модель балки из объемных элементов. Сначала совместим плоскость  $XOY$  ГСК с плоскостью экрана, нажав соответствующую кнопку на панели «Задание положения системы координат модели и параметров рисования», которое можно вызвать командой меню «Ред. Граф.»  $\hookrightarrow$  «Задать начальное положение системы коорд.» (кнопка  на панели инструментов).

Далее подаем команду «Ред. Граф.»  $\hookrightarrow$  «ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть» (ускоритель «Insert» или кнопка  на панели инструментов). В появившемся окне «Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов» вводим запись «1.0. Объемные элементы + 1.02. Параллелепипед из объемных элементов». Теперь в появившейся панели «Уточните размеры» необходимо ввести геометрические характеристики балки. Вводим в ней следующие величины: длина балки  $V=20000$ , количество элементов по длине балки - 20; высота балки  $H=800$ , количество элементов по высоте балки - 1; ширина балки  $L=2000$ , количество элементов по ширине балки – 2. Далее, в появившейся панели «Положение начала координат размещаемой подобласти», уточняем координаты положения вводимого параллелепипеда относительно центра ГСК, введя значения всех координат равными нулю. Построение расчетной модели балки завершено. Результат построения показан на рисунке 1.9.

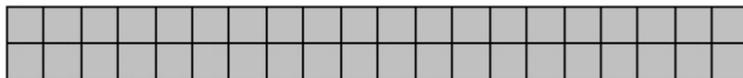


Рисунок 1.9 - Ввод параллелепипеда из объемных элементов

**Ввод свойств материала:** Для ввода свойств материала балки используется текстовый редактор. «Войдем» в текстовый редактор, подав команду **«Ред. текст»**. Далее, выделим запись с данными об объемных элементах и нажмем на кнопку **«Вставить запись перед указанной»**. В появившейся панели **«Укажите тип записи»** выделяем и вводим запись **«свойства материала  $R_0, E, \rho, \dots$ »**. В следующей панели **«Укажите тип материала»** нажимаем на кнопку **«Изотропный упругий, нелинейно-упругий...»** и далее на панели **«Свойства материала»** выбираем в имеющейся базе данных тяжелый бетон марки Б60 и нажимаем кнопку **«Ввести»**.

Теперь необходимо ввести данные об армировании железобетонной конструкции. Эти данные так же вводятся в текстовом редакторе, и запись с ними должна находится перед записью с данными об объемных элементах. Итак, выделяем запись с данными об объемных элементах и нажмем на кнопку **«Вставить запись перед указанной»**. В появившейся панели **«Укажите тип записи»** выделяем и вводим запись **«коэффициенты армирования материала»**. В следующей появившейся панели **«Коэффициенты армирования материала»** вводим эти коэффициенты в соответствии с исходными данными: **« $A_x=0,1$ », « $A_y=0,1$ » и « $A_z=0,1$ »**.

**Ввод подвижной нагрузки:** Подвижная нагрузка вводится с помощью графического редактора. Обозначим прямоугольником (команда **«Рисовать»**  **«...прямоугольник»** (ускоритель клавиша **r** или кнопка  на панели инструментов)) примерные размеры и местоположение площадки подвижной нагрузки так как это показано на рисунке 1.10а. Далее вызываем диалоговую панель **«Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов»** (ускоритель клавиша **Insert** или кнопка  на панели инструментов). В этой панели вводим запись **«2.0. Элементы поверхности»** + **«2.02. Прямоугольник из элементов поверхности»**. В появившейся после этого панели **«Укажите тип и параметр элемента поверхности»** нажимаем кнопку **«Подвижные нагрузки»**, а в следующем окне **«Уточните значение параметра»** указываем величину нагрузки  **$P=100000$  Н**. В следующей появившейся панели **«Уточните размеры»** необходимо ввести геометрические характеристики площадки подвижной нагрузки. Вводим в ней следующие величины: ширина площадки  **$B=1000$** , количество элементов по ширине площадки - 1; высота площадки  **$H=1000$** , количество элементов по высоте площадки - 1. Далее, в появившейся панели **«Положение начала координат размещаемой подобласти»**, уточняем координаты положения вводимого прямоугольника относительно центра ГСК, введя следующие значения координат **«В ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ»**: **« $x_0=0$ ;  $y_0=600$ ;  $z_0=1000$ »**. Результат введения подвижной нагрузки показан на рисунке 1.10б.

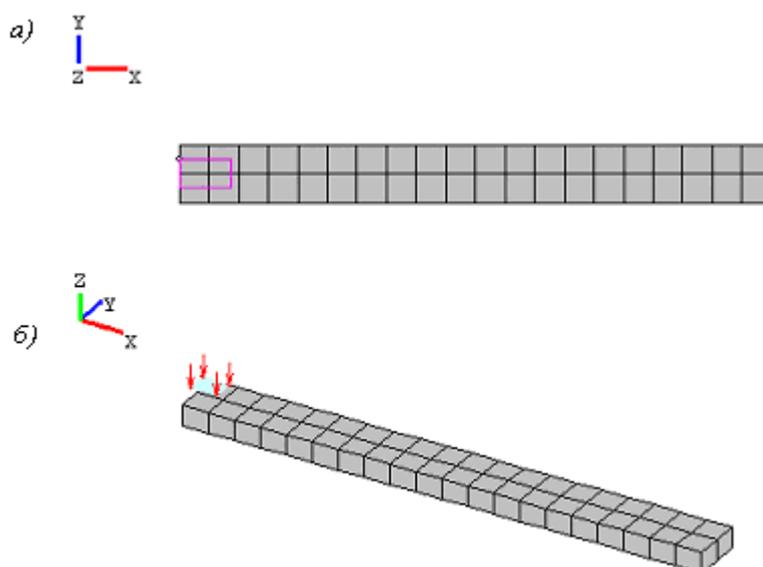


Рисунок 1.10 - Ввод перемещающейся нагрузки: а – обозначение прямоугольником размеров и местоположения, вводимой подвижной нагрузки; б – модель с введенной подвижной нагрузкой

**Ввод кинематических и силовых граничных условий.** Введем скорость движения подвижной нагрузки. Так как значение величины скорости движения нагрузки не принципиально, примем для расчета единичное значение скорости - 1 м/с.

Сначала совместим плоскость  $XOZ$  ГСК с плоскостью экрана, нажав соответствующую кнопку на панели «**Задание положения системы координат модели и параметров рисования**», которое можно вызвать командой меню «**Ред. Граф.**» → «**Задать начальное положение системы коорд.**» (кнопка  на панели инструментов). Пометим узлы подвижной нагрузки, заключив их в прямоугольник (ускоритель клавиша  $r$  или кнопка  на панели инструментов) и подадим команду «**Выделить**» → «**...все узлы внутри контура**» (ускоритель клавиша  $v$  или кнопка  на панели инструментов) – рисунок 1.11а. Теперь подадим команду «**Ред. Граф.**» → «**ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции**» → «**Задать условия**» (ускоритель – клавиша  $u$ ). В появившейся панели «**Укажите тип условия для помеченных узлов**» в области «**КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ**» последовательно указываем мышью на «**Тип условия**» - « **$V$  – заданные скорости**», «**Направление для заданных и начальных...**» - « **$Qx$  – перемещения вдоль оси  $Ox$** » и вводим величину заданной скорости ( 1 м/с) в графе «**– значение (в соотв. единицах)**». Результат ввода в модель скорости движения нагрузки показан на рисунке 1.11б.

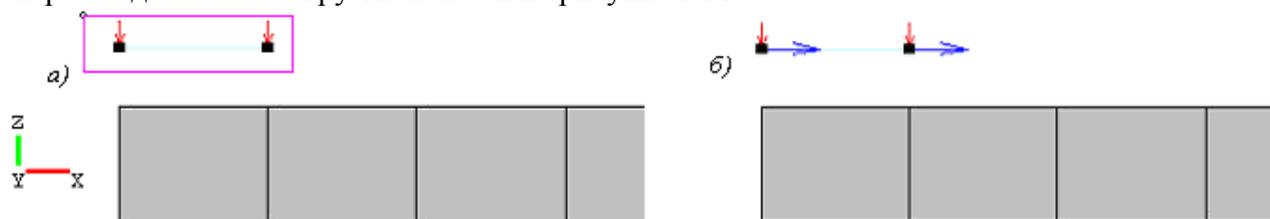


Рисунок 1.11 - Ввод заданных скоростей: а – выделение узлов подвижной нагрузки; б - модель с заданными скоростями подвижной нагрузки

Теперь в соответствии с расчетной схемой представленной на рисунке 1.8 введем кинематические граничные условия в виде закреплений по различным осям ГСК. В местах установки всех трех опор необходимо ввести закрепления по оси  $OZ$  ГСК, в месте установки средней опоры - закрепления по оси  $Ox$  ГСК и в месте установки двух крайних опор - по

оси  $OY$  ГСК. Для ввода закреплений помечаем соответствующие узлы модели, предварительно заключив их в контур прямоугольника и подав команду «**Рисовать**»  $\hookrightarrow$  «... **прямоугольник**» (ускоритель клавиша  $r$  или кнопка  на панели инструментов). Затем подаем команду «**Выделить**»  $\hookrightarrow$  «...**все узлы внутри контура**» (ускоритель клавиша  $v$  или кнопка  на панели инструментов) и команду «**Ред. Граф.**»  $\hookrightarrow$  «**ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции**»  $\hookrightarrow$  «**Задать условия**» (ускоритель – клавиша  $u$ ). В появившейся панели «**Укажите тип условия для помеченных узлов**» в области «**КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ**» последовательно указываем мышью на «**Тип условия**» - «**Q - ЗАДАННЫЕ перемещения**», «**Направление для заданных и начальных...**» - «**Q<sub>x,y,z</sub> – перемещения вдоль оси OX, OY, OZ**», в соответствии с расчетной схемой. Эти действия необходимо последовательно проделать для закрепления соответствующих узлов модели по соответствующим осям ГСК. Последовательность действий при вводе закреплений показана на рисунке 1.12.

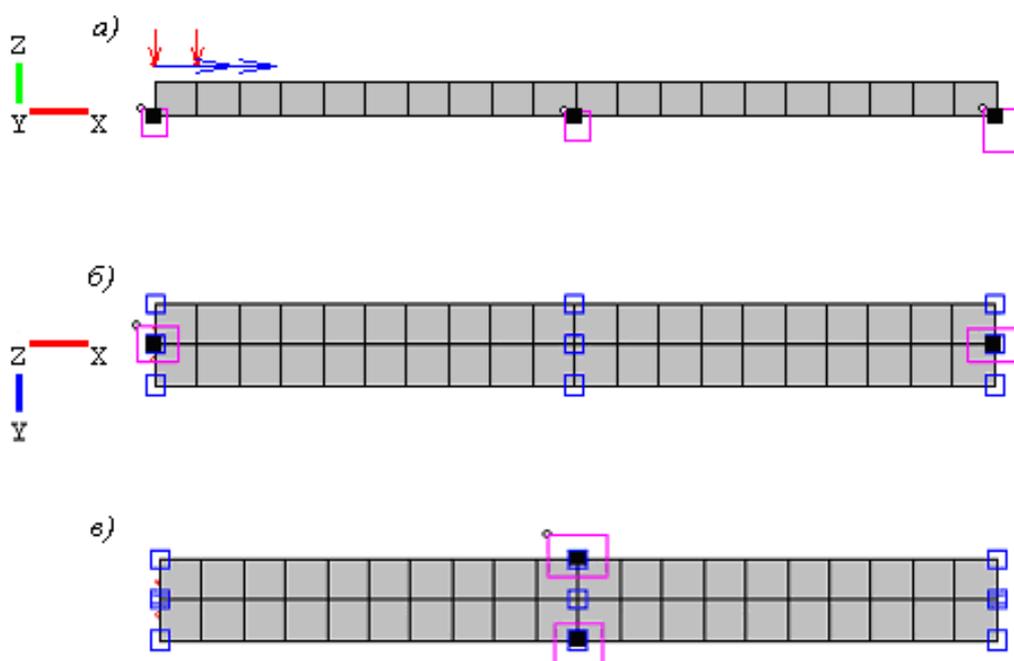


Рисунок 1.12 - Закрепление модели: а – выделение узлов закрепляемых в направлении оси Z ГСК; б – выделение узлов закрепляемых в направлении оси Y ГСК; в – выделение узлов закрепляемых в направлении оси X ГСК

Далее осуществим ввод данных о силе тяжести. Эти данные вводятся с помощью текстового редактора и помещаются в типовую запись «**Нагрузки распределенные по массе (Ax, Ay, Az)**». Эта запись может занимать любое положение в наборе данных, поэтому войдя в текстовый редактор сразу нажимаем кнопку «**Ввести запись в конец набора**» и в появившейся панели «**Укажите тип записи**» выделяем и вводим запись «**Нагрузки распределенные по массе (Ax, Ay, Az)**». В следующей панели «**Данные о распределенных нагрузках**» вводим «**Az= -9,81**».

Так же с помощью текстового редактора необходимо ввести в набор данных запись «**АТРИБУТЫ (число итераций, частот, время и шаг...)**». На панели появившейся при вводе этой записи вводим «**Временной интервал, с=**» - 21 с и «**шаг интегрирования, с=**» - 1 с. Эти данные с учетом введенной скорости подвижной нагрузки соответствуют ее полному прохождению вдоль балки. Введенная запись может занимать любое положение в наборе данных.

Типовые записи и последовательность их расположения в текстовом редакторе показана в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Структура рабочего набора данных

№ п/п	имя записи	тип данных, хранящихся в записи
1	_____	координаты узловых точек
2	Бетон_В60_тяжел	свойства материала ( $R_0, E, \rho, \dots$ )
3	_____	коэффициенты армирования материала
4	_____	объемные КЭ (8 узлов)
5	_____	подвижные поверхности с нагрузками
6	_____	заданные скорости $V$
7	_____	заданные перемещения и закрепления $Q$
8	_____	заданные перемещения и закрепления $Q$
9	_____	заданные перемещения и закрепления $Q$
10	_____	нагрузки распределенные по массе ( $A_x, A_y, A_z$ )
11	_____	АТРИБУТЫ (число итераций, частот, время и шаг...)

Для удобства можно присвоить типовым записям соответствующие имена. Это делается так: выделяем левой кнопкой мыши необходимую запись, затем вписываем в графу «ИМЯ» соответствующее имя записи и нажимаем кнопку «Присвоить имя».

«Выход» из текстового редактора выполняется нажатием кнопки «Закончить работу» на панели «Редактирование набора данных в текстовом режиме».

Вывод изображения модели на экран осуществляется по команде «Отобразить» ↵ «Вывести ИЗОБРАЖЕНИЕ» (ускоритель клавиша  $g$  или кнопка  на панели инструментов).

Результат ввода в модель кинематических граничных и силовых условий показан на рисунке 1.13. Эта модель полностью готова к расчету перемещений при статическом нагружении при изменяющихся во времени нагрузках и параметрах.

Ориентация  
осей ГСК

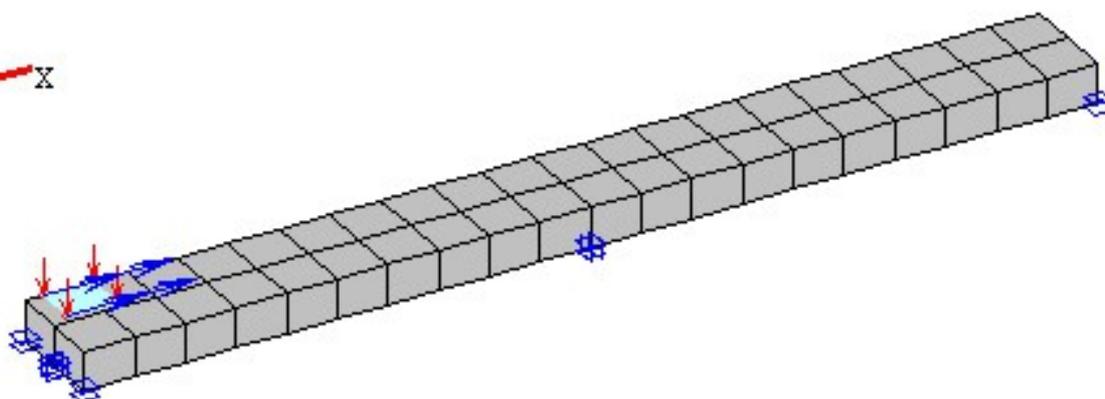
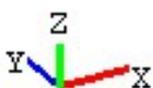


Рисунок 1.13 - Модель железобетонной конструкции с подвижной нагрузкой готовая к расчету

**Вычисления.** Для выполнения вычислений необходимо подать команду «Вычислить». В появившемся после подачи этой команды меню необходимо выделить запись «...при изменяющихся во времени нагрузках и параметрах» и нажать на кнопку «Вычислить».

**Просмотр результатов вычислений.** После завершения вычислений можно приступить к просмотру результатов расчета.

Изменение напряжений железобетонной конструкции можно просмотреть в режиме анимации, в виде графиков, а также в табличном виде.

Для просмотра изменения напряжений во времени необходимо подать команду «Граф. Просм.» → «АНИМАЦИЯ» → «Анимация напряжений изменяющихся во времени» после подачи которой на экран выводится диалоговая панель «Укажите тип и атрибуты отображения перемещений:». В области «Тип перемещения» этой панели устанавливаем переключатель на опцию («- перемещения зависящие от времени или нелинейные»). В области «Способ отображения» устанавливаем переключатель на опцию «- смещением точек». Затем в области «Масштабный коэффициент» устанавливаем переключатель на опцию «- задается пользователем и равен» и вводим 500. В следующем меню «Укажите требуемый параметр:» вводим (к примеру) «ОБЪЕМНЫЕ элементы + Напряжения + SXX – нормальные напряжения по оси OX ГСК». В меню «Укажите параметры анимации» вводим параметры, смысл которых ясен из приведенных в этом меню пояснений. После нажатия кнопки «Ввести» появится меню «Способ масштабирования выводимого параметра», в котором можно ввести границы значений выводимых параметров, а так же режим вывода максимального значения параметра во времени.

На рисунке 1.14 показано графическое отображение распределения нормальных напряжений по оси OX ГСК в элементах железобетонной конструкции в один из моментов времени. Модель показана в деформированном состоянии.

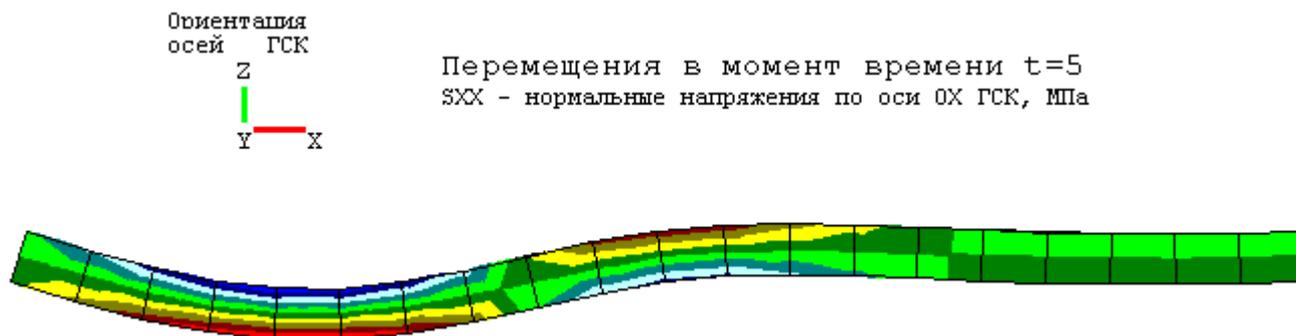


Рисунок 1.14 - Графическое отображение распределения нормальных напряжений по оси OX ГСК в элементах железобетонной конструкции

Построенная модель находится в файле **Перемещ\_Нагрузка.ZNA**.

### 1.3. Прессовое соединение

**Формулировка задачи.** Определить напряженно-деформированное состояние прессового соединения.

**Исходные данные.** Материал конструкции: сталь. Геометрические характеристики прессового соединения пред запрессовкой: внутренний диаметр втулки  $A=100$  мм, диаметр вала  $B=100,5$  мм, наружный диаметр втулки  $C=120$  мм, длина втулки  $D=100$  мм.

Расчетная схема прессового соединения представлена на рисунке 1.15.

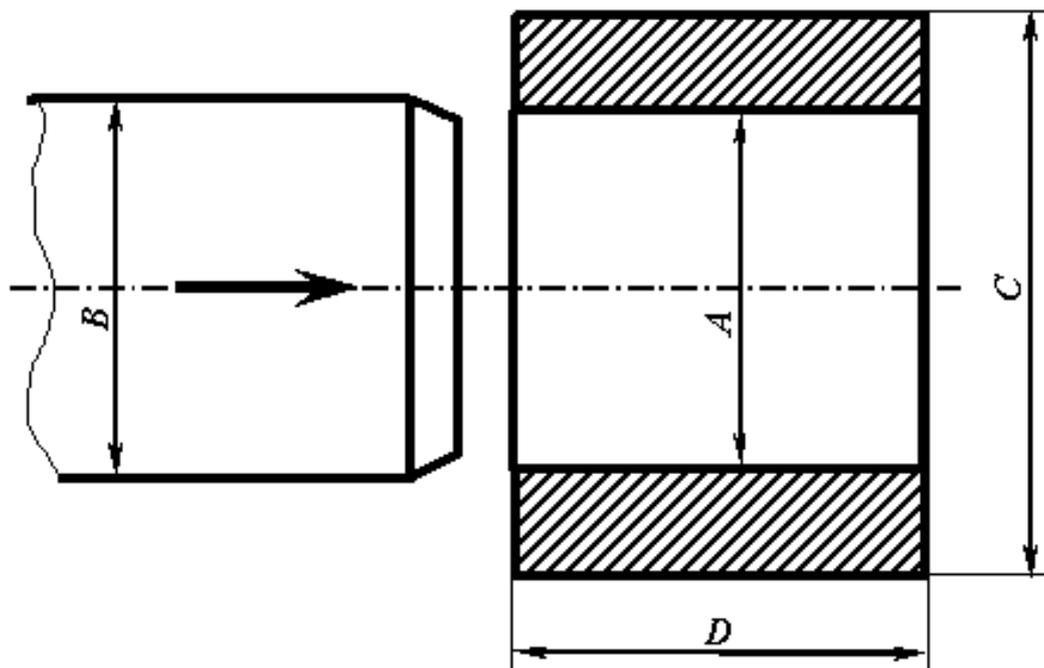


Рисунок 1.15 - Расчетная схема прессового соединения

**Построение модели.** Построим модель вала из объемных элементов. Сначала совместим плоскость  $XOY$  ГСК с плоскостью экрана, нажав соответствующую кнопку на панели «*Задание положения системы координат модели и параметров рисования*», которое можно вызвать командой меню «*Ред. Граф.*»  $\hookrightarrow$  «*Задать начальное положение системы коорд.*» (кнопка  на панели инструментов).

Далее подаем команду «*Ред. Граф.*»  $\hookrightarrow$  «*ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть*» (ускоритель «*Insert*» или кнопка  на панели инструментов). В появившемся окне «*Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов*» вводим запись «*1.0. Объемные элементы + 1.03. Труба из объемных элементов*».

Теперь в появившейся панели «*Уточните размеры*» необходимо ввести геометрические характеристики вала. Вводим в ней следующие величины: наружный диаметр вала  $D=100,5$ ; внутренний диаметр вала  $d=0$ ; количество элементов в радиальном направлении «*разбиение  $D-d$* » - 6; длина вала  $L=120$ , количество элементов по длине вала «*разбиение  $L$* » - 10; «*разбиение по окружности*» - 36; углы раствора вала «*Углы сектора:  $F1=0, F2=360$* ». В появившейся панели «*Положение начала координат размещаемой подобласти*», уточняем координаты центра вала, введя значения всех координат равными нулю.

Результат построения модели вала показан на рисунке 1.16.

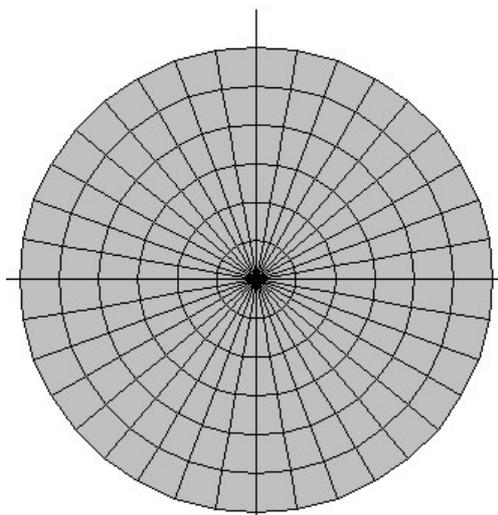


Рисунок 1.16 - Модель вала

Теперь введем в модель контактные поверхности, которые должны находиться на радиальной поверхности вала. Для этого пометим узлы этой поверхности, нарисовав на экране окружности (команда **«Рисовать»** ↪ **«...окружность»**, ускоритель клавиша **c** или кнопка  на панели инструментов) так, как это показано на рисунке 1.17а и подав команду **«Выделить»** ↪ **«...все узлы внутри контура»** (ускоритель клавиша **v** или кнопка  на панели инструментов). Далее подается команда **«Ред. Граф.»** ↪ **«ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть»** (ускоритель клавиша **Insert** или кнопка  на панели инструментов) и в появившейся диалоговой панели **«Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов»** вводится запись **«2.0. Элементы поверхности»** + **«2.01. Элемент поверхности 4 узла»**. В появившемся окне с кнопками ввода различных типов поверхностей **«Укажите тип и параметры элемента поверхности»** нажимаем кнопку **«Контактная поверхн.»** и вводим в следующем окне **«Уточните значение параметра»** в опции **«Контакт.поверхность, толщина t»** соответствующую толщину – 5 мм.

В следующем окне **«Ввод слоя элементов»** пользователю выводится сообщение о режиме ввода элементов - нажимаем кнопку **«Ввести»**. В результате на гранях с помеченными узлами появятся контактные поверхности, сетка элементов которых совпадает с сеткой объемных элементов.

Введенные контактные поверхности позволяют имитировать контакт только по собственным плоскостям. Для полной имитации контакта в модель необходимо ввести осевые узлы контактных поверхностей, положение которых определяет радиус кривизны контактной поверхности. Ввод этих узлов осуществляется после пометки узлов контактных поверхностей подачей команды **«Ред. Граф.»** ↪ **«ПОМЕЧЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, операции»** ↪ **«Выделение осевых узлов контактных поверхностей»**. При этом, в нашем случае, модель должна быть расположена так, чтобы плоскость **ХОУ** ГСК совпадала с плоскостью экрана. Модель вала с выделенными осевыми узлами контактных поверхностей показана на рисунке 1.17б.

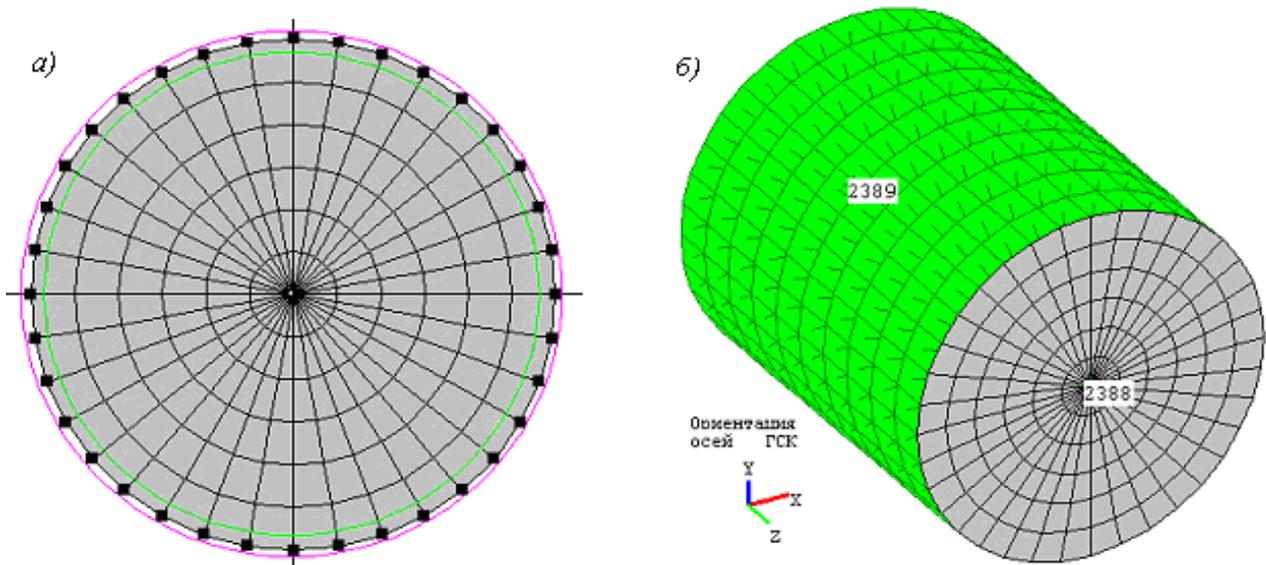


Рисунок 1.17 - Ввод контактных поверхностей: а – выделение узлов на поверхности вала; б – модель с выделенными осевыми узлами введенных контактных поверхностей

Теперь построим модель втулки. При построении плоскость  $XOY$  ГСК должна совпадать с плоскостью экрана. Подаем команду «Ред. Граф.» ↪ «ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть» (ускоритель «Insert» или кнопка  на панели инструментов). В появившемся окне «Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов» вводим запись «1.0. Объемные элементы + 1.03. Труба из объемных элементов». В появившейся панели «Уточните размеры» необходимо ввести геометрические характеристики втулки. Вводим в ней следующие величины: наружный диаметр втулки  $D=140$ ; внутренний диаметр втулки  $d=100$ ; количество элементов в радиальном направлении втулки «разбиение  $D-d$ » - 3; длина втулки  $L=100$ , количество элементов по длине трубы «разбиение  $L$ » - 10; «разбиение по окружности» - 36; углы раствора втулки «Углы сектора:  $F1=0$ ,  $F2=360$ ». Далее, в появившейся панели «Положение начала координат размещаемой подобласти», уточняем координаты положения вводимой втулки относительно центра ГСК, введя следующие значения координат «В ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ»: « $x0=0$ ;  $y0=0$ ;  $z0=10$ ». Результат построения модели втулки показан на рисунке 1.18.

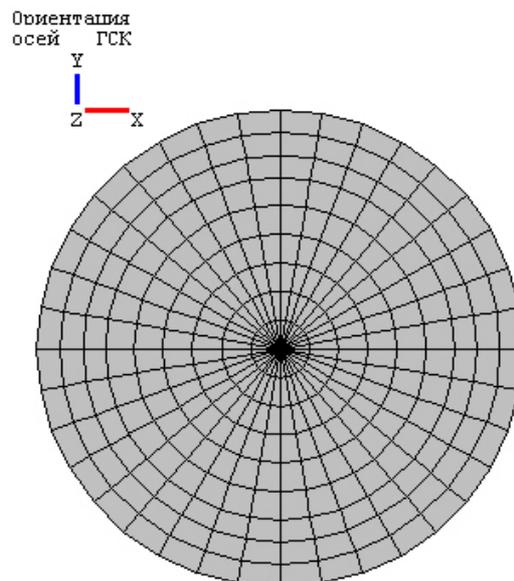


Рисунок 1.18 - Модель с введенной втулкой из объемных элементов

Теперь введем в модель контактные точки, которые должны находится на внутренней радиальной поверхности втулки. Для дальнейших построений необходимо, чтобы были видимыми только узлы втулки. Это можно обеспечить последовательным выполнением двух команд. Сначала подаем команду **«Выделить»**  $\hookrightarrow$  **«...узлы КЭ указанной записи»** (ускоритель – совместное нажатие клавиш **Alt+v**) и в появившейся панели **«Укажите требуемую запись»**, содержащей набор данных КЭ модели, выбираем запись с данными об объемных КЭ втулки. После нажатия кнопки **«Выполнить»** узлы элементов втулки выделяются – рисунок 1.19а. Далее подаем команду **«Выделить»**  $\hookrightarrow$  **«...только ПОМЕЧЕННЫЕ»**, в результате выполнения которой видимыми останутся только узлы и КЭ втулки.

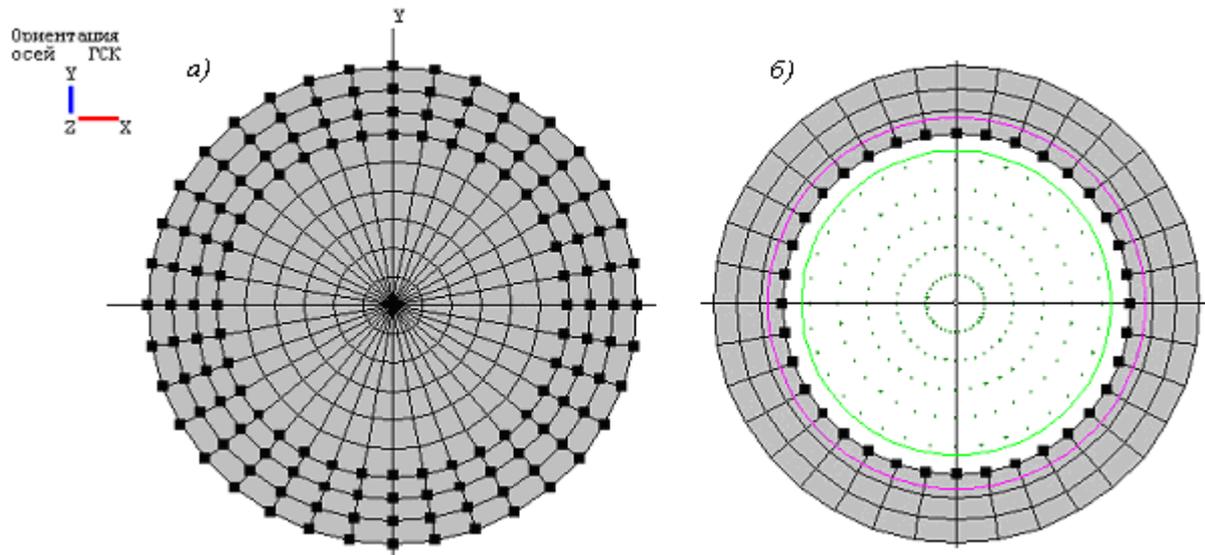


Рисунок 1.19 - Ввод контактных точек: а – выделение узлов втулки; б – выделение узлов на внутренней поверхности втулки

Теперь выделим узлы внутренней радиальной поверхности втулки. Для этого нарисуем окружности (команда **«Рисовать»**  $\hookrightarrow$  **«...окружность»**, ускоритель клавиша **c** или кнопка  на панели инструментов) так, как это показано на рисунке 1.19б и подадим команду **«Выделить»**  $\hookrightarrow$  **«...все узлы внутри контура»** (ускоритель клавиша **v** или кнопка  на панели инструментов). Далее подается команда **«Ред. Граф.»**  $\hookrightarrow$  **«ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»**  $\hookrightarrow$  **«Задать условия»** (ускоритель – клавиша **и**). В появившейся панели **«Укажите тип условия для помеченных узлов»** в области **«КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ»** последовательно указываем мышью на **«Тип условия»** - **«К – контактные точки»**.

Для получения корректных результатов расчета, необходимо повернуть модель вала относительно его продольной оси так, чтобы проекции контактных точек на контактные поверхности лежали посередине этих поверхностей. В нашем случае это поворот на пять градусов.

Сначала выделим узлы вала с помощью команды **«Выделить»**  $\hookrightarrow$  **«...узлы КЭ указанной записи»** (ускоритель – совместное нажатие клавиш **Alt+v**). В появившейся панели **«Укажите требуемую запись»** выбираем запись с данными об объемных КЭ вала и нажимаем кнопку **«Выполнить»**. Результат действий показан на рисунке 1.20а.

Далее выполняем поворот помеченных узлов вала на  $5^\circ$ . Для этого в меню **«Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ»** (ускоритель – клавиша **x** или кнопка  на панели инструментов) в области **«Координаты ТОЧКИ»** устанавливаем нулевые значения координат, а в области **«Коррекция положения**

узлов по ТОЧКЕ» вводим угол  $F = 5^\circ$  и нажимаем кнопку «Повернуть вокруг ТОЧКИ на угол  $F$ ». Результат этих действий показан на рисунке 1.20б.

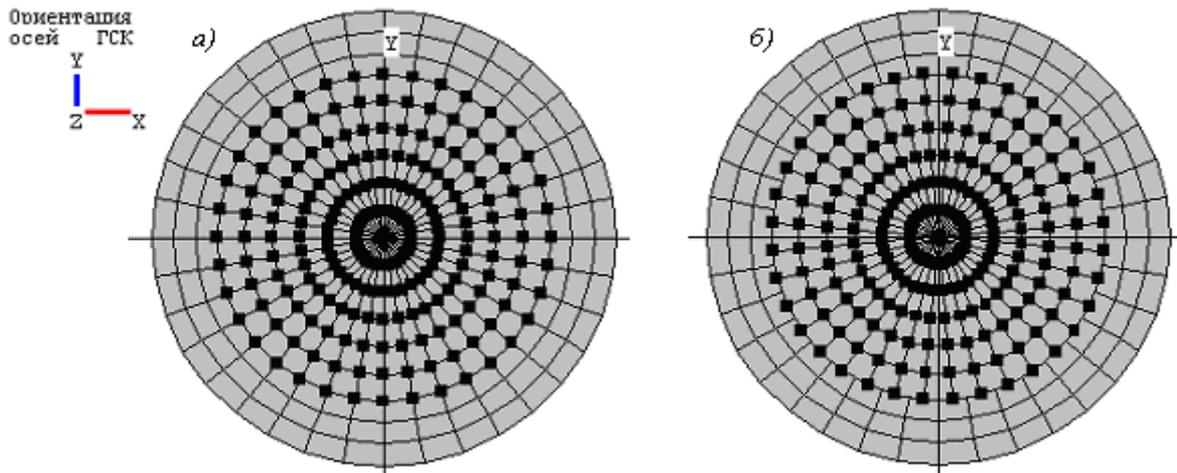


Рисунок 1.20 - Поворот модели втулки на  $5^\circ$ : а – выделение узлов втулки; б – модель после выполнения поворота

Работа с элементами закончена. Результаты построений показаны на рисунке 1.21.

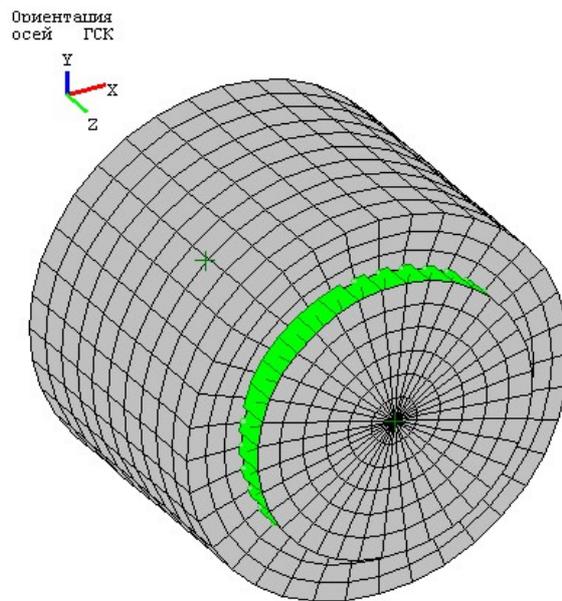


Рисунок 1.21 - Результат ввода элементов

**Ввод кинематических и силовых граничных условий.** Необходимо закрепить торцы вала и втулки от перемещений в направлении оси  $OZ$  ГСК. Так же необходимо закрепить узлы втулки находящиеся в плоскостях  $YOZ$  и  $XOZ$  от перемещений в направлении оси  $OX$  и  $OY$ , соответственно.

Подадим команду «Выделить»  $\hookrightarrow$  «ПОМЕТИТЬ узлы поверхности в контуре» (ускоритель клавиша  $s$  или кнопка  на панели инструментов) – рисунок 1.22а. Затем подадим команду «Ред. Граф.»  $\hookrightarrow$  «ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»  $\hookrightarrow$  «Задать условия» (ускоритель – клавиша  $u$ ). В появившейся панели «Укажите тип условия для помеченных узлов» в области «КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ» последовательно указываем мышью на «Тип условия» - «Q - ЗАДАННЫЕ перемещения», «Направление для заданных и начальных...» - «Qz – перемещения вдоль оси OZ» и нажимаем кнопку «Ввести».

Отменяем пометку узлов командой «**Выделить**» → «**ОТМЕНИТЬ пометку всех узлов**» (ускоритель клавиша **n** или кнопка  на панели инструментов).

При закреплении узлов втулки, находящихся в плоскости **YOZ** (предварительно их необходимо пометить – рисунок 1.22б) в направлении оси **OX** на панели «**Укажите тип условия для помеченных узлов**» в области «**КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ**» последовательно указываем мышью на «**Тип условия**» - «**Q - ЗАДАННЫЕ перемещения**», «**Направление для заданных и начальных...**» - «**Qx – перемещения вдоль оси OX**» и нажимаем кнопку «**Ввести**».

Аналогичные операции выполняются с узлами втулки, лежащими в плоскости **XOZ**, при закреплении их в направлении оси **OY**.

Последовательность и результат ввода в модель кинематических граничных условий показан на рисунке 1.22.

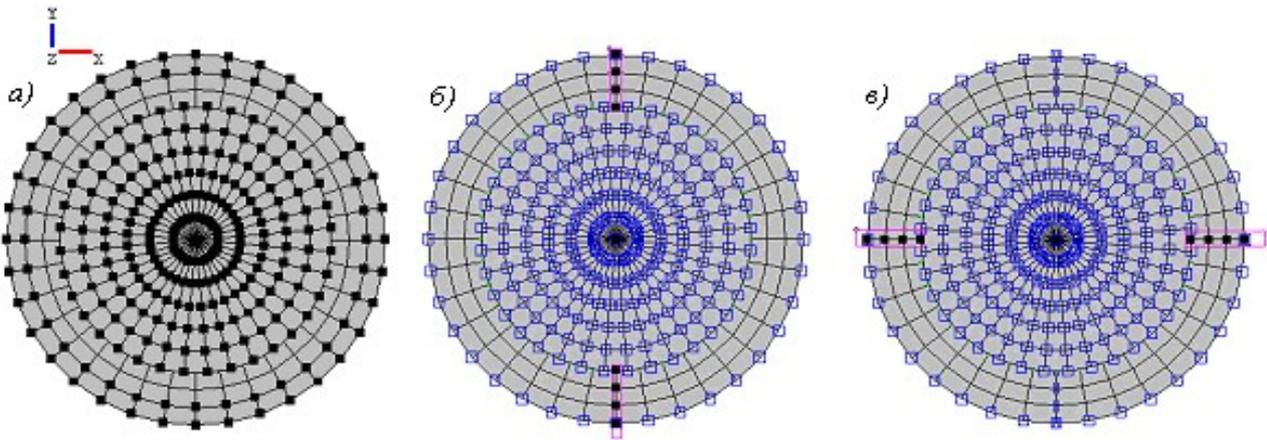


Рисунок 1.22 - Закрепление модели: а – выделение узлов закрепляемых по оси OZ ГСК; б – выделение узлов закрепляемых по оси OX ГСК; в - выделение узлов закрепляемых по оси OY ГСК

**Ввод свойств материала.** Так как втулка и вал изготовлены из стали, ввод свойств этого материала в набор данных необязателен. Это возможно в связи с тем, что «по умолчанию» при отсутствии в наборе данных записи о свойствах материала программа принимает для расчетов свойства стали.

В результате ввода в набор данных кинематических и силовых граничных условий модель прессового соединения при выводе изображения на экран будет выглядеть, так как это показано на рисунке 1.23. Эта модель полностью готова к расчету перемещений при статическом нагружении.

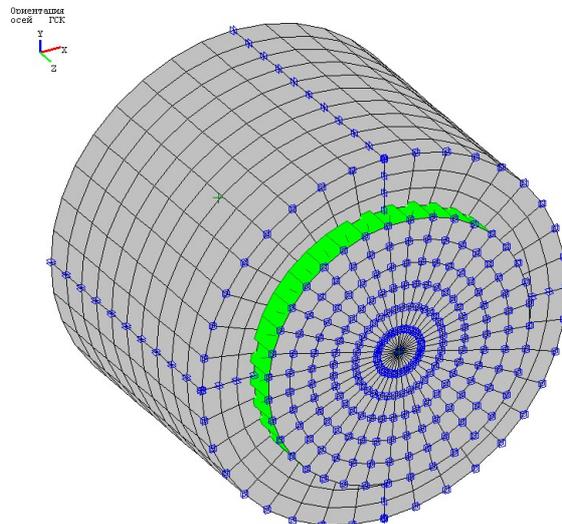


Рисунок 1.23 - Модель прессового соединения готовая к расчету

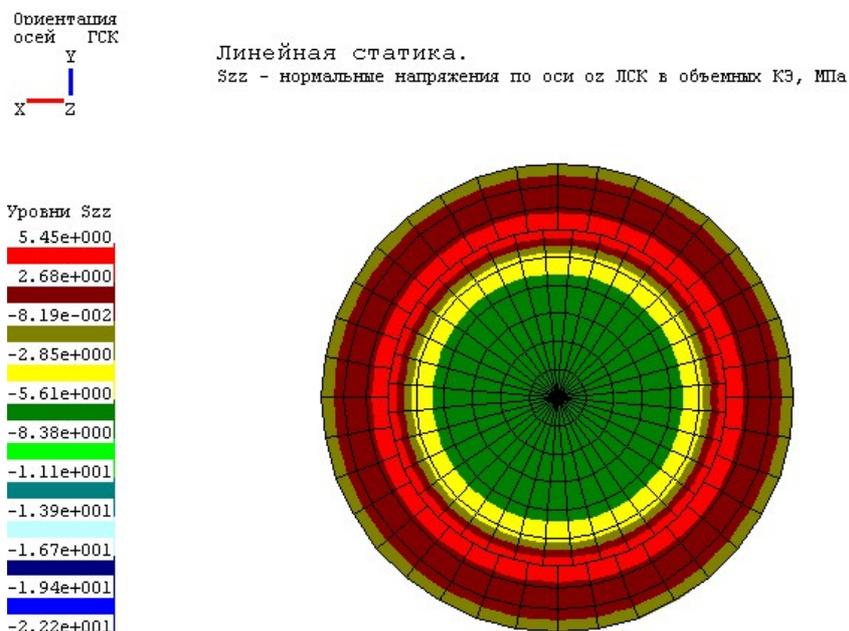
**Вычисления.** Для выполнения вычислений необходимо подать команду «**Вычислить**». В появившемся после подачи этой команды меню необходимо выделить запись «**Перемещения при СТАТИЧЕСКОМ нагружении**» и нажать на кнопку «**Вычислить**».

**Просмотр результатов вычислений.** После завершения вычислений можно приступить к просмотру результатов расчета.

Для этого сначала подается команда «**Граф. просм.**» ↪ «**Выбрать перемещения**», после подачи которой на экран выводится диалоговая панель «**Укажите тип и атрибуты отображения перемещений:**». В области «**Тип перемещения**» этой панели устанавливаем переключатель на опцию («**- перемещения от статически приложенной нагрузки**»). В области «**Способ отображения**» устанавливаем переключатель на опцию «**- смещением точек**». Затем в области «**Масштабный коэффициент**» устанавливаем переключатель на опцию «**- задается пользователем и равен**» и вводим  $1$ .

Теперь подаем команду «**Граф. просм.**» ↪ «**Вывести НАПРЯЖЕНИЯ, УСИЛИЯ (муар, энюры)**» (ускоритель – клавиша  $m$ ), которая переводит программу в режим графического отображения компонент напряжений. После подачи этой команды, на экран выводится панель «**Укажите требуемый параметр**» с перечнем наименований параметров, которые возможно вывести. Вводим «**ОБЪЕМНЫЕ элементы + Напряжения +  $S_{zz}$  – нормальные напряжения по оси  $oz$  ЛСК КЭ**».

На рисунке 1.24 показано графическое отображение распределения нормальных напряжений по оси  $oz$  ЛСК в элементах прессового соединения.

Рисунок 1.24. Графическое отображение распределения нормальных напряжений по оси  $oz$  ЛСК в элементах прессового соединения

Кроме вывода компонент напряжений, имеется возможность графического отображения компонент перемещений в узлах КЭМ. Для отображения перемещений модели подается команда «**Граф. просм.**» ↪ «**Показать перемещения (отм)**» (ускоритель – клавиша  $q$ ).

Построенная модель находится в файле **Прессовое\_Соединение.ZNA**.

## 1.4. Укладка слоев бетона

**Формулировка задачи.** Определить напряженно-деформированное состояние железобетонной двухопорной балки в процессе ее изготовления укладкой трех слоев бетона.

**Исходные данные.** Материал конструкции: тяжелый бетон Б20; отношение площади сечения арматуры к общей площади сечения у каждого из трех поперечных сечений балки – 0,2. Геометрические характеристики балки: длина -  $a=10$  м; толщина каждого из трех слоев бетона -  $b=0,5$  м; ширина балки  $c=2$  м. Расчетная схема железобетонной балки представлена на рисунке 1.25.

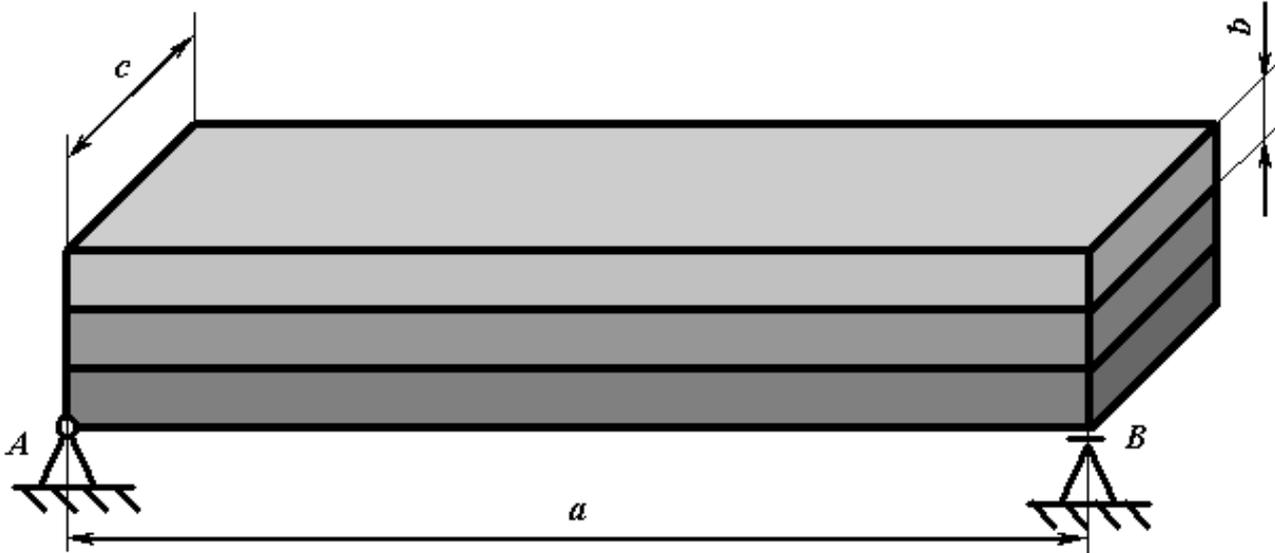


Рисунок 1.25 - Расчетная схема железобетонной балки

**Построение модели.** Построим модель балки из объемных элементов. Сначала совместим плоскость  $XOY$  ГСК с плоскостью экрана, нажав соответствующую кнопку на панели «**Задание положения системы координат модели и параметров рисования**», которое можно вызвать командой меню «**Ред. Граф.**» ↪ «**Задать начальное положение системы коорд.**» (кнопка  на панели инструментов).

Далее подаем команду «**Ред. Граф.**» ↪ «**ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть**» (ускоритель «**Insert**» или кнопка  на панели инструментов). В появившемся окне «**Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов**» вводим запись «**1.0. Объемные элементы + 1.02. Параллелепипед из объемных элементов**». Теперь в появившейся панели «**Уточните размеры**» необходимо ввести геометрические характеристики балки. Вводим в ней следующие величины: длина балки  $V=10000$ , количество элементов по длине балки - 20; высота балки  $H=1500$ , количество элементов по высоте балки – 6 (по два элемента на каждый слой бетона); ширина балки  $L=2000$ , количество элементов по ширине балки – 4. Далее, в появившейся панели «**Положение начала координат размещаемой подобласти**», уточняем координаты положения вводимого параллелепипеда относительно центра ГСК, введя значения всех координат равными нулю. Построение расчетной модели балки завершено. Результат построения показан на рисунке 1.26.

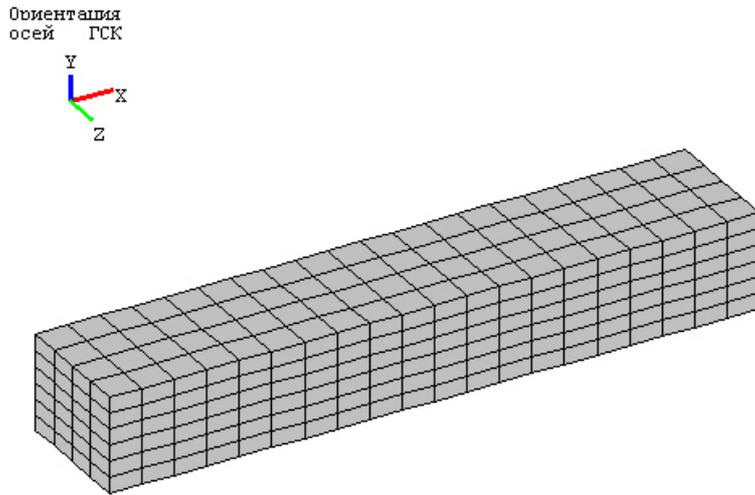


Рисунок 1.26 - Ввод параллелепипеда из объемных элементов

Теперь необходимо выделить каждый из слоев бетона в отдельную типовую запись. Эта операция выполняется с помощью графического и текстового редакторов. Начнем с нижнего слоя - помечаем соответствующие узлы модели, предварительно заключив их в контур прямоугольника и подаем команду «*Рисовать*» ↪ «...*прямоугольник*» (ускоритель клавиша *r* или кнопка  на панели инструментов). Затем подаем команду «*Выделить*» ↪ «...*все узлы внутри контура*» (ускоритель клавиша *v* или кнопка  на панели инструментов) – рисунок 1.27а. Далее, подаем команду «*Ред. Граф.*» ↪ «*ПОМЕЧЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, операции*» ↪ «*Объединение (выделение) в отдельную запись*» ↪ «...*объемных КЭ (8 узлов)*». После выполнения этой команды на экране появится панель с предупреждением о том, что помеченные элементы выделены в отдельную запись, которая помещена в буфер обмена текстового редактора. При нажатии кнопки «*ОК*» происходит автоматический вызов панели «*Редактирование набора данных в текстовом режиме*», где в буфере обмена будет находиться запись с данными об выделенных в нее объемных элементах.

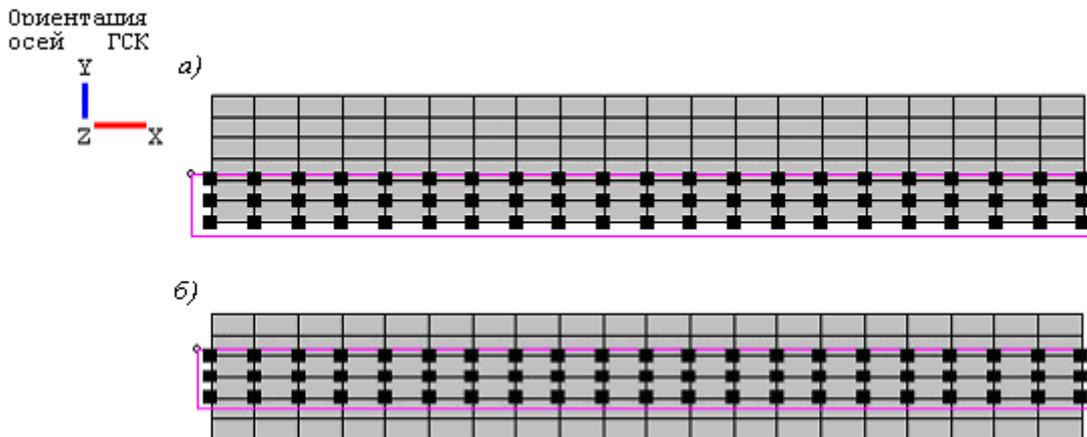


Рисунок 1.27 - Выделение слоев объемных элементов: а – выделение первого слоя элементов; б – выделение второго слоя элементов

Далее необходимо поместить эту запись в набор данных перед имеющейся там записью с данными об остальных объемных элементах. Для этого выделяем левой кнопкой мыши запись об объемных элементах, находящуюся в наборе данных и нажимаем кнопку «*Вставить из буфера перед указ.*». В результате этого в наборе данных появится новая запись, которой, для удобства, присвоим имя «*Слой\_1*».

Такие же действия проделаем со вторым слоем объемных элементов, поместив запись с данными о них после записи с именем «Слой\_1». Присвоим этой новой записи имя «Слой\_2».

Оставшейся последней записи с данными об объемных элементах присваиваем имя «Слой\_3».

**Ввод кинематических и силовых граничных условий.** Согласно расчетной схеме, необходимо шарнирно закрепить узлы левой опоры балки, а узлы правой опоры закрепить от вертикальных перемещений. Для этого выделяем прямоугольником (команда «Рисовать»  $\hookrightarrow$  «...прямоугольник» (ускоритель клавиша *r* или кнопка  на панели инструментов)) соответствующие узлы модели балки, и подаем команду «Выделить»  $\hookrightarrow$  «...все узлы внутри контура» (ускоритель клавиша *v* или кнопка  на панели инструментов). Затем подадим команду «Ред. Граф.»  $\hookrightarrow$  «ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»  $\hookrightarrow$  «Задать условия» (ускоритель – клавиша *u*). При закреплении левой опоры в появившейся панели «Укажите тип условия для помеченных узлов» в области «КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ» указываем мышью на «Тип условия» «S – ШАРНИРНОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ» и нажимаем кнопку «Ввести».

При закреплении правой опоры на панели «Укажите тип условия для помеченных узлов» в области «КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ» последовательно указываем мышью на «Тип условия» - «Q - ЗАДАННЫЕ перемещения», «Направление для заданных и начальных...» - «Qy – перемещения вдоль оси OY».

Последовательность и результат ввода в модель кинематических граничных условий показан на рисунке 1.28.

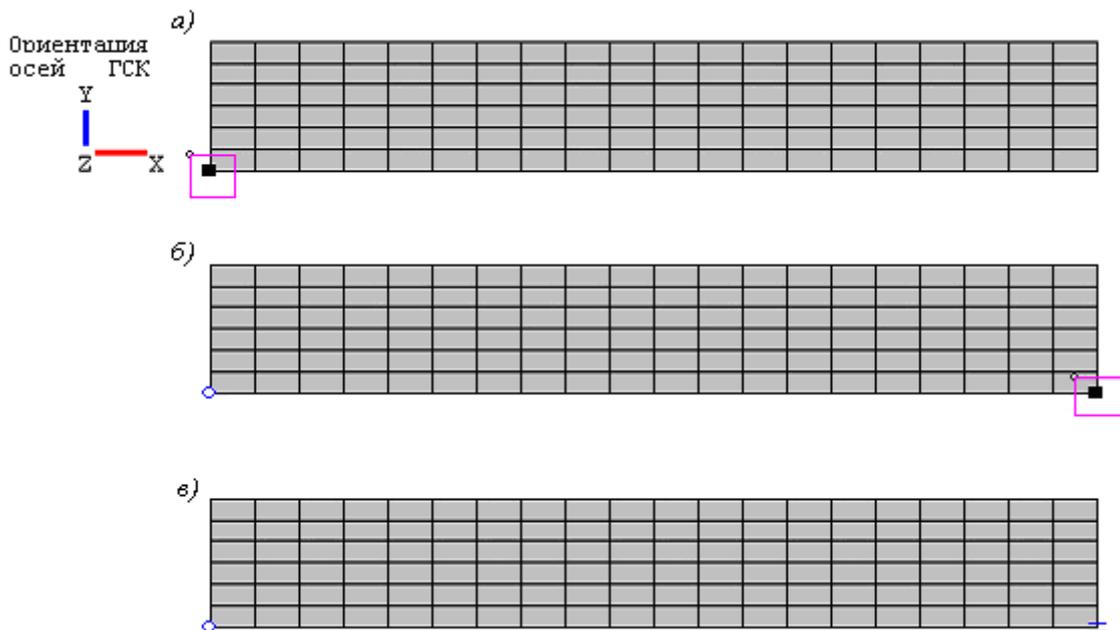


Рисунок 1.28 - Закрепление модели: а – выделение шарнирно закрепляемых узлов; б - отображение закрепления левой опоры и выделение узлов закрепляемых в направлении оси Y ГСК; в – модель балки с введенными закреплениями

**Ввод свойств материала.** Для ввода свойств материала балки используется текстовый редактор. Подадим команду «Ред. текст», выделим запись с данными об объемных элементах и нажмем на кнопку «Вставить запись перед указанной». В появившейся панели «Укажите тип записи» выделяем и вводим запись «свойства материала  $R_0, E, \nu, \dots$ ». В следующей панели «Укажите тип материала» нажимаем на

кнопку **«Изотропный упругий, нелинейно-упругий...»** и далее на панели **«Свойства материала»** выбираем в имеющейся базе данных тяжелый бетон марки Б20 и нажимаем кнопку **«Ввести»**.

Теперь необходимо ввести данные об армировании железобетонной конструкции. Эти данные так же вводятся в текстовом редакторе, и запись с ними должна находиться перед записями с данными об объемных элементах. Итак, выделяем запись с именем **«Слой\_1»** содержащую данные об объемных элементах и нажмем на кнопку **«Вставить запись перед указанной»**. В появившейся панели **«Укажите тип записи»** выделяем и вводим запись **«коэффициенты армирования материала»**. В следующей появившейся панели **«Коэффициенты армирования материала»** вводим эти коэффициенты в соответствии с исходными данными: **«Ax=0,2»**, **«Ay=0,2»** и **«Az=0,2»**.

**Ввод условий существования элементов.** Ввод условий существования элементов осуществляется в текстовом редакторе. Запись с данными об условии существования элементов содержит информацию о том, какие элементы, и в каких пределах времени существуют в структуре модели и должна находиться перед записью с данными об этих элементах.

Условно примем, что каждый из слоев бетона укладывается за одну условную единицу времени.

Первый слой объемных элементов не нуждается в обозначении условий его существования, так как эти условия являются начальными или безусловными.

Для второго слоя элементов эти условия необходимо ввести. Как уже было отмечено, для ввода условий существования используется текстовый редактор, который можно вызвать, подав команду **«Ред. текст»**. На панели **«Редактирование набора данных в текстовом режиме»** в наборе данных выделяем запись с данными об объемных элементах и именем **«Слой\_2»** и нажмем на кнопку **«Вставить запись перед указанной»**. В появившейся панели **«Укажите тип записи»** выделяем и вводим запись **«условия существования»**. В следующей панели **«Условия существования части модели»**, в разделе **«Область действия»** устанавливаем переключатель на опцию **«- для всех следующих записей»**, а в разделе **«Пределы существования по времени, с»** в графу **«Начало»** вписываем время начала существования второго слоя «бетона» - **«1»** и нажимаем кнопку **«Ввести»**.

Действия при вводе данных об условии существования третьего слоя элементов аналогичны действиям при вводе данных об условии существования второго слоя, только в графе **«Начало»** вписываем время начала существования третьего слоя «бетона» - **«2»**.

Далее осуществим ввод данных о силе тяжести. Эти данные вводятся с помощью текстового редактора и находятся в типовой записи **«Нагрузки распределенные по массе (Ax, Ay, Az)»**. Данная запись может занимать любое расположение в наборе данных, поэтому войдя в текстовый редактор сразу нажимаем кнопку **«Ввести запись в конец набора»** и в появившейся панели **«Укажите тип записи»** выделяем и вводим запись **«Нагрузки распределенные по массе (Ax, Ay, Az)»**. В следующей панели **«Данные о распределенных нагрузках»** вводим **«Ay= -9,81»**.

Так же с помощью текстового редактора необходимо ввести в набор данных запись **«АТРИБУТЫ (число итераций, частот, время и шаг...)»**. На панели появившейся при вводе этой записи вводим **«Временной интервал, с»** - 2 с и **«шаг интегрирования, с»** - 0,5 с. Введенная запись может занимать любое положение в наборе данных.

Для удобства просмотра модели в графическом режиме **«СВЕТ»** (ускоритель – совместное нажатие клавиш **Shift+f**) можно каждому из выделенных в отдельную запись слоев элементов присвоить свой цвет. Запись с соответствующими данными о цвете необходимо поместить перед соответствующей записью с данными об объемных элементах.

Типовые записи и последовательность их расположения в текстовом редакторе показана в таблице 1.2.

«Выход» из текстового редактора выполняется нажатием кнопки «*Закончить работу*» на панели «*Редактирование набора данных в текстовом режиме*».

Вывод изображения модели на экран осуществляется по команде «*Отобразить*» ↵ «*Вывести ИЗОБРАЖЕНИЕ*» (ускоритель клавиша *g* или кнопка  на панели инструментов).

Результат построения и ввода в модель кинематических граничных и силовых условий показан на рисунке 1.29. Изображение выведено в графическом режиме «*СВЕТ*». Эта модель полностью готова к расчету перемещений при статическом нагружении при изменяющихся во времени нагрузках и параметрах.

Таблица 1.2 - Структура рабочего набора данных

№ п/п	имя записи	тип данных, хранящихся в записи
1	_____	координаты узловых точек
2	Бетон_V20_тяжел	свойства материала ( $R_0, E, \rho, \dots$ )
3	Жёлтый_____	ЦВЕТ при отображении с освещения
4	Слой_1_____	объёмные КЭ (8 узлов)
5	_____	условия существования
6	Зелёный_____	ЦВЕТ при отображении с освещения
7	Слой_2_____	объёмные КЭ (8 узлов)
8	_____	условия существования
9	Синий_____	ЦВЕТ при отображении с освещения
10	Слой_3_____	объёмные КЭ (8 узлов)
11	_____	заданные перемещения и закрепления Q
12	_____	заданные перемещения и закрепления Q
13	_____	нагрузки распределённые по массе ( $A_x, A_y, A_z$ )
14	_____	АТРИБУТЫ (число итераций, частот, время и шаг...)

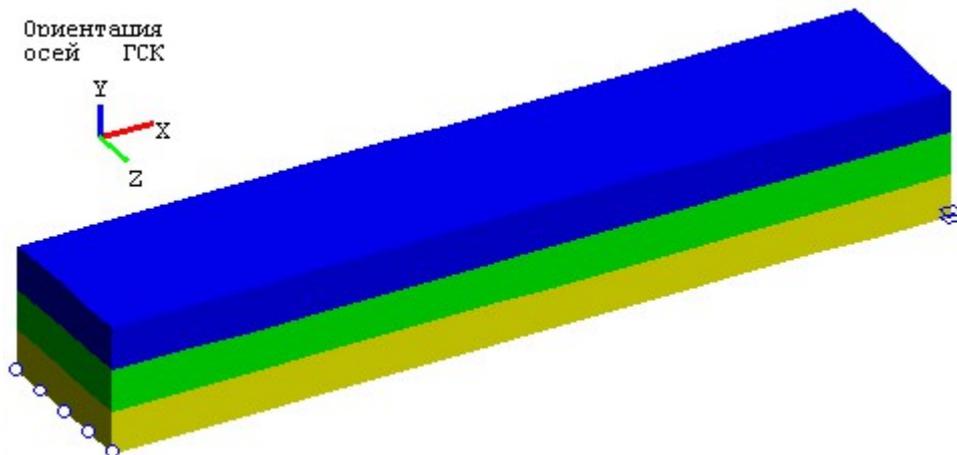


Рисунок 1.29 - Модель железобетонной балки готовая к расчету

**Вычисления.** Для выполнения вычислений необходимо подать команду «*Вычислить*». В появившемся после подачи этой команды меню необходимо выделить запись «*...при изменяющихся во времени нагрузках и параметрах*» и нажать на кнопку «*Вычислить*».

**Просмотр результатов вычислений.** После завершения вычислений можно приступить к просмотру результатов расчета.

Изменение напряжений железобетонной конструкции можно просмотреть в режиме анимации, в виде графиков, а также в табличном виде.

Для просмотра изменения напряжений во времени необходимо подать команду «Граф. Просм.» → «АНИМАЦИЯ» → «Анимация напряжений изменяющихся во времени» после подачи которой на экран выводится диалоговая панель «Укажите тип и атрибуты отображения перемещений:». В области «Тип перемещения» этой панели устанавливаем переключатель на опцию («- перемещения зависящие от времени или нелинейные»). В области «Способ отображения» устанавливаем переключатель на опцию «- смещением точек». Затем в области «Масштабный коэффициент» устанавливаем переключатель на опцию «- задается пользователем и равен» и вводим 1000. В следующем меню «Укажите требуемый параметр:» вводим (к примеру) «ОБЪЕМНЫЕ элементы + Напряжения + SXX – нормальные напряжения по оси OX ГСК». В меню «Укажите параметры анимации» вводим параметры, смысл которых ясен из приведенных в этом меню пояснений. После нажатия кнопки «Ввести» появится меню «Способ масштабирования выводимого параметра», в котором можно ввести границы значений выводимых параметров, а так же режим вывода максимального значения параметра во времени.

На рисунке 1.30 показано графическое отображение распределения нормальных напряжений по оси OX ГСК в элементах железобетонной конструкции в один из моментов времени. Модель показана в деформированном состоянии.



Рисунок 1.30 - Графическое отображение распределения нормальных напряжений по оси OX ГСК в элементах железобетонной конструкции

Построенная модель находится в файле Укладка\_Бетона.ZNA.

## 1.5. Расчет геометрических характеристик и коэффициентов напряжений поперечного сечения стержня

**Формулировка задачи.** Определить геометрические характеристики и коэффициенты напряжений поперечного сечения стержня по его объемной модели.

**Исходные данные:** Поперечное сечение стержня показано на рисунке 1.31 (размеры в миллиметрах).

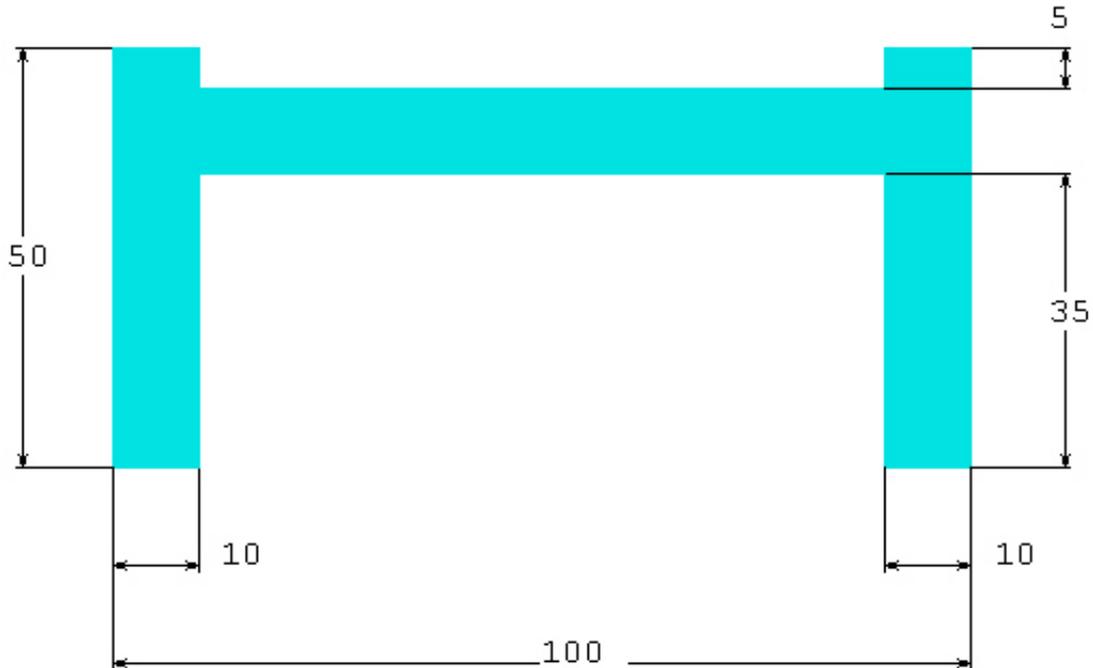


Рисунок 1.31 - Поперечное сечение стержня

**Построение модели.** При построении объемной модели участка стержня для расчета геометрических характеристик и коэффициентов напряжений поперечного сечения стержня необходимо учитывать следующие рекомендации:

- направление оси **OX** глобальной системы координат должно совпадать с направлением оси **ox** локальной системы координат стержня;
- отношение максимального габаритного размера поперечного сечения объемной модели стержня к его длине должно быть примерно 1:5÷1:8;
- при вводе опасных точек сечения желательно, чтобы их нумерация была непрерывна при «обходе» по контуру сечения;
- при построении объемных моделей стержней в виде труб различных сечений, или стержней, имеющих стенки и полки, рекомендуется разбивать эти фрагменты модели по толщине не менее чем на два элемента;
- предполагаемые опасные точки вводятся в сечении, находящемся примерно посередине объемной модели стержня.

Итак, построим объемную модель участка стержня с заданным сечением. Сначала совместим плоскость **YOZ** ГСК с плоскостью экрана, нажав соответствующую кнопку на панели «**Задание положения системы координат модели и параметров рисования**», которое можно вызвать командой меню «**Ред. Граф.**» ↪ «**Задать начальное положение системы коорд.**» (кнопка  на панели инструментов).

Далее подаем команду «**Ред. Граф.**» ↪ «**ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть**» (ускоритель «**Insert**» или кнопка  на панели инструментов). В появившемся окне «**Ввод**

*подобластей, фрагментов и конечных элементов»* вводим запись «1.0. Объемные элементы + 1.02. Параллелепипед из объемных элементов». Теперь в появившейся панели «Уточните размеры» необходимо ввести геометрические характеристики стержня. Учитывая приведенные выше рекомендации, вводим в этой панели следующие величины: ширина балки  $B=100$ , количество элементов по ширине балки - 20; высота балки  $H=50$ , количество элементов по высоте балки - 10; длина балки  $L=600$ , количество элементов по длине балки - 120. Далее, в появившейся панели «Положение начала координат размещаемой подобласти», уточняем координаты положения вводимого параллелепипеда относительно центра ГСК, введя значения всех координат равными нулю. Результат проделанных операций показан на рисунке 1.32.

Теперь выделим узлы модели, удалив которые мы получим требуемое сечение. Для этого выделяем прямоугольником (команда «Рисовать»  $\rightarrow$  «...прямоугольник» (ускоритель клавиша  $r$  или кнопка  на панели инструментов)) соответствующие узлы модели стержня, и подаем команду «Выделить»  $\rightarrow$  «...все узлы внутри контура» (ускоритель клавиша  $v$  или кнопка  на панели инструментов). Затем подаем команду «Ред. Граф.»  $\rightarrow$  «ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»  $\rightarrow$  «Удалить узлы и КЭ» (ускоритель - клавиша **Delete** или кнопка  на панели инструментов). Результат выполнения этих команд показан на рисунке 1.32в.

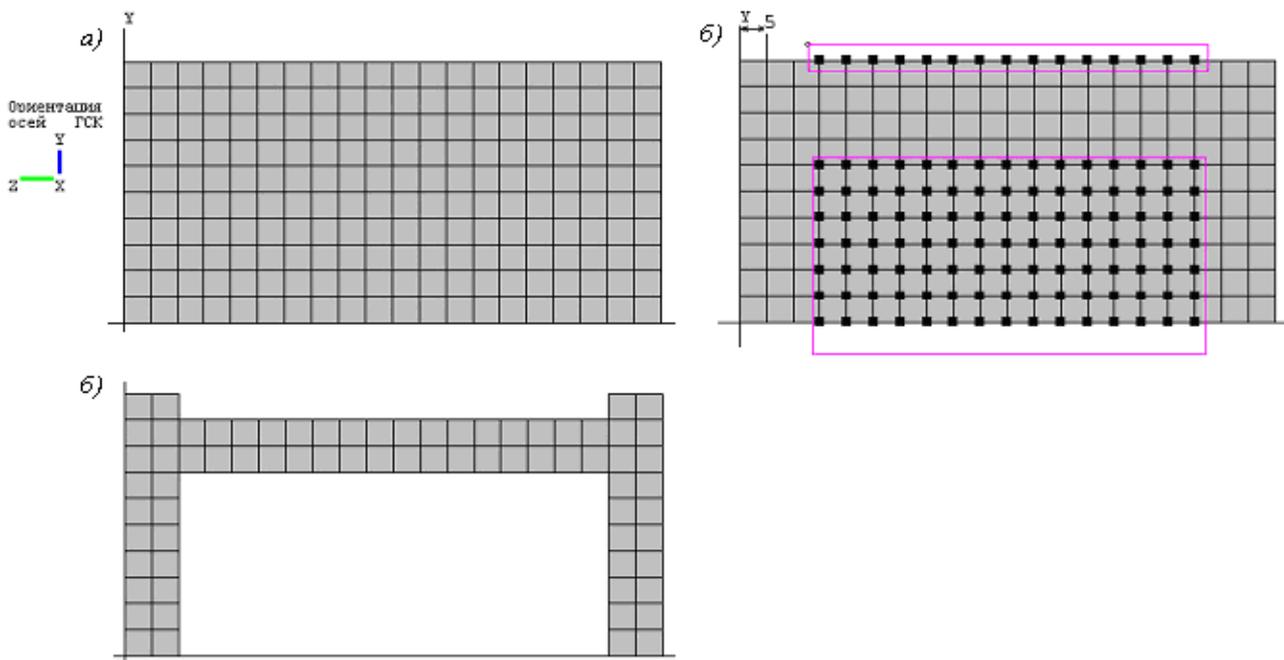


Рисунок 1.32 - Закрепление модели: а – ввод параллелепипеда из объемных элементов; б – выделение удаляемых узлов; в – модель после удаления выделенных узлов

Построение модели стержня из объемных элементов завершено. Результат построения показан на рисунке 1.33.

Теперь введем в построенную модель опасные точки сечения. Опасные точки удобнее вводить в графическом редакторе.

Сначала совместим плоскость  $XOY$  ГСК с плоскостью экрана, нажав соответствующую кнопку на панели «Задание положения системы координат модели и параметров рисования», которое можно вызвать командой меню «Ред. Граф.»  $\rightarrow$  «Задать начальное положение системы коорд.» (кнопка  на панели инструментов).

Ориентация осей ГСК

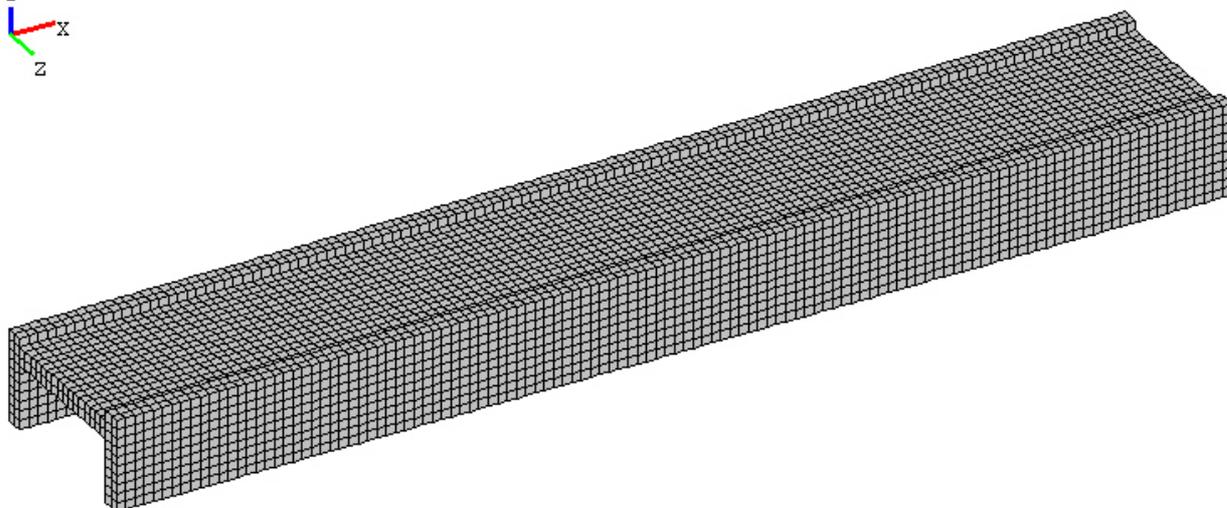


Рисунок 1.33 - Стержень из объемных элементов

Далее оставим видимыми узлы сечения стержня расположенные примерно посередине его длины. Выделим прямоугольником (команда «*Рисовать*» → «...*прямоугольник*» (ускоритель клавиша *r* или кнопка  на панели инструментов)) соответствующие узлы модели стержня, и подадим команду «*Выделить*» → «...*все узлы внутри контура*» (ускоритель клавиша *v* или кнопка  на панели инструментов) – рисунок 1.34. Затем подадим команду «*Выделить*» → «...*только ПОМЕЧЕННЫЕ*» и повернем модель так, чтобы плоскость *YOZ* ГСК совместилась с плоскостью экрана.

Ориентация осей ГСК

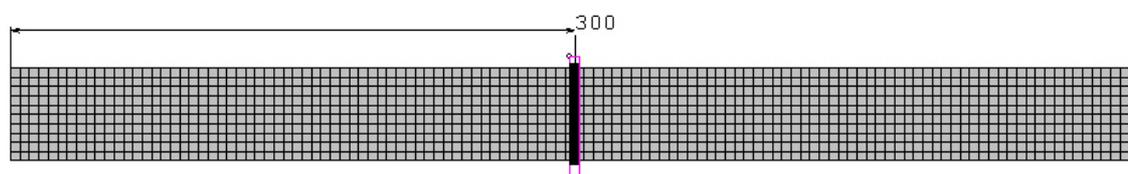


Рисунок 1.34 - Выделение узлов сечения для ввода опасных точек

Приступим непосредственно к вводу опасных точек сечения. Контуром (команда «*Рисовать*» → «...*контур*» (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов) обведем периметр сечения, нажимая левую кнопку мыши в местах нахождения предполагаемых опасных точек сечения – рисунок 1.35а. Далее подаем команду «*Ред. Граф.*» → «*ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть*» (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) и в появившейся диалоговой панели «*Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов*» вводим запись «*3.0. Стержни, связи*» + «*3.01. Задание опасных точек для объемной модели стержня*». В результате сечение с опасными точками будет выглядеть так, как это показано на рисунке 1.35б.

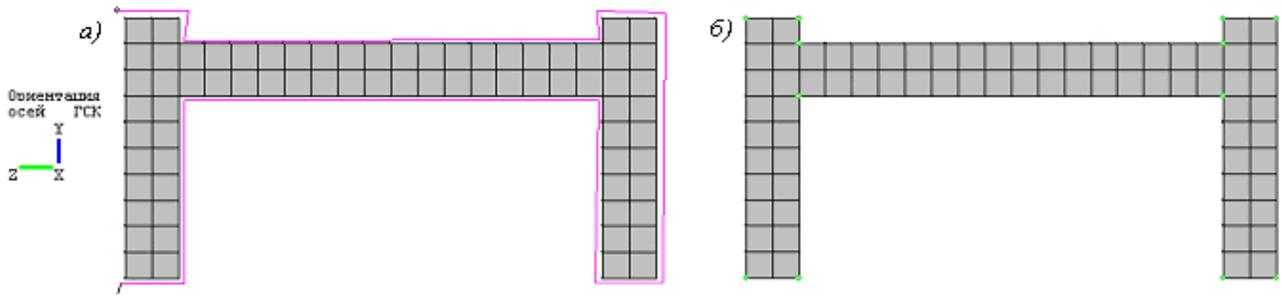


Рисунок 1.35 - Ввод опасных точек: а – обход сечения контуром по местам нахождения предполагаемых опасных точек; б – результат ввода опасных точек

Теперь объемная модель готова к расчету геометрических характеристик и коэффициентов напряжений поперечного сечения стержня – рисунок 1.36.

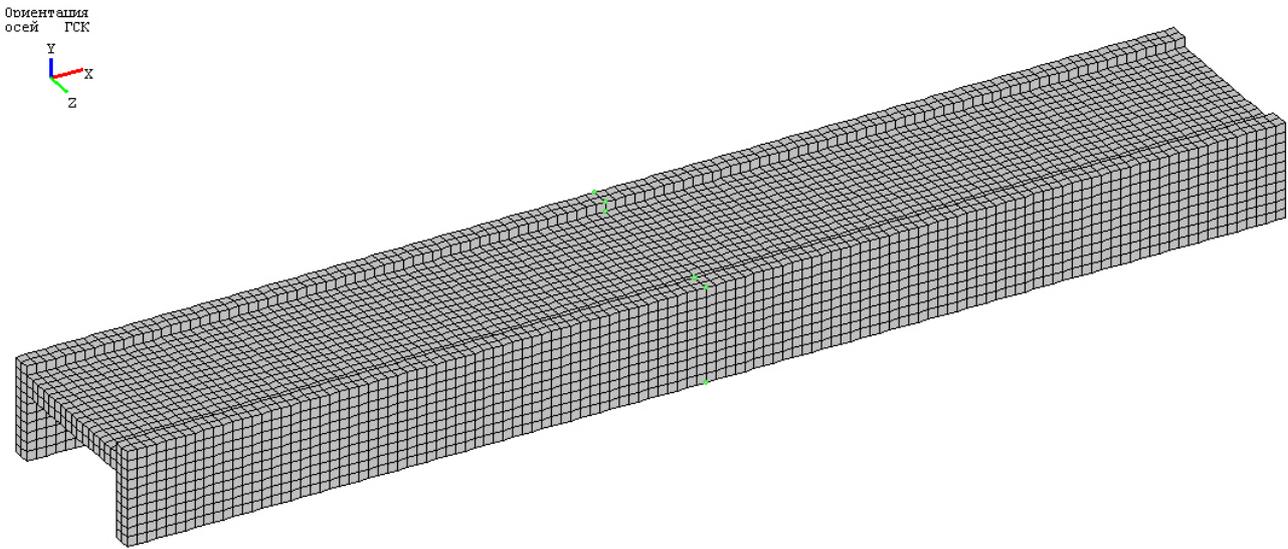


Рисунок 1.36 - Объемная модель участка стержня готовая к расчету

После проведения расчетов, полученные результаты в виде типовой записи о геометрических характеристиках стержней могут быть включены в модель, состоящую из стержневых конечных элементов. Чтобы поместить в эту модель запись с геометрическими характеристиками стержней, рассчитанными по объемной модели необходимо «войти» в текстовый редактор, подав команду **«Ред. текст»**. Далее, необходимо выделить запись с данными о стержневых элементах и нажать на кнопку **«Вставить запись перед указанной»**. В появившейся панели **«Укажите тип записи»** выделяем и вводим запись **«характеристики сечения стержней (F, Jx, Jy,...)»**.

В следующей панели **«Ввод характеристик сечения стержней»** нажимаем кнопку **«Из др. файла»** и в появившейся панели **«Открыть»** указываем путь к файлу, содержащему данные с геометрическими характеристиками стержней, рассчитанными по объемной модели. В следующей появившейся панели **«Укажите требуемую запись»** указываем на запись **«Вычислено по КЭМ»**.

При выводе на экран изображения модели в режиме объемного отображения стержней, объемного отображения сечений стержней и в режиме **«Свет»** можно будет увидеть, что контур отображаемого сечения, является контуром, соединяющим введенные опасные точки сечения в порядке их нумерации – рисунок 1.37.

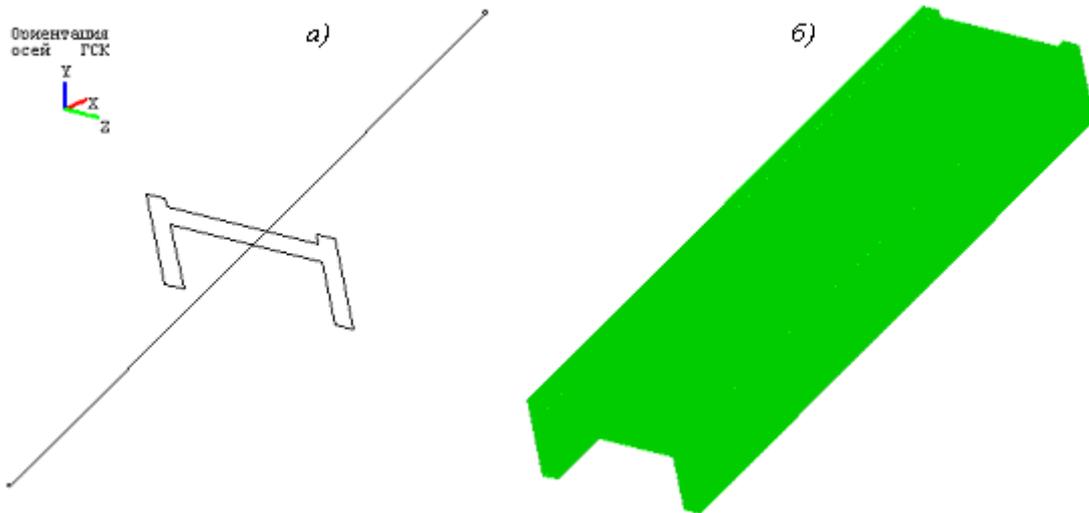


Рисунок 1.37 - Отображение стержня в различных режимах: а – отображение сечения; б – отображение в режиме освещения

**Вычисления.** Для выполнения вычислений необходимо подать команду **«Вычислить»**. В появившемся после подачи этой команды меню необходимо выделить запись **«0. 02 Характеристики СЕЧЕНИЯ СТЕРЖНЯ»** и нажать на кнопку **«Вычислить»**.

**Просмотр результатов вычислений.** После завершения вычислений можно приступить к просмотру результатов расчета. Для этого подаем команду **«Текст. Просм.»** ↵ **«...выборочный просмотр»** после подачи которой на экране появится меню **«Укажите требуемую запись»**. В этом меню выделяем запись с именем **«Вычислено по КЭМ»** и нажимаем на кнопку **«Выполнить»**. В результате этих действий на экране появятся данные с геометрическими характеристиками и коэффициентами напряжений поперечного сечения стержня вычисленные по его объёмной модели.

Построенные модели находится в файлах **Сечение\_Стержня\_1.ZNA** и **Сечение\_Стержня\_2.ZNA**.

## 2. Динамика

### 2.1. Монтаж плиты

**Формулировка задачи.** Определить параметры движения и напряженно-деформированное состояние железобетонной плиты и свай при выполнении операции подъема плиты и установки ее на сваи.

Расчетная схема представлена на рисунке 2.1.

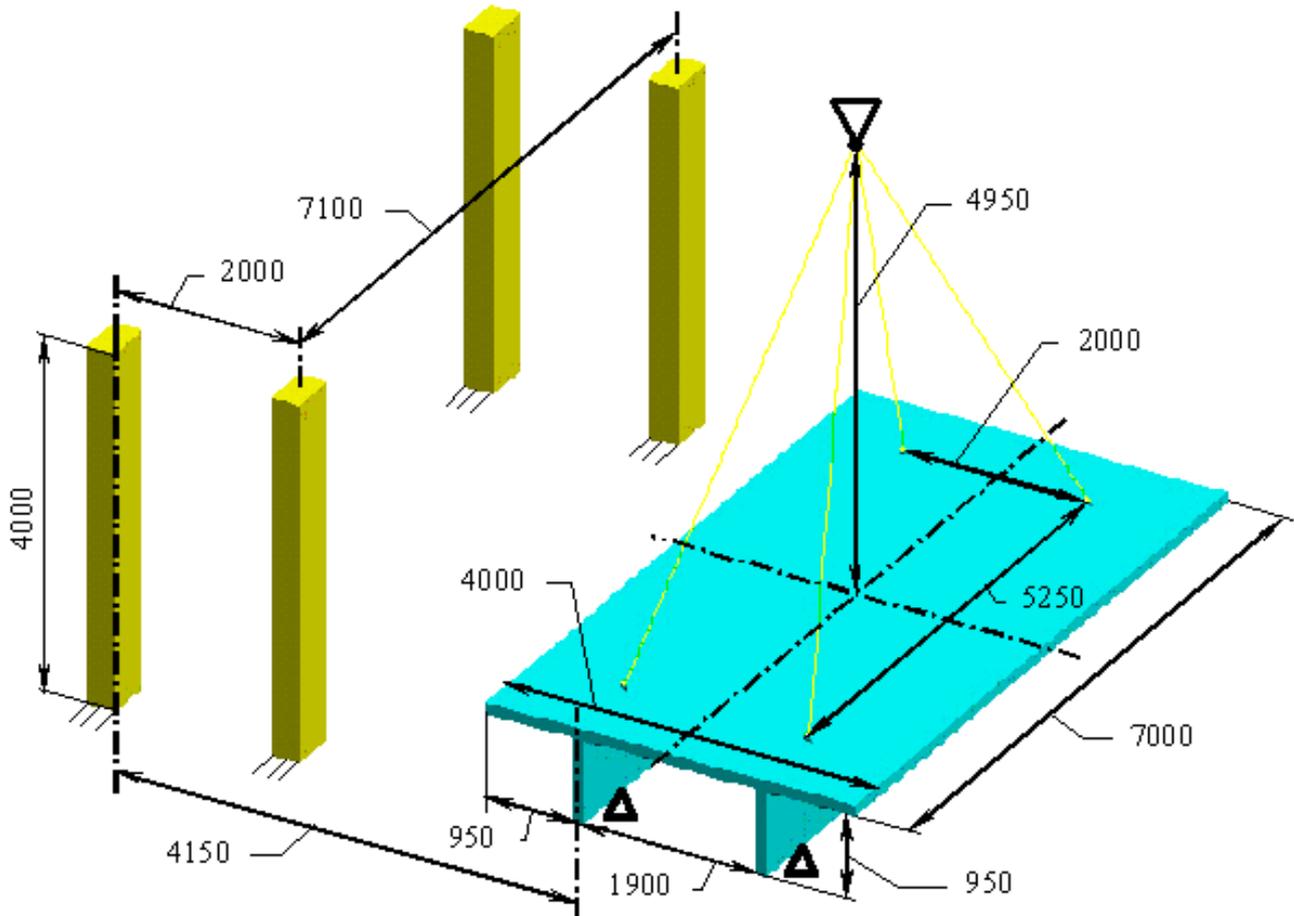


Рисунок 2.1 - Расчетная схема

Перед началом операции монтажа плита находится на двух опорах, при этом расстояние между продольной осью плиты и осью симметрии расставленных свай составляет 4,15 м. На первом этапе монтажа осуществляется подъем плиты на высоту 5 м за 10 с. Второй этап монтажа - это горизонтальное перемещение плиты на 4,15 м за 20 с до совмещения продольной оси плиты с осью симметрии расставленных свай. И, наконец, на третьем этапе монтажа производится опускание плиты на сваи до контакта с ними, то есть вертикальное перемещение вниз на 1 м за 10 с.

Схема монтажа представлена на рисунке 2.2.

**Исходные данные.** Плита и сваи изготовлены из тяжелого бетона Б20. Основные размеры рассчитываемых элементов конструкции указаны на рисунке 2.1. Толщина плиты и ее ребер – 100 мм. Сечение свай - 500×300 мм. Диаметр тросов и монтажных скоб – 26 мм.

**Построение расчетной модели.** Начнем построение расчетной модели с построения модели бетонной плиты.

Сначала совместим плоскость  $XOY$  ГСК с плоскостью экрана, нажав соответствующую кнопку на панели «Задание положения системы координат модели и

*параметров рисования*», которое можно вызвать командой меню «*Ред. Граф.*» ↘ «*Задать начальное положение системы коорд.*» (кнопка  на панели инструментов).

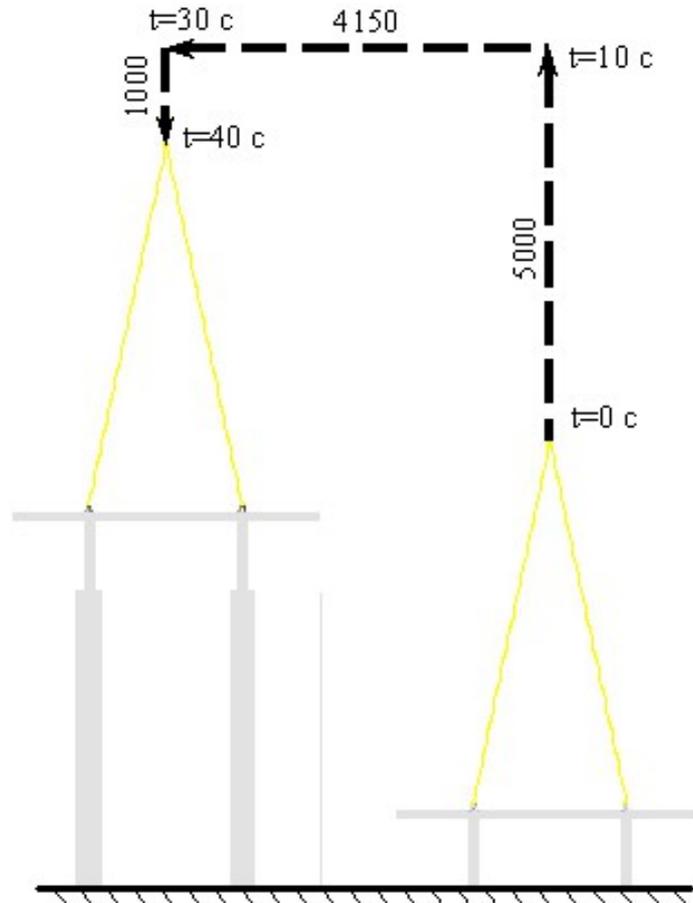


Рисунок 2.2 - Схема монтажа

Формирование модели бетонной плиты из объемных конечных элементов осуществляется с помощью графического редактора. В окне «*Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов*», появившемся после подачи команды «*Ред. Граф.*» ↘ «*ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть*» (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) указываем и вводим запись «*1.0. Объемные элементы + 1.02. Параллелепипед из объемных элементов*». В этом же меню даем имя вводимой записи: «*Плита*». В появившемся окне «*Уточните размеры*» вводим габаритные размеры бетонной плиты (1/4 плиты в плоскости *ХОУ*):  $B=3500$  мм (длина плиты),  $H=2000$  мм (ширина плиты),  $L=1050$  мм (высота плиты), с соответствующим числом разбиений сторон на 4, 5 и 3 части.

Далее, в появившейся панели «*Положение начала координат размещаемой подобласти*», уточняем координаты положения вводимого параллелепипеда относительно центра ГСК, введя значения всех координат равными нулю. Результат построения показан на рисунке 2.3а.

Теперь необходимо откорректировать координаты узлов объемных элементов для получения модели плиты с размерами соответствующими исходным данным. Выделяем узлы элементов, так как это показано на рисунке 2.3б и снизу вверх проводим вектор, определяющий примерное расположение и толщину ребра плиты. Затем в меню «*Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ*» (ускоритель – клавиша *x* или кнопка  на панели инструментов) нажимаем кнопку «*Растянуть по вектору вдоль оси ОУ ЭСК*» и в появившейся панели «*Уточнение координат точек*»

вводим в графе  $Y$  уточненные координаты вектора –  $(950; 1050)$ . Результат этих действий показан на рисунке 2.3в.

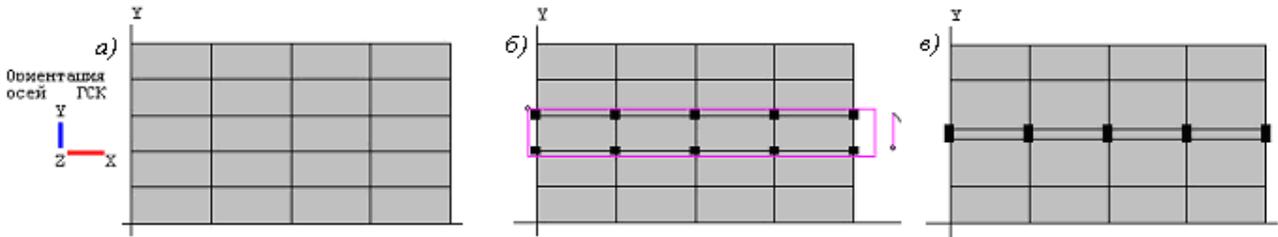


Рисунок 2.3 - Построение модели бетонной плиты: а – ввод параллелепипеда из объемных элементов; б – выделение узлов и нанесение вектора, определяющего примерное расположение и толщину ребра плиты; в - результат коррекции координат выделенных узлов

Для дальнейшей коррекции координат узлов объемных элементов необходимо совместить плоскость  $YOZ$  ГСК с плоскостью экрана (кнопка  на панели инструментов). Далее выделяем узлы элементов, так как это показано на рисунке 2.2а и, в вызванном меню «Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ» нажимаем кнопку «Переместить по ВЕКТОРУ». В окне «Уточнение проекций вектора смещения» вводим –  $(250; 0)$  и получаем слой элементов толщиной соответствующей толщине плиты (рисунок 2.3б).

Теперь пометим узлы, которые необходимо удалить для получения нужного сечения плиты (рисунок 2.3в) и выполним команду «Ред. Граф.»  $\hookrightarrow$  «ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»  $\hookrightarrow$  «Удалить узлы и КЭ» (ускоритель – клавиша *Delete* или кнопка  на панели инструментов).

Результат проделанных операций показан на рисунке 2.3г.

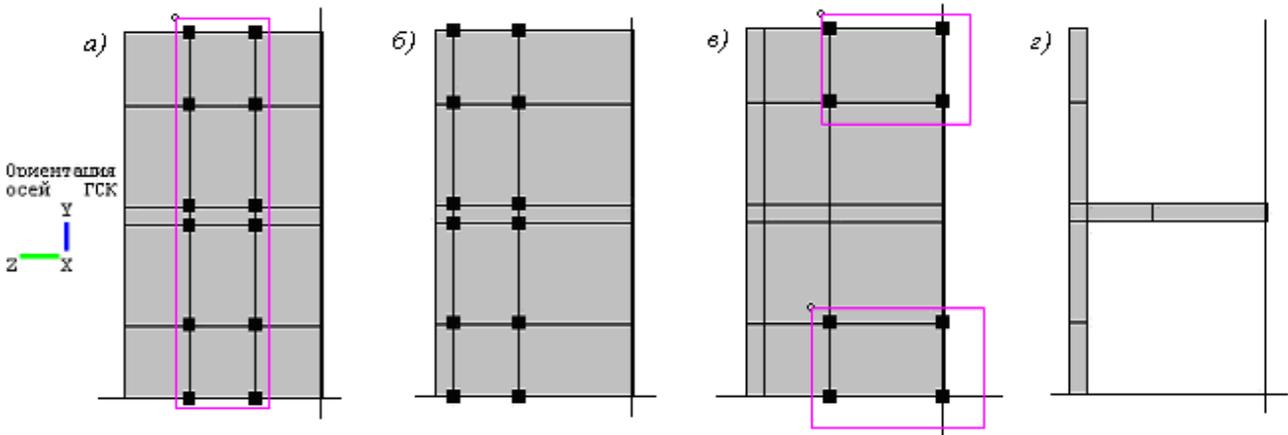


Рисунок 2.4 - Построение модели бетонной плиты: а – выделение перемещаемых узлов; б – результат перемещения узлов; в – выделение удаляемых узлов; г – модель после удаления выделенных узлов

На следующем этапе построений необходимо ввести в модель «монтажные скобы» и присоединить их к модели бетонной плиты. Скобы будут моделироваться с помощью стержневых КЭ.

Наносим на экран контур скобы (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов) так как это показано на рисунке 2.5а и вызываем диалоговую панель «Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов» (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) в которой вводим запись «3.0. Стержни, связи» + «3.02. Стержень (брус)». В этой же панели в соответствующем окне присваиваем имя вводимой

записи: «Скобы Монтажные». В следующей панели «Укажите способ ввода элементов» нажимаем кнопку «Ввести в указанном месте». В появившейся панели «Укажите способ ориентации элемента» нажимаем кнопку «По двум узлам», а в панели «Уточнение расстояния по оси OZ от начала системы координат» вводим  $Z0=2625$ . В следующей панели «Параметры стержневых элементов» вводим все параметры по умолчанию. Результат ввода стержневых элементов показан на рисунке 2.5б.

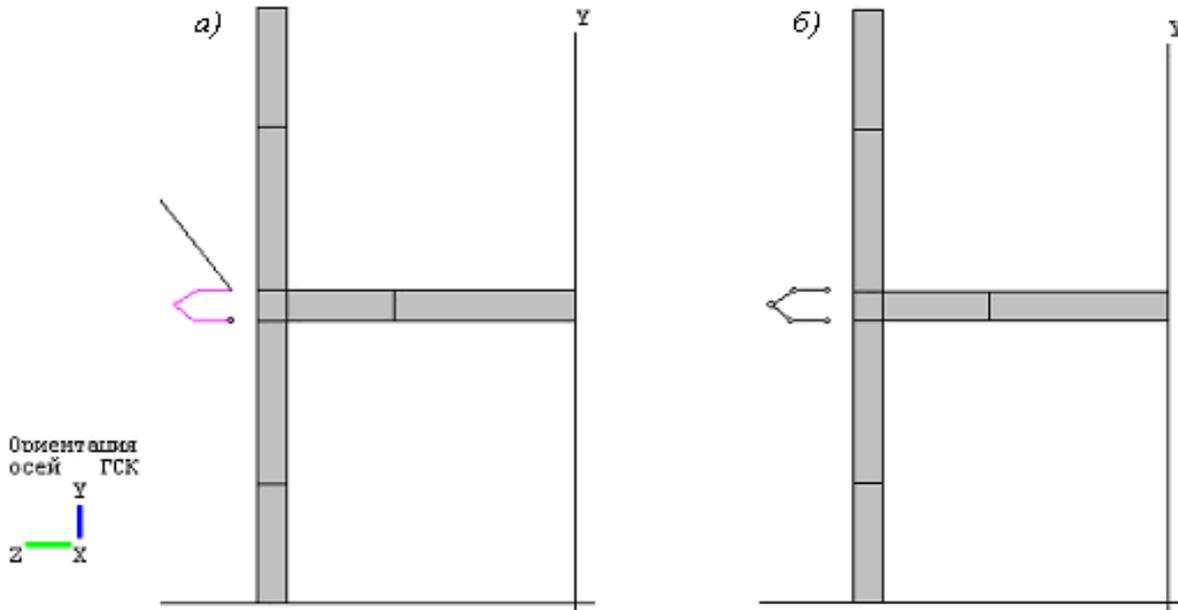


Рисунок 2.5 - Построение модели монтажной скобы из стержневых КЭ: а – нанесение контура скобы; б – результат ввода стержневых КЭ

Теперь откорректируем координаты узлов скобы для обеспечения ее точных геометрических размеров и «заделки» в плиту ее основания.

Пометим узлы основания скобы и переместим их к узлам плиты по вектору «... уточненному по узлам» так как это показано на рисунках 2.6а, б. Далее, снова вызвав панель «Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ» (ускоритель – клавиша  $x$  или кнопка  на панели инструментов) нажимаем на ней кнопку «Выровнять по ближайшим». Результат коррекции – на рисунке 2.6в.

Для обеспечения геометрических размеров проушины помечаем ее узел (рисунок 2.6г) и нажимаем на кнопку «Выровнять по прямой параллельной оси OZ ЭСК, проходящей через ТОЧКУ» в вызванном окне «Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ», предварительно введя в этом окне «Координаты ТОЧКИ» -  $(-1150, 1000)$ . Результат этих операции показан на рисунке 2.6д.

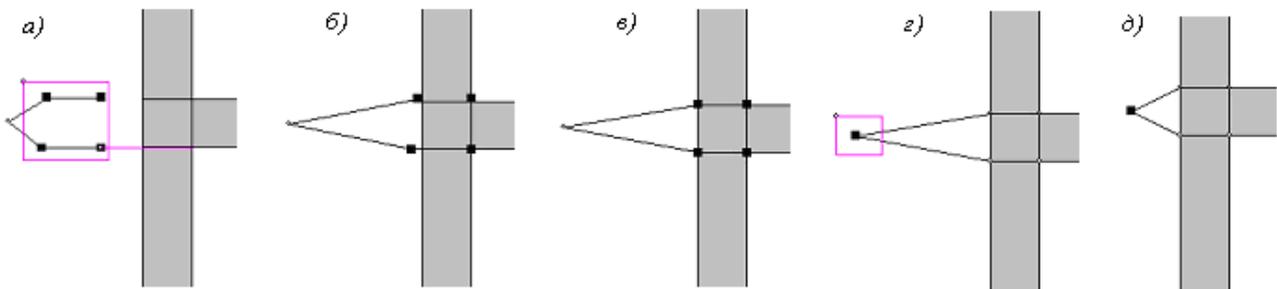


Рисунок 2.6 - Присоединение модели монтажной скобы к плите: а-в – коррекция координат узлов основания скобы; г, д – коррекция координат узлов проушины

Система тросов будет моделироваться с помощью элементов «гибкая нить». Наносим на экран контур троса (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов) так как это показано на рисунке 2.7а и вызываем диалоговую панель «Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов» (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) в которой вводим запись «3.0. Стержни, связи» + «3.0б. Гибкая нить». В этой же панели в соответствующем окне присваиваем имя вводимой записи: «Тросы». В следующей панели «Укажите способ ввода элементов» нажимаем кнопку «Ввести в указанном месте». В появившейся панели «Данные для гибкой нити» оставляем все значения предлагаемых параметров равными нулю, а в панели «Уточнение расстояния по оси OZ от начала системы координат» вводим  $Z_0=2625$ . Результат ввода гибкой нити показан на рисунке 2.7б.

Теперь откорректируем координаты узлов гибкой нити для обеспечения ее точных геометрических размеров и месторасположения.

Пометим узел гибкой нити, предназначенный для слияния со скобой, и переместим его к узлу скобы по вектору «...уточненному по узлам» так как это показано на рисунках 2.7в, г. Далее, после отмены пометки узла (клавиша *n* или кнопка  на панели инструментов), помечаем второй узел гибкой нити и снова вызываем панель «Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ» (ускоритель – клавиша *x* или кнопка  на панели инструментов). Здесь нажимаем на кнопку «Присвоить координаты ТОЧКИ», предварительно введя в этом же окне «Координаты ТОЧКИ» -  $(0, 0)$ , а в следующей панели «Уточнение в глобальной системе координат...» проконтролировать, чтобы все вводимые координаты были равны нулю. Последовательность действий и их результат показан на рисунках 2.7д, е.

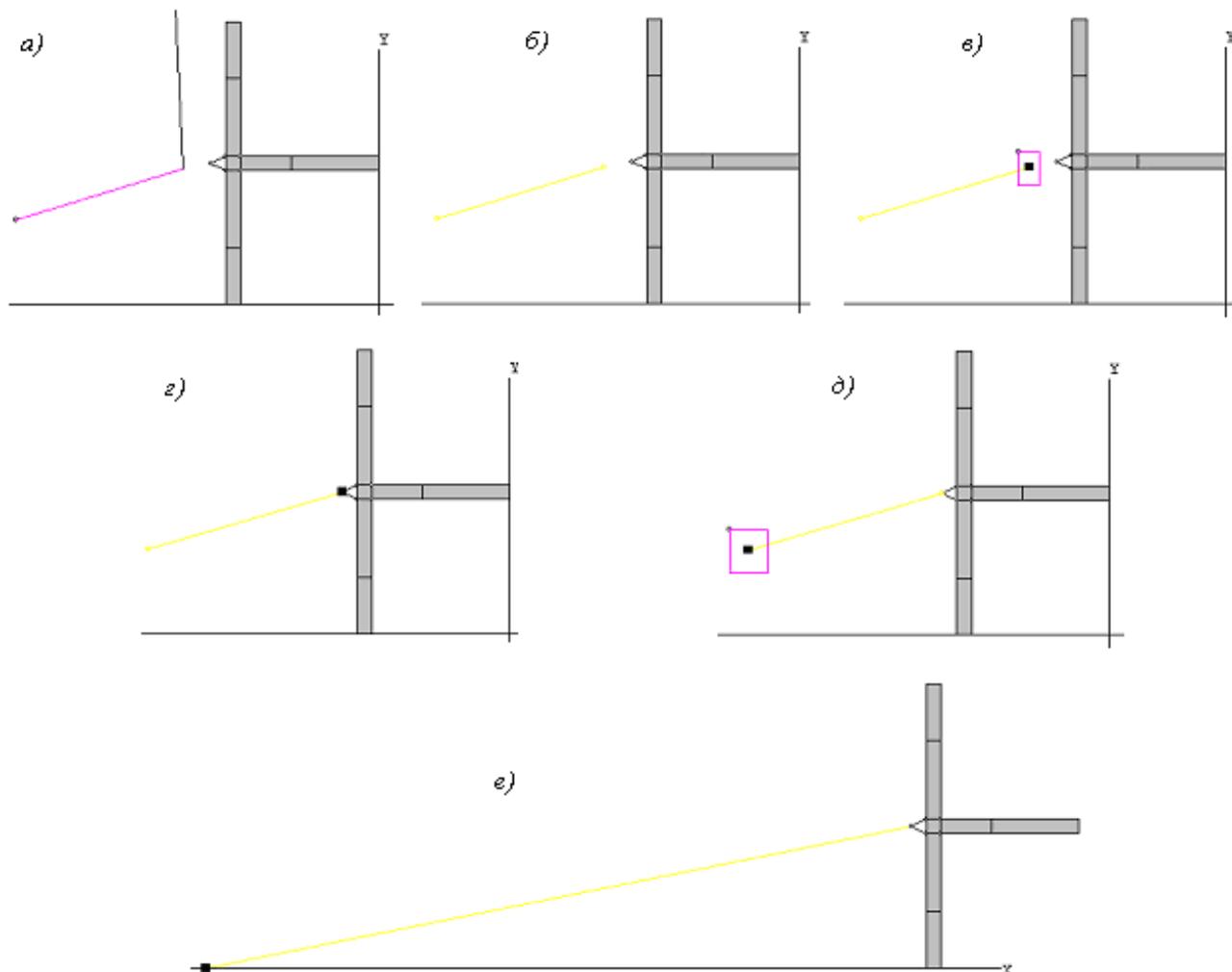


Рисунок 2.7 - Построение модели троса: а – нанесение контура троса; б – результат ввода элемента «гибкая нить»; в-е – коррекция координат узлов троса

В результате вышеописанных построений получена четверть модели бетонной плиты с монтажной скобой и тросом. Для построения полной модели плиты повернем модель так как это показано на рисунке 2.8 и выполним команду «**Дублировать видимую часть**» (кнопка  на панели инструментов). В появившемся после ее подачи окне «**Укажите способ и параметры дублирования**» указываем относительно какой плоскости ГСК будет производиться дублирование и последовательно дублируем модель симметричным отображением относительно плоскостей  $XOZ$  и  $YOZ$ , соответственно, до получения полной модели бетонной плиты с системой тросов и монтажными проушинами (рисунок 2.8).

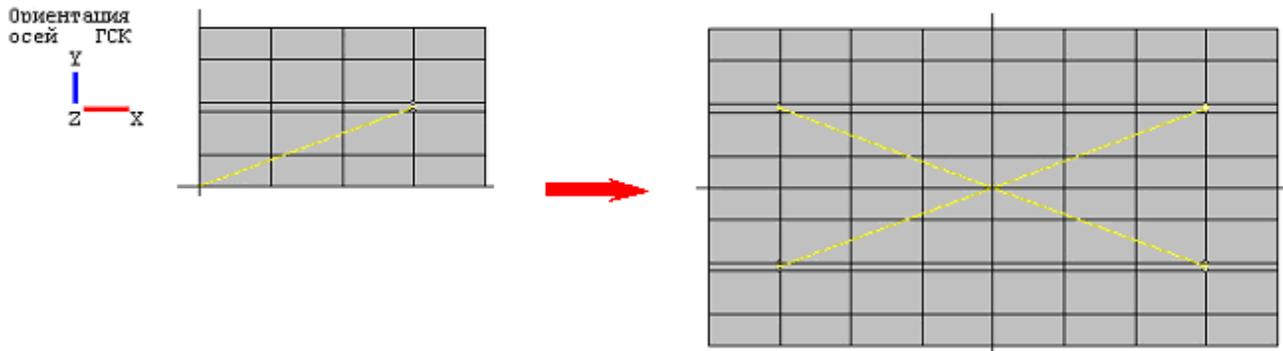


Рисунок 2.8 - Дублирование четверти модели плиты для получения целой модели

Теперь необходимо построить модели свай из объемных элементов.

Совместим плоскость  $XOY$  ГСК с плоскостью экрана, нажав соответствующую кнопку на панели «**Задание положения системы координат модели и параметров рисования**», которое можно вызвать командой меню «**Ред. Граф.**»  $\hookrightarrow$  «**Задать начальное положение системы коорд.**» (кнопка  на панели инструментов).

В окне «**Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов**», появившемся после подачи команды «**Ред. Граф.**»  $\hookrightarrow$  «**ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть**» (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) указываем и вводим запись «**1.0. Объемные элементы + 1.02. Параллелепипед из объемных элементов**». В этом же меню даем имя вводимой записи: «**Сваи**». В появившемся окне «**Уточните размеры**» вводим габаритные размеры сваи:  $B=500$  мм (ширина сваи),  $H=300$  мм (высота сваи),  $L=4000$  мм (длина сваи), с соответствующим числом разбиений сторон на  $1$ ,  $1$  и  $10$  частей.

Далее, в появившейся панели «**Положение начала координат размещаемой подобласти**», уточняем координаты положения вводимого параллелепипеда относительно центра ГСК, введя следующие значения координат:  $x0=3250$ ;  $y0=3000$ ;  $z0=0$ .

Выделяем узлы полученной модели сваи (рисунок 2.9), обведя ее контуром (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов) и подав команду «**Выделить**»  $\hookrightarrow$  «**...все узлы внутри контура**» (ускоритель клавиша *v* или кнопка  на панели инструментов). Теперь подаем команду «**Ред. Граф.**»  $\hookrightarrow$  «**ПОМЕЧЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, операции**»  $\hookrightarrow$  «**Дублировать**» (ускоритель – клавиша *d*). В появившейся панели «**Укажите способ и параметры дублирования**» вводим в окне « $dy=2000$ » и нажимаем кнопку «**Выполнить**».

Полученные сваи опять дублируем (ускоритель – клавиша *d*) «**Симметричным отображением относительно плоскости YOZ**» предварительно выделив их узлы.

Последовательность и результат построения моделей свай показан на рисунке 2.9.

Построение модели закончено. Остается слить совпадающие узлы модели. Слияние узлов производится с помощью команды «Ред. Граф.» ↪ «ВИДИМАЯ ОБЛАСТЬ, операции» ↪ «Совместить близкие узлы» (ускоритель – совместное нажатие клавиш *Alt+t* или кнопка  на панели инструментов) и ввода в появившемся окне «Совмещение близких узлов» максимального расстояния между совмещаемыми узлами модели.

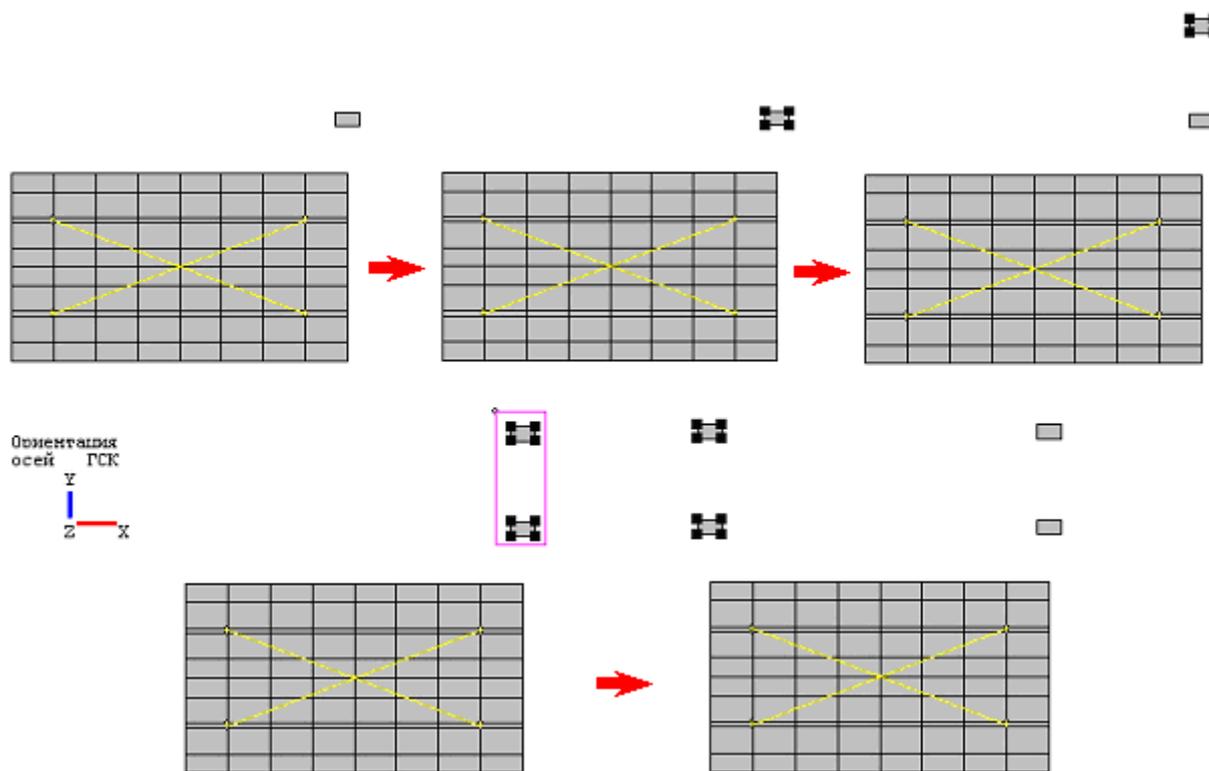


Рисунок 2.9 - Построение моделей свай

**Ввод кинематических граничных условий.** Согласно расчетной схеме, необходимо жестко закрепить узлы оснований свай. Для этого выделяем прямоугольником (команда «Рисовать» ↪ «...прямоугольник» (ускоритель клавиша *r* или кнопка  на панели инструментов)) соответствующие узлы свай, и подаем команду «Выделить» ↪ «...все узлы внутри контура» (ускоритель клавиша *v* или кнопка  на панели инструментов). Затем подадим команду «Ред. Граф.» ↪ «ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции» ↪ «Задать условия» (ускоритель – клавиша *u*). При закреплении левой опоры в появившейся панели «Укажите тип условия для помеченных узлов» в области «КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ» указываем мышью на «Тип условия» «S – ШАРНИРНОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ» и нажимаем кнопку «Ввести» - рисунок 2.10а.

Наличие контакта между сваями и плитой обеспечивается введением в модель пары контактных элементов: «контактная поверхность» и «контактная точка».

Сначала введем в модель контактные точки, которые необходимо разместить в узлах предполагаемого контакта плиты с торцами свай. Для этого их необходимо выделить, так как это показано на рисунке 2.10б и на панели «Укажите тип условия для помеченных узлов» в области «КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ» указываем мышью на «Тип условия» - «K – контактные точки».

Для ввода на торцах свай контактных поверхностей необходимо выделить их узлы (рисунок 2.10в) и подать команду «Ред. Граф.» ↪ «ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть» (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) и в появившейся диалоговой панели «Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов»

вводится запись «2.0. Элементы поверхности» + «2.01. Элемент поверхности 4 узла». В появившемся окне с кнопками ввода различных типов поверхностей «Укажите тип и параметры элемента поверхности» нажимаем кнопку «Контактная поверхн.» и вводим в окне «Ввод значения» в опции «Глубина контроля,  $h$ » соответствующее значение - 500 [мм]. В следующем окне «Ввод значения» в опции «Коэфф. трения» вводим соответствующее значение коэффициента трения бетона о бетон – 0,5.

В следующем окне «Ввод слоя элементов» пользователю выводится сообщение о режиме ввода элементов - нажимаем кнопку «Ввести». В результате на гранях с помеченными узлами появятся контактные поверхности, сетка элементов которых совпадает с сеткой объемных элементов.

Для моделирования перемещения плиты при монтаже введем единичные значения перемещений «такелажного узла» в направлении соответствующих осей  $OY$  и  $OZ$ . Выделим этот узел (рисунок 2.10г) и на панели «Укажите тип условия для помеченных узлов» в области «КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ» последовательно указываем мышью на «Тип условия» - « $Q$  - ЗАДАННЫЕ перемещения», «Направление для заданных и начальных...» - « $Qy$  ( $Qz$ ) – перемещения вдоль оси  $OY$  ( $OZ$ )» и вводим величину заданного перемещения - 1 [мм] в графе «– значение (в соотв. единицах)». Перед вводом необходимо присвоить имена вводимым записям в графе «– имя записи». Назовем их  $Qy$  и  $Qz$ , соответственно.

«Такелажный узел» необходимо закрепить в направлении  $Ox$  ГСК. При его закреплении на вызванной панели «Укажите тип условия для помеченных узлов» (ускоритель – клавиша  $u$ ) в области «КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ» последовательно указываем мышью на «Тип условия» - « $Q$  - ЗАДАННЫЕ перемещения», «Направление для заданных и начальных...» - « $Qx$  – перемещения вдоль оси  $Ox$ ».

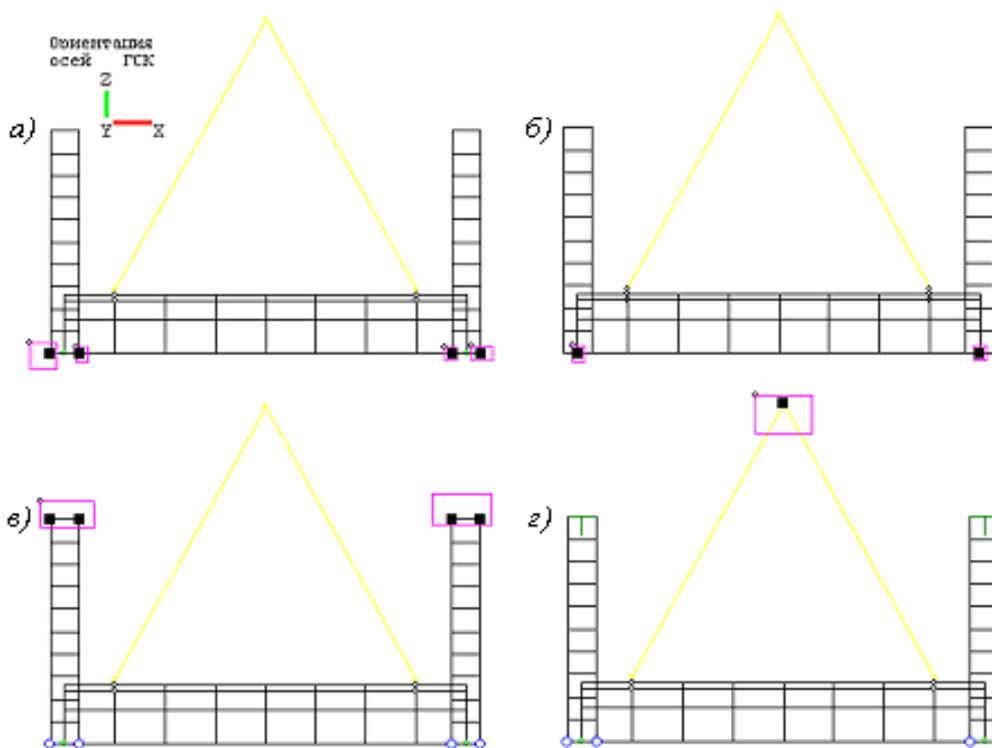


Рисунок 2.10 - Ввод граничных кинематических условий: а – ввод шарнирных закреплений; б – ввод контактных точек; в – ввод контактных поверхностей; г – ввод закрепления по оси  $Ox$  и единичных заданных перемещений по осям  $OY$  и  $OZ$

Далее, вводим элемент «ограничительная поверхность» моделирующий опору под плитой на которой она находится перед подъемом.

Совместим плоскость  $XOY$  ГСК с плоскостью экрана, нажав соответствующую кнопку на панели «**Задание положения системы координат модели и параметров рисования**», которое можно вызвать командой меню «**Ред. Граф.**»  $\hookrightarrow$  «**Задать начальное положение системы коорд.**» (кнопка  на панели инструментов).

Рисуем прямоугольник (ускоритель клавиша  $r$  или кнопка  на панели инструментов) так как это показано на рисунке 2.11а и вызываем диалоговую панель «**Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов**» (ускоритель клавиша  $Insert$  или кнопка  на панели инструментов) в которой вводим запись «**2.0. Элементы поверхности**» + «**2.02. Прямоугольник из элементов поверхности**». В этой же панели в соответствующем окне присваиваем имя вводимой записи: «**Опора**». В следующей появившейся панели «**Укажите тип и параметр элемента поверхности**» нажимаем кнопку «**Огранич. Поверхн.**» и в следующем окне «**Ввод значения**» в опции «**Глубина контроля,  $h$** » вводим соответствующее значение - **500** [мм]. После ввода глубины контроля точек появится окно «**Уточните размеры**» для ввода геометрических характеристик пластины. В нем необходимо ввести следующие величины: ширина пластины  **$B$ =по умолчанию**; количество элементов по ширине пластины - **1**; высота пластины  **$H$ =по умолчанию**, количество элементов по высоте пластины - **1**. В следующей панели «**Положение начала координат размещаемой подобласти**» вводим все параметры по умолчанию кроме  $z_0=0$ . В появившейся панели «**Задайте свойства ограничения**» уточняем величину глубины контроля точек, а остальные параметры оставляем введенными «по умолчанию». Результат построения первой опоры показан на рисунке 2.11б.

Вторую опору получим дублированием первой. Выделим узлы первой опоры (рисунок 2.11б), обведя ее узлы прямоугольником (ускоритель клавиша  $r$  или кнопка  на панели инструментов) и подадим команду «**Выделить**»  $\hookrightarrow$  «**...все узлы внутри контура**» (ускоритель клавиша  $v$  или кнопка  на панели инструментов). Теперь подаем команду «**Ред. Граф.**»  $\hookrightarrow$  «**ПОМЕЧЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, операции**»  $\hookrightarrow$  «**Дублировать**» (ускоритель – клавиша  $d$ ). В появившейся панели «**Укажите способ и параметры дублирования**» вводим в окне « **$dx=5250$** » и нажимаем кнопку «**Выполнить**». Результат построения опор показан на рисунке 2.11в.

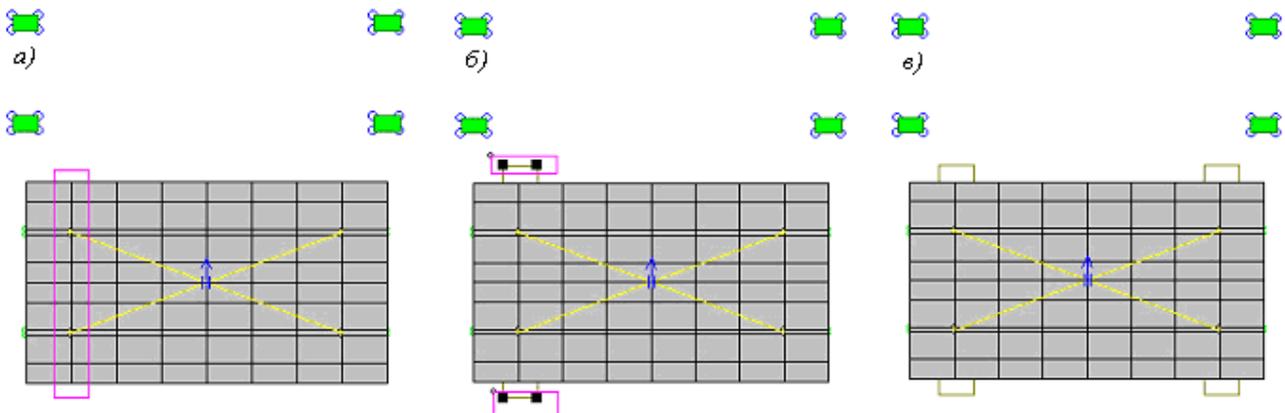


Рисунок 2.11 - Ввод ограничительной поверхности: а – нанесение контура ограничительной поверхности; б, в – дублирование введенной ограничительной поверхности

Работа в графическом редакторе закончена. Остальные данные необходимо вводить с помощью текстового редактора.

**Ввод свойств материала.** Подаем команду «**Ред. текст**», выделяем запись с данными об объемных элементах и нажимаем на кнопку «**Вставить запись перед указанной**». В появившейся панели «**Укажите тип записи**» выделяем и вводим запись

«свойства материала  $R_0, E, \nu, \dots$ ». В следующей панели «Укажите тип материала» нажимаем на кнопку «Изотропный упругий, нелинейно-упругий...» и далее на панели «Свойства материала» выбираем в имеющейся базе данных тяжелый бетон марки Б20 и нажимаем кнопку «Ввести».

Теперь необходимо ввести данные об армировании железобетонной конструкции. Эти данные так же вводятся в текстовом редакторе, и запись с ними должна находиться перед записями с данными об объемных элементах. Итак, выделяем запись с именем «Плита» содержащую данные об объемных элементах плиты и нажмем на кнопку «Вставить запись перед указанной». В появившейся панели «Укажите тип записи» выделяем и вводим запись «коэффициенты армирования материала». В следующей появившейся панели «Коэффициенты армирования материала» вводим эти коэффициенты в соответствии с исходными данными: « $A_x=0,2$ », « $A_y=0,2$ » и « $A_z=0,2$ ». Эти же коэффициенты согласно позиционной зависимости будут относиться и к объемным элементам свай.

**Ввод геометрических характеристик сечений стержневых элементов.** Выделим запись с именем «Скобы Монтажные» и нажмем на кнопку «Вставить запись перед указанной». В появившейся панели «Укажите тип записи» выделяем и вводим запись «характеристики сечения стержней ( $F, J_x, J_y, \dots$ )». В следующей панели «Ввод характеристик сечения стержней» вводим тип сечения «Круг», предварительно введя в графе « $D$ » диаметр скоб, согласно исходным данным – 26 мм. Этот же диаметр согласно позиционной зависимости будут относиться и к элементам гибкая нить, моделирующим тросы.

**Ввод данных о кинематических условиях.** Ввод множителей при перемещениях в функции времени для введенных ранее единичных перемещений  $Q_y$  и  $Q_z$  осуществляется в текстовом редакторе. Единичные перемещения будут умножаться на значение коэффициента соответствующее текущему значению функции от времени, заданной в этой записи.

Выделим запись с именем « $Q_y$ » и нажмем на кнопку «Вставить запись перед указанной». В появившемся меню «Укажите тип записи» выделяем и вводим запись «множитель при перемещениях  $K_q=f(x)$ », которая находится в разделе «ДАННЫЕ О КИНЕМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ». В следующей панели «Ввод функции от времени» устанавливаем переключатель «- функция, задаваемая в виде таблицы» и нажимаем на кнопку «Ввести». В появившейся таблице «Ввод функции, заданной таблично», в соответствии со схемой монтажа показанной на рисунке 2.2, вводим данные, приведенные в таблице 2.1.

В таблице 2.2 приведен множитель при перемещениях в функции времени для единичного перемещения по оси  $Q_z$ , который помещается в текстовом редакторе перед записью « $Q_y$ ».

Таблица 2.1

№ п/г	Время ( $x$ )= $t$ , с	Множитель при перемещениях $f(x)=Q_y$ , мм
1	0	0
2	10	5000
3	30	5000
4	40	4000
5	1000	4000

Таблица 2.2

№ п/г	Время ( $x$ )= $t$ , с	Множитель при перемещениях $f(x)=Q_z$ , мм
1	0	0
2	10	0
3	30	4150
4	1000	4150

**Ввод данных о силе тяжести.** Эти данные помещаются в типовую запись «Нагрузки распределенные по массе ( $A_x, A_y, A_z$ )». Эта запись может занимать любое положение в наборе данных, поэтому войдя в текстовый редактор сразу нажимаем кнопку «Ввести запись в конец набора» и в появившейся панели «Укажите тип записи» выделяем и

вводим запись «*Нагрузки распределенные по массе (Ax, Ay, Az)*». В следующей панели «*Данные о распределенных нагрузках*» вводим «*Az= -9,81*».

И в заключении в набор данных необходимо ввести запись «*АТРИБУТЫ (число итераций, частот, время и шаг...)*». На панели появившейся при вводе этой записи вводим «*Временной интервал, с=*» - 45 с, «*шаг интегрирования, с=*» - 0,25 с и «*Максимальное число итерацийс=*» - 1. Введенная запись может занимать любое положение в наборе данных.

Типовые записи и последовательность их расположения в текстовом редакторе показана в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Структура рабочего набора данных

Структура рабочего набора данных:		
№ п/п	имя записи	тип данных, хранящихся в записи
1	_____	координаты узловых точек
2	Круг_D=26_____	характеристики сечения стержней (F,Jx,Jy,...)
3	Скобы_Монтажные_	стержневые элементы
4	Бетон_B20__тяжел	свойства материала (Ro,E,pu...)
5	Плита_____	объёмные КЭ (8 узлов)
6	Сваи_____	объёмные КЭ (8 узлов)
7	Тросы_____	гибкие нити
8	_____	заданные перемещения и закрепления Q
9	_____	контактные точки
10	_____	контактные поверхности
11	_____	заданные перемещения и закрепления Q
12	_____	множитель при перемещениях $Kq=f(x)$
13	Qz_____	заданные перемещения и закрепления Q
14	_____	множитель при перемещениях $Kq=f(x)$
15	Qy_____	заданные перемещения и закрепления Q
16	_____	ограничение в виде плоскости
17	_____	нагрузки распределённые по массе (Ax,Ay,Az)
18	_____	АТРИБУТЫ (число итераций, частот, время и шаг...)

Набор данных содержит результаты следующих расчетов:  
 -перемещений при динамическом нагружении  
 для 181 шагов по времени  
 -согласованных начальных перемещений

Модель для расчета параметров движения и напряженно-деформированного состояния железобетонной плиты и свай при выполнении операции подъема плиты и установки ее на сваи представлена на рисунке 2.12.

**Вычисления.** Для выполнения вычислений необходимо подать команду «*Вычислить*». В появившемся после подачи этой команды меню необходимо выделить запись «*2.02 Согласованные начальные перемещения*» и нажать на кнопку «*Вычислить*». Эти вычисления необходимы для определения напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции перед началом монтажа, которое вызвано действием силы тяжести.

По окончании этих вычислений необходимо рассчитать «*2.01 Перемещения при ДИНАМИЧЕСКОМ переходном процессе*».

**Просмотр результатов вычислений.** После завершения вычислений перемещений при динамическом переходном процессе можно приступить к просмотру результатов расчетов.

Изменение напряжений и параметры движения конструкции можно просмотреть в режиме анимации, в виде графиков, а также в табличном виде.

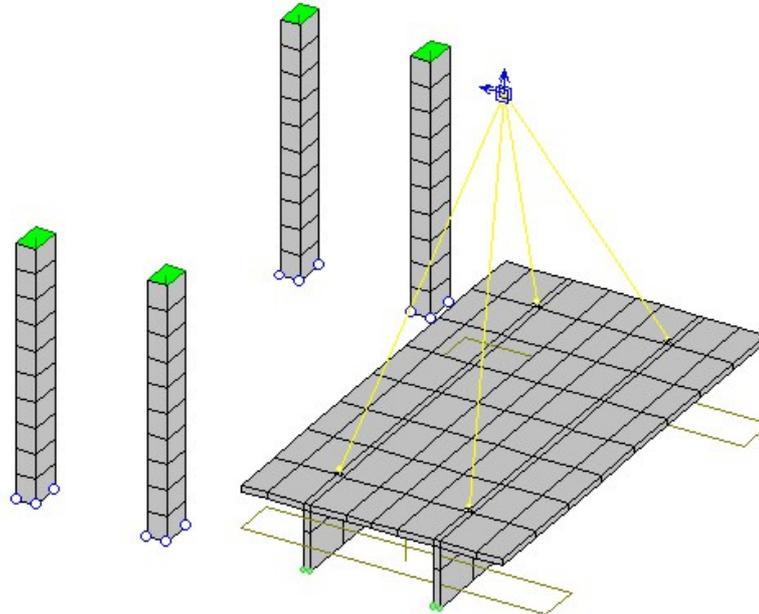
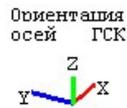


Рисунок 2.12 - Вид модели после завершения построений

Для просмотра параметров движения и изменения эквивалентных напряжений конструкции необходимо подать команду **«Граф. Просм.»**  $\hookrightarrow$  **«АНИМАЦИЯ»**  $\hookrightarrow$  **«Анимация напряжений изменяющихся во времени»** после подачи которой на экран выводится диалоговая панель **«Укажите тип и атрибуты отображения перемещений:»**. В области **«Тип перемещения»** этой панели устанавливаем переключатель на опцию **«- перемещения зависящие от времени или нелинейные»**). В области **«Способ отображения»** устанавливаем переключатель на опцию **«- смещением точек»**. Затем в области **«Масштабный коэффициент»** устанавливаем переключатель на опцию **«- задается пользователем и равен 1»** и вводим **1**. В следующем меню **«Укажите требуемый параметр»** вводим **«ОБЪЕМНЫЕ элементы + Напряжения + SZZ – нормальные напряжения по оси OZ ГСК»**. В меню **«Укажите параметры анимации»** вводим параметры, смысл которых ясен из приведенных в этом меню пояснений. После нажатия кнопки **«Ввести»** появится меню **«Способ масштабирования выводимого параметра»**, в котором можно ввести границы значений выводимых параметров, а так же режим вывода максимального значения параметра во времени.

На рисунке 2.13 показано графическое отображение распределения напряжений в конструкции в момент начала подъема плиты и в момент ее касания свай.

Для просмотра графической зависимости изменения во времени напряжений в узле плиты контактирующим со свайей, нужно сначала выделить этот узел, а за тем подать команду **«Граф. Просм.»**  $\hookrightarrow$  **«Вывести ГРАФИКИ»**  $\hookrightarrow$  **«...напряжений и усилий в элементах»**. В появившемся меню **«Укажите требуемый параметр»** вводим **«Эквивалентные напряжения»**. В следующем меню **«Ввод номеров узлов»** нажимаем на кнопку **«Ввести номера всех помеченных узлов»**.

График изменения эквивалентных напряжений в узле плиты контактирующим со свайей представлен на рисунке 2.14.

Согласованные начальные перемещения  
SZZ - нормальные напряжения по оси OZ ГСК, МПа

Перемещения в момент времени t=40  
SZZ - нормальные напряжения по оси OZ ГСК, МПа

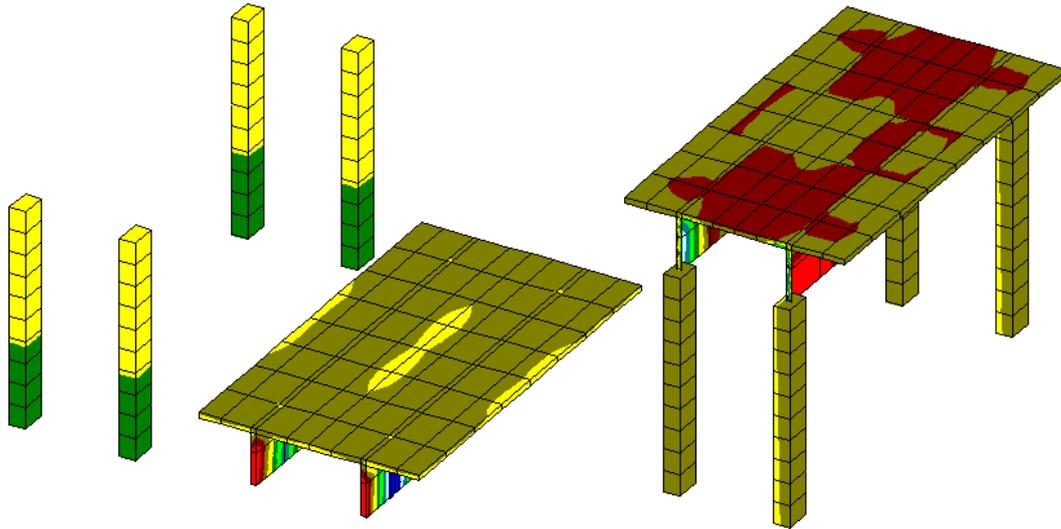


Рисунок 2.13 - Графическое отображение распределения нормальных напряжений по оси **OZ** ГСК в элементах железобетонной конструкции

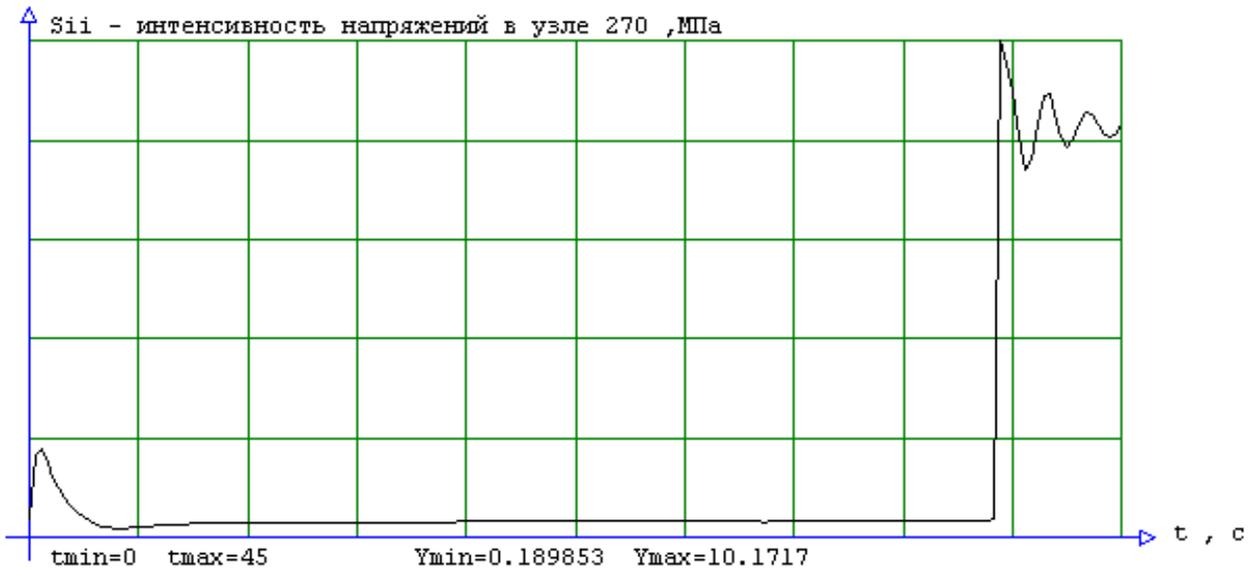


Рисунок 2.14 - График изменения эквивалентных напряжений в узле плиты контактирующим со сваей

Функциональные зависимости, выведенные в виде графиков можно также просмотреть в табличном виде. Для этого нужно подать команду «**Граф. Просм.**» ↵ «**Вывести ГРАФИКИ**» ↵ «**Вывести графики в виде ТАБЛИЦЫ**» или «**Текст. Просм.**» ↵ «**Вывести графики в виде ТАБЛИЦЫ**».

Построенные модели находится в файлах **Монтаж\_Плиты.ZNA**.

### 3. Теплопередача

#### 3.1. Теплый пол

**Формулировка задачи.** Вычислить параметры переходного процесса при работе «теплого пола» в автоматическом режиме при наличии датчика температур.

Расчетная схема представлена на рисунке 3.7.

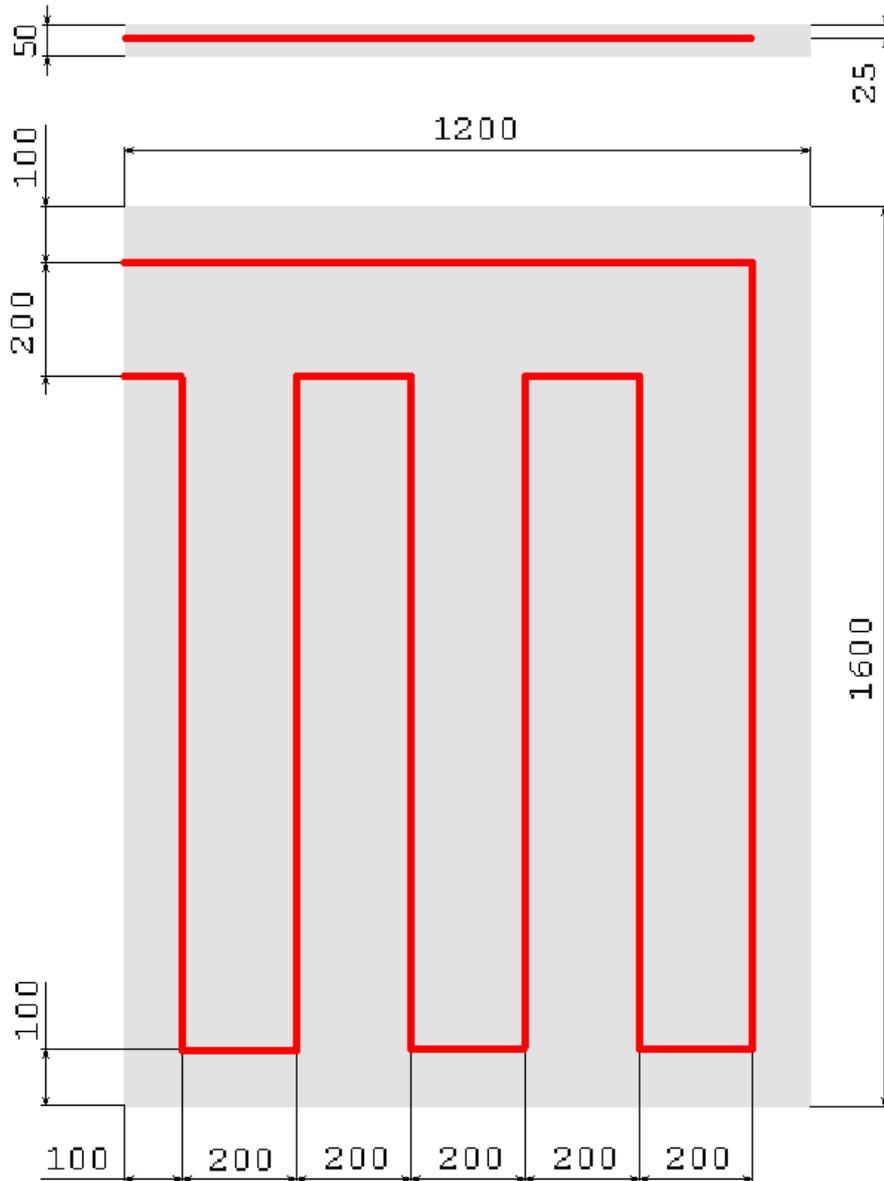


Рисунок 3.7 - Расчетная схема

**Исходные данные.** Перекрытие изготовлено из тяжелого бетона В20. Начальная температура перекрытия  $t_n=15^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от воздуха помещения к поверхности «пола»  $\alpha=10$  Вт/м<sup>2</sup>·град. Теплоотдачей от пола к стенам пренебрегаем. Горизонтальная теплоизоляция находится на «глубине» 50 мм. Температура воздуха в помещении  $t_s=20^\circ\text{C}$ . Интенсивность тепловыделения нагревательного элемента - 100 Вт/м. Допустимая температура нагрева поверхности пола – 40 °С.

**Построение расчетной модели.** Ввиду того, что «теплый пол» имеет пространственную структуру, при построении его конечно-элементной модели необходимо использовать объемные конечные элементы.

Перед началом построений нужно совместить плоскость  $XOY$  ГСК с плоскостью экрана, нажав соответствующую кнопку на панели «**Задание положения системы координат модели и параметров рисования**», которое можно вызвать командой меню «**Ред. Граф.**» ↪ «**Задать начальное положение системы коорд.**» (кнопка  на панели инструментов). Формирование модели перекрытия осуществляется с помощью графического редактора. Для этого в окне «**Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов**», появившемся после подачи команды «**Ред. Граф.**» ↪ «**ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть**» (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) указываем и вводим запись «**1.0. Объемные элементы + 1.02. Параллелепипед из объемных элементов**». В этом же меню даем имя вводимой записи: «**Перекрытие**». В появившемся окне «**Уточните размеры**» вводим геометрические характеристики фрагмента кирпичной стены:  $B=1200$  мм,  $H=1600$  мм,  $L=50$  мм, с соответствующим числом разбиений сторон на **12**, **16** и **2** части.

Далее, в появившейся панели «**Положение начала координат размещаемой подобласти**», уточняем координаты положения вводимого параллелепипеда относительно центра ГСК, введя значения всех координат равными «**0**». Результат построения показан на рисунке 3.8.

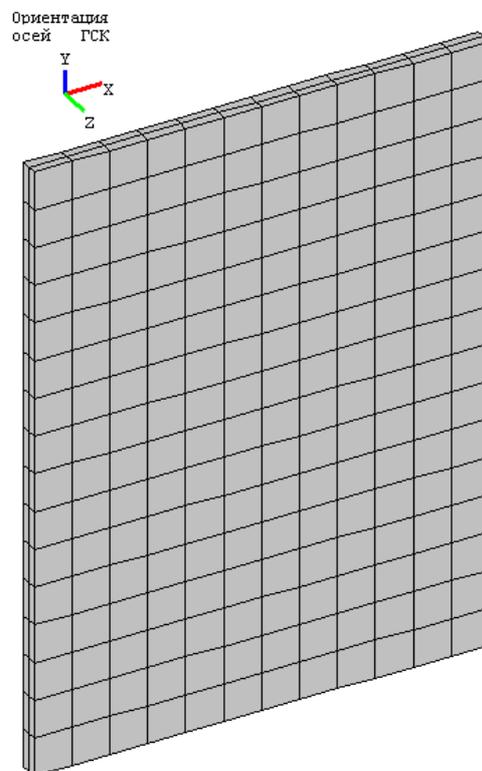


Рисунок 3.8. Модель перекрытия

**Ввод тепловых нагрузок.** Теплоотдача от воздуха помещения к перекрытию моделируется площадками конвективного теплообмена с соответствующими коэффициентами теплоотдачи. Для построения площадок конвективного теплообмена необходимо сначала пометить узлы лежащие на поверхностях теплообмена, то есть на поверхностях «пола» и «потолка». Перед этим совместим плоскость  $XOZ$  ГСК с плоскостью экрана (кнопка  на панели инструментов) и подадим команду «**Рисовать**» ↪ «**... прямоугольник**» (ускоритель клавиша *r* или кнопка  на панели инструментов).

Далее нарисуем на экране прямоугольники так, что бы в их периметр попадали только те узлы граней модели, на которых необходимо построить площадки конвективного

теплообмена. Теперь подадим команду **«Выделить»**  $\hookrightarrow$  **«...все узлы внутри контура»** (ускоритель клавиша **v** или кнопка  на панели инструментов) - рисунок 3.9а.

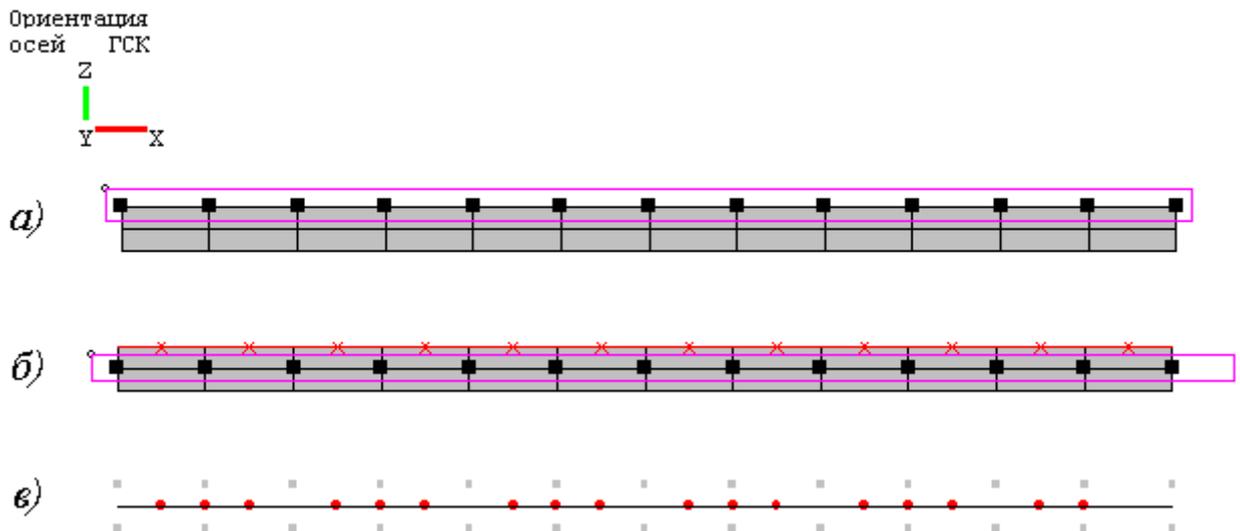


Рисунок 3.9. Ввод тепловых нагрузок: а – выделение узлов на поверхностях теплообмена; б – выделение слоя узлов для ввода линейных источника тепла; в – выделенный слой; г, д – ввод линейных источника тепла

Для построения на помеченных гранях площадок конвективного теплообмена подается команда **«Ред. Граф.»**  $\hookrightarrow$  **«ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть»** (ускоритель клавиша **Insert** или кнопка  на панели инструментов) и в появившейся диалоговой панели **«Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов»** вводится запись **«2.0. Элементы поверхности»** + **«2.01. Элемент поверхности 4 узла»**. В появившемся окне с кнопками ввода различных типов поверхностей **«Укажите тип и параметры элемента поверхности»** нажимаем кнопку **«площадки конвективного теплообмена»** и вводим в следующем окне **«Уточните значение параметра»** в опции **«Пов. конв. теплообмена, hк»** соответствующий коэффициент теплоотдачи  $\alpha=10$  [Вт/м<sup>2</sup>·град].

В следующем окне **«Ввод слоя элементов»** пользователю выводится сообщение о режиме ввода элементов - нажимаем кнопку **«Ввести»**. В результате на гранях с помеченными узлами появятся площадки конвективного теплообмена, сетка элементов которых совпадает с сеткой объемных элементов.

Результат построения площадок конвективного теплообмена показан на рисунке 3.9б.

Нагревательный элемент моделируется тепловой нагрузкой **«линейный источник тепла»**. Для ввода этой нагрузки сначала необходимо оставить видимыми только те узлы, которые принадлежат слою узлов находящихся на уровне закладки нагревательного элемента. Заключим в прямоугольник этот слой, так как это показано на рисунке 3.9б и подадим команду **«Выделить»**  $\hookrightarrow$  **«ВИДИМЫ все УЗЛЫ только в контуре»** (ускоритель клавиша **a** или кнопка  на панели инструментов) - рисунок 3.9в.

Теперь совместим плоскость **ХОУ** ГСК с плоскостью экрана (кнопка  на панели инструментов) и подадим команду **«Рисовать»**  $\hookrightarrow$  **«...прямоугольник»** (ускоритель клавиша **r** или кнопка  на панели инструментов). Вслед за этим, согласно расчетной схеме, последовательно заключим в контур прямоугольника узлы лежащие на линии предполагаемой установки нагревательного элемента и подадим команду **«Выделить»**  $\hookrightarrow$

«...все узлы внутри контура» (ускоритель клавиша *y* или кнопка  на панели инструментов) - рисунок 3.9з.

Далее подаем команду «Ред. Граф.»  «ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»  «Задать условия» (ускоритель – клавиша *u* или кнопка  на панели инструментов). В появившейся панели «Укажите тип условия для помеченных узлов» в области «СИЛОВЫЕ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ (НАГРУЗКИ)» указываем мышью на запись «*h1 – линейный источник тепла*», находящуюся в разделе «УСЛОВИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ» и предварительно введя в ячейке « - значение (в соотв. единицах)» величину интенсивности нагрузки –  $100$  [Вт/м], нажимаем кнопку «Ввести».

Результат ввода в модель линейных источников тепла показан на рисунке 3.9д.

Теперь необходимо задать температуру воздуха в помещении и начальную температуру материала перекрытия. Эти данные вводятся с помощью текстового редактора.

Помня о позиционной зависимости между данными о температуре окружающей среды и данными о конвективном теплообмене подаем команду «Ред. текст», в появившемся меню «Редактирование набора данных в текстовом режиме» выделяем запись с данными о поверхностях конвективного теплообмена и нажимаем на кнопку «Вставить запись перед указанной». В появившейся панели «Укажите тип записи» выделяем и вводим запись «температура окружающей среды», которая находится в разделе «ДАННЫЕ О НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ». В появившемся меню вводим значение температуры в помещении  $t_b=20$  [°C].

Данные о начальной температуре материала перекрытия находятся в записи «начальная температура», которая находится в разделе «ДАННЫЕ О НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ». Эти данные можно ввести в конец набора данных, нажав кнопку «Ввести запись в конец набора». В появившемся меню вводим значение начальной температуры бетона  $t_b=15$  [°C].

**Ввод кинематических граничных условий.** Датчик температур моделируется элементом «автомат-терморегулятор». «Установим» его на поверхности и в центре модели «теплого пола». Ввод датчика в набор данных осуществляется при помощи графического редактора, а именно нанесением на экран точки обозначающей положение вводимого логического элемента (команда «Рисовать»  «...контур» (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов)) – рисунок 3.10а.

Далее подаем команду «Ред. Граф.»  «ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть» (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) и в появившейся диалоговой панели «Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов» вводим запись «5.0. Элементы гидро и пневмо привода» + «5.13. Автомат-регулятор». В этой же панели в соответствующем окне даем имя вводимой записи: «Датчик температур». В окне «Укажите способ ввода элементов» нажимаем кнопку «Соединить с другими». После этого на экране появится меню «Автомат-регулятор». В области «Тип регулируемого параметра» этого меню устанавливаем переключатель в положение «- время включения(ПИД-ШИМ)». Далее в области «Параметры регулирования» вводим «Амплитудное значение параметра=1», «Интервал опроса,  $s=1000$ », «Температура регулирования, град=40», период обнуления интегрального члена функции регулирования (ФР) «Период,  $s=0$ ». В нижней части области «Параметры регулирования» находятся три ячейки для ввода коэффициентов функции регулирования – « $k1=0$ », « $k2=1$ », « $k3=0$ ». После заполнения всех ячеек вводим эти данные, нажав кнопку «Ввести». Вслед за этим на экране появится изображение элемента «автомат-терморегулятор»– рисунок 3.10б.

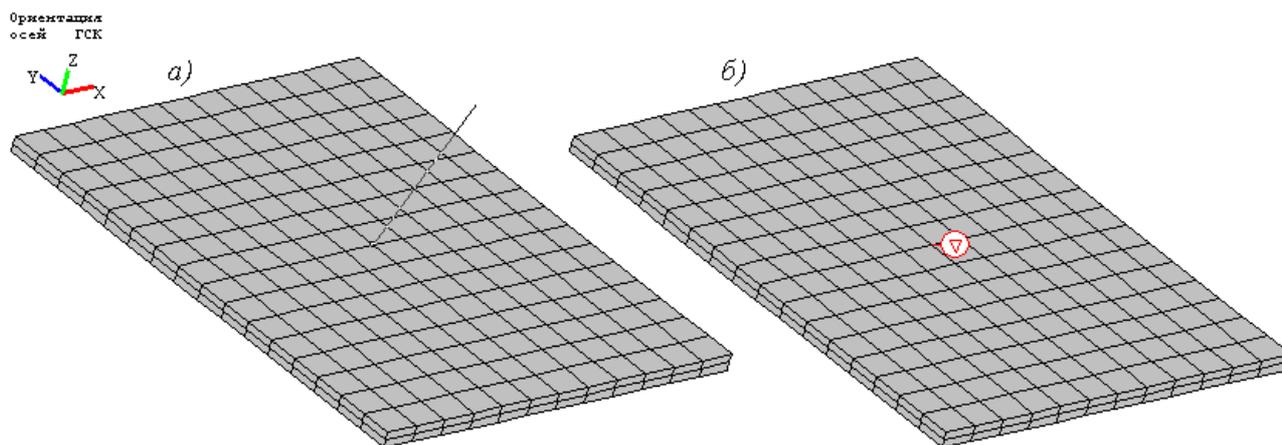


Рисунок 3.10. Ввод элемента «автомат-терморегулятор»: а – нанесение точки; б – результат ввода элемента «автомат-терморегулятор»

Запись с данными о параметрах элемента «автомат-терморегулятор» должна находиться перед введенной ранее записью с данными о тепловой нагрузке *«hl - линейный источник тепла»*.

Для перестановки записей, войдя в текстовый редактор, выделим запись с данными о параметрах элемента «автомат-терморегулятор» и нажмем на кнопку *«Переместить в буфер»*. Далее, выделим запись с данными о тепловой нагрузке *«hl - линейный источник тепла»* и нажмем на кнопку *«Вставить из буфера перед указанной»*.

**Ввод свойств материала.** Подаем команду *«Ред. текст»*, выделяем запись с данными об объемных элементах и нажимаем на кнопку *«Вставить запись перед указанной»*. В появившейся панели *«Укажите тип записи»* выделяем и вводим запись *«свойства материала R, E,  $\rho$ , ...»*. В следующей панели *«Укажите тип материала»* нажимаем на кнопку *«Изотропный упругий, нелинейно-упругий...»* и далее на панели *«Свойства материала»* выбираем в имеющейся базе данных тяжелый бетон марки Б20. Коэффициент теплопроводности  $\lambda=30$  Вт/м·град. Теплоемкость бетона  $c=839$  Дж/кг·град. и нажимаем кнопку *«Ввести»*.

И в заключении, с помощью текстового редактора, в набор данных необходимо ввести запись *«АТРИБУТЫ (число итераций, частот, время и шаг...))»*. На панели появившейся при вводе этой записи вводим *«Временной интервал,  $c=$ » - 15000 с, «шаг интегрирования,  $c=$ » - 100 с*. Введенная запись может занимать любое положение в наборе данных.

Построение модели закончено. После вычисления температур при переходном процессе набор данных должен содержать записи, помещенные в таблице 3.1, а модель должна иметь вид представленный на рисунке 3.11.

**Вычисления.** Для выполнения вычислений необходимо подать команду *«Вычислить»*. В появившемся после подачи этой команды меню необходимо выделить запись *«Температуры при переходном процессе»* и нажать на кнопку *«Вычислить»*.

**Просмотр результатов вычислений.** После завершения вычислений можно приступить к просмотру результатов расчета.

Изменение температуры поверхности «пола» можно просмотреть в режиме анимации, в виде графиков, а также в табличном виде.

Таблица 3.1 - Структура рабочего набора данных

Структура рабочего набора данных:		
№ п/п	имя записи	тип данных, хранящихся в записи
1		координаты узловых точек
2		АТРИБУТЫ (число итераций, частот, время и шаг...)
3		начальная температура
4		температура окружающей среды
5	Бетон В20 тяжел	свойства материала ( $R_0, E, \rho, \dots$ )
6		объемные КЭ (8 узлов)
7		поверхность конвективного теплообмена
8	Датчик температу	автомат-терморегулятор
9		нагрузки распределённые по длине $p(l)$

Выполнен расчет температур при переходном процессе

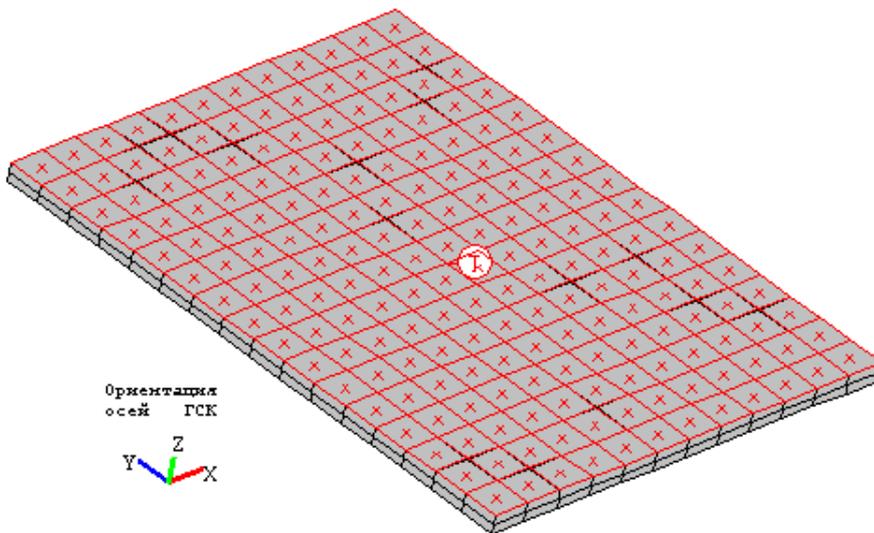


Рисунок 3.11. Вид модели после завершения построений

Для просмотра изменения температуры во времени в режиме анимации необходимо подать команду **«Граф. Просм.»**  $\hookrightarrow$  **«АНИМАЦИЯ»**  $\hookrightarrow$  **«Анимация температур при переходном процессе»** после подачи которой на экран выводится диалоговая панель **«Укажите параметры анимации:»**. В этом меню вводим параметры, смысл которых ясен из приведенных в этом меню пояснений. После нажатия кнопки **«Ввести»** появится меню **«Укажите способ масштабирования выводимого параметра»**, в котором можно ввести границы значений выводимых параметров, а так же режим вывода максимального значения параметра во времени. На рисунке 3.12 показано графическое отображение распределения температуры в элементах «теплого пола» в один из моментов времени.

Для просмотра графической зависимости изменения температуры в каком-либо узле (узлах) модели от времени нужно сначала выделить этот узел (узлы) и подать команду **«Граф. Просм.»**  $\hookrightarrow$  **«Вывести ГРАФИКИ»**  $\hookrightarrow$  **«...температуры»**. В появившемся меню **«Ввод номеров узлов»** предлагаются различные варианты ввода интересующих пользователя номеров узлов.

Для удобства анализа выведенных графических зависимостей необходимо выполнить команды **«Граф. Просм.»**  $\hookrightarrow$  **«Вывести ГРАФИКИ»**  $\hookrightarrow$  **«Выводить значения функции в указываемых точках»** или **«Граф. Просм.»**  $\hookrightarrow$  **«Вывести ГРАФИКИ»**  $\hookrightarrow$  **«...аргумента и функции в указываемых точках»**. После подачи одной из этих команд и нажатия левой кнопки мыши при наведенном курсоре на интересующий пользователя участок графика на нем будут отображаться параметры соответствующие поданным командам. График изменения давления в одном из узлов модели домкрата, с установленными значениями функции в указанной точке, представлен на рисунке 3.13.

Ориентация  
осей ГСК



Время = 14000  
T - температура, град

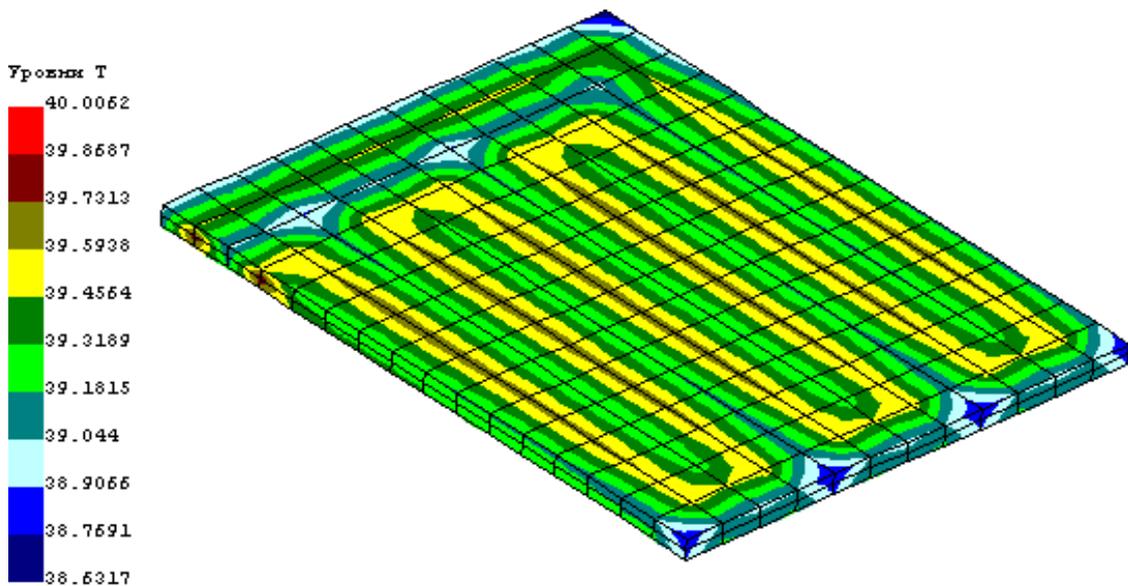


Рисунок 3.12. Графическое отображение распределения температуры в модели «теплого пола» в один из моментов времени

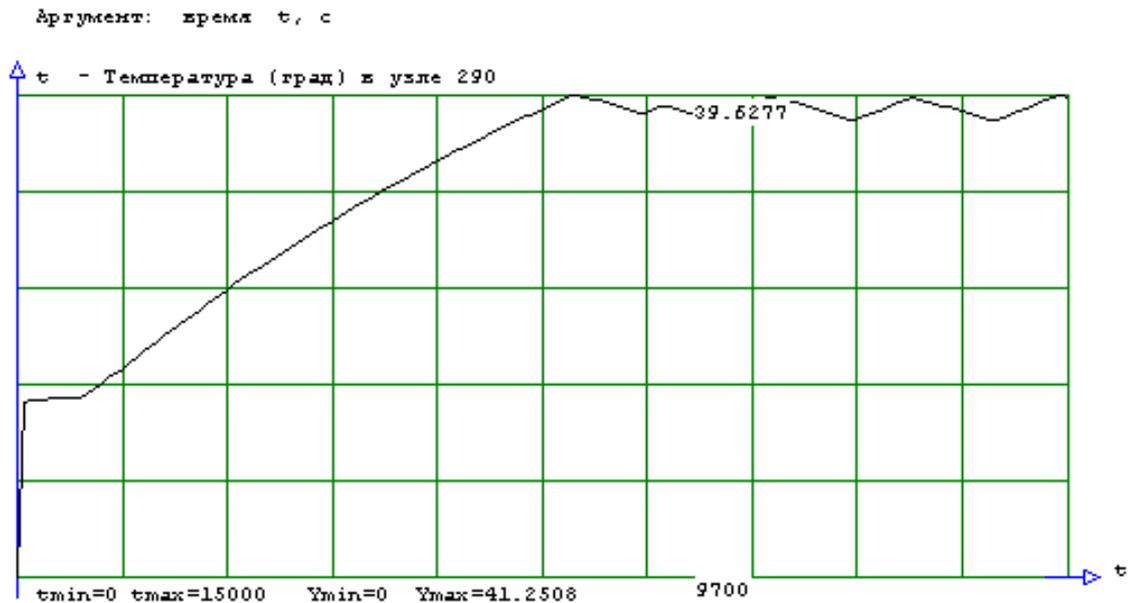


Рисунок 3.13. График изменения температуры в одном из узлов модели «теплого пола», с установленными значениями функции в указанной точке

Если необходимо более подробно визуально исследовать какой-либо участок выведенного на экран графика, то для этого нужно обозначить последовательным нажатием левой кнопки мыши границы интересующего участка и вслед за этим нажать правую кнопку мыши. Границы исследуемой области могут последовательно сужаться до величины шага по времени.

Функциональные зависимости, выведенные в виде графиков можно также просмотреть в табличном виде. Для этого нужно подать команду «Граф. Просм.» ↵

**«Вывести ГРАФИКИ»** ↪ **«Вывести графики в виде ТАБЛИЦЫ»** или **«Текст. Просм.»** ↪ **«Вывести графики в виде ТАБЛИЦЫ»**.

При переходе в режим вывода графиков в виде таблицы на экране будут отображаться только значения аргумента и функции выделенного участка графика. При нажатии правой кнопки мыши происходит возврат к изображению рассматриваемого участка графика. Возвращение к полному графику выполняется повторным нажатием правой кнопки мыши.

Построенная модель находится в файле **Теплый\_Пол.zna**.

#### **4. Гидро- пневмодинамика**

#### 4.1. Домкрат

**Формулировка задачи.** Вычислить параметры переходного процесса при подъеме груза домкратом. Определить изменение давления рабочего тела в трубопроводах и рабочих цилиндрах домкрата, параметры работы предохранительных клапанов, параметры движения штоков пневмоцилиндров, а также напряженно деформированное состояние рычажного механизма домкрата.

Расчетная схема представлена на рисунке 4.1.

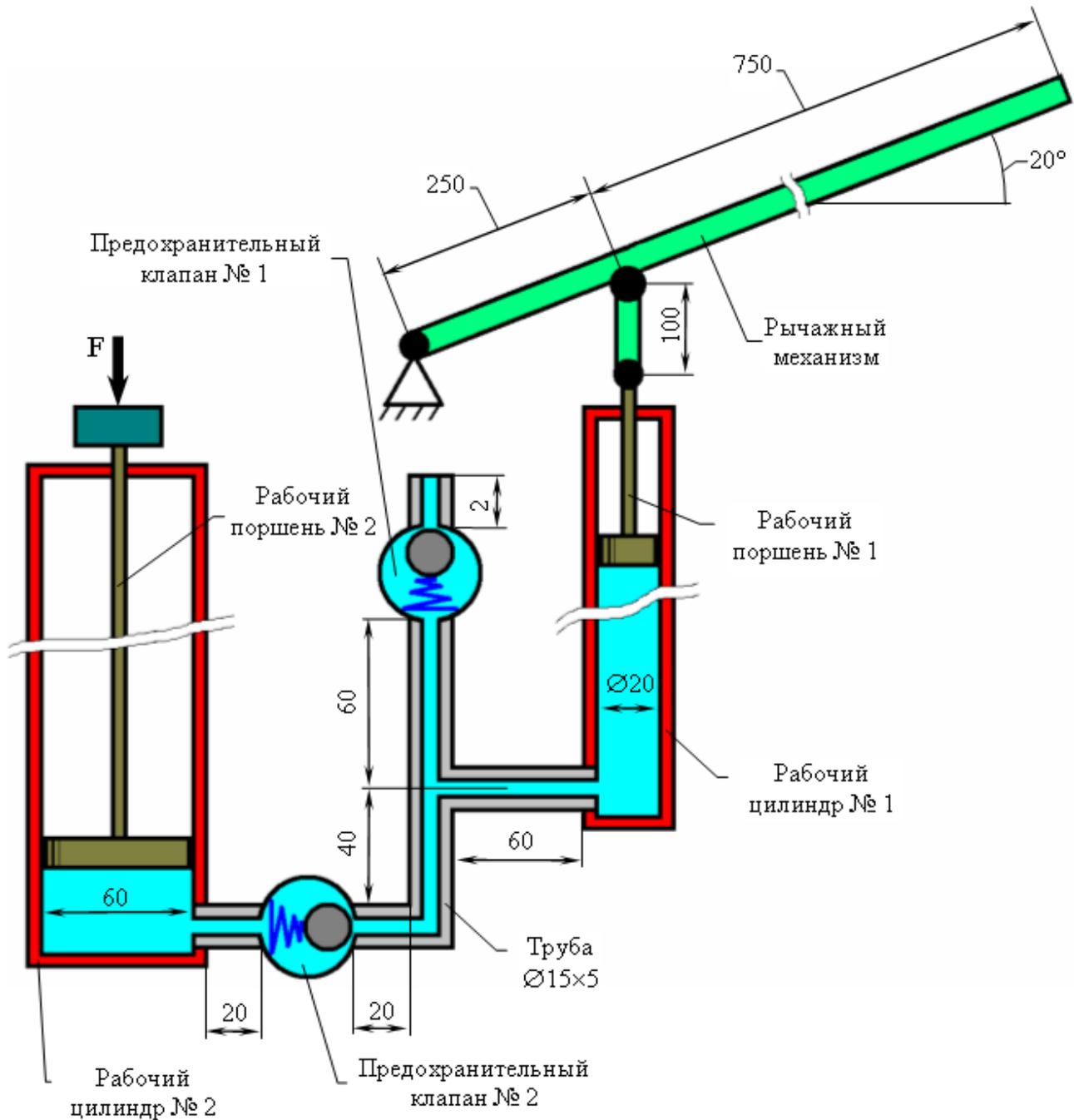


Рисунок 4.1 - Расчетная схема

#### Исходные данные.

Характеристики системы «цилиндр-поршень № 1»:

- диаметр поршня = 20 мм;
- диаметр штока = 5 мм;
- диаметр отверстия подвода = 10 мм;
- исходный объём = 100000 мм<sup>3</sup>.

Характеристики системы «цилиндр-поршень № 2»:

- диаметр поршня = 60 мм;
- диаметр штока = 5 мм;
- диаметр отверстия подвода = 5 мм;
- исходный объём = 100000 мм<sup>3</sup>.

Характеристики предохранительных клапанов № 1 и № 2:

- диаметр подвода = 5 мм;
- жёсткость пружины = 10 Н/м;
- давление настройки = 0,0001 МПа;
- масса подвижных частей = 0,0025 кг;
- максимальный ход подвижной части (ПЧ) = 6 мм;
- множитель в зависимости площади отверстия от перемещения ПЧ = 30 мм<sup>2</sup>/мм;
- коэффициент сопротивления = 10<sup>-5</sup>.

Коэффициент гидравлического сопротивления для всех трубопроводов равен нулю.

Все участки трубопровода имеют одинаковые геометрические характеристики поперечного сечения.

Рычажный механизм изготовлен из стальных труб диаметром 40 мм с толщиной стенки 5 мм.

Рычаг движется по закону  $Q_y \cdot \sin(2\pi t)$ , где  $Q_y$  – амплитудное значение рабочего хода рычага в вертикальном направлении из нейтрального положения, величина которого равна 150 мм;  $t$  – время, с. Положение, в котором находится рычаг на расчетной схеме, является начальным.

Вес груза равен 1000 Н.

**Построение расчетной модели.** Начнем построения модели с построения рычажной механизма. Формирование модели рычажной механизма осуществляется при помощи графического редактора.

Перед началом построений совместим плоскость  $XOY$  ГСК с плоскостью экрана, нажав соответствующую кнопку на панели «**Задание положения системы координат модели и параметров рисования**», которое можно вызвать командой меню «**Ред. Граф.**»  «**Задать начальное положение системы коорд.**» (кнопка  на панели инструментов).

Построим рычаг. Подаем команду «**Ред. Граф.**»  «**ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть**» (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) и в появившейся диалоговой панели «**Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов**» вводим запись «**3.0. Стержни, связи**» + «**3.03. Линия элементов из стержней**». В этой же панели в соответствующем окне даем имя вводимой записи: «**Рычажный Механизм**». В появившейся панели «**Типовые области и конечные элементы**» устанавливаем переключатель «**Способ ориентации ЛСК элемента**» в положение «**по двум узлам**», в окне «**Количество элементов в линии =**» вводим число **8**, а в окнах «**Координаты крайних точек:**» вводим для первой точки (0, 0, 0); для второй - (1000, 0, 0). В следующей панели «**Параметры стержневых элементов**» вводим все параметры по умолчанию. Результат построений показан на рисунке 4.2а.

Для поворота стержневых элементов «рычага» на 20° сначала выделим все его узлы, подав команду «**Выделить**»  «**...все узлы внутри контура**» (ускоритель клавиша *v* или кнопка  на панели инструментов) и после этого укажем центр поворота элементов нажатием левой кнопки мыши в месте, показанном на рисунке 4.2б. Далее, подачей команды «**Ред. Граф.**»  «**ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции**»  «**Корректировать положение**»

(ускоритель – клавиша  $x$  или кнопка  на панели инструментов) вызываем меню «*Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ*» и в области «*Координаты ТОЧКИ*» этого меню нажимаем кнопку «*Уточнить по узлу*», а в области «*Коррекция положения узлов по ТОЧКЕ*» вводим угол  $F = 20^\circ$  и нажимаем кнопку «*Повернуть вокруг ТОЧКИ на угол F*». Результат этих действий показан на рисунке 4.2в.

Теперь необходимо построить модель «шатуна». Для этого выполним дублирование уже имеющегося стержневого элемента. Пометим его узлы, обведя контуром (ускоритель клавиша  $k$  или кнопка  на панели инструментов) и подадим команду «*Выделить*»  $\hookrightarrow$  «... *все узлы внутри контура*» (ускоритель клавиша  $v$  или кнопка  на панели инструментов). Теперь проведем контуром произвольный отрезок и подадим команду «*Ред. Граф.*»  $\hookrightarrow$  «*ПОМЕЧЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, операции*»  $\hookrightarrow$  «*Дублировать*» (ускоритель – клавиша  $d$ ). В появившемся окне «*Укажите способ и параметры дублирования*» нажимаем на кнопку «*Выполнить*». Результат дублирования показан на рисунке 4.2д.

Далее, необходимо откорректировать координаты узлов «шатуна» для приведения их положения в соответствие с расчетной схемой. Для этого контуром нанесем на экран отрезок, так как это показано на рисунке 4.2д и подадим команду «*Ред. Граф.*»  $\hookrightarrow$  «*ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции*»  $\hookrightarrow$  «*Корректировать положение*» (ускоритель – клавиша  $x$  или кнопка  на панели инструментов). В вызванном этой командой меню «*Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ*» нажимаем кнопку «*Выровнять и растянуть по линии*», а в появившейся после этого панели «*Уточнение координат точек*» уточняем и вводим координаты точек нанесенного на экран отрезка: точка № 1 -  $(250; 0)$ , точка № 2 -  $(250; -100)$ .

Пока элемент, моделирующий шатун имеет выделенные узлы, выполним коррекцию его параметров. Для этого подадим команду «*Ред. Граф.*»  $\hookrightarrow$  «*ПОМЕЧЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, операции*»  $\hookrightarrow$  «*Коррекция параметров и поворот сечений стержней*» (ускоритель – совместное нажатие клавиш  $Shift+x$ ). В появившемся меню «*Параметры стержневых элементов*» в предварительно помеченной области « - *задать тип соединений в узлах*» устанавливаем переключатели для обоих узлов на «- шарнир», таким образом, задав шарнирный тип соединения в узлах шатуна.

Результат построения модели рычажного механизма показан на рисунке 4.2е.

На следующем этапе построений введем в общую модель домкрата элементы пневмопривода. При этом будем использовать графический редактор. Все элементы пневмо- и гидроприводов имеющиеся в библиотеке элементов вводятся в модель предварительным нанесением на экран отрезков, которые затем будут интерпретированы в графические образы вводимых элементов. Геометрические размеры графические образов элементов не имеют значения, так как все геометрические характеристики вводимых элементов будут введены в текстовом режиме. Однако, для удобства, при построении моделей из элементов пневмо- и гидроприводов целесообразно, что бы оси вводимых элементов были ориентированы параллельно вертикали или горизонтали ГСК.

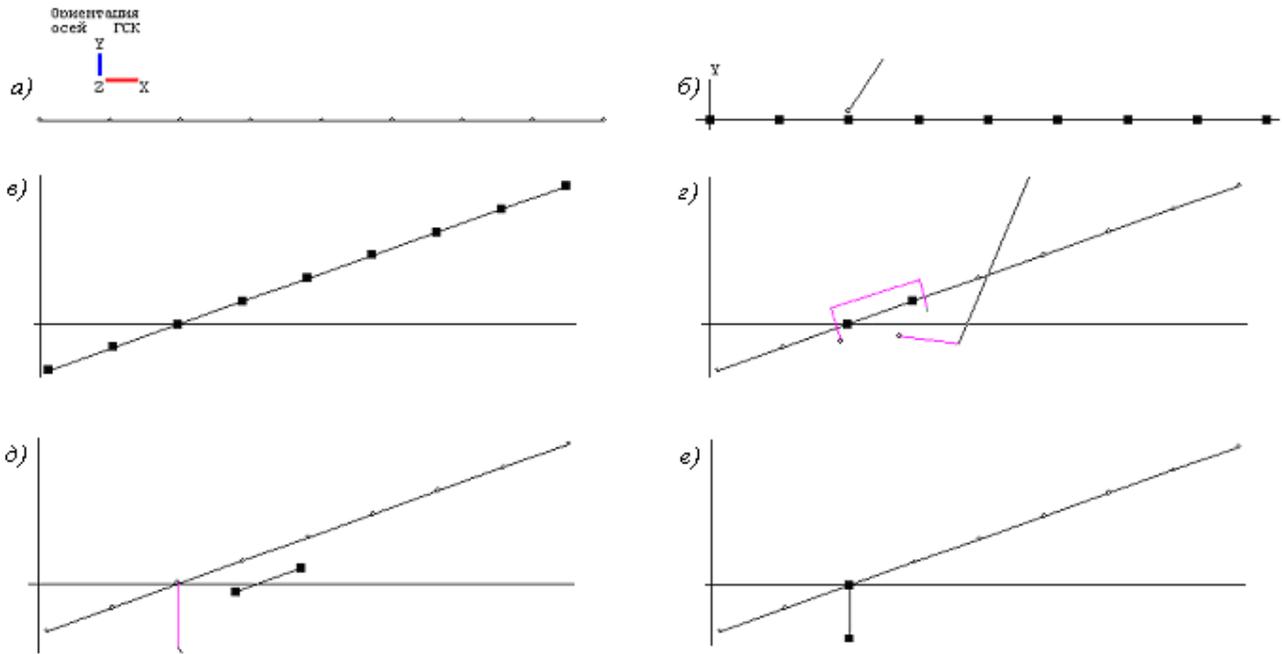


Рисунок 4.2 - Построение модели рычажного механизма: а – ввод линии элементов из стержней; б – подготовка к повороту стержневых элементов; в – модель «рычага» после поворота; г - подготовка к дублированию стержневого элемента для получения модели «шатуна», д – результат дублирования и подготовка к выравниванию дублированного элемента; е – модель рычажного механизма

Построим модель системы «цилиндр-поршень № 1». Контуром (ускоритель клавиша **k** или кнопка  на панели инструментов) нанесем на экран отрезки, так как это показано на рисунке 4.3а. Далее подаем команду «Ред. Граф.»  $\hookrightarrow$  «ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть» (ускоритель клавиша **Insert** или кнопка  на панели инструментов) и в появившейся диалоговой панели «Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов» вводим запись «5.0. Элементы гидро и пневмопривода» + «5.02. цилиндр-поршень». В этой же панели в соответствующем окне даем имя вводимой записи: «Цилиндр-порш №1». В следующей панели «Уточнение расстояния по оси OZ от начала системы координат» вводим  $\theta$ . В появившейся после этого панели «Элемент цилиндр-поршень» в области «Параметры» в соответствии с исходными данными вводим характеристики системы «цилиндр-поршень № 1». В области «Положительное направление потока» этого же меню устанавливаем переключатель на опцию «- из элемента» и нажимаем на кнопку «Ввести».

Результат проделанных операций показан на рисунке 4.3б.

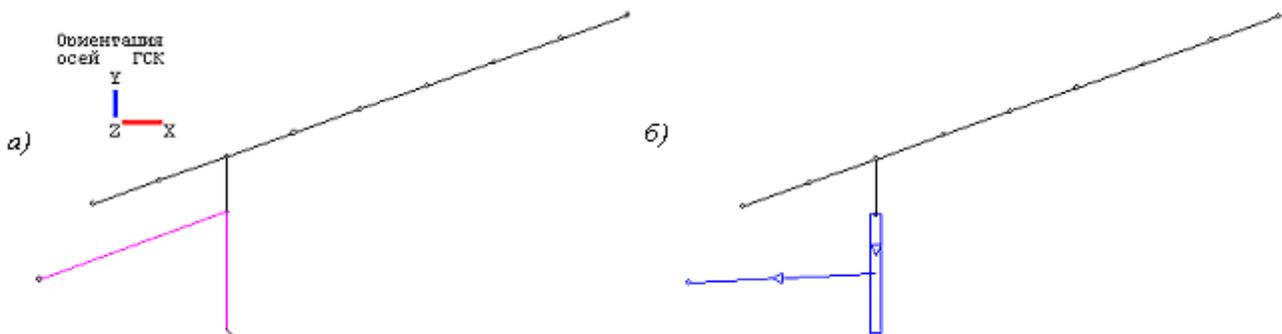


Рисунок 4.3 - Ввод элемента «цилиндр-поршень» № 1: а – нанесение контура; б - введенный элемент «цилиндр-поршень» № 1

Теперь введем в модель отрезок трубы расположенный на выходе из рабочего цилиндра № 1. Контуром (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов) нанесем на экран отрезок, так как это показано на рисунке 4.4а. Далее подаем команду «*Ред. Граф.*» ↪ «*ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть*» (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) и в появившейся диалоговой панели «*Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов*» вводим запись «5.0. Элементы гидро и пневмопривода» + «5.01. трубопровод». В этой же панели в соответствующем окне даем имя вводимой записи: «*Трубопровод*». В следующей панели «*Укажите способ ввода элементов*» нажимаем на кнопку «*Ввести в указанном месте*», а в ячейке панели «*Уточнение расстояния по оси OZ от начала системы координат*» вводим 0. В появившейся после этого панели «*Трубопровод круглого сечения*» в соответствии с исходными данными вводим геометрические характеристики вводимого участка трубопровода.

Результат проделанных операций показан на рисунке 4.4б.

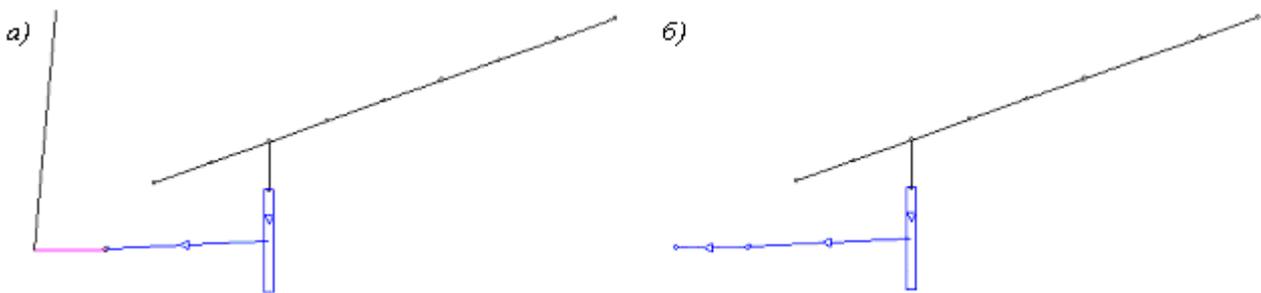


Рисунок 4.4 - Ввод элемента «трубопровод»: а – нанесение контура; б – модель с введенным элементом «трубопровод»

Далее необходимо смоделировать разветвление трубопроводов. Контуром (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов) нанесем на экран отрезки, так как это показано на рисунке 4.5а. Далее подаем команду «*Ред. Граф.*» ↪ «*ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть*» (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) и в появившейся диалоговой панели «*Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов*» вводим запись «5.0. Элементы гидро и пневмопривода» + «5.08. разветвление трубопроводов». В этой же панели в соответствующем окне даем имя вводимой записи: «*Тройник*». В следующей панели «*Укажите способ ввода элементов*» нажимаем на кнопку «*Ввести в указанном месте*», а в ячейке панели «*Уточнение расстояния по оси OZ от начала системы координат*» вводим 0. В появившейся после этого панели «*Разветвление трубопроводов*» в соответствии с исходными данными вводим геометрические характеристики вводимого участка трубопровода и устанавливаем направления потоков в нем (узел *i* – в элемент, узел *j* – в элемент, узел *k* – из элемента).

Результат проделанных операций показан на рисунке 4.5б.

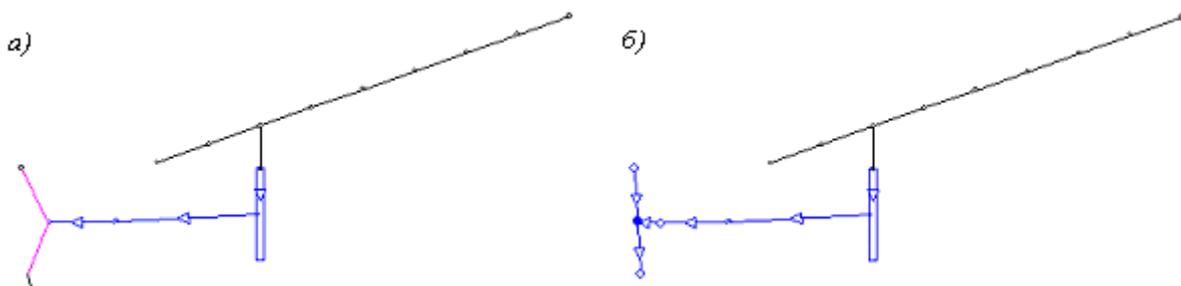


Рисунок 4.5 - Ввод элемента «разветвление трубопроводов»: а – нанесение контура; б - модель с введенным элементом «разветвление трубопроводов»

На следующем этапе построений введем в модель трубу, соединяющую разветвление трубопроводов с предохранительным клапаном № 1. Это можно сделать, выполнив дублирование ранее построенного отрезка трубы. Для этого сначала подадим команду **«Рисовать»** → **«...прямоугольник»** (ускоритель клавиша *r* или кнопка  на панели инструментов), нарисуем на экране прямоугольник так, что бы в его периметр попадали узлы построенного ранее участка трубопровода, и подадим команду **«Выделить»** → **«...все узлы внутри контура»** (ускоритель клавиша *v* или кнопка  на панели инструментов) - рисунок 4.6а. Далее подадим команду **«Ред. Граф.»** → **«ПОМЕЧЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, операции»** → **«Дублировать»** (ускоритель – клавиша *d*). В появившейся панели **«Укажите способ и параметры дублирования»** вводим в окне **«количество дублей =»** число *1*, а в окне **«dfz=»** - *90* и нажимаем кнопку **«Выполнить»**. Результат дублирования – на рисунке 4.6б.

Теперь необходимо расположить полученный дублированием участок трубопровода соответственно расчетной схеме. Проведем контуром (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов) вектор, так как это показано на рисунке 4.6б и подадим команду **«Ред. Граф.»** → **«ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»** → **«Корректировать положение»** (ускоритель – клавиша *x* или кнопка  на панели инструментов). В вызванном этой командой меню **«Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ»** нажимаем на кнопку **«...уточненному по узлам»**. Результат перемещения показан на рисунке 4.6в.

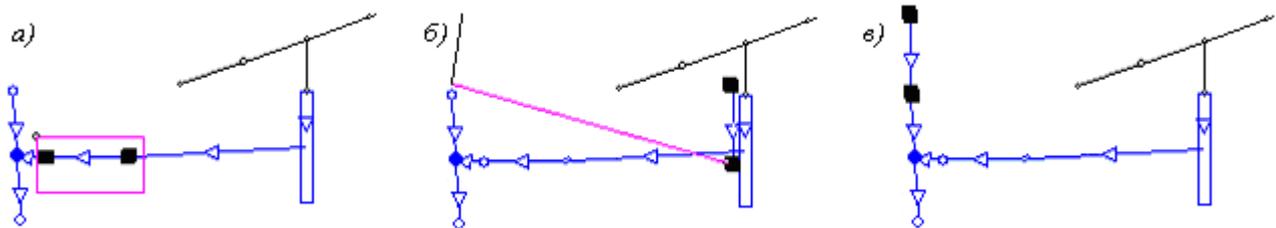


Рисунок 4.6 - Дублирование элемента «трубопровод»: а – выделение узлов элемента; б - результат дублирования и нанесение направляющего вектора; в - результат перемещения

Теперь необходимо построить модель предохранительного клапана № 1. Контуром (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов) нанесем на экран отрезки, так как это показано на рисунке 4.7а. Далее подаем команду **«Ред. Граф.»** → **«ВВЕСТИ (добавить) типовую подобласть»** (ускоритель клавиша *Insert* или кнопка  на панели инструментов) и в появившейся диалоговой панели **«Ввод подобластей, фрагментов и конечных элементов»** вводим запись **«5.0. Элементы гидро и пневмопривода»** + **«5.05. предохранительный клапан»**. В этой же панели в соответствующем окне даем имя вводимой записи: **«Предохр.клапан»**. В следующей панели **«Укажите способ ввода элементов»** нажимаем на кнопку **«Ввести в указанном месте»**, а в ячейке панели **«Уточнение расстояния по оси OZ от начала системы координат»** вводим *0*. В появившейся после этого панели **«Обратный клапан»** в области **«Параметры»** в соответствии с исходными данными вводим характеристики обратного клапана.

Результат проделанных операций показан на рисунке 4.7б.

Далее, снова при помощи дублирования введем в модель два отрезка трубопроводов соединяющие «тройник» с «предохранительным клапаном №2» и «предохранительный клапан №2» с «рабочим цилиндром №2», соответственно.

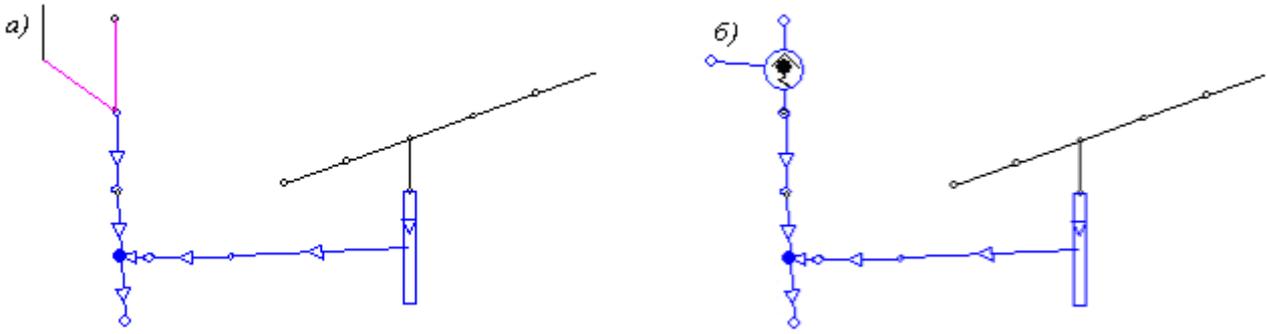


Рисунок 4.7 - Ввод элемента «предохранительный клапан»: а – нанесение контура; б - модель с введенным элементом «предохранительный клапан»

Подадим команду **«Рисовать»**  $\hookrightarrow$  **«...прямоугольник»** (ускоритель клавиша *r* или кнопка  на панели инструментов), нарисуем на экране прямоугольник так, что бы в его периметр попадали узлы построенного ранее участка трубопровода, и подадим команду **«Выделить»**  $\hookrightarrow$  **«...все узлы внутри контура»** (ускоритель клавиша *v* или кнопка  на панели инструментов) - рисунок 4.8а. Проведем контуром (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов) вектор, так как это показано на рисунке 4.8а и подадим команду **«Ред. Граф.»**  $\hookrightarrow$  **«ПОМЕЧЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, операции»**  $\hookrightarrow$  **«Дублировать»** (ускоритель – клавиша *d*). В появившейся панели **«Укажите способ и параметры дублирования»** вводим в окне **«количество дублей =»** число **2** и нажимаем кнопку **«Выполнить»**. Результат дублирования – на рисунке 4.8б.

Расположим полученные дублированием участки трубопровода соответственно расчетной схеме. Проведем контуром (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов) вектор, так как это показано на рисунке 4.8б и подадим команду **«Ред. Граф.»**  $\hookrightarrow$  **«ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»**  $\hookrightarrow$  **«Корректировать положение»** (ускоритель – клавиша *x* или кнопка  на панели инструментов). В вызванном этой командой меню **«Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ»** нажимаем на кнопку **«...уточненному по узлам»**. Результат перемещения показан на рисунке 4.8в.

Построение «предохранительного клапана №2» можно выполнить посредством дублирования ранее построенного «предохранительного клапана №1», так как согласно исходным данным технические характеристики этих клапанов одинаковые.

Для этого контуром обведем ранее введенный элемент **«предохранительный клапан»** так, как это показано на рисунке 4.9а и подадим команду **«Выделить»**  $\hookrightarrow$  **«...все узлы внутри контура»** (ускоритель клавиша *v* или кнопка  на панели инструментов). Затем подадим команду **«Ред. Граф.»**  $\hookrightarrow$  **«ПОМЕЧЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, операции»**  $\hookrightarrow$  **«Дублировать»** (ускоритель – клавиша *d*). В появившейся панели **«Укажите способ и параметры дублирования»** вводим в окне **«количество дублей =»** число **1**, а в окне **«dfz=»** - **90** и нажимаем кнопку **«Выполнить»**. Результат дублирования – на рисунке 4.9б.

Теперь необходимо расположить полученный дублированием «предохранительный клапан № 2» соответственно расчетной схеме. Проведем контуром (ускоритель клавиша *k* или кнопка  на панели инструментов) вектор, так как это показано на рисунке 4.9б и подадим команду **«Ред. Граф.»**  $\hookrightarrow$  **«ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»**  $\hookrightarrow$  **«Корректировать положение»** (ускоритель – клавиша *x* или кнопка  на панели инструментов). В вызванном этой командой меню **«Коррекция координат помеченных**

узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ» нажимаем на кнопку «...уточненному по узлам». Результат перемещения показан на рисунке 4.9в.

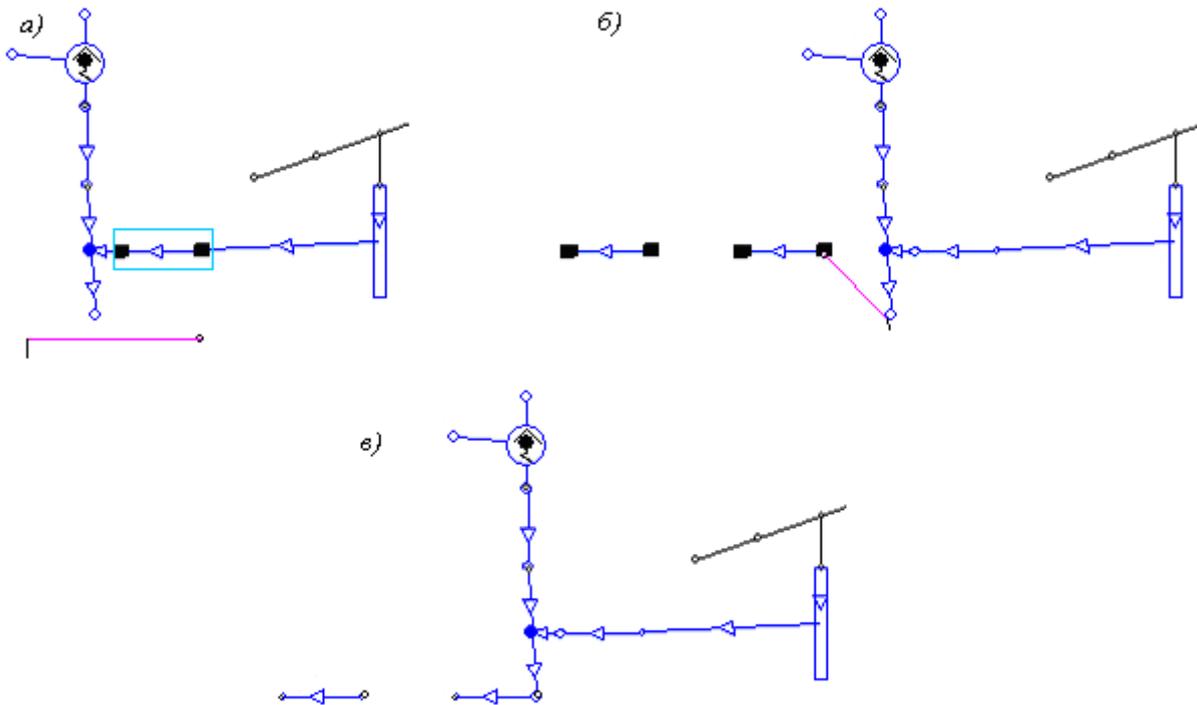


Рисунок 4.8 - Дублирование элемента «трубопровод»: а – выделение узлов элемента; б - результат дублирования и нанесение направляющего вектора; в - результат перемещения

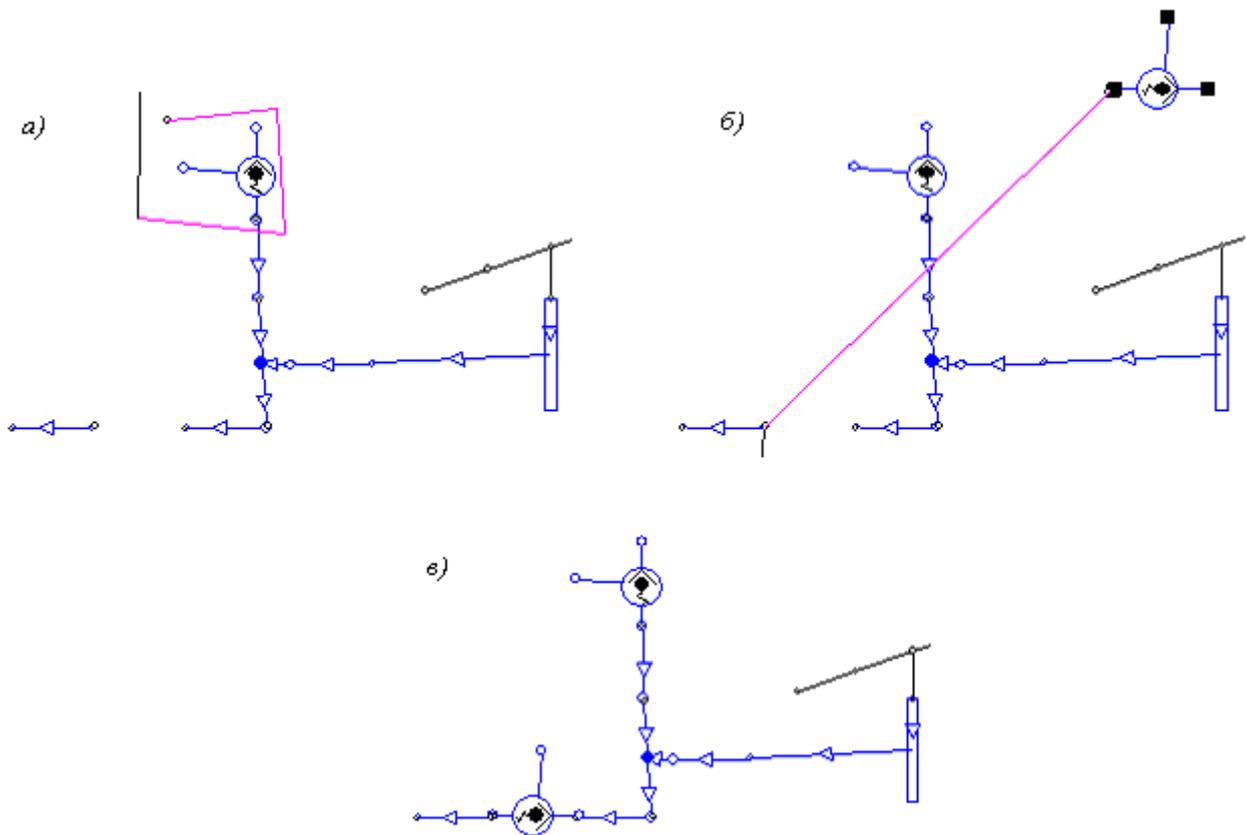


Рисунок 4.9 - Дублирование элемента «предохранительный клапан»: а – выделение узлов элемента; б - результат дублирования и нанесение направляющего вектора; в – результат перемещения

Порядок построения модели системы «цилиндр-поршень №2» идентичен построению модели системы «цилиндр-поршень №1» (рисунок 4.10). Отличие составляют технические характеристики этих элементов конструкции домкрата и направление движения рабочего тела в них.

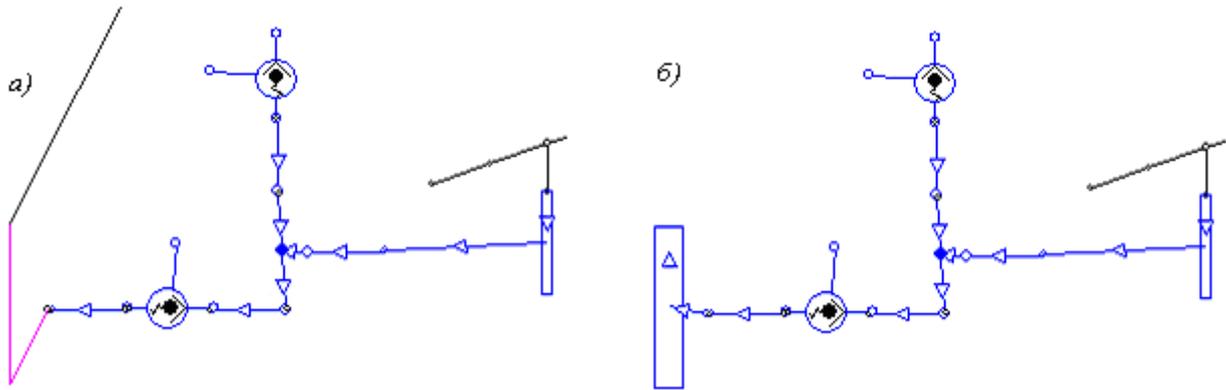


Рисунок 4.10 - Ввод элемента «цилиндр-поршень» № 2: а – нанесение контура; б - введенный элемент «цилиндр-поршень» № 2

Используем возможность дублирования элементов для построения отрезка трубопровода перед входом в «предохранительный клапан № 1».

Контуром обведем ранее введенный элемент «*трубопровод*» так, как это показано на рисунке 4.11а и подадим команду «**Выделить**»  $\hookrightarrow$  «...все узлы внутри контура» (ускоритель клавиша *v* или кнопка  на панели инструментов). Затем проведем контуром вектор, так как это показано на рисунке 4.11а и подадим команду «**Ред. Граф.**»  $\hookrightarrow$  «**ПОМЕЧЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, операции**»  $\hookrightarrow$  «**Дублировать**» (ускоритель – клавиша *d*). В появившейся панели «**Укажите способ и параметры дублирования**» нажимаем на кнопку «**уточнить dx, dy и dz по координатам ближайших узлов**», а затем на кнопку «**Выполнить**». Результат дублирования – на рисунке 4.11б.

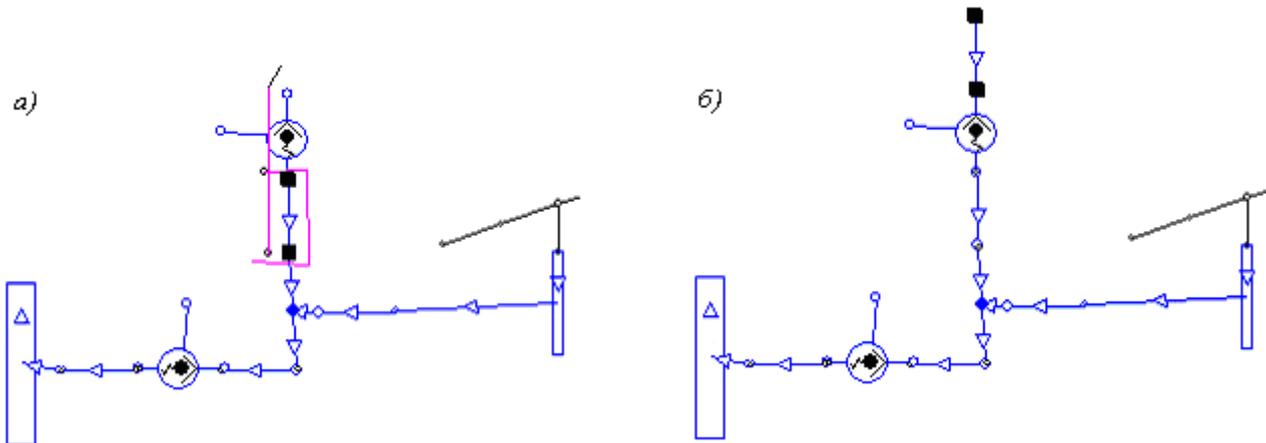


Рисунок 4.11 - Дублирование элемента «трубопровод»: а – выделение узлов элемента и нанесение направляющего вектора; б - результат дублирования

Ввод элементов закончен. Теперь необходимо выровнять узлы модели согласно ранее данным рекомендациям. Сначала выровняем по вертикали узлы элемента «цилиндр-поршень №1». Для этого выделим узлы этого элемента, обведя его контуром и подав после этого команду «**Выделить**»  $\hookrightarrow$  «...все узлы внутри контура» (ускоритель клавиша *v* или кнопка

 на панели инструментов). Далее укажем курсором и нажатием левой кнопки мыши **ТОЧКУ**, по которой будет производиться выравнивание - рисунок 4.12а, а за тем нажмём на кнопку **«Выровнять вертикально по ТОЧКЕ»** в меню **«Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ»** вызванном подачей команды **«Ред. Граф.»** → **«ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»** → **«Корректировать положение»** (ускоритель – клавиша **x** или кнопка  на панели инструментов). Результат коррекции показан на рисунке 4.12б.

Таким же образом выравниваем узлы всех прямолинейных участков модели. Только при горизонтальном выравнивании в меню **«Коррекция координат помеченных узлов в ЭКРАННОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ»** необходимо нажимать кнопку **«Выровнять горизонтально по ТОЧКЕ»**.

Последовательность выравнивания узлов всех элементов показана на рисунке 4.12.

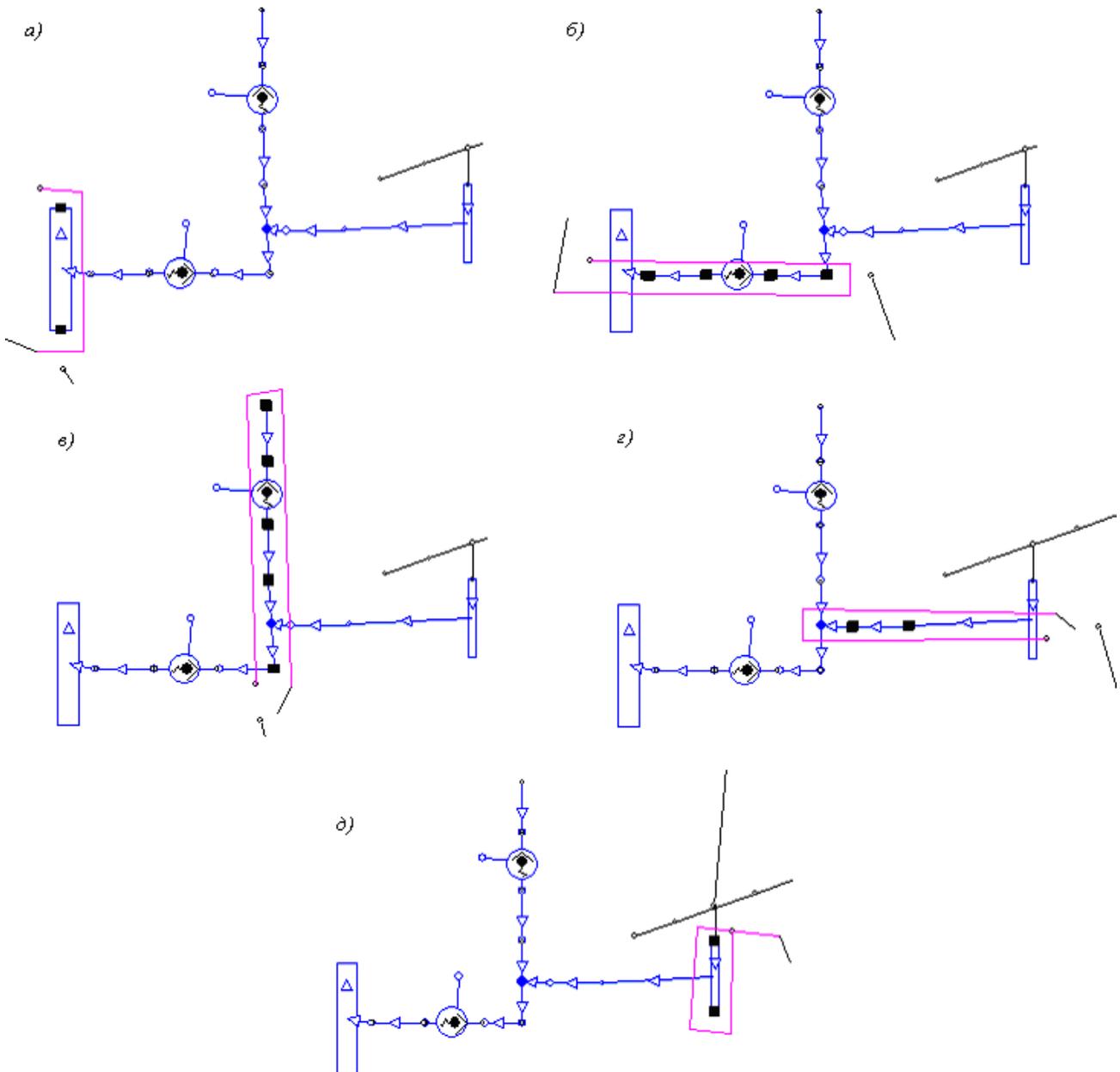


Рисунок 4.12 - Выравнивание узлов элементов: а, в, д – выделение выравниваемых по вертикали узлов элементов и нанесение «точек выравнивания»; б, г – выделение выравниваемых по горизонтали узлов элементов и нанесение «точек выравнивания»

Далее необходимо совместить все узлы построенной модели, которые должны совпадать. Это можно сделать, подав команду **«Ред. Граф.»**  $\hookrightarrow$  **«ВИДИМАЯ ОБЛАСТЬ, операции»**  $\hookrightarrow$  **«Совместить близкие узлы»** (ускоритель – совместное нажатие клавиш **Alt+t** или кнопка на панели инструментов) и введя в появившемся окне **«Совмещение близких узлов»** максимальное расстояние между совмещаемыми узлами модели. Измерить максимальное расстояние между совмещаемыми узлами модели можно, выполнив команду **«Рисовать»**  $\hookrightarrow$  **«...размер по оси OX (OY)»**.

В результате проделанных операций будет получена модель, изображенная на рисунке 4.13.

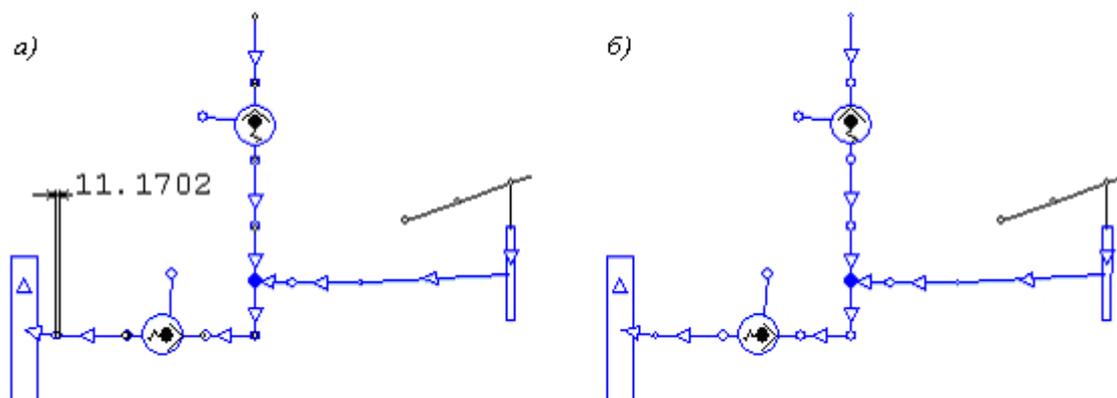


Рисунок 4.13 - Совмещение близких узлов модели: а – измерение максимального расстояния между совмещаемыми узлами модели; б – модель после совмещения близких узлов

**Ввод кинематических граничных условий.** Прежде всего, введем шарнирное закрепление в опоре рычага. Для этого необходимо сначала выделить соответствующий узел модели рычага, заключив его в прямоугольник (ускоритель клавиша **r** или кнопка на панели инструментов) и подав команду **«Выделить»**  $\hookrightarrow$  **«...все узлы внутри контура»** (ускоритель клавиша **v** или кнопка на панели инструментов) – рисунок 4.14а. Затем подаем команду **«Ред. Граф.»**  $\hookrightarrow$  **«ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»**  $\hookrightarrow$  **«Задать условия»** (ускоритель – клавиша **u**) и в появившейся панели **«Укажите тип условия для помеченных узлов»** в области **«КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ»** указываем мышью на **«Тип условия»** **«S – ШАРНИРНОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ»** и нажимаем кнопку **«Ввести»**. Результат проделанных операций показан на рисунке 4.14б.

Теперь необходимо закрепить от перемещений в направлениях **OX** и **OZ** ГСК рабочие узлы цилиндров-поршней. Для этого, так же как и в предыдущем случае выделим эти узлы и подадим команду **«Ред. Граф.»**  $\hookrightarrow$  **«ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»**  $\hookrightarrow$  **«Задать условия»** (ускоритель – клавиша **u**). В появившейся панели **«Укажите тип условия для помеченных узлов»** в области **«КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ»** последовательно указываем мышью на **«Тип условия»** - **«Q - ЗАДАННЫЕ перемещения»**, **«Направление для заданных и начальных...»** - **«Qx(z) – перемещения вдоль оси OX (OZ)»**. Последовательность действий при вводе закреплений показана на рисунке 4.14б.

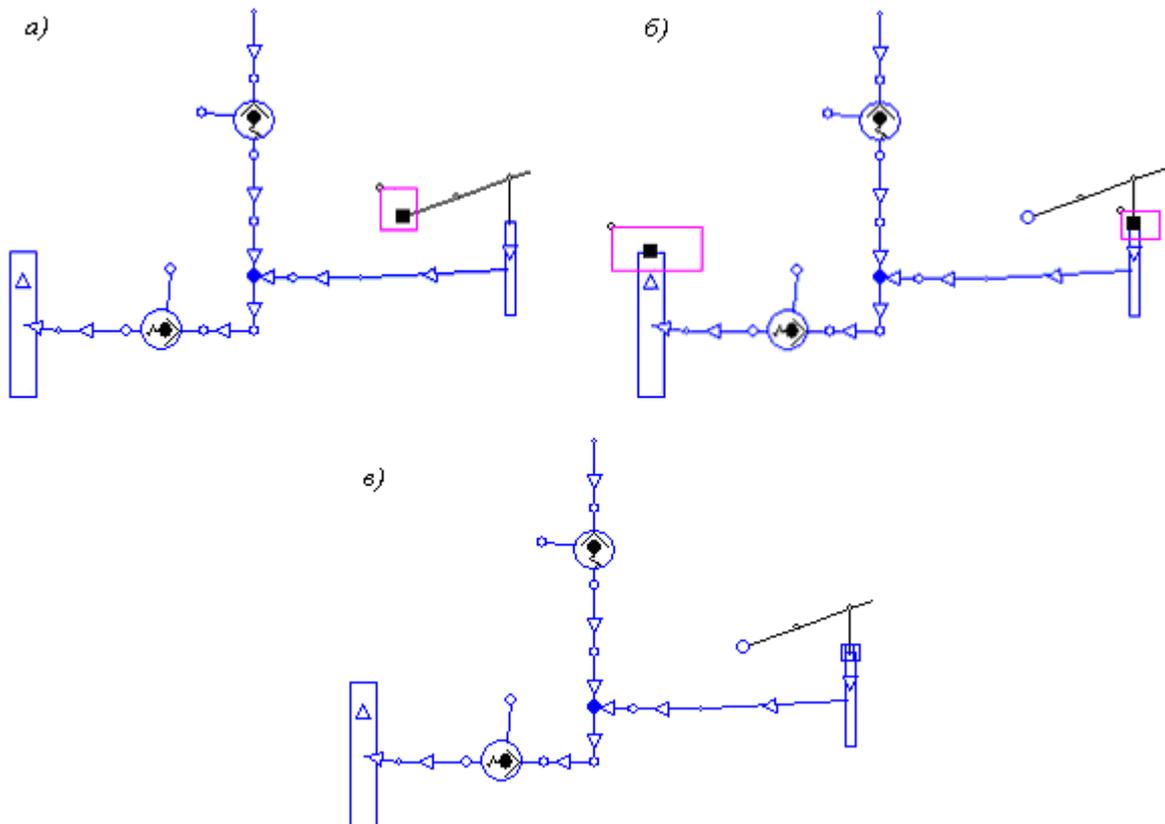


Рисунок 4.14 - Ввод кинематических граничных условий: а – выделение шарнирнозакрепляемого узла; б – выделение узлов закрепляемых по осям  $OX$  и  $OZ$ ; в – модель после ввода закреплений

Для моделирования перемещения рычага введем в соответствующем узле рычага амплитудное значение его перемещений в направлении оси  $OY$  ГСК. Выделим этот узел (рисунок 4.15а) и на панели «Укажите тип условия для помеченных узлов» в области «КИНЕМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ» последовательно указываем мышью на «Тип условия» - « $Q$  - ЗАДАННЫЕ перемещения», «Направление для заданных и начальных...» - « $Q_y$  – перемещения вдоль оси  $OY$ » и вводим величину заданного перемещения - 150 [мм] в графе « - значение (в соотв. единицах)». Перед вводом, желательно, присвоить имя вводимой записи в графе « - имя записи». Назовем ее  $Q_y$ .

Подобным образом прикладываем нагрузку к рабочему узлу «цилиндра-поршня» №2. Выделяем соответствующий узел «цилиндра-поршня» №2 (рисунок 4.15б) и подаем команду «Ред. Граф.»  $\rightarrow$  «ПОМЕЧЕННЫЕ УЗЛЫ, операции»  $\rightarrow$  «Задать условия» (ускоритель – клавиша  $u$ ). В появившейся панели «Укажите тип условия для помеченных узлов» в области «СИЛОВЫЕ ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ (НАГРУЗКИ)» указываем мышью на запись « $P_y$  - ...оси  $OY$ », находящуюся в разделе «СИЛЫ И МОМЕНТЫ» и предварительно введя в ячейке « - значение (в соотв. единицах)» величину усилия – -1000 [Н], нажимаем кнопку «Ввести».

Последовательность действий при вводе перемещения рычага и сосредоточенной нагрузки показана на рисунке 4.15.

Работа в графическом редакторе закончена. Остальные данные необходимо вводить с помощью текстового редактора.

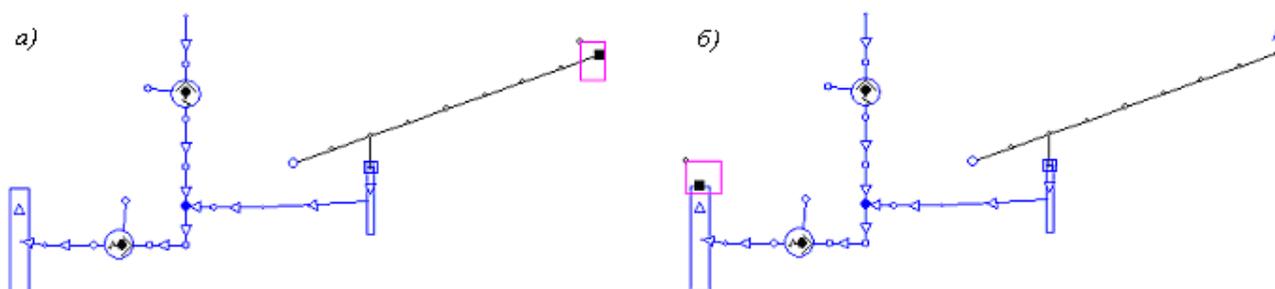


Рисунок 4.15 - Ввод заданного перемещения и сосредоточенной нагрузки:  
 а - выделение узла для ввода заданных перемещений по оси OY;  
 б - выделение узла для ввода усилия по оси OY

**Ввод свойств материала.** Необходимо ввести свойства материала элементов рычажного механизма. Так как они изготовлены из стали, ввод свойств этого материала в набор данных необязателен. Это возможно в связи с тем, что «по умолчанию» при отсутствии в наборе данных записи о свойствах материала программа принимает для расчетов свойства стали.

**Ввод геометрических характеристик сечений стержневых элементов.** Введем геометрические характеристики сечений рычажного механизма. Подаем команду «*Ред. текст*». На появившейся панели «*Редактирование набора данных в текстовом режиме*» в наборе данных выделяем запись с данными о стержневых элементах и нажмем на кнопку «*Вставить запись перед указанной*». В появившейся панели «*Укажите тип записи*» выделяем и вводим запись «*характеристики сечения стержней (F, Jx, Jy,...)*». В следующей панели «*Ввод характеристик сечения стержней*» вводим тип сечения «*Труба*», предварительно введя в графах геометрические характеристики сечений рычажного механизма - «*D=40*» и «*d=30*».

**Ввод данных о кинематических условиях.** Ввод множителя при перемещениях в виде функции времени для введенного ранее перемещения  $Q_u$  осуществляется в текстовом редакторе.

Выделим запись с именем « $Q_u$ » и нажмем на кнопку «*Вставить запись перед указанной*». В появившемся меню «*Укажите тип записи*» выделяем и вводим запись «*множитель при перемещениях  $Kq=f(x)$* », которая находится в разделе «*ДАННЫЕ О КИНЕМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ*». В следующей панели «*Ввод функции от времени*» устанавливаем переключатель в первой строке области «*Тип функции и необходимые параметры*». Далее, вводим в этой строке соответствующие исходным данным параметры и нажимаем на кнопку «*Ввести*».

Строка меню с введенными в ней данными должна быть такой как это показано на рисунке 4.16.



Рисунок 4.16 - Строка меню «*Ввод функции от времени*» с введенными данными

И в заключении в набор данных необходимо ввести запись «*АТРИБУТЫ (число итераций, частот, время и шаг...)*». На панели появившейся при вводе этой записи вводим «*Временной интервал, с*» - 3 с, «*шаг интегрирования, с*» - 0,001 с и «*Максимальное число итераций*» - 3. Введенная запись может занимать любое положение в наборе данных.

Типовые записи и последовательность их расположения в текстовом редакторе показана в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Структура рабочего набора данных

Структура рабочего набора данных:		
№ п/п	имя записи	тип данных, хранящихся в записи
1	_____	координаты узловых точек
2	_____	АТРИБУТЫ (число итераций, частот, время и шаг...)
3	Труба_D=40_d=30_	характеристики сечения стержней (F, J <sub>x</sub> , J <sub>y</sub> ,...)
4	РычажныйМеханизм	стержневые элементы
5	Цилиндр-порш__1__	цилиндр-поршень
6	Трубопровод_____	трубопровод круглого сечения
7	Тройник_____	разветвление трубопроводов
8	Предохр.клапан__	предохранительный клапан
9	Предохр.клапан__	предохранительный клапан
10	Цилиндр-порш__2__	цилиндр-поршень
11	_____	заданные перемещения и закрепления Q
12	_____	заданные перемещения и закрепления Q
13	_____	заданные перемещения и закрепления Q
14	_____	множитель при перемещениях $Kq=f(x)$
15	Qy_____	заданные перемещения и закрепления Q
16	_____	сосредоточенные узловые нагрузки

Выполнен расчет перемещений при динамическом нагружении  
для 3000 шагов по времени

Модель для расчета параметров переходного процесса при подъеме груза домкратом представлена на рисунке 4.17.

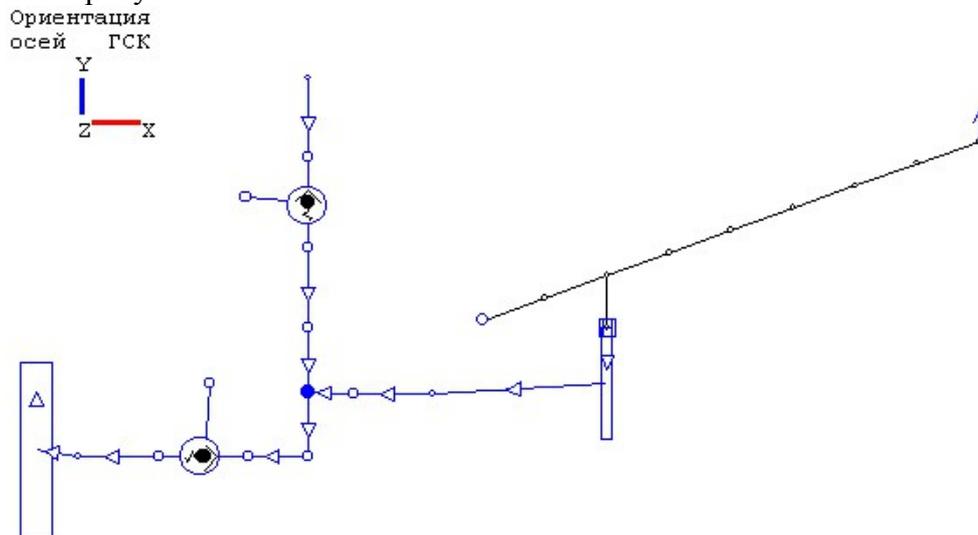


Рисунок 4.17 - Модель для расчета параметров переходного процесса при подъеме груза домкратом

**Вычисления.** Для выполнения вычислений необходимо подать команду «**Вычислить**». В появившемся после подачи этой команды меню необходимо выделить запись «**Перемещения при ДИНАМИЧЕСКОМ переходном процессе**» и нажать на кнопку «**Вычислить**».

**Просмотр результатов вычислений.** После завершения вычислений можно приступить к просмотру результатов расчета.

Изменение давления рабочего тела в трубопроводах и рабочих цилиндрах домкрата можно просмотреть в режиме анимации, в виде графиков, а также в табличном виде.

Для просмотра изменения давления во времени необходимо подать команду «Граф. Просм.» ↪ «АНИМАЦИЯ» ↪ «Анимация напряжений изменяющихся во времени» после подачи которой на экран выводится диалоговая панель «Укажите тип и атрибуты отображения перемещений:». В области «Тип перемещения» этой панели устанавливаем переключатель на опцию («- перемещения зависящие от времени или нелинейные»). В области «Способ отображения» устанавливаем переключатель на опцию «- смещением точек». Затем в области «Масштабный коэффициент» устанавливаем переключатель на опцию «- задается пользователем и равен» и вводим 1. В следующем меню «Укажите требуемый параметр» вводим « $P_g$  – давление рабочего тела». В меню «Укажите параметры анимации» вводим параметры, смысл которых ясен из приведенных в этом меню пояснений. После нажатия кнопки «Ввести» появится меню «Способ масштабирования выводимого параметра», в котором можно ввести границы значений выводимых параметров, а так же режим вывода максимального значения параметра во времени. На рисунке 4.18 показано графическое отображение распределения давлений в элементах домкрата в один из моментов времени.

Для просмотра графической зависимости изменения давления в каком-либо узле (узлах) модели от времени нужно сначала выделить этот узел (узлы) и подать команду «Граф. Просм.» ↪ «Вывести ГРАФИКИ» ↪ «...напряжений и усилий в элементах». В появившемся меню «Укажите требуемый параметр» вводим « $P_g$  – давление рабочего тела». В следующем меню «Ввод номеров узлов» предлагаются различные варианты ввода интересующих пользователя номеров узлов.

Для удобства анализа выведенных графических зависимостей необходимо выполнить команды «Граф. Просм.» ↪ «Вывести ГРАФИКИ» ↪ «Выводить значения функции в указываемых точках» или «Граф. Просм.» ↪ «Вывести ГРАФИКИ» ↪ «...аргумента и функции в указываемых точках». После подачи одной из этих команд и нажатия левой кнопки мыши при наведенном курсоре на интересующий пользователя участок графика на нем будут отображаться параметры соответствующие поданным командам. График изменения давления в одном из узлов модели домкрата, с установленными значениями функции в указанной точке, представлен на рисунке 4.19.



Рисунок 4.18 - Графическое отображение распределения давлений в элементах домкрата

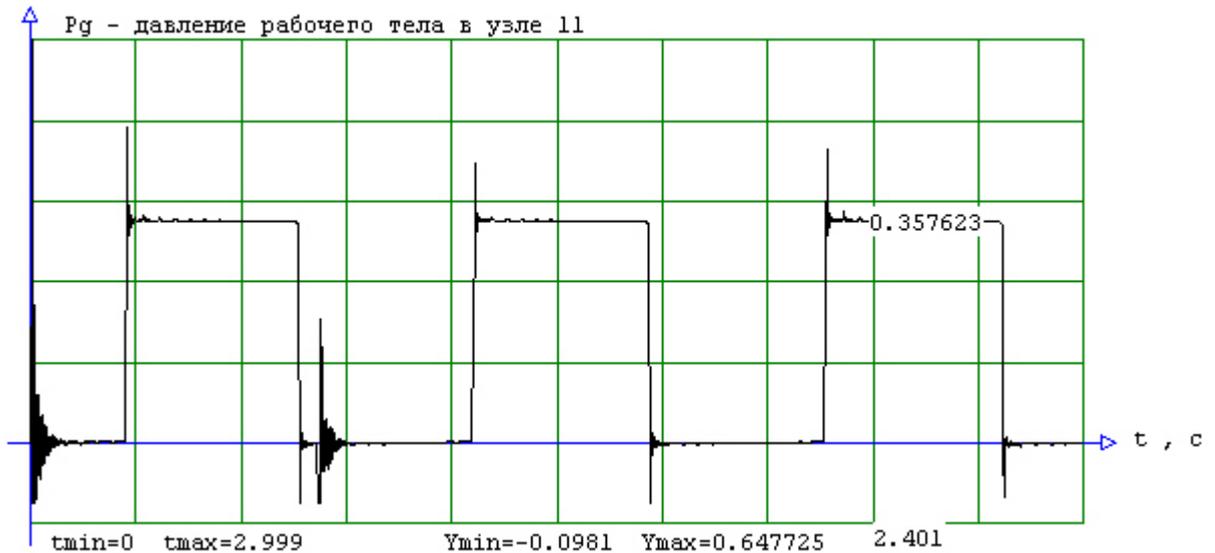


Рисунок 4.19 - График изменения давления в одном из узлов модели домкрата, установленными значениями функции в указанной точке

Функциональные зависимости, выведенные в виде графиков можно также просмотреть в табличном виде. Для этого нужно подать команду «**Граф. Просм.**» ↪ «**Вывести ГРАФИКИ**» ↪ «**Вывести графики в виде ТАБЛИЦЫ**» или «**Текст. Просм.**» ↪ «**Вывести графики в виде ТАБЛИЦЫ**».

Параметры движения штоков пневмоцилиндров и напряженно деформированное состояние рычажного механизма домкрата можно проследить визуально при просмотре анимации напряжений изменяющихся во времени, вывести в виде графиков или в табличном виде. Порядок действий и выполнения команд для просмотра этих параметров такой же, как для просмотра изменения давления.

Построенная модель находится в файле **Домкрат.zna**.