

Министерство образования Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра машин и технологии обработки металлов давлением

**КУЗНЕЧНО – ШТАМПОВОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.  
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛАВНОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО  
МЕХАНИЗМА КРИВОШИПНЫХ МАШИН**

Методические указания к курсовому проекту

Санкт-Петербург  
Издательство СПбГПУ  
2003

УДК 621.73(075.8)

Кузнечно-штамповочное оборудование. Разработка и исследование главного исполнительного механизма кривошипных машин. Методические указания к курсовому проекту / Сост.: С.Н. Кункин. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003, 41 с.

Методические указания соответствуют государственному образовательному стандарту дисциплины СД.00.8И «Кузнечно-штамповочное оборудование» подготовки инженеров-механиков по специальности 120400 - Машины и технология обработки металлов давлением и магистров по магистерской программе 551805 Процессы и машины обработки давлением с включением образования бакалавра по направлению 551800 - Технологические машины и оборудование.

Рассмотрены новые принципы создания и исследования кривошипных механизмов в компьютерной среде моделирования MSC.visualNastran 4D. Дана краткая характеристика возможностей данной программы и на основе конкретного примера по созданию кривошипно-ползунного механизма, показаны приемы работы в этой среде моделирования.

Предназначены для студентов пятого курса механико-машиностроительного факультета в рамках подготовки инженеров и магистров.

Табл. 3. Ил. 44. Библиогр.: 6 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

© Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет, 2003

## ВВЕДЕНИЕ

Задачей курсового проекта является углубление и закрепление знаний, полученных по дисциплине «Кузнечно-штамповочное оборудование», приобретение практического опыта по разработке и расчету основных узлов кривошипных машин в современных компьютерных программах [1, 2, 3, 6].

MSC.visualNastran 4D - это трехмерная среда моделирования, работающая в операционных системах Windows<sup>®</sup> 98, Windows Me<sup>®</sup>, Windows NT<sup>®</sup>, Windows<sup>®</sup> 2000. В данной программе вы можете исследовать динамическое движение и моделировать напряженно-деформированное состояние узлов механизма без промежуточных файлов или связей с другой программой.

MSC.visualNastran 4D интегрирован и имеет ассоциативные связи с самыми последними версиями систем автоматизированного проектирования, такими как SolidWorks 2000, Autodesk Inventor 5, Mechanical Desktop, Solid Edge, Pro/ENGINEER. Программа также предусматривает импорт данных в стандартных форматах STEP, Parasolid, ACIS, IGES и STL.

При моделировании кинематики разрабатываемого механизма возможно измерение положения (перемещения), скорости, ускорения, а также угловой скорости и углового ускорения каждой детали или узла рассматриваемого механизма.

При анализе напряженно-деформированного состояния узлов механизма возможен:

1. Статический расчет упруго деформируемой детали;
2. Расчет потери устойчивости рассматриваемой конструкции;
3. Моделирование вибрации конструкции или механизма под действием приложенных нагрузок.

При интеграции с системами автоматизированного проектирования в процессе расчетов можно корректировать геометрию объектов и при последующих расчетах наблюдать изменение напряженно-деформированного состояния исследуемых деталей.

Моделирование главного исполнительного механизма кривошипных машин в среде MSC.visualNastran 4D с исследованием кинематики и прочностных расчетов позволит ознакомить студентов механиков с современными системами проектирования механизмов и повысит качество выполняемых курсовых проектов.

# 1. СРЕДА МОДЕЛИРОВАНИЯ

## 1.1 Интерфейс пользователя

Запустив **MSC.visualNastran 4D** и щелкнув левой кнопкой мыши на появившейся заставке, вы попадаете в среду моделирования.

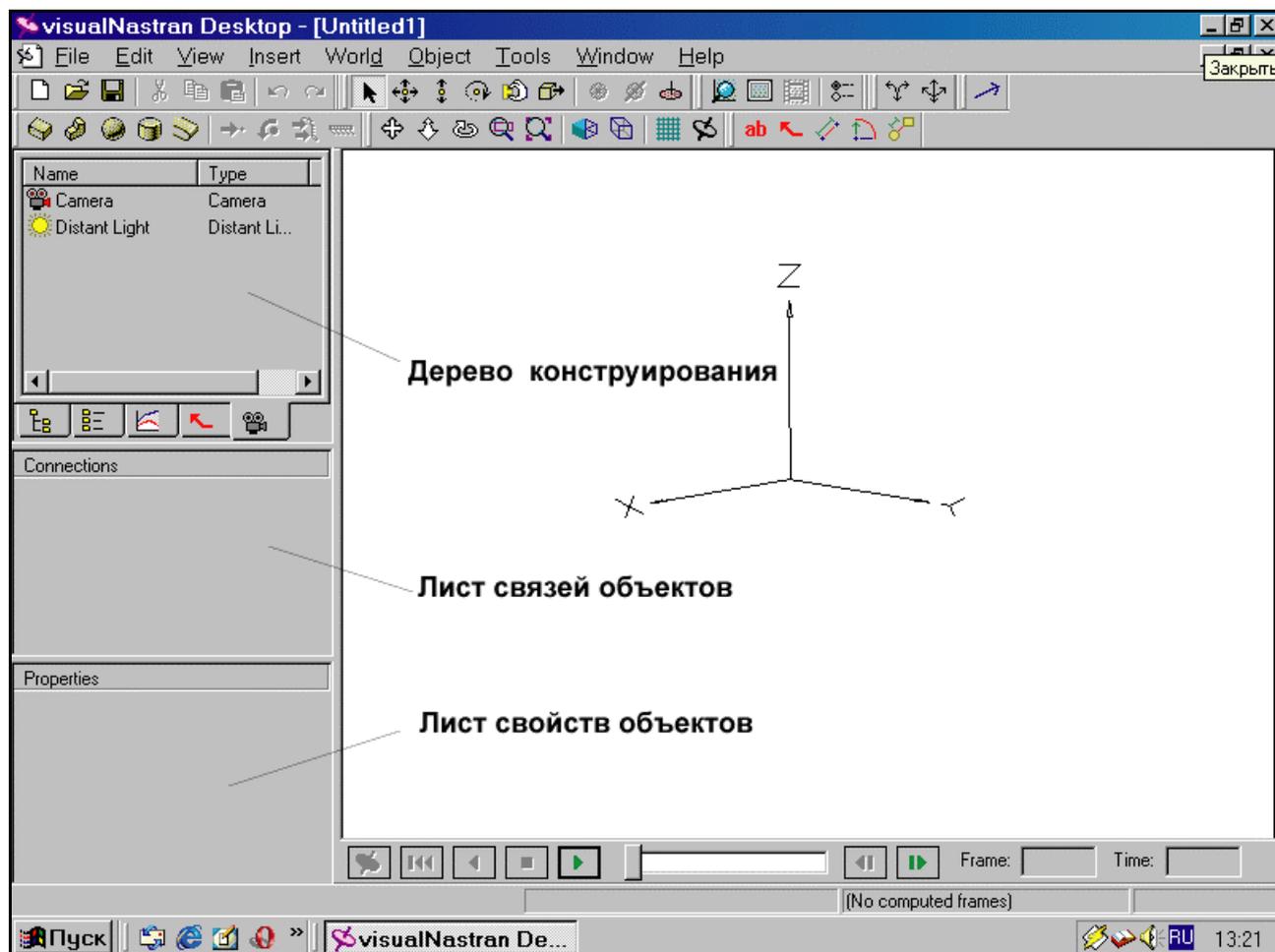


Рис. 1.1  
Среда моделирования MSC.visualNastran 4D

Главное окно функционально объединяет все интерфейсные элементы среды моделирования. В верхней части располагаются заголовок, содержащий имя загруженного файла, системное меню в виде иконки и, в правой части – стандартные для интерфейса Windows кнопки минимизации, изменения размеров и закрытия главного окна.

Главное меню содержит группы команд - **File** (Файл), **Edit** (Редактирование), **View** (Вид), **Insert** (Вставка), **World** ( Мир), **Object** (Объект), **Tools** (Инструменты), **Window** (Окно), **Help** (Справка).

Панель инструментов **View** (Вид) содержит инструменты, частично дублирующие команды меню View, которые связаны с опциями отображения разрабатываемого механизма (модели).

Графическое рабочее окно служит для отображения разрабатываемой модели и результатов расчетов. В окне представлена глобальная система координат X, Y, Z. Можно определить несколько графических окон, показывающих модель и результаты расчетов. Управление расположением окон осуществляется из группы команд Window.

Помимо указанных элементов управления в среде моделирования MSC.visualNastran 4D определены также «горячие» клавиши – комбинации клавиш, указываемые в меню рядом с названиями отдельных команд, при нажатии которых вызываются для исполнения соответствующие команды меню.

Shortcut Key	Function
F1	Help
F2	Pan
F3	Zoom In/Out
F4	Rotate Around
F5	Run
F7	Join/Create Constraint
F8	Split
F9	Attach Coordinate System to Selection
F10	Reset Coordinate System
F	Front View
B	Back View
T	Top View
L	Left View
R	Right View
M	Bottom View
X	X-Grid
Y	Y-Grid
Z	Z-Grid
A	Automatic Grid
S	Set Home
H	Go Home
P	Previous View
N	Next View
V	View All
Arrow Keys	Rotate view

## 1.2 Обзор команд меню

В этом разделе кратко описываются основные команды меню и их назначение. Более подробно рассмотрен ряд команд из групп View, Insert, World, Object, Tools. Ряд пунктов меню и работа с ними будет детально обсуждаться ниже на примерах создания моделей механизмов и конечно-элементного расчета отдельных деталей.

Меню **View** (Вид) содержит основную группу команд для управления отображением модели. Здесь можно обновить изображение модели, определить новые виды и задать необходимые установки для них. Команды данного пункта позволяют задать различные стили отображения модели (контурное, тонированное или кинематическую схему механизма), ориентировать модель в нужном положении.

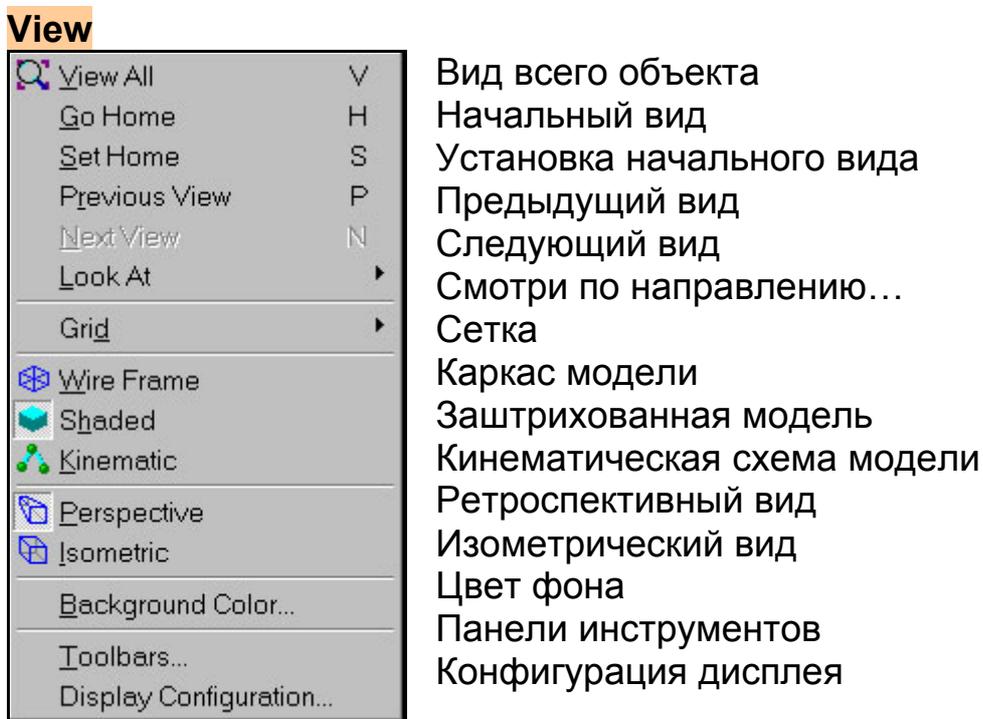


Рис. 1.2  
Панель меню **View** (Вид)

Одним из важных и часто используемых пунктов меню является группа команд, включенных в пункт меню **Insert** (Вставка). Все команды меню разбиты на группы. Первая группа команд относится непосредственно к вставке объектов в среду моделирования непосредственно из файлов или узлов сборки (Sub-assembly). Важная команда из данной группы **Constraint** (Соединение) вызывает подменю с набором возможных соединений деталей в определенный механизм.

## Insert

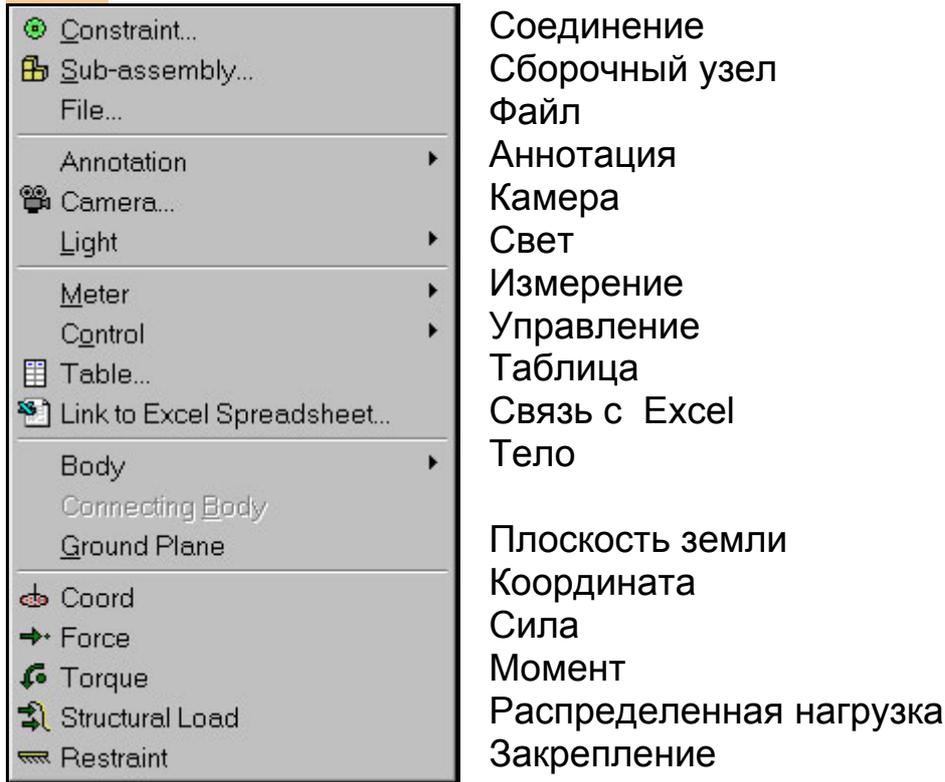


Рис. 1.3

Панель меню **Insert** (Вставка)

Вторая подгруппа команд позволяет ввести в рабочее окно аннотации, использовать камеру и изменять освещение объекта.

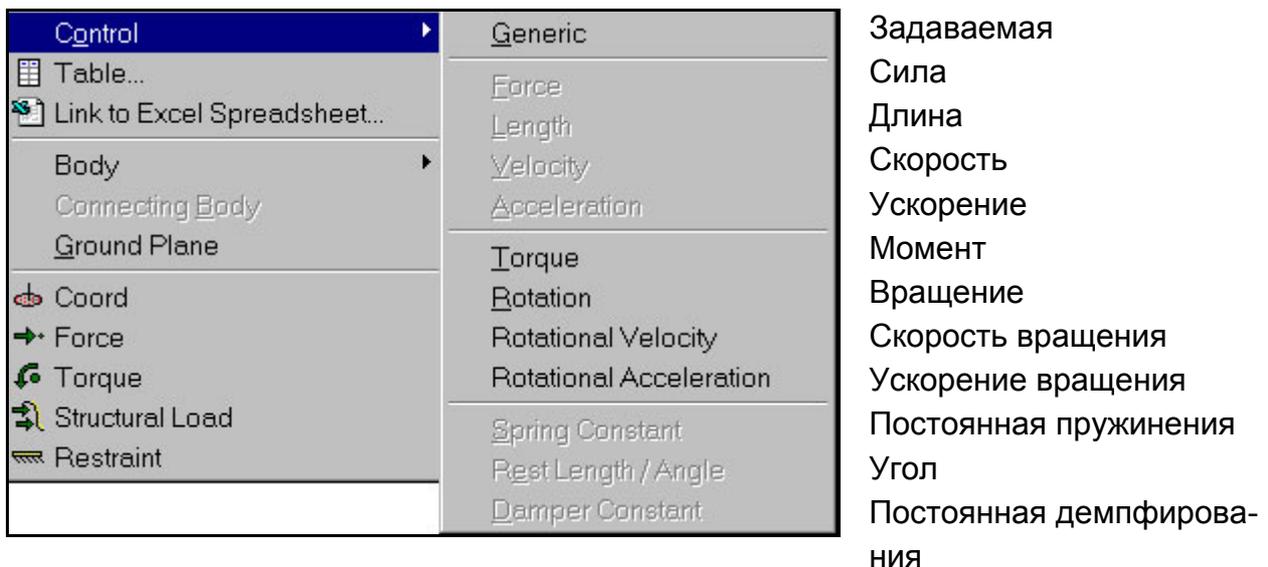


Рис. 1.4

Панель подменю **Control** (Управление)

Третья подгруппа команд при моделировании механизма очень важна и поэтому очень часто используется. После создания механизма командой **Control** (Управление) задается движение ведущего узла механизма в виде фиксированного числа, например, угловой скорости или в табличном виде. Команда **Meter** (Измерение) позволяет измерять различные характеристики интересующей вас детали или узла моделируемого механизма. Например, для кривошипных машин можно исследовать величины перемещения, скорости и ускорения ползуна, на котором крепится рабочий инструмент для деформирования исходной заготовки.

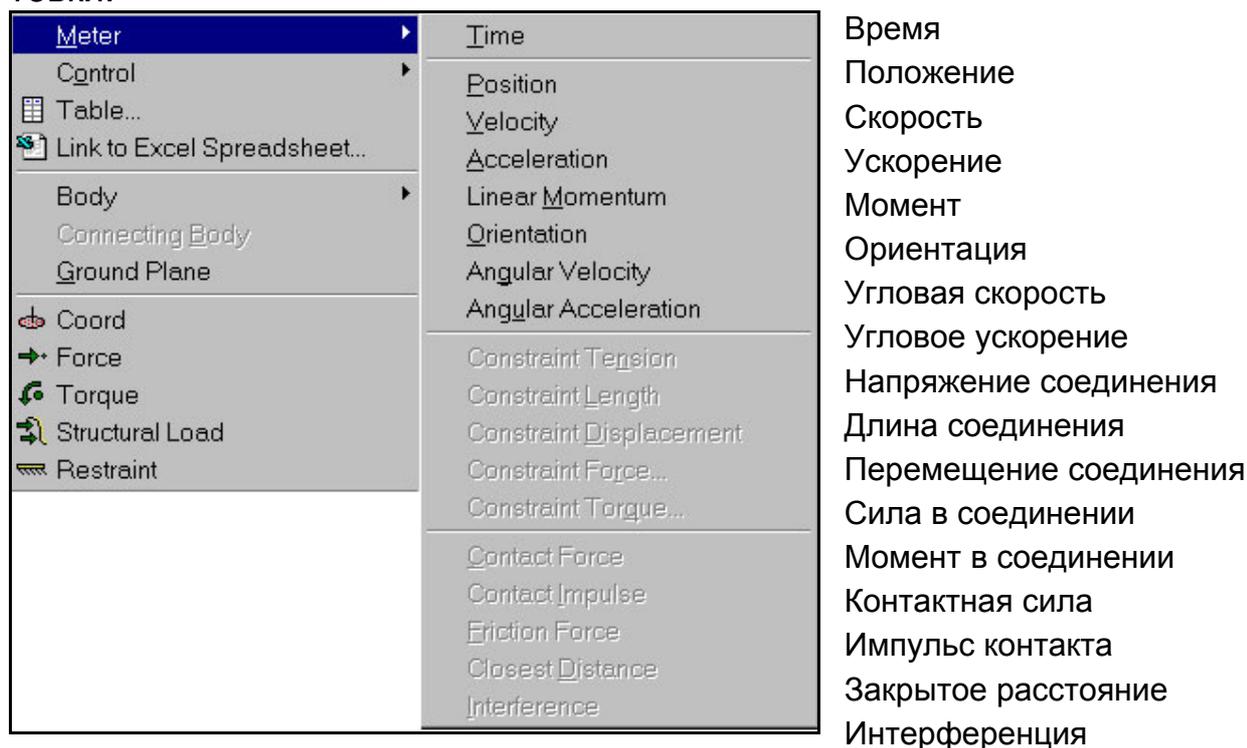


Рис. 1.5  
Панель подменю **Meter** ( Измерение )

Команда **Link to Excel Spreadsheet** (Связь с Excel) позволяет связаться с файлом программы Excel и использовать данные для моделирования выбранного механизма.

Подгруппа команд связанных с геометрией (**Body**) и созданием простейших по форме геометрических тел.

Следующая подгруппа команд используется для задания граничных условий при расчете деталей методом конечных элементов. Возможно задание сосредоточенной силы ( **Force** ), момента ( **Torque** ), распределенной нагрузки ( **Structural Load** ) на поверхности или ребре детали, и закрепление ( **Restraint** ) отдельных поверхностей исследуемой

детали.

Следующий пункт главного меню **World** ( Мир ) включает в себя команды непосредственно связанные с заданием исходных установок для моделирования, запуском процесса расчета и с удалением истории конечно-элементного расчета (FEA) или истории движения механизма при изучении кинематики.

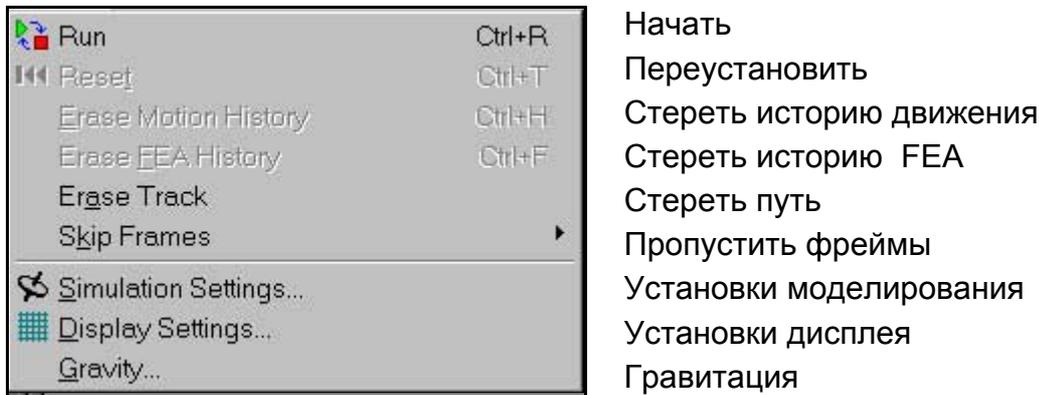


Рис. 1.6  
Подменю команд **World** (Мир)

В меню **Tools** ( Инструменты ) есть две подгруппы команд. Команда **Slide Show** ( Показ слайдов ) демонстрирует все файлы, созданные в данной программе в заданном каталоге. Команда **Demo Tour** ( Демонстрационный тур ) показывает демо-файлы, поставляемые фирмой разработчиком, для демонстрации возможностей данной программы.

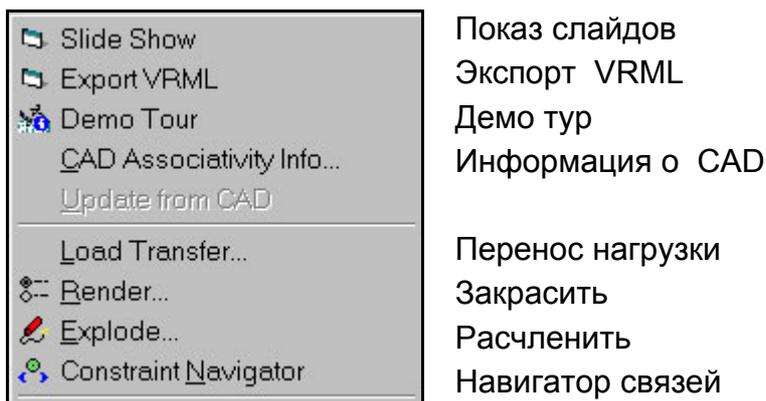


Рис. 1.7  
Подменю команд **Tools** ( Инструменты )

Команда **Render** имеет подменю по созданию графических файлов и записи моделей в движении в файлы с расширением **.avi**.

## 2. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ КРИВОШИПНО-ПОЛЗУННОГО МЕХАНИЗМА И ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ

### 2.1 Создание модели механизма

Для создания модели кривошипно-ползунного механизма создадим минимально необходимое количество деталей : главный вал, шатун, ось и ползун. Твёрдотельные модели данных деталей могут быть созданы в любой из CAD-программ: SolidWorks 2000, Autodesk Inventor 5, Mechanical Desktop , Solid Edge, Pro/ENGINEER. В зависимости от установки программных продуктов на конкретном компьютере модели деталей, могут экспортироваться напрямую непосредственно в VisualNastran Desktop или через импорт данных в стандартных форматах STEP, Parasolid, ACIS, IGES и STL [ 4 ].

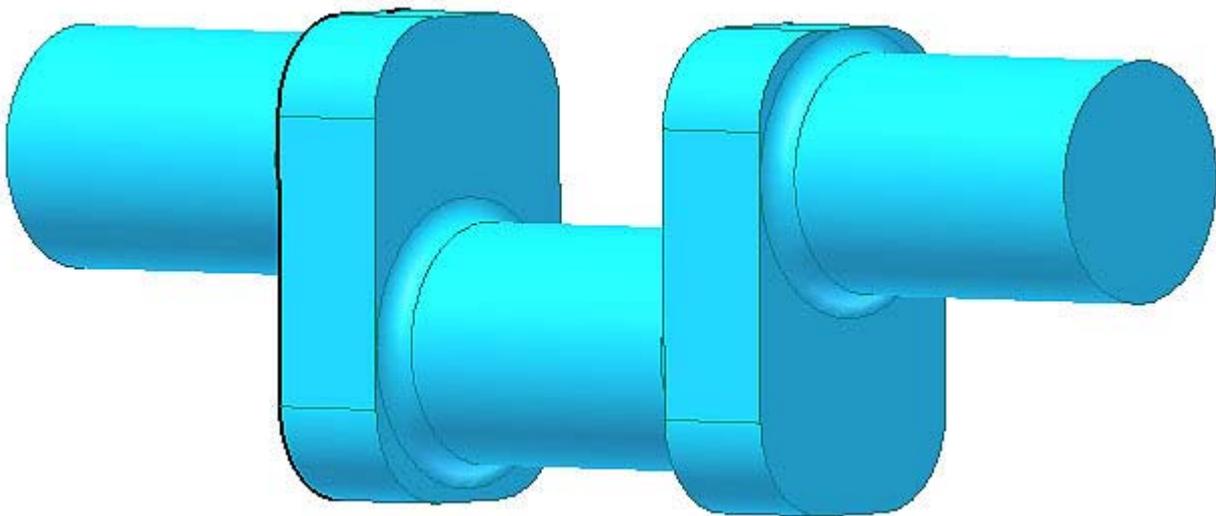


Рис. 2.1  
Твёрдотельная модель главного вала,  
созданная в Inventor 5.3

Модель коленчатого вала, созданная в программе Inventor 5.3, представлена на рис. 2.1. Модели всех требуемых деталей создаются в CAD программах и записываются, например, в файлы с расширением .sat. Это позволяет свободно импортировать твёрдотельные модели деталей вне зависимости от того, как установлено программное обеспечение. Рассмотрим подробно импорт модели вала в среду VisualNastran.

Запустив программу **VisualNastran Desktop** , выбираем в главном меню **Insert** (Вставка). В открывающемся меню команду **Fail** (Файл) и выбираем файл модели коленчатого вала. Выполнив данные действия, вы увидите импортированный вал в рабочем окне программы. С помощью кнопок панели **View** (Вид) поверните вал в удобное для вас положение.

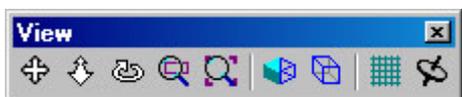


Рис. 2.2 Панель инструментов **View** ( Вид )

Вы также можете воспользоваться меню **View** (Вид) и выбрать команду **Look at**. В раскрывающемся подменю, вы увидите команды стандартных видов. Установив стандартный вид по какой-либо оси, можно поворачивать модель с помощью клавиатуры, используя стрелки.

Следующие действия по созданию модели механизма можно расписать по шагам.

### Шаг 1.

Поскольку главный вал является ведущим звеном в создаваемом механизме необходимо задать движение вращения вала. Выделите модель вала, щелкнув левой кнопкой по валу. В результате этого действия вокруг вала появится параллелепипед, а в листах объектов, связей и свойств появится информация о вале.

Если ось **Z** системы координат, связанной с валом, совпадает с осью опорных шеек коленчатого вала, поверните вал так, чтобы ось была направлена прямо на вас, нажав клавишу **Z**.

На торце опорной шейки создайте координату, используя кнопку **Coord** (Координата) на панели меню **Edit** (Редактирование).



Рис. 2.3  
Панель инструментов **Edit** (Редактирование)

На листе связей (слева от рабочего окна) появится информация о вале и установленной координате. Сделав двойной щелчок левой кнопкой по координате, откроется плавающее меню, на вкладке которого **Pos** (Положение) можно точно задать положение координаты по всем трем осям. (см. рис. 2.4)

Создав координату в требуемом месте модели, переходим ко второму шагу.

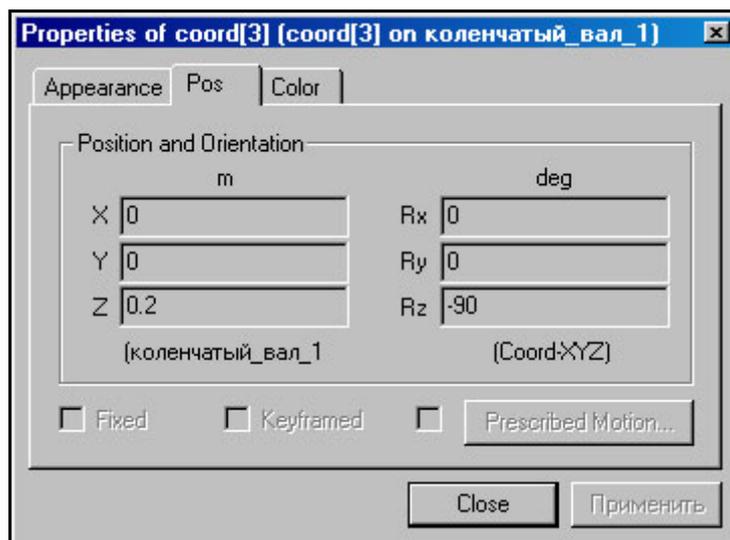


Рис. 2.4  
Плавающая панель **Properties** (Свойства)

## Шаг 2.

В главном меню выбираете **Insert** (Вставка), а в раскрывающемся подменю команду **Constraint** (Соединение). В результате выбора данной команды открывается плавающая панель **Create Constraint** (Создать соединение). Данная панель представлена на рис. 2.5

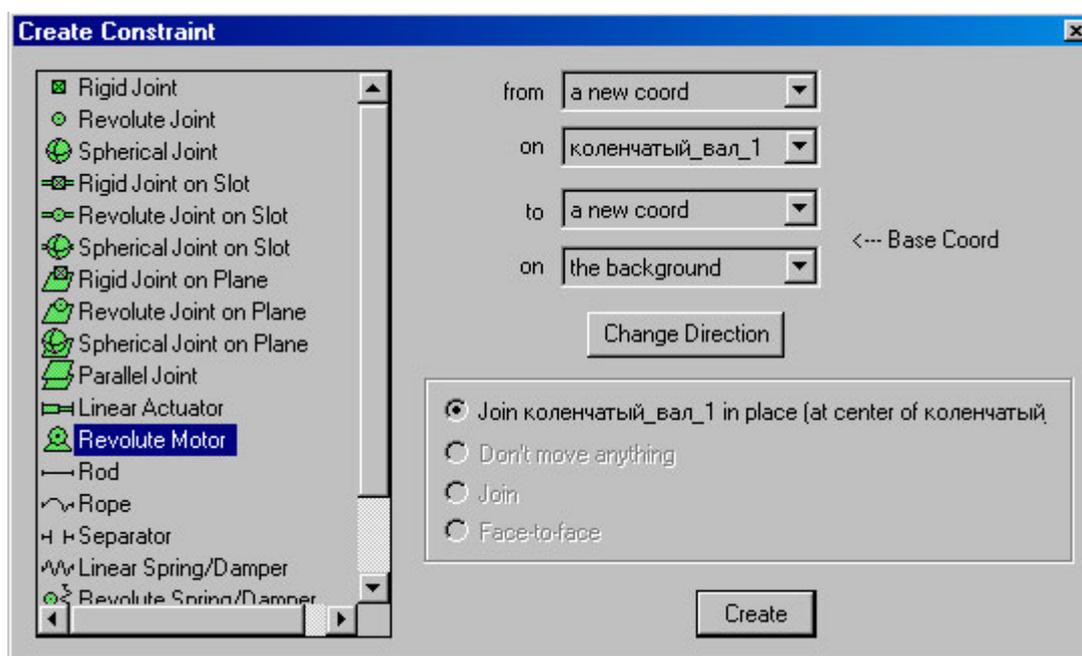


Рис. 2.5 Панель **Create Constraint**

Среди различных видов соединений выбираете **Revolute Motor** ( Мотор вращения) и нажимаете кнопку **Create** (Создать). Таким образом, к торцу шейки вала присоединен мотор вращения, свойства которого можно изменять. Мотор имеет зеленый цвет и находится у торца шейки вала. (см. рис. 2.6)

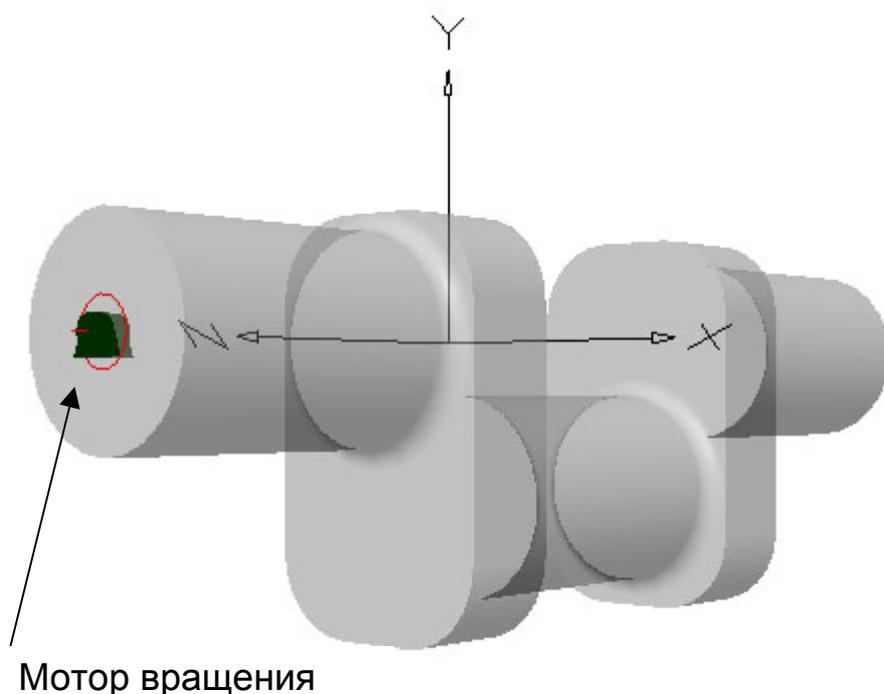


Рис. 2.6  
Модель вала, с присоединенным мотором вращения

Проверить правильность выполненных вами действий можно, воспользовавшись панелью **Playback Controls** (см. Рис. 2.7)

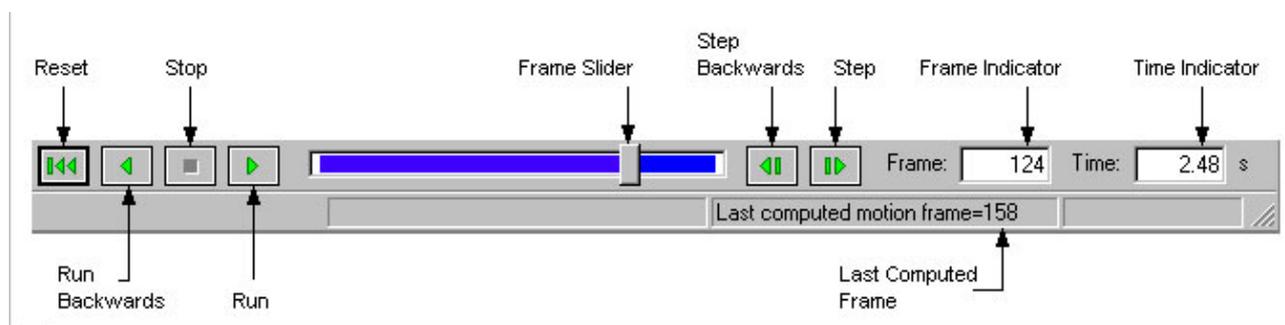


Рис. 2.7  
Панель **Playback Controls** (Управление воспроизведением)

Нажав кнопку **Run** ( Начать движение ) вы увидите его вращение и

сможете оценить соответствие результата поставленной задаче.

Если вал вращается правильно, то вы можете установить требуемую скорость его вращения. Это можно сделать несколькими путями и один из них следующий :

1. Выделить в листе **Connections** (Связей) **Constraint [5]** , соответствующую **Revolute Motor** ( Мотор вращения). После этого в главном меню щелкните левой кнопкой по **Insert** и в раскрывшемся подменю выберите команду **Controls** (Управление).
2. В появившемся подменю выберите команду **Rotational Velocity**. (см. рис 2.8).

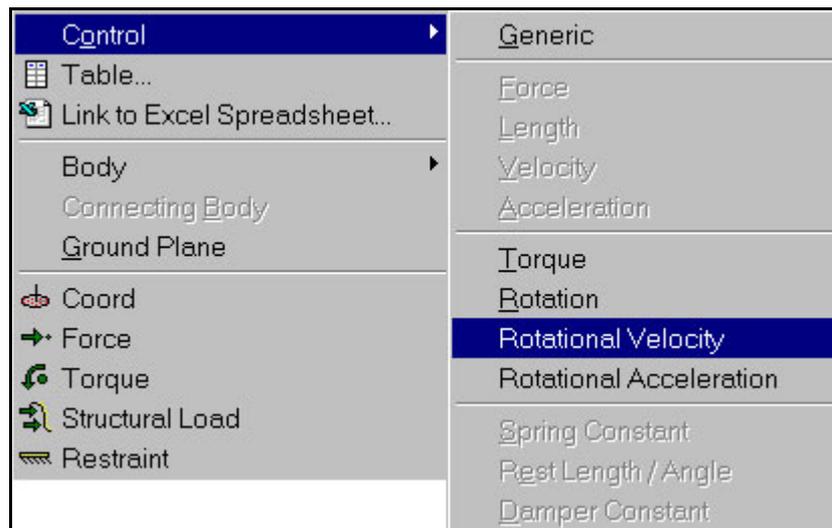


Рис. 2.8  
Панель выбора из меню **Control** (Управление)

После выбора данной команды и появления плавающей панели **Choose Input Type** (Выберите тип ввода) сделайте выбор на **Slider** и нажмите **OK**. На новой плавающей панели **Rot. Velocity of constraint [ 5 ]** вы можете набрать требуемое число. Если угловая скорость указана в градусах в секунду (deg/s), то можно изменить единицы измерения.

Поскольку для кривошипных машин одним из основных параметров регламентируемых ГОСТами является число ходов в минуту, а соответственно и число оборотов главного вала в минуту, то можно использовать привычные единицы измерения. Изменение производится следующим образом.

В главном меню выбирается команда **World** , а в подменю команда **Display Settings** ( Установки дисплея). На плавающей панели **Display Settings** выбирается закладка **Unit** ( Единицы измерения). На рис. 2.9 показана данная панель. В позиции **Rot. Vel.** выбираем единицы измерения **rpm** (rotate per minute – обороты в минуту).

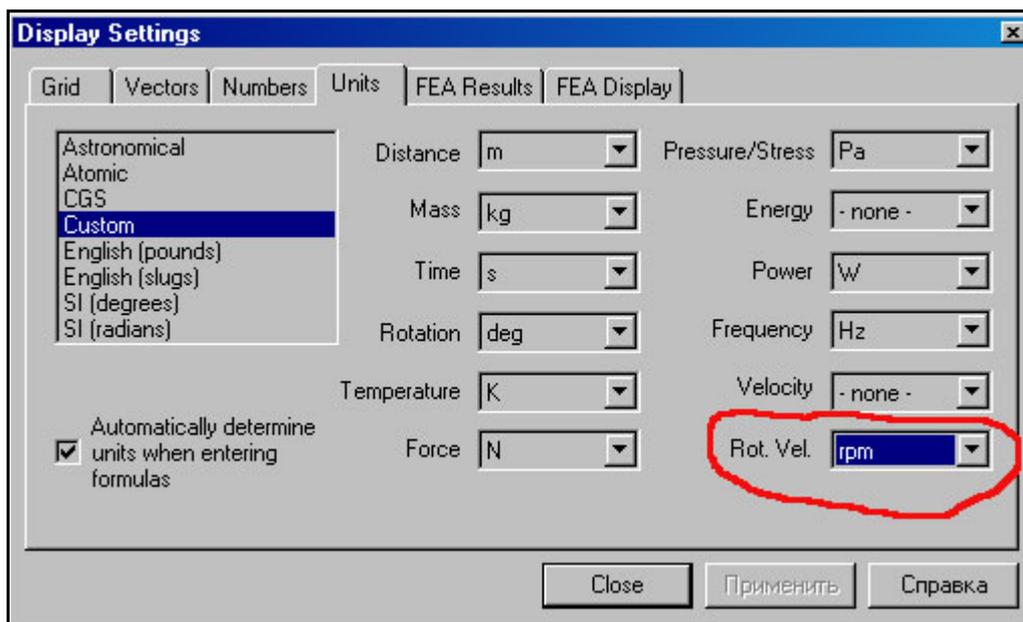


Рис. 2.9  
Панель **Display Settings** ( Установки дисплея )

### Шаг 3.

Теперь необходимо указать координату на шатунной шейке для создания соединения между коленчатым валом и шатуном. Координата должна располагаться на оси шейки и посередине ее длины.

Для выполнения данной задачи желательно иметь перед собой распечатанный чертеж трехмерной модели вала, чтобы размеры вала и система координат, связанная с валом были у вас перед глазами.

Сама процедура установки координаты аналогична той, что была выполнена для соединения **Revolute Motor**. Нажав на клавиатуре клавишу **Z**, устанавливаем вид по оси с торца вала. Увеличив размеры вала, приблизительно на оси шатунной шейки вала устанавливаем координату, воспользовавшись панелью **Edit** (рис. 2.3). Выделив деталь с вновь созданной координатой в листе связей ( **Connections** ) ниже в листе свойств ( **Properties** ) вы увидите ряд свойств объектов. В данный момент нас интересуют два свойства **Color** (Цвет) и **Pos** (Позиция). Поскольку устанавливаемая координата должна находиться на оси шатунной шейки вала, то для того чтобы проконтролировать правильность ее установки, мы должны видеть ее. Это возможно если изменить прозрачность модели вала в рабочем окне.

Данная операция выполняется следующим образом. В листе свойств щелкаем левой кнопкой по свойству **Color** (Цвет). Открывается плавающее меню **Properties** (Свойства) и закладка **Color** (рис. 2.10)

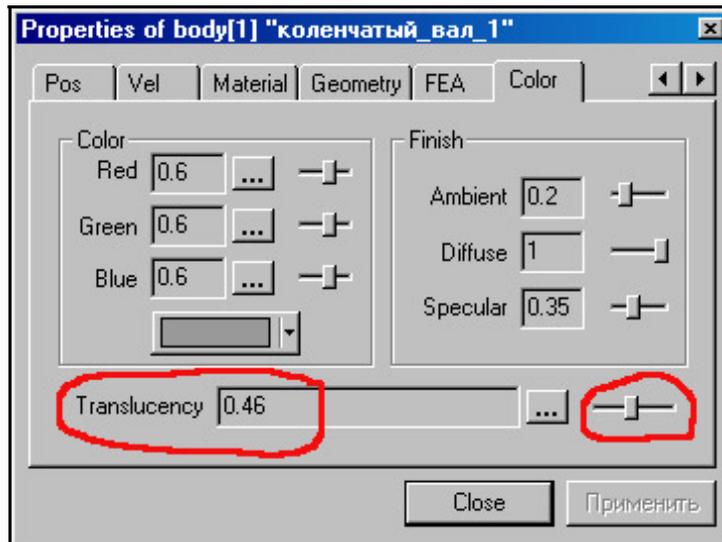


Рис. 2.10  
Панель **Properties** (Свойства)

На данной закладке вы можете поменять цветовые характеристики выбранного вами объекта и, в частности, **Translucency** (Светопрозрачность) с помощью бегунка, находящегося справа. Величина изменения **Translucency** в диапазоне от 1 до 0. Установите достаточную на ваш взгляд прозрачность модели и приступайте к корректировке положения созданной координаты.

В листе связей выберите устанавливаемую координату, а в листе свойств - **Pos** (Положение). Задайте требуемые координаты в плавающей панели свойств и проконтролируйте полученный результат. На рис. 2.11 представлен вид модели вала с координатой, предназначенной для создания соединения с шатуном.

После выполненных операций модель вала, в целом, можно считать подготовленной к сборке с шатуном. Следующий этап работы – это импорт модели шатуна в рабочее окно VisualNastran Desktop.

#### Шаг 4.

Импорт модели шатуна, как и любой другой детали, осуществляется аналогично импорту коленчатого вала. В меню **Insert** выбираете команду **Fail** и из каталога, в котором хранятся модели, выбираете файл, например, **Шатун.sat**. После выполнения данных действий вы увидите шатун в рабочем окне программы. В зависимости от того, как расположена собственная система координат шатуна, детали могут перекрыва-

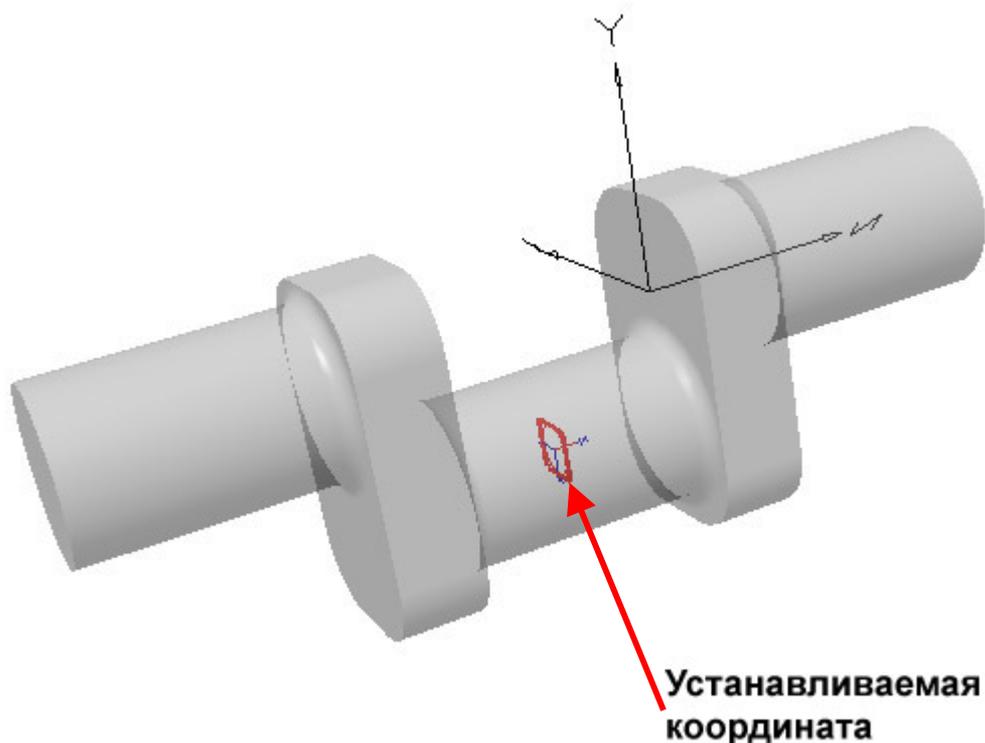


Рис. 2.11

Модель вала с координатой точки,  
устанавливаемой для связи с шатуном

ться различным образом. Сначала сместите детали в одну сторону экрана, а затем выделите шатун и переместите его в удобное вам место рабочего окна для работы с ним. Данная операция выполняется с помощью кнопок панели **Edit** (Редактирование) (см. рис. 2.12)



Рис. 2.12

Панель инструментов **Edit** (Редактирование)

Возможно использование как кнопки **Drag**, так **Move**. Следующие действия, которые необходимо выполнить с шатуном – это обозначить точки с координатами, для создания соединений с коленчатым валом и с пальцем, соединяющим шатун с ползуном.

Данные точки располагаются на осях отверстий верхней и нижней шатунных головок и находятся в срединной плоскости шатуна. Выделив шатун щелчком левой кнопки мыши, на панели кнопок **Edit** нажимаем кнопку **Coord** (см. рис. 2.12). Переместив курсор в виде « + » на окружность верхней шатунной головки вы увидите, что окружность выделяется, синим цветом, а курсор трансформируется в « оружейный прицел ». Щелкнув левой кнопкой мыши, вы получаете координату на оси отверс-

тия верхней головки шатуна. Выделив в листе связей созданную координату, в листе свойств ( **Properties** ) щелкните левой кнопкой мыши в квадрате напротив свойства **Pos**. В появившейся плавающей панели **Properties** (Свойства) на вкладке **Pos** откорректируйте положение точки для создания соединения с коленчатым валом. Аналогичные действия выполните для малой шатунной головки. Результат должен быть таким, как показано на рис. 2.13.

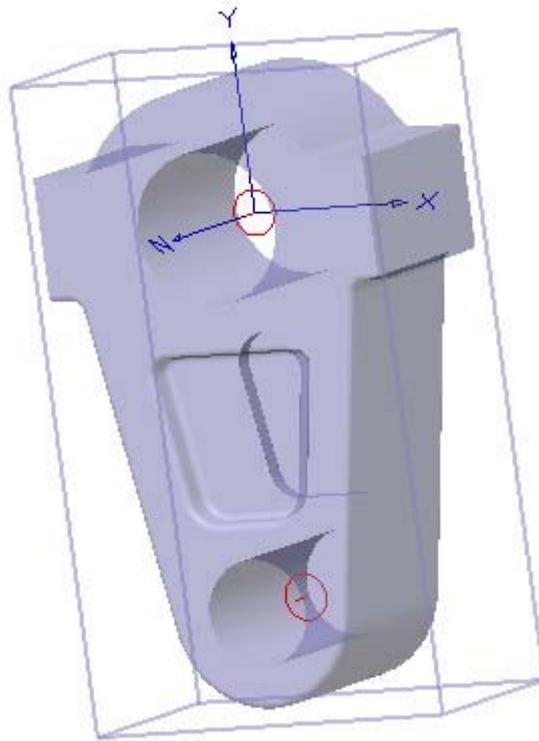


Рис. 2.13  
Модель шатуна с установленными координатами

#### Шаг 5.

Следующий шаг это создание шарнирного цилиндрического соединения между коленчатым валом и шатуном. Щелкнув левой кнопкой мыши по модели вала, выделите его. На панели инструментов **Edit** нажмите кнопку **Join/ Create Constraint** (Соединение) (смотри рис. 2.14).



Рис. 2.14  
Панель Edit с выделенной кнопкой **Join/ Create Constraint**

На экране появится плавающая панель **Create Constraint** (Создать соединение). Из представленного набора соединений нужно выбрать

Revolute Joint (Соединение вращения). В дополнительных полях нужно выбрать соответствующие координаты коленчатого вала и шатуна. ( Рис. 2.15 ).

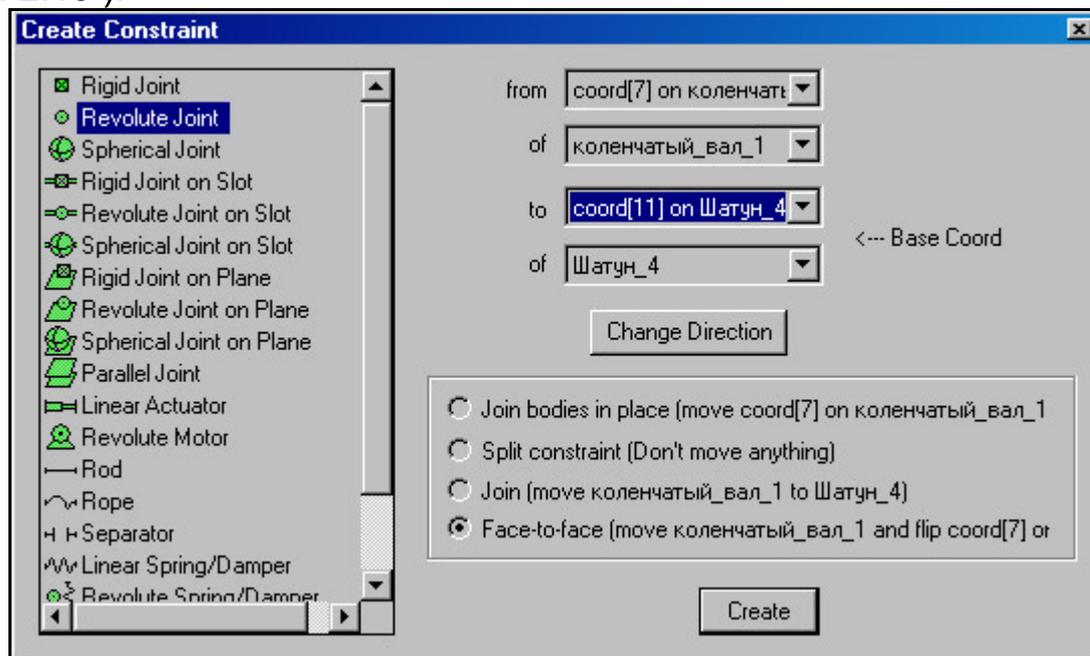


Рис. 2.15

Плавающая панель **Create Constraint** , для создания цилиндрического соединения между кривошипным валом и шатуном

Для того чтобы ось отверстия нижней головки шатуна могла перемещаться только в направлении оси **Y** и имела возможность вращения, создадим для второй координаты соединение **Revolute Joint on Slot** (Соединение вращения в направляющих ).

Шаг 6.

Аналогично процессу создания предыдущего соединения выделяем шатун, щелкнув по нему левой кнопкой мыши. На панели **Edit** нажимаем кнопку **Join/ Create Constraint** ( Соединение ) ( рис. 2.15). В плавающей панели **Create Constraint** выбираем соединение **Revolute Joint on Slot** (Соединение вращения в направляющих ). В дополнительных опциях указываем координату центральной точки на оси и создаем соединение.

В результате выполненных действий вы получите механизм, состоящий из двух деталей, аналогичный представленному на рис. 2.16.

Вы можете проверить правильность работы механизма, воспользовавшись панелью **Playback Controls** нажав кнопку **Run**. Если механизм совершает неправильные движения, проверьте в первую очередь свойства последнего созданного соединения.

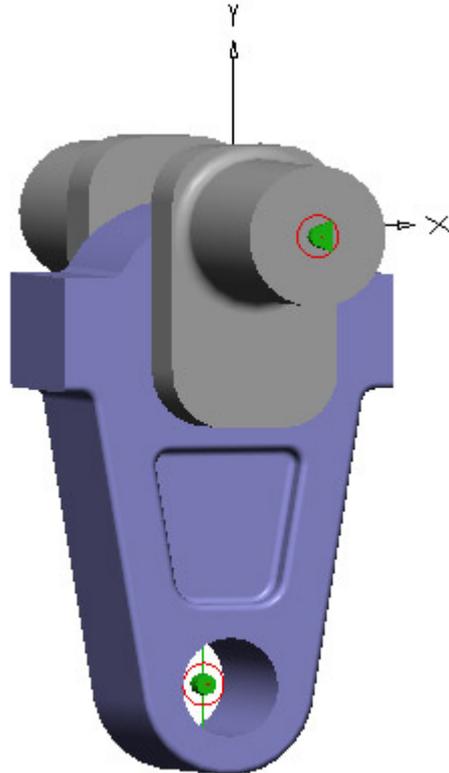


Рис. 2.16  
Механизм из коленчатого вала и шатуна

Щелкнув правой кнопкой мыши, по зеленому обозначению соединения прямо на модели, вы откроете плавающее подменю. Выберете в нем команду свойства. Откроется панель со свойствами этого соединения (Рис. 2.17).

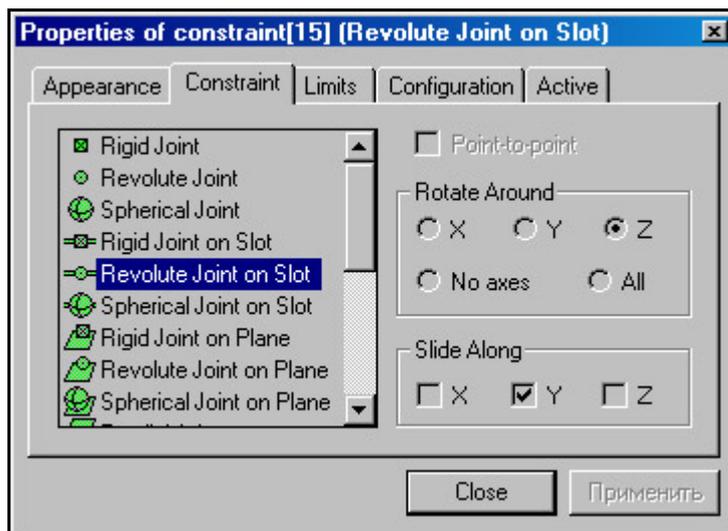


Рис. 2.17  
Панель свойств для соединения **Revolute Joint on Slot**

Проверьте правильность установок. Соединение для оси нижней головки шатуна должно иметь вращение вокруг оси  $Z$  и скользить вдоль оси  $Y$ . Сделав правильные установки, нажмите **OK**.

Аналогичные действия выполните для двух оставшихся деталей: пальца и ползуна. В результате вы получите в сборке кривошипно-ползунный механизм с минимальным количеством деталей (рис. 2.18).

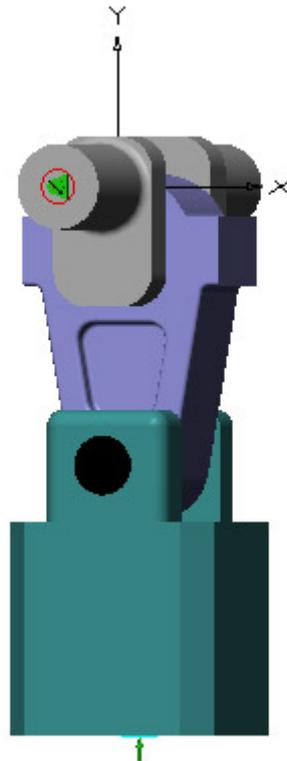


Рис. 2.18

Модель кривошипно-ползунного механизма

Теперь модель готова к различным исследованиям по кинематике и конечно-элементному анализу, как в статике, так и в движении. К ползуну могут прикладываться изменяющиеся в течение времени нагрузки, соответствующие различным технологическим операциям, например, операции вырубки.

## 2.2 Исследование кинематики

При выполнении курсового проекта по кривошипным машинам обычно исследуют перемещение ползуна, скорость и ускорение, в зависимости от угла поворота главного вала.

В данной программе изменение перемещения, скорости и других параметров рассматривается во времени. Для исследования перемещения ползуна, он должен быть выделен. Данная операция выполняется щелчком левой кнопки мыши. В главном меню выбирают **Insert** (Вставка). В раскрывающемся подменю команду **Meter** (Измерять), а далее **Position** (Положение). Нажав на кнопку Run на панели **Playback Controls** (Управление воспроизведением) мы получим изменение перемещения во времени (см. рис. 2.19)

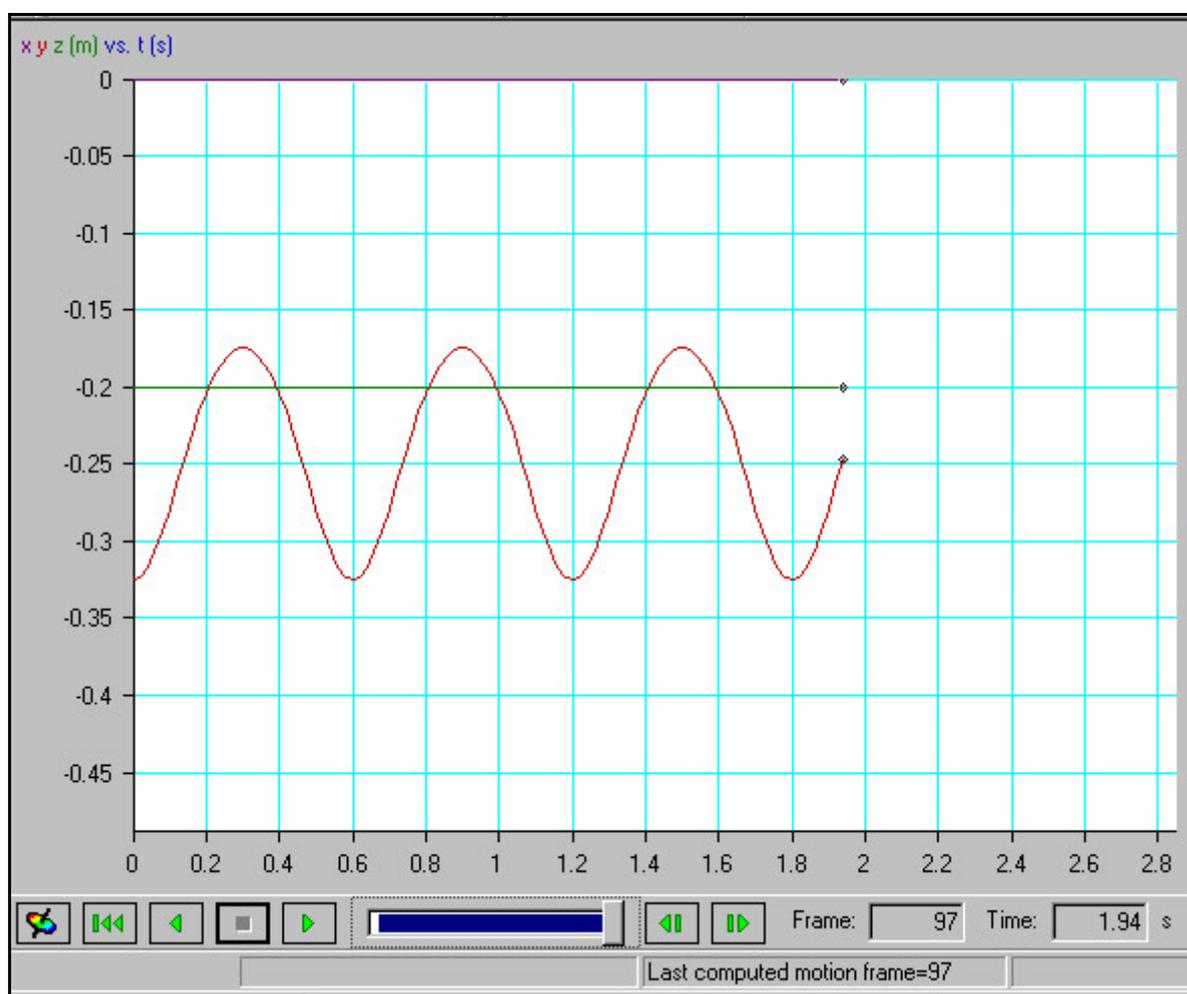


Рис. 2.19

Перемещение ползуна в зависимости от времени  
(возвратно-поступательное движение ползуна вдоль оси Y)

Для исследования скорости перемещения ползуна в раскрывающемся подменю команды **Meter** (Измерять) выбираем **Velocity** (Скорость). Запустив движение механизма, получим график изменения скорости ползуна от времени (см. 2.20).

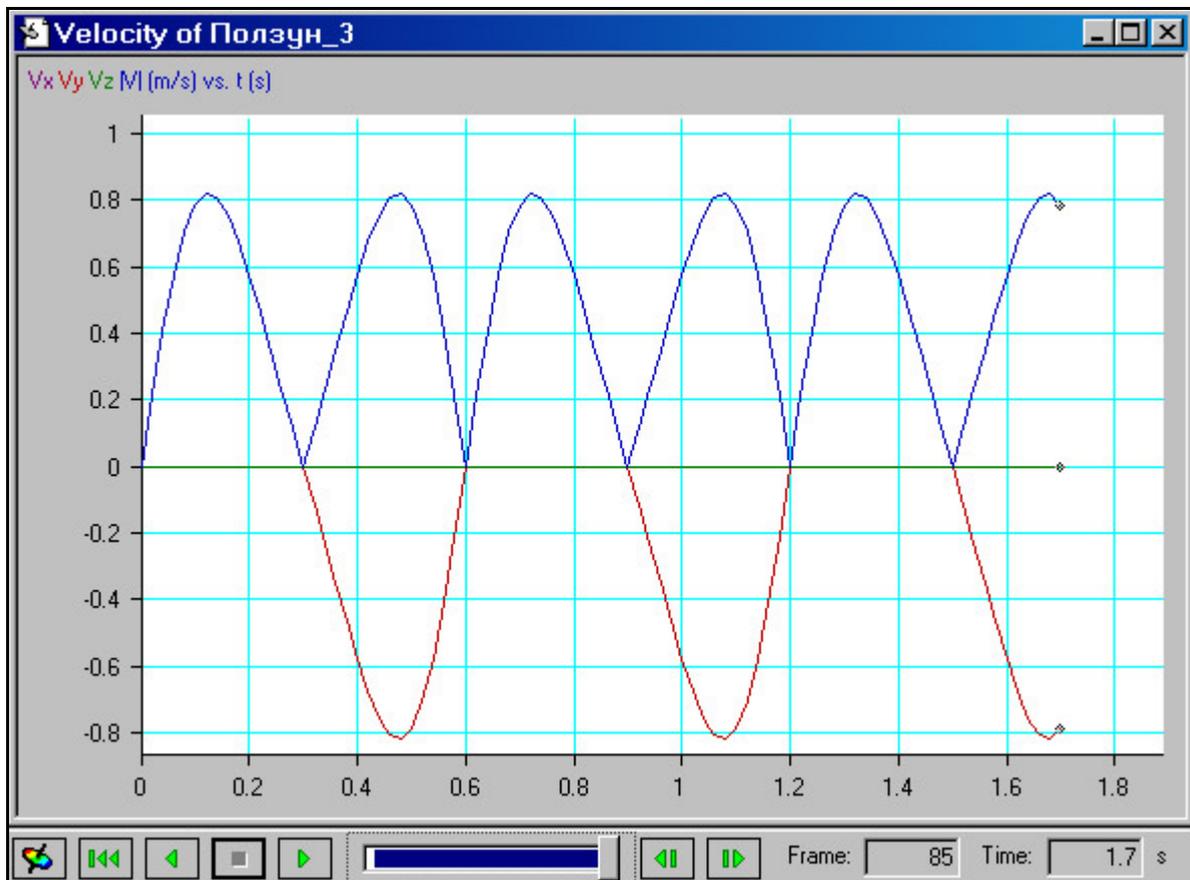


Рис. 2.20  
Графики скорости ползуна (м/с)

Аналогично получим зависимость ускорения ползуна, выбрав в плавающем меню команду **Acceleration** (Ускорение). Данный график представлен на рис. 2.21. Таким образом, все традиционные кинематические характеристики, любого кривошипного механизма могут быть исследованы в одной программе.

Для получения зависимостей перемещения, скорости и ускорения ползуна в традиционной форме от угла поворота главного вала необходимо воспользоваться экспортом данных в программу Excel. Для этого нужно выполнить следующие действия. Имея зависимости перемещения, скорости и ускорения от времени войти в главное меню **File** (Файл), далее выбрать команду **Export** (Экспорт), в подменю команду **Meter Data** (Данные измерений). В появившемся плавающем меню

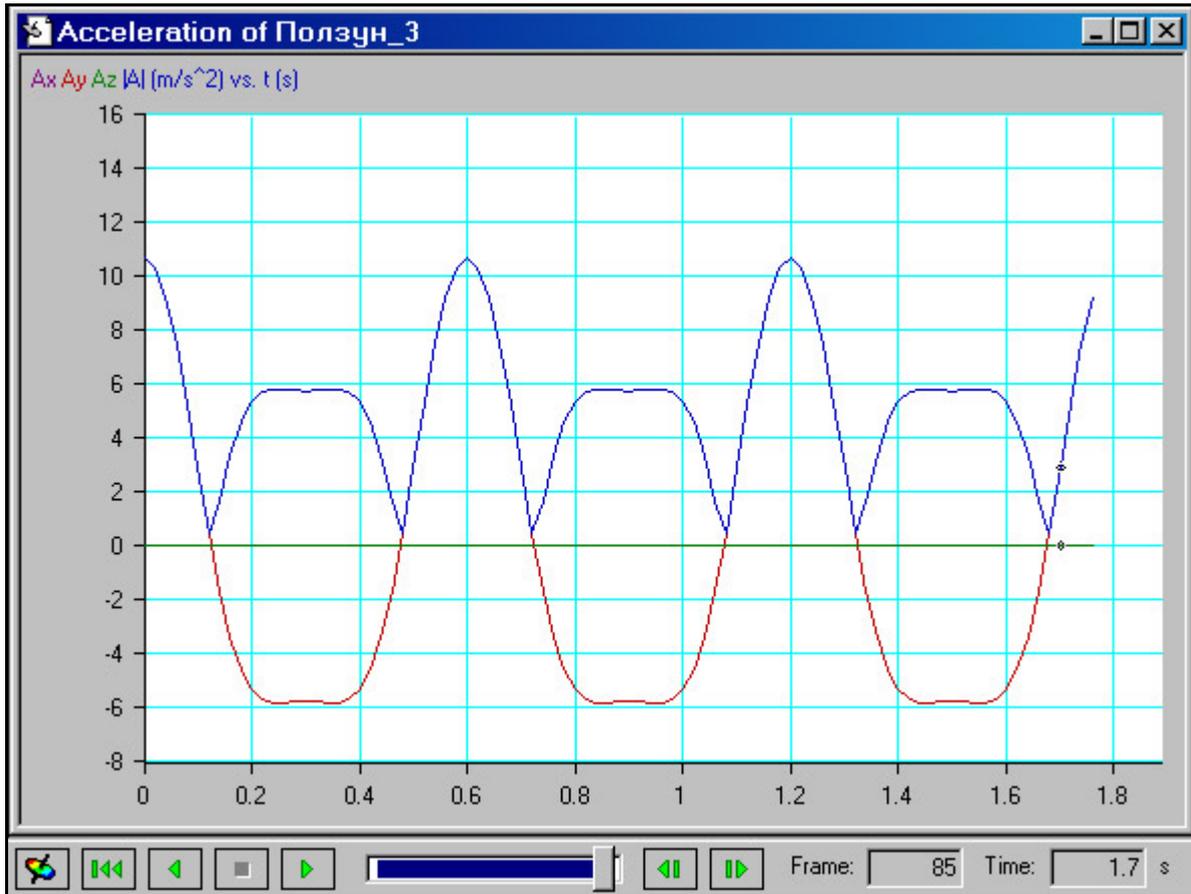


Рис. 2.21  
График ускорения ползуна (м/сек<sup>2</sup>)

укажите название вашего файла, в позиции тип файла – укажите Excel Files. После выполнения этих действий вся информация будет записана в соответствующий файл. Далее, зная количество ходов пресса в минуту и введя дополнительный столбец, вы можете пересчитать время в угол поворота главного вала. Построение графика перемещения, скорости или ускорения от угла поворота главного вала выполняется обычными для программы Excel способами.

### 3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ РАСЧЕТ ДЕТАЛЕЙ ГЛАВНОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

#### 3.1 Интерфейс пользователя для FEA

Конечно-элементный анализ (FEA) отдельных деталей может осуществляться в MSC.visualNastran 4D после их импорта в программу. Данная операция уже была описана при построении модели механизма.

Конечно, данный пакет нельзя сравнивать, с мощными и специализированными программами конечно-элементного анализа той же фирмы MSC.Nastran или ANSYS [ 4 ].

Достоинства данной программы в части, конечно-элементного анализа - это оптимизация пакета на быстрое построение сетки элементов, более быстрое решение задачи и интерактивная визуализация полученных результатов. Модуль конечно-элементного анализа при обработке результатов управляет памятью и дисковым пространством, используя «оценочную» программу, которая определяет приблизительный объем памяти и дисковое пространство, необходимое для решения.

Для решения задачи необходимо обратиться к команде главного меню **World** или панели кнопок **View** и выбрать опцию **Simulation Settings** ( Установки моделирования ). В появившейся плавающей панели **Simulation Settings** выбрать закладку **FEA** (см. рис. 3.1)

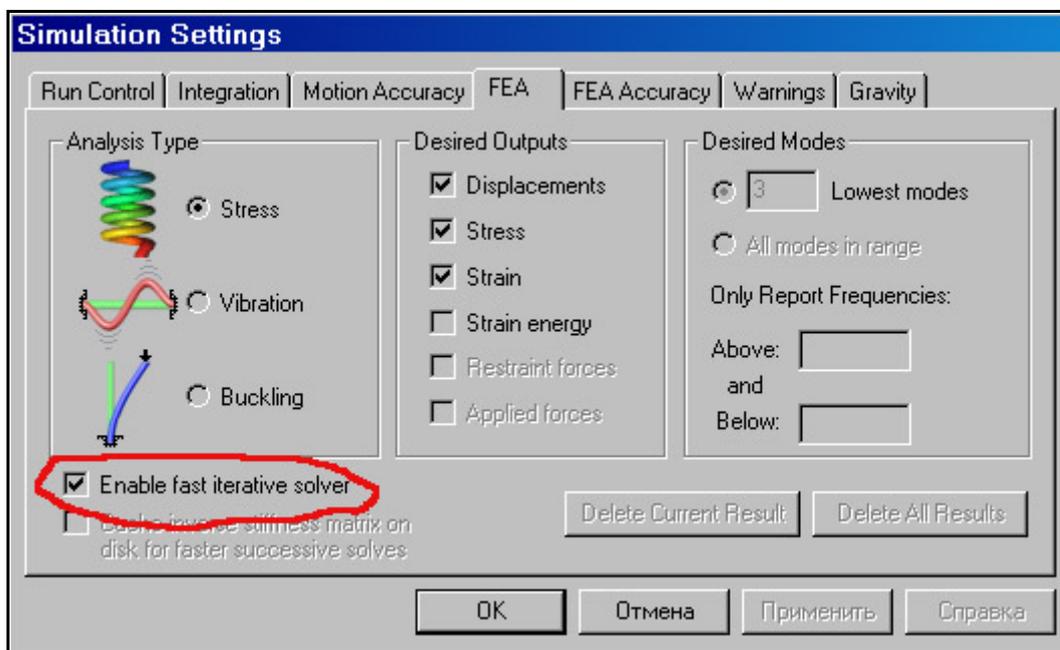


Рис. 3.1  
Панель **Simulation Settings** (Установки моделирования)

Как видно из информации, представленной на данной закладке, возможны три типа конечно-элементного анализа:

1. Анализ напряженно-деформированного состояния (**Stress**);
2. Анализ вибрации (**Vibration**);
3. Анализ потери устойчивости (**Buckling**).

Для доступа к быстрому итерационному решающему устройству создайте отметку напротив **Enable fast iterative solver**.

Для повышения точности расчетов в программе MSC.visualNastran 4D возможно автоматическое адаптивное пере разбиение сетки элементов. На следующей закладке **FEA Accuracy** (Точность FEA) выбирается опция **Use H-adaptivity**, в которой дополнительно можно установить максимальное количество итераций (**Max. Iterations**) и максимальную ошибку (**Target error**) (см. рис. 3.2).

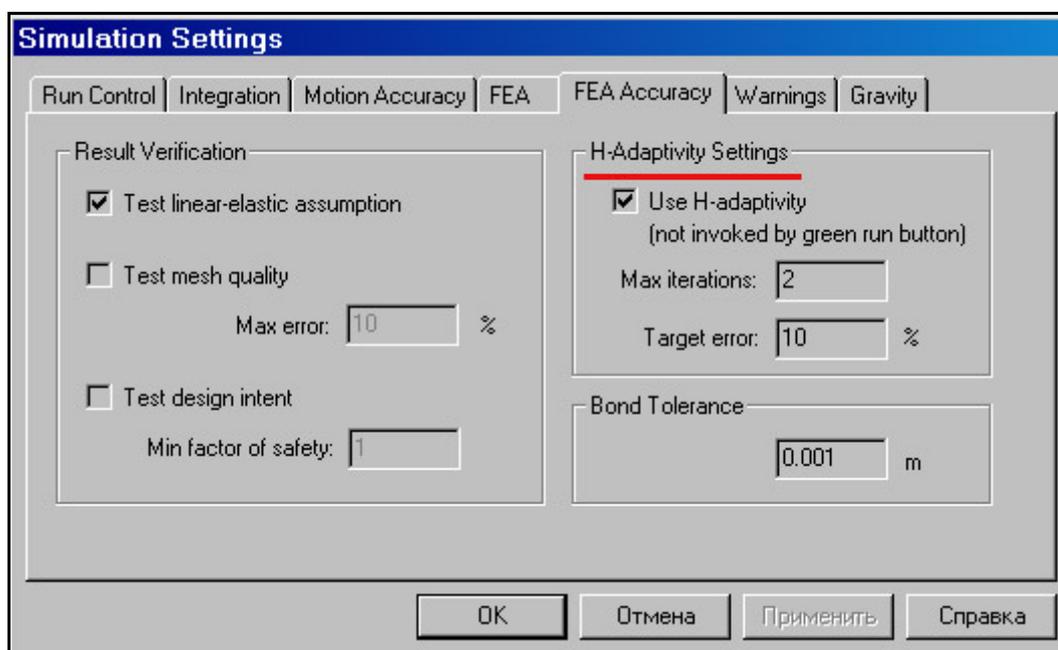


Рис. 3.2  
Закладка **FEA Accuracy** (Точность МКЭ) на  
панели **Simulation Settings**

Размеры сетки при разбиении модели на конечные элементы вы можете задать, вручную выполнив следующие действия. В листе связей (**Connections to коленчатый вал**) выделите Коленчатый вал (см. рис. 3.3)

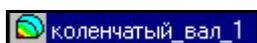


Рис. 3.3

В листе свойств ( **Properties** ) сделайте выбор на позиции **FEA**. В рабочем окне появится плавающая панель **Properties of body [1]** (Свойства тела [1] ) (см. рис. 3.4).

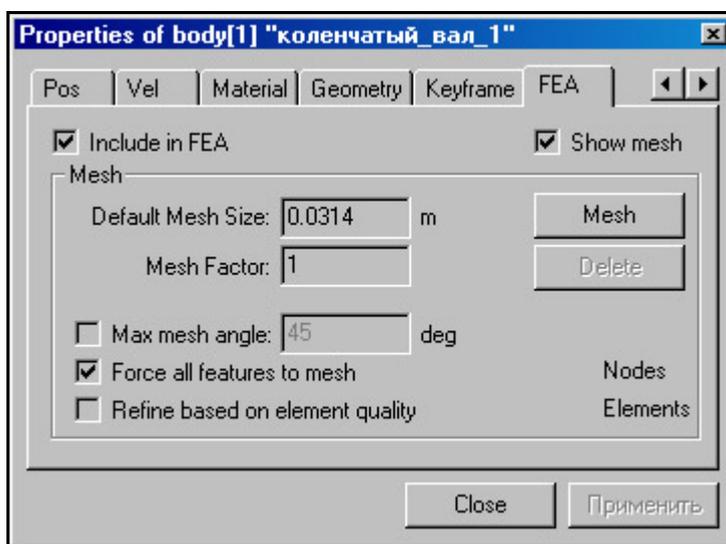


Рис. 3.4  
Плавающая панель **Properties** ( Свойства )

В позиции **Default Mesh Size** ( Размер сетки по умолчанию ) вы можете установить размер сетки, который, по вашему мнению, даст более точные результаты расчета. Однако изменять размер сетки в сторону уменьшения следует малыми шагами, так как число узлов ( **Nodes** ) и элементов (**Elements**) может расти в геометрической прогрессии, и ваши желания не совпадут с возможностями вашего компьютера.

Включив опции **Include in FEA** ( Включить МКЭ ) и **Show mesh** (Показывать сетку) можете нажать кнопку **Mesh** ( Сетка ). Программа разобьет модель вала на конечные элементы, и результаты вы увидите на модели вала в рабочем окне. Если результаты разбиения модели на конечные элементы вас устраивают, можете двигаться дальше.

В плавающей модели **Properties** ( Свойства ) перейдите на закладку **Material** ( Материал ). Нажмите кнопку **Edit** ( Редактирование ) и выберите нужную вам сталь. Если требуемого материала среди представленных вам нет, то необходимо в редакторе WordPad в файл **MaterialProperties.dat** внести информацию о данном материале. Данный файл располагается в каталоге программы **visualNastran Desktop\ Desktop\ Materials**.

Следующий важный этап – это задание граничных условий. Можно идти двумя путями:

1. Использовать пункт главного меню **Insert** ( Вставка ) (рис. 1.3).

2. Воспользоваться панелью инструментов **Sketch** ( Эскиз ) (рис. 3.5).



Рис. 3.5  
Панель инструментов **Sketch** ( Эскиз )

Данная программа позволяет задавать полные нагрузки, давления на поверхности, моменты, концентрированные силы, ограничения или известные перемещения относительно различных систем координат. Граничные условия (нагрузки ) можно наглядно представить в виде таблицы (см. рис. 3.6).

Нагрузки и граничные условия  
( Loads and Boundary Conditions (LBCs))

Load Type	Face	Edge	Vertex	World	Body	Coord	Cartesian	Cylindrical	Face
Total Force	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Distributed Load	X	X		X	X	X	X	X	X
Concentrated Load	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pressure	X								X
Torque	X			X	X	X	X		
	Geometry			Frame			Coordinates		

Рис. 3.6  
Типы нагрузок ( Load Type )

Назначение нагрузок можно выполнять в следующей последовательности:

1. Выделяете деталь, которая будет рассчитываться методом конечных элементов.
2. Вращайте деталь так, чтобы вам удобно было задать нагрузку на требуемой поверхности.
3. Выберите инструмент нагрузки на панели **Sketch** (Эскиз):

Сила ( Force ) 

Момент ( Torque ) 

Структурная нагрузка ( Structural Load ) 

4. Щелкните левой кнопкой мыши в точке на поверхности, где вы хотите приложить нагрузку.

5. Щелчком правой кнопки мыши по нагрузке в листе связей ( [Connections to ...](#) ) или двойным щелчком по нагрузке в окне моделирования вы откроете плавающую панель Свойств ( [Properties](#) ) ( см. рис. 3.7).

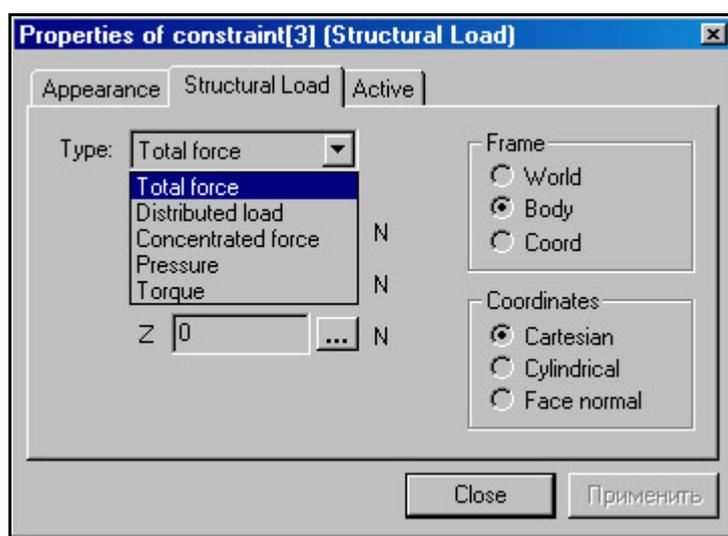


Рис. 3.7  
Плавающая панель [Properties](#) (Свойства )

**Load Types** ( Типы нагрузок ):

- **Total Force** ( Полная или суммарная сила ) : Полная сила приложенная к грани (поверхности), ребру детали или вертикально. Полная сила, приложенная вертикально эквивалентна [Concentrated Force](#) ( Сконцентрированной силе ). Полная величина силы не изменится, если размер объекта изменится.
- **Distributed load** ( Распределенная нагрузка ) : Сила, приложенная к единице площади, (когда приложена к грани) или сила, приложенная на единицу длины (когда сила приложена к ребру детали). Распределенная нагрузка, заданная в нормальной плоскости к грани детали, эквивалентна [Pressure Load](#) ( Давление ). Суммарная величина приложенной распределенной нагрузки зависит от размера объекта.

- **Concentrated load** ( Сконцентрированная нагрузка ) : Представляет полную силу приложенную в одной точке, которая определяется координатами; координата всегда должна быть на поверхности модели (то есть, пользователь не должен задавать координату силы вне поверхности модели).
- **Pressure** ( Давление ) : Определяет величину силы на единицу поверхности, которая всегда перпендикулярна к поверхности.
- **Torque** ( Момент ) : Определяет величину момента, приложенного к поверхности (границы).

#### **Frame** ( Кадр ):

- **World** ( Мир ) : координаты определены относительно глобальной системы координат. Сила, приложенная в положительном направлении оси  $X$  , будет параллельна оси  $X$  глобальной системы координат.
- **Body** ( Тело ) : координаты определяются относительно системы координат тела (детали). Сила, приложенная в положительном направлении оси  $X$  , будет параллельна оси  $X$  системы координат, связанной с телом.
- **Coord** ( Координата ) : координаты определяются относительно присоединенной системы координат. Сила, приложенная в положительном направлении оси  $X$  , будет параллельна оси  $X$  присоединенной системы координат.

Замечание: **Concentrated load** ( Сконцентрированная нагрузка ), заданная в кадре (Frame) с опцией **Coord** не может быть определена при использовании цилиндрической системы координат.

#### **Coordinates** ( Координаты ) :

Выбор различных систем координат ( вместе с различными опциями Кадра ( Frame)) обеспечивает различные пути задания (определения) направлений силы.

- **Cartesian** ( Декартова система координат ) : Это основная система координат. Полная величина силы непосредственно связана со значениями, введенными для компонентов по осям. Направление силы не зависит от расположения.
- **Cylindrical** ( Цилиндрическая система координат ) : Радиальное направление всегда перпендикулярно оси  $Z$  , выбранной в опциях кадра ( Frame ). Тангенциальное направление всегда перпендикулярно радиальному. Поэтому, силы определенные в цилиндрической системе координат являются функцией положения.

- **Face normal** ( Перпендикулярно грани ) : Сила всегда приложена перпендикулярно к поверхности грани детали. Эта опция не применима к нагрузкам на ребрах и вершинах. Вы можете задавать величину силы или давления, но не их направление.

Последняя, четвертая, кнопка на панели **Sketch** ( Эскиз ), относящаяся к заданию граничных условий – это кнопка **Restraint** ( Ограничение ) 

При выполнении конечно-элементного анализа вы можете наложить ограничения на перемещения на отдельные элементы исследуемой модели. Ограничения ( **Restraint** ) могут накладываться на грани, ребра и вершины модели. Данная операция выполняется следующим образом :

1. Выбирается инструмент **Restraint** ( Ограничение )  на панели **Sketch** ( Эскиз ).
2. Щелкните левой кнопкой мыши в точке на поверхности (грань, ребро или вершина) на перемещения, которой в процессе расчета напряженно-деформированного состояния вы хотите наложить ограничения.

Для редактирования свойств, введенных ограничений сделайте следующие действия: двойным щелчком на введенном **Restraint** ( Ограничении ) в окне моделирования или щелчком правой кнопки мыши в листе связей (Connections ) и выбрав в появившемся подменю **Properties** ( Свойства ) откроем плавающую панель **Properties** .

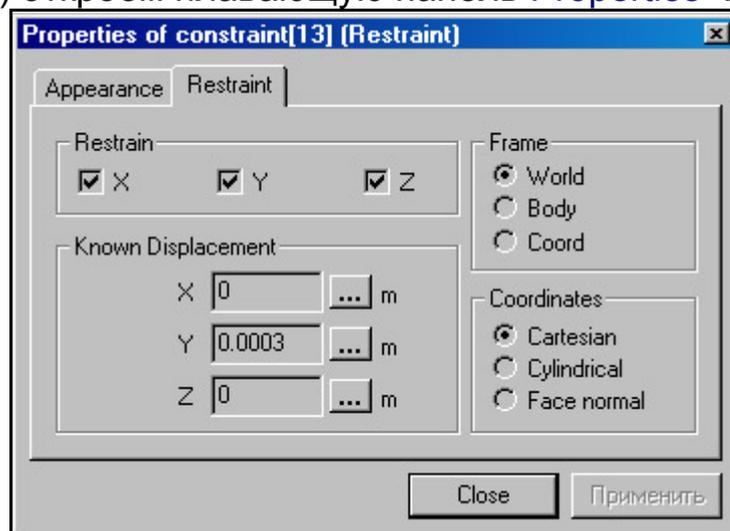


Рис. 3.8  
Плавающая панель **Properties** ( Свойства )

Выбрав закладку **Restraint** ( Ограничение ) мы сможем установить свойства ограничения, выбрав определенные опции (см. рис. 3.8).

- **Restraint** ( Ограничение ) : Задайте направления по осям X, Y, Z по которым устанавливаются ограничения по перемещениям.
- **Known Displacement** ( Известные перемещения ) : Установите известное (или заданное) перемещение на выбранной поверхности, аналогично нагрузке задаваемой в силах.

Другие опции на данной закладке определяют следующее:

**Frame** ( Кадр ) :

- **World** ( Мир ) : координаты определены относительно глобальной системы координат;
- **Body** ( Тело ) : координаты определены относительно системы координат, связанной с телом;
- **Coord** ( Координата ) : координаты определены относительно присоединенной системы координат;

**Coordinates** ( Координаты ) :

- **Cartesian** ( Декартова система координат ) : Это основная система координат.
- **Cylindrical** ( Цилиндрическая система координат ) : Радиальное направление всегда перпендикулярно оси Z , выбранной в опциях кадра ( Frame ). Тангенциальное направление всегда перпендикулярно радиальному.

### 3.2 Статический расчет главного вала

На примере главного вала выполним статический конечно-элементный расчет (FEA), с использованием простейших видов нагрузок.

Для этого нужно выполнить следующие действия:

1. На панели **Sketch** (Эскиз) нажать кнопку **Structural Load** (Структурная нагрузка).
2. В рабочем окне на модели вала выделить нижнюю часть шатунной шейки вала, на которую передается усилие от шатуна, и щелкнуть левой кнопкой мыши на данной поверхности (выделенная поверхность окрашивается черным цветом).
3. Двойным щелчком мыши на изображении структурной нагрузки в рабочем окне откройте плавающую панель свойств. На закладке **Structural Load** установите общее усилие равным номинальному усилию прессы, для которого вы создаете коленчатый вал.
4. К торцу одной из опорных шеек вала приложите момент, который необходим для выполнения технологической операции. Для этого на панели инструментов **Sketch** (Эскиз) выберите инструмент **Torque**, обозначающий момент . Затем выберите поверхность торца опорной шейки вала, а будет подсвечиваться черным цветом) и щелкните кнопкой мыши. На поверхности торца появится обозначение приложенного момента (зеленого цвета). Модель вала с приложенными нагрузками будет выглядеть так, как представлено на рис. 3.9.

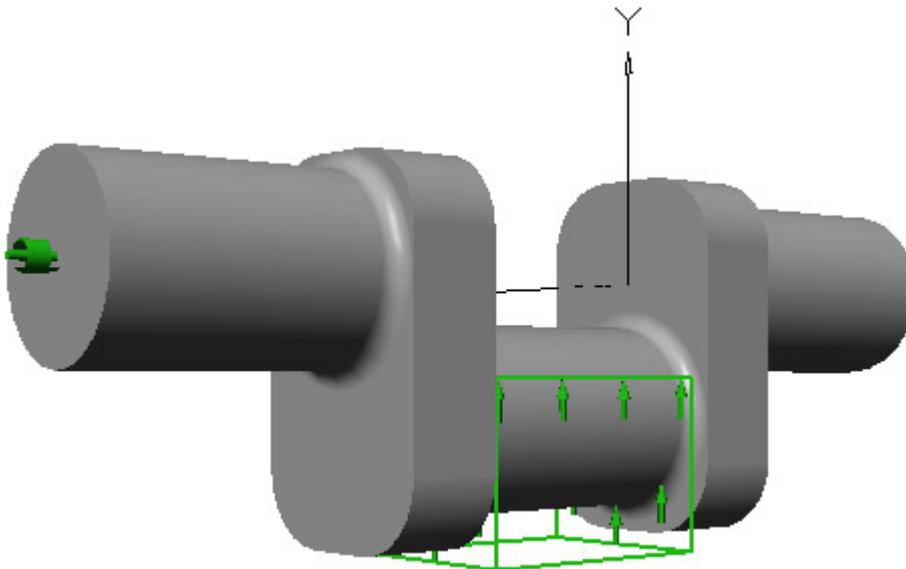


Рис. 3.9  
Модель вала с приложенными нагрузками

В листе связей ( [Connections to](#) ) сделайте двойной щелчок по координате момента. В рабочем окне появится плавающая панель свойств ( [Properties](#) ). На закладке [Pos](#) ( Положение ) проверьте координаты приложенного момента и при необходимости откорректируйте их. Координата приложения момента (или ось приложения) должна совпадать с осью опорных шеек вала.

Далее в листе связей ( [Connections to](#) ) сделайте двойной щелчок по обозначению момента. В рабочем окне появится плавающая панель свойств ( [Properties](#) ). На закладке [Structural Load](#) ( Структурная нагрузка ) установите величину прикладываемого момента ( Н \* м ).

Как разбить модель на конечные элементы и выбрать материал модели, было описано выше (в частности, см. рис. 3.4 ).

Теперь вы можете приступить непосредственно к расчету напряженно-деформированного состояния коленчатого вала. Внизу рабочего окна перед панелью [Playback Controls](#) (Управление воспроизведением) имеется инструмент [Solve FEA](#) ( Решить FEA ) . Щелкнув кнопкой мыши по данному инструменту, вы запускаете процесс расчета. В итоге расчета получаете полный расчет напряженно-деформированного состояния детали. (см. рис. 3.10 ).

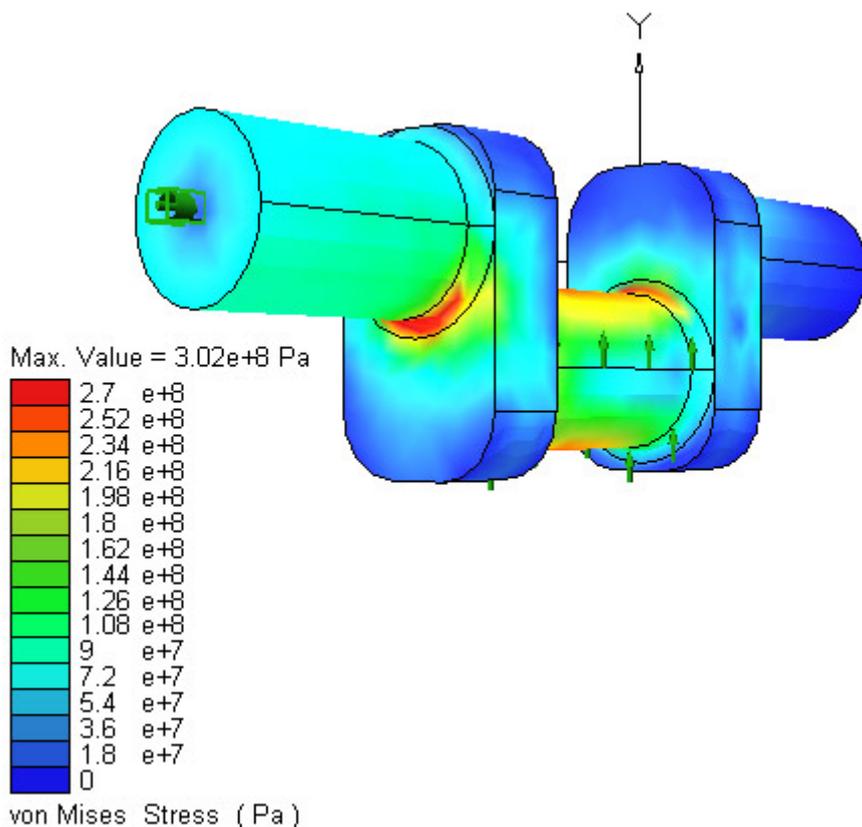


Рис. 3.10 Модель вала после расчета ( напряжения Мизеса)

На рис. 3.10 вы наглядно можете видеть распределение напряжений по Мизесу ( $\sigma_i$ ). На панели инструментов View ( Вид ) (см. рис. 2.2) выберите инструмент **Display Settings** ( Установки дисплея ). В результате открывается плавающая панель **Display Settings** ( см. рис. 3.11).

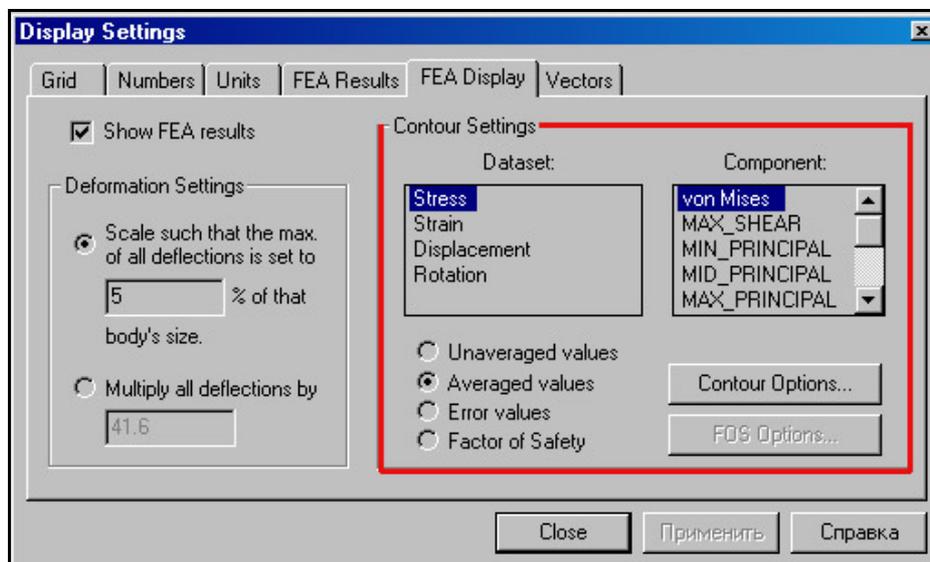


Рис. 3.11  
Плавающая панель **Display Settings**

На закладке **FEA Display** в блоке команд **Contour Settings** ( Контурные установки ) есть две группы данных : **Dataset** ( Набор данных ) и **Component** ( Компоненты ). Выбрав из представленного набора **Stress** ( Напряжения ), **Strain** ( Деформация ), **Displacement** ( Перемещения ), далее можно выбрать интересующий вас компонент [ 5 ]. Набор данных и компонент можно представить в виде таблиц 3.1 –3.3.

Таблица 3.1

Stress	von Mises	Интенсивность напряжений $\sigma_i$
	MAX_SHEAR	Максимальное касательное напряжение $\tau_{max}$
	MIN_PRINCIPAL	Минимальное главное напряжение $\sigma_3$
	MID_PRINCIPAL	Среднее главное напряжение $\sigma_2$
	MAX_PRINCIPAL	Максимальное главное напряжение $\sigma_1$
	Sigma_x	Напряжение по оси X - $\sigma_x$
	Sigma_y	Напряжение по оси Y - $\sigma_y$
	Sigma_z	Напряжение по оси Z - $\sigma_z$
	Sigma_xy	Напряжение $\sigma_{xy}$
	Sigma_yz	Напряжение $\sigma_{yz}$
	Sigma_zx	Напряжение $\sigma_{zx}$

Таблица 3.2

Strain	von Mises	Интенсивность деформаций $\varepsilon_i$
	MAX_SHEAR	Максимальная касательная деформация $\tau_{\max}$
	MIN_PRINCIPAL	Минимальная главная деформация $\varepsilon_3$
	MID_PRINCIPAL	Средняя главная деформация $\varepsilon_2$
	MAX_PRINCIPAL	Максимальная главная деформация $\varepsilon_1$
	Epsilon_x	Деформация по оси X - $\varepsilon_x$
	Epsilon_y	Деформация по оси Y - $\varepsilon_y$
	Epsilon_z	Деформация по оси Z - $\varepsilon_z$
	Epsilon_xy	Деформация $\varepsilon_{xy}$
	Epsilon_yz	Деформация $\varepsilon_{yz}$
	Epsilon_zx	Деформация $\varepsilon_{zx}$

Таблица 3.3

Displacement	Delta_MAG	Суммарная величина перемещения $\Delta$
	Delta_x	Величина перемещения по оси X - $\Delta_x$
	Delta_y	Величина перемещения по оси Y - $\Delta_y$
	Delta_z	Величина перемещения по оси Z - $\Delta_z$

Интересующие вас результаты расчета, вы можете экспортировать в html-файлы или текстовые файлы, воспользовавшись меню Fail  $\Rightarrow$  Export. Визуальную информацию можно записать в файлы с расширением .jpeg или .avi используя команды главного меню Tool  $\Rightarrow$  Render.

### 3.3 Динамический расчет шатуна

Для рассмотрения напряженно-деформированного состояния какой-либо детали механизма в динамике, в процессе выполнения технологической операции, следует поступить следующим образом.

Приложим к ползуну сосредоточенную силу. На панели инструментов **Sketch** (Эскиз) (см. рис. 3.5) выбираем инструмент **Force** (Сила) и прикладываем ее к ползуну, в направлении действия технологической нагрузки. Для начального расчета усилие можно задать по центру ползуна, а затем уже исследовать приложение внецентренной нагрузки на напряженно-деформированное состояние деталей механизма.

Обычно типовые графики нагрузок для различных технологических операций даны в относительных величинах [ 6 ] ( см. рис. 3.12 ) .

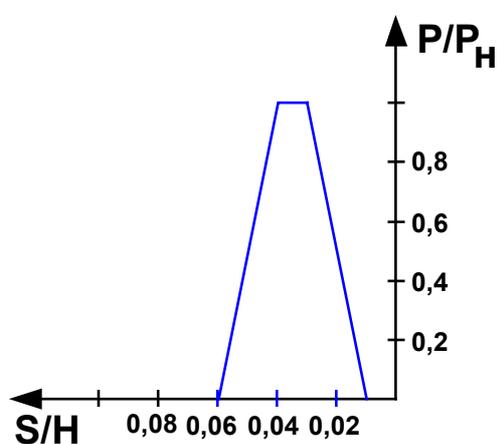


Рис. 3.12  
Типовой график нагрузки для  
листоштамповочного прессы  
( вырубка )

Умножив относительные величины на заданную величину хода ползуна и номинальное усилие прессы, соответственно, получим реальные величины, действующие на механизм. Величину перемещения ползуна необходимо пересчитать в единицы времени, так как в программе величина силы является функцией времени. Сделав двойной щелчок кнопкой мыши по заданной силе в листе связей ( **Connections to** ) откроем панель Свойств ( **Properties** ). На закладке **Structural Load** ( Структурная нагрузка ) по оси **Y** нажмем кнопку с многоточием  ( см. рис. 3.13 ). В результате данного действия появится панель **Formula** ( Формула ) ( см. рис. 3.14 ). На панели **Formula** выберите инструмент **Table** ( Таблица ) ( кнопка выделена красным цветом ). При выборе данного инструмента открывается панель **Insert Table** ( Вставка таблицы ). В таблице в одном столбце указывается время, а во втором усилие, действующее в данный момент времени.

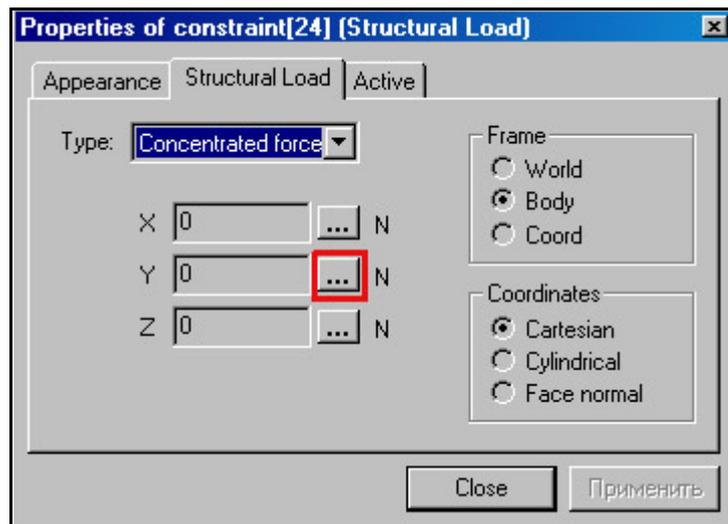


Рис. 3. 13  
Панель **Properties Structural Load**  
( Свойства структурной нагрузки )

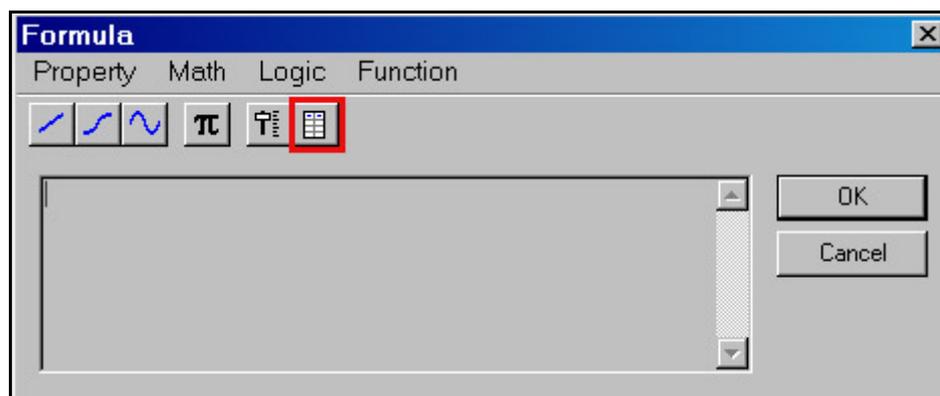


Рис. 3.14  
Плавающая панель **Formula** ( Формула )

После выполнения данных действий задачу определения технологической нагрузки можно считать выполненной. Щелкнув мышью по шатуну, выделите его. Щелкнув правой кнопкой мыши, откройте плавающее меню и выберите **Include in FEA** ( Включить FEA ). На панели инструментов **View** ( Вид ) выберите инструмент **Simulation Settings** ( Установки моделирования ). На этой плавающей панели, на закладке **Run Control** выберите опцию **Auto-compute FEA at every frame** ( Автоматическое вычисление НДС в каждом фрейме (кадре)). На рис. 3.15 данная опция выделена красным цветом. На закладке **Integration** ( Интегрирование ) имеются три группы опций, от которых зависит точность и время расчета.

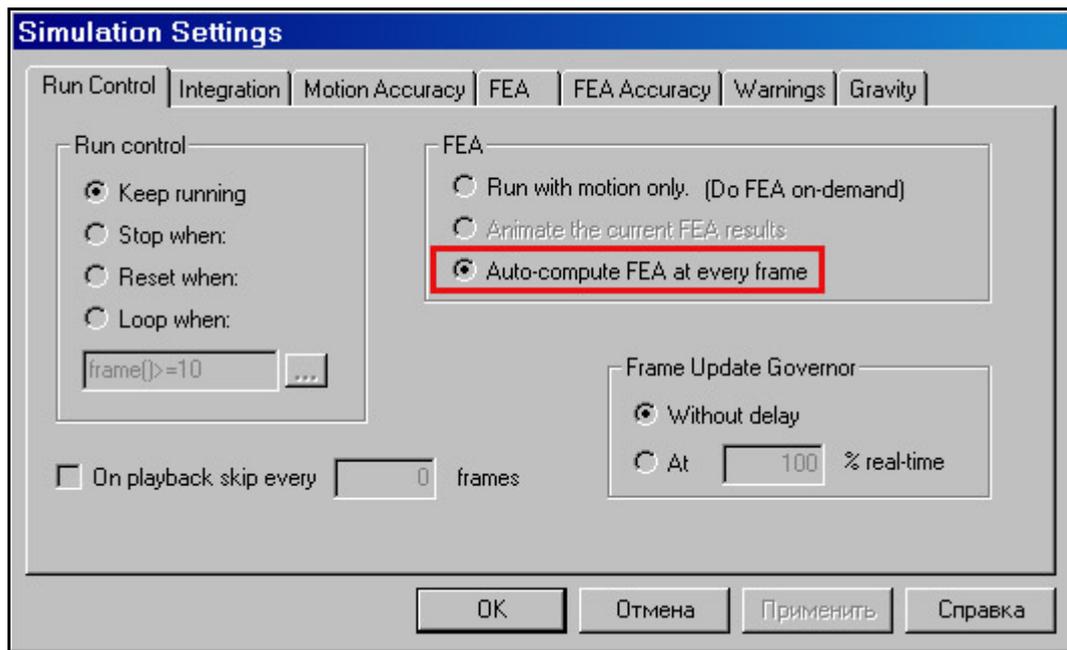


Рис. 3.15

Плавающая панель Simulation Settings ( Установки моделирования)

На панели **Playback Control** нажмите кнопку **Run**. Коленчатый вал начинает вращаться, и программа рассчитывает напряженное состояние в шатуне в каждом фрейме (кадре) (см. рис. 3.16 ).

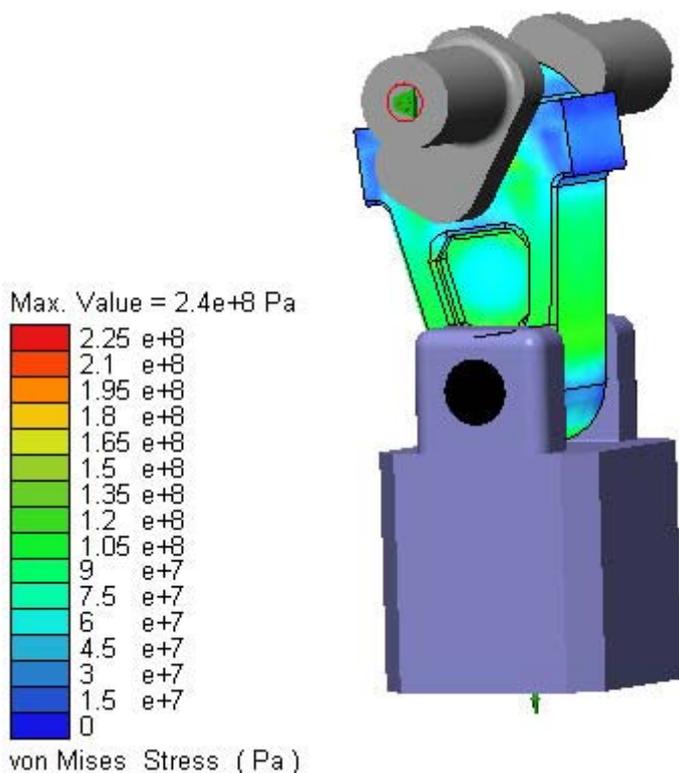


Рис. 3.16  
Напряженно-деформированное состояние шатуна (операция вырубки)

## Список литературы

1. Миропольский Ю.А. Холодная объемная штамповка на автоматах. – М.: Машиностроение, 2001. – 456 с. ил.
2. Детали машин: Учеб. Для вузов / Л.А. Андриенко, Б.А. Байков, И.К. Ганулич и др.; Под ред. О.А. Ряховского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 544 с. – (Сер. Механика в техническом университете; Т.8).
3. А.Т. Крук, Э.Р. Гольник и др. Принцип построения и структура конструкторской базы данных для проектирования кривошипных горячештамповочных прессов. Журнал «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением», 2001, № 11, с. 28 – 36.
4. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC.NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с., ил. (Серия «Проектирование»).
5. Теория пластичности. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Учебное пособие для вузов. М.: Metallurgy, 1987. 352
6. Кузнечно-штамповочное оборудование. Учебник для машиностроительных вузов / А.Н. Банкетов, Ю.А. Бочаров, Н.С. Добринский и др.; Под ред. А.Н. Банкетова, Е.Н. Ланского. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 576 с., ил.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. Среда моделирования .....	4
1.1 Интерфейс пользователя .....	4
1.2 Обзор команд меню .....	6
2. Создание модели кривошипно-ползунного механизма и исследование кинематики .....	10
2.1 Создание модели механизма .....	10
2.2 Исследование кинематики .....	22
3. Конечно-элементный расчет деталей главного исполнительного механизма .....	25
3.1 Интерфейс пользователя для FEA .....	25
3.2 Статический расчет главного вала .....	33
3.3 Динамический расчет шатуна .....	37
Список литературы .....	40

