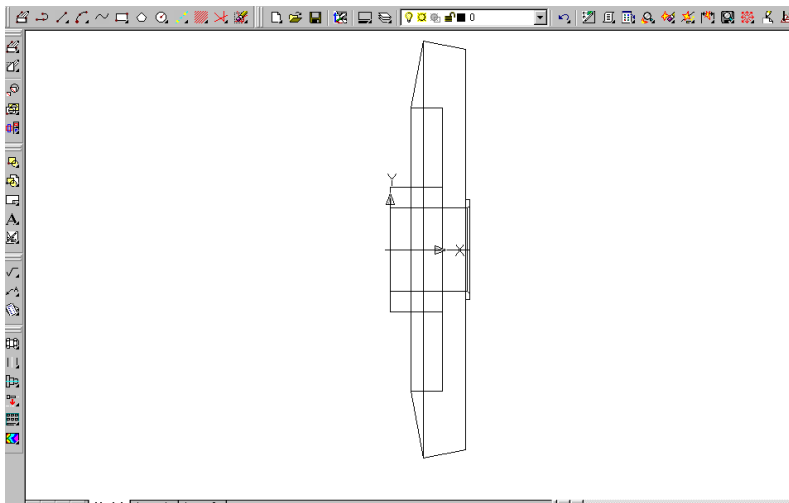


## ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА В СРЕДЕ MECHANICAL DESKTOP

### 4.1 Создание модели обода зубчатого колеса.

В качестве примера для рассмотрения метода выбрана модель конического колеса нагруженного осевой силой. С одной стороны данный пример прост и удобен для пояснения сути метода и методики работы с использованием блока **POWER PACK**, с другой стороны пример имеет практический смысл и может быть задачей конкретного инженерного исследования. В конических передачах при передаточных числах  $u > 5$  деформация обода колеса под действием осевого усилия является одним из основных факторов вызывающих концентрацию нагрузки в зацеплении. В ряде случаев, при значительных частотах вращения, зафиксированы случаи разрушения обода.

Для конечно-элементного анализа необходимо создать трехмерную твердотельную модель исследуемой детали непосредственно в **MECHANICAL DESKTOP**, **AUTOCAD MECHANICAL POWER PACK**, в **AUTOCAD** либо в других графических пакетах с возможностью создания файлов в форматах .dwg или .dxf, например, с помощью пакета **COREL DRAW**. Разработанная твердотельная модель конического зубчатого колеса модель представлена на Рис.4.1.



**Рис.4.1. Трехмерная твердотельная модель обода конического колеса**

Для вызова модуля **FEA** — finite element analysis (*метод конечного элемента*), необходимо выполнить следующие действия:

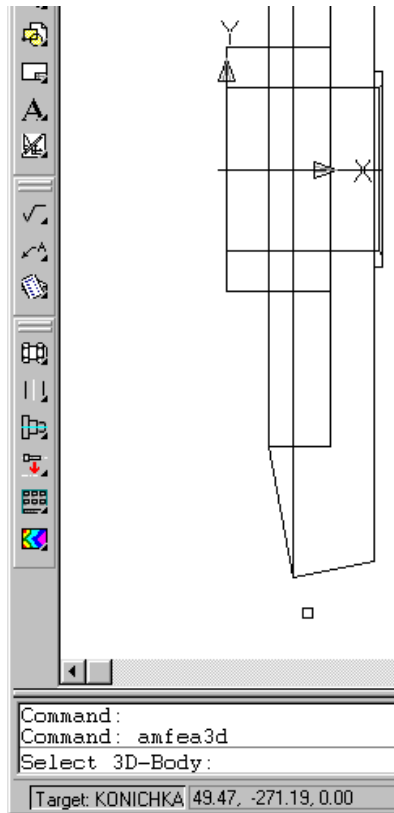
Наберите в командной строке команду **AMSFEA3D** и нажмите клавишу **Enter**. В командной строке появится запрос:

**Select 3D-Body:**

(*Выберите трехмерный объект:*).

В рабочем поле появится квадратный курсор для выбора объекта (рис. 4.2.).

Вызов модуля **FEA** — finite element analysis (*метод конечного элемента*) можно осуществить с помощью меню. В меню **CONTENT** (*содержание*) выберите строку **CALCULATIONS** (*вычисления*) и в подменю соответствующему **CALCULATIONS** строку **FEA** (Рис.4.3).



*Рис.4.2. Модель обода зубчатого колеса, командная строка и курсор*

Укажите курсором на модель конического колеса и нажмите левую кнопку мыши, появится меню модуля конечно-элементного анализа (Рис.4.4).

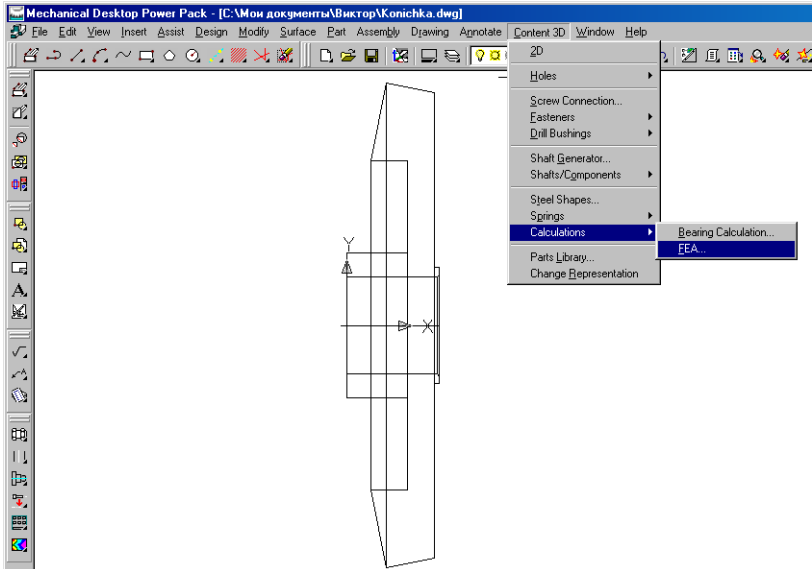


Рис.4.3. Модель обода зубчатого колеса и меню

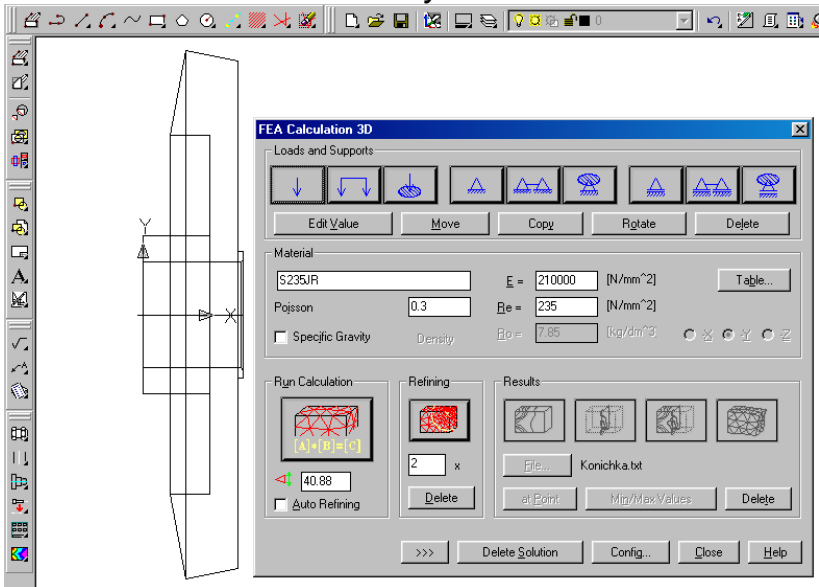


Рис.4.4. Модуль конечно-элементного анализа

На первом этапе необходимо описать условия закрепления рассчитываемого объекта. Для закрепления рассчитываемого объекта могут быть использованы следующие типы опор (слева - направо): шарнирно неподвижная опора, ряд шарнирно неподвижных опор размещенных по некоторому заданному контуру, сферический шарнир (кинематическая пара 3-го класса), шарнирно подвижная опора (кинематическая пара 4-го класса), ряд шарнирно подвижных опор размещенных по некоторому заданному контуру, подвижный сферический шарнир (Рис.4). Шарнирно неподвижная опора является кинематической парой 5-го класса. Шарнирно подвижная опора является кинематической парой 4-го класса. Сферический шарнир является кинематической парой 3-го класса. Подвижный сферический шарнир является кинематической парой 2-го класса. Класс кинематической пары из ряда шарнирно подвижных опор зависит от формы контура, по которому они размещены. Так, при размещении подвижных опор по прямой, получим пару 5 класса поступательную, а при размещении по окружности, получим пару 5 класса вращательную. Необходимо внимательно следить за тем, чтобы приложенные силы уравнивались реакциями связи. В противном случае нормальная работа модуля невозможна.

После размещения опор переходят к приложению внешних нагрузок. В качестве внешних нагрузок деталь может быть нагружена одной или несколькими сосредоточенными силами, нагрузкой распределенной по контуру и нагрузкой распределенной по площади. Для удобства задания нагрузок предусмотрено редактирование величины нагрузки **Edit Value** (*редактировать значение*) и редактирование расположения нагрузок посредством кнопок **Move** (*перемещение*) и **Rotate** (*вращение*), а также создание массивов нагрузок посредством кнопки **Copy** (*копировать*). При необходимости заданные опоры и нагрузки могут

быть удалены посредством кнопки **Delete** (*удалить*) (см. рис. 4.4).

Осевое усилие в зацеплении воспринимается торцом зубчатого венца конического колеса взаимодействующим с буртиком на валу.

Выберите в качестве опоры ряд шарнирно подвижных опор размещенных по контуру.

Программа запрашивает поверхность, по которой приложены реакции

**Position of support on the body:**

*(Расположение реакций на поверхности тела:).*

и расположение контура:

**Select loop:**

*(Выберите контур:).*

Укажите поверхность, к которой приложены реакции и нажмите левую кнопку мыши.

Поступит запрос:

**Specify start point on loop <Closed loop>:**

*(Выберите начальную точку контуру <контур замкнутый>:).*

Установите курсор в командной строке и нажмите клавишу **Enter**. Появится окно, в котором программа запрашивает расположение осевых реакций – вдоль оси  $x$  либо по нормали к поверхности. (Рис. 4.5). В данном случае это не имеет значения. Выберем расположение реакций вдоль оси  $x$ .

В командной строке появляется запрос

**Specify angle or [Change x-axis/xyz-components/Base plane/Two points] <Default>:**

*(Выберите угол или [Измените положение оси  $x$ /Хуз-система координат/Базовая*

плоскость/[Две точки] <Значение по умолчанию>:).

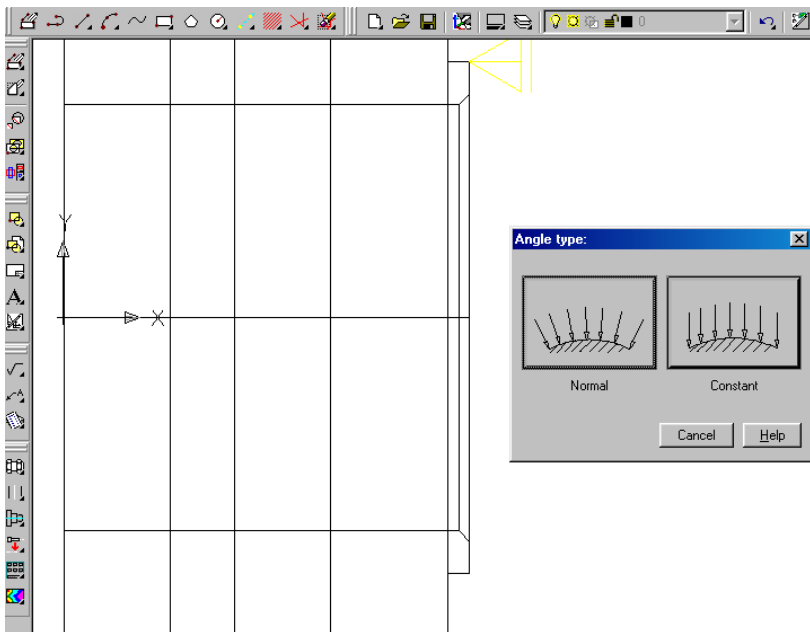


Рис.4.5. Вид окна для выбора типа реакции опор

Необходимо выбрать угол между направлением реакции и осью  $x$  или, при необходимости, сменить систему координат, плоскость в которой расположен контур, либо задать новое расположение оси  $x$  двумя точками. Предусмотрена возможность, задать произвольный угол между реакциями и осью  $x$  либо между реакциями и нормалью к поверхности в точке приложения реакции (Рис.4.6).

Укажите угол между осью направлением реакции и  $x - 90^\circ$ .

**Specify angle or [Change x-axis] <Default>:**

(Выберите угол или [Измените положение оси  $x$ ] <Значение по умолчанию>:).

Повторно укажите в командной строке угол равный  $90^\circ$ , так как локальная ось  $x$  лежит в плоскости торца.

Рациональнее указать, что реакции направлены по нормали к поверхности торца. Тогда непосредственно появится запрос:

**Specify angle or [Change x-axis] <Default>:**

*(Выберите угол или [Измените положение оси  $x$ ] <Значение по умолчанию>:).*

И в этом случае в командной строке необходимо указать угол равный  $0^\circ$ , так как локальная ось  $x$  направлена перпендикулярно плоскости торца.

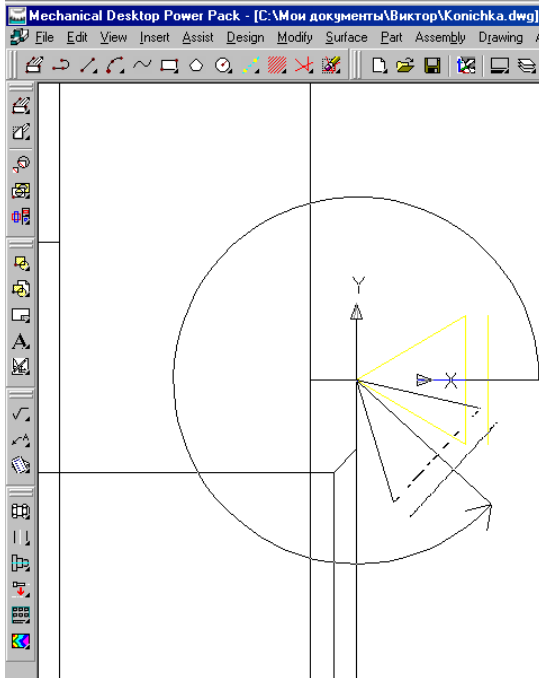
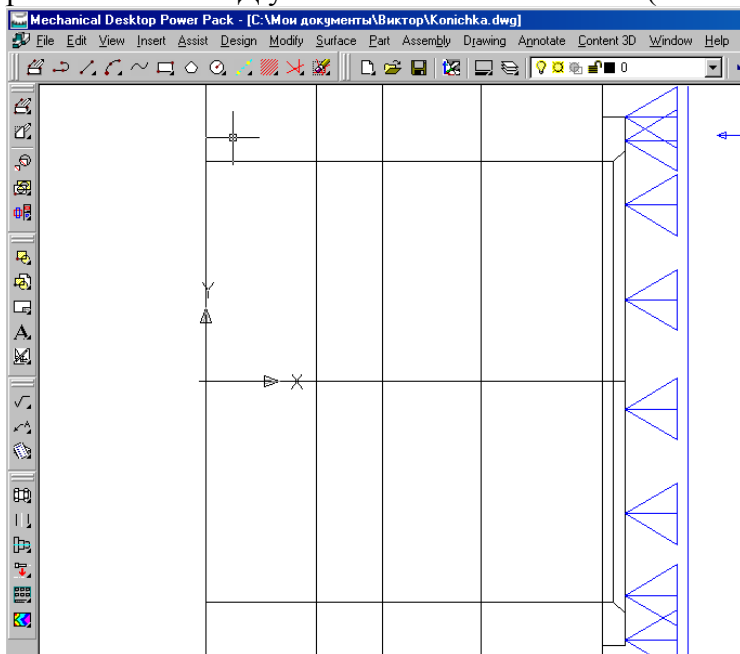


Рис.4.6. Выбор направления реакции опор



Заданные опоры изображены на чертеже в соответствии с принятыми в ЕСКД условными обозначениями (Рис.4.7).



*Рис.4.7. Расположение реакции опор*

В радиальном направлении нагрузка воспринимается валом. Для закрепления колеса можно использовать ряд шарнирно неподвижных опор размещенных по посадочному отверстию, ряд шарнирно подвижных опор размещенных по посадочному отверстию, два ряда шарнирно неподвижных опор, два ряда шарнирно подвижных опор и т.д. Можно располагать ряды опор в различных, по длине ступицы, сечениях.

Для выбора правильной расчетной схемы необходимо обладать опытом проектирования с использованием метода конечных элементов. В противном случае необходимо сравнить характер полученных результатов с данными полученными аналитическими методами и подобрать тип и

расположение опор в наибольшей степени отвечающим условиям решаемой задачи.

Для простоты рассматриваемого примера, в котором исследуется изгиб обода под действием осевого усилия, не будем прикладывать к колесу окружную силу. Тогда отпадает необходимость в приложении реакций фиксирующих колесо от поворота. В используемой модели колеса окружная сила может быть воспринята рядом шарнирно неподвижных опор, что соответствует посадке колеса на вал с натягом.

В рассмотренном примере окружная сила не приложена, колесо от поворота не фиксируется и тогда наиболее близким к реальной конструкции крепления колеса на валу, является размещение двух рядов шарнирно подвижных опор в левом и правом торцовых сечениях ступицы. При размещении опор на кромке между отверстием и торцом первоначально опоры предполагаются размещенными по торцу, и затем требуется ряд действий, для того чтобы задать расположение опор по посадочной поверхности. Поэтому рационально выполнить фаску, которая не влияет на результат расчетов, но уменьшает количество необходимых шагов.

Выбирают в меню модуля **FEA** шарнирно подвижные опоры размещенные по контуру.

В командной строке появляется запрос:

**Select loop**

*(Выберите контур:)*.

Курсором укажите на линию пересечения посадочной поверхности и поверхности фаски.

В командной строке появляется запрос

**Specify start point on loop <Closed loop>:**

*(Выберите начальную точку контуру <контур замкнутый>:)*.

Введите в командную строку **Closed loop** или просто **C**.

Появится окно, в котором программа запрашивает расположение осевых реакций – вдоль оси  $x$  либо по нормали к поверхности. (Рис. 4.8).

В командной строке запрос:

**Definition of support**

*(задайте тип реакций)*

Выберем расположение реакций по нормали к поверхности.

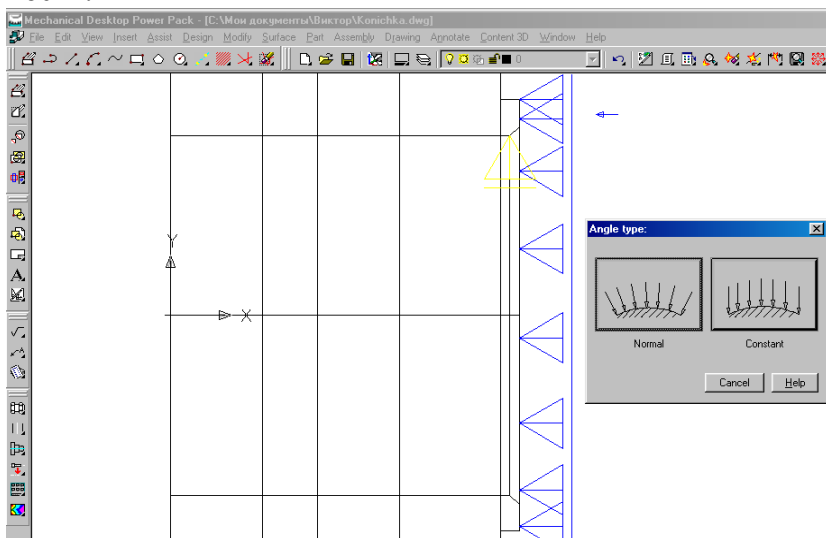


Рис.4.8. Вид окна для выбора типа реакции опор

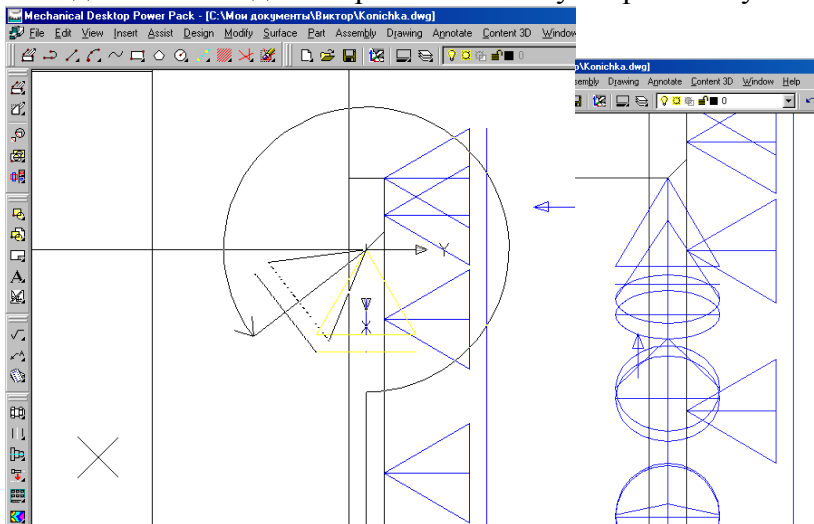
Затем предусмотрена возможность, задать угол между нормалью и направлением реакции. (Рис.4.9). Ось  $x$  направлена по радиусу.

В командной строке появляется запрос:

**Specify angle or [Change x-axis] <Default>:**

*(Выберите угол или [Измените положение оси x] <Значение по умолчанию>:).*

Задаем в командной строке значение угла равное нулю.

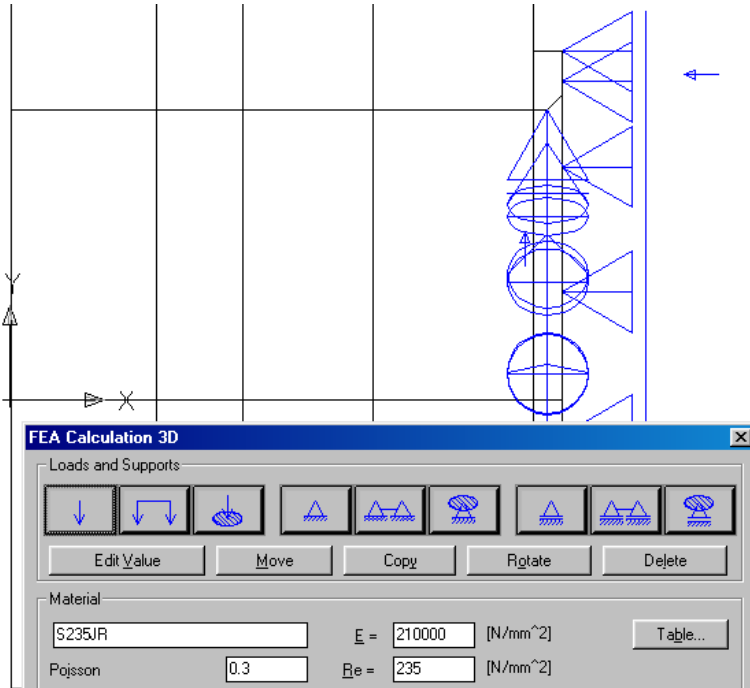


**Рис.4.9.**  
*Выбор направления  
реакции опор*

**Рис.4.10.**  
*Шарнирно подвижные  
опоры воспринимающие  
осевую и радиальную реакции*

Визуализация расположения опор выполнена с учетом проецирования на плоскость экрана (Рис. 4.10).

Затем появляется меню модуля **FEA** и предоставляется возможность задать дополнительные опоры. Выбираем ряд шарнирно подвижных опор размещенных по левому торцу посадочного отверстия (Рис.4.11).



*Рис.4.11. Шарнирно подвижные опоры, размещенные по контуру — вторая кнопка справа*

Выбранная поверхность отображается в виде пунктира (Рис.4.12).

В командной строке появляется запрос:

**Specify start point on loop <Closed loop>:**

*(Выберите начальную точку контуру <контур замкнутый>:).*

Введите в командную строку **Closed loop** или просто **C**.

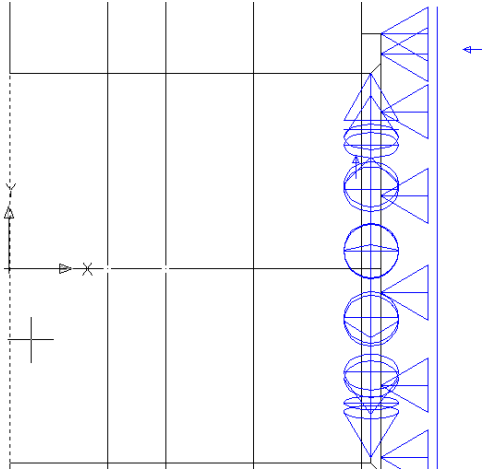


Рис.4.12. Выбранный контур размещения опор

Появится окно, в котором программа запрашивает расположение осевых реакций – вдоль оси  $x$  либо по нормали к поверхности. (Рис. 4.13а).

В командной строке запрос:

**Definition of support**

*(задайте тип реакций)*

Выберем расположение реакций по нормали к поверхности.

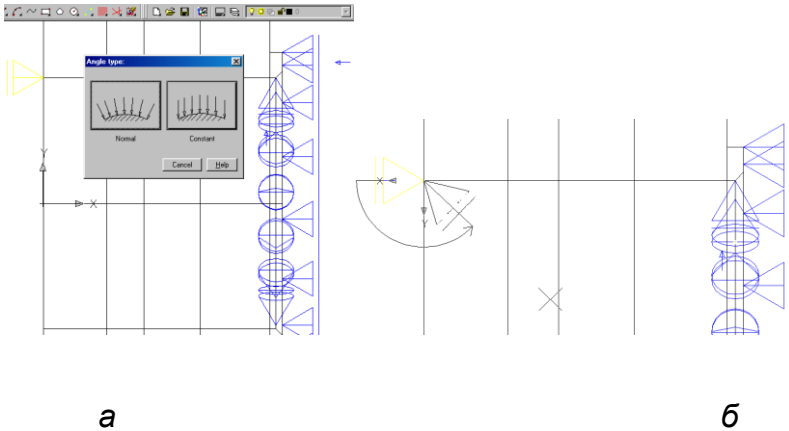
Затем предусмотрена возможность, задать угол между нормалью и направлением реакции. (Рис.4.13б). Ось  $y$  направлена по радиусу.

В командной строке появляется запрос:

**Specify angle or [Change x-axis] <Default>:**

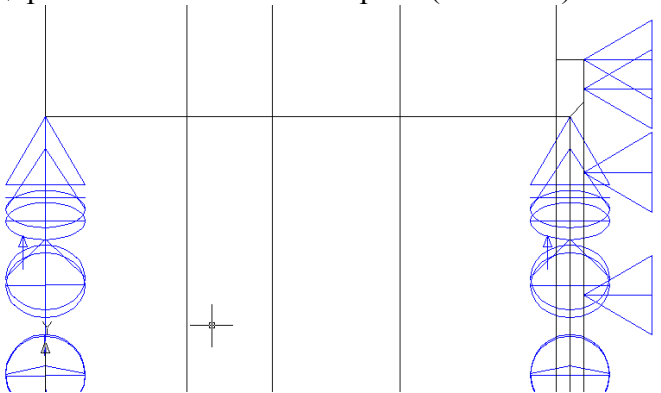
*(Выберите угол или [Измените положение оси  $x$ ] <Значение по умолчанию>:).*

Задаем в командной строке значение угла равное  $90^\circ$ .



*Рис.4.13. Размещение опор по левому торцу*

Визуализация расположения опор выполнена с учетом проецирования на плоскость экрана (Рис. 4.14).



*Рис.4.14. Закрепление модели обода конического колеса*

Следующий этап — приложение внешней нагрузки осевой силой изгибающей обод. Выбираем сосредоточенную силу (первая кнопка слева) из меню модуля конечного элемента **FEA** (Рис. 4.15а). Выбрать сосредоточенную силу

можно с помощью команды **AMPOWEREDIT**. Последует запрос

**Position of load on the body: Select a surface**

*(Положение точки приложения силы на поверхности тела. Выберите поверхность):*

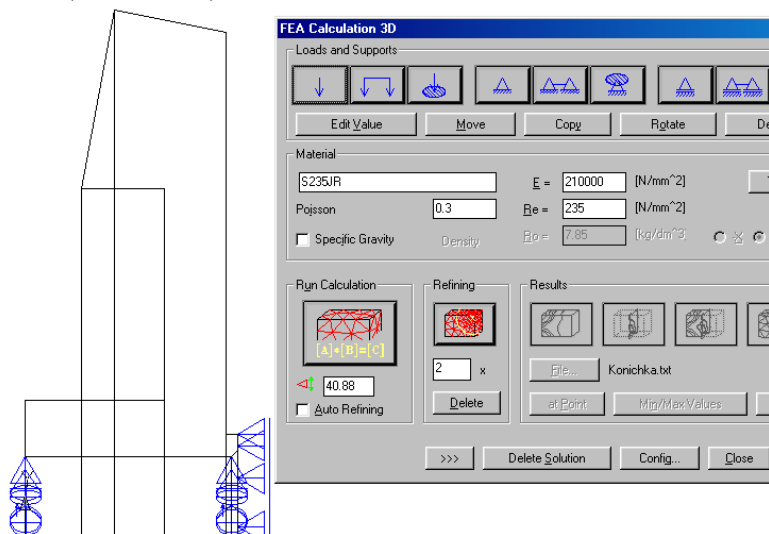
Необходимо указать курсором коническую поверхность зубчатого венца.

Последует запрос

**Specify distance or [next base/Offset]:**

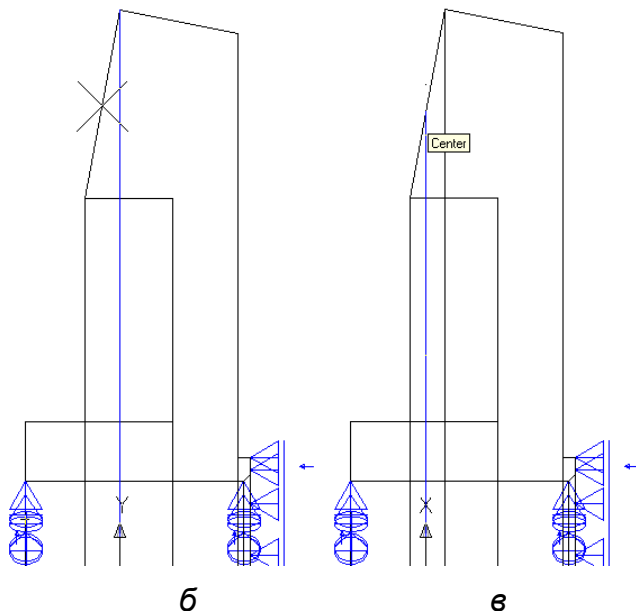
*(Выберите расстояние или [другую поверхность отсчета/отменить команду]):*

Необходимо указать дистанцию от левого торца курсором — посередине зубчатого венца (Рис. 4.15б) или ввести число в командную строку. В точку пересечения плоскости, задающей расстояние точки приложения силы от торца, и оси колеса автоматически переносится начало координат (Рис. 4.15в).



a





**б** **в**  
 Рис.4.15. Выбор типа и поверхности приложения нагрузки

Перенесите начало координат непосредственно в точку приложения силы с помощью команды **\_UCS**.

Последует запрос:

**Enter an option**

**[New/Move/orthoGraphic/Prev/Restore/Save/De1/Apply/?/World]**

(Следующая из опций

[новая/переместить/ортогональная/предыдущая/восстановить/сохранить/удалить/применить/?/глобальная])

Введите в командную строку **Move**.

Последует запрос

**Specify new origin point or**

**[Zdepth]<0,0,0>:**

*Выберите новую точку начало системы координат [в плоскости с другой координатой Z]  $\langle 0, 0, 0 \rangle$ :*

Задайте координаты точки приложения силы к ободу колеса или непосредственно укажите курсором. Система координат переместится непосредственно в указанную точку. Вновь вызовите меню модуля **FEA**, для этого наберите в командной строке команду **AMSFEA3D** и нажмите клавишу **Enter**. В командной строке появится запрос:

**Select 3D-Body:**

*(Выберите трехмерный объект:).*

В рабочем поле появится квадратный курсор для выбора объекта. Укажите курсором на модель колеса

Последует запрос

**Specify angle or [Change x-axis]:**

*(Выберите угол или [измените ось x]):*

Введите угол  $0^\circ$ , при этом ось  $x$  расположится вдоль, а ось  $z$  перпендикулярно образующей конуса зубчатого венца (Рис. 4.16а).

Последует запрос:

**Specify angle or [Change x-axis/XYZ-components/Base plane/Two points]:**

*(Выберите угол или [измените ось x/компоненты системы координат/ плоскость с другой координатой Z/две точки]):*

Выберите **Two points**, и задайте положение осевой силы двумя точками (Рис. 4.16б).

Последует запрос:

**Specify value of load  $\langle 1000 (N) \rangle$ :**

*(Выберите величину нагрузки  $\langle$ по умолчанию  $1000 (N)$  $\rangle$ ):*

Введите 1650 N — величина осевой силы рассчитана по зависимостям для усилий в зацеплении конических передач. К модели колеса приложено усилие в виде вектора и указана его величина и размерность.

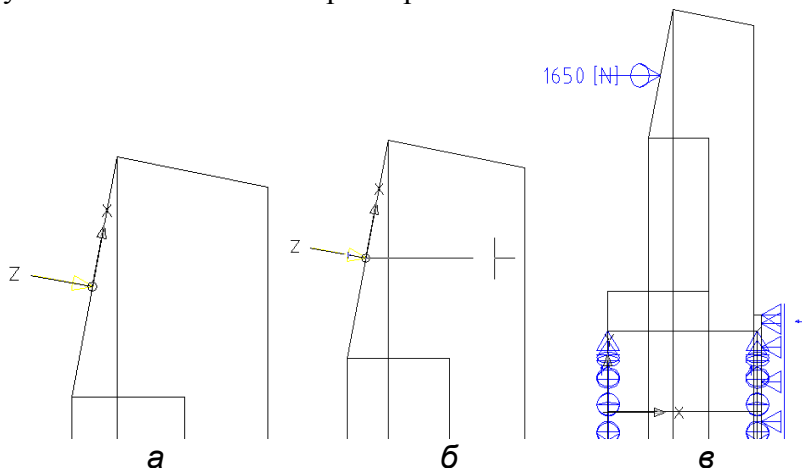


Рис.4.16. Усилие, приложенное к модели

Выберем материал зубчатого колеса и его механические характеристики. В модуле FEA содержится библиотека материалов в соответствии со стандартами ANSI и DIN (Рис. 4.17).

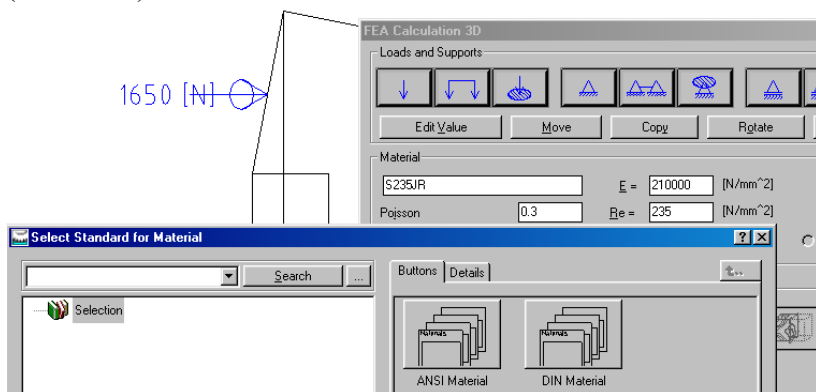


Рис.4.18. Выбор марки стали

По умолчанию в качестве материала колеса задана сталь S235JR. Проведем расчет для стали S235J2G4, которая обладает более высокими прочностными характеристиками (Рис. 4.18). Указаны коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$  (Poisson 0,3), модуль упругости второго рода ( $E = 210000\text{Н/мм}^2$ ), допускаемые напряжения  $[\sigma]$  ( $R_e = 235\text{Н/мм}^2$ ).

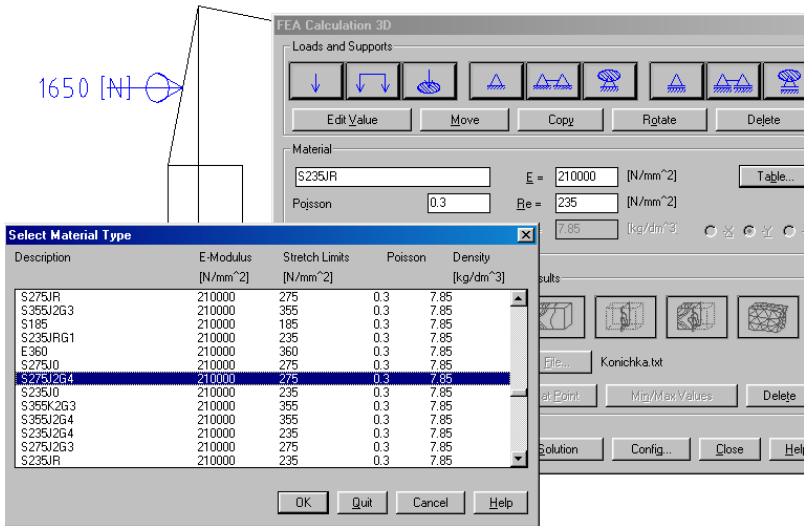


Рис.4.17. Выбор механических характеристик модели

Существует возможность учесть силы веса. Для этого необходимо поставить флажок в окне **Specific Gravity**. Тогда в качестве исходных данных добавляется плотность **Density** ( $R_o = 7,85\text{кг/см}^3$ ).

Заданием механических характеристик завершается создание модели обода зубчатого колеса и созданы все необходимые предпосылки для анализа напряженно-деформированного состояния модели обода зубчатого колеса.

## 4.2 Анализ напряженно-деформированного состояния модели обода зубчатого колеса.

Наряду с заданием условий закрепления модели, важнейшим этапом влияющим на корректность и точность решения, является разбиение модели на конечные элементы. Существует возможность автоматического разбиения **Auto Refining**. Шаг разбиения в данном случае составляет 40,88 (Рис.4.19). В наиболее важной для исследования части детали шаг разбиения может быть уменьшен. Для этого в окне **Refining** необходимо указать, во сколько раз уменьшен шаг разбиения (например, в два раза), а затем указать границы области с уменьшенным шагом.

Управление разбиением модели на конечные элементы из командной строки невозможно.

Обычно точность результата, получаемая с использованием автоматического разбиения удовлетворительна. При уменьшении шага разбиения необходимо учитывать, что расчеты по методу конечного элемента требуют значительных ресурсов оперативной памяти. Опыт использования программного комплекса показывает, что использование уменьшенного шага разбиения в исследуемой области возможно при оперативной памяти в полтора и более гигабайт.

В процессе счета отображается информация о числе рассмотренных узлов и элементов, а также объем задействованной виртуальной памяти (Рис.4.20). При большом числе элементов и недостатке оперативной памяти расчет может быть не завершен. В таком случае необходимо увеличить объем виртуальной памяти зарезервированный Windows.

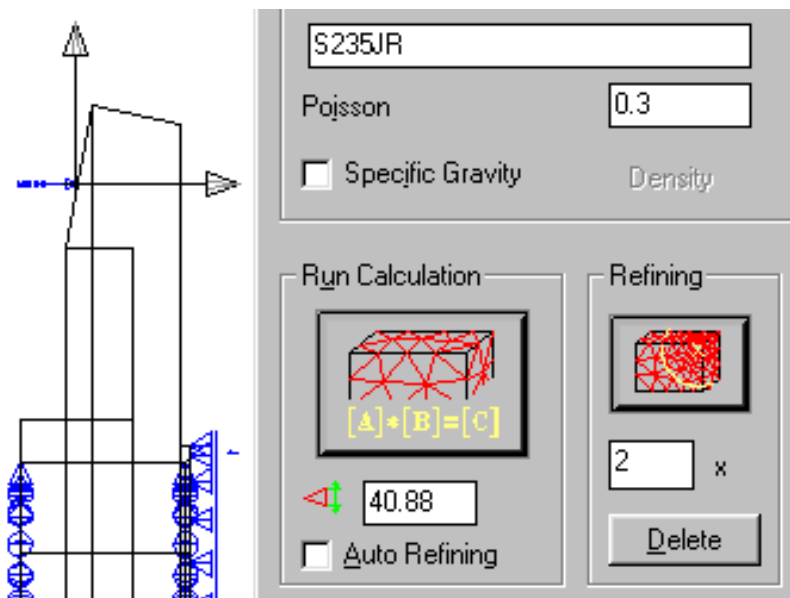


Рис.4.19. Выбор шага разбиения

По завершению разбиения модели на конечные элементы появится сообщение:

**Calculation of Equation System**

*(Решение системы уравнений)*

**Calculation of Stresses**

*(Вычисление напряжений)*

Последует запрос

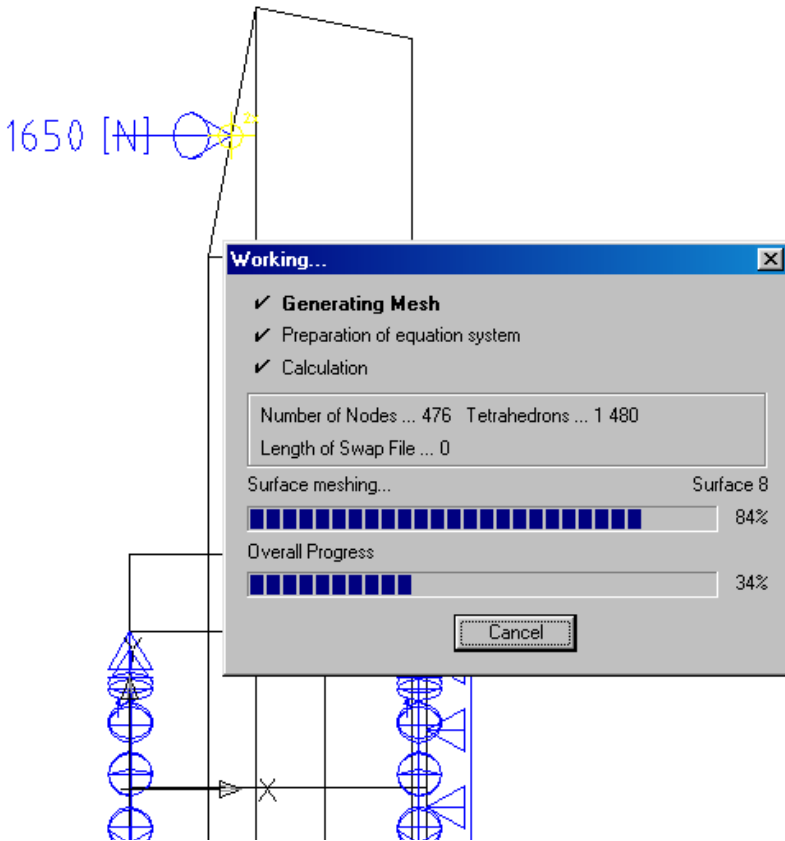
**Specify base point or displacement <in boundary>:**

*(Задайте расположение базовой точки <граничные условия>):*

Выберите одну из точек внутри модели

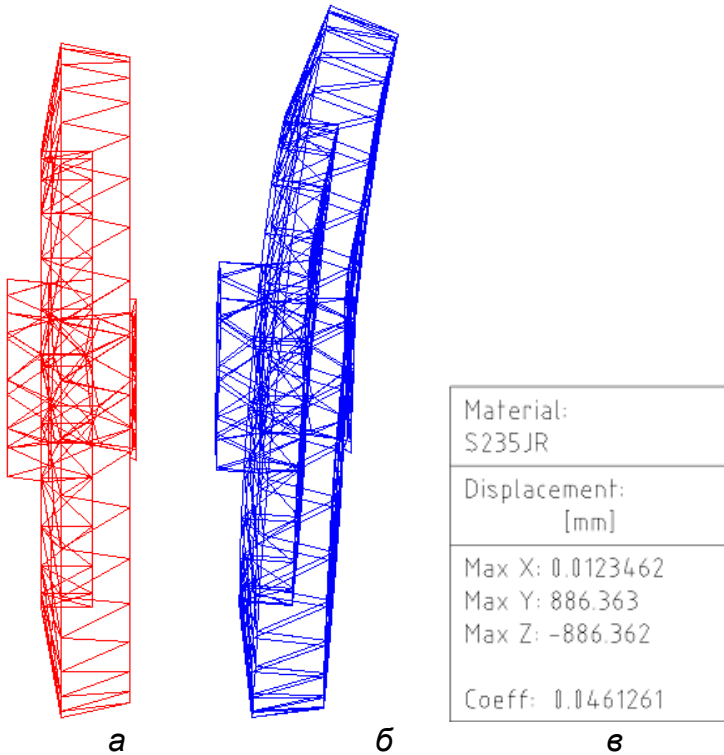
**Specify second point of displacement:**

*(Задайте расположение второй точки <граничные условия>):*



*Рис.4.20. Отчет о процессе создания конечно-элементной сетки*

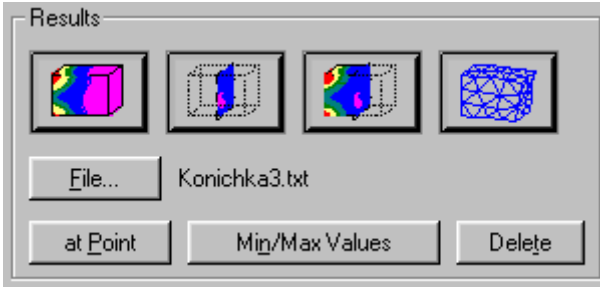
Укажите одну из точек вне модели. Появится изображение модели колеса с наложенной на него конечно-элементной сеткой (Рис.4.21а).



*Рис.4.21. Исследование деформации обода*

Модуль конечно-элементного анализа дает возможность определить напряжения в модели (левая кнопка), определить напряжения в любом сечении (вторая кнопка слева), определить напряжения в выбранной части модели (третья кнопка слева) и деформацию модели (Рис.4.22).





*Рис.4.22. Исследование деформации обода*

Для расчета деформированного конечно-элементного каркаса введите в командную строку **AMPOWEREDIT** либо нажмите на правую кнопку.

Последует запрос:

**Specify base point or displacement <in boundary>:**

*(Задайте расположение базовой точки <граничные условия>):*

Выберите одну из точек внутри модели

**Specify second point of displacement:**

*(Задайте расположение второй точки <граничные условия>):*

Появится изображение деформированного конечно-элементного каркаса, который позволяет наглядно представить характер деформации модели (см. Рис.4.21б).

Последует запрос:

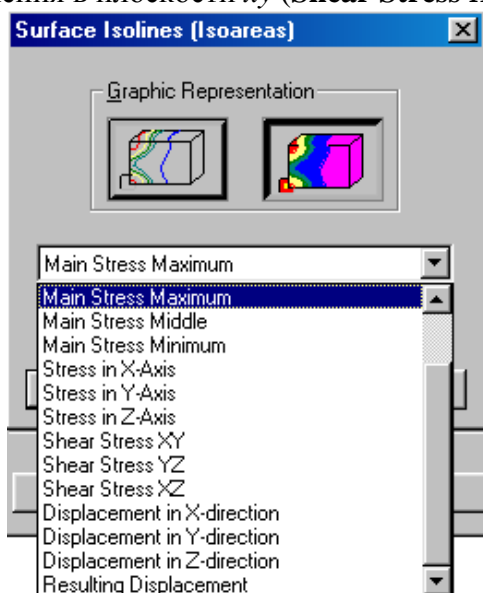
**Specify insertion point or [Paper space]:**

*(Задайте точку вставки или [пространство листа]):*

Укажите произвольную точку в пространстве модели или в пространстве листа появится таблица с данными расчета (см. Рис.4.21в). При этом в таблице указан матери-

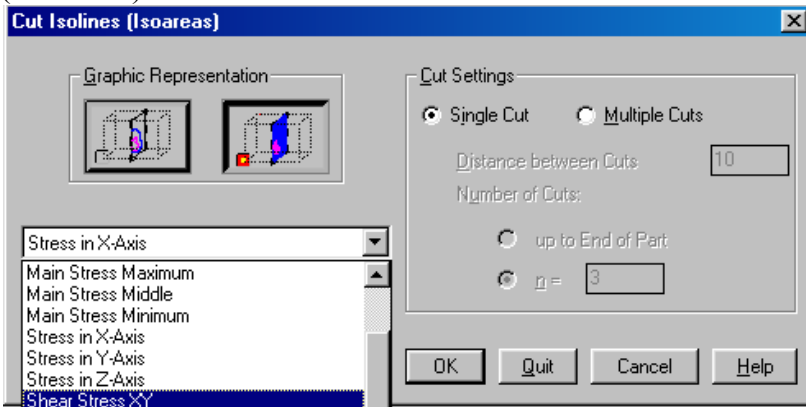
ал колеса (сталь S235JR), размерность перемещений (mm) и максимальные перемещения по осям. Перемещение по оси  $x = 0.0123462$ мм представляет собой искомую деформацию модели. Перемещения по осям  $y$  и  $z$  лишены физического смысла т.к. модель не зафиксирована от поворота.

Для возврата в меню конечно-элементного модуля введите в командную строку **AMPOWEREDIT**. Для исследования объемно-напряженного состояния модели нажмите правую кнопку (см. Рис.4.22). Предоставляется возможность графического представления напряжений в плоскости экрана в виде изолиний или изоповерхностей (Рис. 4.23). Можно рассчитать максимальные главные напряжения (**Main Stress Maximum**), проекцию максимальных главных напряжений на ось  $x$  (**Stress in X-Axis**), касательные напряжения в плоскости  $xy$  (**Shear Stress XY**).



*Рис.4.23. Исследование  
объемно-напряженного состояния*

Для данного случая наиболее информативным является расчет касательных напряжений в плоскости  $xu$ , для определения напряжений в заданной плоскости воспользуемся второй справа кнопкой (см. Рис.4.22). Как и при расчете объемных напряжений, информация может быть представлена в виде изолиний (**Isolines**) и изоповерхностей (**Isoareas**). Напряжения могут быть найдены в сечении модели одной плоскостью (**Single cut**) или в сложном сечении образованном несколькими плоскостями (**Multiple cuts**) (Рис. 4.24).



*Рис.4.24. Исследование напряжений в заданной плоскости*

Введите команду **AMPOWEREDIT**, нажмите вторую кнопку справа (см. Рис.4.22), выберите представление информации в виде изоповерхности (см. Рис.4.23), выберите сечение одной плоскостью.

Появится запрос:

**Specify first point of cut plane or  
[Plane and offset/point and Direction]:**

*(Выберите первую точку секущей плоскости  
или [Плоскость или отменить/точка и  
направление]):*

Выберем задание плоскости тремя точками. Укажите произвольную точку модели.

Появится запрос:

**Specify second point:**

*(Выберите вторую точку)*

Укажите вторую точку, не совпадающую с первой.

Появится запрос:

**Specify third point:**

*(Выберите третью точку)*

Укажите третью точку модели.

Появится запрос:

**Specify direction of view [Flip/Accept]**

**<Accept>:**

*(Выберите направление проецирования [Повернуть на 180°/Согласиться] <Согласиться>):*

Введите **Accept**.

Появится запрос:

**Insert results in [Cut plane/Ucs/Paper space] <Cut plane>:**

*(Вставить результаты в [Текущую плоскость/Сменить систему координат/Плоскость листа] <Текущая плоскость>):*

Выберите **Cut plane**.

**Specify base point or displacement <in boundary>:**

*(Выбрать базовую точку или расположение <граничные условия>):*

Укажите крайнюю точку модели

**Specify second point of displacement:**

*(Выберите вторую точку перемещения)*

Укажите точку, в которую необходимо поместить сечение модели с наложенными на него изоповерхностями напряжений (Рис. 4.25).

**Specify insertion point or [Paper space] :**

*(Выберите точку вставки или [поверхность листа]) :*

Укажите точку, в которую будет помещена таблица с результатами расчетов (Рис. 4.25).

В таблице указана марка стали — **S235JR**, предел текучести стали — **235(Yield Point)**, размерность рассчитанных напряжений в МПа ( $\text{N/mm}^2$ ). Далее указаны интервалы расчета напряжений и соответствующий им цвет. Максимальное напряжение, с учетом знака, составляет 1,24 Мпа.

Для изменения визуального представления напряженно-деформированного состояния можно изменить интервалы напряжений и соответствующий им цвет (Рис. 4.26).

В меню конечно-элементного модуля необходимо убрать флажок в окошке — выбор интервалов автоматически (**Set Intervals Automatically**). Появится меню выбора интервалов вручную.

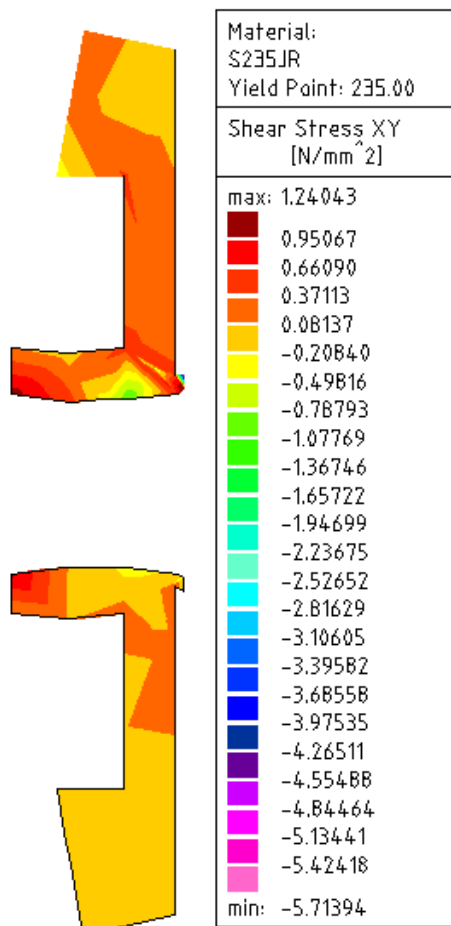
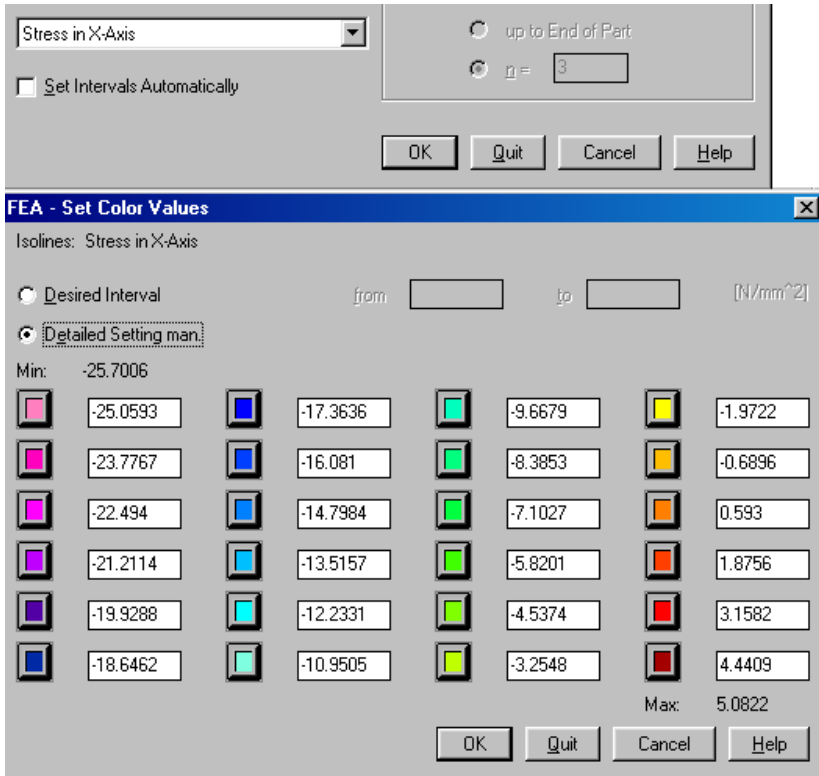


Рис.4.25. Результаты расчета напряжений



*Рис.4.26. Выбор интервалов представления напряжений*

Имеется возможность расчета напряжений в любой выбранной плоскости (Рис. 4.27)

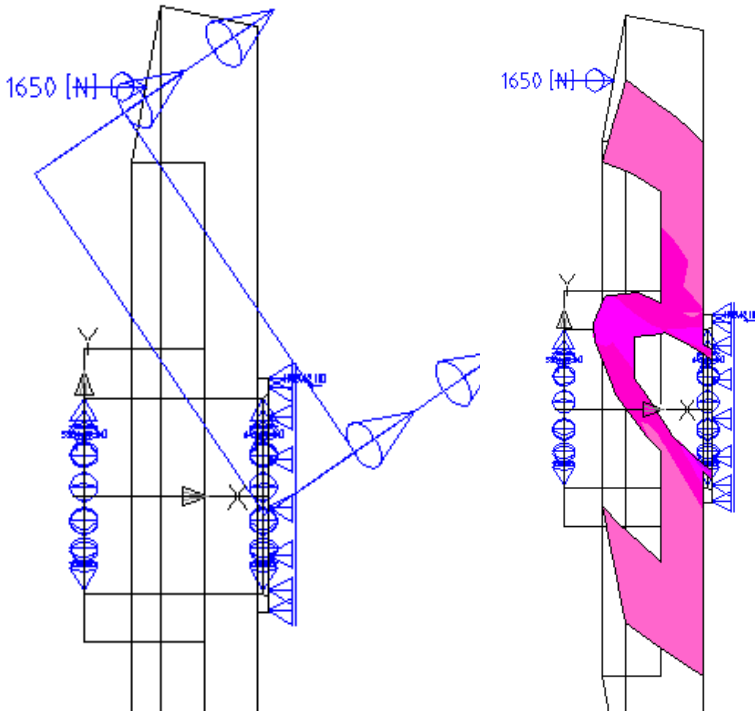


Рис.4.27. Расчет напряжений в заданной плоскости

Расчет напряжений выполнен для всех узлов конечных элементов. Для того чтобы узнать напряжение в определенной точке необходимо нажать кнопку **at Point** (см. Рис. 4.22).

Появится запрос:

**Specify point:**

*(Выберите точку) :*

В командной строке появится отчет

**Node: (209.14,1294,0)**

*Узел конечного элемента: (координаты узла в мировой системе координат  $x, y, z$ )*



**Displacement dx = 0.0109616 [mm]**

**dy = 0.1163435E-02 [mm]**

**dz = -0.1270957E-02 [mm]**

**d = 0.0110962 [mm]**

*Перемещения узла в миллиметрах направлении осей  $x, y, z$  —  $dx, dy, dz$  и суммарное  $d$ .*

**Stress in XYZ-axis**

**sx = -0.3480980 [N/mm<sup>2</sup>]**

**sy = -0.5120751 [N/mm<sup>2</sup>]**

**sz = -0.1106023 [N/mm<sup>2</sup>]**

*Проекции главного напряжения в МПа направлении осей  $x, y, z$  —  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ .*

**Shear Stress**

**txy = 0.2721706 [N/mm<sup>2</sup>]**

**tyz = -0.0376931 [N/mm<sup>2</sup>]**

**txz = 0.0372652 [N/mm<sup>2</sup>]**

*Касательные напряжения в МПа в плоскостях  $xy, yz, xz$  —  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ .*

**Main Stress**

**s1 = -0.1045408 [N/mm<sup>2</sup>]**

**s2 = -0.1473826 [N/mm<sup>2</sup>]**

**s3 = -0.7188520 [N/mm<sup>2</sup>]**

*Главные напряжения максимальные, средние и минимальные —  $\sigma_{max}, \sigma_m, \sigma_{min}$ .*

**Tresca Stress sTr = 0.6143111 [N/mm<sup>2</sup>]**

**Max Shear maxT = 0.3071556 [N/mm<sup>2</sup>]**

**Von Mises svM = 0.5940500 [N/mm<sup>2</sup>]**

Рассчитываются также напряжения  $\sigma_{tr}$ ,  $\tau_{max}$ ,  $\sigma_{vm}$ .

Отдельно сформирована таблица максимальных и минимальных значений напряжений и перемещений Рис. 4.28. Для вызова таблицы значений служит кнопка **Min/Max Values** (см. Рис. 4.22). Для удаление неверных или лишних расчетных данных служит кнопка **Delete**. При нажатии на эту кнопку появляется запрос:

**Select result or [Paper space/All]:**

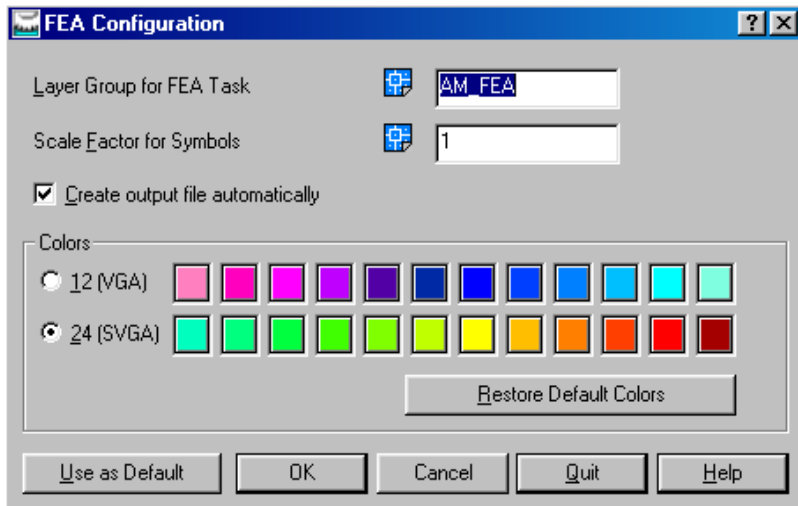
*(Выберите результат или [Пространство листа/Все]) :*

В поле чертежа появляется квадратный курсор, которым необходимо указать на удаляемый объект, это может быть сечение с наложенными изолиниями напряжений, таблица с результатами расчетов и др. После нажатия на правую клавишу мыши объект будет удален, модель, и остальные элементы выполненного расчета сохраняются. Можно полностью удалить все полученные результаты, включая разбиения на конечные элементы с помощью кнопки **Delete Solution**. С помощью кнопки **Config** можно получить доступ к управлению экранном представлением информации (Рис. 4.29). Данные расчета располагаются по умолчанию в слое **AM FEA**, для визуализации напряженно-деформированного состояния используется 24 цвета.

|                             |            |            |                      |
|-----------------------------|------------|------------|----------------------|
| Von Mises Stress            | 0.0409269  | 30.457082  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Tresca Stress               | 0.0445850  | 34.970790  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Max. Shear Stress           | 0.0222925  | 17.485395  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Main Stress Maximum         | -6.5646258 | 8.2017739  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Main Stress Middle          | -7.7623015 | 2.8002660  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Main Stress Minimum         | -26.769016 | 1.3125933  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Stress in X-Axis            | -25.700573 | 5.0821665  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Stress in Y-Axis            | -7.7431570 | 7.2183859  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Stress in Z-Axis            | -6.6593578 | 2.7033589  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Shear Stress XY             | -5.7139406 | 1.2404309  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Shear Stress YZ             | -3.1424849 | 1.2446671  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Shear Stress XZ             | -0.9141271 | 1.2830067  | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Displacement in X-direction | 0          | 0.0169162  | [mm]                 |
| Displacement in Y-direction | 0          | 0.4598059  | E-02 [mm]            |
| Displacement in Z-direction | 0.2656555  | -0.1942451 | E-02 [mm]            |
| Resulting Displacement      | 0.5886820  | 0.0172758  | E-04 [mm]            |

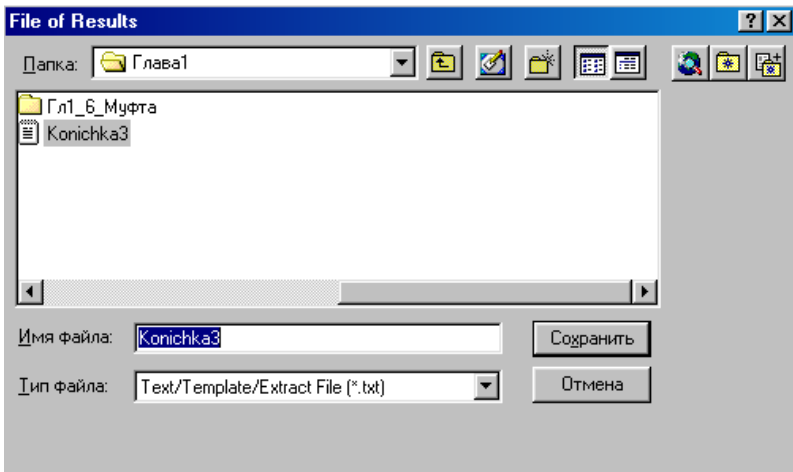
Buttons: OK, Quit, Help

*Рис.4.28. Таблица максимальных и минимальных значений напряжений и перемещений*



*Рис.4.29. Управление экраным представлением решения*

Все результаты расчета сводятся в файл отчета в формате **.txt** (см. Рис. 4.22), в нашем примере файл отчета носит название **Коничка3.txt**. Он формируется нажатием кнопки **File**. После нажатия кнопки появляется окно сохранения данных с помощью которого можно скорректировать название и месторасположение файла отчета (Рис. 4.30). Содержание файла отчета приведено в таблице 1.



*Рис.4.30. Сохранение файла отчета*

|                  |         |                                |                      |            |                      |                      |         |
|------------------|---------|--------------------------------|----------------------|------------|----------------------|----------------------|---------|
| Solution:        |         | FEA-3D                         |                      |            |                      |                      |         |
| Material:        |         | S235JR                         |                      |            |                      |                      |         |
| Elastic modulus  |         | 210000.00 [N/mm <sup>2</sup> ] |                      |            |                      |                      |         |
| Poisson constant |         | 0.30                           |                      |            |                      |                      |         |
| Density          |         | 7.85 [kg/dm <sup>3</sup> ]     |                      |            |                      |                      |         |
| Values in Nodes  |         |                                |                      |            |                      |                      |         |
| -----            | Load    | Displ.                         | Von-Mises            | in direct. | Shear Str.           | Main Str.            |         |
| Num.             |         |                                |                      |            |                      |                      |         |
| X-Coord          | Fx      | dx,dy,dz                       | Max Shear            | sx         | Txy                  | s1                   |         |
| Y-Coord          | Fy      | dRes                           | Tresca               | sy         | Tyz                  | s2                   |         |
| Z-Coord          | Fz      |                                |                      | sz         | txz                  | s3                   |         |
| Supp.            |         |                                |                      |            |                      |                      |         |
|                  | [N]     | [mm]                           | [N/mm <sup>2</sup> ] |            | [N/mm <sup>2</sup> ] | [N/mm <sup>2</sup> ] |         |
| =====            |         |                                |                      |            |                      |                      |         |
| =====            |         |                                |                      |            |                      |                      |         |
| 0                | -738.19 | 0.00                           | -0.0051758           | 0.1026     | 0.0025               | -0.0015              | 0.0046  |
|                  | 191.42  | 0.00                           | -153.3716057         | 0.0522     | 0.0004               | 0.0146               | 0.0010  |
|                  | -43.26  | 0.00                           | 872.9901475          | 0.1044     | -0.0970              | 0.0081               | -0.0998 |
|                  |         |                                | 886.3603370          |            |                      |                      |         |
| 1                | -688.19 | 0.00                           | -0.0049623           | 0.3166     | 0.0002               | -0.0014              | 0.3143  |
|                  | 198.61  | 0.00                           | -76.2709973          | 0.1589     | -0.0027              | -0.0247              | -0.0011 |
|                  | -21.51  | 0.00                           | 847.4809100          | 0.3177     | 0.3123               | 0.0048               | -0.0034 |
|                  |         |                                | 850.9060805          |            |                      |                      |         |
| 2                | -688.19 | 0.00                           | -0.0048483           | 0.2713     | -0.0017              | -0.0037              | 0.2674  |
|                  | 206.30  | 0.00                           | -226.3687038         | 0.1416     | 0.0103               | -0.0614              | 0.0099  |
|                  | -63.85  | 0.00                           | 820.2427825          | 0.2832     | 0.2529               | 0.0103               | -0.0158 |
|                  |         |                                | 850.9059950          |            |                      |                      |         |

**Generate Nodes in middle of edges of triangles**

Renumbering of Nodes

Search loads and supports

Preparation of Equation System

Number of Nodes: 2654

Number of Tetrahedrons: 1384

Halfwidth of Matrix: 1056

Length of Swap File: 67362784

Number of equations: 7962

Number of equations in Block: 7962

Number of Blocks: 1

Length of Swap Block: 67362784

Calculation of Equation System

Calculation of Stresses

Automatic Refining

Generate Nodes in middle of edges of triangles

Renumbering of Nodes

Search loads and supports

Preparation of Equation System

Number of Nodes: 9238

Number of Tetrahedrons: 5508

Halfwidth of Matrix: 2511

Length of Swap File: 558529200

Number of equations: 27714

Number of equations in Block: 1852

Number of Blocks: 15

Length of Swap Block: 37235280

Generate Nodes in middle of edges of triangles

Renumbering of Nodes

Search loads and supports

Preparation of Equation System

Number of Nodes: 2654

Number of Tetrahedrons: 1384

Halfwidth of Matrix: 1056

Length of Swap File: 100111512

Number of equations: 7962

Number of equations in Block: 3944

Number of Blocks: 3

Length of Swap Block: 33370504

Calculation of Equation System

Calculation of Stresses

Specify base point or displacement <in boundary>: \*Cancel\*  
 Specify first point of cut plane or [Plane and offset/point and Direction]:  
 Specify second point:  
 Specify third point: 90,90,90  
 Specify direction of view [Flip/Accept] <Accept>: A  
 Insert results in [Cut plane/Ucs/Paper space] <Cut plane>: C  
 Specify base point or displacement <in boundary>:  
 Specify second point of displacement:  
 Specify insertion point or [Paper space]:

Node: 396 (-688.19,549.97,73.89)

|                    |        |               |                      |
|--------------------|--------|---------------|----------------------|
| Displacement       | dx =   | 0.3949211E-02 | [mm]                 |
|                    | dy =   | 261.9596821   | [mm]                 |
|                    | dz =   | -398.2305844  | [mm]                 |
|                    | d =    | 476.6659977   | [mm]                 |
| Stress in XYZ-axis | sx =   | 0.0463397     | [N/mm <sup>2</sup> ] |
|                    | sy =   | -0.7816963    | [N/mm <sup>2</sup> ] |
|                    | sz =   | -0.2172147    | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Shear Stress       | txy =  | 0.1011934     | [N/mm <sup>2</sup> ] |
|                    | tyz =  | 0.3073664     | [N/mm <sup>2</sup> ] |
|                    | txz =  | 0.0698681     | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Main Stress        | s1 =   | 0.2634484     | [N/mm <sup>2</sup> ] |
|                    | s2 =   | -0.4198433    | [N/mm <sup>2</sup> ] |
|                    | s3 =   | -0.7961763    | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Tresca Stress      | sTr =  | 1.0596247     | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Max Shear          | maxT = | 0.5298123     | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Von Mises          | svM =  | 0.9304081     | [N/mm <sup>2</sup> ] |