

**КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

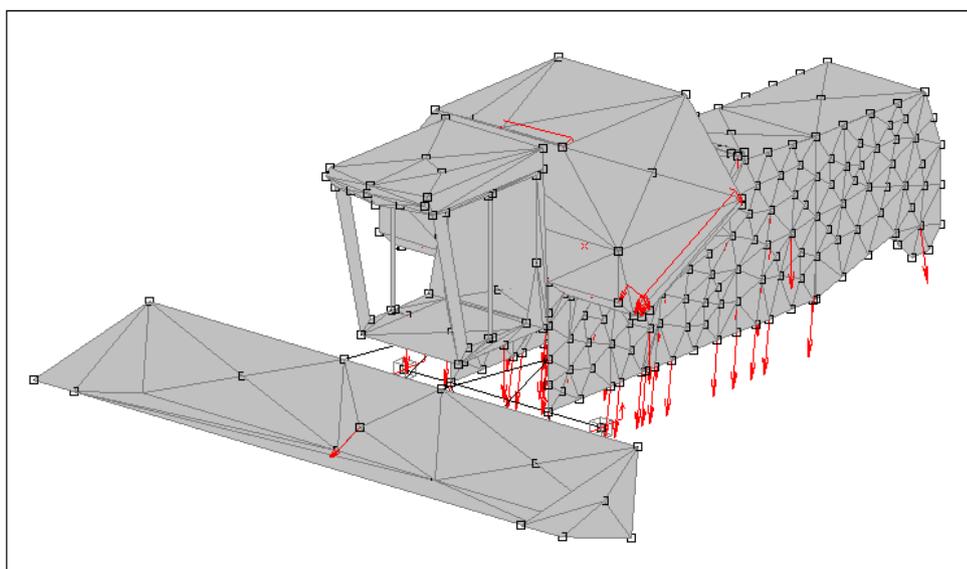
**КАФЕДРА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

**Трубилин Е.И.  
Труфляк Е.В.**

***«ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО  
КОНСТРУИРОВАНИЯ»***

**В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА**

**APM WinMachine**



**КРАСНОДАР  
2014 г.**

**КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

---

**КАФЕДРА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

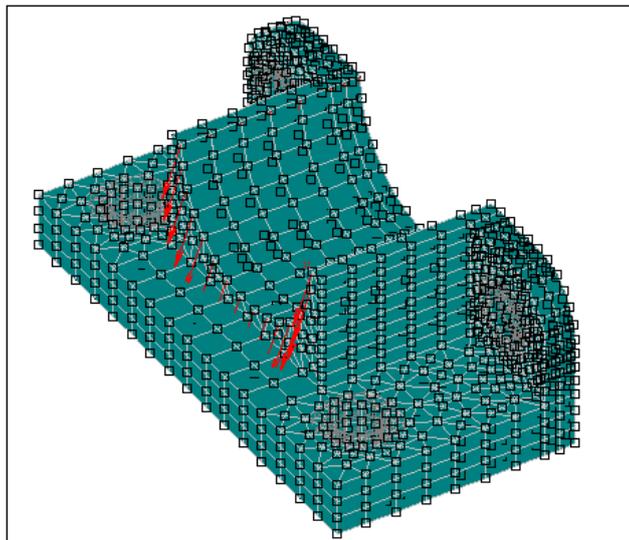
---

**Трубилин Е.И.  
Труфляк Е.В.**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

**для высших учебных заведений  
инженерных специальностей  
по курсу**

***«ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО  
КОНСТРУИРОВАНИЯ»***



**Краснодар 2014 г.**

ББК 73

УДК 004

Для студентов специальности  
110301.65 – Механизация сельского хозяйства  
(очная и заочная формы обучения)

Учебное пособие рассмотрено и одобрено методической  
комиссией факультета механизации – протокол № 4 от  
«15» января 2014 г.

В данном учебном пособии приведена программа курса обучения дисциплины “Основы компьютерного конструирования” в системе АРМ WinMachine.

Задания, которые представлены в пособии, разработаны на основе лицензионного пакета программы АРМ WinMachine.

Практический курс рассчитан на пользователей системы АРМ WinMachine.

Рецензент:

Заведующий отделом механизации Краснодарского НИИСХ  
им. П.П. Лукьяненко, доктор технических наук К.А. Сохт

# СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ ВРАЩЕНИЯ В МОДУЛЕ АРМ TRANS.....	6
2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВАЛОВ И ОСЕЙ В МОДУЛЕ АРМ SHAFT.....	43
3 РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В МОДУЛЕ АРМ BEAR.....	96
4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРИВОДА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В МОДУЛЕ АРМ DRIVE.....	122
5 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН В МОДУЛЕ АРМ JOINT.....	139
6 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В МОДУЛЕ АРМ STRUCTURE 3D.....	162
ВАРИАНТЫ.....	218
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	284



## ВВЕДЕНИЕ

*APM WinMachine* – это наукоемкий программный продукт, созданный на базе современных инженерных методик проектирования, численных методов механики, математики и моделирования, гармонично сочетающий опыт поколений конструкторов, инженеров-механиков и других специалистов с возможностями компьютерной техники и технологии.

- ✓ Система реализована по модульному принципу. Каждый модуль может работать как отдельно, так и в составе определенного комплекса, таким образом, пользователь выбирает оптимальный вариант поставки программного продукта.

- ✓ Простота работы с *APM WinMachine* дает возможность существенно повысить производительность труда.

- ✓ Возможности интеграции со сторонними программными продуктами через обменные форматы позволяют использовать ранее созданную графическую информацию для получения расчетных моделей, что существенно уменьшает временные затраты в процессе проектирования.

Имеющиеся в системе *APM WinMachine* возможности инструментального обеспечения делают возможным решение обширного круга прикладных задач:

- ✓ Проектировать механическое оборудование и его элементы с использованием инженерных методик;

- ✓ Проводить анализ напряженно-деформированного состояния (с помощью метода конечных элементов) трехмерных объектов любой сложности при произвольном закреплении, статическом или динамическом нагружении;

- ✓ Создавать конструкторскую документацию в соответствии с ЕСКД;

- ✓ Использовать при проектировании поставляемые базы данных стандартных изделий и материалов, а также создавать свои собственные базы под конкретные направления деятельности.

При создании содержательной части системы *APM WinMachine* был использован уникальный опыт конструирования машин, который нарабатывался долгие годы в многочисленных лабораториях отраслевых институтов и других научных организациях и на предприятиях бывшего СССР. В системе такой опыт обобщен, осмыслен, дополнен собственными оригинальными разработками и реализован в виде комплекса компьютерных программ, которые составляют



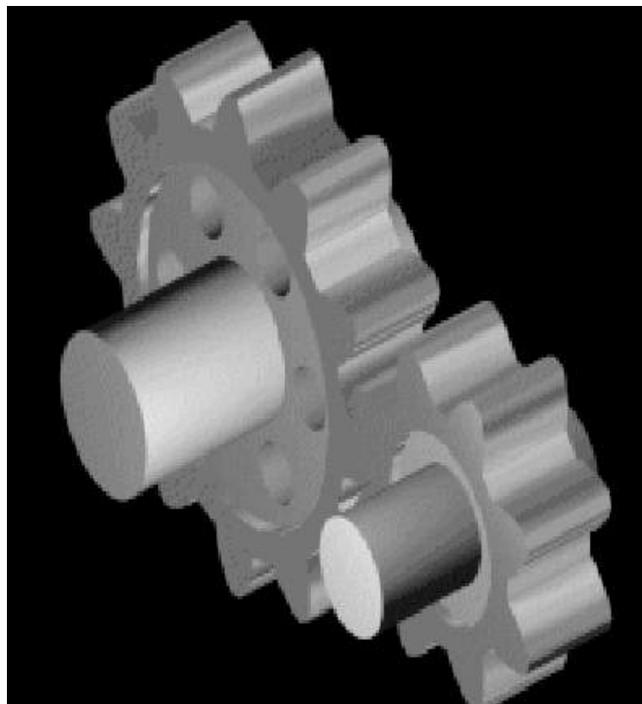
инструментальную основу проектирования и по большинству параметров не имеют мировых аналогов.

Учебное пособие состоит из шести разделов и индивидуальных вариантов для самостоятельного решения упражнений по каждой теме. Каждый раздел содержит общие положения, цель работы и порядок выполнения работы.



# 1 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ ВРАЩЕНИЯ В МОДУЛЕ APM TRANS

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ



Модуль **APM Trans** предназначен для проектирования и расчета механических передач вращения. Название модуля образовано сокращениями от английского слова "*transmission*" (передача).

С помощью **APM Trans** можно рассчитать следующие характеристики передач вращения:

- *Геометрические параметры передач;*
- *Силы, действующие в передаче;*
- *Долговечность;*
- *Максимальную допустимую нагрузку;*
- *Параметры контроля.*

### ***Типы передач***

Система позволяет рассчитать и спроектировать следующие типы передач (рисунок 1.1):

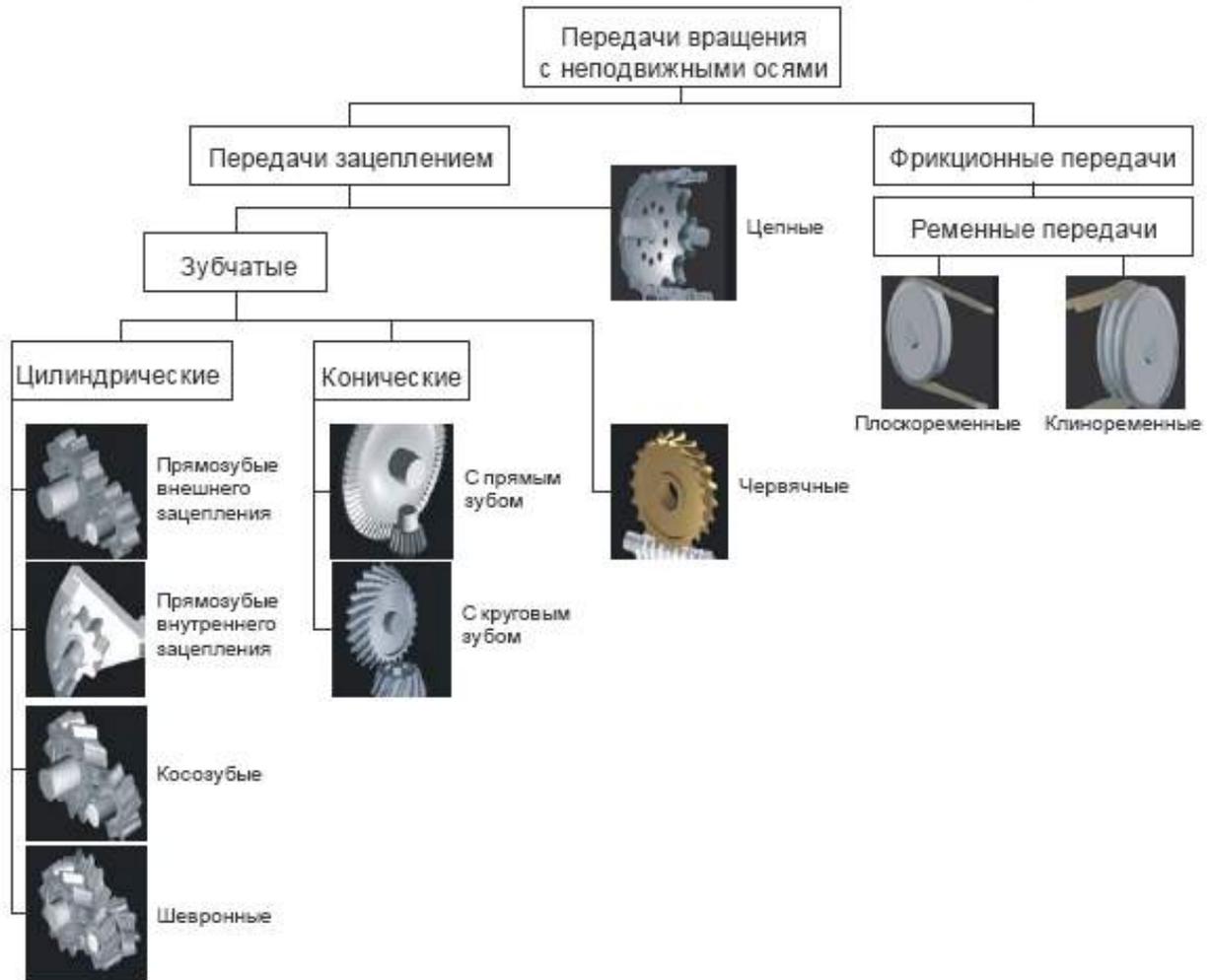


Рисунок 1.1 Классификация типов передач, рассчитываемых системой **APM Trans**

Система позволяет получить рабочие чертежи составляющих элементов передач в формате **DXF**.

### **Типы расчетов**

С помощью **APM Trans** можно выполнить следующие виды расчетов:

- проектировочный расчет передачи
- проверочный расчет передачи

### **Проектировочный расчет**

При проектировочном расчете пользователь задает значения параметров, таких как внешняя нагрузка, материалы, тип термообработки, кинематические характеристики, долговечность. Используя эти данные, **APM Trans** рассчитывает основные геометрические размеры передачи, основываясь на критериях усталостной прочности на изгиб и сопротивления выкрашиванию.



### **Проверочный расчет**

С помощью проверочного расчета определяется нагрузочная способность передачи при заданных значениях параметров (геометрических размеров, характеристик конструкционных материалов и т.п.). Реализовано два вида проверочных расчетов:

- определение максимального момента при заданной долговечности;
- определение долговечности при заданной нагрузке.

### **Проектирование с ограничениями**

**APM Trans** способна проектировать передачи с ограничениями межосевых расстояний, продольных и поперечных размеров, смещений исходного контура колес, углов наклона зуба и др.

### **Исходные данные**

Для расчёта передач системе *APM Trans* требуются следующие

## **Основные исходные данные**

### **Цилиндрические передачи:**

1. Момент на выходном валу передачи;
2. Частота вращения выходного вала;
3. Передаточное отношение;
4. Требуемый ресурс передачи;
5. Число зацеплений каждого колеса передачи за один оборот ведущего колеса;
6. Тип расположения колеса на валу (симметрично, несимметрично, консольно);
7. Вид термообработки каждого из колёс (улучшение, закалка, цементация и нитроцементация, азотирование);
8. Режим работы передачи (постоянный, тяжёлый, средне нормальный, средне вероятный, лёгкий, очень лёгкий).

### **Конические передачи**

1. Момент на выходном валу передачи;
2. Частота вращения выходного вала;
3. Передаточное отношение;
4. Требуемый ресурс передачи;
5. Вид термообработки каждого из колёс (см. цилиндрические передачи);
6. Режим работы передачи (см. цилиндрические передачи).

### **Червячные передачи**

1. Момент на выходном валу передачи;
2. Частота вращения выходного вала;



3. Передаточное отношение;
4. Требуемый ресурс передачи;
5. Материал венца червячного колеса (оловянистая бронза, безоловянистая бронза, чугун);
6. Режим работы передачи (см. цилиндрические передачу).

### ***Цепные передачи***

1. Момент на входном валу передачи;
2. Частота вращения входного вала;
3. Передаточное отношение;
4. Требуемый ресурс передачи;
5. Вид профиля звёздочки (выпукло-вогнутый и прямолинейный);
6. Вид нагрузки передачи (плавная, спокойная, с лёгкими ударами, со средними ударами, с тяжёлыми ударами, вибрационная);
7. Тип цепи используемой в передаче (втулочно-роликовая лёгкой серии, втулочно-роликовая нормальной серии, втулочно-роликовая длиннозвённая, втулочно-роликовая с изогнутыми пластинами);
8. Вид режима смазки используемой в передаче (без смазки, периодическая, непериодическая, внутришарнирная, масляная ванна, распылением, циркуляционная, капельная).

### ***Ремённые передачи***

1. Мощность, передаваемая передачей;
2. Частота вращения входного вала;
3. Передаточное отношение;
4. Коэффициент динамичности;
5. Тип механизма регулировки натяжения ремня (только для плоскоремённых передач).

Кроме этих параметров вы можете задать *дополнительные параметры*, которые позволяют наложить ограничения на рассчитываемую передачу.

### ***Цилиндрические передачи***

1. Межосевое расстояние;
2. Коэффициент ширины колеса (относительно межосевого расстояния);
3. Модуль;
4. Угол наклона линии зубьев;
5. Коэффициент смещения инструмента для каждого из колёс;
6. Средняя твёрдость поверхности зубьев колёс. По умолчанию принимается средняя твёрдость, обеспечиваемая выбранной термобработкой.



7. Реверсивность передачи (реверсивная или нереверсивная передача). По умолчанию передача считается нереверсивной.

8. Стандартное межосевое расстояние (по ГОСТ). По умолчанию межосевое расстояние выбирается из ряда R40.

#### ***Конические передачи***

1. Внешний делительный диаметр колеса;
2. Ширину зубчатого венца колёс;
3. Внешний торцевой модуль;
4. Средняя твёрдость поверхности зубьев колёс. По умолчанию принимается средняя твердость, обеспечиваемая выбранной термообработкой.
5. Осевая форма зубьев;
6. Тип опор ведущего вала (шарикоподшипник, роликоподшипник, смешанные опоры);
7. Реверсивность передачи (реверсивная или нереверсивная передача). По умолчанию передача считается нереверсивной.

#### ***Червячные передачи***

1. Межосевое расстояние;
  2. Модуль;
  3. Коэффициент диаметра.
- Вы можете также указать системе, что вам требуется выбрать передачу из базы данных. По умолчанию рассчитывается новая передача.

#### ***Цепные передачи***

1. Число зубьев звездочек;
2. Межосевое расстояние.

#### ***Ремённые передачи***

1. Межосевое расстояние (в пределах реализуемых стандартными длинами ремней);
2. Угол наклона оси передачи к горизонту (только для плоскоремённых передач);
3. Максимальное число ремней в передаче, но не более 8 (только для клиноремённых передач).

### ***Результаты***

Система **APM Trans** позволяет рассчитать следующие параметры, которые приведены в приложении (описание параметров с их обозначениями, принятыми в системе).



### Компоненты интерфейса пользователя

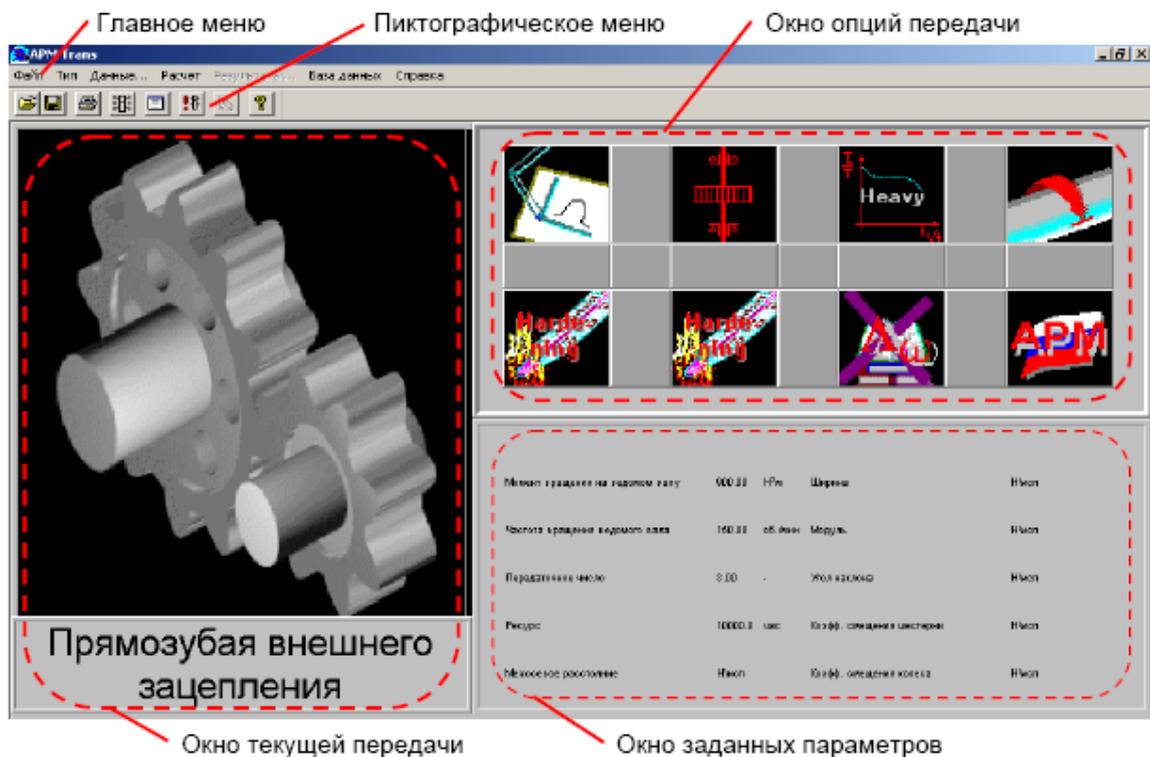


Рисунок 1.2 Общий вид программы **APM Trans**

Главное меню (рисунок 1.3) содержит все команды системы **APM Trans**.



Рисунок 1.3 Структура главного меню **APM Trans**

Пиктографическое меню представляет собой группу кнопок расположенных в верхней части главного окна системы (рисунок 1.2). Пиктографическое меню позволит ускорить выбор наиболее часто используемых команд. Краткое описание команд главного меню и соот-



ветствующих кнопок пиктографического меню, а также сочетания клавиш ускоренного вызова команд представлены в таблице 1.1

Таблица 1.1 Справочник команд **APM Trans**

Главное меню	Команда	Сочетание клавиш	Описание команды
Файл	 Открыть...	Ctrl+O	Открыть файл <i>APM Trans</i> (*.wtr)
	 Сохранить	Ctrl+S	Сохранить данные и результаты в файл (*.wtr)
	Сохранить как...	–	Сохранить данные и результаты в файл (*.wtr) под другим именем или как файл отчета формата *.rtf
	 Печать...	Ctrl+P	Вызов диалогового окна печати исходных данных и результатов расчета;
	Установка принтера...	–	Вызов диалогового окна настройки принтера
	Выход	Alt+F4	Выход из программы <i>APM Trans</i>
Тип	 Передачи...	Ctrl+T	Вызов диалогового окна выбора типа передачи
	Расчета – Проектировочный	Ctrl+D	Выбор проектировочного расчета
	Расчета – Проверка по ресурсу	Ctrl+L	Выбор проверочного расчета по ресурсу
	Расчета – Проверка по моменту	Ctrl+Q	Выбор проверочного расчета по моменту
Данные...	 –	–	Вызов диалогового окна ввода исходных данных
Расчет	 Расчет	–	Проведение вычислений
Результаты...	 –	–	Вызов диалогового окна выбора результатов для просмотра
	Стандарт расчета	–	Вызов диалогового окна выбора стандарта расчета
База данных	Установить стандарт...	–	Выбор раздела баз данных
	Исходный контур...	–	Выбор исходного контура
	Настройка базы...	–	Вызов менеджера баз данных
Справка	Содержание	F1	Вызов справки по <i>APM Trans</i>
	 Q модуле...	–	Информация об установленной версии <i>APM Trans</i> и разработчике

### Информационные окна

Информационные окна составляют "лицо" программы, так как они постоянно у вас перед глазами. Эти окна предоставляют вам следующую информацию: *тип текущей передачи, опции текущей передачи и расчёта, заданные числовые параметры текущей передачи и краткое описание команд меню*. Каждому типу информации соответствует отдельное окно.

### Окно текущей передачи

Окно текущей передачи расположено в верхнем левом углу экрана системы **APM Trans** (рисунок 1.4). В этом окне представлен как рисунок текущей передачи, так и её наименование.



Рисунок 1.4 Окно текущей передачи. В верхней части окна показана текущая передача, в нижней части – её название

### Окно опций текущей передачи

Это окно показывает вам опции текущей передачи в виде пиктограмм (рисунок 1.5).

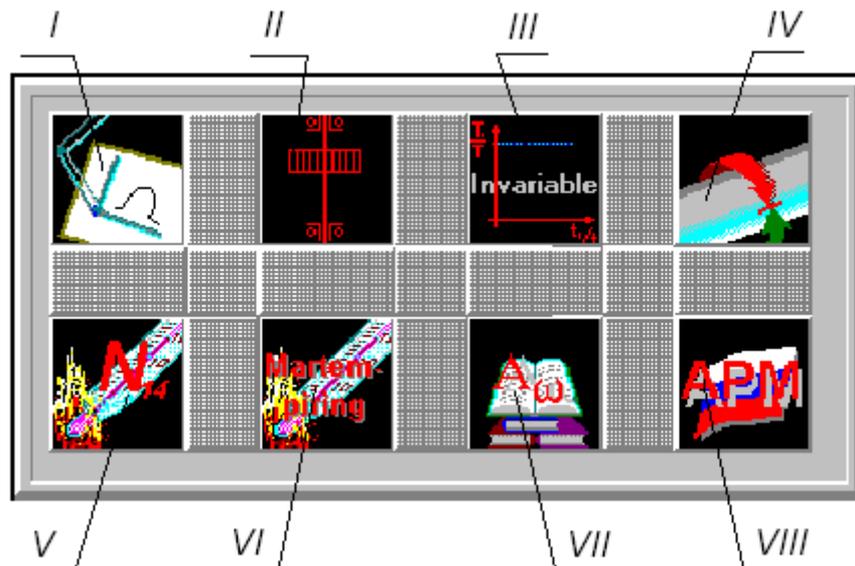


Рисунок 1.5 Фрагмент окна опций текущей передачи

Содержимое этого окна зависит от типа текущей выбранной передачи и расчёта. Каждая пиктограмма отвечает за свою опцию для каждого типа передачи. Приведём описание и вид каждой позиции:



*Независящие от типа передачи*

**Позиция I**

Показывает тип проводимого расчёта и может иметь следующий вид:



Тип расчёта не выбран



Проектировочный расчёт



Проверочный расчёт по ресурсу



Проверочный расчёт по моменту

*Зависящие от типа передачи*

**Позиция II**

**Цилиндрическая передача** - показывает тип расположения ведущего колеса на валу:



Тип расположения не выбран



Консольное расположение

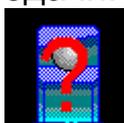


Несимметричное расположение

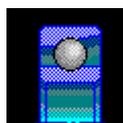


Симметричное расположение

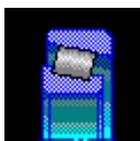
**Коническая передача** – показывает тип опоры ведущего вала передачи:



Тип опоры не выбран



Шарикоподшипники



Роликоподшипники



**Червячная передача** - тип расположения червяка, принимаемый по умолчанию в системе.

**Ремённые передачи** – не используется.

**Цепные передачи** – тип цепи.



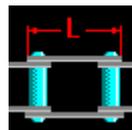
Тип цепи не выбран



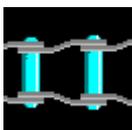
Втулочно-роликовая легкой серии



Втулочно-роликовая нормальной серии



Втулочно-роликовая с удлиненными пластинами



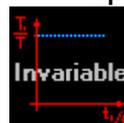
Втулочно-роликовая, с изогнутыми пластинами

### Позиция III

Цилиндрическая передача, коническая передача, червячная передача - показывает режим работы передачи:



Режим работы не выбран



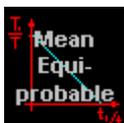
Постоянный режим



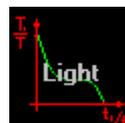
Тяжёлый режим работы



Средне нормальный режим



Средне вероятный режим



Легкий режим

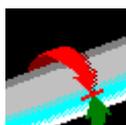


Особо легкий режим

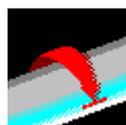
Для ременной и цепной передач - не используется.

### Позиция IV

Для цилиндрической и конической передачи - показывает реверсивность передачи



Реверсивная передача



Нереверсивная передача

Для червячной, ременной и цепной передачи - не используется.

### Позиция V

Для цилиндрической и конической передачи - показывает тип термообработки ведущего колеса передачи



Термообработка  
не выбрана



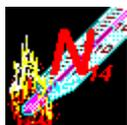
Улучшение



Закалка



Цементация и  
нитроцементация



Азотирование

**Червячная передача** - тип материала зубчатого венца червячно-го колеса.



Материал не выбран



Оловянистая бронза



Безоловянистая  
бронза

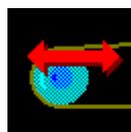


Чугун

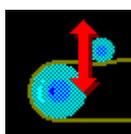
**Ремённые передачи** - тип механизма натяжения ремней.



Тип механизма не вы-  
бран



Натяжение смещени-  
ем валов

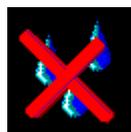


Натяжение роликом

**Цепные передачи** - тип смазки цепи.



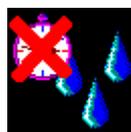
Тип смазки не выбран



Передача работает  
без смазки



Периодическая смазка



Непериодическая  
смазка



Смазка масляной ванной



Капельная смазка



Внутришарнирная смазка



Смазка распыливанием



Циркуляционная смазка

### Позиция VI

Для цилиндрической и конической передачи - показывает тип термообработки ведомого колеса передачи (см. предыдущую позицию)



Червячная передача - материал червяка (Сталь).

Ремённые передачи - не используется.

Цепные передачи - тип профиля зубьев звёздочки.



Профиль не выбран



Прямолинейный профиль



Выпукло-вогнутый профиль

### Позиция VII

Цилиндрическая передача – показывает, из какого ряда будет браться межосевое расстояние при расчёте



Нестандартное межосевое расстояние



Стандартное межосевое расстояние

Коническая передача – показывает, что система рассчитывает только ортогональные передачи





Для червячной, ремённой и цепной передач - не используется.

### Позиция VIII

Для всех типов передач не используется.

### Окно заданных параметров.

Это окно показывает вам начальные параметры текущей передачи. Если параметр не определён, то вместо его численного значения вы увидите "Н/опр." Если же параметр вами не используется (Дополнительные параметры, например), то вы увидите - "Н/исп." (рисунок 1.6).

Момент на выходе	300.00	Нм	Отн. ширина	Н/исп
Обороты на выходе	20.00	об/мин	Модуль	Н/исп
Передаточное отношение	2.00	-	Угол наклона	Н/исп
Ресурс	100.0	час	Кoeffициент X1	Н/исп
Межосевое	Н/исп		Кoeffициент X2	Н/исп

Рисунок 1.6 Фрагмент окна заданных параметров

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получить навыки работы в системе *APM Trans*.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Типичная последовательность действий при работе с системой *APM Trans* включает в себя следующие операции:

1. *Запуск программы;*
2. *Выбор типа передачи для расчета;*
3. *Выбор типа необходимого расчета;*
4. *Ввод необходимых параметров;*
5. *Выполнение расчетов;*
6. *Выбор результатов для просмотра;*
7. *Непосредственный просмотр результатов;*
8. *Задание конструктивных параметров необходимых для создания чертежей;*
9. *Выход в систему APM Graph для окончательной работы над чертежом;*
10. *Возврат в систему APM Trans.*



## Упражнение 1.1 Работа с системой APM Trans

### Задание 1. Запустите систему

Для того чтобы запустить **APM Trans** откройте окно группы **APM** (оно создается при инсталляции) и выберите в разделе “Инженерный анализ” иконку **APM Trans** (рисунок 1.7).

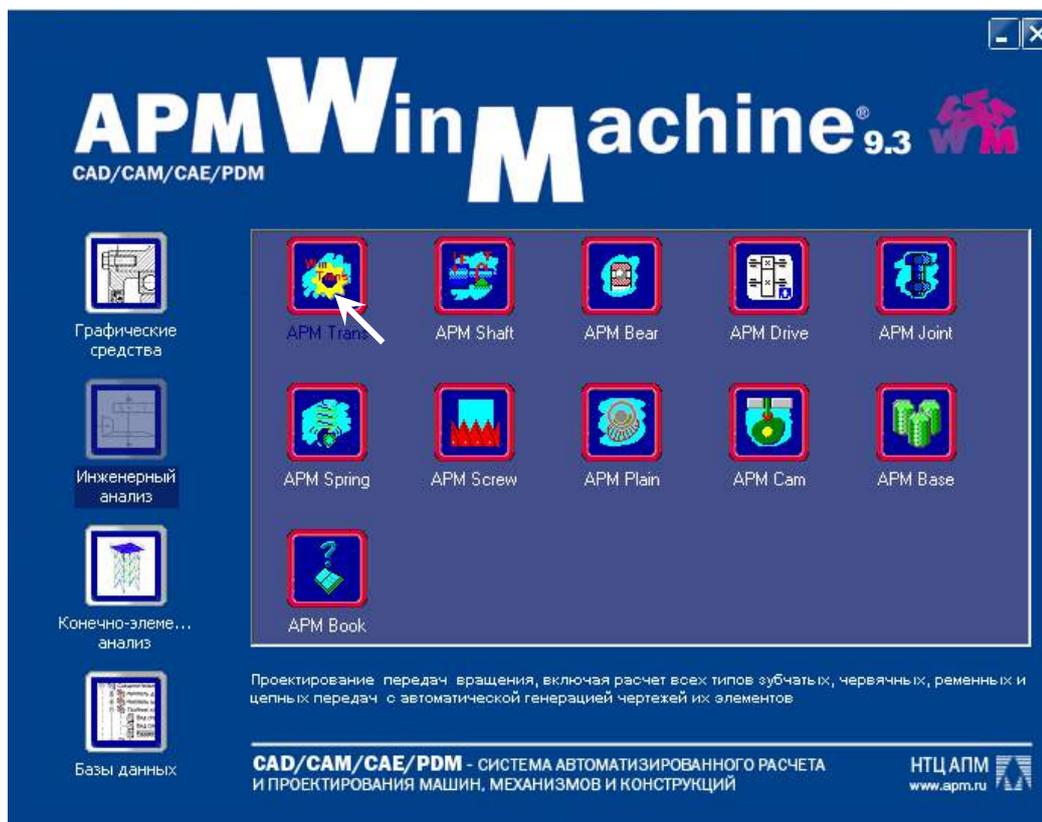


Рисунок 1.7

### Задание 2. Выберите тип передачи по образцу

Для выбора типа передачи используйте команду **Тип - Передачи**. В диалоговом окне, которое появится на экране (рисунок 1.8), выберите тип передачи, которую вы хотите рассчитать (рисунок 1.9).

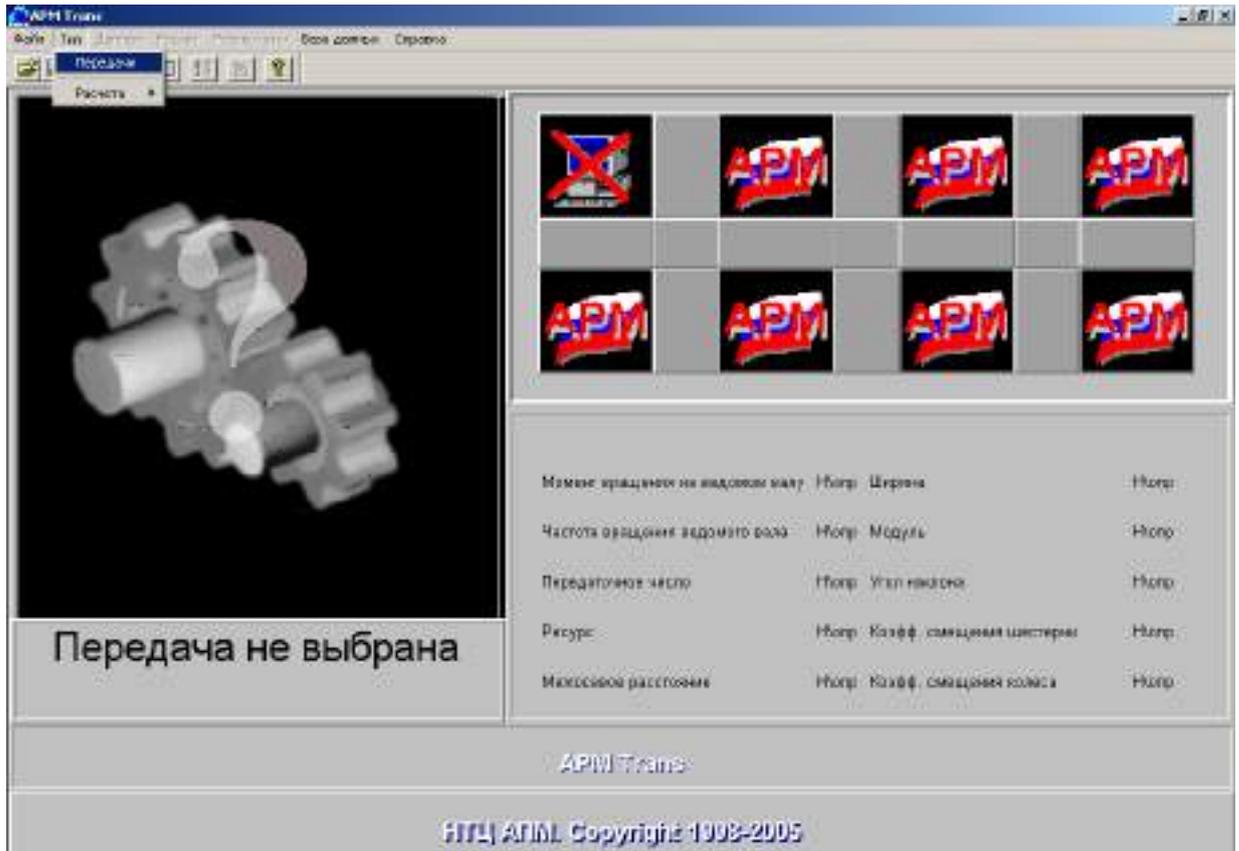


Рисунок 1.8

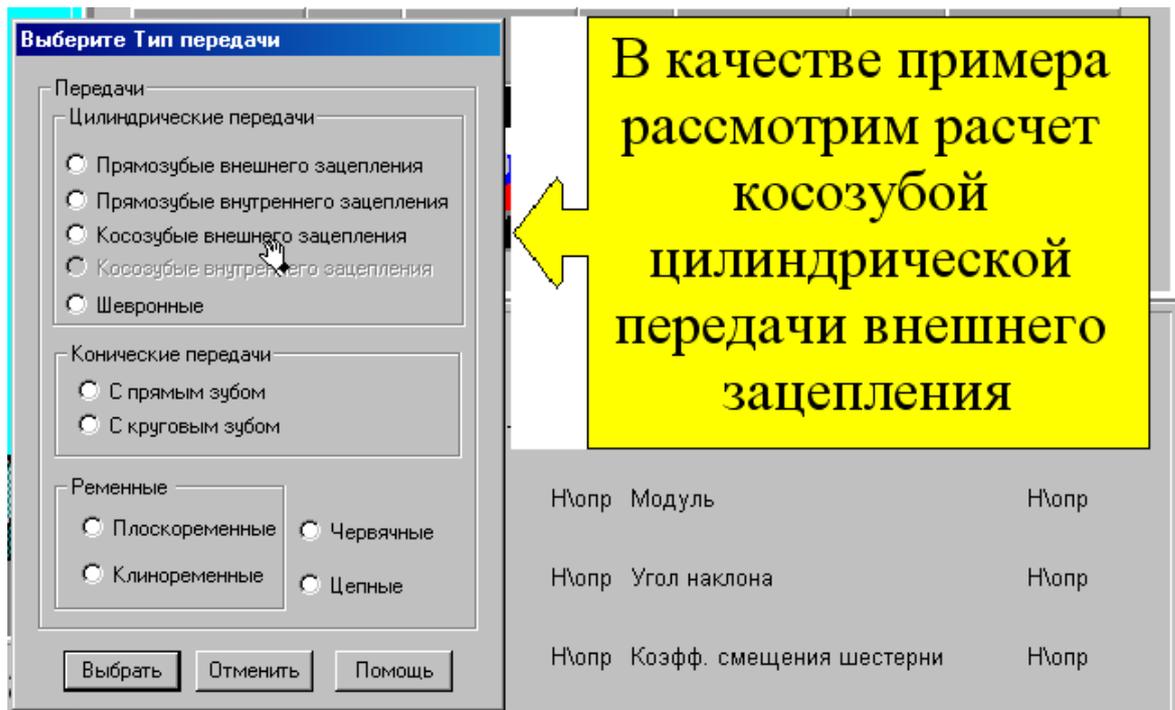


Рисунок 1.9 Выбор типа передачи



Появится заставка, соответствующая выбранной передаче (рисунок 1.10).

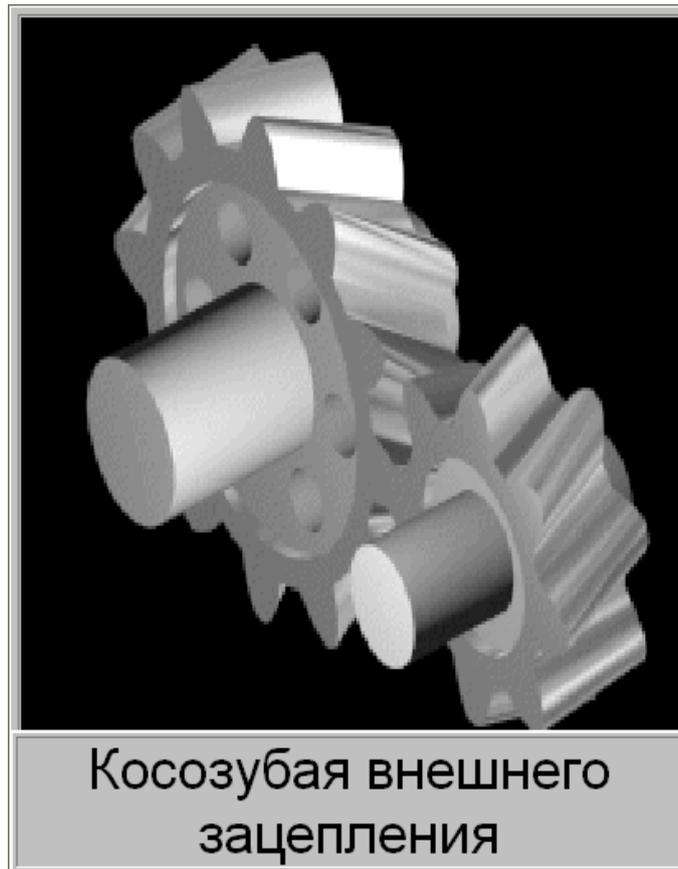


Рисунок 1.10

**Задание 3.** Выберите тип расчетов по образцу

В системе **APM Trans** реализовано два типа расчетов зубчатой передачи – проверочный и проектировочный. Для выбора типа расчетов используется команда **Тип - Расчета** (рисунок 1.11). **Тип Расчета** является пунктом меню и может принимать одно из трех значений:

- проектировочный
- проверка по ресурсу
- проверка по моменту

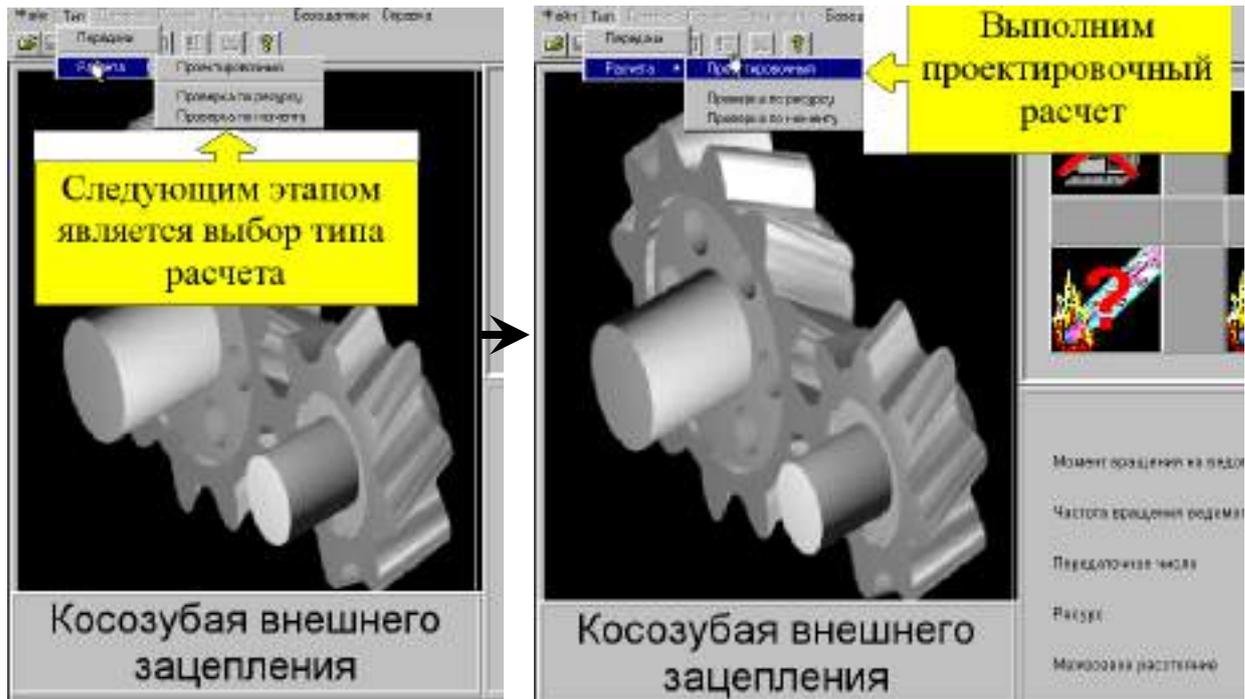


Рисунок 1.11 Выбор типа расчета

**Задание 4.** Введите исходные данные по образцу

Для того чтобы задать исходные данные служит команда **Данные**  главного меню. В ответ на эту команду появляется диалоговое окно для ввода данных. Содержание этого окна зависит от типа передачи и от типа проводимого расчета (рисунок 1.12).

Все исходные данные делятся на две группы: - "основные данные", т.е. данные без которых невозможен расчёт передач, и "ограничения". В ответ на команду **Данные** появляется окно для ввода "основных" данных. Оно содержит кнопку "**Еще...**" (если дополнительные данные не помещаются в основном окне). Если вы выберете эту кнопку, на экране будет отображено диалоговое окно для ввода дополнительных данных. В этом окне вы можете установить необходимые вам ограничения.

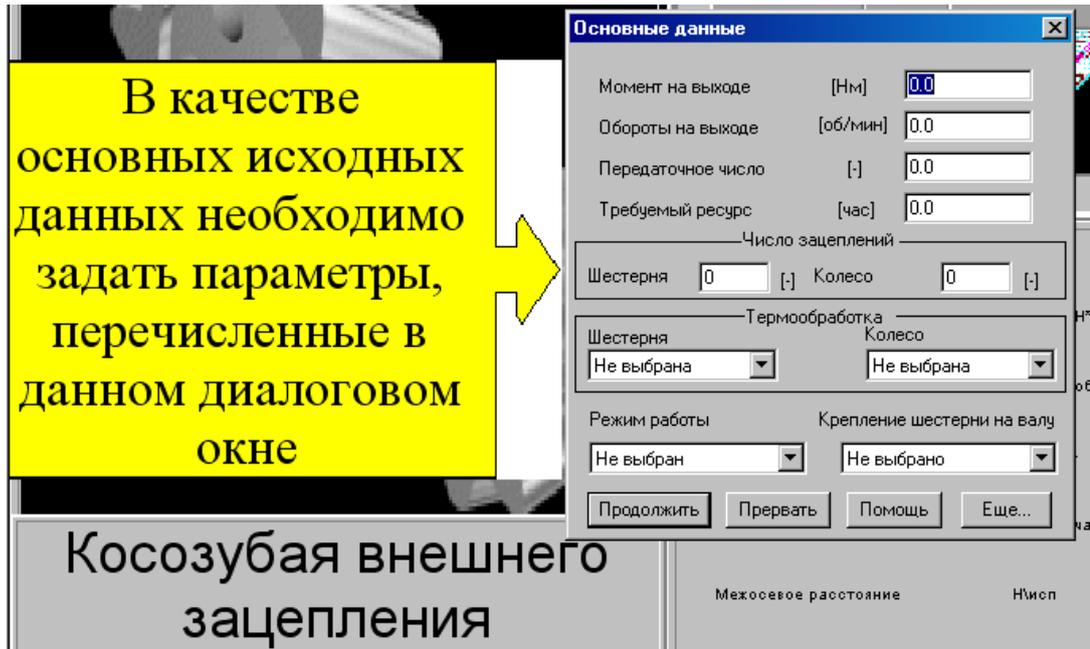


Рисунок 1.12 Диалоговое окно для ввода данных

Признаком установленного параметра является любое отличное от нуля значение. Это соглашение действует на все дополнительные параметры кроме одного случая – при установке коэффициентов смещения инструмента (которые могут иметь нулевое значение) вас попросят подтверждения их значения в случае равенства их нулю.

В обоих окнах действует проверка вводимых параметров. Проверка активизируется при нажатии кнопки подтверждения ввода (кнопка "OK"). В случае если введенные данные лежат в допустимых пределах, окно закроется, и вы сможете провести вычисления. Если же хоть один из введенных параметров выходит за пределы области допустимых значений, то система выдаст окно с предупреждением о некорректности параметра (рисунок 1.13).

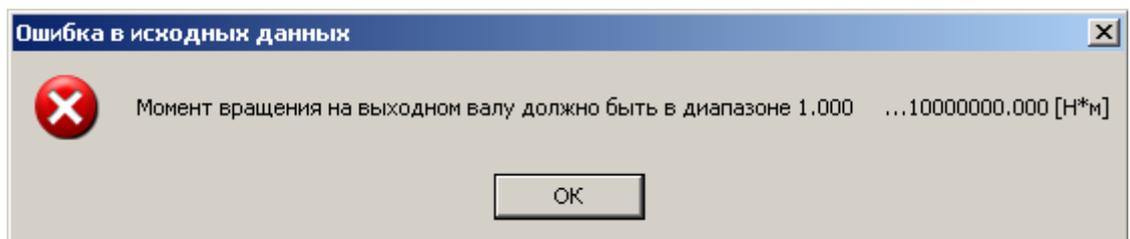


Рисунок 1.13 Сообщение о некорректности параметра

После того как вы нажмёте в этом окне кнопку "Ok" система автоматически установит фокус ввода на требуемый параметр. Изменив некорректное значение, вы можете снова подтвердить ввод.

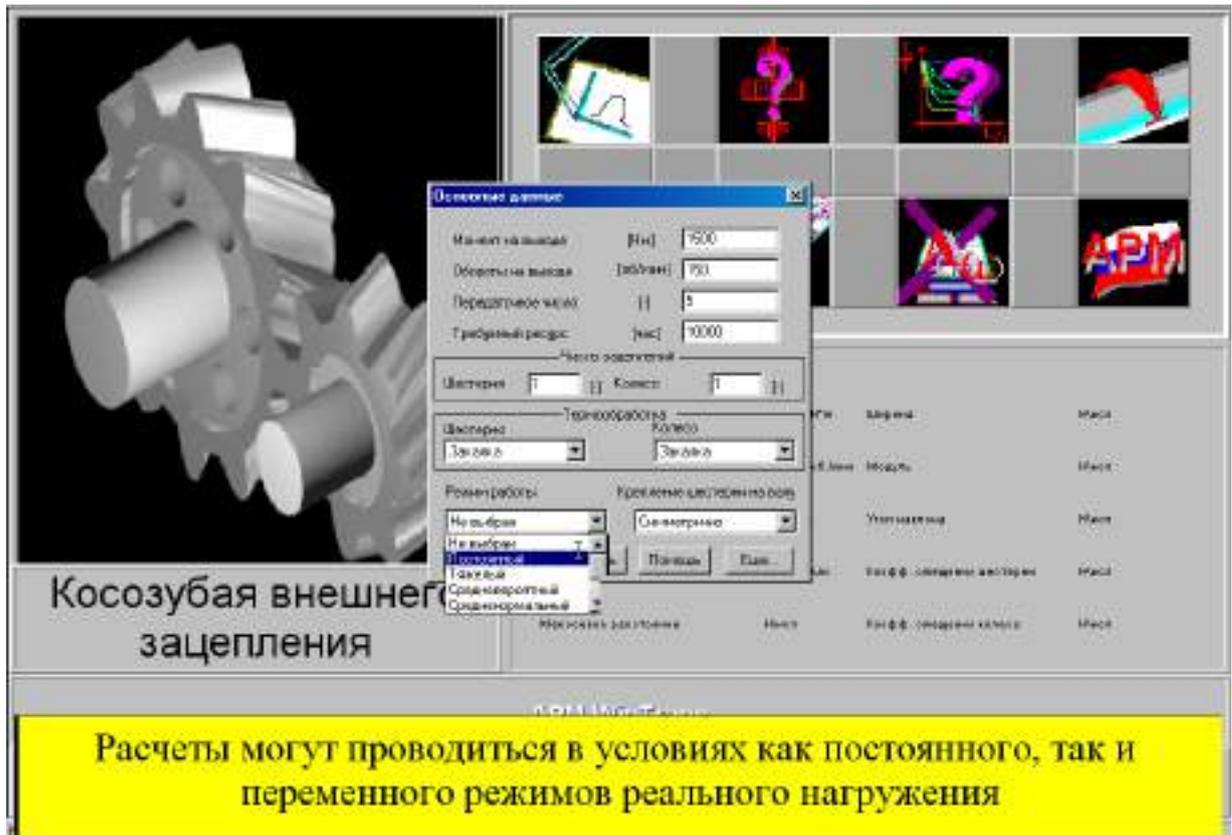


Рисунок 1.14

Введите **Основные данные**, показанные на рисунке 1.15.

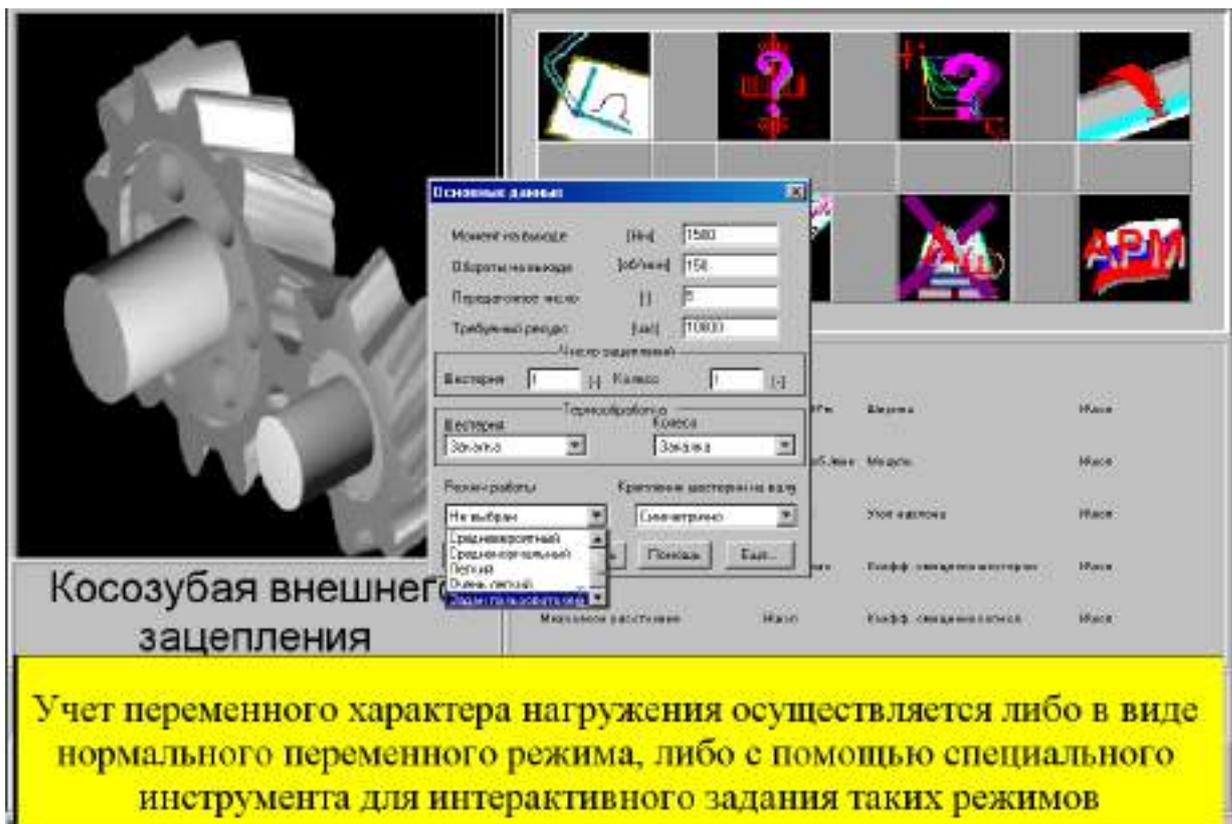


Рисунок 1.15

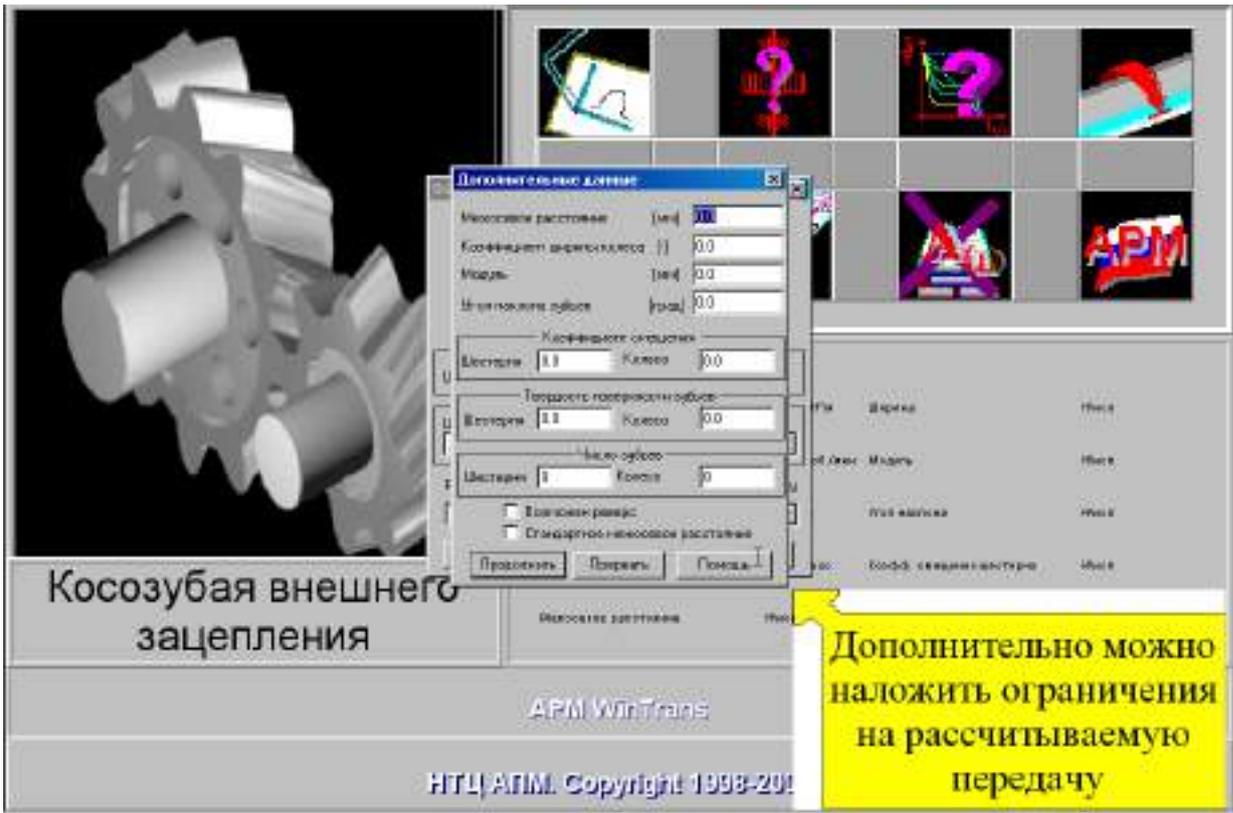


Рисунок 1.16

Введите **Режим нагружения**, так как это показано на рисунке 1.17.

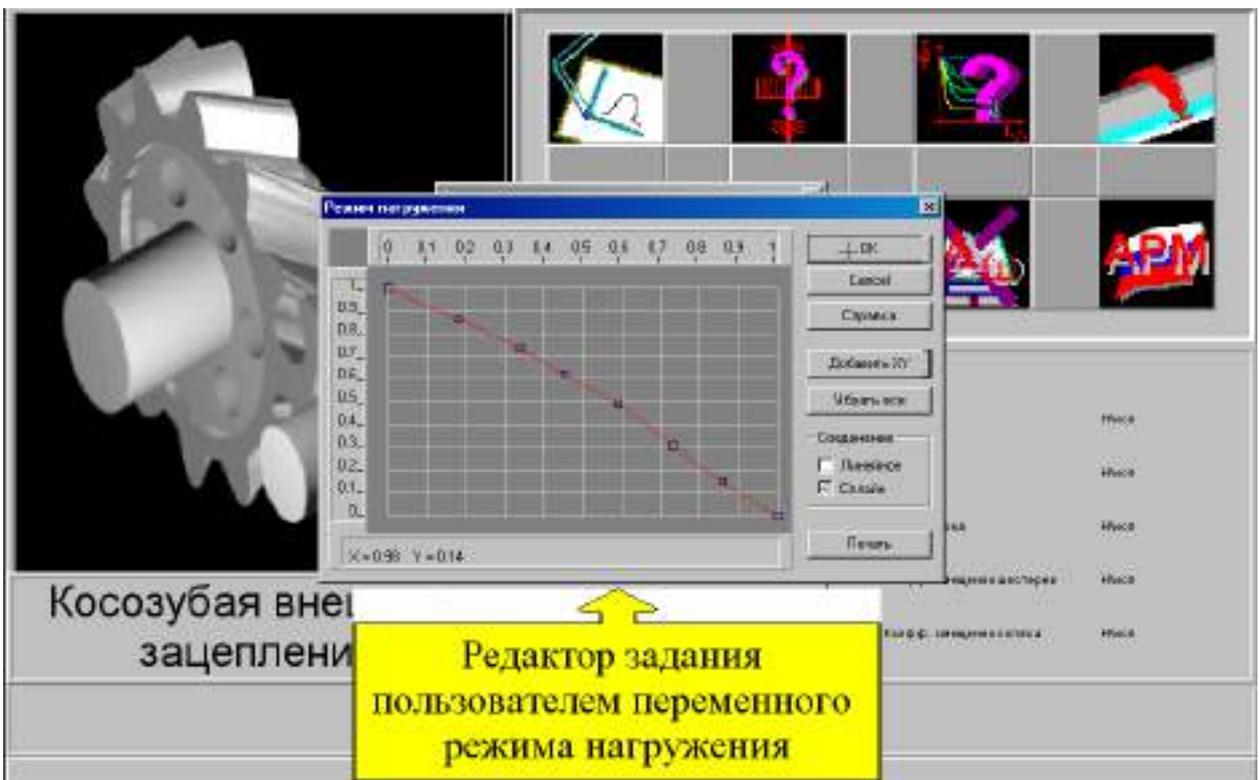


Рисунок 1.17

**Задание 5.** Выполните расчет и просмотр результатов расчета

Рисунок 1.18

После того как введены исходные данные, вы можете провести вычисления, выбрав команду **Расчет**  главного меню.

При успешном завершении расчетов на экран выводится окно с сообщением **"Ready"**.

После того как был проведён расчёт, вы можете просмотреть результаты вычисления, выбрав команду **Результаты** главного меню. По этой команде появляется диалоговое окно, содержащее кнопки, каждая из которых отвечает за демонстрации отдельной группы результатов (рисунок 1.19). Содержимое окна зависит от типа передачи.

Пример диалогового окна выбора результатов вы можете видеть на рисунке 1.19, где показано окно выбора результатов расчёта цилиндрической передачи. Для облегчения выбора всех результатов в окнах, где групп результатов достаточно много, добавлены кнопки – **"Выбрать Всё"** и **"Отменить Всё"**. Выбрав необходимые вам результаты, нажмите кнопку **"Продолжить"**. После нажатия этой кнопки окно выбора результатов закрывается, и вы попадаете в цепочку показа диалоговых окон с результатами (рисунок 1.20-1.29). В каждый момент времени для просмотра доступно только одно окно. Перейти к другому окну можно нажав кнопку **"Продолжить"**. Вы можете прервать показ результатов, нажав в любой момент времени кнопку **"Прервать"**. Указанная схема работает для всех типов передач, кроме ременных передач. Для этих передач по команде **Результаты** выводится таблица, содержащая результаты расчетов для всех типов ремней, находящихся в базе данных.

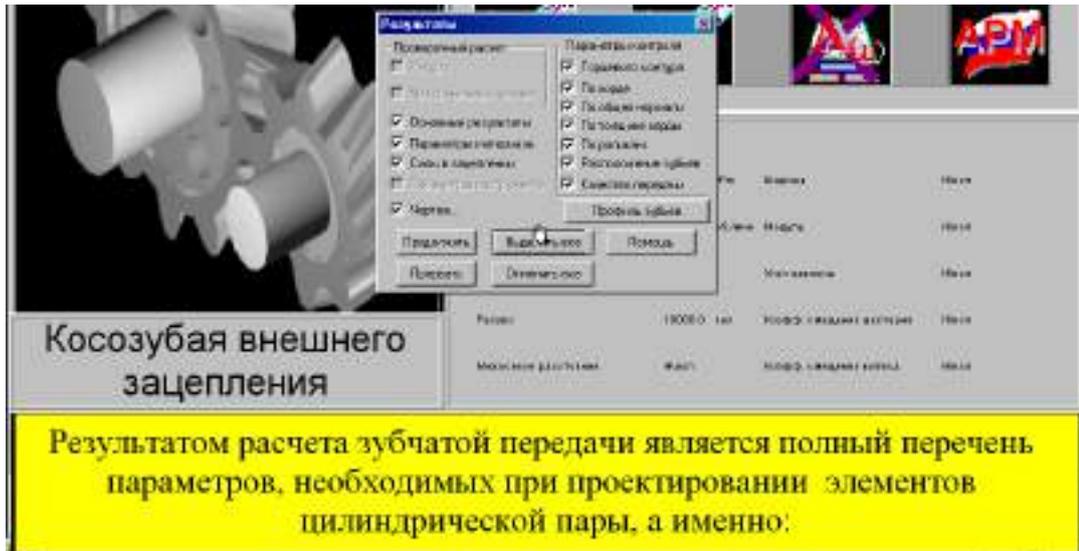


Рисунок 1.19

Результаты показаны на рисунках 1.20 – 1.29 (результаты расчета представлены в версии 8.5).

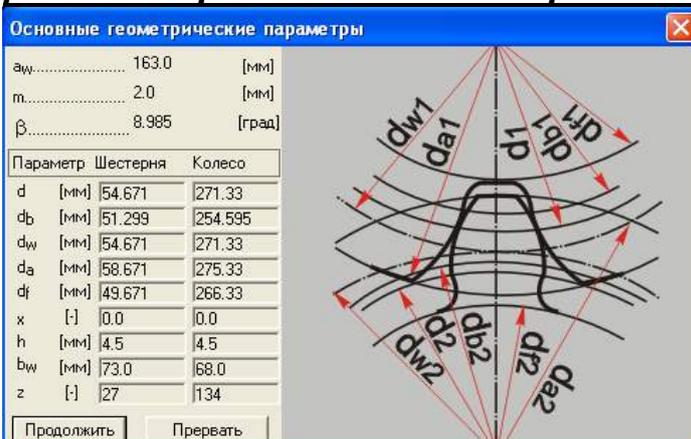


Рисунок 1.20 Основные геометрические параметры

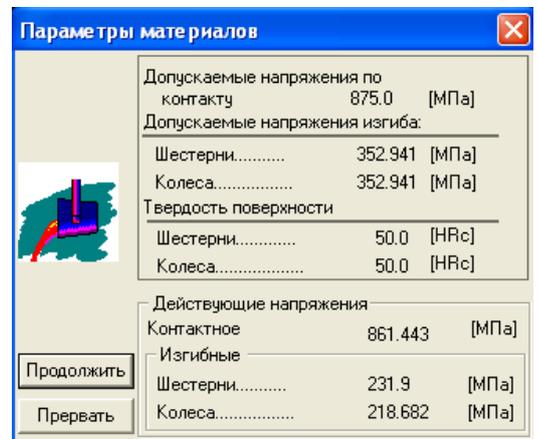


Рисунок 1.21 Параметры материалов

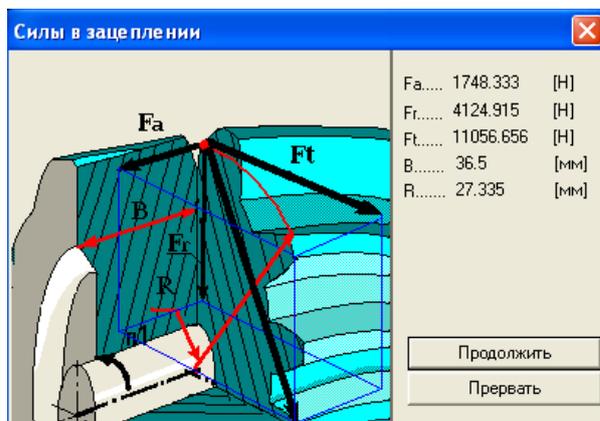


Рисунок 1.22 Силы в зацеплении

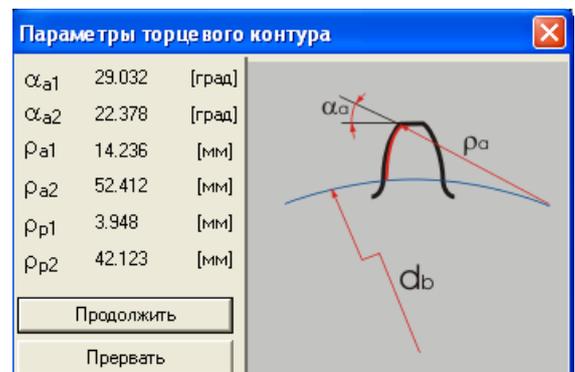


Рисунок 1.23 Параметры торцевого контура



**Параметры хорды**

$s_{c1}$	2.774	[мм]
$s_{c2}$	2.774	[мм]
$h_{c1}$	1.495	[мм]
$h_{c2}$	1.495	[мм]
$\rho_{s1}$	10.912	[мм]
$\rho_{s2}$	48.368	[мм]
$\beta_b$	8.44	[град]

Продолжить

Прервать

Рисунок 1.24 Параметры хорды

**Параметры общей нормали**

$\alpha_{x1}$	20.228	[град]
$\alpha_{x2}$	20.228	[град]
$\rho_{w1}$	10.608	[мм]
$\rho_{w2}$	47.186	[мм]
$W1$	21.448	[мм]
$W2$	95.404	[мм]
$z_{nr1}$	4	[-]
$z_{nr2}$	16	[-]

Продолжить

Прервать

Рисунок 1.25 Параметры общей нормали

**Толщина зуба по хорде**

Параметр	Шестерня	Колесо
$d_y$ [мм]	54.671	271.33
$\alpha_y$ [град]	20.228	20.228
$s_{ty}$ [мм]	3.181	3.181
$\beta_y$ [град]	8.985	8.985
$\Psi_{y\psi}$ [град]	3.212	0.647
$s_y$ [мм]	3.14	3.142
$h_y$ [мм]	2.044	2.009

Продолжить

Прервать

Рисунок 1.26 Толщина зуба по хорде

**Контроль по роликам**

D..... 3.5 [мм]

Параметр	Шестерня	Колесо
$d_D$ [мм]	56.139	272.899
M [мм]	59.544	276.399
$\alpha_d$ [град]	23.967	21.104
$\rho_m$ [мм]	9.671	47.4

Продолжить

Прервать

Рисунок 1.27 Контроль по роликам

**Расположение зубьев**

$\rho_x$	5.904	[мм]
$\rho_x$	40.229	[мм]
$\rho_{z1}$	1086.19	[мм]
$\rho_{z2}$	5390.723	[мм]

Продолжить

Прервать

Рисунок 1.28 Расположение зубьев

**Качество передачи**

$z_{min}$	17.097	[-]
$\alpha_{tw}$	20.228	[град]
$\epsilon_e$	1.724	[-]
$\epsilon_f$	1.661	[-]
$\epsilon_r$	3.385	[-]

Параметр	Шестерня	Колесо
$\beta_r$ [град]	9.631	9.116
$s_{na}$ [мм]	1.462	1.634
c [мм]	0.5	0.5

Продолжить

Прервать

Рисунок 1.29 Качество передачи

**Задание 6.** Выберите в окне **Результаты** кнопку **Профили зубьев** и включите анимацию процесса зацепления (рисунок 1.30).

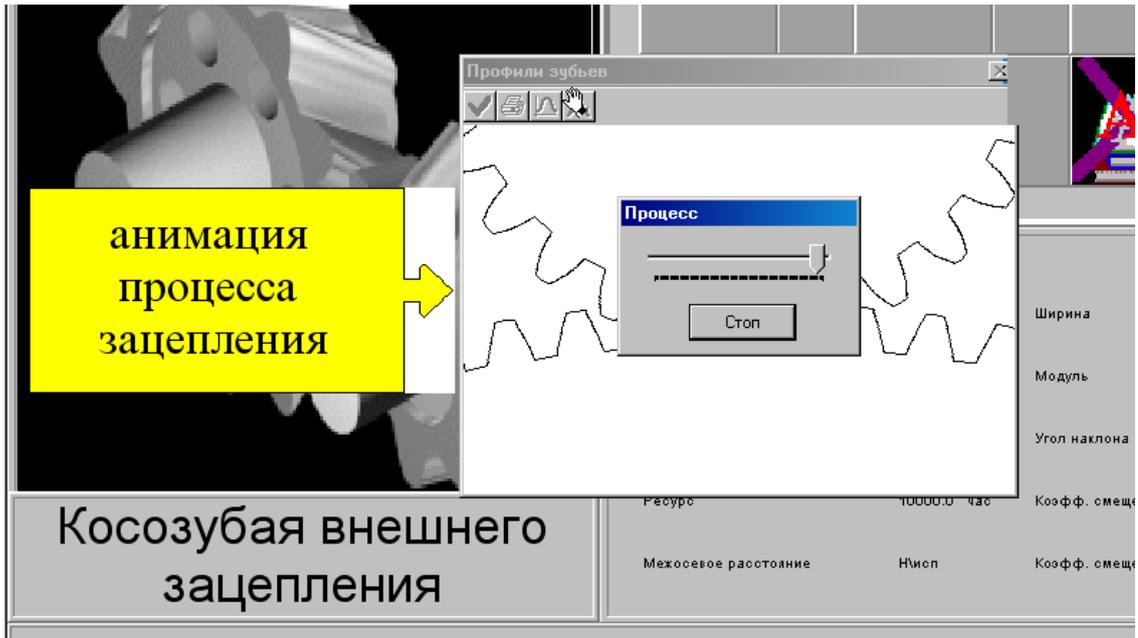


Рисунок 1.30

**Задание 7.** Просмотрите результат имитации процесса нарезания зубьев методом обкатки (рисунок 1.31).

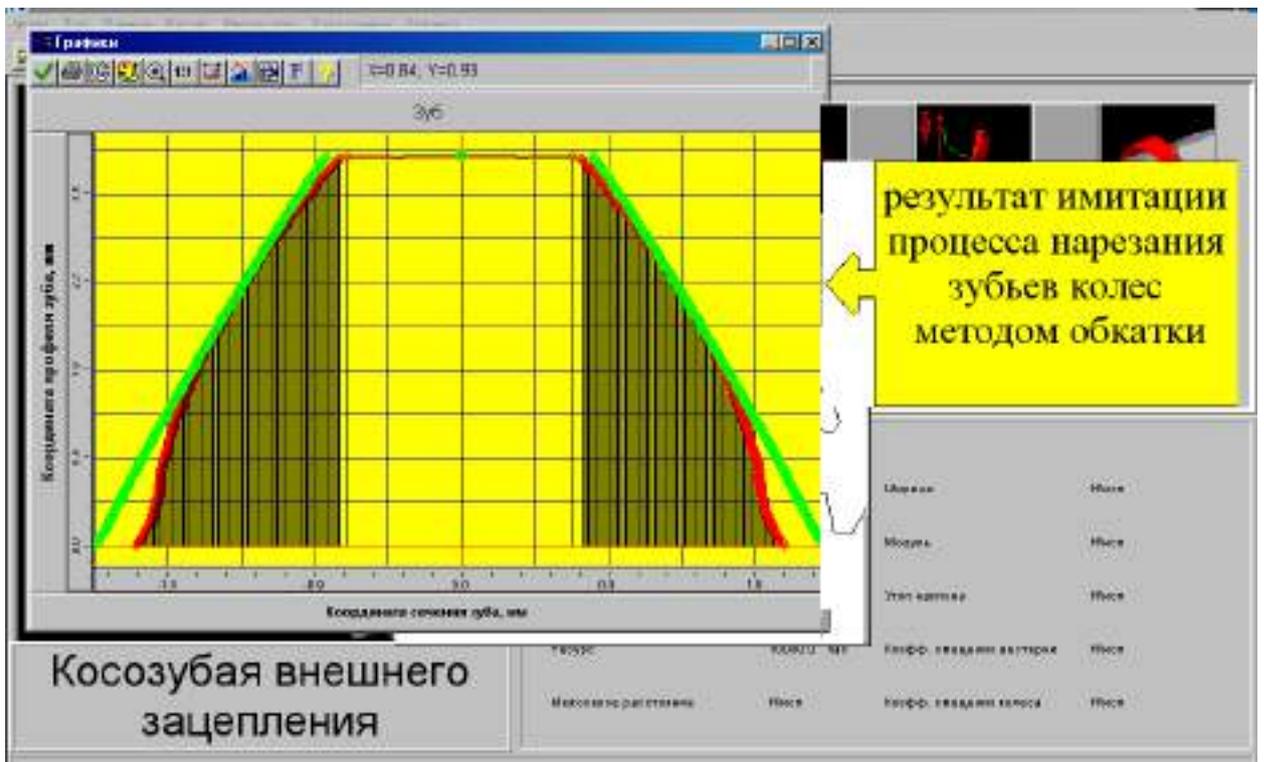


Рисунок 1.31

Так же имеется возможность экспорта элемента передачи (ведущего или ведомого) в графический модуль **APM Graph**.



**Задание 8.** Сохраните полученные расчеты в программе **Microsoft Word** (рисунок 1.32) с расширением **RTF**.

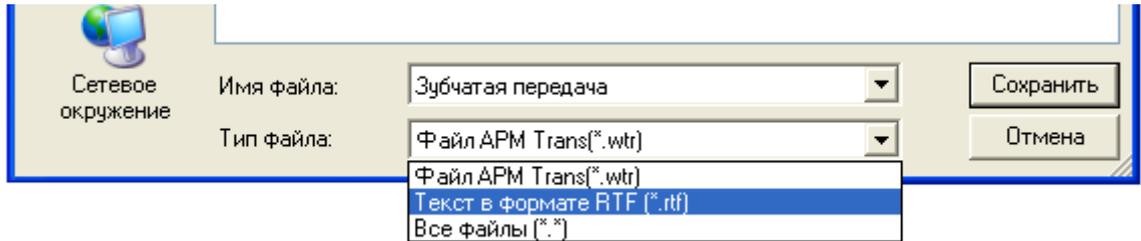


Рисунок 1.32

В результате полученные данные будут сохранены в этом документе (рисунок 1.33).

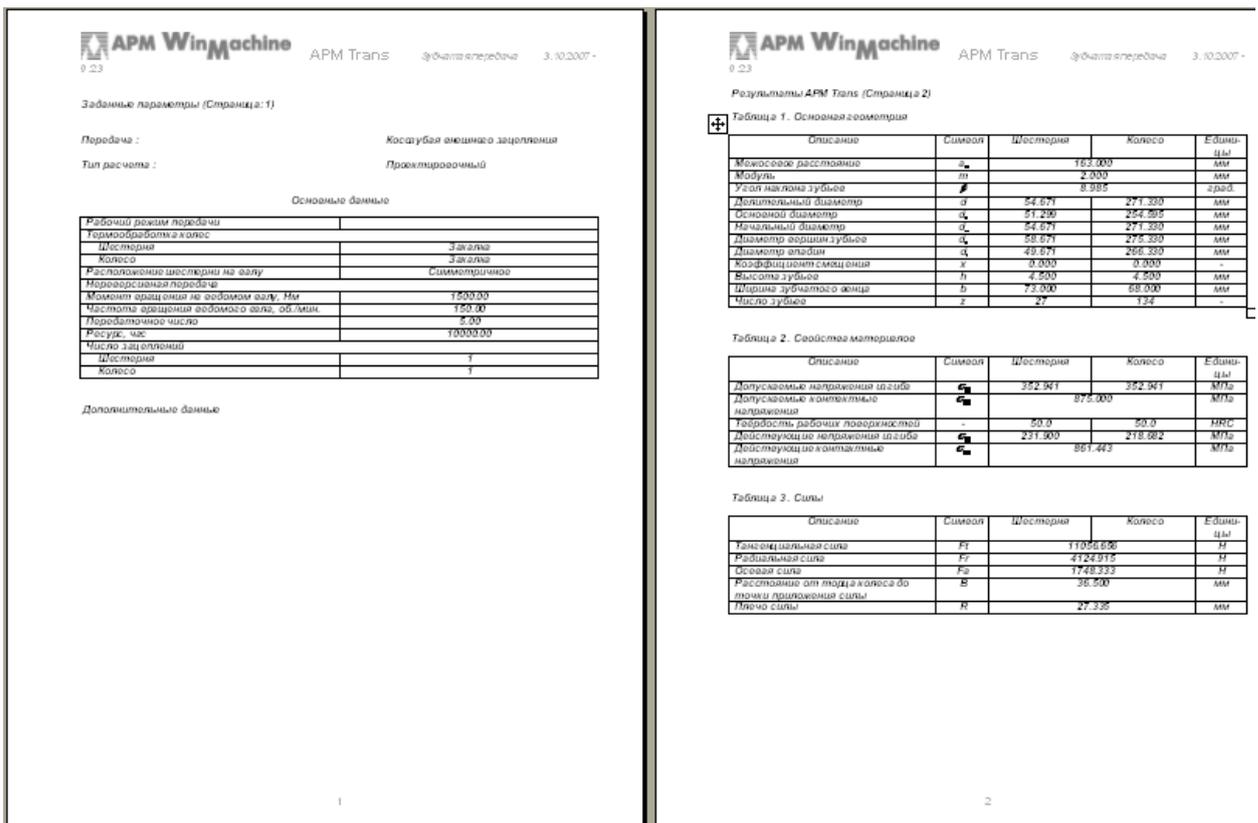


Рисунок 1.33

## 9. Создайте рабочий чертёж

После окончания расчета вы можете создать рабочие чертежи элементов рассчитанной передачи. Для создания чертежа вам нужно проделать следующие действия:

1. Выбрать опцию Черчение в диалоговом окне выбора результатов (рисунок 1.34).
2. В диалоговом окне выбрать элемент, который вы хотите на чертить.



3. При появлении главного окна оформления чертежа необходимо ввести параметры, характеризующие чертёж и конструкцию элемента передачи.

4. После ввода всех параметров чертежа в меню главного окна черчения сохраните чертёж, система APM Graph запустится автоматически.

5. Если необходимо, выполните окончательное редактирование чертежа в системе APM Graph. Печать чертежа возможна из графического редактора APM Graph.

6. Выйдите из системы APM Graph для продолжения работы с APM Trans.

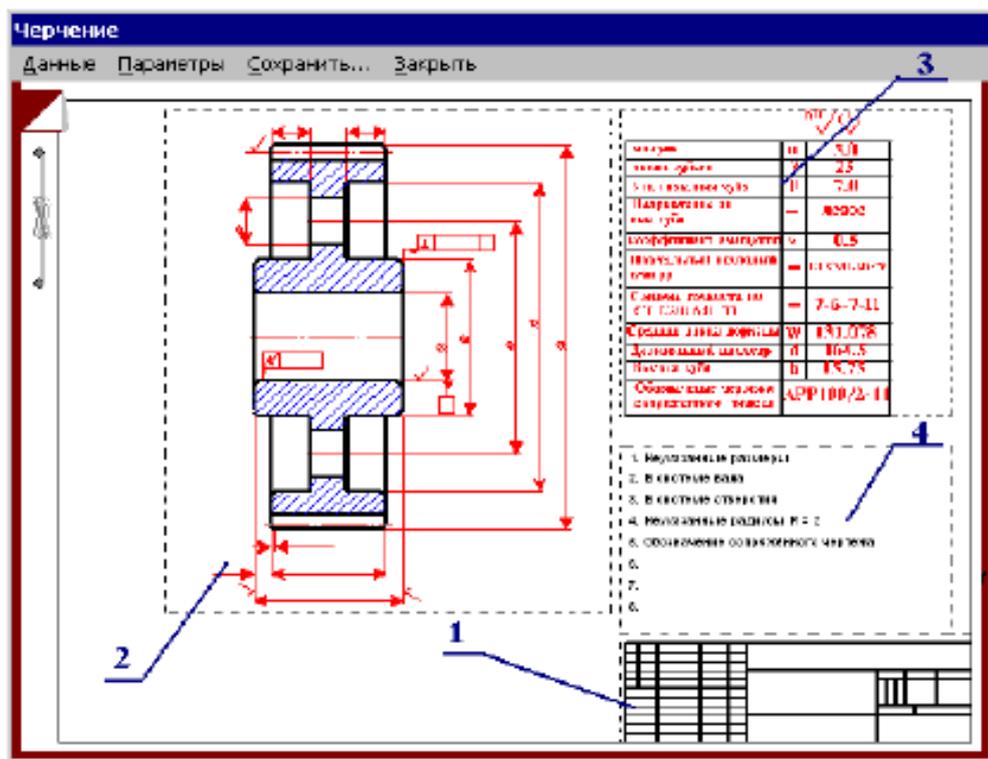


Рисунок 1.34 Главное окно подсистемы генерации чертежей

### Упражнение 1.2 Проектировочный расчет зубчатой цилиндрической косозубой передачи внешнего зацепления

**Задание.** Рассчитайте зубчатую цилиндрическую косозубую передачу одноступенчатого редуктора с моментом на выходе  $T_2 = 900$  Н·м. Частоты вращения входного и выходного валов передачи равны  $n_1 = 210$  об/мин и  $n_2 = 70$  об/мин соответственно, т.е. передаточное число  $u = 3$ . Передача неревверсивная с симметричным расположением шестерни относительно опор. Время безотказной работы  $t = 10\,000$  часов в тяжелом режиме нагружения. Зубчатые колеса изготовлены из стали 40X, закаленной по поверхности до твердости HRC 45÷50, тер-



мообработка типа “улучшение” с последующей закалкой ТВЧ по контуру до заявленной твердости.

**Заданные параметры:**Передача: *Косозубая*Зацепления: *Внешнего*Тип расчета: *Проектировочный***Основные данные**

Рабочий режим передачи	<i>Тяжелый</i>
Термообработка колес	
Шестерня	<i>Закалка</i>
Колесо	<i>Закалка</i>
Расположение шестерни на валу	<i>Симметричное</i>
Нереверсивная передача	
Момент на выходе, Н·м	<i>900.00</i>
Обороты на выходе, об./мин.	<i>70.00</i>
Передаточное число	<i>3.00</i>
Ресурс, час	<i>10000.00</i>
Число зацеплений	
Шестерня	<i>1</i>
Колесо	<i>1</i>

**Расчет цилиндрической косозубой передачи внешнего зацепления в модуле APM Trans**

1. Выберите тип передачи – *косозубая внешнего зацепления*.
2. Укажите тип расчета – *проектировочный*.
3. Установите стандарт – ГОСТ (**База данных – Установить стандарт**).
4. Проверьте установку параметров исходного контура (по умолчанию в меню **База данных – Исходный контур** установлен ГОСТ 13755-81 – исходный контур зубчатых цилиндрических колес эвольвентного зацепления).
5. Задайте основные исходные данные в полях ввода диалогового окна **Основные данные**, рисунок 1.35.
6. Нажмите в нижней части диалогового окна **Основные данные** кнопку **Еще**, введите в соответствующие поля ввода открывшегося окна **Дополнительные данные** необходимые значения (рисунок 1.36).



**Основные данные**

Момент на выходе [Нм] 900.0  
Обороты на выходе [об/мин] 70.0  
Передаточное число [-] 3.0  
Требуемый ресурс [час] 10000.0

Число зацеплений  
Шестерня 1 [-] Колесо 1 [-]

Термообработка  
Шестерня Закалка Колесо Закалка

Режим работы Тяжелый Крепление шестерни на валу Симметрично

Продолжить Прервать Справка Еще...

Рисунок 1.35

**Дополнительные данные**

Межосевое расстояние [мм] 0.0  
Кoeffициент ширины колеса [-] 0.0  
Модуль [мм] 0.0  
Угол наклона зубьев [град] 0.0

Кoeffициент смещения  
Шестерня 0.0 Колесо 0.0

Твердость поверхности зубьев  
Шестерня 45 Колесо 45

Число зубьев  
Шестерня 0 Колесо 0

Возможен реверс  
 Стандартное межосевое расстояние

Продолжить Прервать Справка

Рисунок 1.36

В данном случае необходимо включить флажок **Стандартное межосевое расстояние**, для того чтобы значение межосевого расстояния выбиралось из стандартного ряда, и задать точное значение твердости поверхности зубьев, использованное при расчете – в противном случае для вида термообработки **Закалка** программой будет принято по умолчанию  $HRC = 50$ .

7. Произвести расчет передачи (пункт **Расчет** главного меню).

8. Откройте диалоговое окно **Результаты** и отметьте флажками интересующие результаты расчета (рисунок 1.37).

**Результаты**

Проверочный расчет  
 Ресурс  
 Максимальный момент  
 Основные результаты  
 Параметры материала  
 Силы в зацеплении  
 Параметры инструмента  
 Чертеж...

Параметры контроля  
 Торцевого контура  
 По хорде  
 По общей нормали  
 По толщине хорды  
 По роликам  
 Расположение зубьев  
 Качество передачи

Профиль зубьев

Продолжить Выделить все Справка  
Прервать Отменить все Допуски...

Рисунок 1.37



## Результаты расчета цилиндрической косозубой передачи (результаты расчета представлены в версии 8.5)

Таблица 1.2 Основная геометрия (см. рисунок 1.38)

Описание	Символ	Шестерня	Колесо	Единицы
Межосевое расстояние	$a_w$	130.001		мм
Модуль	$m$	1.5		мм
Угол наклона зубьев	$\beta$	9.415		град
Делительный диаметр	$d$	65.381	194.622	мм
Основной диаметр	$d_b$	61.339	182.591	мм
Начальный диаметр	$d_w$	65.381	194.622	мм
Диаметр вершин зубьев	$d_a$	68.381	197.622	мм
Диаметр впадин	$d_f$	61.631	190.872	мм
Коэффициент смещения	$x$	0.000	0.000	-
Высота зубьев	$h$	3.375	3.375	мм
Ширина зубчатого венца	$b_w$	59.000	55.000	мм
Число зубьев	$z$	43	128	-

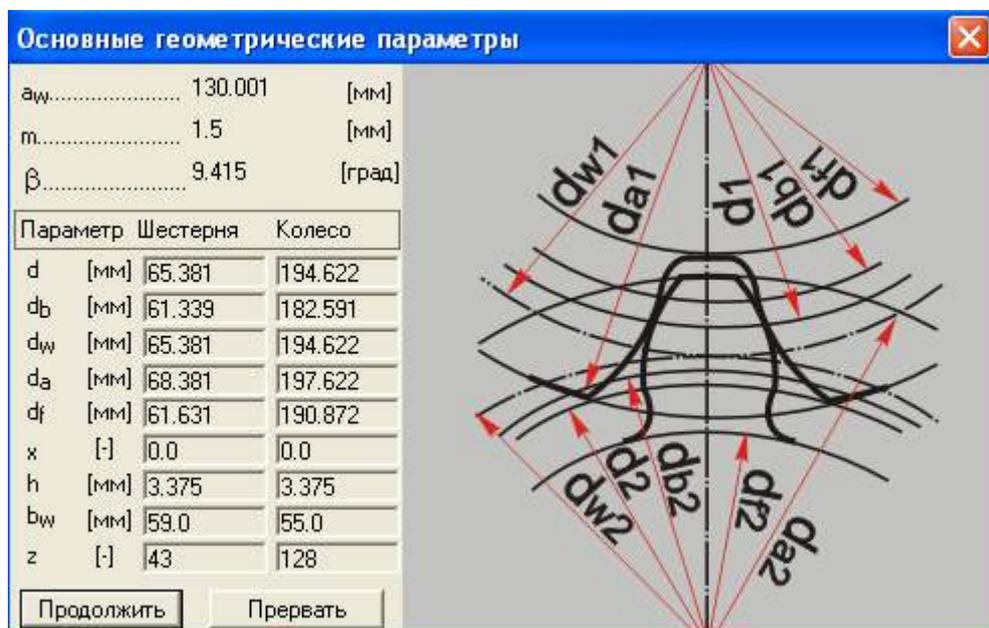


Рисунок 1.38

### Упражнение 1.3 Проектировочный расчет клиноременной передачи

**Задание.** Определите основные геометрические размеры клиноременной передачи, предназначенной для передачи мощности  $P_1 = 7,5$  кВт. Частота вращения ведущего шкива  $n_1 = 950$  об/мин, передаточное число  $u = 3$ . величина межосевого расстояния  $a_o = 800$  мм. При работе передачи имеют место умеренные колебания нагрузки, пусковая нагрузка не превышает 150% от номинальной.

**Заданные параметры:**Передача: *Клиноременная*Тип расчета: *Проектировочный***Основные данные**

Тип натяжного устройства	<i>Не выбран</i>
Мощность передачи, кВт	<i>7.500</i>
Частота вращения ведущего вала, об/мин	<i>950.000</i>
Передаточное число	<i>3.000</i>
Коэффициент динамичности нагрузки	<i>1.100</i>
Максимально допустимое количество ремней	<i>5</i>

**Расчет клиноременной передачи в модуле APM Trans**

Проектировочный расчет выполняется для выбранного поперечного сечения ремня. Из таблицы 1.3 выбираем сечение В, для которого:

$b_o = 14$  мм – ширина ремня на нейтрально слое;

$l_o = 2240$  мм – длина эталонного ремня сечения В;

$A = 138$  мм<sup>2</sup> – площадь поперечного сечения ремня;

$h = 10,5$  мм – высота поперечного сечения ремня;

$m_o = 0,18$  кг/м – масса единицы длины ремня (погонная плотность).

Таблица 1.3 Основные размеры клиновых и поликлиновых ремней

Тип ремня	Обозначение сечения	Размеры в сечении				A, см <sup>2</sup>	l <sub>o</sub>	l <sub>min</sub>	l <sub>max</sub>	D <sub>min</sub>	T <sub>1</sub>	m <sub>o</sub> , кг/м
		b <sub>o</sub>	b(t)	h	y <sub>o</sub>							
Клиновой нормального сечения	Z	8,5	10	6	2,1	0,47	1320	400	2500	63	<30	0,06
	A	11	13	8	2,8	0,81	1700	560	4000	90	15-60	0,10
	B	14	17	10,5	4,0	1,38	2240	800	6300	125	45-150	0,18
	C	19	22	13,5	4,8	2,30	3750	1800	10600	200	120-600	0,30
	D	27	32	19	6,9	4,76	4500	3150	15000	315	420-400	0,62
	E	32	38	23,5	8,3	6,92	7100	4500	18000	500	1600-6000	0,90



Клиновой узкого сечения	SPZ	8,5	10	8	2,0	0,56	1600	630	3550	63	150	0,07
	SPA	11	13	10	2,8	0,95	2500	800	4500	90	90-400	0,12
	SPB	14	17	13	3,5	1,58	3550	1250	8000	140	300- 2000	0,20
	SPC	19	22	18	4,8	2,78	5600	2000	8000	224	>2000	0,37
Поликли- новой	К	-	2,4	4,0	-	0,72	710	400	2000	40	40	0,09
	Л	-	4,8	9,5	-	3,56	1600	1250	4000	80	18-40	0,45
	М	-	9,5	16,7	-	11,37	2240	2000	4000	180	>130	1,6

$b_o$  – ширина ремня на нейтральном слое;

$b(t)$  – ширина большего основания трапеции в сечении клинового ремня (шаг ребер поликлинового ремня);

$h$  – высота сечения ремня;

$A$  – площадь сечения;

$l_o$  – длина стандартного ремня;

$l_{\min}$  – нижний предел длины;

$l_{\max}$  – верхний предел длины;

$D_{\min}$  – минимальный диаметр ведущего шкива;

$T_1$  – вращающий момент ведущего шкива;

$m_o$  – масса 1 м длины.

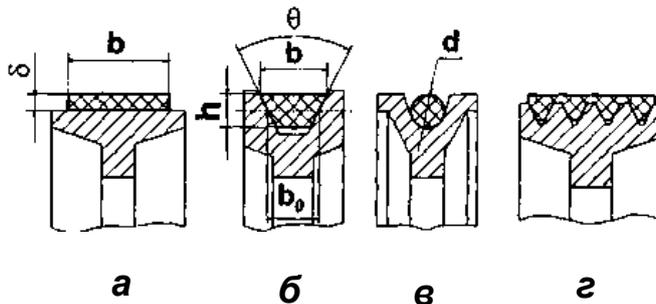


Рисунок 1.39 Ременные передачи: а – плоскоремённые; б - клиноремённые; в – круглоремённые; г – с поликлиновым ремнём

Для расчета клиноремённой передачи в модуле APM Trans необходимо задать следующие исходные данные (диалоговое окно **Основные параметры ременной передачи**, рисунок 1.40):

1. Мощность на ведущем валу;
2. Число оборотов ведущего вала;
3. Передаточное число;
4. Коэффициент динамичности нагрузки.

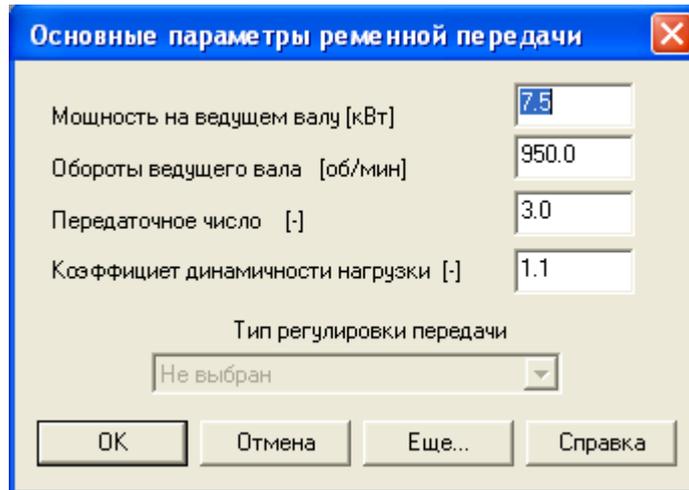


Рисунок 1.40

По таблице 1.4 определяем коэффициент динамичности нагрузки  $C_d$ . Для заданного характера нагрузки можно принять  $C_d = 1,1$ .

Таблица 1.4 Рекомендуемые значения коэффициента динамичности нагрузки  $C_d$

Характер нагрузки	$C_d$
Спокойная. Пусковая до 120% нормальной	1
Умеренные колебания. Пусковая до 150% нормальной	1,1-1,2
Значительные колебания. Пусковая до 200% нормальной	1,25-1,4
Ударная. Пусковая до 300% нормальной	1,5-1,6

Для корректного решения поставленной задачи в диалоговом окне **Дополнительные данные**, отрываемся нажатием кнопки **Еще**, следует обязательно указать величину межосевого расстояния  $a_o = 800$  мм.

Из остального списка дополнительных параметров можно задать максимальное число ремней и угол наклона передачи. По умолчанию максимально допустимое число ремней – 12, расположение передачи – горизонтальное (рисунок 1.41).

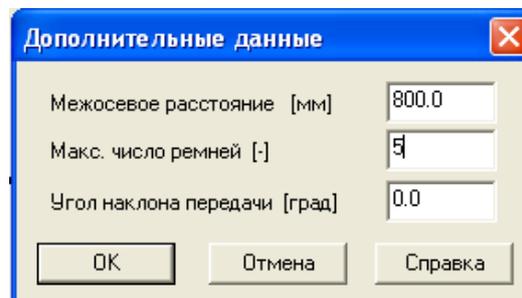


Рисунок 1.41



В качестве результатов программа выводит таблицу с различными вариантами размеров поперечных сечений ремней и диаметров ведущего шкива. Количество расчетных вариантов можно сократить, вводя ограничения на число ремней.

Для заданных исходных данных программой был рассчитан 31 вариант клиноременной передачи, из которых в данном случае можно выбрать тот, который ближе к выбранному сечению *B*, Номер 8 (таблица 1.5; рисунок 1.42).

### Результаты расчета ременной передачи (результаты расчета представлены в версии 8.5)

Таблица 1.5 Результаты расчета ременной передачи (рисунок 1.42)

Описание	Символ	Параметры	Единицы
Обозначение	$S$	$B$	-
Число ремней	$Z$	4	-
Диаметр ведущего шкива	$d_1$	140.000	мм
Диаметр ведомого шкива	$d_2$	400.000	мм
Длина ремня	$l$	2500.000	мм
Межосевое расстояние	$a$	815.524	мм
Передаточное число	$u$	2.901	-
Сила предварительного натяжения	$F$	807.801	Н
Сила, действующая на вал	$Q$	1363.566	Н

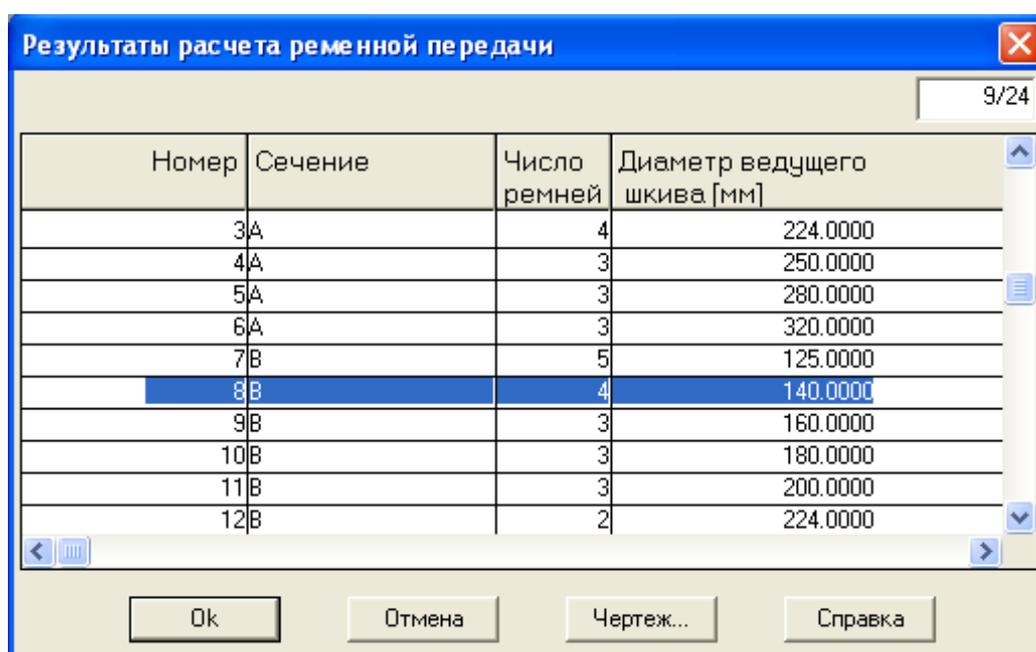


Рисунок 1.42



## Упражнение 1.4 Проектировочный расчет цепной передачи

**Задание.** Определите основные геометрические размеры элементов втулочно-роликовой цепной передачи с передаваемой мощностью  $P_2 = 1,5$  кВт. Частоты вращения ведущей и ведомой звездочек равны  $n_1 = 200$  об/мин и  $n_2 = 100$  об/мин соответственно. Величина межосевого расстояния близка к оптимальной,  $a = (30 \div 50)p$ , где  $p$  – шаг цепи. Расположение цепи – горизонтальное. Натяжение цепи регулируется периодически. Смазка цепи – периодическая. Коэффициент полезного действия передачи  $\eta = 0,94$ .

### Заданные параметры:

Передача: *Цепная*

Тип расчета: *Проектировочный*

### Основные данные

Тип цепи	<i>Роликовая повышенной точности</i>
Вид рабочей нагрузки	<i>Плавная нагрузка</i>
Тип смазки цепи	<i>Периодическая смазка</i>
Момент вращения на ведущей звездочке, Н·м	<i>76.20</i>
Частота вращения ведущей звездочки, об/мин	<i>200.00</i>
Передаточное число	<i>2.00</i>
Ресурс, час	<i>30.00</i>

### Расчет цепной передачи в модуле APM Trans

Для расчета цепной передачи необходимо задать основные параметры передачи. Диалоговое окно **Данные Цепной Передачи** показано на рисунке 1.43.

Данные Цепной Передачи

Момент на ведущей звездочке [Н\*м] 76.2

Обороты ведущей звездочки [об/мин] 200.0

Передаточное отношение [-] 2.0

Требуемый ресурс [час] 30.0

Рядность цепи [-] 1

Тип звездочки [иконка]

Тип смазки [Периодическая смазка]

Тип цепи [Роликовая повышенной т...]

Критерий расчёта [По статике]

Режим работы [Плавная нагрузка]

Ok Прервать Помощь Еще...

Рисунок 1.43



С помощью APM Trans могут быть получены следующие характеристики цепной передачи:

- параметры цепи;
- параметры звездочек;
- нагрузка на вал;
- чертеж звездочек.

**Результаты расчета цепной передачи (рисунки 1.44 -1.47)  
(результаты расчета представлены в версии 8.5)**

Таблица 1.6 Параметры цепи (рисунок 1.44)

Описание	Символ	Звездочка ведущая	Звездочка ведомая	Единицы
Межосевое расстояние	$a_w$	635.831		мм
Шаг цепи	$t$	15.875		мм
Диаметр ролика цепи	$D_1$	10.160		мм
Расстояние между пластинами	$B$	6.480		мм
Диаметр оси цепи	$d$	5.080		мм
Максимальная ширина цепи	$b$	20.000		мм
Высота пластины цепи	$h$	14.800		мм
Расстояние между осями рядов многорядных цепей	$A$	0.000		мм
Расстояние от края цепи до оси ряда	$b_1$	11.000		мм
Рядность цепи	$N_r$	1		-

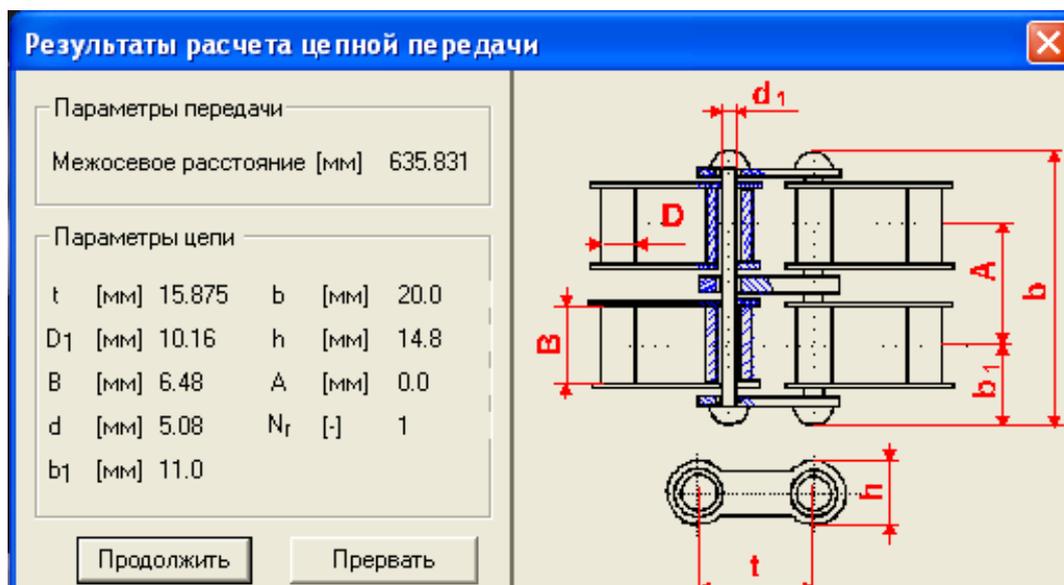


Рисунок 1.44



Таблица 1.7 Параметры звездочек (рисунок 1.45)

Описание	Символ	Звездочка малая	Звездочка большая	Единицы
Число зубьев	$Z$	25	50	–
Шаг звездочки	$t_z$	15.875	15.875	мм
Половина углового шага	$\tau$	7.2	3.6	град
Диаметр окружности, вписанной в шаговый многоугольник	$d_c$	125.664	252.26	мм

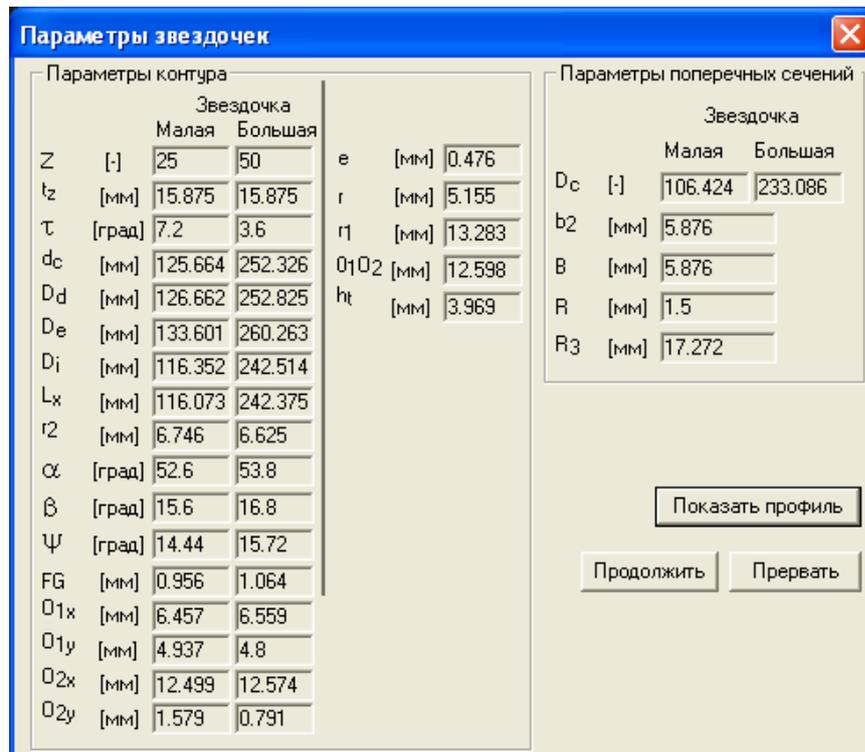


Рисунок 1.45

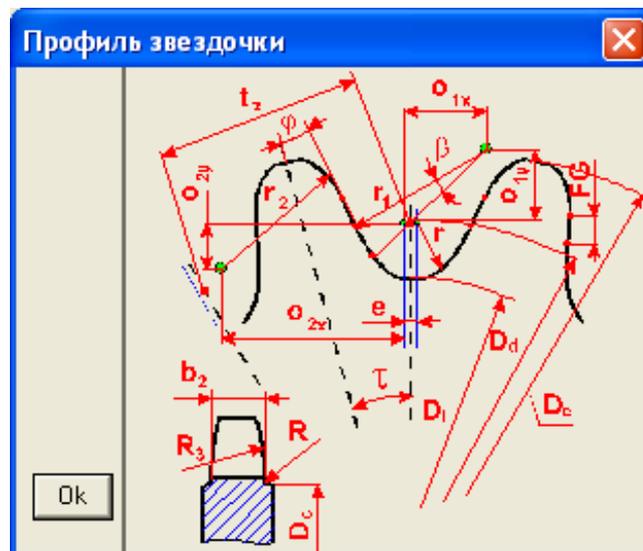


Рисунок 1.46



Таблица 1.8 Силы, действующие на вал (рисунок 1.47)

Описание	Символ	Звездочка малая	Звездочка большая	Единицы
Модуль силы	$F$	1203,199		Н
Угол между вектором силы и линией центров	$\alpha_f$	5,684		град

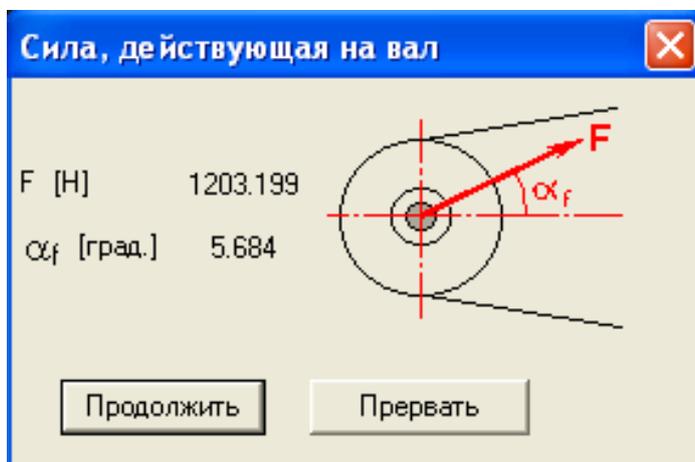


Рисунок 1.47



## 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВАЛОВ И ОСЕЙ В МОДУЛЕ APM SHAFT

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**APM Shaft** представляет собой программу для расчета и проектирования валов и осей.

С помощью **APM Shaft** можно рассчитать следующие параметры:

- реакции в опорах валов;
- распределение моментов и углов изгиба;
- распределение моментов и углов кручения;
- распределение деформаций;
- распределение напряжений;
- распределение коэффициента запаса усталостной прочности;
- распределение поперечных сил;
- собственные частоты и собственные формы вала.

### Назначение и классификация валов

Валы и оси служат для установки вращающихся деталей машин, таких как зубчатые колеса, шкивы, звездочки и т.п. *Вал предназначен для поддержания расположенных на нем деталей и для передачи вращающего момента.* При работе вал испытывает изгиб и кручение, а в отдельных случаях дополнительно растяжение и сжатие. *Ось предназначена только для поддержания расположенных на ней деталей.* В отличие от вала ось не передает вращающего момента и, следовательно, не испытывает кручения. Оси могут быть неподвижными или вращаться вместе с присоединенными к ним деталями.

### Критерии, используемые при расчете валов

В процессе работы валы испытывают значительные нагрузки, поэтому при определении оптимальных геометрических размеров валов необходимо выполнить комплекс расчетов, включающий в себя определение: статической прочности; усталостной прочности; жесткости при изгибе и кручении.

При высоких скоростях вращения необходимо определять частоты собственных колебаний вала для того, чтобы предотвратить попадание в резонансные зоны.

Длинные валы проверяют на устойчивость.



## Расчет статической прочности

Этот расчет является проверочным. С его помощью для вала заданной формы вычисляются значения коэффициентов запаса. Как правило, форма, и геометрические размеры вала определяются из конструктивных соображений. Расчет должен подтвердить или опровергнуть предложенную конструктором конфигурацию вала с точки зрения статической прочности. Заметим, что статическая прочность не является единственным критерием проверки правильности конструкции вала. Окончательный вывод может быть сделан только в результате проверки всех критериев.

При расчете статической прочности вал рассматривается как круглая балка переменного сечения. Валы изготавливаются из стали, механические характеристики, которой определяют величину запаса прочности при заданном нагружении вала. Таким образом, цель расчета вала может быть сформулирована как определение таких значений механических характеристик материала вала, которые обеспечивают заданные значения коэффициентов запаса прочности при заданном нагружении вала.

Если в каждом сечении вала напряжения одинаковы по величине, то такой вал называется **равнопрочным**. В силу ряда причин спроектировать равнопрочный вал на практике невозможно, но чем ближе фактические напряжения к напряжениям, имеющим место для равнопрочного вала, тем лучше будет использоваться материал проектируемого вала.

При расчете статической прочности в качестве исходных данных, помимо геометрических характеристик, должны быть заданы действующие на вал нагрузки, такие как:

- сосредоточенные и распределенные радиальные силы;
- осевые силы;
- изгибающие моменты;
- моменты кручения.

Необходимо также указать условия закрепления вала, задав конечное число опор, причем количество опор не должно превышать пятидесяти.

При вводе моментов кручения следует следить за тем, чтобы соблюдалось условие равновесия по кручению. Если это условие не выполняется, система проигнорирует введенные моменты кручения.

Расчет статической прочности включает в себя определение моментов изгиба и кручения в выбранных сечениях вала, а также расчет напряжений изгиба и кручения.

Прочность вала оценивается величиной эквивалентных напряжений, рассчитанных исходя из гипотезы максимальных касательных напряжений. В случае статически неопределимых валов расчет реакций опор выполняется методом сил.



Результаты расчета моментов изгиба представляются в виде эпюр, построенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Крутящие моменты и результаты расчета эквивалентных напряжений представляются в виде графика их изменения по длине вала. Статическая прочность считается достаточной, если коэффициент запаса составляет 1,3...1,5 и более. Под коэффициентом запаса понимается отношение предела текучести материала вала к величине эквивалентного напряжения в наиболее нагруженной точке. В качестве дополнительных параметров вычисляются величины реакций опор, которые необходимы для расчета сопряженных с валом деталей.

### **Расчет вала на сопротивление усталости**

Вращение вала приводит к возникновению переменных по времени напряжений. В случае изменений приложенной к валу внешней нагрузки неравномерность напряжений еще более возрастает. Переменный характер напряжений приводит к появлению усталостных трещин, которые могут стать причиной разрушения. Разрушение начинается в наиболее напряженных точках вала.

Большую роль в возникновении и развитии разрушений играют местные напряжения. Эти напряжения появляются в местах размещения канавок, галтелей, шлицевых соединений, шпонок, резьб и т.п.

Расчет усталостной прочности производится исходя из номинальных напряжений изгиба и кручения, с учетом местных напряжений, действующих в рассматриваемой точке вала. Влияние местных напряжений учитывается введением коэффициентов концентрации напряжений; значения этих коэффициентов зависят от типа концентратора.

Результаты расчета усталостной прочности представляются в виде графика изменения коэффициента запаса усталостной прочности по длине вала. Под коэффициентом запаса понимается запас длительной прочности. Так как точность расчета этого коэффициента существенно ниже, чем точность определения статической прочности, минимально допустимое значение коэффициента запаса не должно быть меньше 2,5.

В модуле предусмотрен также механизм учета переменности внешних силовых факторов, при котором переменный режим нагружения приводится к эквивалентному постоянному режиму.

### **Расчет жесткости**

В некоторых случаях важным критерием, обуславливающим пригодность предложенной конструкции вала, является его *жесткость*. Напомним, что под жесткостью понимается нагрузка, вызывающая единичную деформацию (в принятой системе единиц измерения).



Расчет жесткости в модуле **APM Shaft** включает в себя определение деформаций, возникающих под действием приложенной нагрузки. Для расчета деформаций используется метод интеграла Мора. В соответствии с характером нагрузки жесткость вала делится на *изгибную* и *крутильную*; в **APM Shaft** вы можете рассчитать оба этих типа. Результаты расчета выводятся в виде графика изменения жесткости вдоль оси вала.

В некоторых случаях бывает необходимо определить углы поворота поперечных сечений вала и параметров кручения, полученных дифференцированием кривой деформаций; **APM Shaft** позволяет провести такие расчеты. Условие жесткости считается выполненным, если фактические деформации и углы наклона рассматриваемых сечений не превышают максимально допустимых значений.

Величины допустимых значений зависят от назначения проектируемого оборудования и требуемой точности.

### **Расчет динамических характеристик вала**

При расчете быстроходных или нежестких валов возникает задача определения собственных частот изгибных и крутильных колебаний.

**APM Shaft** позволяет рассчитать как абсолютные значения собственных частот, так и их собственные формы.

В основу определения собственных частот в **APM Shaft** положен метод начальных параметров. При расчете изгибных колебаний учитывается как собственная масса вала, так и инерция поворота сечения вала.

При расчете учитываются внешние массы, к которым относятся массы и осевые моменты инерции. При расчете крутильных колебаний предполагается, что моменты инерции описывают тела вращения (для которых осевой момент инерции в два раза меньше, чем полярный).

Модуль **APM Shaft** позволяет рассчитать вал при различных граничных условиях и различных типах опор.

*Рассматриваются опоры следующих видов:*

- жесткая безмоментная опора (смещение оси вала и реактивный момент равны нулю);
- упругая опора (смещение оси вала пропорционально реакции в опоре).

*Из параметров материалов системе требуются:*

- плотность материала;
- модуль упругости;
- коэффициент Пуассона.



## Редактор валов

Редактор валов, входящий в состав модуля **APM Shaft**, представляет собой графический редактор, предназначенный для задания геометрии валов и осей. Редактор дает в распоряжение пользователя гибкие и удобные средства для:

- задания конструкции вала;
- ввода нагрузок, действующих на вал;
- размещения опор, на которых установлен вал.

Основное отличие редактора валов модуля **APM Shaft** от традиционных графических редакторов состоит в наборе примитивов, с которыми он оперирует. Набор примитивов в **APM Shaft** включает в себя основные элементы конструкции вала (цилиндрические и конические сегменты, фаски, галтели, канавки, отверстия, участки с резьбой, шпонки и шлицевые соединения), а также условные обозначения для действующих на вал нагрузок и опор, на которых он установлен. Это значительно упрощает ввод геометрии вала и других данных, необходимых для выполнения расчетов.

## Компоненты редактора валов

Основными элементами редактора валов являются инструментальная панель, информационная панель, линейки и рабочее поле (окно редактирования).

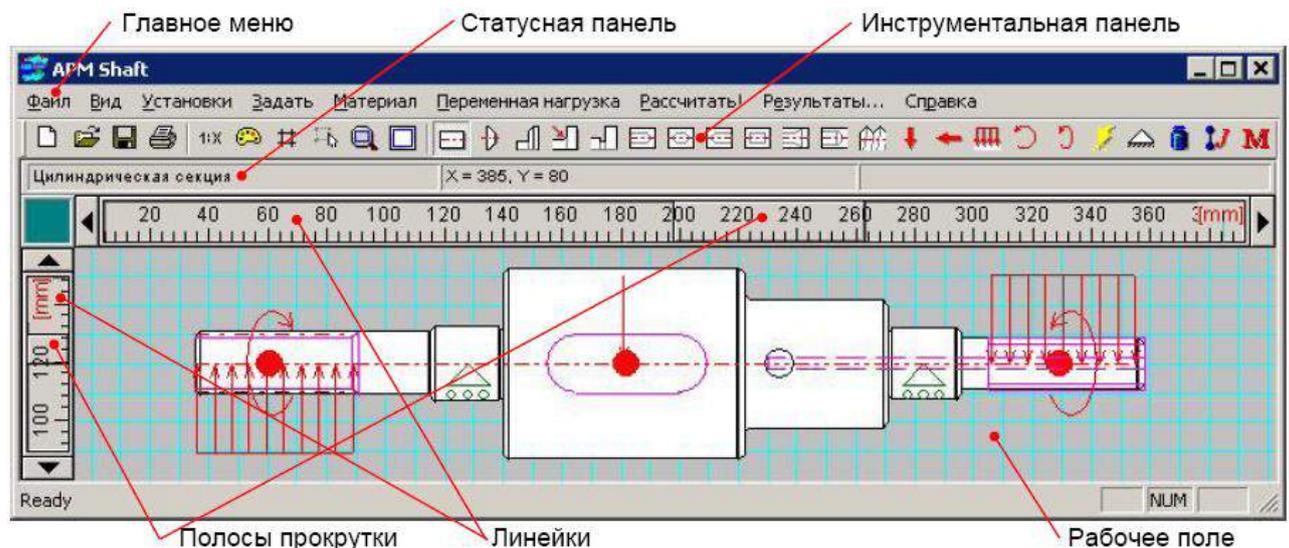


Рисунок 2.1 Общий вид **APM Shaft**



### Главное меню

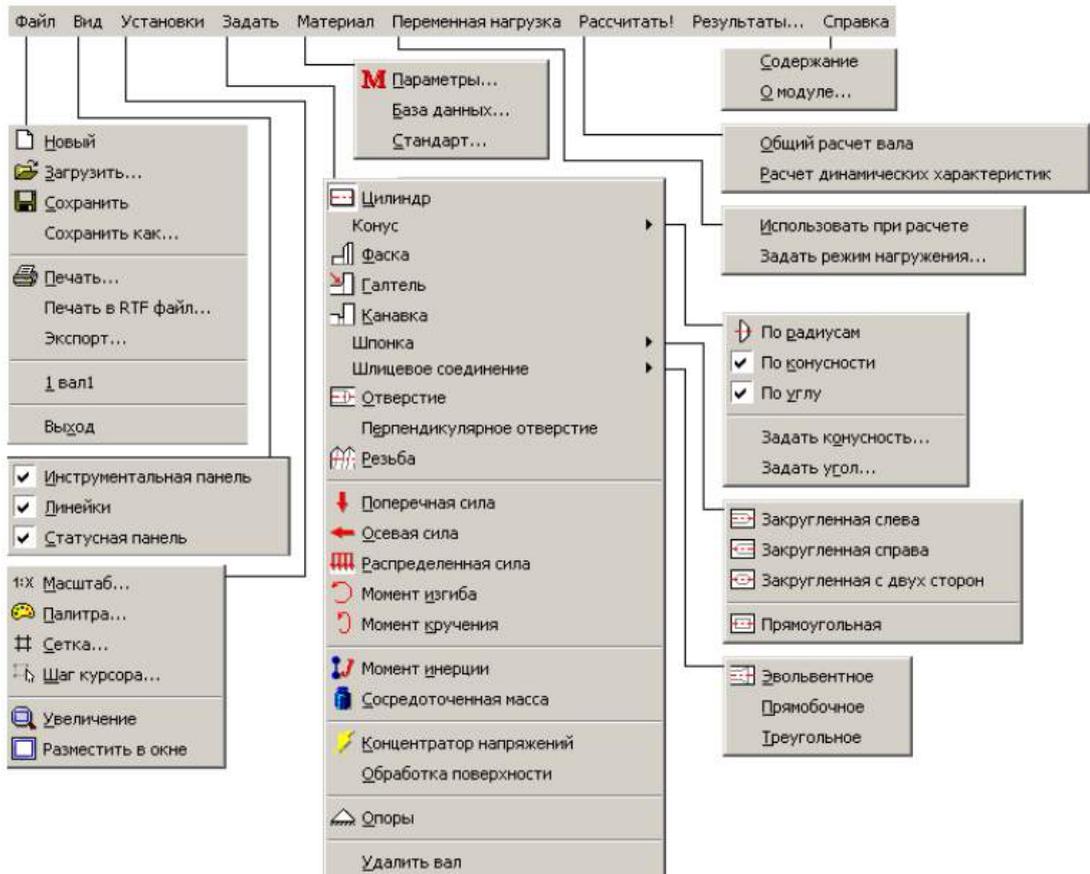


Рисунок 2.2 Структура главного меню системы APM Shaft

### Рабочее поле

Рабочее поле является главным компонентом редактора валов. В нем отображается вал, и выполняются операции по его формированию и изменению.

### Линейки

Редактор включает в себя две линейки - вертикальную и горизонтальную. На линейках показаны шкалы, которые зависят от текущего масштаба изображения и от того какая часть вала показывается в данный момент в рабочем поле.

### Информационная панель

Информационная панель используется для вывода текущих значений параметров в процессе рисования вала. Набор отображаемых параметров зависит от того, с каким элементом вы работаете. Так, например, при рисовании цилиндрического участка вала на информационной панели показываются координаты курсора, а также текущие значения длины и диаметра цилиндрической секции.

### Инструментальная панель

Инструментальная панель содержит кнопки для вызова основных команд редактора. Для вызова нужной команды просто щелкните левой кнопкой мыши на соответствующей кнопке.



### **Полосы прокрутки и панорамирование вала**

Вал, с которым работает пользователь, может не помещаться целиком в рабочем поле. Полосы прокрутки позволяют “перемещать” вал относительно рабочего поля редактора.

### **Увеличение размеров рабочего поля**

Пользователь может увеличить размеры рабочего поля за счет удаления с экрана линеек, инструментальной и информационной панелей. Для этого используются команды **Вид – Линейки (Инструменты, Статусная панель)**. В любой момент каждый из этих элементов можно снова вернуть на экран.

### **Масштаб изображения**

Для изменения масштаба изображения служит команда **Установки – Масштаб** . В диалоговом окне показанном на рисунке 2.3 вы можете ввести нужный масштаб в поле *Масштаб* или выбрать один из стандартных масштабов (1 : 2, 1 : 5, 1 : 10 и т.д.).

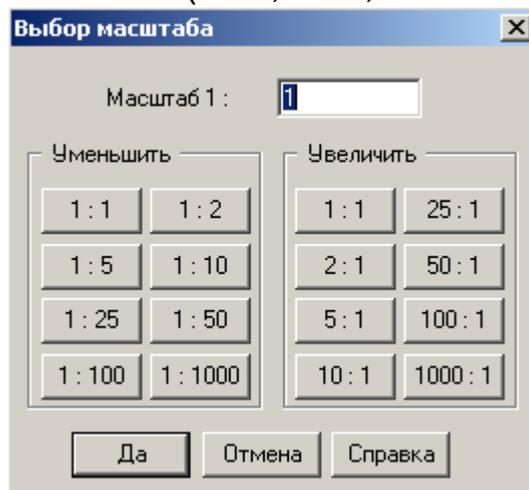


Рисунок 2.3

### **Палитры редактора**

Палитрой называется совокупность цветов, используемых для рисования компонентов вала, нагрузок и опор, а также цвета фона и цвета линий вспомогательной сетки. Для выбора палитры используется команда **Установки – Палитра** .

### **Вспомогательная сетка**

Для лучшего визуального контроля при рисовании вала в поле редактора может выводиться вспомогательная прямоугольная сетка. С помощью команды **Установки – Сетка**  пользователь может выбрать шаг сетки и тип линий сетки.

### **Шаг курсора**

При работе с редактором имеется возможность регулировать точность задания координат и размеров. По умолчанию используется точность равная 1 мм. Это значит, что все размеры элементов вала и



все координаты будут округляться до миллиметров. Вы можете ввести другое значение с помощью команды **Установки - Шаг Курсора** .

### Справочник команд

Таблица 2.1 Справочник команд APM Shaft

Главное меню	Команда	Описание команды
Файл	 Новый	Создания нового вала
	 Открыть...	Открытие файла APM Shaft (*.wsh)
	 Сохранить	Сохранение исходных данных и результатов расчетов в файл APM Shaft (*.wsh)
	Сохранить как...	Сохранение исходных данных и результатов в файл (*.wtr) под другим именем
	 Печать...	Вызов диалогового окна печати исходных данных и результатов расчета;
	Печать в RTF файл...	Вызов диалогового окна печати в *.rtf - файл исходных данных и результатов расчета;
	Экспорт...	Создание рабочего чертежа вала в формате APM Graph (*.agr).
	Выход	Выход из системы APM Shaft
Вид	<input checked="" type="checkbox"/> Инструментальная панель	Вкл./выкл. инструментальную панель с кнопками ускоренного выбора команд
	<input checked="" type="checkbox"/> Линейки	Вкл./выкл. горизонтальные и вертикальные линейки и полосы прокрутки
	<input checked="" type="checkbox"/> Статусная панель	Вкл./выкл. статусной панели для отображения текущей информации
Установки	 Масштаб	Установка масштаба отображения вала
	 Палитра	Настройка цветов отдельных элементов вала и компонентов редактора валов
	 Сетка	Настройка шага и типа сетки
	 Шаг Курсора	Настройка точности задания координат и размеров с помощью мыши
	 Увеличение	Увеличить фрагмент вала с помощью
	 Разместить в окне	Разместить вал в окне, чтобы он был полностью виден на экране
Задать	 Цилиндр	Рисование цилиндрических участков вала
	 Конус   По радиусам	Рисование конических участков вала по начальному и конечному радиусам
	Конус   <input checked="" type="checkbox"/> По конусности	Рисование конуса по текущему значению конусности
	Конус   <input checked="" type="checkbox"/> По углу	Рисование конуса по текущему значению угла конуса (т.е. угла между образующей конуса и осью вала)
	Конус   Задать конусность...	Задание текущего значения конусности
	Конус   Задать угол...	Задание текущего значения угла конуса
	 Фаска	Задание фасок
	 Галтель	Задание галтелей



	Канавка	Задание канавок
	Шпоночный паз   Закругленный слева	Рисование шпоночных пазов, начинающихся на правом краю сегмента и имеющих закругление слева
	Шпоночный паз   Закругленный справа	Рисование шпоночных пазов, начинающихся на левом краю сегмента и имеющих закругление справа
	Шпоночный паз   Закругленный с двух сторон	Рисование шпоночных пазов, закругленных с двух сторон
	Шпоночный паз   Прямоугольный	Рисование прямоугольных шпоночных пазов
	Шлиц   Эвольвентный	Рисование эвольвентных шлицов
	Шлиц   Прямобоочный	Рисование прямобоочных шлицов
	Шлиц   Треугольный	Рисование треугольных шлицов
	Отверстие	Рисование осевых отверстий
	Перпендикулярное отверстие	Рисование отверстий, перпендикулярных оси вала
	Резьба	Задание резьбы
	Поперечная сила	Задание поперечных сил
	Осевая сила	Задание осевых сил
	Распределенная сила	Задание распределенных сил
	Момент изгиба	Задание моментов изгиба
	Момент кручения	Задание моментов кручения
	Момент инерции	Задание внешних осевых моментов инерции, например от шкива ременной передачи
	Сосредоточенная масса	Задание внешних сосредоточенных масс, например от зубчатого колеса
	Концентратор напряжений	Задание концентраторов напряжений на участках вала
	Обработка поверхности	Задания поверхностной обработки участков вала
	Опоры	Задание опор
	Удалить вал	Удаление текущего вала со всеми его конструктивными особенностями, нагрузками и опорами.
Материал	Параметры	Задание механических свойств материала вала
	База данных	Выбор материала из базы данных
	Стандарт	Выбор стандарта из базы данных, по которому будут выбираться шпоночные пазы, шлицы и т.д.
Переменная нагрузка	Задать режим нагружения...	Выбор одного из типовых режимов нагружения или задание режима нагружения пользователем
	<input checked="" type="checkbox"/> Использовать при расчете	Вкл./выкл. использования переменной нагрузки (режима нагружения) при расчете
Рассчитать!	Общий расчет вала	Расчет вала на статическую и усталостную прочность
	Расчет динамических характеристик	Расчет собственных частот и форм изгибных и крутильных колебаний вала
Результаты...	-	Вызов диалогового окна выбора результатов расчета для просмотреть расчеты
Справка	Содержание	Вызов содержания справки по APM Shaft
	О модуле...	Вывод окна с информацией об установленной версии APM Shaft, разработчике и обладателе лицензии на программу



## Общие принципы работы с редактором

### **Выбор режима**

Для того, чтобы нарисовать вал нужно последовательно задать элементы его конструкции; для проведения расчетов, нужно также ввести нагрузки и разместить опоры. **Чтобы нарисовать или отредактировать какой либо элемент вала, нужно переключить редактор в режим рисования этого элемента.** Для этого нужно выбрать либо соответствующую кнопку на инструментальной панели, либо команду в меню. Показателем текущего режима является форма курсора в рабочем поле - она соответствует объектам, с которыми в данный момент работает редактор.

### **Рисование**

Непосредственно рисование вала и ввод нагрузок и опор в системе **APM Shaft** производится с помощью мыши. В процессе рисования курсором мыши вы указываете точку или участок где нужно поместить очередной элемент; после этого параметры элемента могут быть уточнены в диалоговом окне.

По особенностям задания примитивы редактора валов можно условно разделить на две группы - “точечные” и “протяженные”.

К “точечным” элементам относятся те, для размещения которых нужно указать либо только осевую координату (пример - сосредоточенные силы, опоры), либо участок (например, для размещения галтели нужно указать зону контакта цилиндров, для задания фаски - край цилиндра). Для задания этих элементов нужно поместить курсор в нужную точку или в нужную зону и щелкнуть **левой** кнопкой мыши. На экране появляется диалоговое окно, в котором вводятся характеристики элементов (например, величина силы или радиус галтели).

К числу “протяженных” относятся цилиндрические и конические секции вала, участки с резьбой, отверстия, шпоночные и шлицевые соединения, распределенные силы. При вводе этих примитивов обычно нужно задать габариты соответствующего элемента, например, начальную и конечную точки цилиндрического участка и его диаметр. Последовательность действий в этом случае следующая. Сначала нужно поместить курсор в ту точку, где начинается элемент, и нажать левую кнопку мыши. Затем, удерживая кнопку, переместить курсор в ту точку, где элемент кончается, и отпустить кнопку. В процессе перемещения курсора при нажатой кнопке мыши на экране рисуется текущая форма (или текущие габариты) элемента, а в информационном окне выводятся текущие значения основных параметров. После того, как пользователь отпустит кнопку, на экране может появляться диалоговое окно для уточнения значений параметров.



Элементы вала можно также разделить на “первичные” и “вторичные”. К первичным относятся *цилиндрические* и *конические* участки вала. Все остальные элементы являются вторичными - они могут быть введены только после того как вы задали первичные элементы и только в их границах (т.е., например, вы не сможете ввести нагрузку при отсутствии вала или приложить ее за его границами).

***Рекомендуется следующая последовательность рисования вала:***

- 1. Нарисовать цилиндрические и конические участки вала**
- 2. Задать переходные элементы (фаски, галтели, канавки)**
- 3. Задать отверстия, участки с резьбой, шлицевые и шпоночные соединения**
- 4. Ввести приложенные к валу нагрузки и разместить опоры**

### ***Редактирование***

Редактирование в системе **APM Shaft** включает в себя изменение параметров элементов вала, а также их удаление. ***При редактировании нужно переключить редактор в режим рисования элементов того типа, который вы хотите редактировать.*** Затем необходимо указать объект, который вы хотите удалить или изменить. Для этого нужно поместить курсор на объект и нажать ***правую*** кнопку мыши (точность указания объекта курсором должна быть достаточной, чтобы программа могла определить, какой объект вы хотите редактировать; не обязательно помещать курсор непосредственно на объект, достаточно, чтобы он был ближайшим среди объектов данного типа). На экране появляется диалоговое окно, содержащее параметры объекта и кнопку ***Удалить***. Пользователь может ввести новые значения параметров или удалить объект.

### ***Диагностика***

В процессе работы система пытается отследить ошибочные действия пользователя. Например, она не позволит вам разместить нагрузки или опоры за пределами вала; вы не сможете ввести отверстие диаметр, которого больше диаметра вала и т.п. Тем не менее, предусмотреть все виды возможных ошибок трудно, поэтому пользователь должен контролировать вал, который он рисует. Следует быть внимательным при редактировании (изменении) конструкции вала.

Поясним это на примере. Допустим, у вас есть цилиндрический сегмент вала длиной 100 мм, на котором имеется участок с резьбой длиной 90 мм. Вы решили уменьшить длину сегмента до 50 мм, но не уменьшили длину участка с резьбой. В результате участок с резьбой перейдет на следующий сегмент (который может иметь другой диаметр) или даже выйдет за пределы вала.



## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научиться выполнять расчет валов и осей в системе **APM Shaft**.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Рисование элементов конструкции вала

Используя графический редактор можно задать следующие элементы вала:

- цилиндрические участки
- конические участки
- фаски
- галтели
- канавки
- отверстия
- шпонки
- участки с резьбой
- шлицевые соединения

Для рисования цилиндрической секции выбирается команда **Рисовать – Цилиндр** .

Рисование цилиндрической секции может осуществляться в трех режимах (рисунок 2.4):

- добавление секции слева (рисунок 2.4, а)
- добавление секции справа (рисунок 2.4, б)
- вставка секции (рисунок 2.4, в)

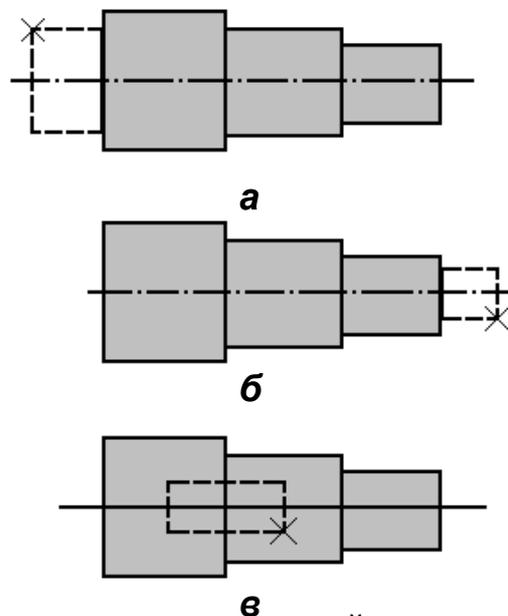


Рисунок 2.4 Добавление новых секций к валу: а - добавление секции к правому краю вала; б - добавление секции к левому краю вала; в - вставка секции внутри вала



Выбор режима определяется выбором начального положения курсора (имеется в виду положение курсора в тот момент, когда вы нажимаете левую кнопку мыши). Если ближайшим к курсору в начальный момент рисования будет левый край вала, новая секция будет добавлена к валу слева, если правый - то справа. Если ближайшей является граница между двумя существующими секциями внутри вала, то новая секция будет вставлена между ними.

Примечание! Крестиком показано начальное положение курсора. При перемещении курсора по горизонтали изменяется длина добавляемой секции, по вертикали - ее радиус.

Для добавления новой секции к левому концу вала курсор помещается слева от левого конца вала и нажимается левая клавиша мыши. Далее перемещая курсор, задается ширина и радиус секции. Текущие значения этих параметров отображаются в окне справочной информации. Форма новой секции показывается на экране цветом отличным от цвета уже введенных участков вала. При отпускании кнопки мыши, секция будет перерисована нормальным цветом.

Если первоначально курсор поместить на первую секцию (но ближе к ее левому краю) то новая секция будет добавлена также слева, при этом вал как бы сдвинется вправо, так что его левая граница останется на прежнем месте.

Таким же образом добавляется новая секция к правому концу вала - начальное положение курсора должно быть ближе к правому концу.

Если вы хотите вставить новую секцию внутрь вала, поместите курсор на границу тех участков, между которыми вы хотите вставить новую секцию, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая ее, задайте размеры вставляемой секции.

## Упражнение 2.1 Общий расчет вала

**Задание 1.** Создайте 5 цилиндрических секций по образцу (рисунок 2.5).

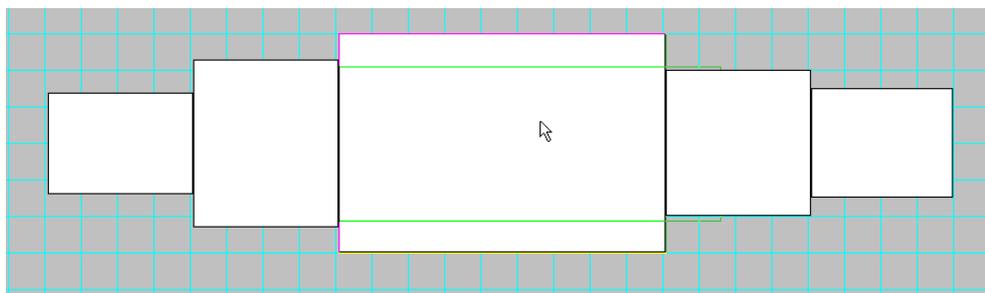


Рисунок 2.5



**Задание 2.** Сделайте размер второй и четвертой секций одинаковыми, щелкнув на них правой кнопкой мыши и изменив размеры в соответствии с рисунком 2.6

Чтобы отредактировать или удалить какой либо из элементов вала нужно сначала выбрать его. Для этого войдите в режим рисования этого элемента (с помощью команды меню или пиктографической кнопки) выберите нужный элемент, подведя к нему курсор и нажав *правую* кнопку мыши. При этом на экране появится диалоговое окно. Оно содержит поля ввода, заполненные текущими значениями параметров редактируемого элемента и клавишу для удаления элемента.

Для редактирования цилиндрических и конических участков используется одно и тоже диалоговое окно (рисунок 2.6). В нем содержатся поля, в которых вы можете ввести новые значения длины секции, а также радиусов секции на ее левом и правом краю. Таким образом, с помощью редактирования вы можете цилиндрический участок сделать коническим и наоборот.

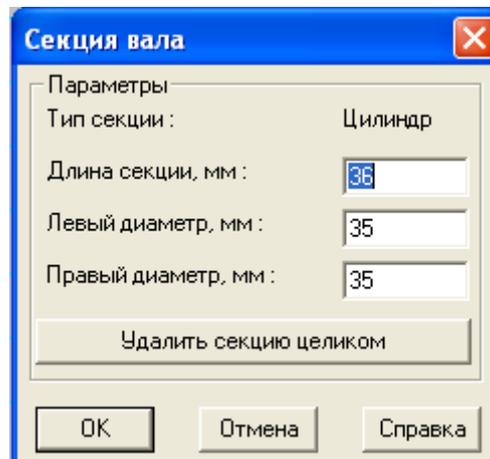


Рисунок 2.6

**Задание 3.** Выполните отверстия у первой, второй и третьей секций по образцу (рисунок 2.7)

Для этого используется команда **Задать – Отверстие**

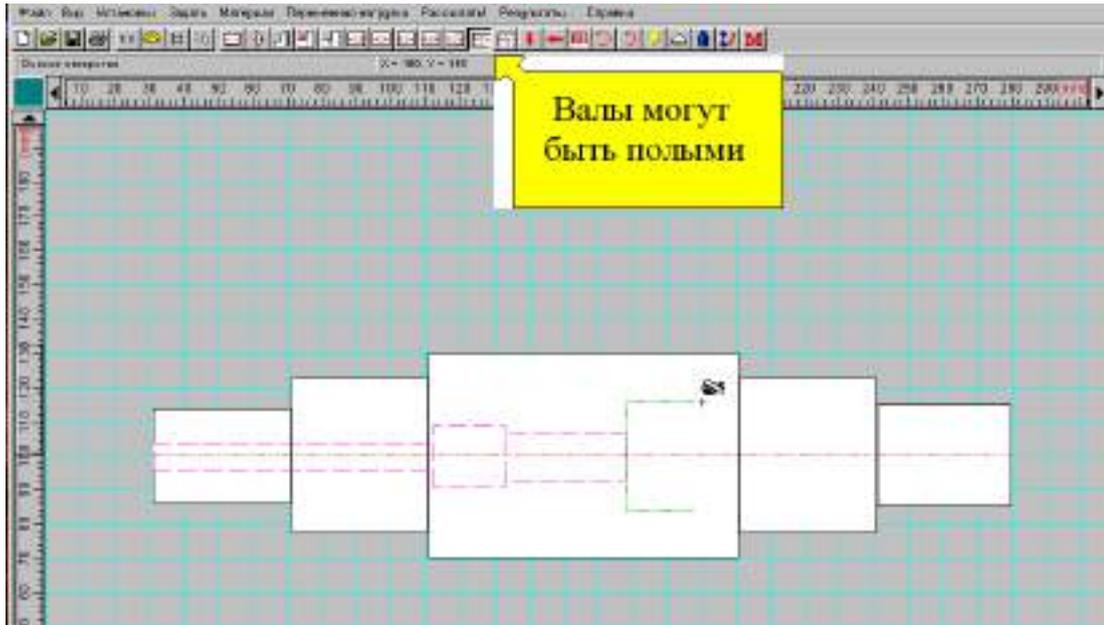


Рисунок 2.7

**APM Shaft** позволяет также задать перпендикулярные отверстия (**Задать – Перпендикулярное отверстие**).

**Задание 4.** Удалите отверстия, щелкнув по последнему правой кнопкой мыши и выбрав опцию **Удалить левое отверстие полностью** (рисунок 2.8)

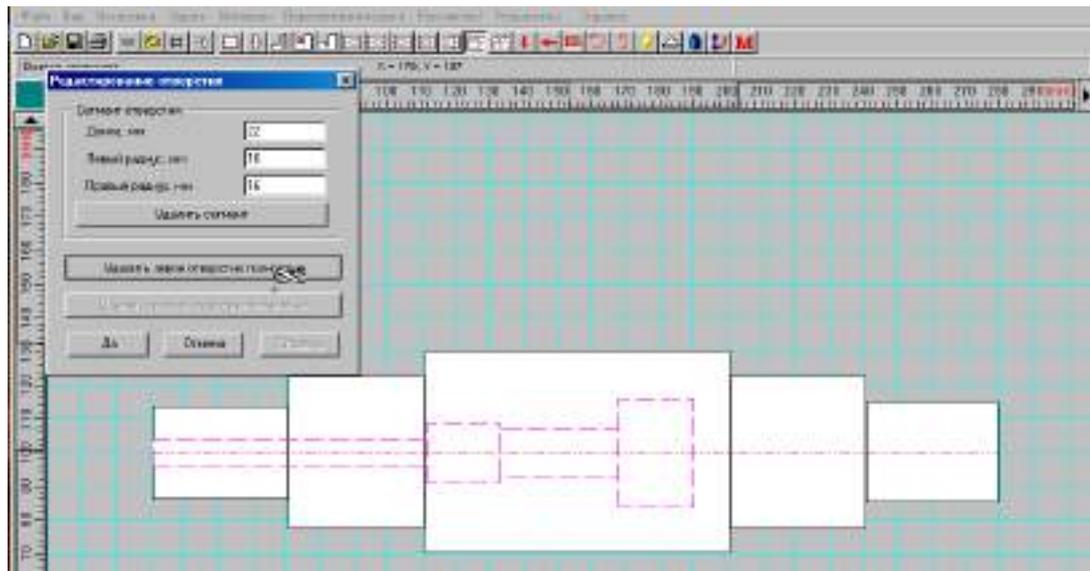


Рисунок 2.8

Наряду с цилиндрическими участками, можно задавать и конические. Конический участок в редакторе валов может быть задан тремя способами

- а) по начальному и конечному радиусам;
- б) по начальному радиусу и значению конусности;



в) по начальному радиусу и углу между образующей конуса и осью вала.

Для выбора способа рисования нужно открыть всплывающее меню **Задать - Конус** и в нем выбрать в нем одну из команд **По радиусам**, **По конусности** или **По углу**.

**Задание 5.** Задайте галтели по образцу между второй и третьей, третьей и четвертой секциями вала с радиусами 2 мм (рисунок 2.11)

*Г а л т е л ь* – представляет собой переходный элемент, предназначенный для уменьшения концентрации напряжений в зоне контакта двух участков вала, имеющих различный диаметр (рисунок 2.9).

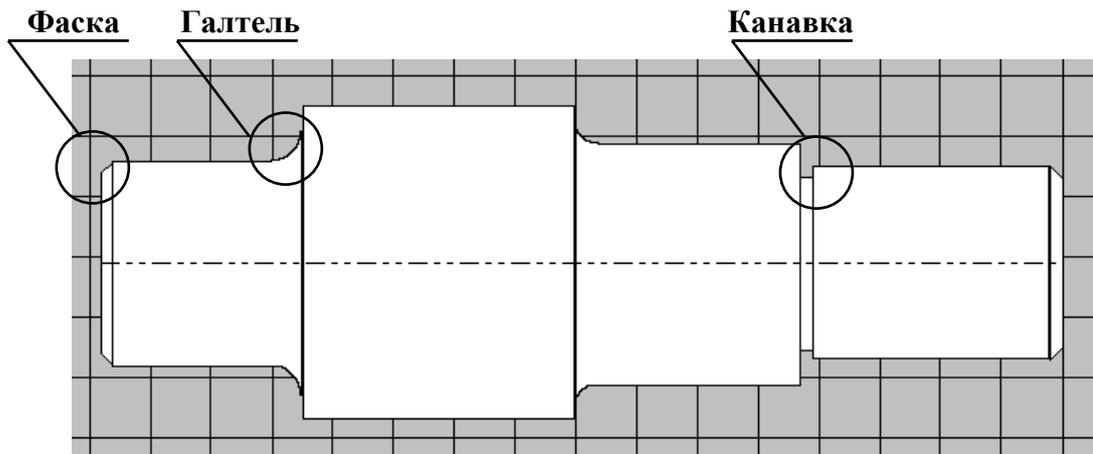


Рисунок 2.9 Редактор **APM Shaft**. Фрагмент вала с фасками, галтелями и канавкой

Чтобы задать галтель выберите команду **Задать – Галтель**. Поместите курсор в ту часть вала где вы хотите ввести галтель и нажмите левую клавишу мыши. На экране появится диалоговое окно, в котором требуется ввести радиус галтели (рисунок 2.10).

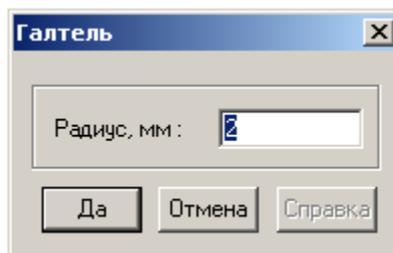


Рисунок 2.10

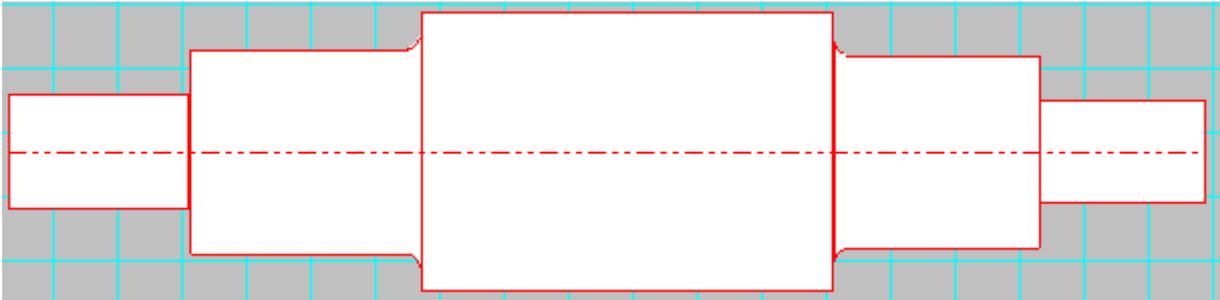


Рисунок 2.11 Результат задания галтели

**Задание 6.** Удалите галтель между третьей и четвертой секциями вала (рисунок 2.13)

*Редактирование и удаление галтели* заключается в следующем. Подведите курсор к галтели, которую вы хотите удалить (изменить) и нажмите *правую* клавишу мыши. На экран будет выведено диалоговое окно, с помощью которого вы можете удалить галтель или ввести новое значение радиуса галтели (рисунок 2.12).

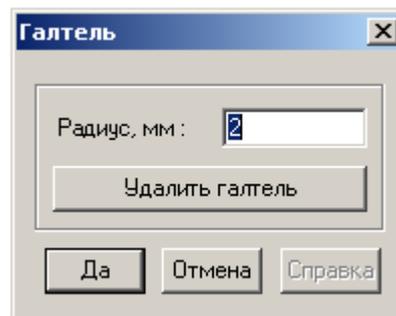


Рисунок 2.12

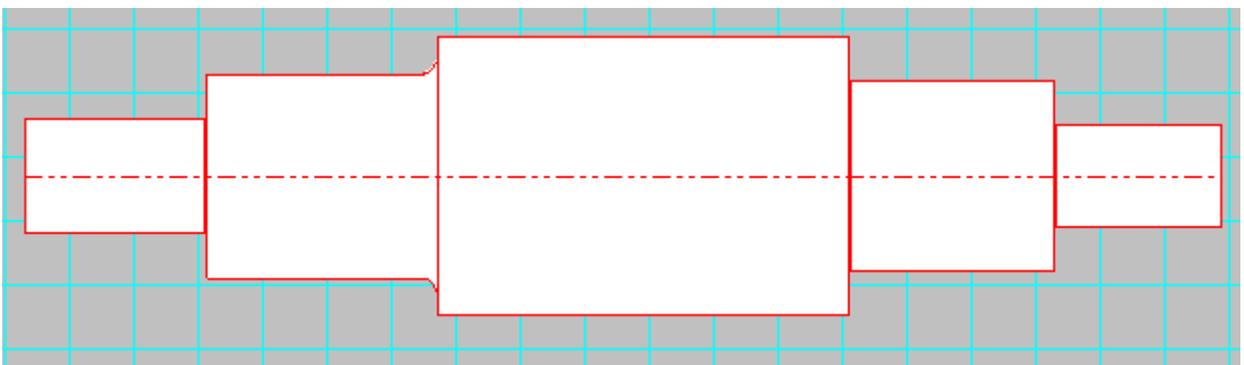


Рисунок 2.13 Результат удаления галтели

**Задание 7.** Задайте фаски по образцу (рисунок 2.15)

*Фаска* представляет собой небольшую коническую расточку на краю цилиндрического участка вала (рисунок 2.9).



Для рисования фаски выберите команду **Задать – Фаска** . Подведите курсор к тому краю сегмента, на котором вы хотите поместить фаску и нажмите левую кнопку мыши. На экране появляется диалог, в котором необходимо указать ширину фаски и угол между образующей фаски и осью вала (рисунок 2.14). Введите нужные значения или используйте те, которые предлагаются по умолчанию.

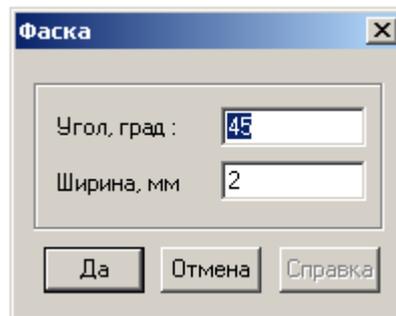


Рисунок 2.14



Рисунок 2.15 Результат задания фасок

**Задание 8.** Задайте канавку между третьей и четвертой секцией по образцу (рисунок 2.18)

Программа **APM Shaft** позволяет задавать канавки (см. рисунок 2.9) трех типов (рисунок 2.16). Чтобы задать канавку выберите команду **Задать - Канавка** . Далее поместите курсор в то место где вы хотите поместить канавку. На экране появится диалоговое окно (см. рисунок 2.16), которое позволит вам выбрать тип канавки. Вслед за ним будет показано окно (см. рисунок 2.17), в котором вы можете ввести параметры канавки. По умолчанию используются стандартные значения, которые зависят от диаметра вала.

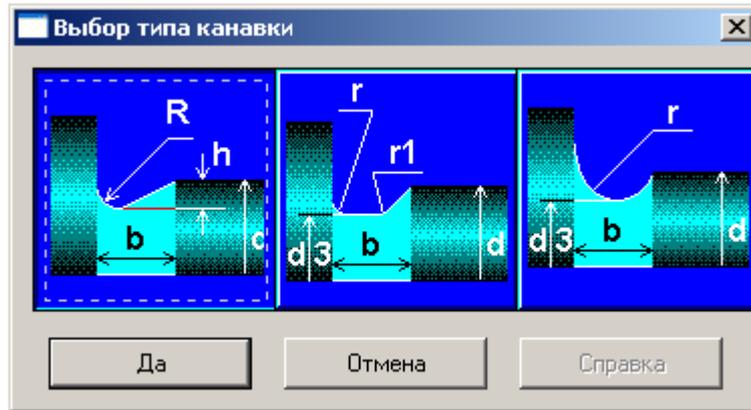


Рисунок 2.16 Диалоговое окно для выбора типа канавки

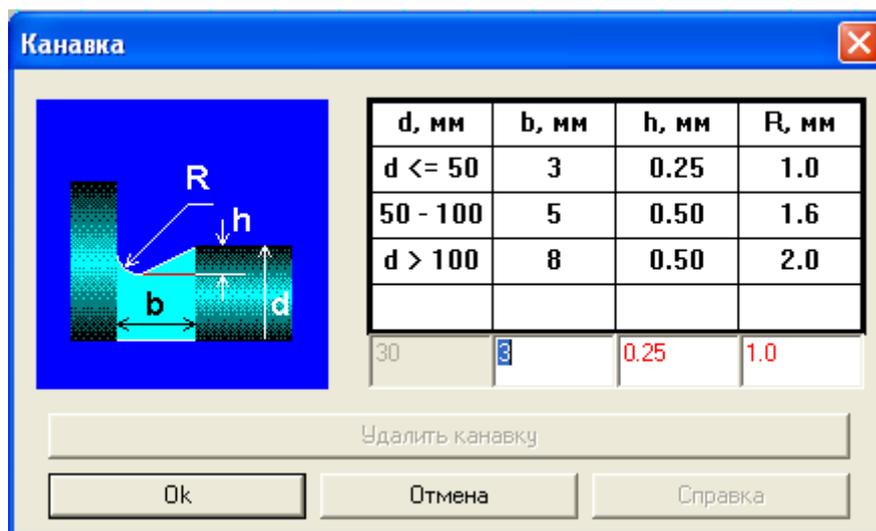


Рисунок 2.17 Диалоговое окно для редактирования параметров канавки



Рисунок 2.18 Результат задания канавки

**Задание 9.** Задайте шпонки по образцу (рисунок 2.19)

*Шпоночные соединения служат для передачи вращающего момента между валом и укрепленной на нем деталью, например ступицей зубчатого колеса. Конструктивно шпонка представляет собой стальной брус, вставляемый в пазы вала и плотно надетой на него детали.*



В редакторе **APM Shaft** вы можете нарисовать шпонки четырех типов - закругленные влево  и вправо , закругленные с обеих сторон , а также прямоугольные .

Для рисования шпонки сначала выберите нужный вам тип в меню **Задать - Шпонка**. Затем поместите курсор в точку, соответствующую левой или правой границе шпонки и нажмите левую кнопку мыши. Удерживая кнопку, переместите курсор в точку соответствующую другой границе шпонки соединения (при этом на экране будет изображен габаритный прямоугольник шпонки) и отпустите кнопку. На экране появится диалоговое окно, в котором пользователь может уточнить параметры шпонки. Следует иметь в виду, что шпонка, закругленная влево всегда начинается на правой границе сегмента, а шпонка закругленная вправо - на левой.

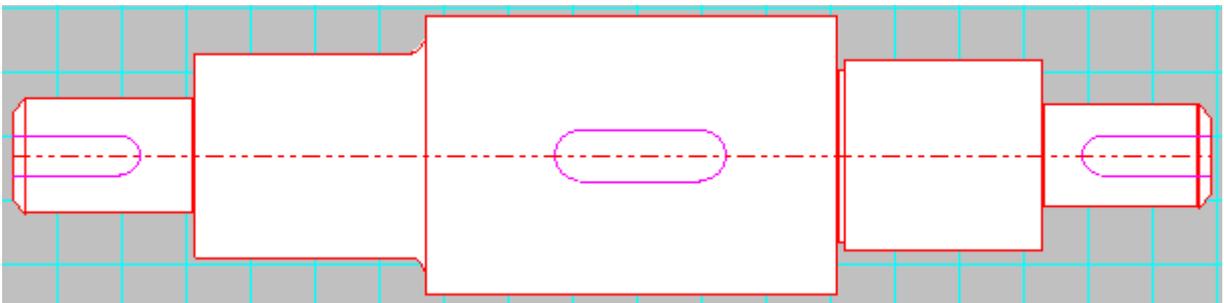


Рисунок 2.19 Результат задания шпонок

**Задание 10.** Удалите шпонки по образцу (рисунок 2.20)

Процесс удаления шпонок аналогичен процессу удаления галтелей, который представлен ранее (см. удаление галтели).

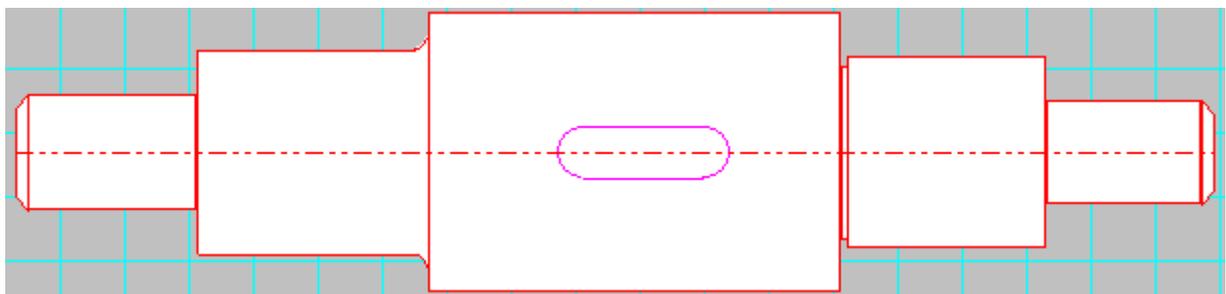


Рисунок 2.20 Результат удаления шпонок

**Задание 11.** Задайте произвольное эвольвентное шлицевое соединение по образцу (рисунок 2.22)

*Шлицевые соединения, как и шпоночные, служат для передачи вращающего момента между валом и посаженной на него деталью. Шлицевые соединения используются в условиях крупносерийного и массового производства. Они способны*



передать гораздо большую нагрузку по сравнению со шпоночными. Соединения этого типа образуются выступами на валу и впадинами на ступице. При этом передача момента вращения обеспечивается зацеплением. Шлицевые соединения технологичны. Их недостатком является наличие большой концентрации напряжений у основания зуба.

По форме выступа (зуба) различают три типа шлицевых соединений:

- *прямобочные* (рисунок 2.21 а);
- *эвольвентные* (рисунок 2.21 б);
- *треугольные* (рисунок 2.21 с).

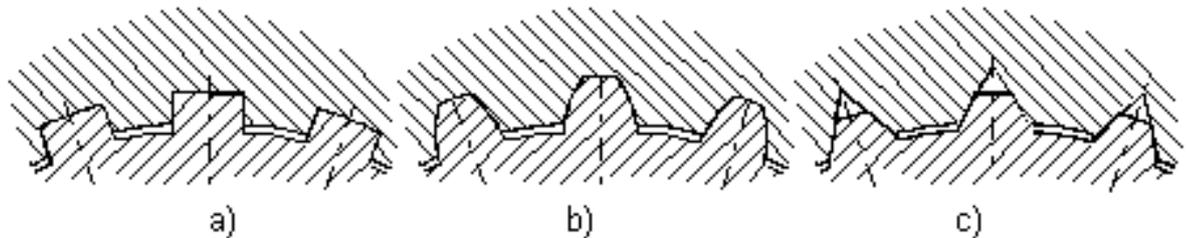


Рисунок 2.21

При вводе шлицевого соединения нужно сначала выбрать его тип в меню **Задать - Шлицевое соединение - эвольвентный, прямобочный** или **треугольный**. Затем поместите курсор в точку, соответствующую левой или правой границе шлицевого соединения и нажмите левую кнопку мыши. Удерживая кнопку, переместите курсор в точку, соответствующую другой границе шлицевого соединения (при этом на экране будет изображен габаритный прямоугольник шлицевого соединения) и отпустите кнопку. На экране появится диалоговое окно, в котором вы можете уточнить параметры соединения.

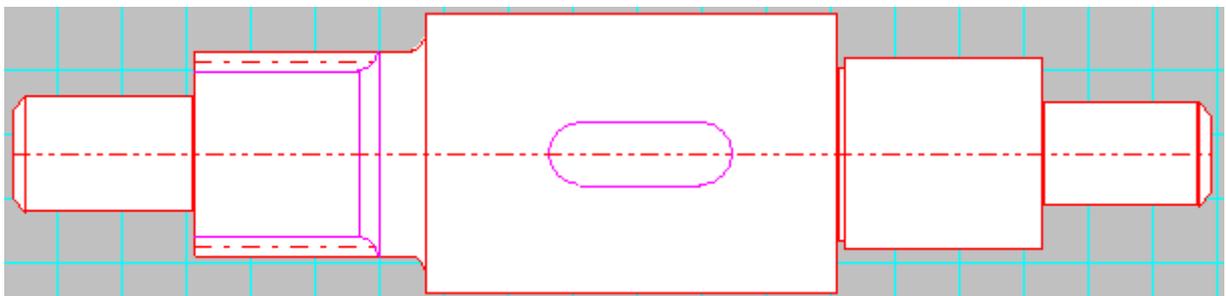


Рисунок 2.22 Результат задания шлицевого соединения

**Задание 12.** Задайте резьбу на четвертой секции по образцу (рисунок 2.23) и удалите ее

Участки с резьбой вводятся также, как и шлицевые соединения - указывается одна граница, затем другая, окончательно параметры уточняются в диалоговом окне (**Задать - Резьба** ).

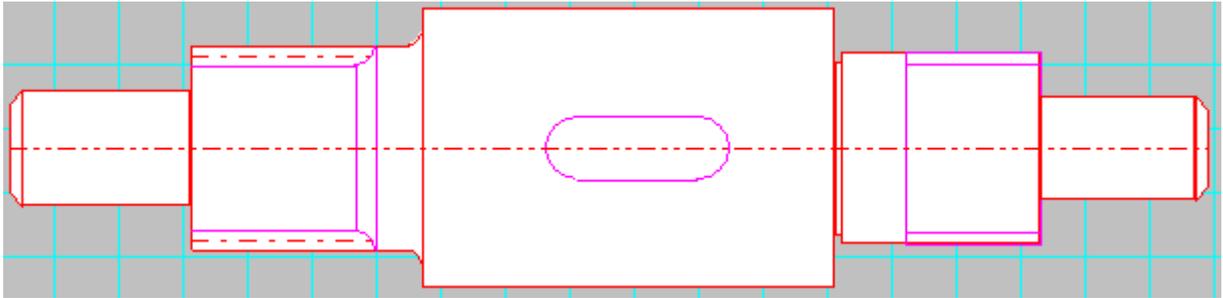


Рисунок 2.23 Редактор **APM Shaft**. Фрагмент вала с резьбой, шпоночным и шлицевым соединением

### Задание типа обработки

Редактор **APM Shaft** позволяет учесть тип обработки поверхности вала. Пользователь может задать участки вала со следующими видами обработки: *закалка, азотирование, цементация, цианирование, обкатка роликом, обдувка дробью*. Участки обработки задаются и редактируются, так же как и участки с резьбой и цилиндрические участки вала (**Задать – Обработка поверхности**).

### Задание 13. Задайте три опоры по образцу (рисунок 2.24)

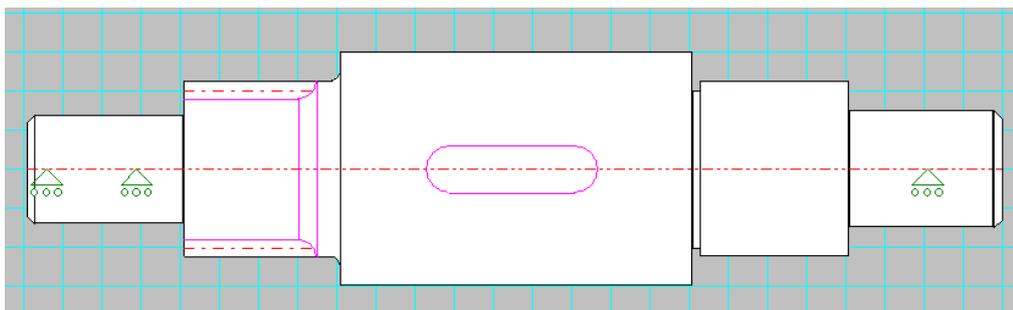


Рисунок 2.24

Для размещения опор выберите команду **Задать – Опоры**  которая переключает редактор в режим рисования опор. Затем щелкните мышью в той точке, где должна быть установлена опора, проконтролировав значение осевой координаты в информационной панели. На экране появится диалоговое окно (рисунок 2.25), в котором вы можете выбрать тип опоры и уточнить ее параметры.

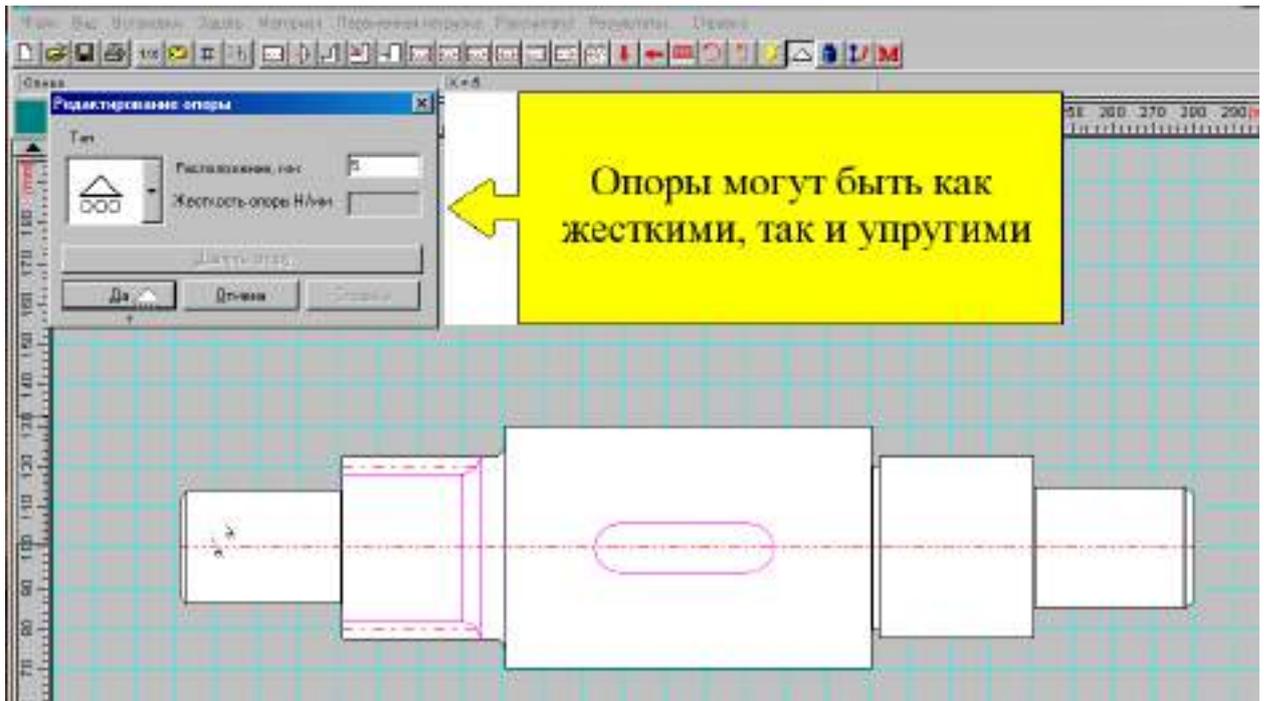


Рисунок 2.25 Диалоговое окно для ввода и редактирования опор

**Задание 14.** Задайте поперечную силу в центре шпоночного паза по образцу (вертикальная проекция - “-4000 Н”, горизонтальная - “3000 Н”)

С помощью редактора **APM Shaft** можно задать *радиальные и осевые сосредоточенные силы, распределенные силы, а также моменты изгиба и кручения.*

Радиальные силы направлены перпендикулярно оси вала. Чтобы ввести радиальную силу (**Задать – Поперечная сила** ) поместите курсор в ту точку, где эта сила должна быть приложена и щелкните левой кнопкой мыши. На экране появится диалоговое окно для ввода параметров силы (рисунок 2.26). Радиальная сила характеризуется осевой координатой (расстоянием от начала вала), направлением и величиной. Вы можете задать силу двумя способами. В одном случае вы вводите модуль силы и угол, который составляет направление линии действия силы с вертикалью; эти параметры вводятся в полях *Модуль* и *Угол*. Во втором случае вы задаете горизонтальную и вертикальную проекцию силы в полях *Вертикальная* и *Горизонтальная*. Переключение между способами задания силы производится с помощью радио-кнопок *Модуль* и *Проекции*. Пользователь может задать идентификатор силы, который состоит из названия и индекса, которые вводятся в соответствующих полях. Примеры идентификаторов -  $F_1$ ,  $Вес_{Двигателя}$ .

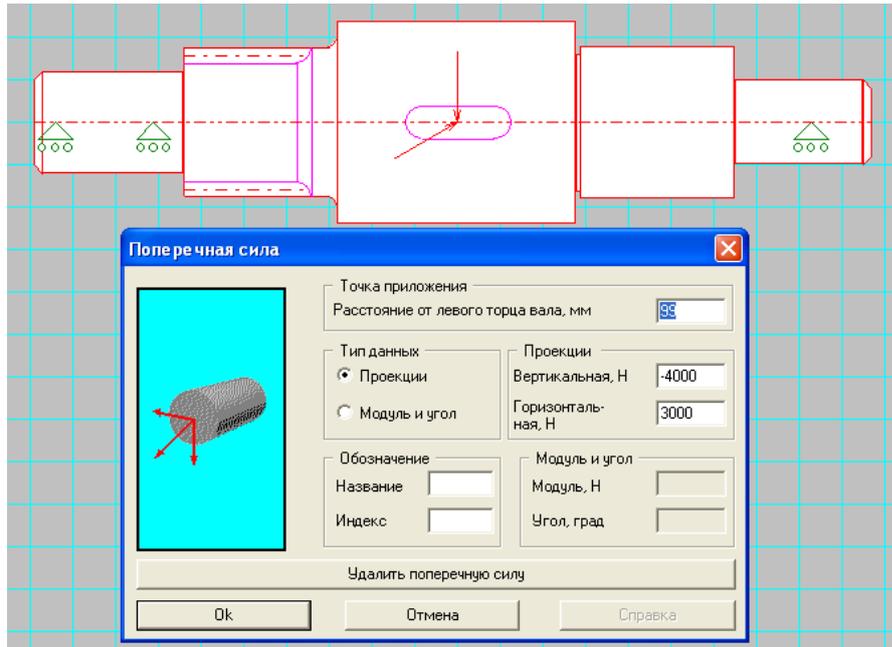


Рисунок 2.26

**Задание 15.** Задайте осевую силу к центру шпоночного паза по образцу

Чтобы задать осевую силу (**Задать – Осевая сила** ) нужно щелкнуть левой кнопкой мыши в точке приложения силы. На экране появляется диалоговое окно (рисунок 2.27), в котором необходимо ввести величину силы, и уточнить (если необходимо) расстояние до точки приложения силы от начала отсчета длины вала.

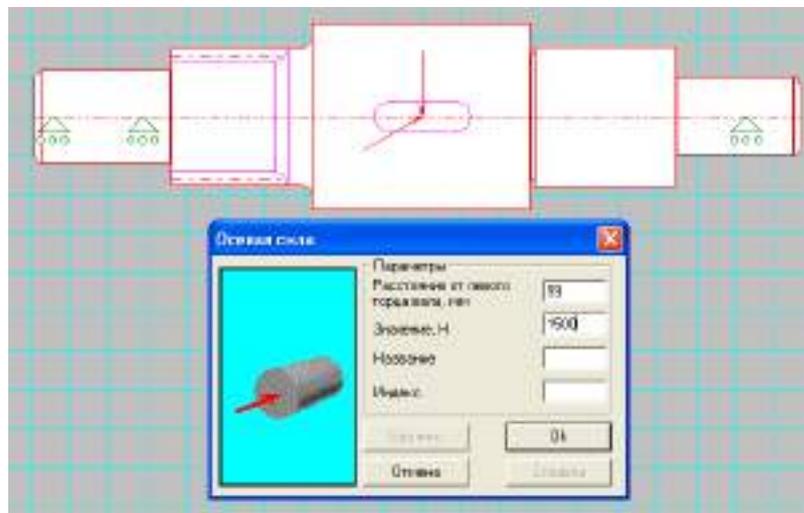


Рисунок 2.27

Результат приложения осевой силы показан на рисунке 2.28.

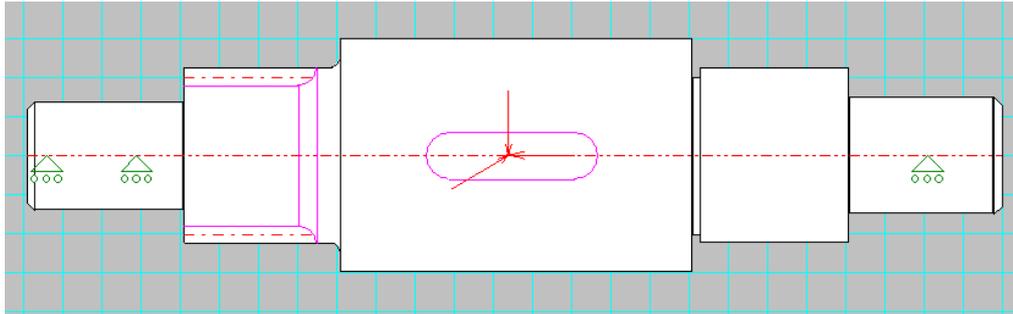


Рисунок 2.28 Результат приложения осевой силы

**Задание 16.** Приложите к первой, второй, третьей опорам осевые силы, равные 500Н и направленные в обратном направлении (рисунок 2.29, рисунок 2.30)

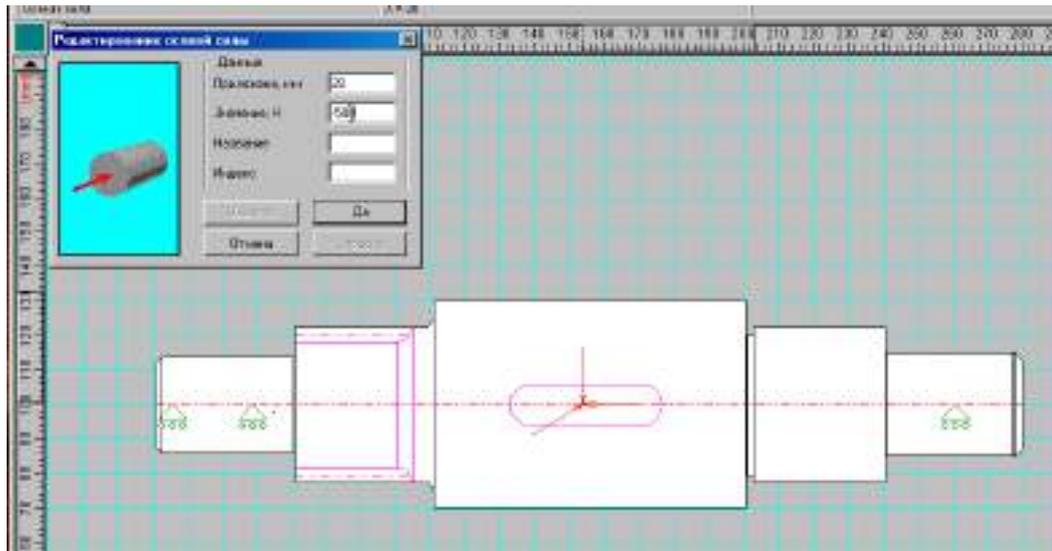


Рисунок 2.29

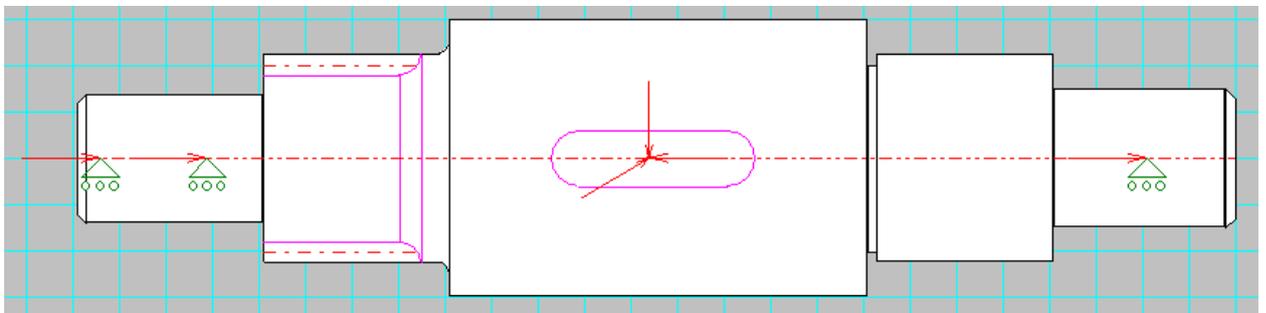


Рисунок 2.30

**Задание 18.** Задайте распределенные силы по образцу (рисунок 2.32)

*Распределенная сила характеризуется участком, на котором она действует, а также значениями удельной силы на левой и правой границах (промежуточные значения получают линейной интерполяцией).*



Для задания распределенной силы (**Задать – Распределенная сила** ) нужно поместить курсор на одну из границ зоны действия силы (безразлично, левую или правую), нажать левую кнопку мыши и удерживая ее переместить курсор в точку, соответствующую другой границе зоны. После того, как вы отпустите кнопку, на экране появится диалоговое окно (рисунок 2.31), в котором вы можете уточнить границы зоны действия распределенной силы и ввести значения удельной силы, действующие на левой и правой границах.

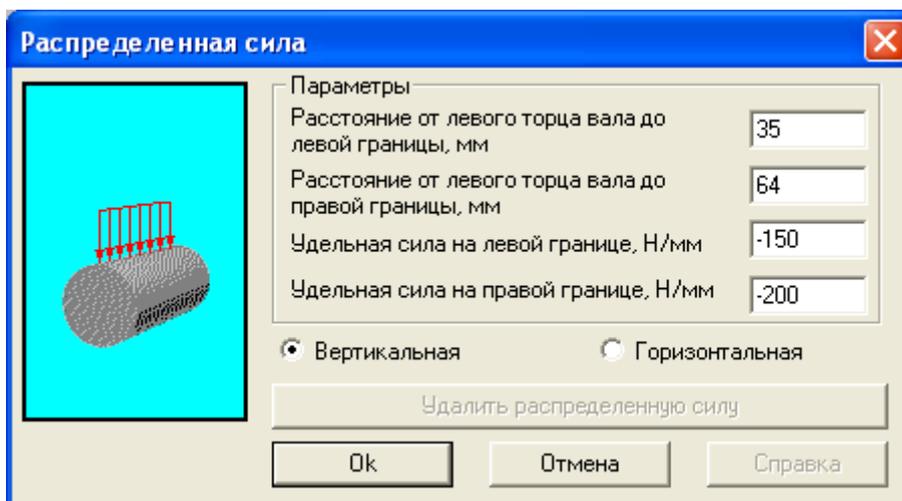


Рисунок 2.31 Диалоговое окно для ввода и редактирования распределенных сил

Результат задания распределенной силы показан на рисунке 2.32.

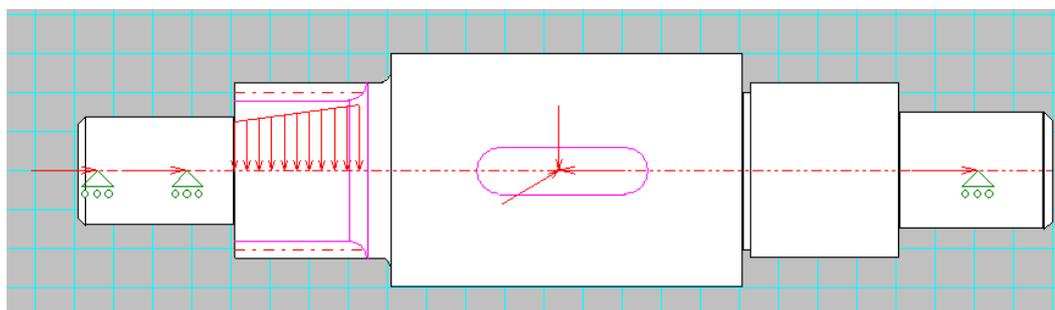


Рисунок 2.32 Результат задания распределенной силы

**Задание 19.** Задайте моменты изгиба к центру шпоночного паза по образцу (рисунок 2.34)

Момент изгиба задается (**Задать – Момент изгиба** ) также как радиальная сила. После щелчка левой кнопкой мыши в точке приложения момента, на экране появляется диалоговое окно (рисунок 2.33), которое позволяет задать момент изгиба либо совокупностью проекций на координатные оси, либо через модуль и угол с вертикалью.

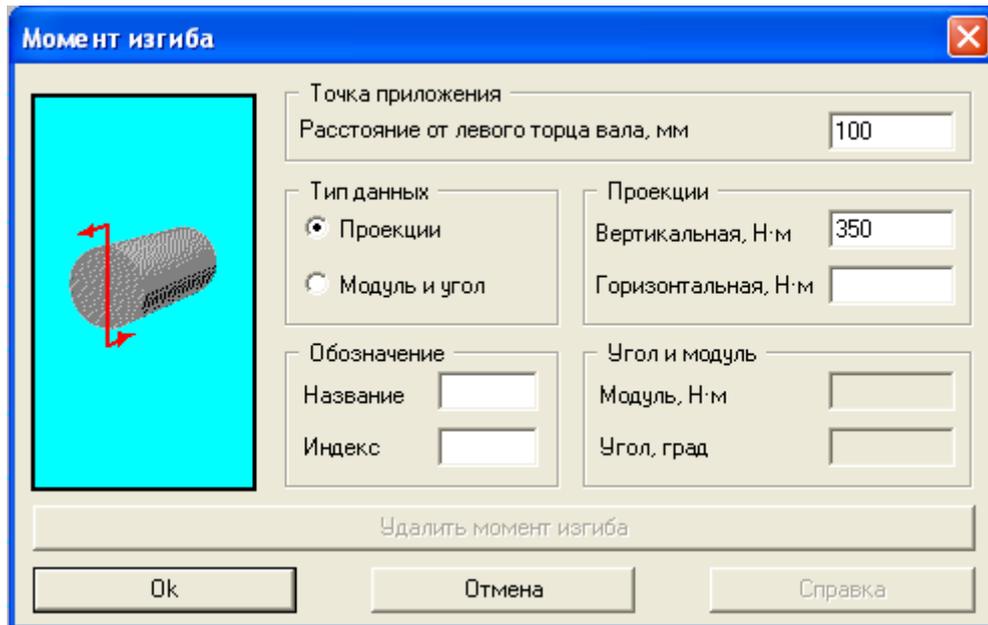


Рисунок 2.33 Диалоговое окно для ввода и редактирования момента изгиба

Результат показан на рисунке 2.34

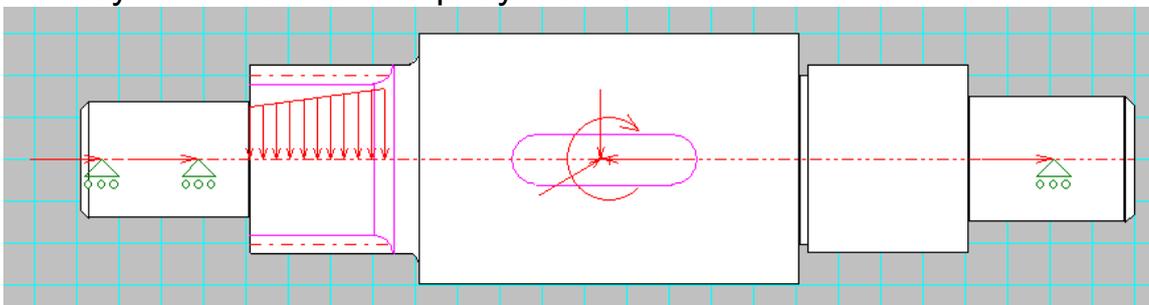


Рисунок 2.34

**Задание 20.** Задайте три крутящих момента (400 Н·м) по образцу (рисунок 2.40)

*Момент кручения характеризуется величиной и координатой точки приложения.*

Чтобы задать его (**Задать – Момент кручения** ) нужно поместить курсор в точку приложения момента и щелкнуть левой кнопкой мыши. В появившемся диалоговом окне (рисунки 2.35, 2.37, 2.39) необходимо ввести величину момента.

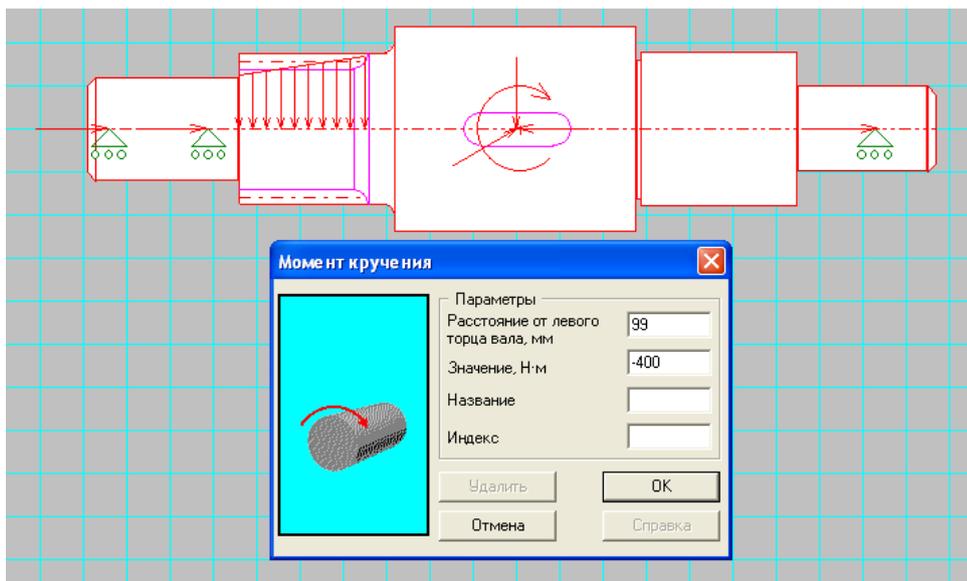


Рисунок 2.35

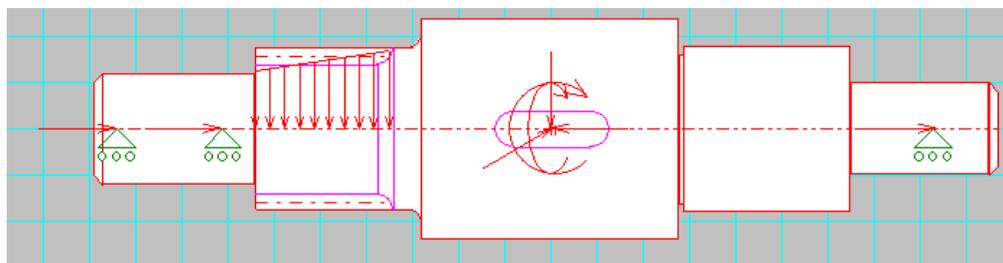


Рисунок 2.36

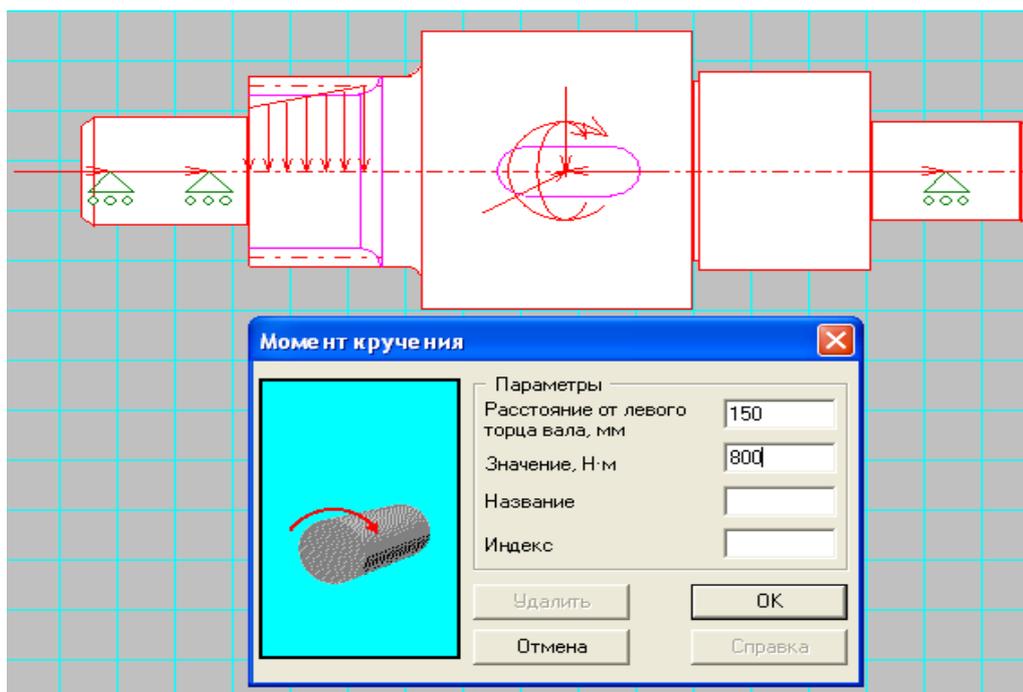


Рисунок 2.37

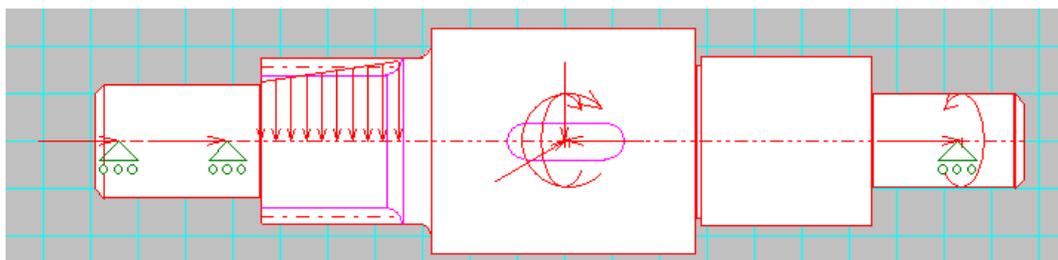


Рисунок 2.38

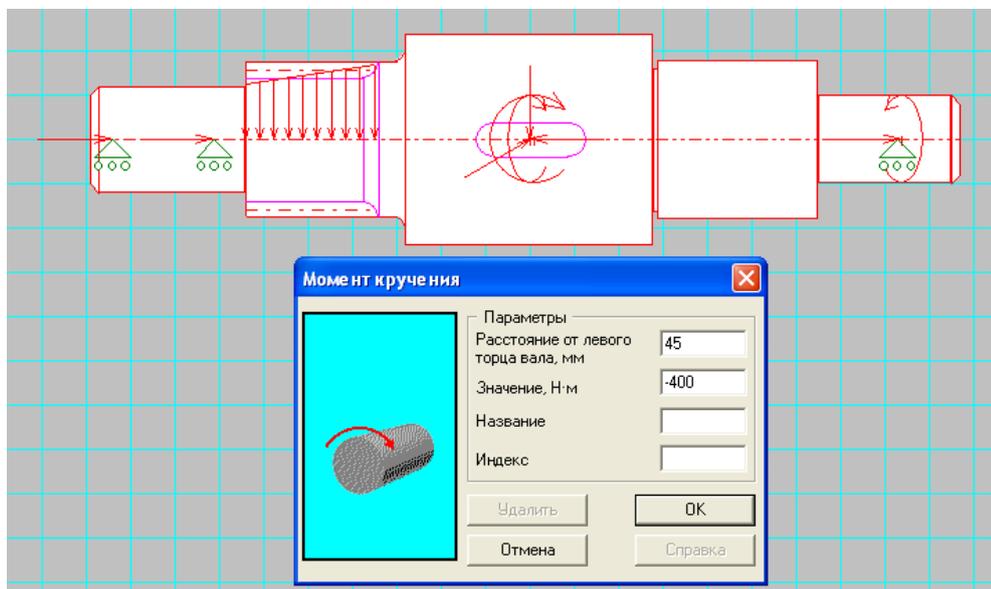


Рисунок 2.39

Результат показан на рисунке 2.40

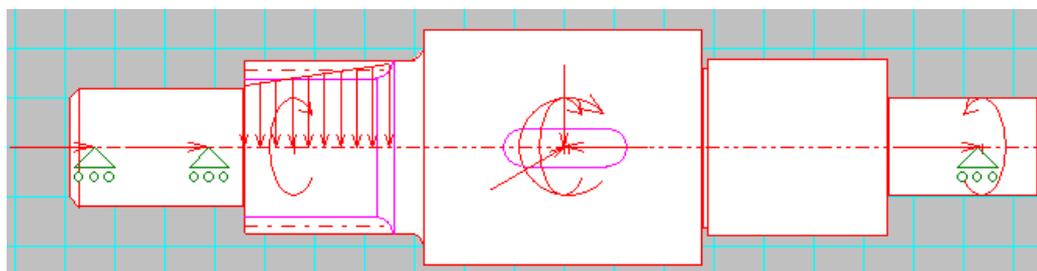


Рисунок 2.40

**Для корректной постановки задачи необходимо проверить условия равновесия по моментам кручения и осевым силам!**

**Задание 21.** Задайте материал по образцу и затем отмените действие, нажав **Отменить**.

Для расчета вала необходимо задать характеристики материала, из которого он изготовлен. К числу этих характеристик относятся предел прочности, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и плотность



материала. Пользователь может задать значения этих параметров одним из двух способов:

- выбрать из базы данных, входящей в состав системы **APM WinMachine** (команда **Материал - База Данных**);

- ввести в диалоговом окне (команда **Материал - Параметры** **M**) (см. рисунок 2.41, 2.42).

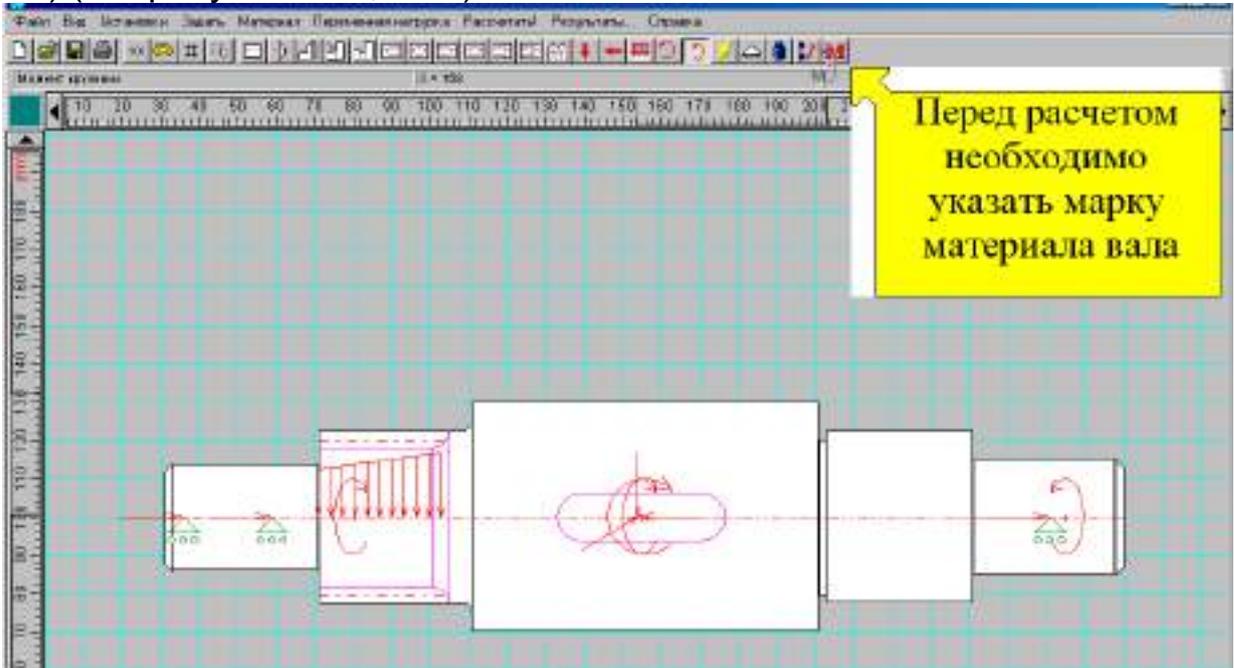


Рисунок 2.41

Свойства материала можно ввести вручную (рисунок 2.42)

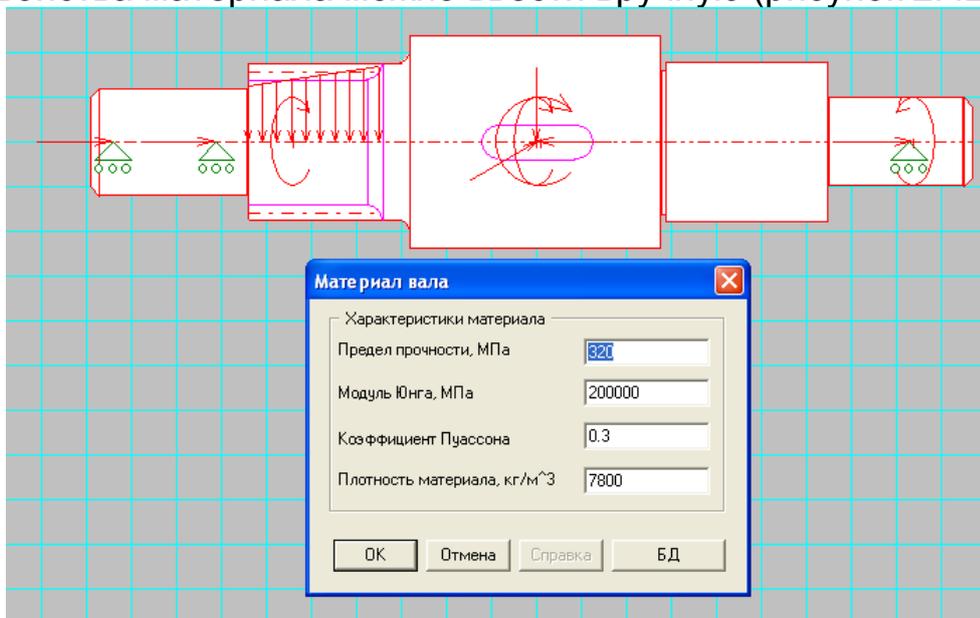


Рисунок 2.42 Диалоговое окно для ввода характеристик материала вала

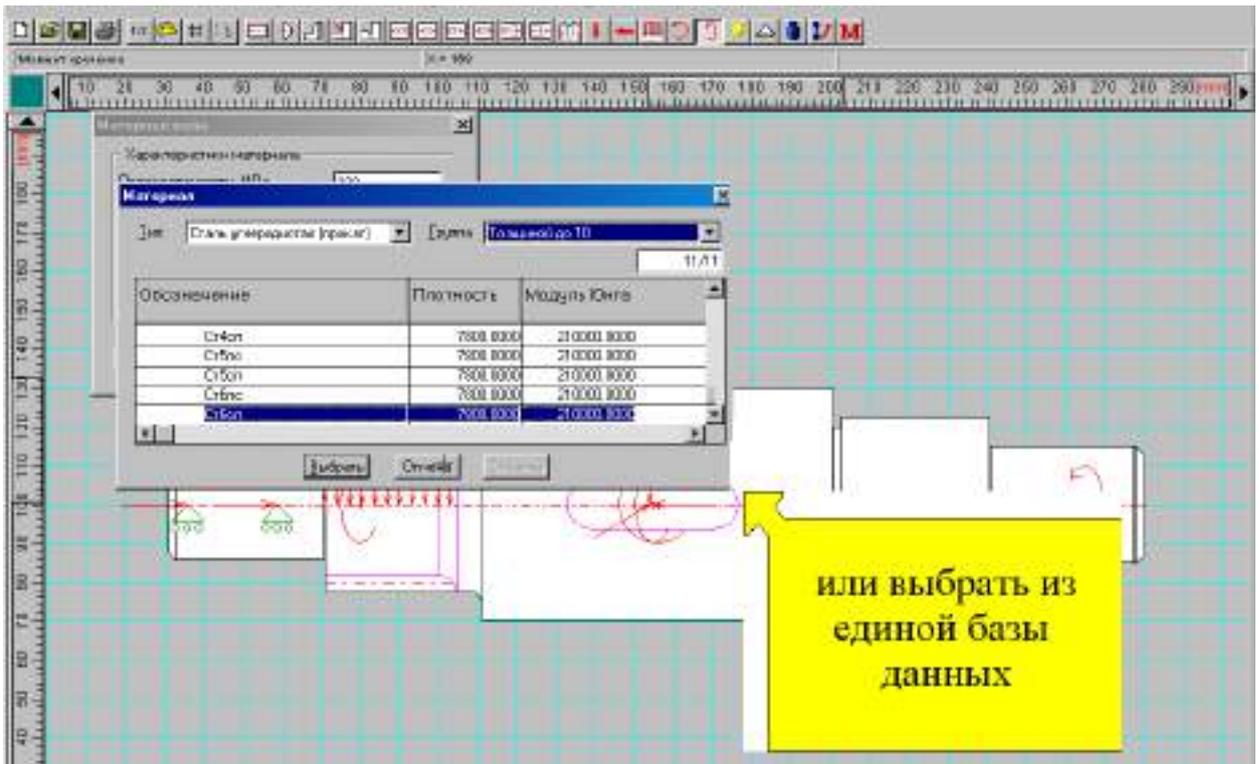


Рисунок 2.43

### Удаление вала

Для удаления вала выбирается команда **Задать - Удалить вал**. На экране появляется окно (рисунок 2.44) с запросом на подтверждение удаления.

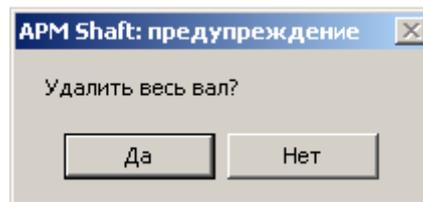


Рисунок 2.44 Окно запроса подтверждения удаления вала

**Задание 22.** Задайте переменный характер внешнего нагружения (рисунок 2.45)

Используя команду **Переменная нагрузка – Задать режим нагружения – Задан пользователем** задайте график изменения нагрузки по образцу (рисунок 2.45)

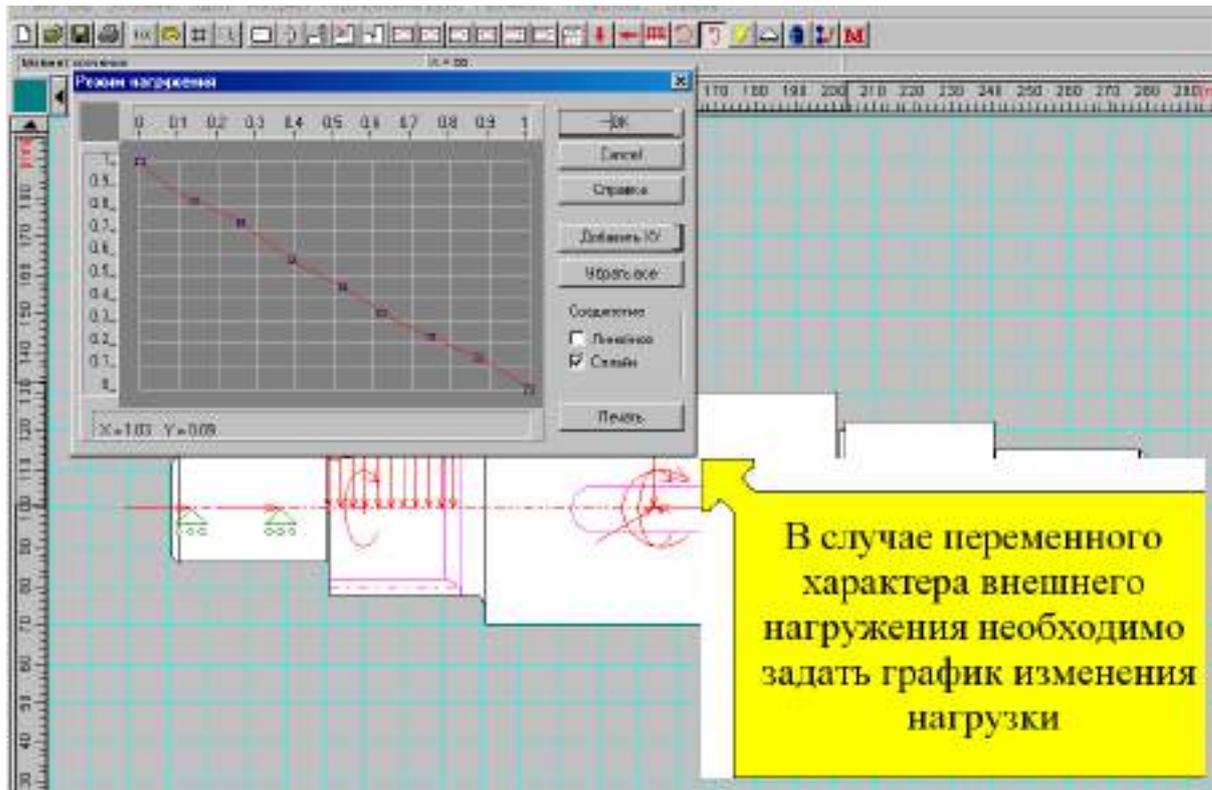


Рисунок 2.45

**Задание 23.** Выполните общий расчет вала (рисунок 2.46)

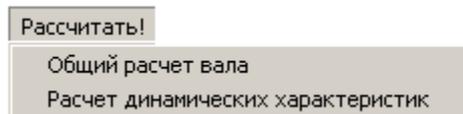


Рисунок 2.46 Всплывающее меню **Рассчитать**

По команде **Общий расчет вала** выполняются расчеты вала на статическую и усталостную прочность. Перед расчетом на экран выводится диалог ресурса работы вала (рисунок 2.47).

**Задание 24.** Установите ресурс работы и частоту вращения вала по образцу (рисунок 2.47)

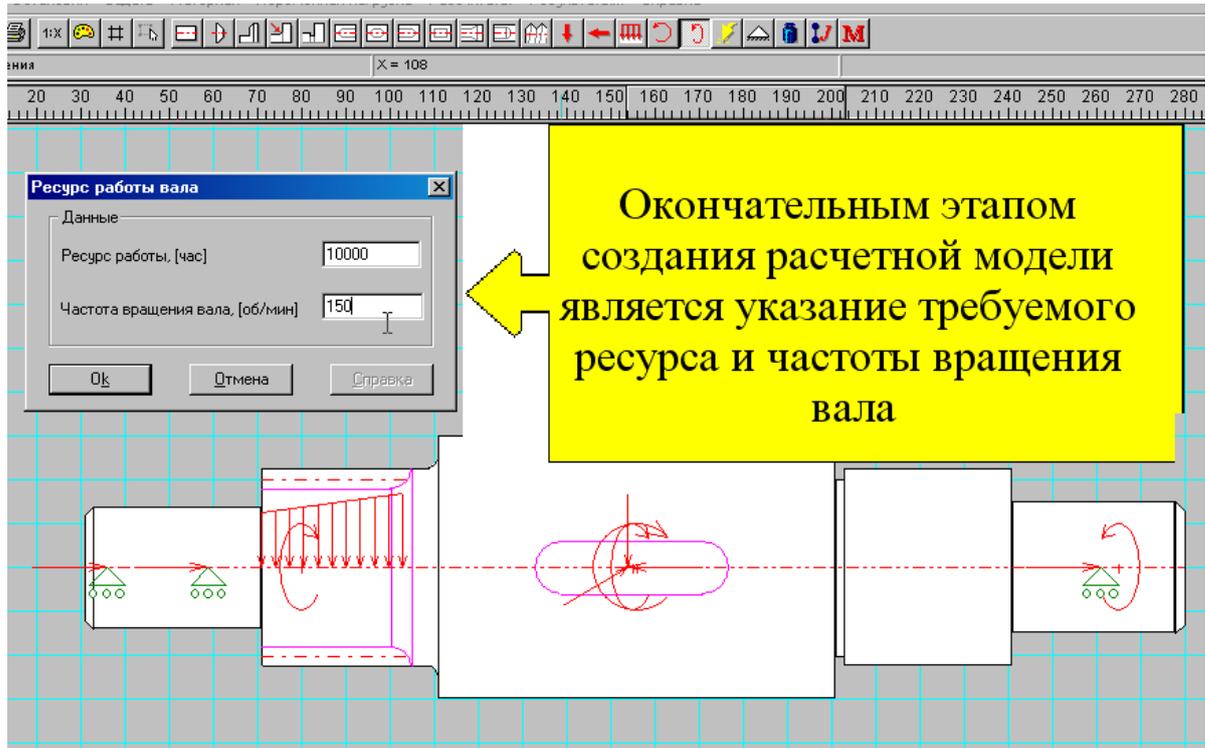


Рисунок 2.47 Диалог Ресурс работы вала

По команде **Расчет динамических характеристик** выполняются расчеты динамических характеристик вала.

Команда **Результаты** вызывает на экран диалоговое окно (рисунок 2.48), с помощью которого вы можете просмотреть результаты расчетов. Каждая кнопка этого окна выводит на экран значения соответствующего параметра, представленного в виде графика (рисунок 2.49) или таблицы. Если в диалоге включить флаг Рисовать вал, то на графиках расчетных параметров будет показан сам вал.

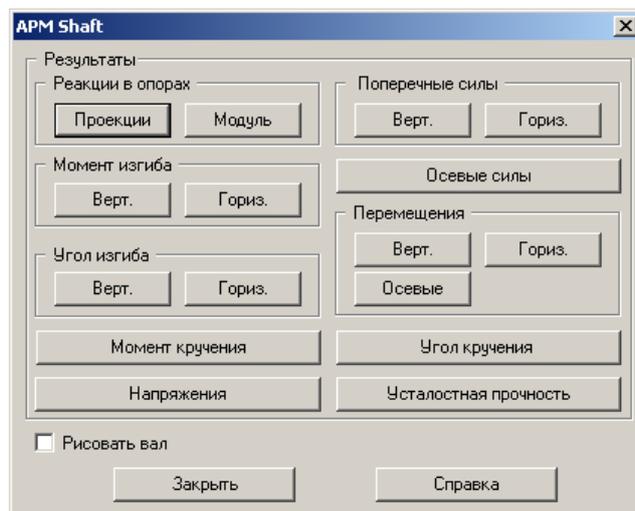


Рисунок 2.48 Диалоговое окно Результаты расчетов

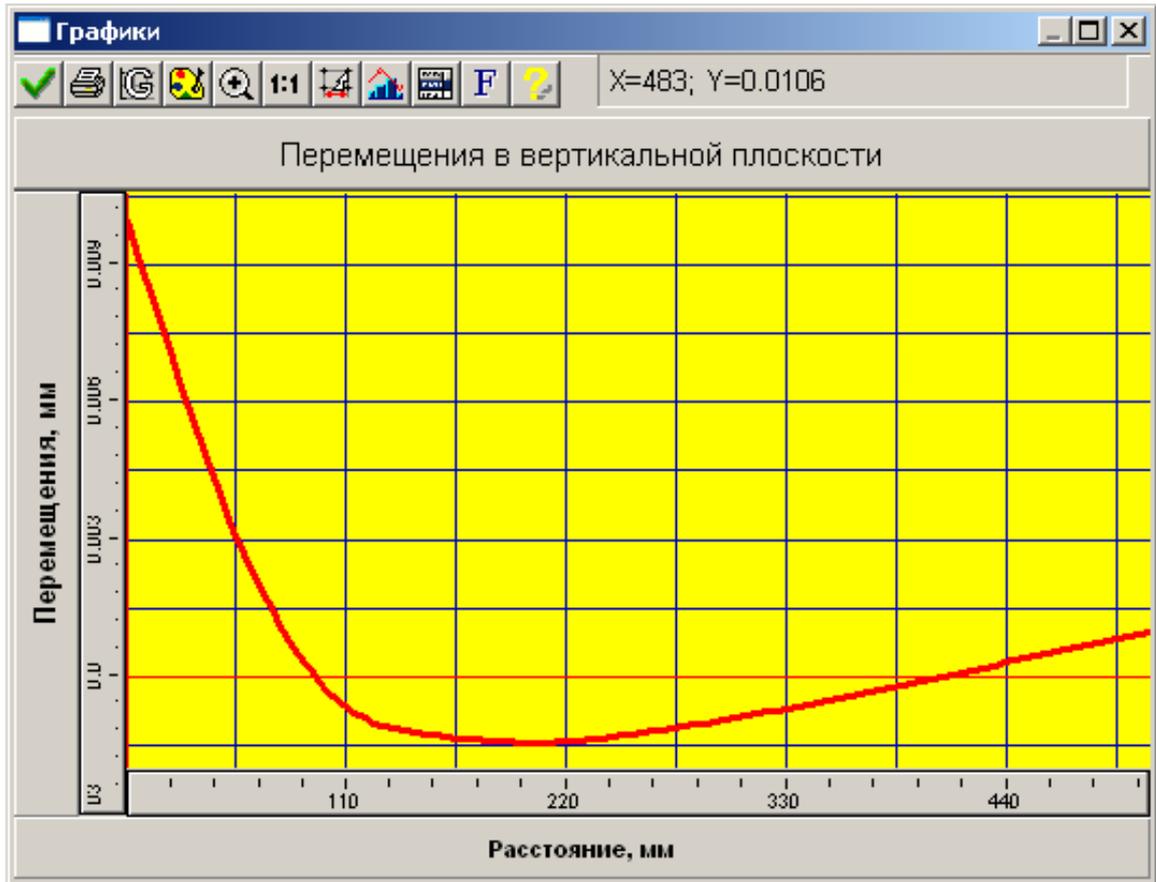


Рисунок 2.49 График перемещения в вертикальной плоскости

*На примере определения усталостной прочности, последовательно меняя различные параметры (например, выбирая более прочный материал; увеличивая диаметр вала) и контролируя эти перемены расчетом, можно получить конструкцию вала близкую к равнопрочной.*

### Упражнение 2.2 Расчет динамических характеристик вала

**Задание 1.** Создайте 5 цилиндрических секций по образцу (рисунок 2.50).

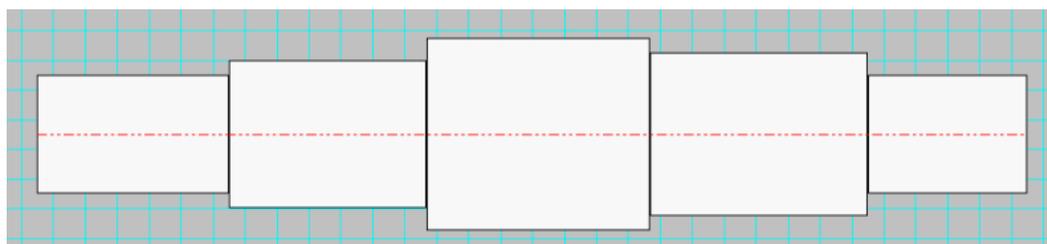
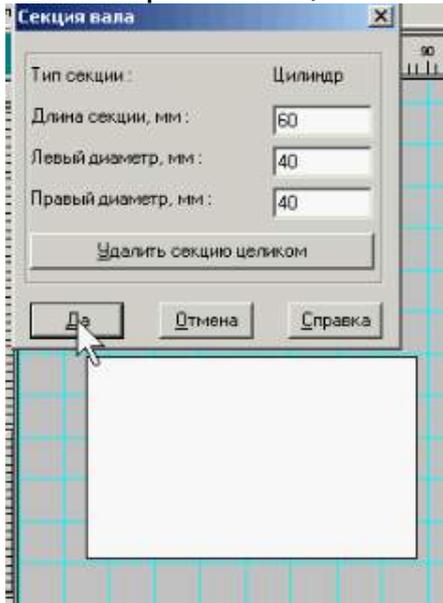


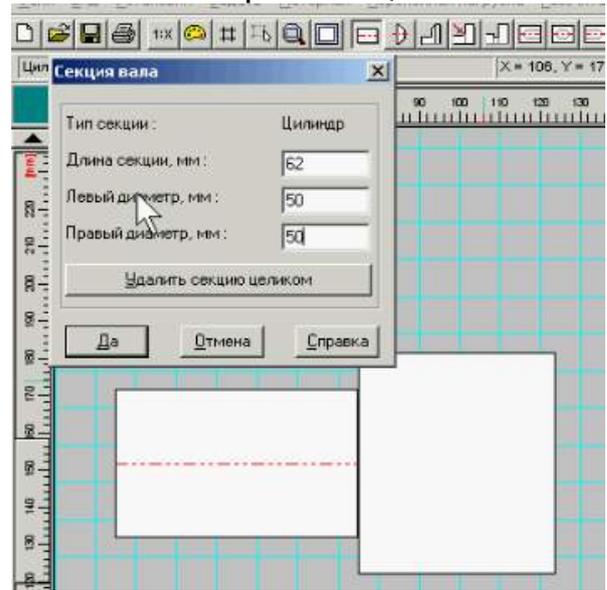
Рисунок 2.50



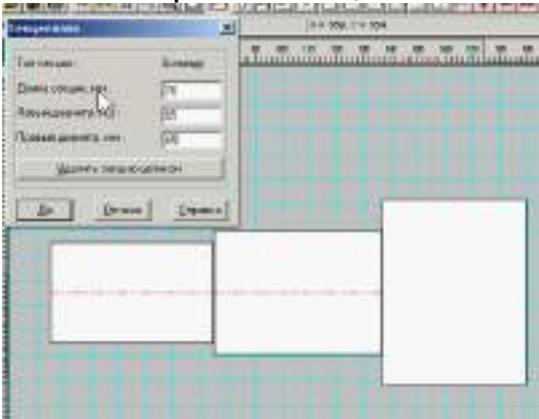
Первая секция



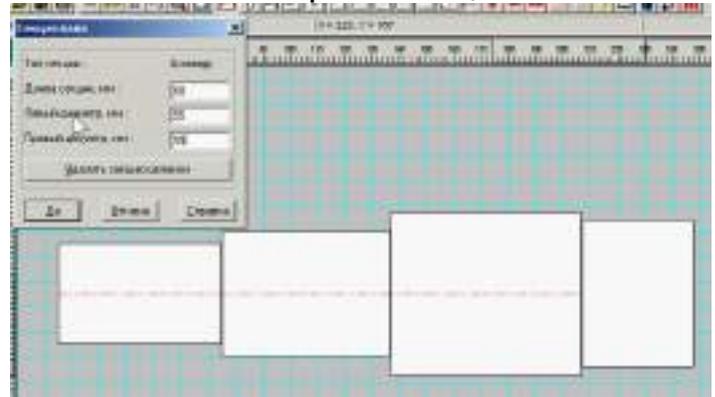
Вторая секция



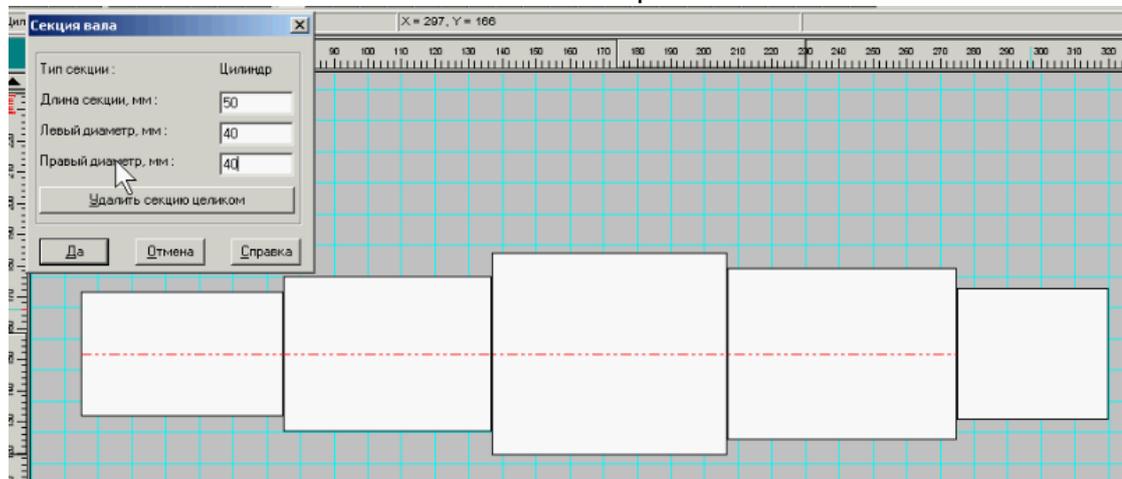
Третья секция



Четвертая секция



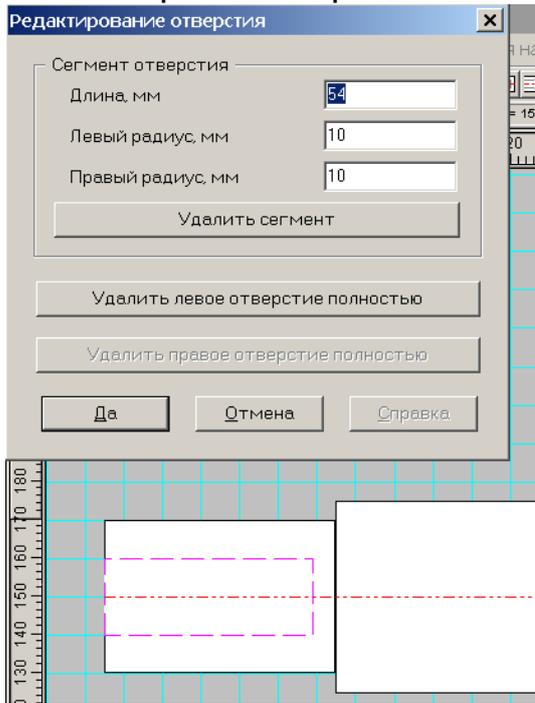
Пятая секция





**Задание 2.** Выполните отверстия по образцу (рисунок 2.51).

**Первое отверстие**



**Второе отверстие**

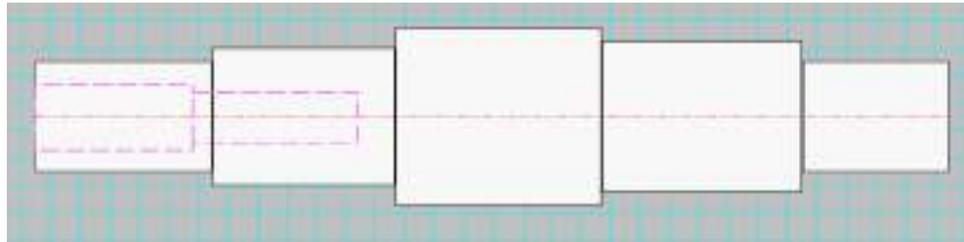
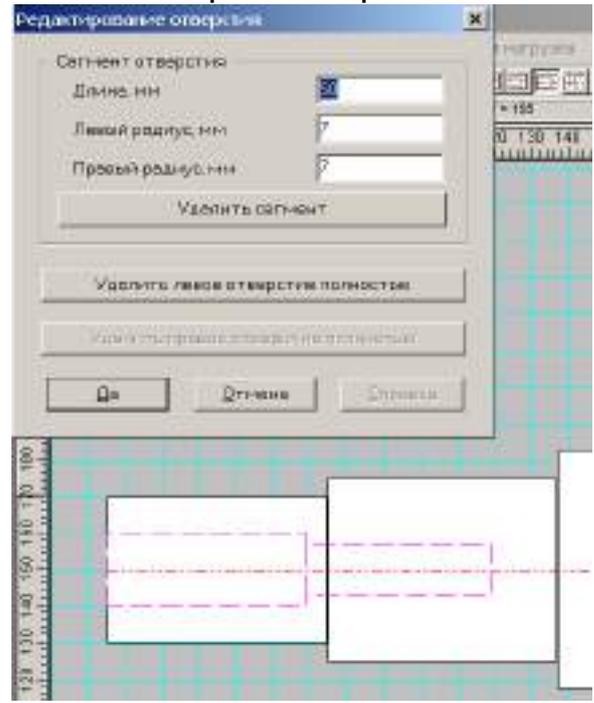
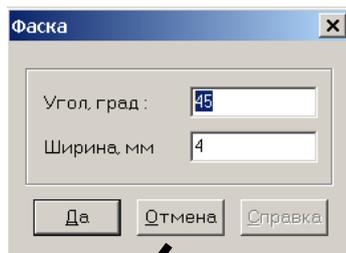


Рисунок 2.51

**Задание 3.** Задайте фаски (рисунок 2.52).

**Фаска слева**



**Фаска справа**

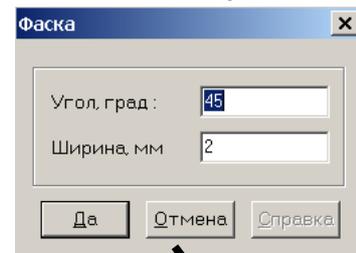


Рисунок 2.52



**Задание 4.** Задайте галтель (рисунок 2.53).

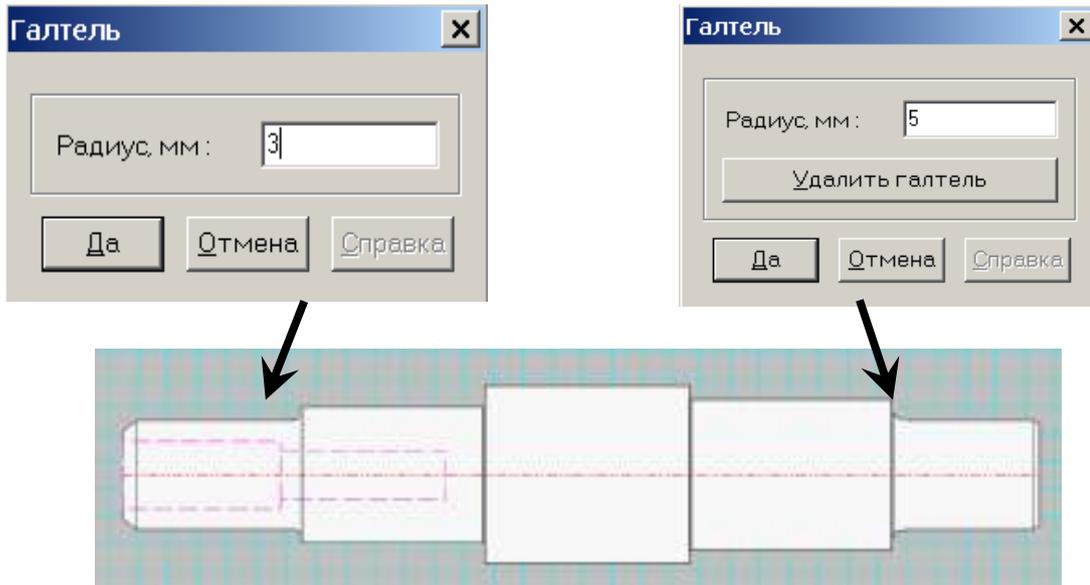


Рисунок 2.53

**Задание 5.** Задайте канавку между второй и третьей секциями (рисунок 2.54).

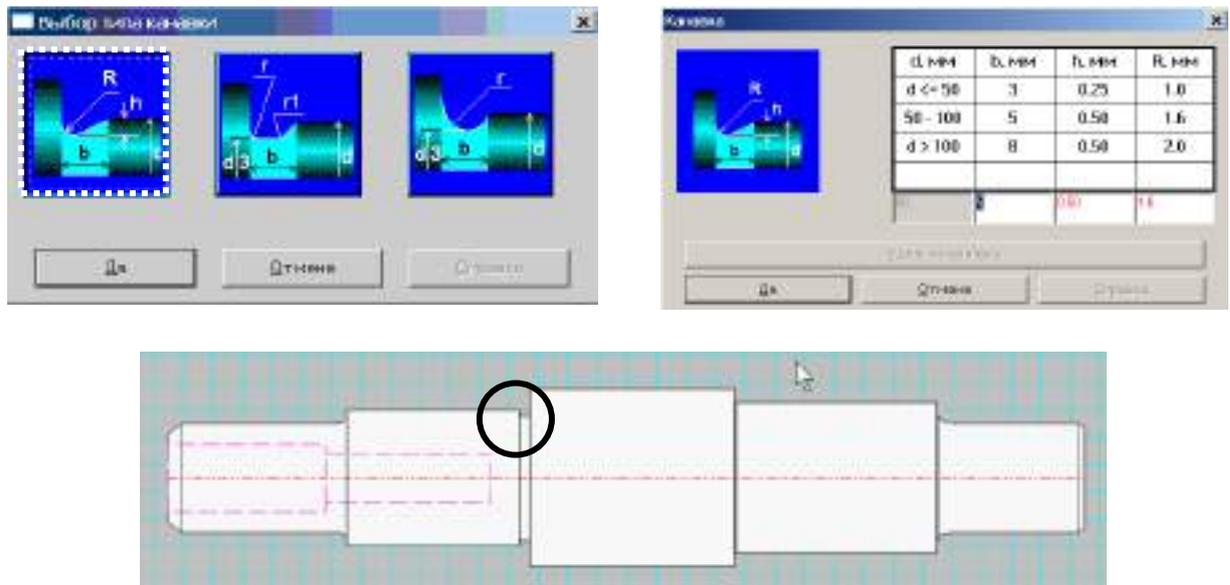


Рисунок 2.54



**Задание 6.** Покажите резьбу на четвертой секции (рисунок 2.55).

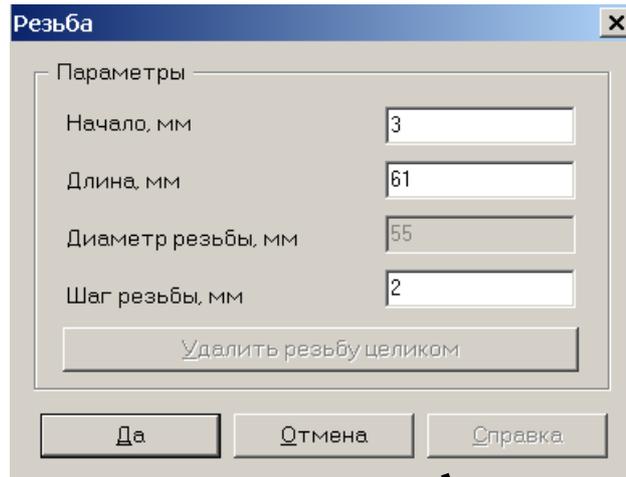


Рисунок 2.55

**Задание 7.** Укажите закругленную шпонку (рисунок 2.56).

Тип шпонки – призматическая (выбрать первую строчку)

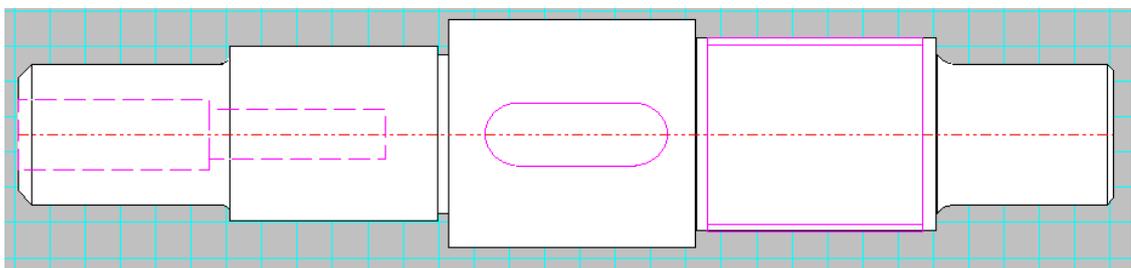
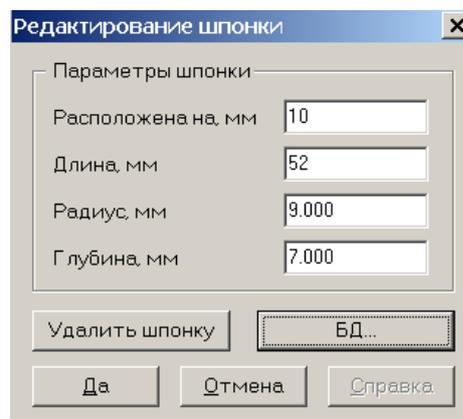


Рисунок 2.56



**Задание 8.** Задайте обработку поверхности второй секции (рисунок 2.57).

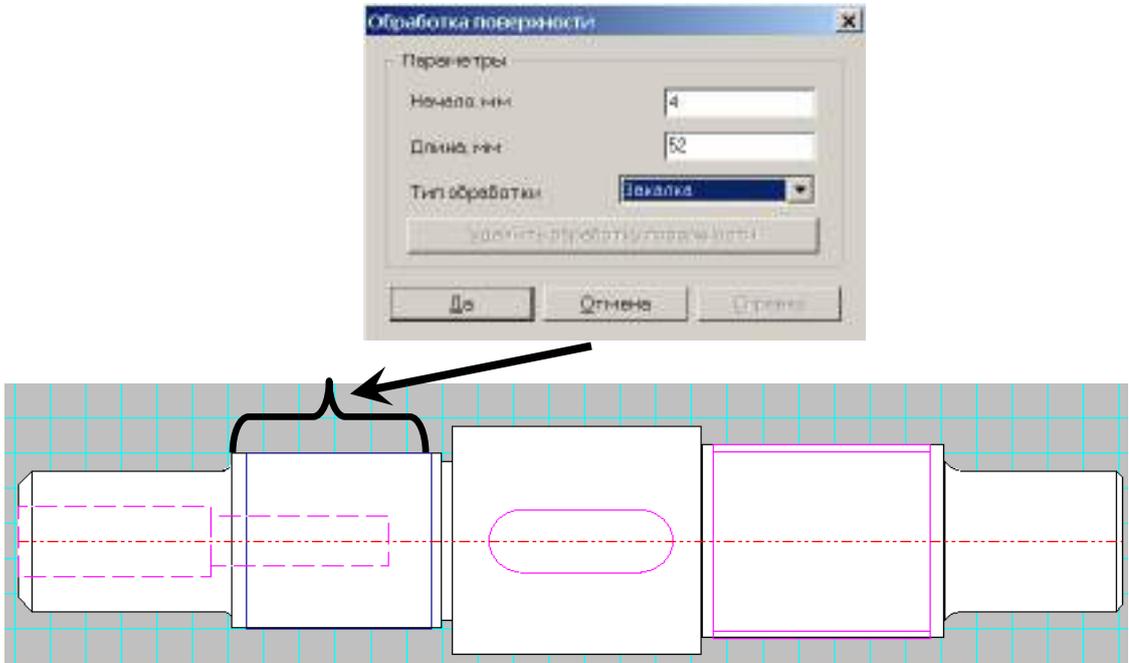


Рисунок 2.57

**Задание 9.** Задайте опоры вала (рисунок 2.58).

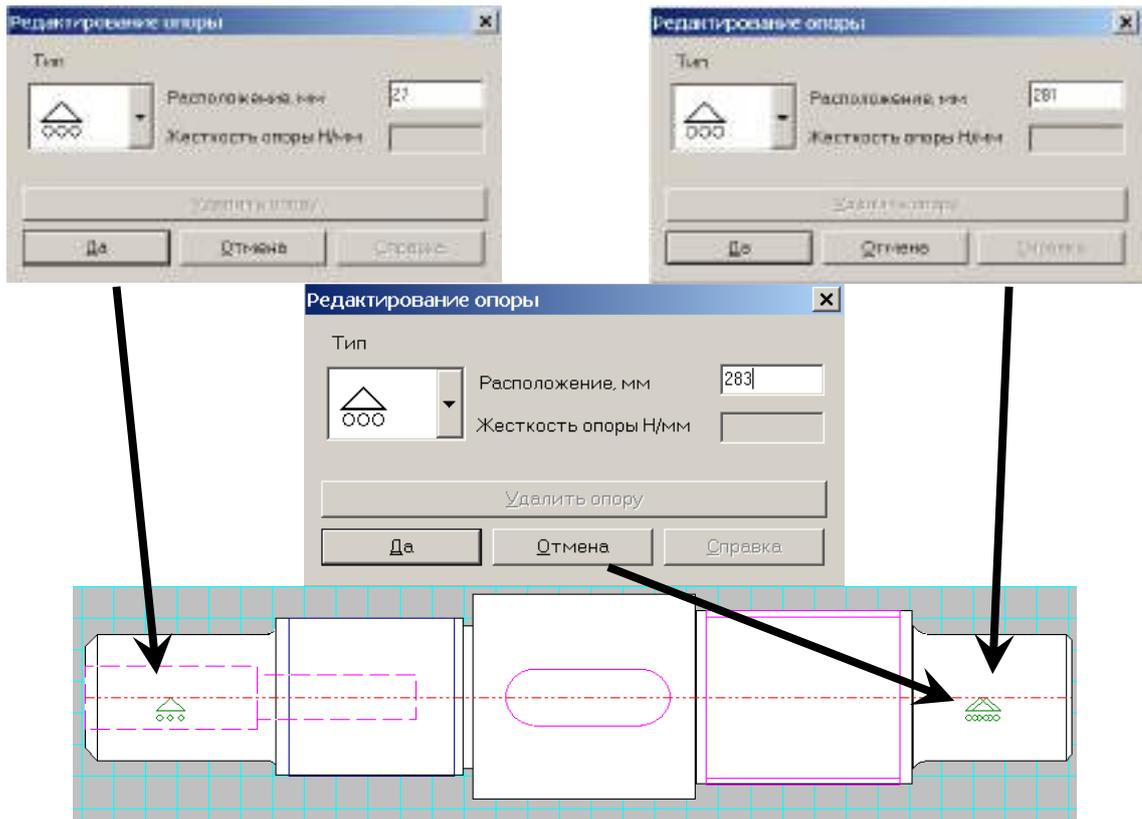


Рисунок 2.58



**Задание 10.** Задайте радиальную силу (рисунок 2.59).

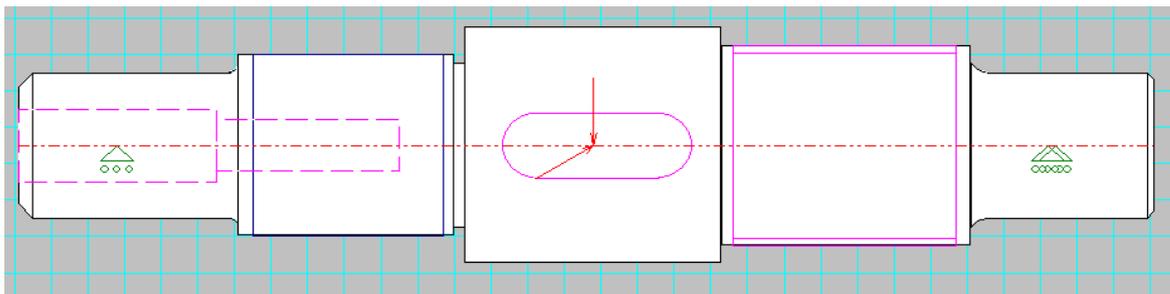
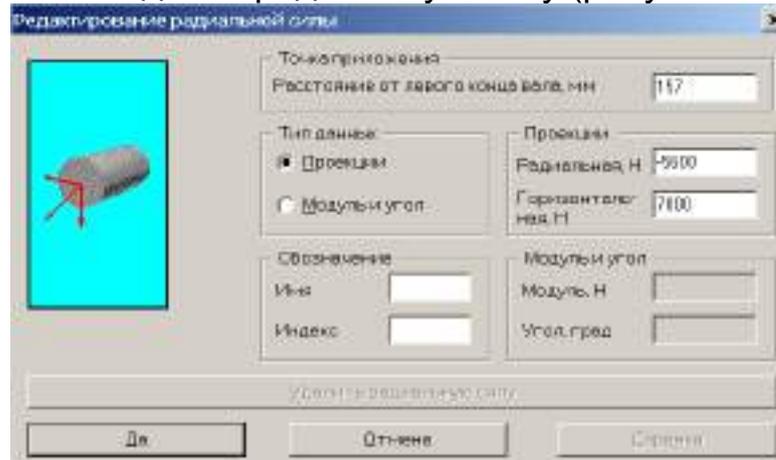


Рисунок 2.59

**Задание 11.** Задайте распределенные силы (рисунок 2.60).

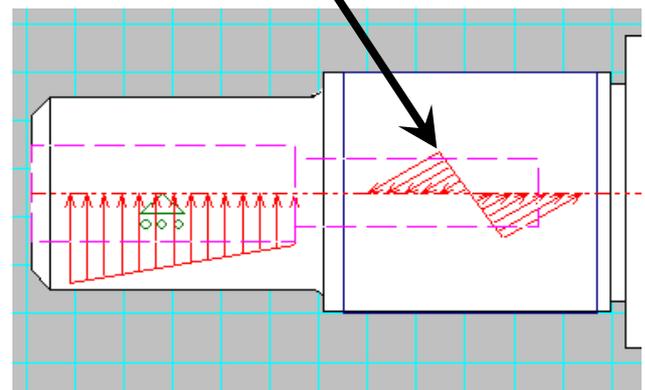
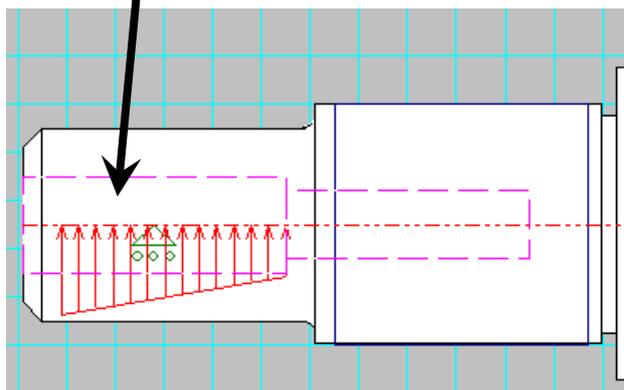
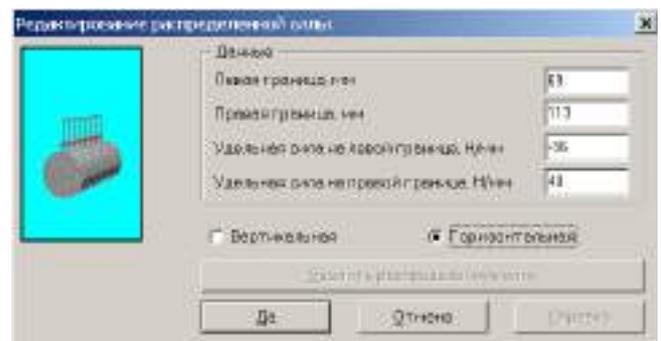
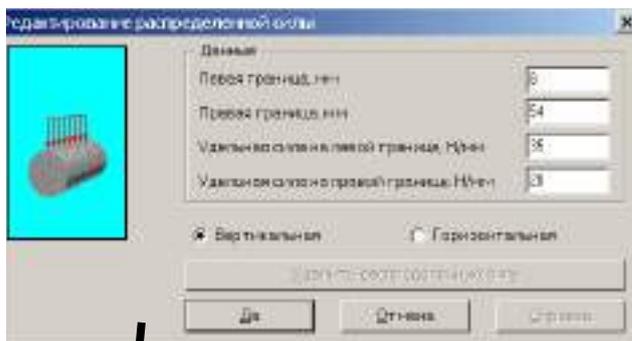


Рисунок 2.60



**Задание 12.** Задайте осевую силу (рисунок 2.61).

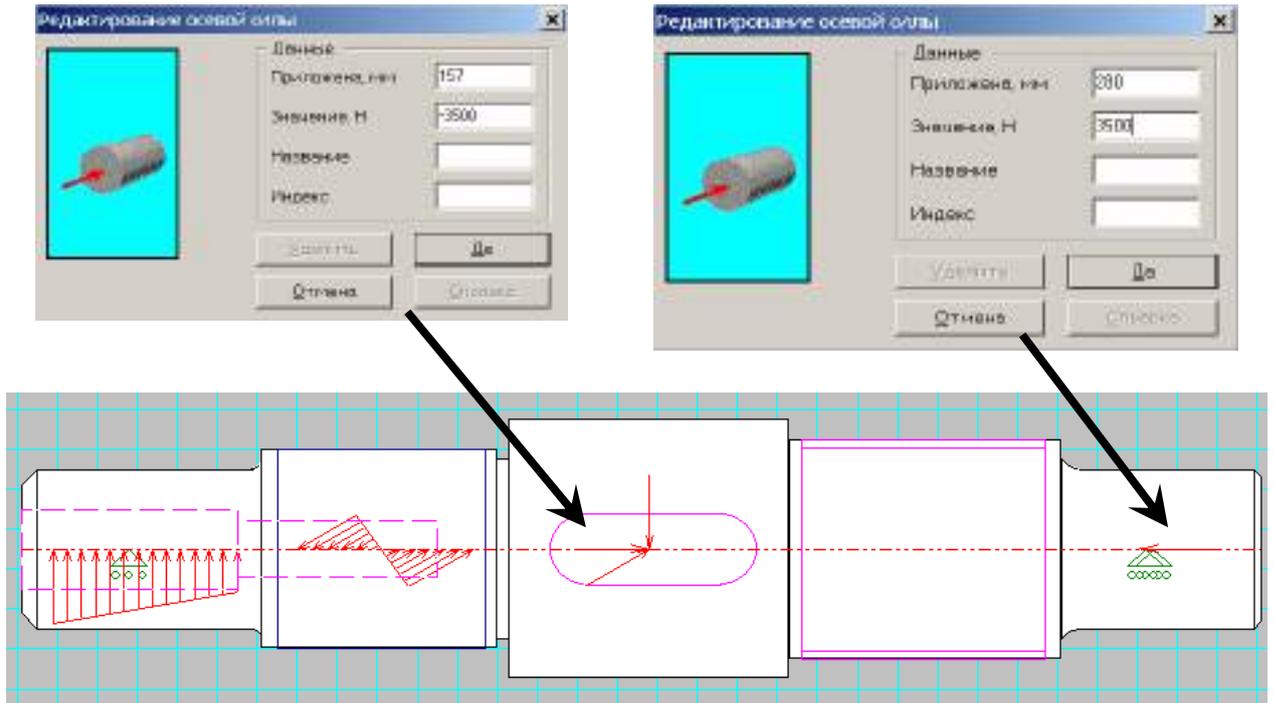


Рисунок 2.61

**Задание 13.** Задайте момент изгиба (рисунок 2.62).

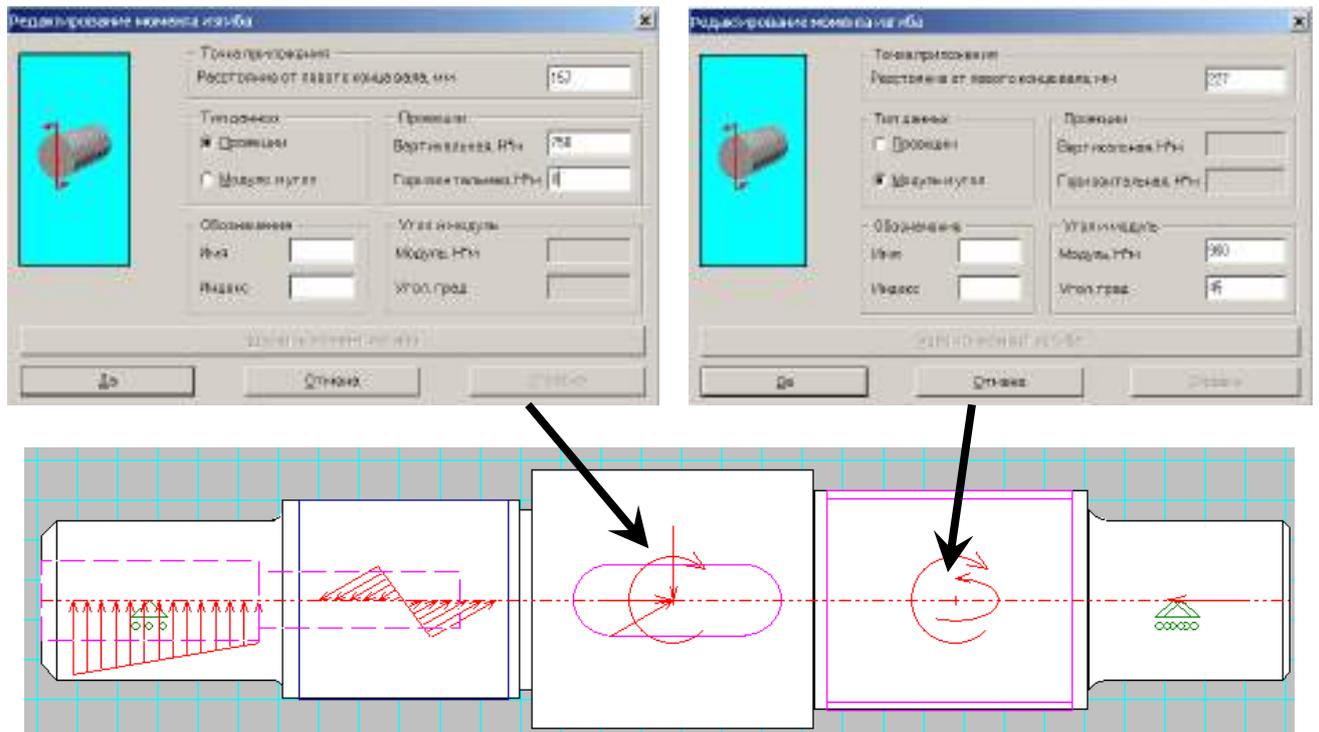


Рисунок 2.62



**Задание 14.** Задайте момент кручения (рисунок 2.63).

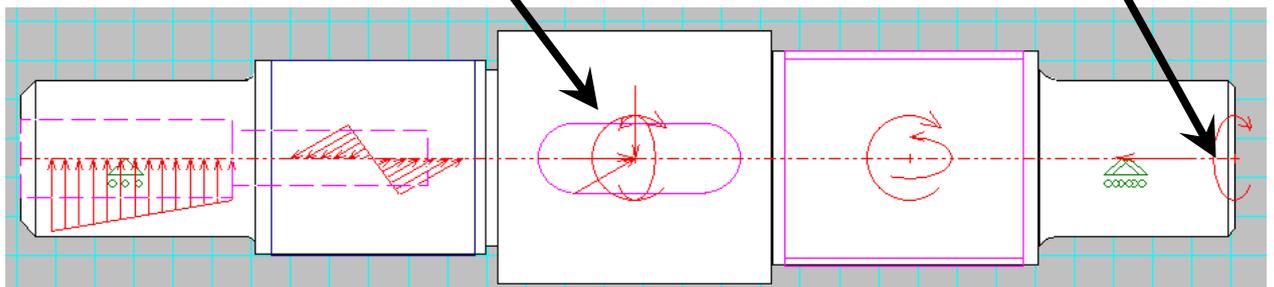
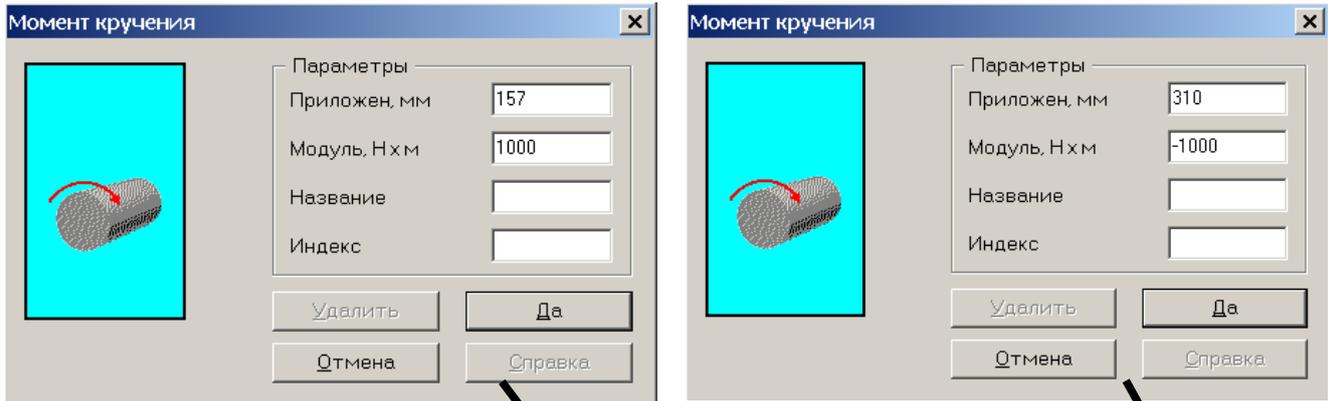


Рисунок 2.63

**Задание 15.** Для корректной постановки задачи необходимо проверить условие равновесия вала по моментам кручения и осевым силам!

**Задание 16.** Укажите параметры материала (рисунок 2.64)

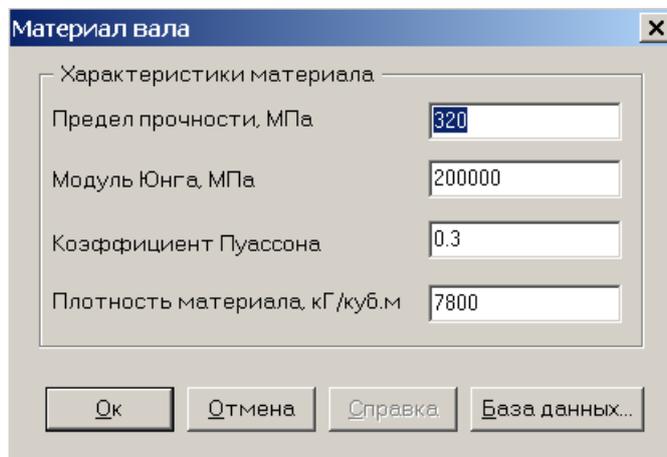


Рисунок 2.64



**Задание 17.** Выполните общий расчет вала

Ресурс работы вала

Данные

Ресурс работы, [час] 25000

Частота вращения вала, [об/мин] 200

Ok Отмена Справка

Рисунок 2.65

**Задание 18.** Просмотрите результаты

### Реакции в опорах

№	Координата опоры, мм	Вект. реакция, Н	Гориз. реакция, Н
1	27	-4177.49	-389.579
2	281	42834.5	-53361.3
3	283	-34250.5	84447
4			
5			
6			
7			

№	Координата опоры, мм	Модуль реакции, Н	Угол, град
1	27	4276.37	-162.283
2	281	84853.8	140.182
3	283	56112.7	-37.6176
4			
5			
6			
7			

Рисунок 2.66

### Моменты изгиба

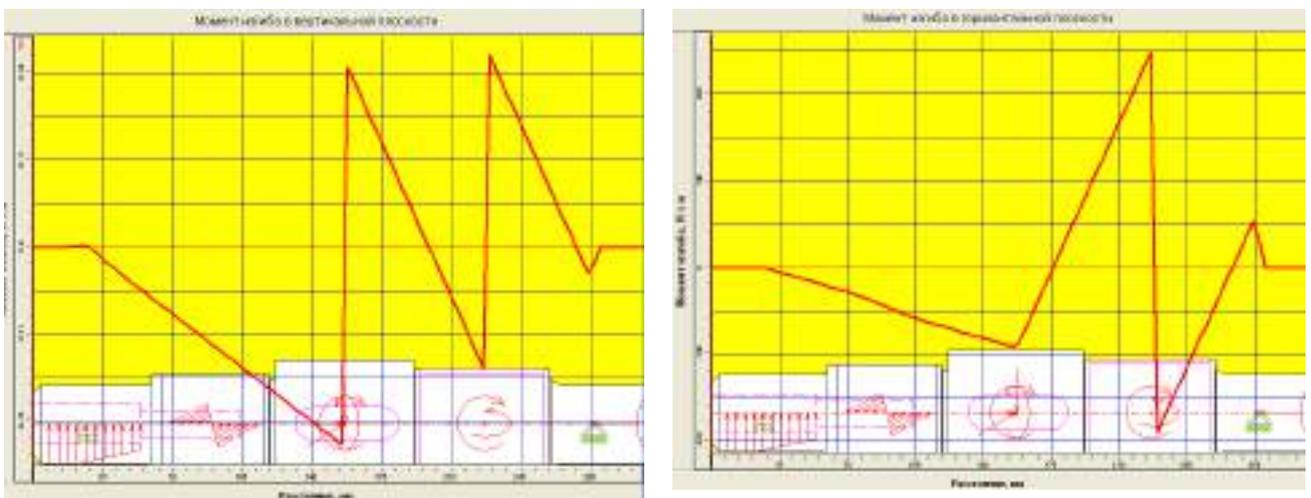


Рисунок 2.67



### Угол изгиба

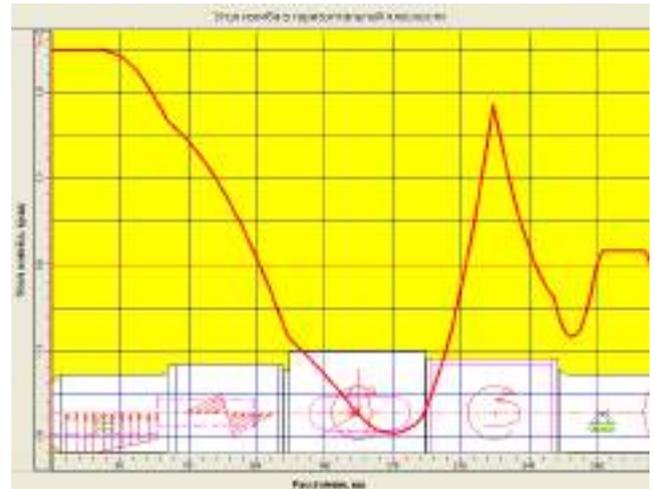
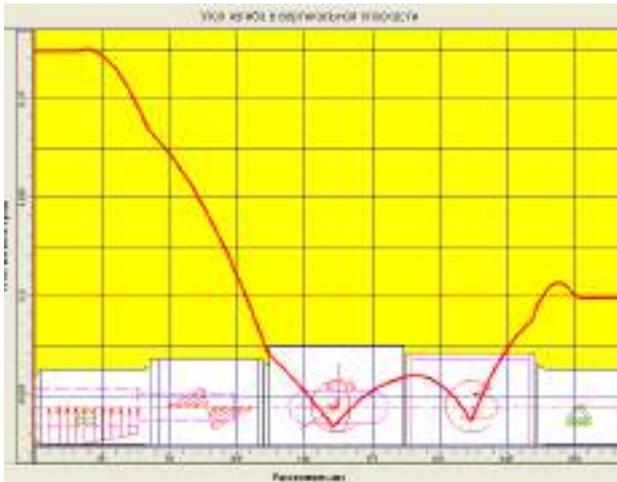
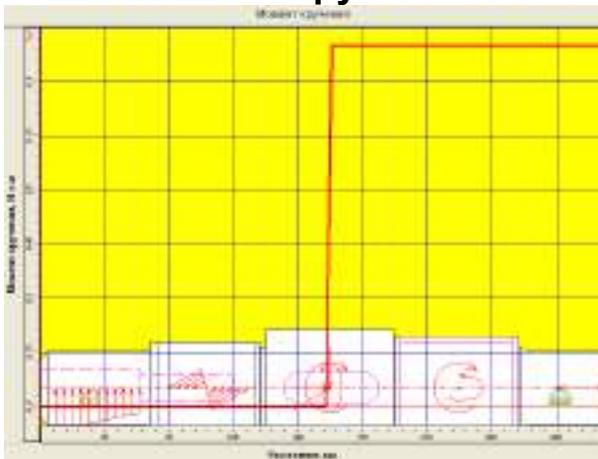


Рисунок 2.68

### Момент кручения



### Напряжения

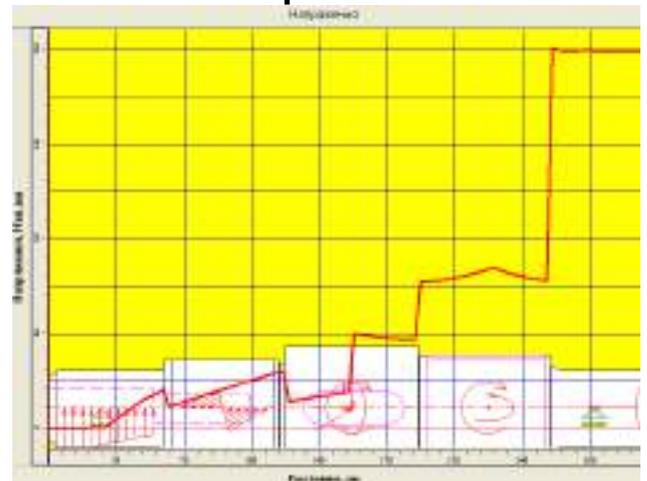


Рисунок 2.69

### Угол кручения



Рисунок 2.70



### Поперечные силы

Вертикальные



Горизонтальные

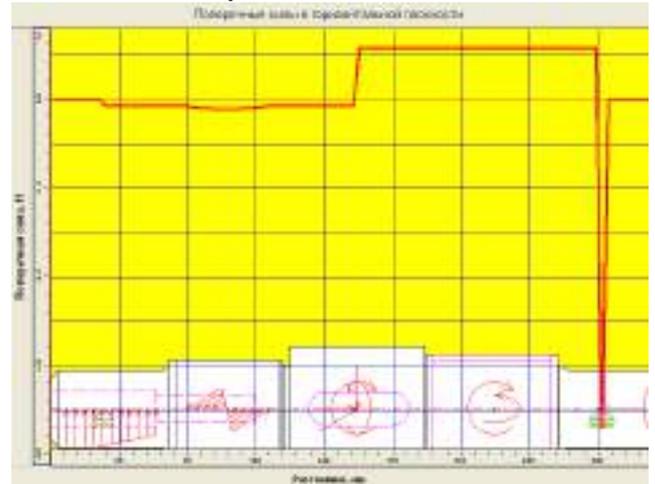
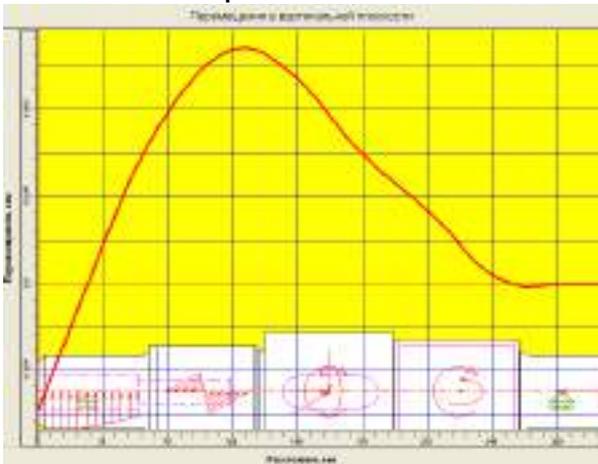


Рисунок 2.71

### Перемещения

Вертикальные



Горизонтальные

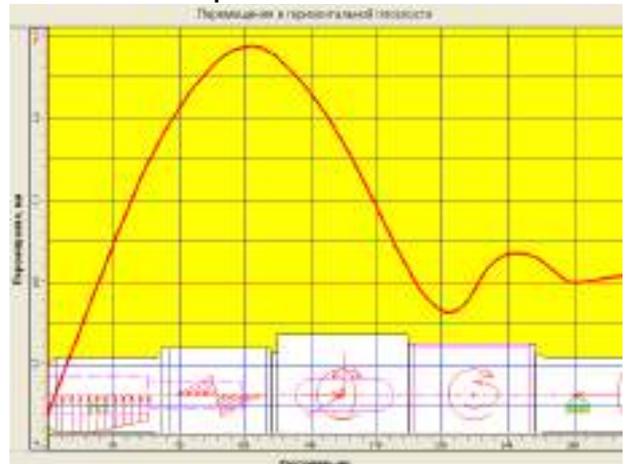
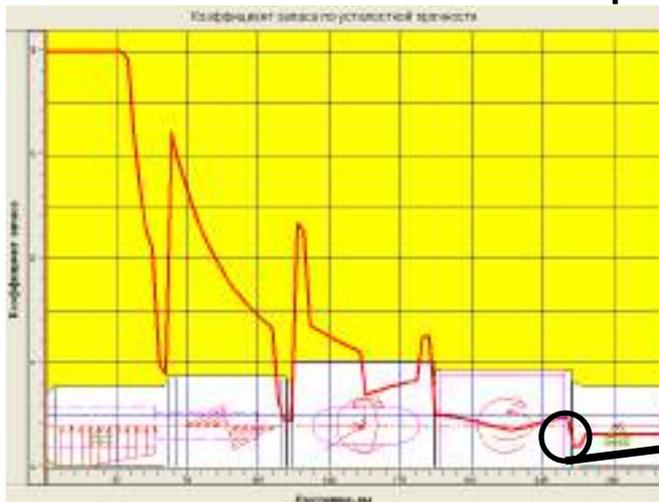


Рисунок 2.72

### Усталостная прочность



Экзистенция	
Коэффициент запаса по усталостной прочности	
2.067767997	
1.996528319	
1.922988853	
1.852196149	
1.783331193	
1.840411908	
1.914319198	
1.990489303	
2.068252696	
2.146847981	
2.224207999	
2.299871826	
2.376874825	
2.454873469	
0.9771941628	
0.9874627665	
1.553451144	

Рисунок 2.73



**Задание 19.** Как видно из эпюры, значения коэффициента запаса усталостной прочности в некоторых точках вала ниже единицы. Это означает, что в таких сечениях возможно появление усталостных трещин, которые, в конечном счете, могут привести к разрушению конструкции.

Чтобы избежать разрушения, необходимо, например, увеличить диаметр вала или выбрать материал с другими характеристиками.

Выполните любое из этих действий с целью получения более высокого коэффициента запаса усталостной прочности.

**Задание 20.** Выполните расчет динамических характеристик

Расчет динамических характеристик, таких как собственные частоты и формы, проводится методом начальных параметров. Такой вид расчета крайне важен для оценки резонансных явлений при работе вала.

Для моделирования реальных процессов при расчете динамических характеристик вала в модуле APM Shaft имеется два специальных инструмента: “Сосредоточенная масса” и “Момент инерции”.

**Задание 21.** Задайте сосредоточенную массу

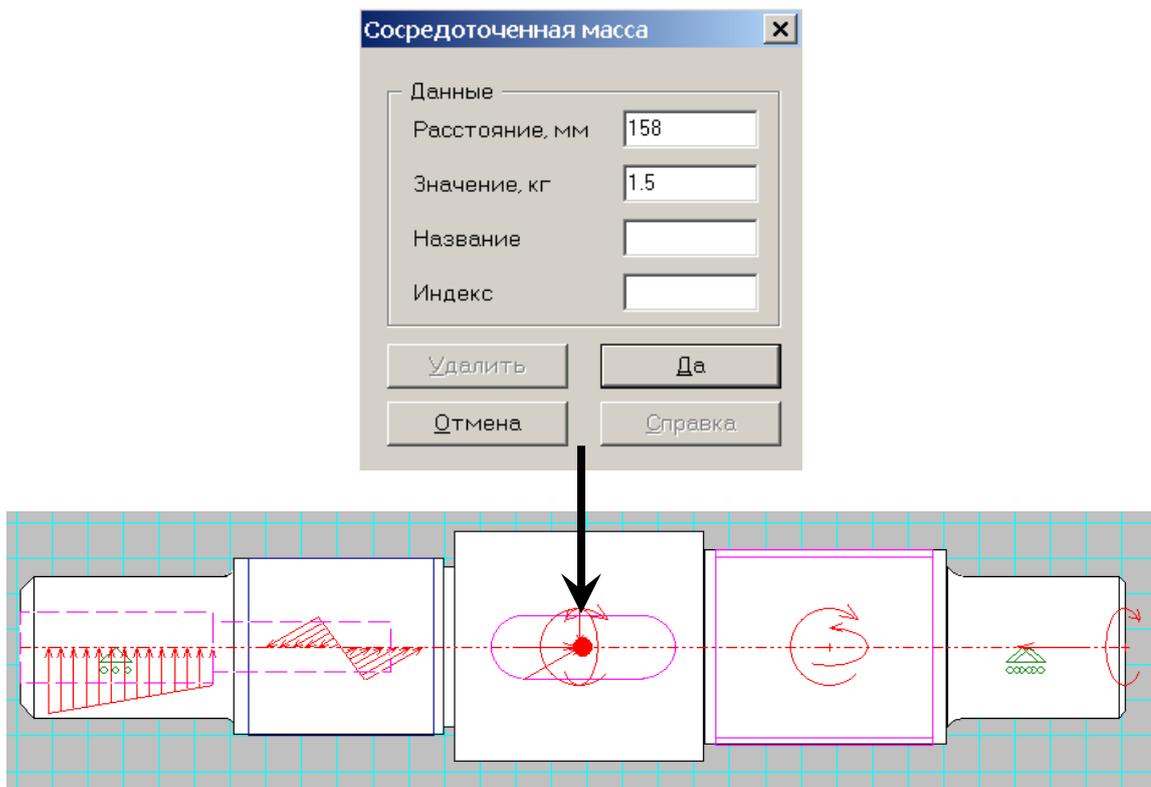


Рисунок 2.74



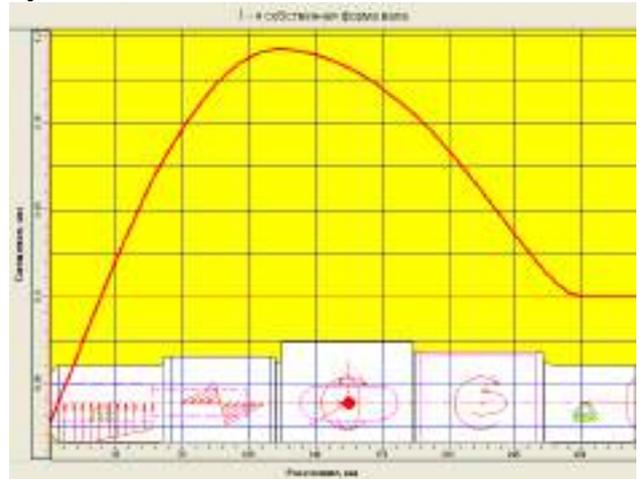
**Задание 22.** Выполните расчет

**Задание 23.** Просмотрите результаты

Собственные частоты изгибных колебаний

Порядковый Номер	Частота [рад/с]	Частота [Гц]
1	13420.9041	2136.0032
2	45155.9741	7186.7965
3	89497.4018	14243.9539
4	144134.5998	22939.7340
5	208661.5679	33209.5200

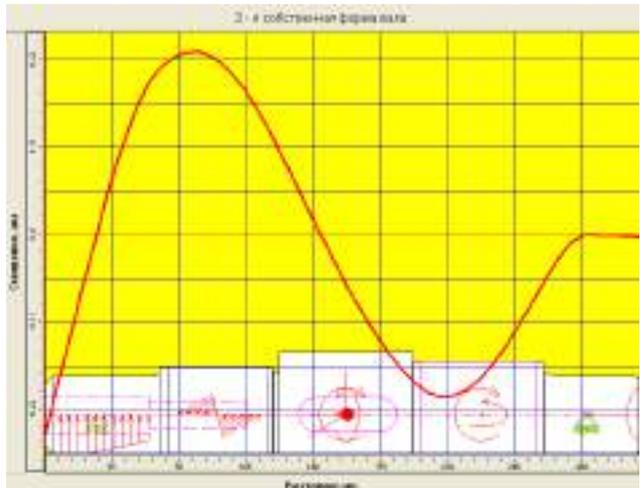
OK Показать форму Справка



Собственные частоты изгибных колебаний

Порядковый Номер	Частота [рад/с]	Частота [Гц]
1	13420.9041	2136.0032
2	45155.9741	7186.7965
3	89497.4018	14243.9539
4	144134.5998	22939.7340
5	208661.5679	33209.5200

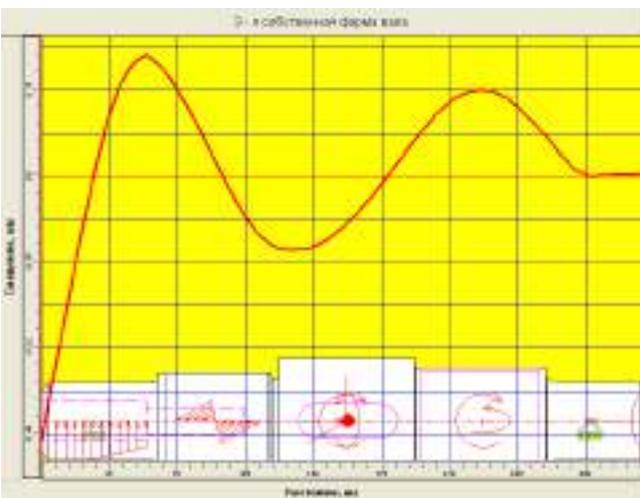
OK Показать форму Справка



Собственные частоты изгибных колебаний

Порядковый Номер	Частота [рад/с]	Частота [Гц]
1	13420.9041	2136.0032
2	45155.9741	7186.7965
3	89497.4018	14243.9539
4	144134.5998	22939.7340
5	208661.5679	33209.5200

OK Показать форму Справка

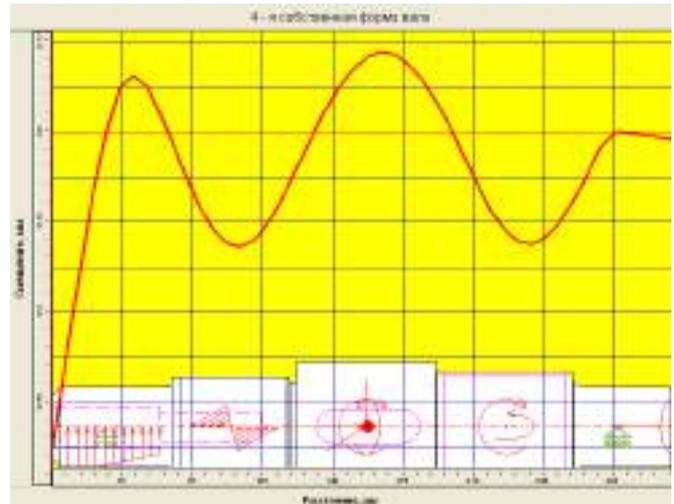




Собственные частоты изгибных колебаний

Порядковый Номер	Частота [рад/с]	Частота [Гц]
1	13420.9041	2136.0032
2	45155.9741	7186.7965
3	89497.4018	14243.9539
4	144134.5998	22939.7340
5	208661.5679	33209.5200

OK    Показать форму    Справка



Собственные частоты изгибных колебаний

Порядковый Номер	Частота [рад/с]	Частота [Гц]
1	13420.9041	2136.0032
2	45155.9741	7186.7965
3	89497.4018	14243.9539
4	144134.5998	22939.7340
5	208661.5679	33209.5200

OK    Показать форму    Справка

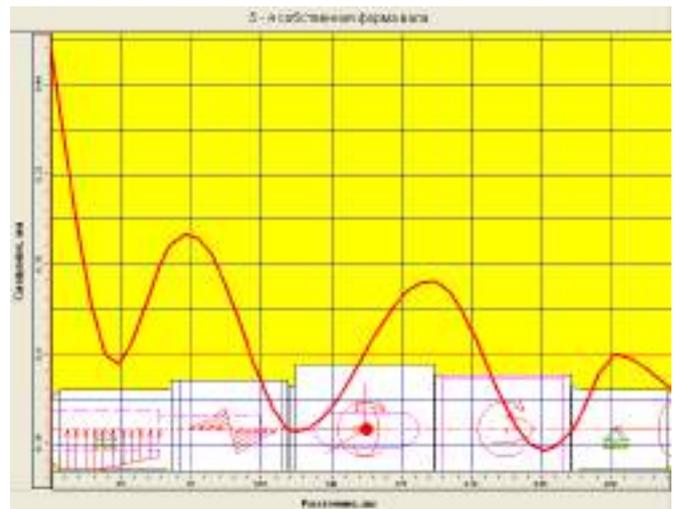


Рисунок 2.75

**Задание 24.** После расчета вала сгенерируйте его рабочий чертеж в формате редактора APM Graph в папку “ОКК” под именем “Вал”, расположенной на локальном диске “С” (рисунок 2.76).



Рисунок 2.76



Рисунок 2.77

### Упражнение 2.3 Расчет вала на усталостную прочность

**Задание 1.** Выполните расчет вала (рисунок 2.78) на сопротивление усталости, приняв:

$$\begin{aligned}
 T_1 = T_2 = 2000 \text{ Н}\cdot\text{м}; & \quad F_{t1} = 13,3 \text{ кН}; & \quad F_{t2} = 40 \text{ кН}; \\
 F_{r1} = 4,9 \text{ кН}; & \quad F_{r2} = 14,7 \text{ кН}; & \quad M_{a1} = M_{a2} = 280 \text{ Н}\cdot\text{м}; \\
 F_{a1} = 1,87 \text{ кН}; & \quad F_{a2} = 5,6 \text{ кН}; & \quad F = 3,73 \text{ кН}.
 \end{aligned}$$

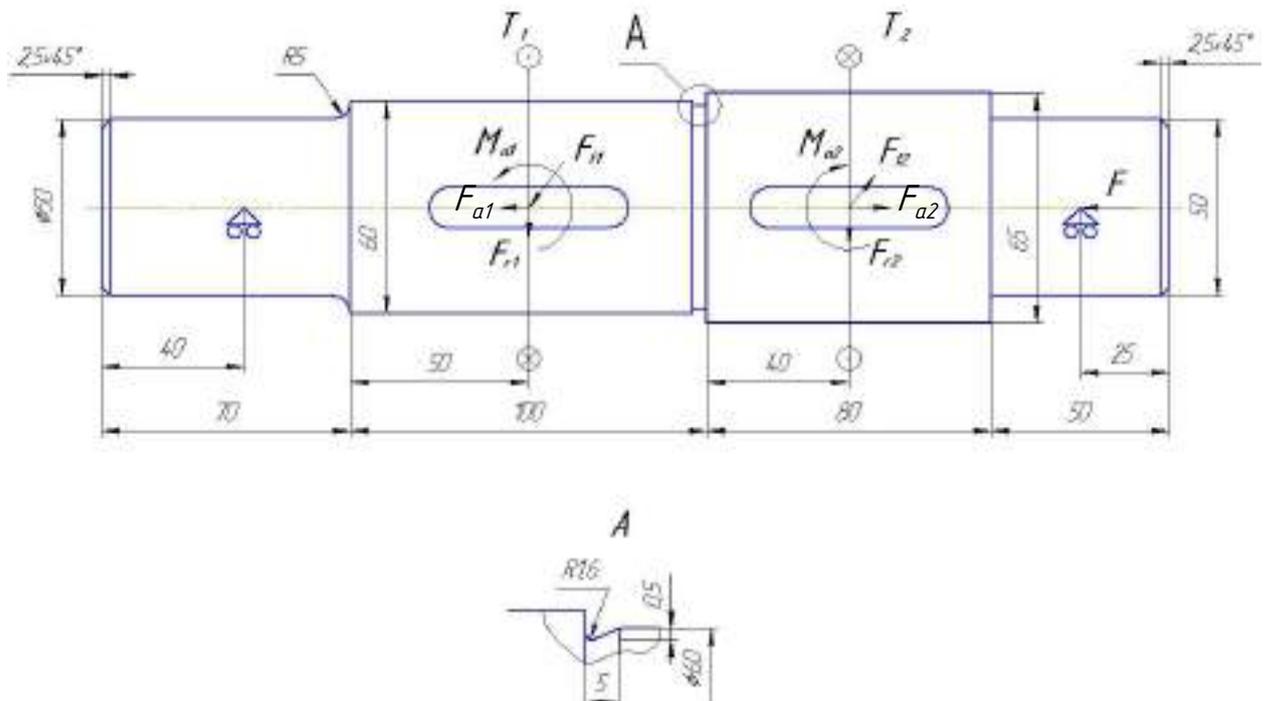


Рисунок 2.78



Вал изготовлен из стали 55 со следующими характеристиками:

предел прочности:	$\sigma_b = 700$ МПа;
предел текучести:	$\sigma_t = 420$ МПа;
предел выносливости при изгибе:	$\sigma_{-1} = 336$ МПа;
предел выносливости при кручении:	$\tau_{-1} = 175$ МПа.
Вид механической обработки поверхности:	тонкое шлифование

### Расчет вала по усталостной прочности

В силу конструктивных особенностей валов напряжения, возникающие в каждой точке вала, меняются как по величине, так и по знаку. Это обстоятельство является главной причиной усталостного разрушения валов, поэтому расчет их усталостной прочности (выносливости) является основным.

В данном примере расчет сводится к определению коэффициента запаса длительной усталостной прочности  $s$ , минимально допустимое значение которого рекомендуется выбирать из диапазона  $s_a = 1,5 \div 2,5$ . В конечном итоге величина коэффициента задается субъективно, в зависимости от ответственности конструкции, последствий разрушения вала, точности определения нагрузок и напряжений, уровня технологии изготовления и контроля. Для рассматриваемой задачи примем  $s_a = 2,2$ .

Расчет на выносливость базируется на статическом расчете напряженно-деформированного состояния.

Расчетный запас прочности определяется для наиболее опасного сечения, поэтому, прежде всего, нужно найти те сечения вала, которые подлежат проверке. В нашем случае такими сечениями будут (рисунок 2.79):

- сечение 1–1, в котором имеется концентратор напряжений в виде галтели;
- сечение 2–2, ослабленное шпоночным пазом в месте приложения внешних сил  $F_{t1}, F_{r1}, F_{a1}$  и моментов  $M_{a1}, T_1$ ;
- сечение 3–3 с канавкой  $A$ ;
- сечение 4–4, имеющее шпоночный паз в месте приложения внешних сил  $F_{t2}, F_{r2}, F_{a2}$  и моментов  $M_{a2}, T_2$ ;

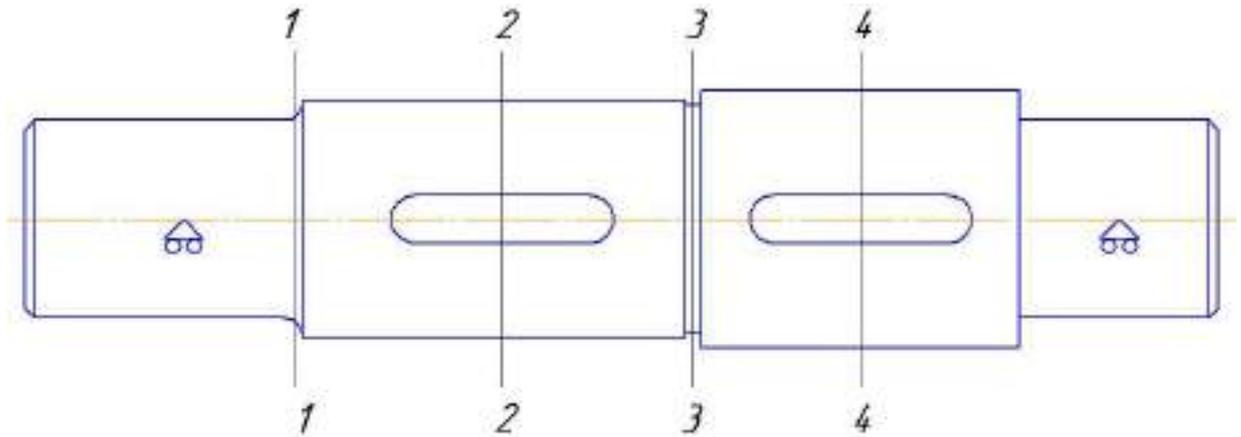


Рисунок 2.79

Для расчета в модуле **APM Shaft** необходимо изобразить вал, описать условия его закрепления, задать точки приложения и величины действующих на вал внешних нагрузок, указать все имеющиеся концентраторы напряжений и ввести параметры материала (или выбрать один из стандартных в базе данных).

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений, учитывающие влияние местных напряжений на величину запаса по усталостной прочности при задании концентраторов напряжений необходимо выбрать из таблиц 2.2 и 2.3.

Обозначения, используемые в таблице 2.2, пояснены на рисунке 2.80.

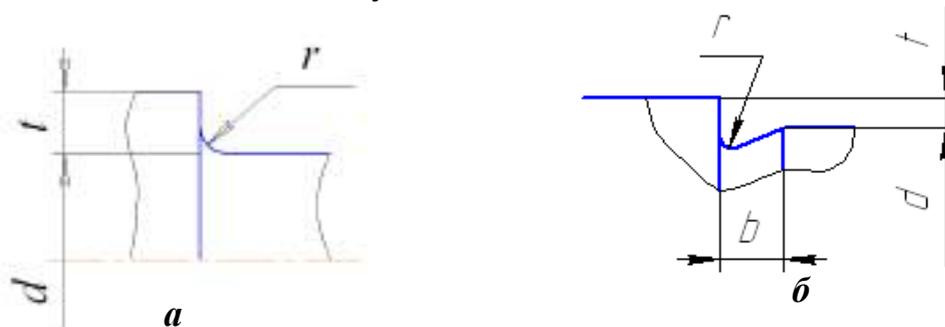


Рисунок 2.80 Галтели (а) и канавки (б)

Таблица 2.2 Эффективные коэффициенты концентрации напряжений в ступенчатом переходе с галтелью (рисунок 2.81, а, б)

t/r	r/d	$K_{\sigma}$ при $\sigma_b$ , МПа				$K_{\tau}$ при $\sigma_b$ , МПа			
		500	700	900	1200	500	700	900	1200
1	0,01	1,35	1,40	1,45	1,50	1,30	1,30	1,30	1,30
	0,02	1,45	1,50	1,55	1,60	1,35	1,35	1,40	1,40
	0,03	1,65	1,70	1,80	1,90	1,40	1,45	1,45	1,50
	0,05	1,60	1,70	1,80	1,95	1,45	1,45	1,50	1,55
	0,10	1,45	1,55	1,65	1,85	1,40	1,40	1,45	1,50
2	0,01	1,55	1,60	1,65	1,70	1,40	1,40	1,45	1,45
	0,02	1,80	1,90	2,00	2,15	1,55	1,60	1,65	1,70



	<b>0,03</b>	1,80	1,95	2,05	2,25	1,55	1,60	1,65	1,70
	<b>0,05</b>	1,75	1,90	2,00	2,20	1,55	1,60	1,65	1,75
<b>3</b>	<b>0,01</b>	1,90	2,00	2,10	2,20	1,55	1,60	1,65	1,75
	<b>0,02</b>	1,95	2,10	2,20	2,40	1,60	1,70	1,75	1,85
	<b>0,03</b>	1,95	2,10	2,25	2,45	1,65	1,70	1,75	1,90
<b>5</b>	<b>0,01</b>	2,10	2,25	2,35	2,50	2,20	2,30	2,40	2,60
	<b>0,02</b>	2,15	2,30	2,45	2,65	2,10	2,15	2,25	2,40

Таблица 2.3 Эффективные коэффициенты концентрации напряжений при изгибе и кручении валов для различных концентраторов

$\sigma_b$ , МПа	Шлицы		Шпоночная канавка		Резьба		Поперечное отверстие	
	$K_\sigma$	$K_\tau^*$	$K_\sigma^{**}$	$K_\tau$	$K_\sigma$	$K_\tau$	$K_\sigma^{***}$	$K_\tau$
600	1,55	2,36/1,46	1,46/1,76	1,54	1,96	1,54	2,05/1,85	1,80
800	1,65	2,55/1,58	1,62/2,01	1,88	2,20	1,71	2,10/1,90	1,95
1000	1,72	2,70/1,58	1,77/2,26	2,22	2,61	2,22	2,20/2,00	1,90
1200	1,75	2,80/1,60	1,92/2,50	2,39	2,90	2,39	2,30/2,10	2,00

\* В числителе приведены значения коэффициента  $K_\tau$  для валов с прямобочными шлицами, а в знаменателе – с эвольвентными.

\*\* В числителе указаны значения коэффициента  $K_\sigma$  для канавок, полученных пальцевой фрезой, а в знаменателе – дисковой.

\*\*\* В числителе приведены значения коэффициента  $K_\sigma$  для валов при диаметре отверстия  $a = (0,05 \div 0,15)d$ , в знаменателе – при  $a = (0,5 \div 0,25)d$ .

На рисунке 2.81-2.82 приведен некоторые из эпюр, полученных при расчете данного вала в предлагаемой программе: момент изгиба в вертикальной плоскости (рисунок 2.81)

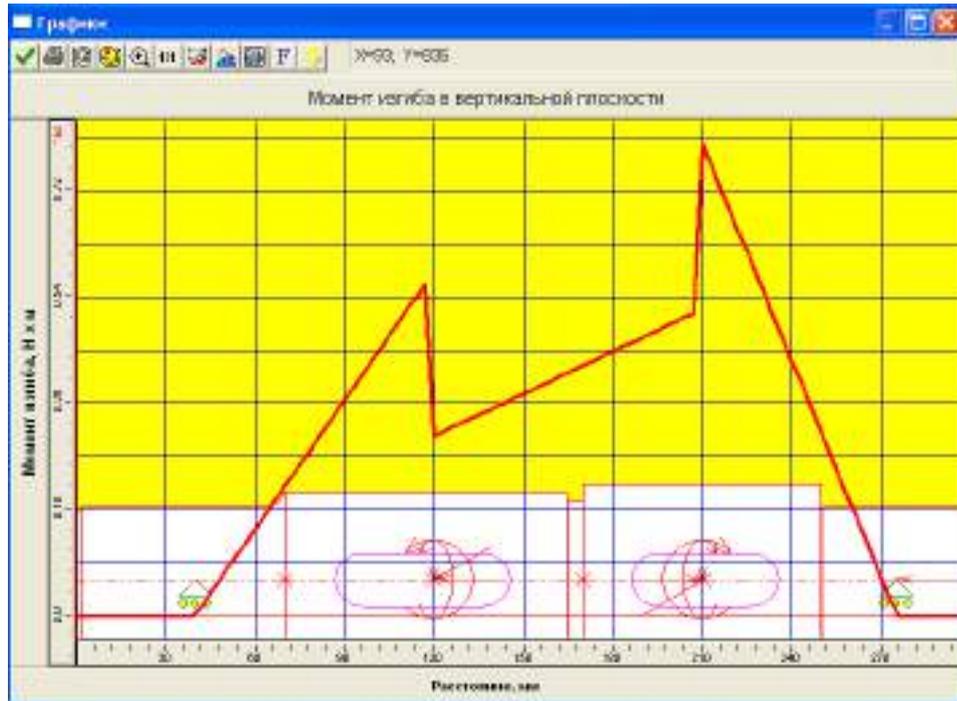


Рисунок 2.81

момент изгиба в горизонтальной плоскости (рисунок 2.82)

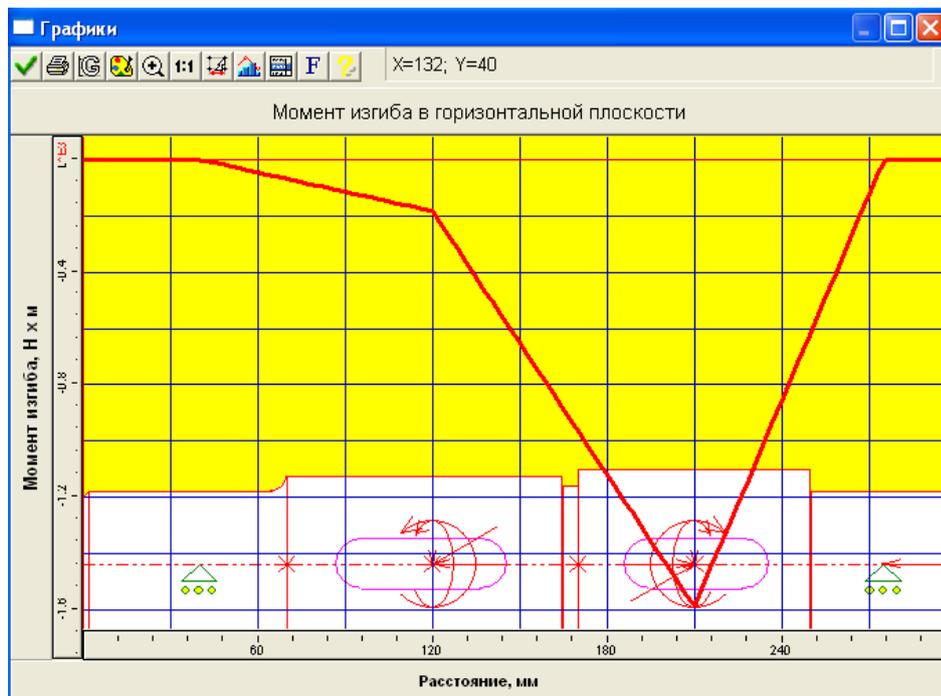


Рисунок 2.82

**Анализируя полученные результаты (коэффициент запаса по усталостной прочности), можно сделать вывод о том, в каких сечениях данный вал имеет недостаточную усталостную прочность, то есть для которого значение коэффициента запаса меньше допустимого  $s < s_a = 2,2$ .**



## 3 РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В МОДУЛЕ АРМ BEAR

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Программа **АРМ Bear** представляет систему для расчета неидеальных подшипников качения, в ходе задания параметров нагрузки и условий работы, выполнения сопутствующих расчетов, оптимального выбора подходящего варианта, и обеспечивает вывод результатов на экран (в файл, на печать).

*С помощью АРМ Bear могут быть рассчитаны:*

- перемещения в подшипниках качения;
- наибольшие контактные напряжения;
- долговечность;
- силы, действующие на тела качения;
- моменты трения;
- потери мощности;
- тепловыделение в подшипнике.

*Расчеты могут быть выполнены для подшипников восьми типов:*

- шариковых радиальных;
- шариковых сферических;
- шариковых радиально-упорных;
- шариковых упорных;
- роликовых радиальных;
- роликовых сферических;
- роликовых радиально-упорных;
- роликовых упорных.

### **Новый подход к расчету подшипников в программе АРМ Bear**

Подшипники качения представляют собой один из наиболее массовых видов деталей машин, используемых в современном машиностроении. Достоверное определение параметров и оптимальный выбор режима работы подшипников имеют первостепенное значение для характеристик проектируемого механического оборудования, в первую очередь для его точности и долговечности.

Не будет преувеличением сказать, что определение жесткости и перемещений является краеугольным камнем и в то же время камнем преткновения при расчете подшипников. Жесткость имеет важное значение сама по себе, кроме того, она используется при расчете многих других параметров.



Классический метод расчета жесткости основан на решении так называемой контактной задачи. Для решения этой задачи используются методы теории упругости. Решение контактной задачи базируется на ряде допущений, известных как условия Герца. Одним из наиболее важных среди этих условий является требование абсолютной гладкости контактирующих поверхностей. В то же время поверхности реальных объектов всегда имеют погрешности формы. Амплитуда этих погрешностей сопоставима с величиной контактных перемещений.

Это делает классические методы решения контактной задачи непригодными, ошибки могут достигать 100% и более.

В Центре научного и программного обеспечения "Автоматизированное Проектирование Машин" разработана общая теория контакта неидеальных поверхностей. В этой теории учитывается существенно статистическая природа процессов, имеющих место при контакте неидеальных поверхностей. Разработаны эффективные методы определения контактной жесткости и перемещений. Надежность этих методов подтверждена данными экспериментальных исследований.

Важный момент, который нужно иметь в виду при расчете подшипников состоит в том, что реальный контакт между телами качения и дорожками качения имеет статистический характер. Следовательно, характеристики подшипника, такие как жесткость и перемещения, можно определить только в статистическом смысле - как выборочную реализацию, среднее значение, дисперсию и т.п.

В **APM Bear** рассчитывается выборочная реализация контактных перемещений подшипника, состоящая из 100 элементов. Используя ее вы можете определить средние значения перемещений и жесткости, их дисперсии, максимальные, минимальные и наиболее частые значения, форму полей рассеяния и т.д. Те параметры, которые рассчитываются с использованием контактных перемещений (момент трения, потери мощности, нагрузки, действующие на тела качения), также представлены как массивы из 100 элементов (с соответствующими статистическими характеристиками). Эти результаты могут быть отображены различными способами - в виде таблицы, гистограммы, графика, эпюры и даже с помощью анимации. Это дает вам реальную картину поведения подшипника во всей ее сложности и полноте.

### Перемещения и жесткость

*Жесткость представляет собой способность тела сопротивляться деформации, вызванной внешней нагрузкой, действующей на тело. Численно жесткость равна силе, которая вызывает единичную деформацию (в выбранной системе единиц измерения).*



Податливость характеризует способность тела деформироваться под действием внешней нагрузки. Численно податливость равна деформации вызванной единичной внешней силой.

Под перемещением будет пониматься абсолютное перемещение центра подшипника, вызванное действием внешней силы.

#### Компоненты перемещения

В зависимости от типа подшипника и характера приложенной нагрузки, перемещение может быть одно-, двух- и трехмерным. Мы будем использовать следующие названия для компонент перемещения подшипника (см. рисунок 3.1):

- осевое перемещение - составляющая общего перемещения, направленная вдоль оси вала, на котором смонтирован подшипник;

- радиальное перемещение - составляющая общего перемещения, параллельная линии действия радиальной силы и перпендикулярная оси вала;

- боковое перемещение - составляющая, перпендикулярная оси вала и направлению радиальной силы.

Биениями называются относительные перемещения центра подшипника, обусловленные его вращением и зависящие от геометрии, точности и внешней нагрузки.

В **APM Bear** абсолютные и относительные перемещения совпадают, поэтому термины перемещения и биения используются как взаимозаменяемые.

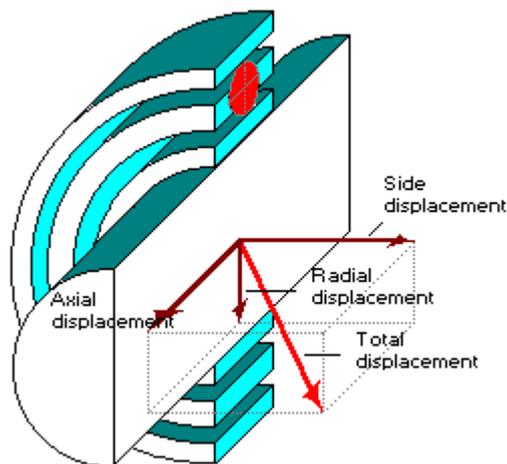


Рисунок 3.1 Компоненты перемещения подшипника. В общем случае суммарное перемещение подшипника может иметь до трех составляющих - осевую, радиальную и боковую. Осевое перемещение направлено вдоль оси вала; радиальное перпендикулярно оси вращения и параллельно направлению радиальной силы; боковое перемещение перпендикулярно осевому и радиальному



### Что рассчитывается

Расчет перемещений представляет собой ядро **APM Bear**. Пользователю системы дается уникальная возможность определить (и даже, непосредственно наблюдать) во всех подробностях реальную картину движения подшипника.

Для того, чтобы охарактеризовать перемещения рассчитывается (моделируется) массив из 100 положений центра подшипника. Для каждого положения может быть вычислено до 3 составляющих (осевая, радиальная и боковая, см. рисунок 3.1). В случае радиально-упорных подшипников, которые устанавливаются парами, перемещения рассчитываются для каждого подшипника отдельно.

Используя этот массив, вы можете оценить максимальные и минимальные перемещения, наблюдать форму поля рассеяния перемещений, определить, какие компоненты преобладают и т.п. Основываясь на перемещениях легко рассчитать жесткость и податливость подшипника. Таким образом, вы получаете исчерпывающее описание движения подшипника.

### Представление

Результаты расчета перемещений могут быть продемонстрированы в **APM Bear** следующими способами:

1) **В виде таблицы.** На экране отображается диалоговое окно, содержащее окно списка, заполненное значениями контактных перемещений центра подшипника. В нижней части окна показаны статистические характеристики распределения перемещений - среднее значение, дисперсия и среднеквадратическое отклонение. Каждая компонента суммарного перемещения (осевая, радиальная и боковая) показывается отдельно. На рисунке 3.2 приведен пример таблицы радиальных перемещений шарикового радиального подшипника.

Возможные положения центра (мкм)			
17.212	18.118	19.024	19.024
22.648	17.212	17.212	19.024
19.024	19.024	16.306	18.118
21.742	18.118	19.930	24.466
19.930	18.118	20.836	18.118
21.742	22.648	15.401	16.306
19.024	19.930	19.930	16.306
17.212	14.495	19.024	16.306

Мат. ожидание	18.906
Дисперсия:	5.698
Среднеквадр. откл.:	2.375

Buttons: Ок, Отмена, Справка

Рисунок 3.2 Массив радиальных биений подшипника. В верхней части окна расположена таблица значений радиальных смещений, в нижней - статистические характеристики распределения смещений



2) **В виде гистограммы.** Гистограмма используется для того, чтобы продемонстрировать особенности распределения значений смещений. Промежуток между наибольшим и наименьшим значениями перемещений делится на двадцать равных интервалов, для каждого интервала рассчитывается доля перемещений, попадающих в его границы. На рисунке 3.3 показана гистограмма боковых перемещений для радиального шарикового подшипника.

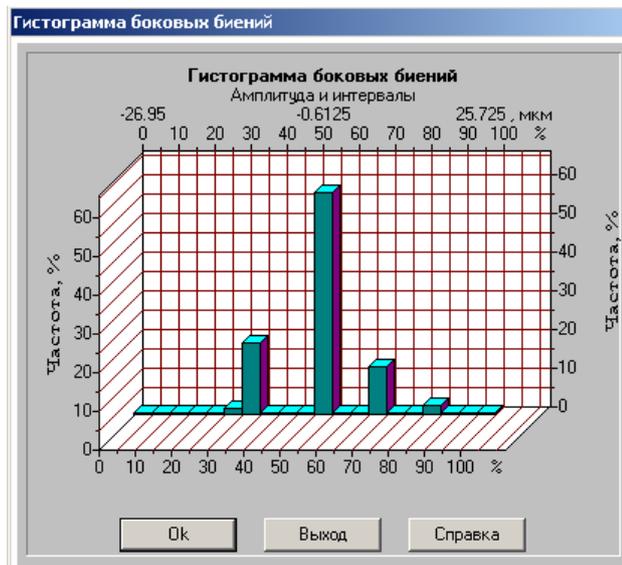


Рисунок 3.3 Пример гистограммы боковых биений радиального шарикового подшипника

3) **В виде поля положений центра подшипника.** С помощью таблиц и гистограмм компоненты суммарного перемещения показываются по отдельности. Для того, чтобы продемонстрировать совместное распределение компонент используются двух- и трехмерные поля рассеяния. На рисунке 3.5 показано трехмерное поле биений для шарикового радиально-упорного подшипника.

4) **В виде анимации.** Для того, чтобы дать вам общее представление о реальном характере движения подшипника используется анимация. Для этого используется все тот же массив из 100 положений центра подшипника. На рисунке 3.4 показан фрагмент анимации биений шарикового радиально-упорного подшипника.

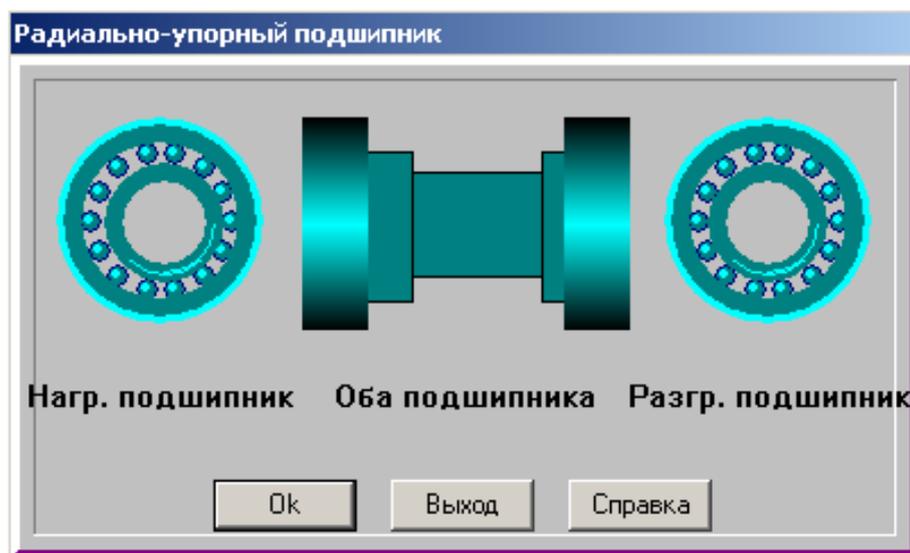


Рисунок 3.4 Фрагмент анимации движения для радиально-упорного подшипника. В левой и правой частях окна пользователь может наблюдать радиальные и боковые перемещения подшипников, образующих парный узел. В центральной части показаны оба подшипника и часть вала, на котором они смонтированы. Это позволяет наблюдать осевые и радиальные перемещения, а также перекос вала.

#### *Наибольшие контактные напряжения*

*Наибольшее контактное напряжение представляет собой напряжение в контакте наиболее нагруженного тела качения или его части.*

#### **Что рассчитывается**

В **APM Bear** определяется наибольшее контактное напряжение, действующее в подшипнике. Это значение выводится в поле "Резюме" диалогового окна "Результаты".

#### *Долговечность*

*Под долговечностью понимается период времени в течении которого 90 подшипников из каждых 100 не будут иметь усталостных разрушений.*

#### **Что рассчитывается**

Значение расчетной долговечности выводится в поле "Резюме" диалогового окна "Результаты".

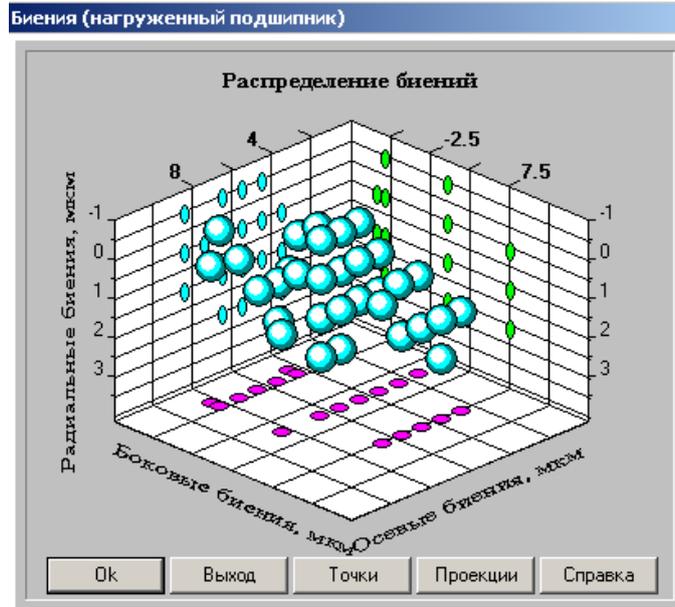


Рисунок 3.5 Пример пространственного поля рассеяния положений центра подшипника. Такие графики используются для радиально-упорных подшипников (шарикового и роликового). Перемещения подшипников этого типа в общем случае имеют три составляющих - осевую, радиальную и боковую. Эти компоненты откладываются вдоль осей графика. Сферические точки на графике соответствуют суммарному смещению. Значками, имеющими форму эллипсов, расположенными на координатных плоскостях, показаны парные распределения компонент биений: осевые-радиальные, осевые-боковые, радиальные-боковые. По желанию пользователя суммарные и парные распределения могут не показываться

### *Силы, действующие на тела качения*

*Силы, действующие на тела качения, представляют собой нормальные силы, приложенные к телам качения со стороны дорожек качения с которыми они контактируют. Эти силы зависят от геометрии подшипника, точности изготовления, внешних нагрузок и относительного положения тел качения и колец.*

### **Что рассчитывается**

В **APM Bear** для каждого из 100 положений центра подшипника (см. выше) рассчитываются силы, действующие на тела качения.

### **Представление**

Силы, действующие на тела качения, могут быть показаны:

- 1) **В виде эпюры**
- 2) **В виде графика**

На рисунок 3.6 приведено диалоговое окно, в котором показаны эпюра и график сил, действующих на тела качения.

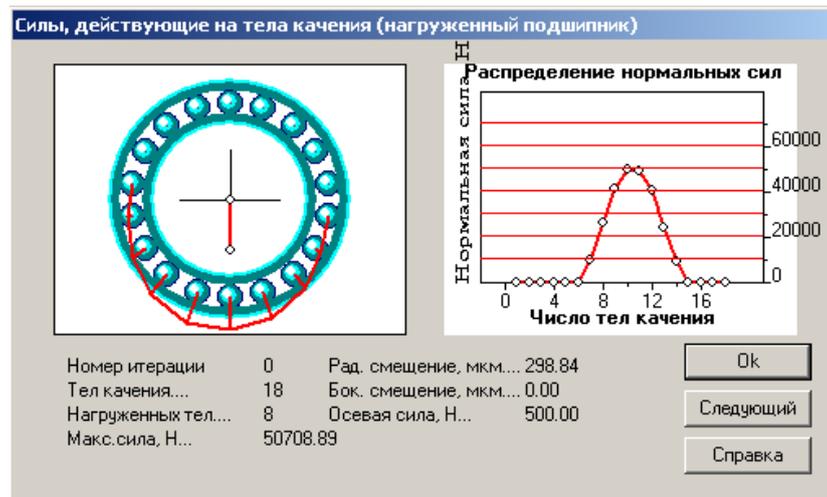


Рисунок 3.6 Силы, действующие на тела качения. Диалоговое окно с эпюрой и графиком сил, действующих на тела качения (радиально-упорный шариковый подшипник). Используя клавишу "Следующий" вы можете перейти к следующему виртуальному положению центра подшипника и таким образом проследить как изменяются нормальные силы в процессе вращения подшипника. Чтобы исправить положение можно, например, использовать более точный подшипник или изменить величину преднатяга

### Момент трения

*Момент трения можно определить как момент, который должен быть приложен к подшипнику, чтобы компенсировать действие сил трения.*

### Что рассчитывается

В **APM Bear** рассчитывается (моделируется) массив из 100 значений момента трения (соответствующий массиву перемещений).

### Представление

Значения сил трения могут быть показаны

- 1) в виде таблицы, дополненной статистическими характеристиками (среднее, дисперсия, среднеквадратическое отклонение);
- 2) в виде гистограммы;
- 3) в виде графика.

Среднее значение момента трения показывается в поле "Резюме" диалогового окна "Результаты".

### Потери мощности

*Потери мощности представляют собой мощность, рассеянную в подшипнике в результате действия сил трения в контакте между телами качения и дорожками качения.*

### Что рассчитывается

В **APM Bear** рассчитывается (моделируется) массив из 100 значений потерь мощности (соответствующий массиву перемещений).



### Представление

Значения потерь мощности могут быть показаны

- 1) в виде таблицы, дополненной статистическими характеристиками (среднее, дисперсия, среднеквадратическое отклонение);
- 2) в виде гистограммы;
- 3) в виде графика;

Среднее значение потерь мощности показывается в поле "Резюме" диалогового окна "Результаты".

### Тепловыделение

*Тепловыделение представляет собой количество тепла, выделенное в подшипнике в результате действия сил трения.*

Значение тепловыделения показывается в поле "Резюме" диалогового окна "Результаты".

### Типы подшипников

В данном разделе приводится краткое описание типов подшипников, которые вы можете рассчитать с помощью **APMBear**.

Таблица 3.1

<b>Подшипник</b>	<i>- часть опорной структуры вала, воспринимающая действие нагрузки и обеспечивающая вращение вала</i>
<b>Подшипник качения</b>	<i>- подшипник, в котором между опорной и вращающейся поверхностями расположены тела качения (сферические или роликовые). Кроме тел качения подшипник включает в себя внешнее и внутреннее кольца.</i>
<b>Шариковый подшипник</b>	<i>- подшипник качения с телами качения сферической формы</i>
<b>Роликовый подшипник</b>	<i>- подшипник качения, у которого тела качения имеют форму цилиндрических либо конических роликов</i>
<b>Неидеальный подшипник</b>	<i>- подшипник качения, геометрические размеры которого имеют отклонения от номинальных значений</i>

С помощью **APM Bear** вы можете рассчитать подшипники восьми наиболее часто используемых типов (таблица 3.2).



Таблица 3.2

Тип	Схема	Определение	Тип	Схема	Определение
Радиальный шариковый подшипник		Шариковый подшипник для работы в условиях радиальной нагрузки	Радиальный роликовый подшипник		Роликовый подшипник для работы в условиях радиальной нагрузки
Сферический шариковый подшипник		Шариковый подшипник с двумя рядами тел качения для работы в условиях радиальной нагрузки.	Сферический роликовый подшипник		Роликовый подшипник с двумя рядами тел качения для работы в условиях радиальной нагрузки.
Радиально-упорный шариковый подшипник		Шариковый подшипник, работающий в условиях комбинированной нагрузки, включающей осевую и радиальную силы	Радиально-упорный роликовый подшипник		Роликовый подшипник, работающий в условиях комбинированной нагрузки, включающей осевую и радиальную силы
Упорный шариковый подшипник		Шариковый подшипник, работающий в условиях чисто осевой нагрузки	Упорный роликовый подшипник		Роликовый подшипник, работающий в условиях чисто осевой нагрузки

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Настоящий раздел содержит описание всех параметров, используемых в **APMBear** в качестве исходных данных для расчетов.

#### Геометрия

Для задания геометрии подшипника используются следующие параметры:



Таблица 3.3

<b>Внешний диаметр</b>	<i>Диаметр внешнего кольца подшипника, номинальное значение которого совпадает с диаметром отверстия. Единицы измерения – миллиметры (мм).</i>
<b>Внутренний диаметр</b>	<i>Диаметр внутреннего кольца подшипника, номинальное значение которого совпадает с диаметром вала. Единицы измерения – миллиметры (мм).</i>
<b>Диаметр тел качения</b>	<i>Номинальное значение диаметра тела качения. Единица измерения – миллиметры.</i>
<b>Длина ролика</b>	<i>Теоретическое значение длины зоны контакта между роликом и дорожкой качения. Единица измерения – миллиметры.</i>
<b>Угол контакта</b>	<i>Угол между направлением действия нагрузки и плоскостью, нормальной к оси подшипника. Единица измерения – градусы.</i>
<b>Число тел качения</b>	<i>Для однорядных подшипников – общее число тел качения, для многорядных – число тел качения в одном ряду.</i>
<b>Число рядов тел качения</b>	<i>Число рядов тел качения в подшипнике.</i>

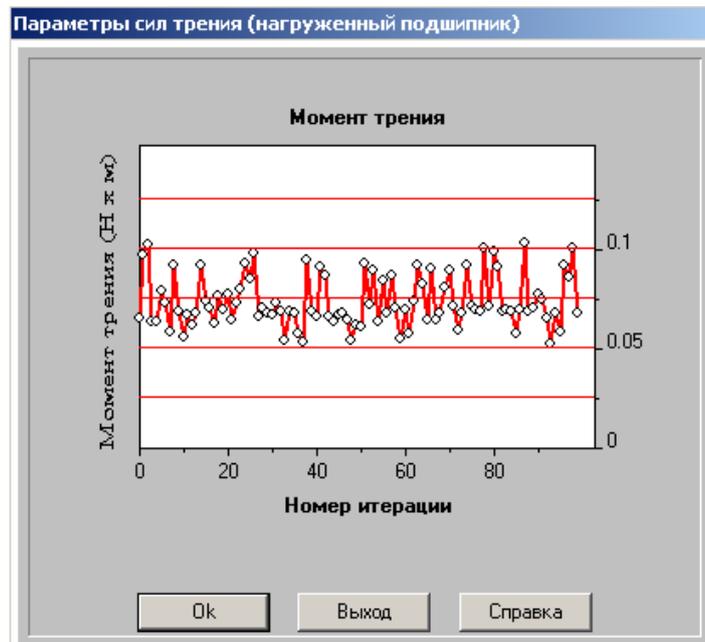


Рисунок 3.7 Распределение значений момента трения. График значений момента трения (радиально-упорный шариковый подшипник). По оси Y отложены значения момента трения, по оси X - номер позиции центра подшипника, которому соответствует значение момента трения.



## Точность

Для того, чтобы охарактеризовать точность подшипника используются два параметра (см. таблицу 3.4).

Таблица 3.4

<b>Радиальные биения дорожки качения внешнего кольца подшипника</b>	<i>Разность между максимальной и минимальной толщиной внешнего кольца подшипника.</i>
<b>Радиальные биения дорожки качения внутреннего кольца подшипника</b>	<i>Разность между максимальной и минимальной толщиной внутреннего кольца подшипника.</i>

## Условия работы

Для описания условий, в которых должен работать подшипник в **APM Bear**, используются следующие параметры.

Таблица 3.5

<b>Радиальная сила</b>	<i>Составляющая суммарной нагрузки, которая направлена вдоль радиуса к центру вращения. Единицы измерения – ньютоны (Н).</i>
<b>Осевая сила</b>	<i>Составляющая суммарной нагрузки, которая параллельна оси вращения. Единицы измерения – ньютоны (Н).</i>
<b>Радиальная сила на нагруженной опоре</b>	<i>Радиальная сила, действующая на нагруженный подшипник. Этот параметр используется только для радиально-упорных подшипников. Единицы измерения – ньютоны (Н).</i>
<b>Радиальная сила на ненагруженной опоре</b>	<i>Радиальная сила, действующая на ненагруженный подшипник. Этот параметр используется только для радиально-упорных подшипников. Единицы измерения – ньютоны (Н).</i>
<b>Осевая сила преднатяга</b>	<i>Осевая сила, обеспечивающая преднатяг; прикладывается путем относительного осевого смещения внутреннего и внешнего колец подшипника. Единицы измерения – ньютоны (Н).</i>



<b>Коэффициент динамичности нагрузки</b>	<i>Коэффициент, учитывающий степень ударности нагрузки, приложенной к подшипнику; зависит от характера внешнего воздействия. Безразмерный параметр.</i>
<b>Радиальное смещение преднатяга</b>	<i>Радиальное смещение колец подшипника, которое достигается в процессе сборки подшипникового узла. Единица измерения – миллиметры.</i>
<b>Скорость вращения</b>	<i>Количество полных оборотов подшипника за единицу времени. Единица измерения – об/мин.</i>

### Нагруженные и ненагруженные подшипники

В **APM Bear** радиально-упорные подшипники рассматриваются установленными в паре.

*Подшипник, нагрузка которого увеличивается под действием внешней осевой силы, называется **нагруженным**.*

*Подшипник, нагрузка которого уменьшается под действием внешней осевой силы называется **ненагруженным**.*

### Интерфейс APM Bear

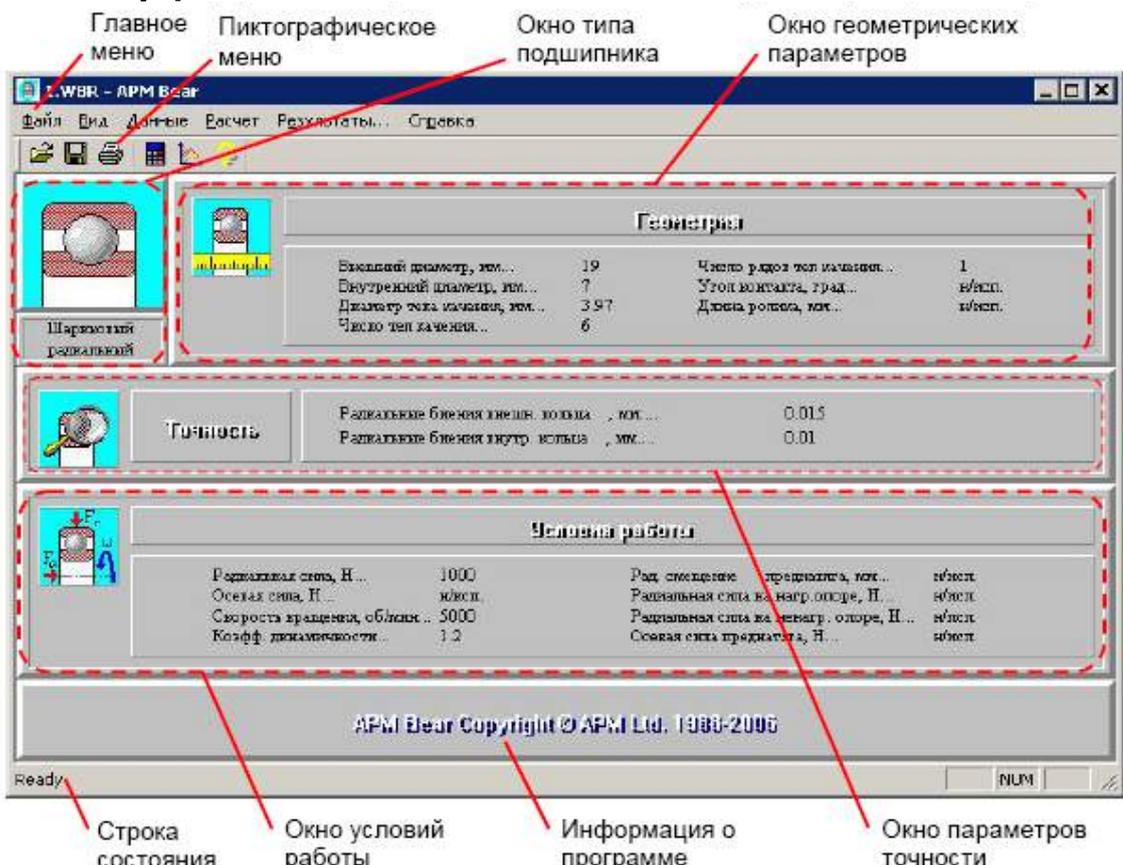


Рисунок 3.8 Общий вид системы **APM Bear**

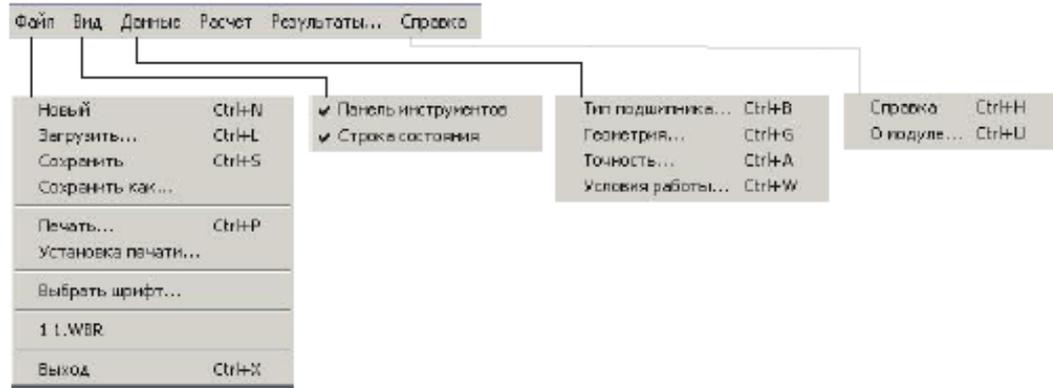


Рисунок 3.9 Структура главного меню **APM Bear**

Таблица 3.6 Справочник команд **APM Bear**

Команда	Описание команды
Файл   Новый (Ctrl+ N)	Создание нового расчета подшипника
Файл   Загрузить... (Ctrl+L)	Открытие файла <i>APM Bear</i> (*.wbr).
Файл   Сохранить (Ctrl+S)	Сохранение исходных данных и результатов расчета в файл <i>APM Bear</i> (*.wbr).
Файл   Сохранить как...	Сохранение исходных данных и результатов расчета с запросом имени в файл (*.wbr).
Файл   Печать...(Ctrl+P)	Вызов диалогового окна выбора исходных данных и результатов расчета для вывода на принтер или печати в текстовый файл отчета (*.rtf).
Файл   Установки печати...	Вызов стандартного диалогового окна настройки печати.
Файл   Выбрать шрифт	Вызов стандартного диалогового окна выбора параметров шрифта информационных окон.
Файл   Последние файлы	Открытие последнего сохраненного файла. Имя команды соответствует имени файла.
Файл   Выход (Ctrl+X)	Выход из системы <i>APM Bear</i> .
Вид   <input checked="" type="checkbox"/> Панель инструментов	Вкл./выкл. панели инструментов с кнопками ускоренного выбора команд
Вид   <input checked="" type="checkbox"/> Строка состояния	Вкл./выкл. строки состояния для отображения текущей информации
Данные   Тип подшипника (Ctrl+B)	Вызов диалогового окна выбора типа подшипника.
Данные   Геометрия... (Ctrl+G)	Вызов диалогового окна ввода геометрических параметров.
Данные   Точность... (Ctrl+G)	Вызов диалогового окна ввода параметров точности.
Данные   Условия работы... (Ctrl+G)	Вызов диалогового окна ввода условий работы.
Расчет (Alt+H)	Запуск расчета подшипника.
Результаты... (Alt+T)	Вызов окна просмотра результатов.
Справка   Содержание (Ctrl+H)	Вызов содержания справки по <i>APM Bear</i>
Справка   О модуле... (Ctrl+U)	Вывод окна с информацией об установленной версии <i>APM Bear</i> , разработчике и обладателе лицензии на программу.

## ЦЕЛЬРАБОТЫ

Научиться рассчитывать подшипники качения в системе **APM Bear**.



## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Упражнение 3.1 Расчет подшипника

Чтобы рассчитать подшипник с помощью **APM Bear** вам необходимо выполнить следующие действия:

- запустить **APM Bear**
- выбрать тип подшипника
- ввести исходные данные
- произвести расчеты
- просмотреть результаты

**Задание 1.** Запустите систему **APM Bear**

**Задание 2.** Выберите тип подшипника

Первое, что вам необходимо сделать, это указать тип подшипника который вы хотите рассчитать. Выберите команду **Данные - Тип подшипника**. На экране появится диалоговое окно со списком типов подшипников (см. рисунок 3.10). Выберите нужный вам тип и нажмите клавишу **Ok** для подтверждения.

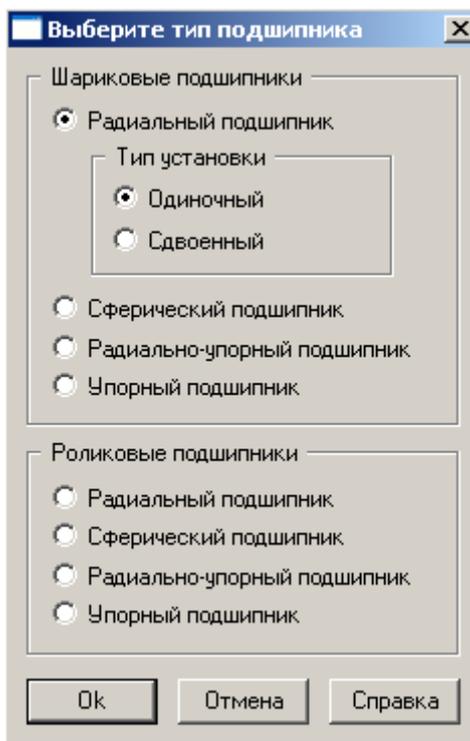


Рисунок 3.10 Диалоговое окно выбора типа подшипника



### Задание 3. Введите исходные данные

Следующим шагом является ввод исходных данных. Все данные в **APM Bear** разделены на три группы, характеризующие:

- геометрию подшипника;
- погрешности изготовления (точность);
- условия работы.

Для того, чтобы начать ввод данных выберите команду **Данные** в главном меню. Эта команда вызывает всплывающее меню, включающее в себя три команды - **Геометрия**, **Точность** и **Условия Работы** (рисунок 3.11).

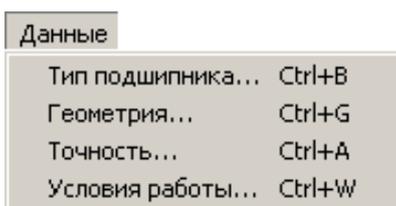


Рисунок 3.11

Когда вы выбираете одну из этих команд, на экране появляется диалоговое окно для ввода данных, относящихся к соответствующей группе. Эти диалоговые окна показаны на рисунках 3.12, 3.13 и 3.14. Пользователь должен ввести все исходные данные, которые указаны в этих диалоговых окнах.

Из базы данных выберите Подшипник 100ГО (Легкая серия 2).

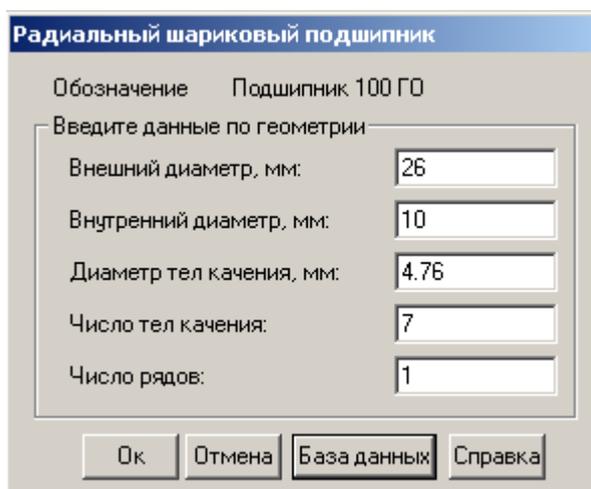


Рисунок 3.12

Выберите значения точности изготовления из баз данных (БД), как это показано на рисунке 3.13.

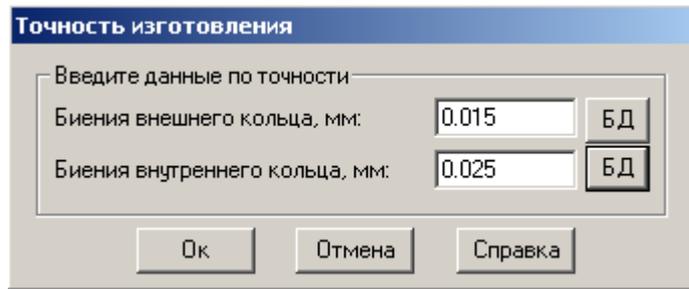


Рисунок 3.13

Укажите условия работы по примеру (рисунок 3.14).

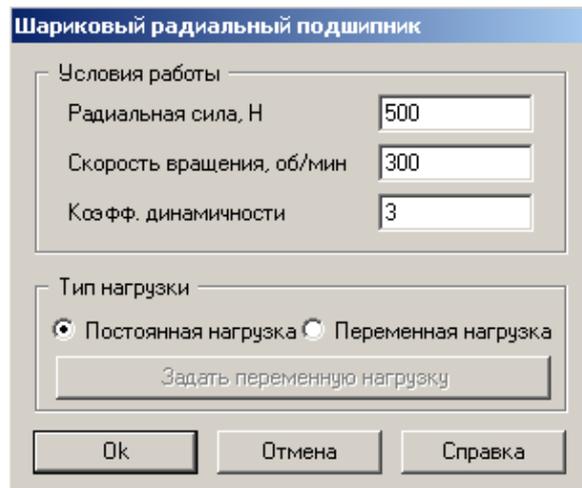


Рисунок 3.14

#### **Задание 4.** Выполните расчеты

После завершения ввода исходных данных выберите команду **Расчет** в главном меню. На экране будет отображено окно **Вычисления** (рисунок 3.15). В этом окне показывается текущий процент выполнения расчетов, что позволяет пользователю оценить время, необходимое для завершения вычислений.

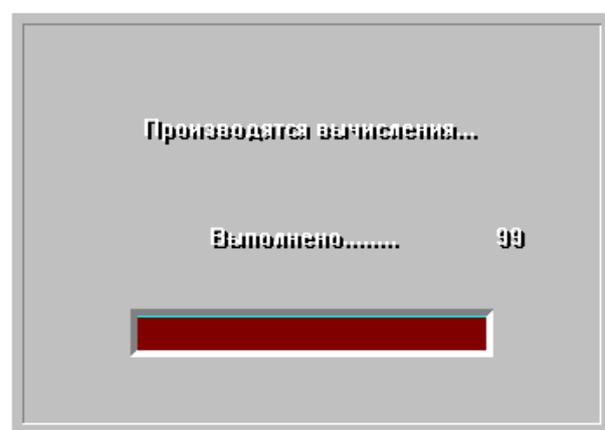


Рисунок 3.15 Окно Вычисления



### Задание 5. Просмотрите результаты расчетов

Выберите команду **Результаты** в главном меню. На экране будет отображено диалоговое окно **Результаты** (см. рисунок 3.16). Оно содержит кнопки для показа всех параметров, рассчитываемых в программе. Выберите кнопку, соответствующую тому параметру, который вы хотите просмотреть. Если вы хотите просмотреть все результаты выберите кнопку **Показать все**, которая инициирует последовательную демонстрацию всех результатов.

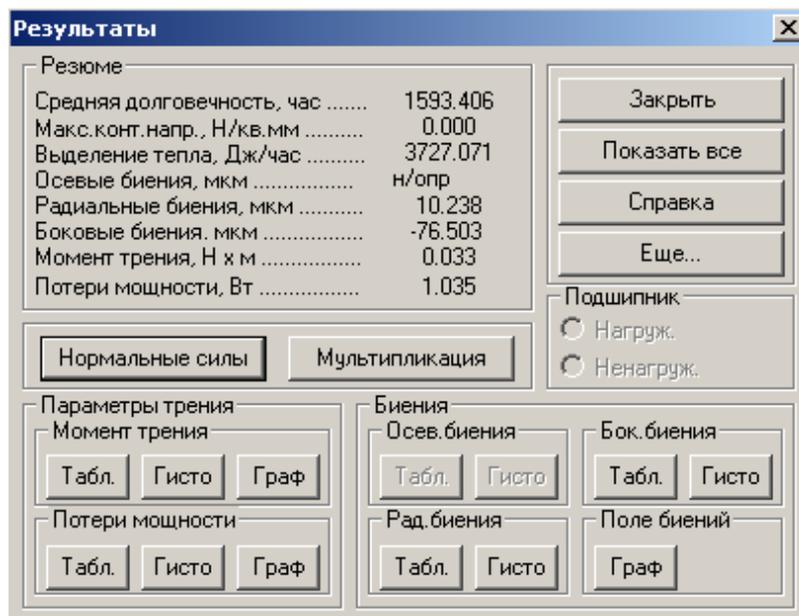


Рисунок 3.16 Окно Результаты

### Упражнение 3.2 Расчет подшипников качения

**Задание.** Подберите подшипники для вала редуктора (рисунок 3.17) при следующих исходных данных. Диаметр в месте посадки подшипников  $d = 60$  мм,  $n = 200$  мин<sup>-1</sup>, ресурс  $L_h = 20\ 000$  ч, режим нагрузки II по рисунку 3.17, допускаемые двухкратные кратковременные перегрузки, температура подшипника  $t < 100^\circ\text{C}$ , реакции опор по рисунку 3.19  $F_{R1} = 10417$  Н,  $F_{R2} = 16381$  Н,  $F_a = 906$  Н и направлена в сторону левой опоры.

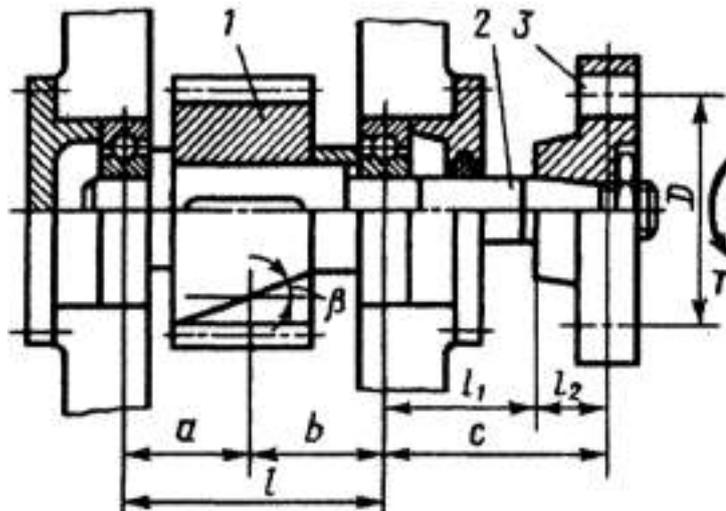
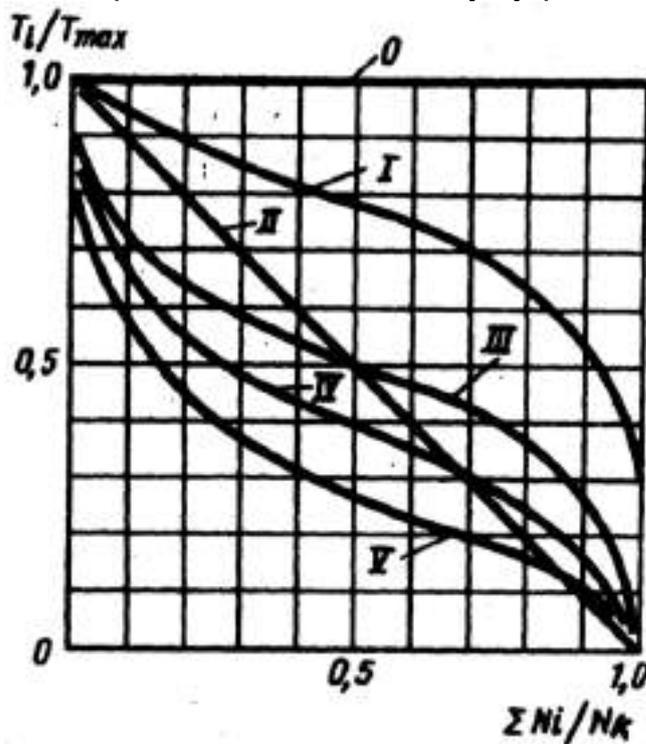


Рисунок 3.17 Вал с элементами, расположенными на нем: 1 – шестерня; 2 – вал; 3 – полушар



**Режимы нагружения:**

- 0 – постоянный;
- I – тяжелый;
- II – средний равновероятный;
- III – средний нормальный;
- IV – легкий;
- V – особо легкий

$T_i$  – текущий момент нагрузки;  
 $T_{max}$  – максимальный из моментов, которые учитывают при расчете на усталость;  
 $\sum N_i$  - число циклов нагружений при работе с моментами, равными и большими  $T_i$ ;  
 $N_k$  – суммарное число циклов нагружений за расчетный срок службы передачи.

Рисунок 3.18

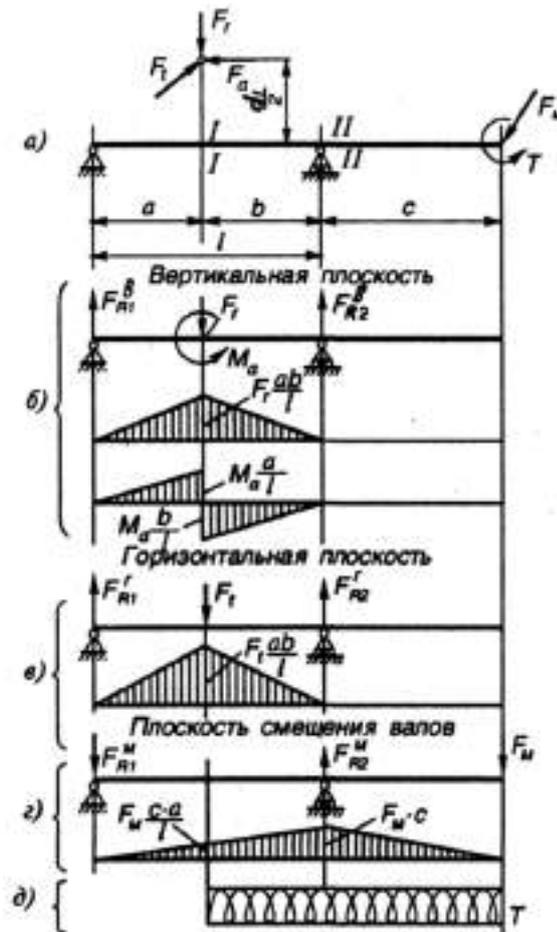


Рисунок 3.19

**Решение:**

**Задание 1.** Учитывая сравнительно небольшую осевую силу  $F_a$ , предварительно назначаем шариковые радиальные подшипники средней узкой серии, условное обозначение 312, для которых по каталогу:

$C = 81900 \text{ Н}$  – базовая динамическая грузоподъемность (**Базовая динамическая грузоподъемность** – это такая постоянная стационарная сила, которую подшипник может теоретически воспринимать в течение 1 млн. оборотов без проявления признаков усталости не менее чем у 90 % из определенного числа подшипников, подвергающихся испытаниям);

$C_o = 48000 \text{ Н}$  – статическая грузоподъемность (**Под статической грузоподъемностью** понимают такую статическую силу, которой соответствует общая остаточная деформация тел качения и колец в наиболее нагруженной точке контакта, равная 0,0001 диаметра тела качения);

$N_{пр} = 6000 \text{ мин}^{-1}$  – предельная частота вращения.



Таблица 3.7

Размеры, мм (см. рис. 3.20)				Динамическая грузоподъемность С, Н	Статическая грузоподъемность С <sub>0</sub> , Н	Пределная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	
d	D	B	r			Смазка	
						пластичная	жидкая
12	37	12	1,5	9 750	4 650	19 000	24 000
60	130	31	3,5	81 900	48 000	5 000	6 000
100	215	47	4	174 000	132 000	3 000	3 600

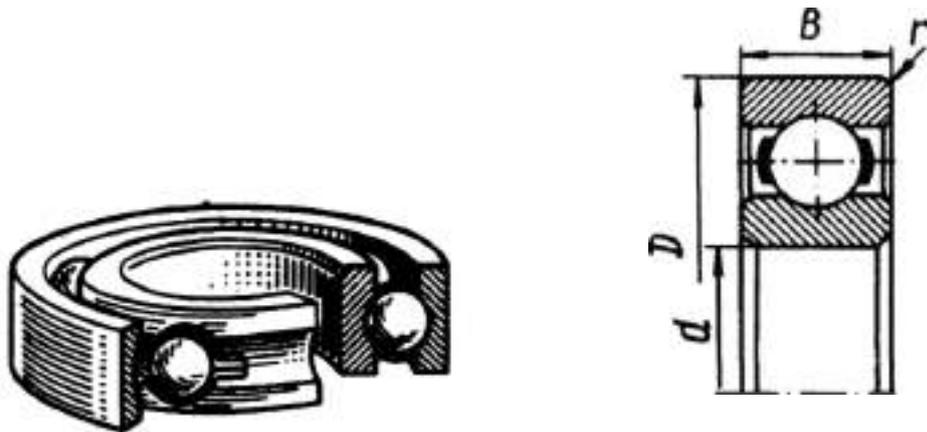


Рисунок 3.20

**Задание 2.** Определяем эквивалентную динамическую нагрузку на подшипник с учетом переменного режима нагружения

$$\left. \begin{aligned} P_r &= (XV F_r + Y F_a) K_B K_T \\ P_a &= (X F_r + Y F_a) K_B K_T \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где  $F_r$ ,  $F_a$  – радиальная и осевая силы;

$X$ ,  $Y$  – коэффициенты радиальной и осевой сил (указываются в каталоге, см. выдержки в таблице 3.8);

$V$  – коэффициент вращения, зависящий от того, какое кольцо подшипника вращается относительно внешней нагрузки (при вращении внутреннего кольца  $V = 1$ , наружного  $V = 1,2$ );

$K_B$  – коэффициент безопасности, учитывающий характер нагрузки: спокойная  $K_B = 1$ , умеренные толчки  $K_B = 1,3 \dots 1,5$ , с сильными толчками (ударами)  $K_B = 2,5 \dots 3$ ;

$K_T$  – температурный коэффициент (для стали ШХ15 при  $t$  до  $100^\circ\text{C}$   $K_T = 1$ , при  $t = 125 \dots 250^\circ\text{C}$   $K_T = 1,05 \dots 1,4$  соответственно).



Таблица 3.8

Тип подшипника	$\alpha^\circ$	$F_a/C_0$	$F_a/(VF_r) \leq \epsilon$		$F_a/(VF_r) > \epsilon$		$\epsilon$
			X	Y	X	Y	
Радиальный шариковый однорядный	0	0,014	1	0	0,56	2,30	0,19
		0,028				1,99	0,22
		0,056				1,71	0,26
		0,084				1,55	0,28
		0,11				1,45	1,30
		0,17				1,31	0,34
		0,28				1,15	0,38
		0,42				1,04	0,42
		0,56				1,00	0,44
		Радиально-упорный шариковый однорядный				12	0,014
0,029	1,62		0,34				
0,057	1,46		0,37				
0,086	1,34		0,41				
0,11	1,22		0,45				
0,17	1,13		0,48				
0,29	1,14		0,52				
0,43	1,01		0,54				
0,57	1,00		0,54				
26	—		1	0	0,41		0,87
36	—	1	0	0,37	0,66	0,95	
Подшипники роликовые конические однорядные	—	—	1	0	0,4	0,4 ctgx   1,5 ctgx (можно по каталогу)	

При переменном режиме нагрузки в формулах (3.1) вместо  $F_r$  и  $F_a$  подставляют их средние величины  $F_{mr}$  и  $F_{ma}$ , каждая из которых определяется по зависимости:

$$F_m = \sqrt[p]{\sum (F_i^p L_i) / \sum L_i}, \quad (3.2)$$

где  $F_i$  – радиальная или осевая сила соответственно, действующая на подшипник при  $i$ -том режиме нагрузки;

$L_i$  – число млн. об. на  $i$ -том режиме.

Для расчетов по формуле (3.2) необходимо знать циклограмму нагружения. Расчет величин  $F_m$  упрощается, если воспользоваться графиком типовых режимов (рисунок 3.18). В этом случае  $F_{mr} = K_E F_r$  и  $F_{ma} = K_E F_a$ , где величины  $F_r$  и  $F_a$  определяют по максимальной из длительно действующих нагрузок, а величину коэффициента эквивалентности  $K_E$  – в зависимости от режима нагрузки:

Режим нагрузки	0	I	II	III	IV	V
$K_E$	1,00	0,80	0,63	0,56	0,50	0,40



$$F_{mr1} = 0,63 \cdot 10417 = 6562,7 \text{ H};$$

$$F_{ma1} = 0,63 \cdot 906 = 570,8 \text{ H};$$

$$F_{mr2} = 0,63 \cdot 16381 = 10320 \text{ H};$$

$$F_{ma1} / C_o = 570,8 / 48000 = 0,012;$$

Отметим, что в случаях получения величин этого отношения, отличающихся от приведенных в таблице 3.7, поиск  $Y$  и  $e$  осуществляют линейной интерполяцией или по формулам. В нашем случае для назначенных подшипников  $e = 0,528(F_a/C_o)^{0,24} = 0,528(570,8/48000)^{0,24} = 0,182$ .

При  $V = 1$  (см. примечания к формуле 3.1)

$$F_{ma1} / (VF_{mr1}) = 570,8/6562,7 = 0,087 < e$$

При этом  $X = 1$ ,  $Y = 0$  (таблица 3.7).

По рекомендациям к формуле (1)  $K_B = 1,3$ ;  $K_T = 1$ .

По формуле (3.1):

$$P_{r1} = (1 \cdot 1 \cdot 6562,7 + 0 \cdot 0,012) 1,3 \cdot 1 = 8531,5;$$

$$P_{r2} = (1 \cdot 1 \cdot 10320 + 0 \cdot 0,012) 1,3 \cdot 1 = 13416 \text{ H}.$$

Так как  $P_{r2} > P_{r1}$ , то подбор подшипников проводим для правой опоры, как более нагруженной.

Определяем динамическую грузоподъемность:

$$C = P^p \sqrt[p]{L/(a_1 a_{23})}$$

где  $P$  – эквивалентная динамическая нагрузка;

$p = 3$  для шариковых и  $p = 10/3 \approx 3,33$  для роликовых подшипников;

$L$  – ресурс, млн. оборотов;

$a_1$  – коэффициент долговечности (см. ниже);

$a_{23}$  – обобщенный коэффициент совместного влияния качества металла, особенностей технологии производства, конструкции и условий эксплуатации (таблица 3.8);

$$L = 60nL_h / 10^6 = 60 \cdot 200 \cdot 20000 / 10^6 = 240 \text{ млн. об.}$$

В каталогах указаны  $C$  с коэффициентом надежности  $P(t) = 0,9$ .



В тех случаях, когда необходимо повысить надежность, величину  $a_1$  уменьшают:

$P(t)$ .....	0,9	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
$a_1$ .....	1	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21

Для подшипников большинства изделий принимают  $P(t) = 0,9$ . Принимаем  $a_1 = 1$ ;  $a_2 = 1$  (таблица 3.9).

Таблица 3.9

Тип подшипника	$a_{23}$ при условиях (см. примечания)		
	1	2	3
Для шарикоподшипников (кроме сферических)	0,7...0,8	1,0	1,2...1,4
Для роликоподшипников цилиндрических, шарикоподшипников сферических двухрядных	0,5...0,6	0,8	1,0...1,2
Для роликоподшипников конических	0,6...0,7	0,9	1,1...1,3
Для роликоподшипников сферических двухрядных	0,3...0,4	0,6	0,8...1,0

Примечания: 1. Обычные условия применения. 2. Условия, характеризующиеся наличием гидродинамической пленки масла между контактирующими поверхностями колец и тел качения ( $\Lambda \geq 2,5$ ) и пониженных перекосов в узле. 3. Когда кольца и тела качения изготовлены из сталей повышенного качества (электрошлаковой или вакуумной) и подшипники работают в условиях наличия гидродинамической пленки масла и пониженных перекосов в узле. 4. Решение задачи гидродинамической теории смазки для подшипников качения сложнее, чем для подшипников скольжения, и здесь не рассматривается.

$$C = 13416\sqrt[3]{240} = 83373 \text{ Н.}$$

Получен результат, когда потребная динамическая грузоподъемность превышает базовую ( $C = 81900 \text{ Н}$  – базовая) на 1,8 %, следовательно, расчетный ресурс подшипника 312 будет меньше заданного и составит:

$$L_h = a_1 \cdot a_{23} \cdot (C/P)^p \cdot 10^6 / 60 \cdot n = 1 \cdot 1 \cdot (81900/13416)^3 \cdot 10^6 / (60 \cdot 200) = 18958 \text{ ч}$$

(отклонение от заданного ресурса  $L_h = 20000 \text{ ч}$  – 5,2 %)

Отметим, что величина расчетного ресурса (при  $a_1 = 1$ ) минимальной или гарантированной для 90 % подшипников определенной партии. Фактически же ресурс подшипников существенно больше расчетного. С учетом двукратной перегрузки проверим подшипник 312 по статической грузоподъемности.

Эквивалентная статическая нагрузка

$$P_o = X_o F_r + Y_o F_a, \text{ но не меньше чем } P_o = F_r,$$



где  $X_o$  и  $Y_o$  – коэффициенты радиальной и осевой статических сил; для однорядных и двухрядных радиальных шарикоподшипников  $X_o = 0,6$  и  $Y_o = 0,5$ .

Для левой опоры:

$$P_o = 2(0,6 \cdot 10417 + 0,5 \cdot 906) = 13406 \text{ Н} < C_o,$$

где 2 – двукратная перегрузка.

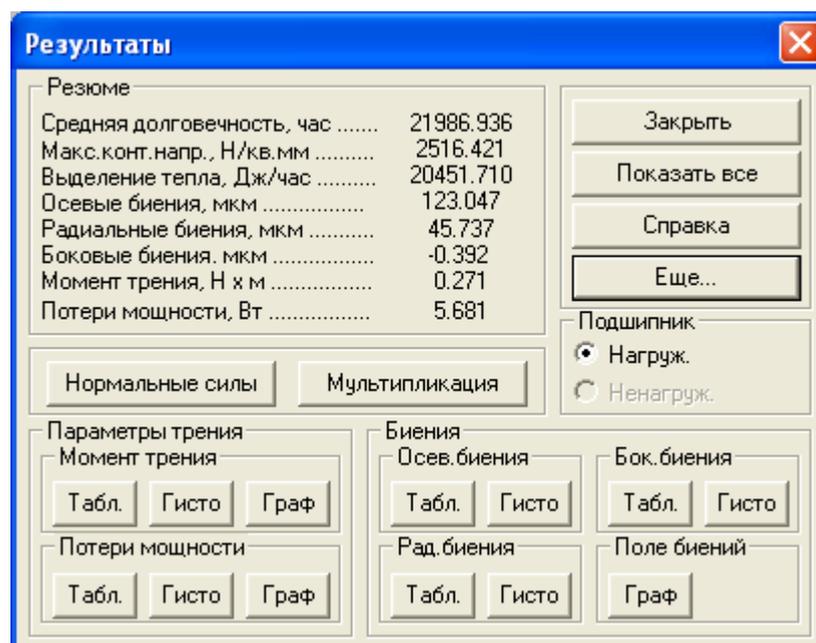
Для правой опоры:

$$P_o = 2 \cdot 16381 = 32762 \text{ Н} < C_o,$$

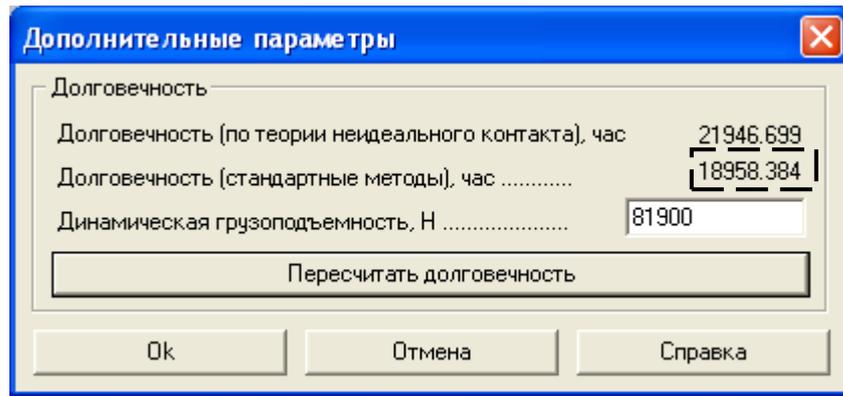
Условие  $P_o \leq C_o$  выполняется.

**Учитывая изложенное выше, а также то обстоятельство, что опорные реакции определялись как максимально возможные (наихудший случай) следует признать подшипник 312 удовлетворяющим исходным данным примера.**

Результаты расчета этого примера в модуле **APM Bear** показан на рисунке 3.21.



**а**



**б**

Рисунок 3.21 Результаты расчета: а – общие результаты; б – дополнительные параметры



## 4 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПРИВОДА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В МОДУЛЕ APM DRIVE

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

*Модуль **APM Drive** представляет собой инструмент для комплексного расчета и проектирования привода вращательного движения произвольной структуры. С помощью **APM Drive** можно получить геометрические размеры зубчатых и червячных колес, а также подходящие размеры подшипников качения и валов. Процедура вычислений выполняется автоматически. При этом корректировка конструкции в зависимости от полученных промежуточных результатов осуществляется в интерактивном режиме.*

Необходимая информация для проведения расчета и проектирования всего многообразия приводов вращательного движения следует задать, используя встроенный редактор задания произвольных кинематических схем. Он организован таким образом, что формирование кинематических схем обеспечивается за счет использования примитивов, из которых собирается кинематическая цепь произвольной структуры. Этот редактор предназначен также для ввода исходных данных, необходимых для выполнения проектировочного расчета как привода в целом, так отдельных его элементов.

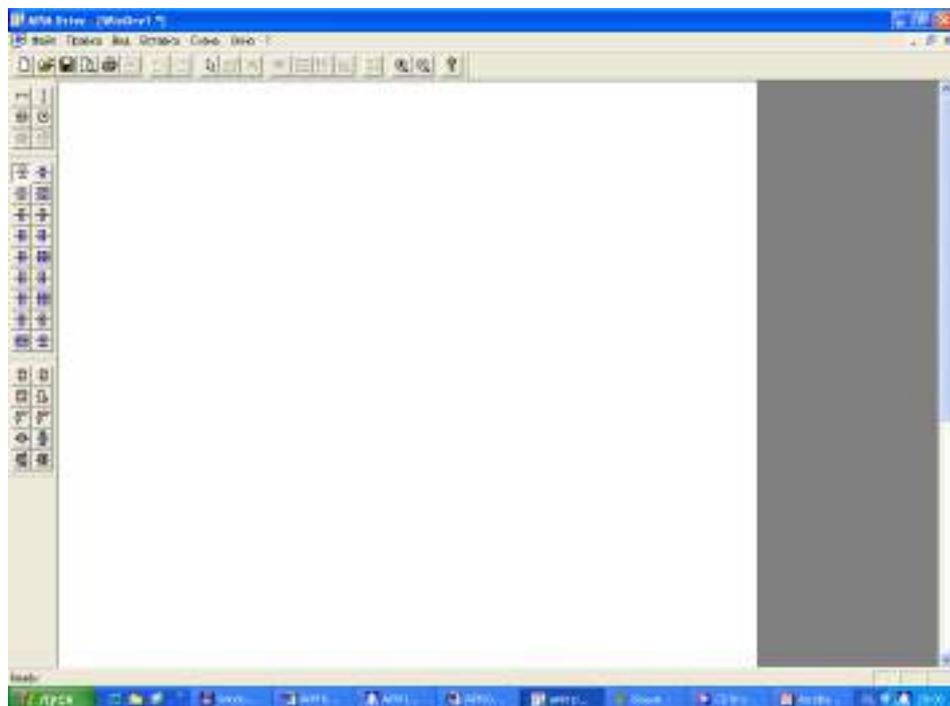


Рисунок 4.1 Общий вид окна **APM Drive**



Эти примитивы редактора можно условно разделить на три группы:

- *подшипников качения;*
- *передач вращательного движения;*
- *вспомогательных элементов кинематических схем.*

Все кнопки вызова соответствующих примитивов имеют всплывающие подсказки в нижней части окна.

В группу **подшипников качения** включены следующие типы шариковых и роликовых подшипников:

Радиальный шариковый

Радиальный самоустанавливающийся

Радиально-упорный шариковый (левый)

Упорный шариковый (левый)

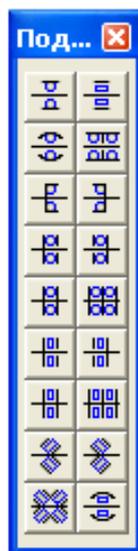
Упорный шариковый (одинарный)

Роликовый упорный (левый)

Роликовый упорный

Радиально-упорный роликовый (левый)

Радиально-упорный роликовый (двусторонний)



Радиальный роликовый

Радиально-упорный шариковый (двух-й)

Радиально-упорный шариковый (правый)

Упорный шариковый (правый)

Упорный шариковый (двойной)

Роликовый упорный (правый)

Роликовый упорный (двойной)

Радиально-упорный роликовый (правый)

Роликовый сферический

В группу **передач** отнесены передачи вращения следующих типов:

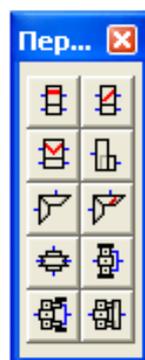
Прямозубая внешнего зацепления

Шевронная

Коническая

Червячная

Планетарная 2



Косозубая внешнего зацепления

Прямозубая внутреннего зацепления

Коническая с круговым зубом

Планетарная 1

Планетарная 3



Группа **вспомогательных элементов** кинематических схем включает следующие элементы:

Горизонтальный вал

Входной вал

Сделать валы соосными



Вертикальный вал

Выходной вал

Break coaxial link

Кроме панелей инструментов примитивов, используемых для задания кинематических схем привода, в редакторе используется также стандартная инструментальная панель (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2

*Кнопки этой панели (слева направо) предназначены для:*



- создания новой расчетной схемы;
- открытия сохраненного документа;
- сохранения созданного файла расчета;
- предварительного просмотра кинематической схемы привода перед печатью;
- печать кинематической схемы привода, а также исходных данных расчета и промежуточных результатов разбиения по ступеням.

*Далее следуют:*



- кнопки отмены и повторения последней операции;
- выделения элемента кинематической схемы для его редактирования и просмотра результатов расчета;
- просмотра параметров (исходных данных для зубчатой передачи, конфигурации вала или типа и параметров подобранного подшипников качения) выбранного элемента схемы, которые используются при расчете;
- удаление предварительно помеченного элемента кинематической схемы.

*Кроме того используются:*



- кнопка выбора типа используемого стандарта из базы данных;
- кнопка вызова окна задания исходных данных расчета;
- кнопка «запуска на расчет»;



- кнопка вывода окна просмотра результатов расчета выбранного элемента кинематической схемы;
- кнопка вывода окна задания и редактирования параметров разбиения параметров кинематической схемы;
- кнопка увеличения и уменьшения показа рабочего поля;
- кнопка вызова помощи и сведений о программе.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научиться проектировать и рассчитывать привод произвольной структуры в модуле **APM Drive**.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В качестве инструментов для расчета и проектирования привода используются такие модули Системы **APM WinMachine** как: **APM Trans**, **APM Shaft**, **APM Bear**, **APM Data**, **APM Graph**. При этом, в полном объеме, можно использовать возможности перечисленных выше модулей. Модуль **APM Drive** представляет собой объединяющий модуль, который готовит исходные данные для функционирования и последовательного запуска каждого из перечисленных выше модулей. По этой причине работа модуля **APM Drive** оказывается невозможной, если при установке Системы **APM WinMachine** не оказывается хотя бы одного из перечисленных модулей.

### Упражнение 4.1 Расчет зубчатой цилиндрической косозубой передачи внешнего зацепления одноступенчатого редуктора

#### Заданные параметры:

Передача: *Косозубая*

Зацепления: *Внешнего*

Тип расчета: *Проектировочный*

Основные данные

Режим работы	<i>Тяжелый</i>
Термообработка:	
- шестерня	<i>Закалка</i>
- колесо	<i>Закалка</i>
Крепление шестерни на валу	<i>Симметричное</i>
Нереверсивная передача	
Момент на выходе, Н·м	<i>1200</i>
Частота вращения на выходе, об./мин.	<i>120</i>
Передаточное число	<i>3</i>



Требуемый ресурс, час	15000
Число зацеплений:	
- шестерня	1
- колесо	1
Твердость поверхности зубьев HRC:	
- шестерня	45
- колесо	45
Стандартное межосевое расстояние	

**Задание 1.** Создайте два горизонтальных вала (рисунок 4.3)

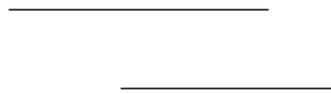


Рисунок 4.3

**Задание 2.** Расположите косозубую передачу внешнего зацепления  (рисунок 4.4)

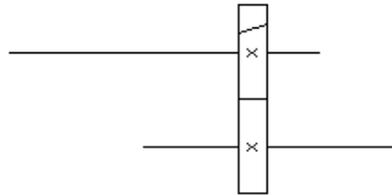


Рисунок 4.4

**Задание 3.** Укажите в качестве опор – радиальные шариковые подшипники  (рисунок 4.5)

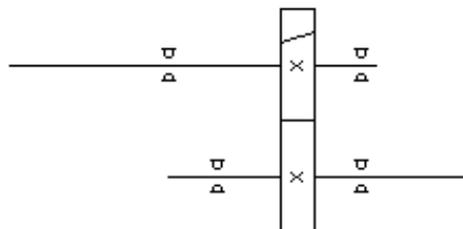


Рисунок 4.5

**Задание 4.** Условно укажите входной  и выходной  валы (рисунок 4.6)

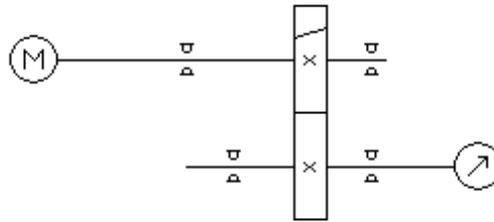


Рисунок 4.6

**Задание 5.** Задайте исходные данные по образцу и выполните расчет

**Задание 5.1** Задайте начальные данные  (рисунок 4.7)

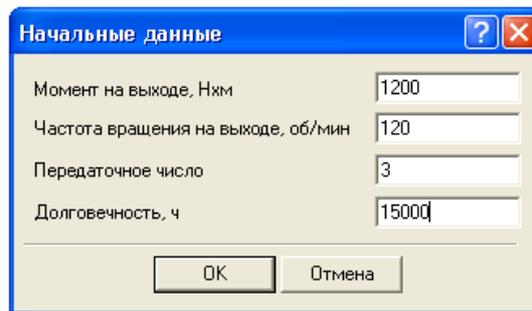


Рисунок 4.7

**Задание 5.2** Выделите зубчатую передачу  и задайте ее параметры щелчком правой кнопки мыши и, выбрав **Параметры** (рисунок 4.8 – 4.10)

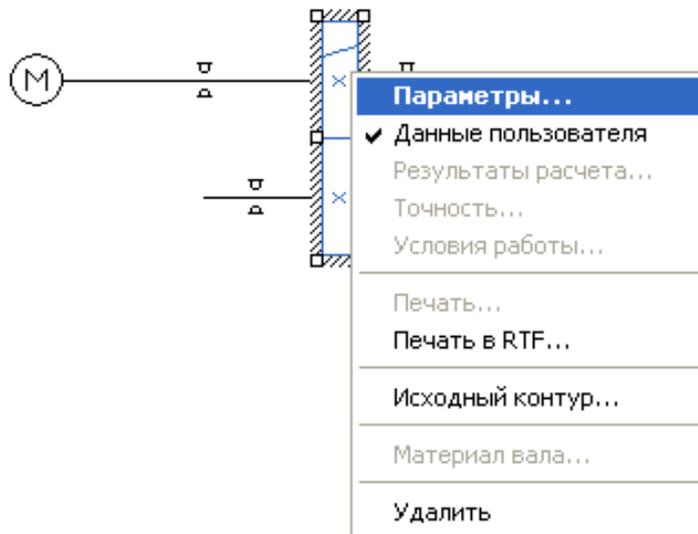


Рисунок 4.8



**Основные данные**

Момент на выходе [Нм] 1200.0

Обороты на выходе [об/мин] 120.0

Передаточное число [-] 8.0

Требуемый ресурс [час] 15000.0

Число зацеплений

Шестерня 1 [-] Колесо 1 [-]

Термообработка

Шестерня Закалка Колесо Закалка

Режим работы Тяжелый Крепление шестерни на валу Симметрично

Продолжить Прервать Справка Еще...

Рисунок 4.9

**Дополнительные данные**

Межосевое расстояние [мм] 0.0

Коэффициент ширины колеса [-] 0.0

Модуль [мм] 0.0

Угол наклона зубьев [град] 0.0

Коэффициент смещения

Шестерня 0.0 Колесо 0.0

Задать материал шестерни Выбрать...

Задать материал колеса Выбрать...

Твердость поверхности зубьев HRC

Шестерня 45.0 Колесо 45.0

Твердость сердцевины зубьев HRC

Шестерня 0.0 Колесо 0.0

Число зубьев

Шестерня 0 Колесо 0

Возможен реверс

Стандартное межосевое расстояние

Продолжить Прервать Справка

Рисунок 4.10

**Задание 5.3** Выполните расчет схемы

В процессе расчета возможен случай, когда рассчитанный и сгенерированный модулем **APM Shaft** диаметр вала в месте посадки под подшипник, выражается таким нестандартным числом, под который в базе данных не находится подходящего подшипника (рисунок 4.11). В этом случае при просмотре параметров расчета соответствующих подшипников в окне «Параметры» модуль **APM Drive** проставляет нули и не указывает выбранный номер подшипника. Естественно и в окне результатов расчета таких подшипников также будут проставлены нули. В этом случае следует изменить диаметр соответствующих сегментов вала до больших стандартных значений, для которых существуют подшипники и снова запустить модуль **APM Drive** на расчет.

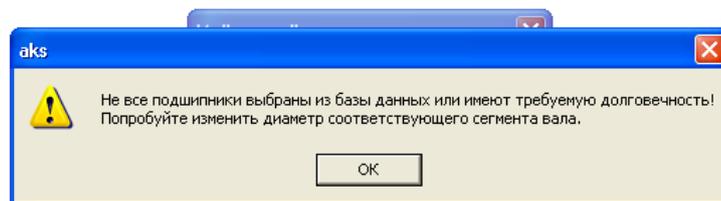
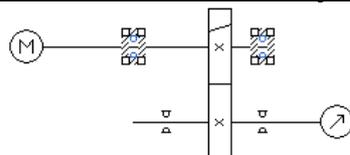


Рисунок 4.11



**Задание 6.** Измените диаметры 2 и 4 сегментов первого вала до 40 мм, а третьего до 45 мм и выполните расчет заново

**Задание 6.1** Для просмотра параметров первого вала (рисунок 4.12) щелкните по нему правой кнопкой мыши и, выберите **Параметры**

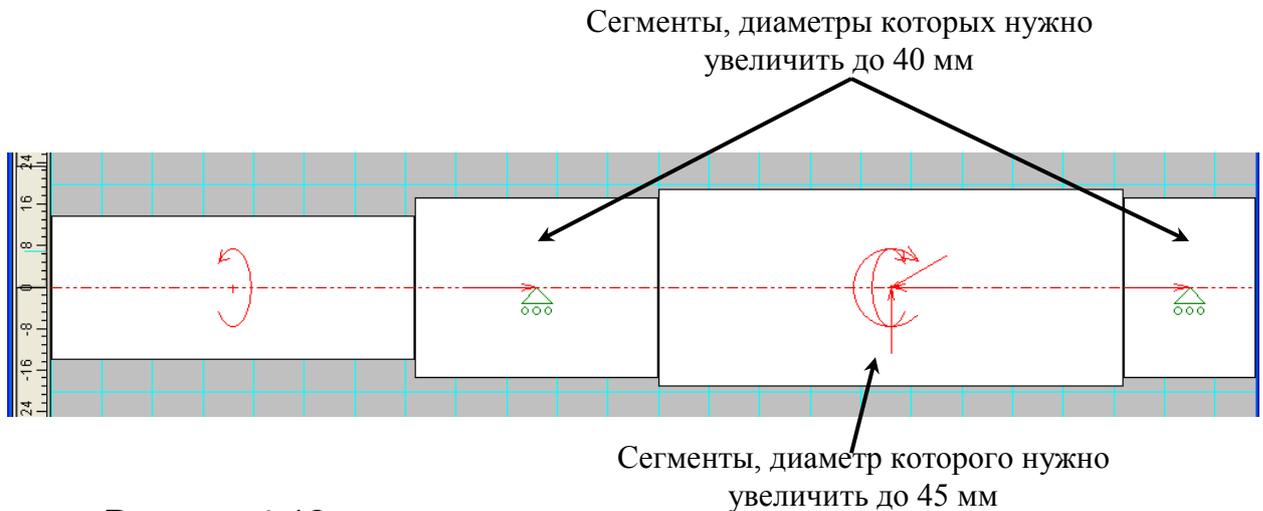


Рисунок 4.12

**Задание 6.2** Для просмотра параметров второго вала (рисунок 4.13) щелкните по нему правой кнопкой мыши и, выберите **Параметры**

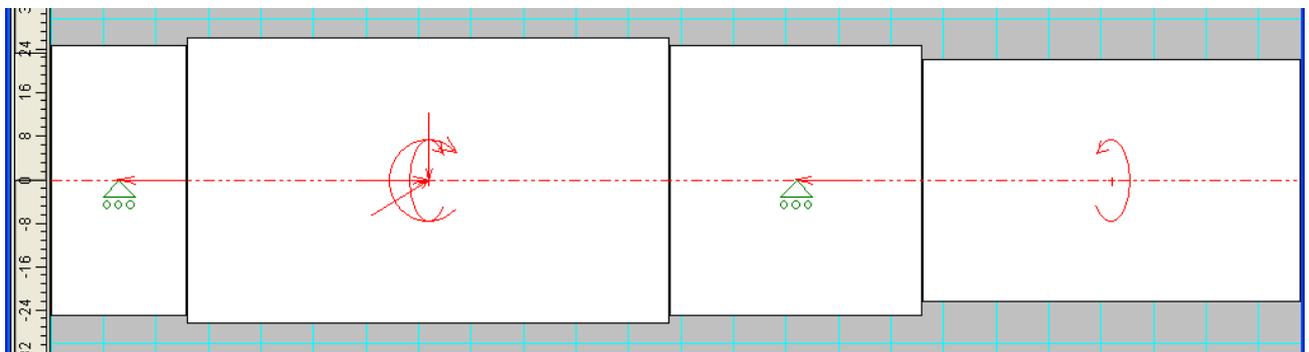


Рисунок 4.13

**Задание 7.** Просмотрите некоторые результаты расчета косозубой передачи, щелкнув правой кнопкой мыши по ней и выбрав **Результаты расчета...** (рисунок 4.14-4.17)

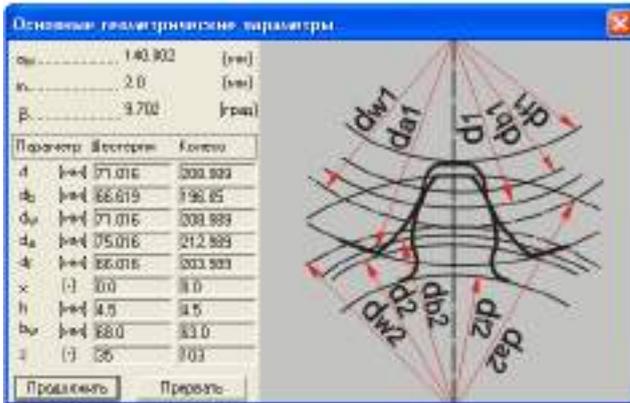


Рисунок 4.14

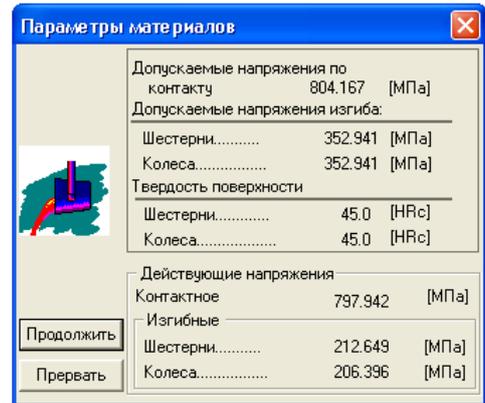


Рисунок 4.15

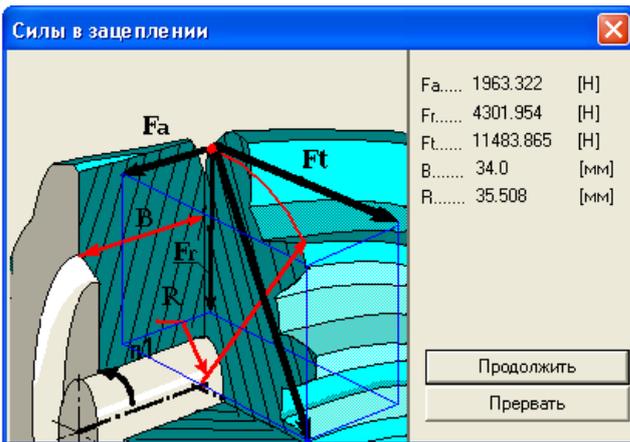


Рисунок 4.16

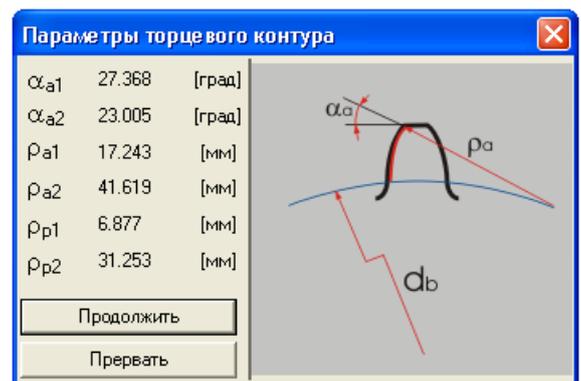


Рисунок 4.17

## Упражнение 4.2 Расчет редуктора

**Задание 1.** Создайте три вертикальных вала  (рисунок 4.18)

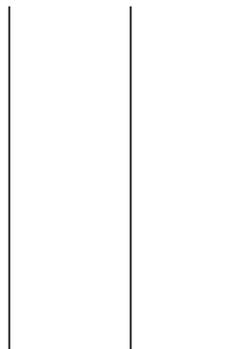


Рисунок 4.18

**Задание 2.** Создайте горизонтальный вал  (рисунок 4.19)

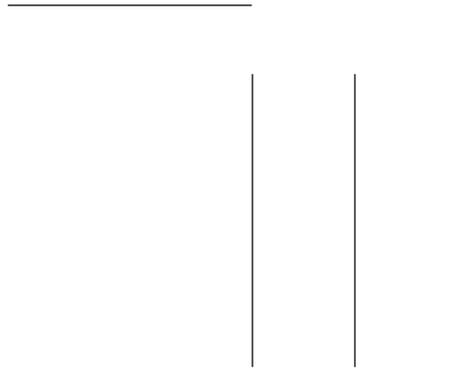


Рисунок 4.19

**Задание 3.** Вставь коническую передачу с круговым зубом   
(рисунок 4.20)

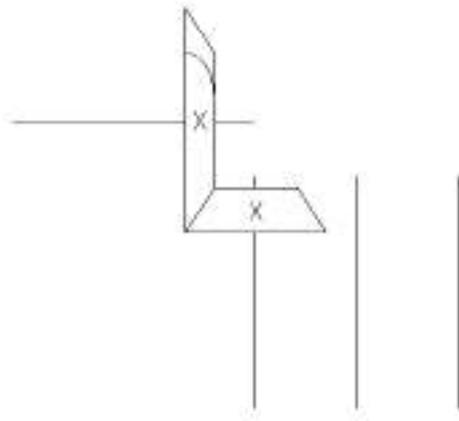


Рисунок 4.20

**Задание 4.** Расположите две косозубые передачи внешнего зацепления   
(рисунок 4.21)

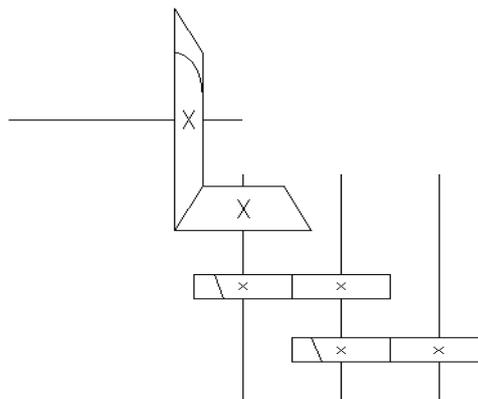


Рисунок 4.21



**Задание 5.** Укажите в качестве опор – радиальные шариковые подшипники  (рисунок 4.22)

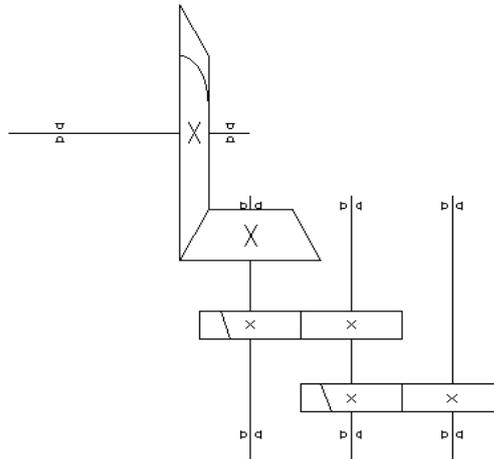


Рисунок 4.22

**Задание 6.** Условно укажите входной  и выходной  валы (рисунок 4.23)

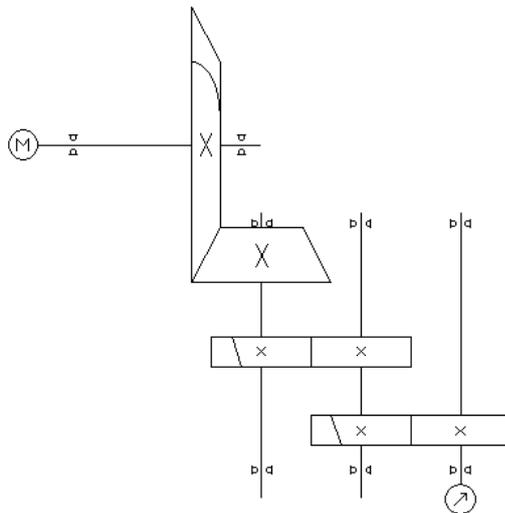


Рисунок 4.23

**Задание 7.** Задайте исходные данные по образцу и выполните расчет

Для задания исходных данных для расчета параметров цепи необходимо вызвать процедуру «Исходные данные». Вызов производится нажатием соответствующей кнопки  (рисунок 4.24).

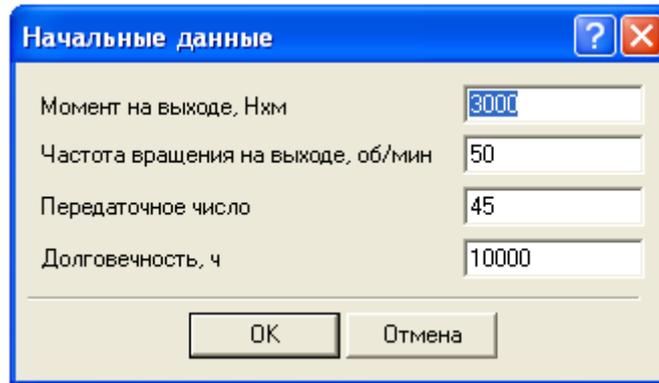


Рисунок 4.24

В этом режиме вводятся

- Момент на выходе цепи;
- Частота вращения выходного вала;
- Передаточное отношение кинематической цепи;
- Требуемое время работы проектируемого привода.

После введения исходных данных для расчета можно проконтролировать или отредактировать параметры разбиения общих исходных данных по ступеням. Для этого при нажатии кнопки просмотра результатов разбиения , появляется окно (рисунок 4.25), в котором программа разбила общее передаточное отношение привода по ступеням, а также определила число оборотов и крутящие моменты на каждой из ступеней.

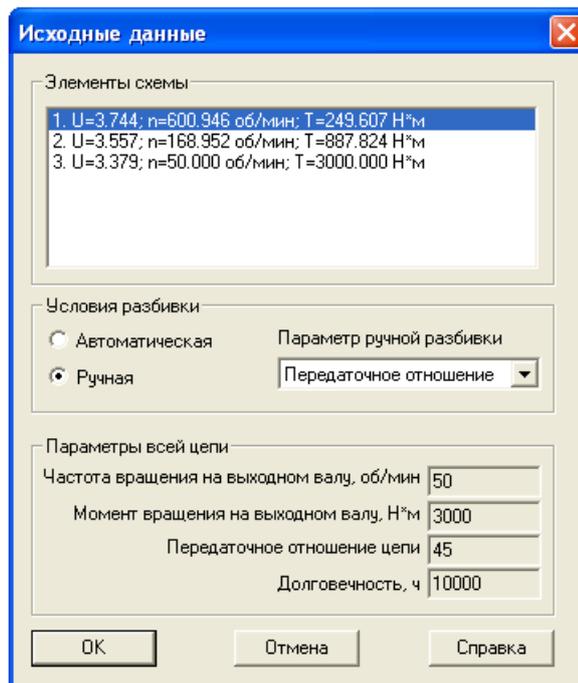


Рисунок 4.25



Для ручного разбиения этих параметров, следует перейти в ручной режим разбивки, далее выбрать один из параметров, который вы хотите задать вручную, и сделать двойной щелчок левой кнопкой мыши по нему.

Появляется окно редактирования этого параметра на выбранной ступени (рисунок 4.26).

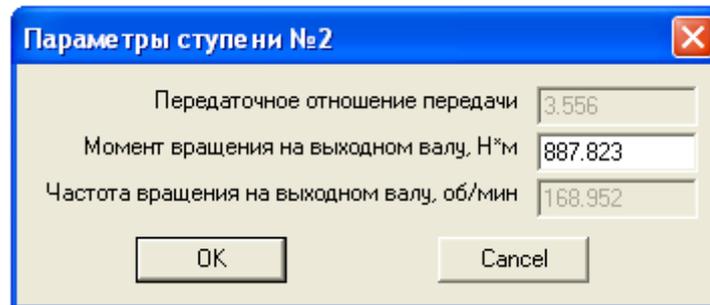


Рисунок 4.26

**Задание 8.** Выполните расчет  (рисунок 4.27)

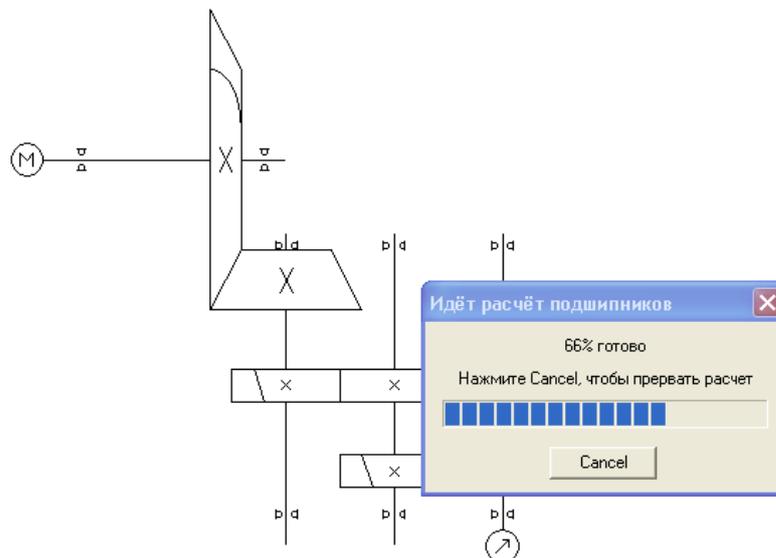


Рисунок 4.27

**Задание 9.** Просмотрите результаты расчета

После окончания расчетов для просмотра результатов расчета, следует выделить какой-либо интересующий элемент схемы (**Выделить элемент схемы** ) , и затем нажатием кнопки **Показать результаты расчета**  можно просмотреть или исходные данные для расчета соответствующей зубчатой или червячной передачи, или рас-



четную модель вала, или тип и геометрические параметры выбранного подшипника из базы данных.

Эту же процедуру можно произвести, если щелкнуть правой кнопкой мыши на выделенном элементе привода. В этом случае появляется динамическое меню, в котором нажатием левой кнопки мыши можно выбрать соответствующий пункт – **Результаты расчета** (рисунок 4.28).

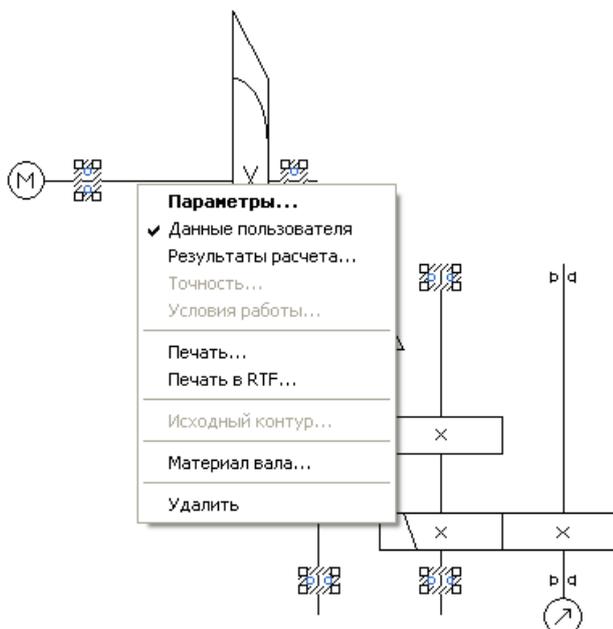


Рисунок 4.28

Для просмотра результатов расчета модуль **APM Drive** вызывает соответствующие модули расчета передач (**APM Trans**), валов (**APM Shaft**) или подшипников качения (**APM Bear**) и выводит полученные результаты расчета по выбранному элементу привода в формате соответствующего модуля.

В результате расчетов модуль производит расчет зубчатых передач, подбирает и создает конструкцию вала и подбирает подходящие подшипники из базы данных. Полученные данные расчета могут считаться предварительными, и на любом этапе любой элемент привода может быть скорректирован, и заново проведен расчет. При этом, все внесенные изменения в отдельные элементы привода будут учтены в последующем расчете. Изменения в каком-либо элементе конструкции производятся в соответствии с правилами редактирования, принятыми в соответствующем модуле, и описаны с соответствующих разделах инструкции по эксплуатации этих модулей.

**Задание 10.** Просмотрите параметры полученных валов (рисунки 4.29-4.32)



Рисунок 4.29

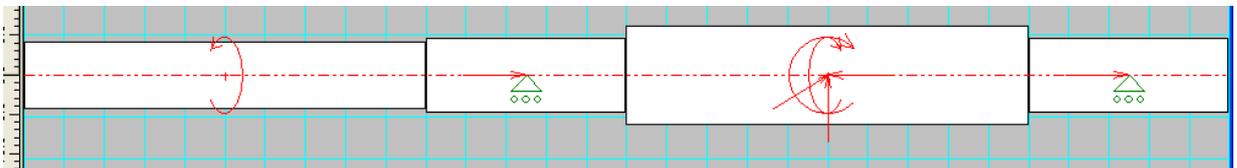


Рисунок 4.30 Параметры горизонтального вала

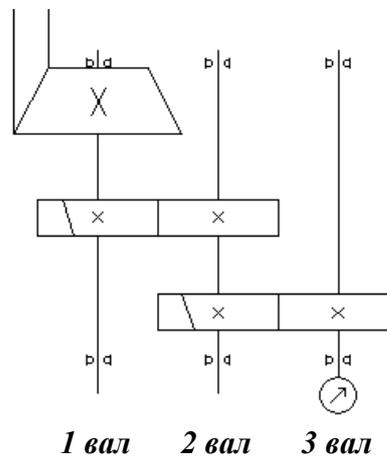


Рисунок 4.31 Нумерация вертикальных валов

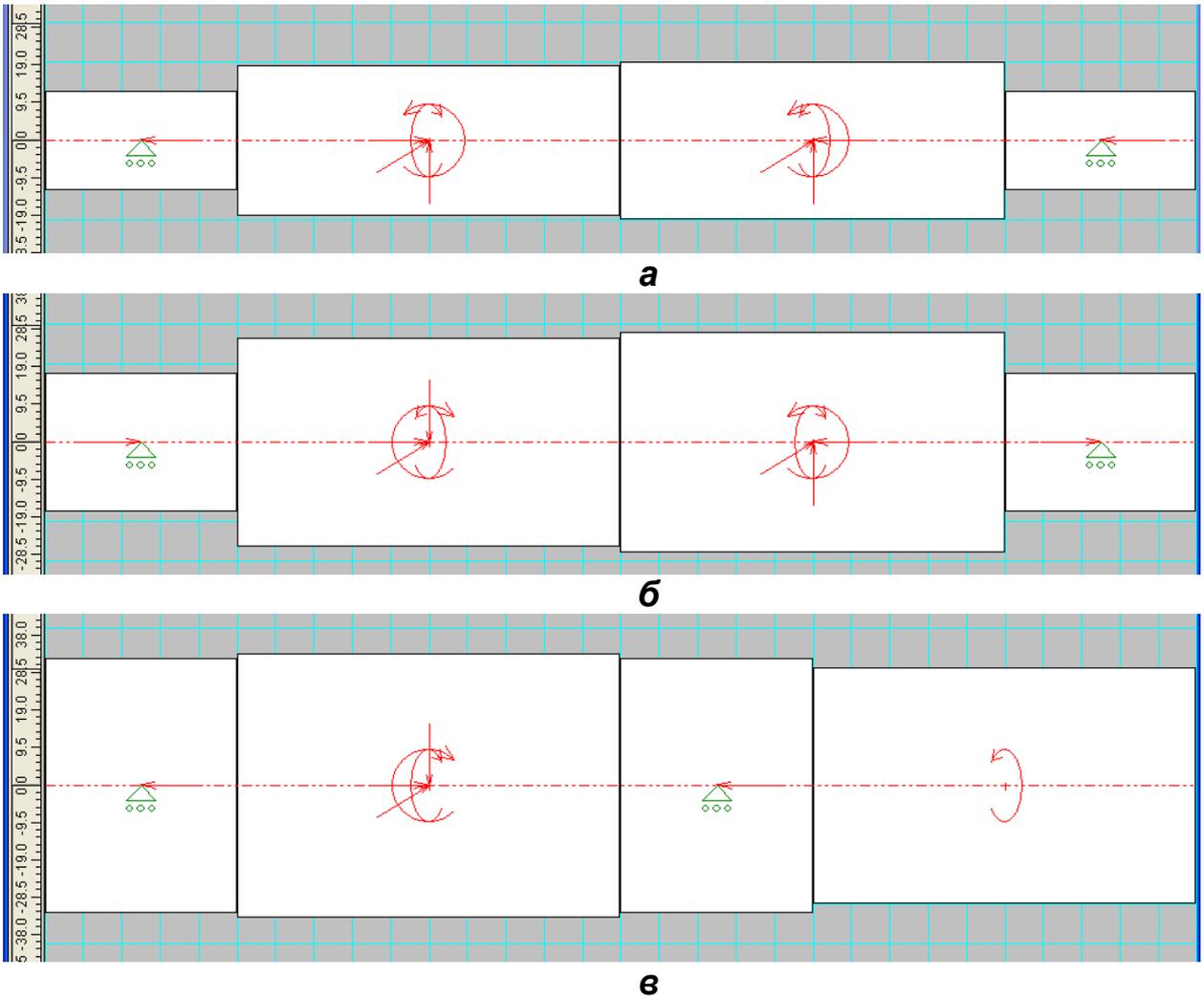


Рисунок 4.32 Параметры вертикальных валов: **а** – первого; **б** – второго; **в** – третьего

Следует напомнить, что по результатам расчета локальных программ **APM Trans**, **APM Shaft** можно отрисовать элементы передач и валы, оформленные в виде рабочего чертежа деталей. Рассчитанные по программе **APM Bear** подшипники качения, можно отрисовать, используя базу данных. Инструментальной средой для создания чертежа и его последующего редактирования является графический редактор **APM Graph**, который является составной частью **APM WinMachine** и, который предназначен для подготовки и просмотра графической информации всех без исключения модулей.

В целом программа завершает работу чертежом привода собранного из его элементов.

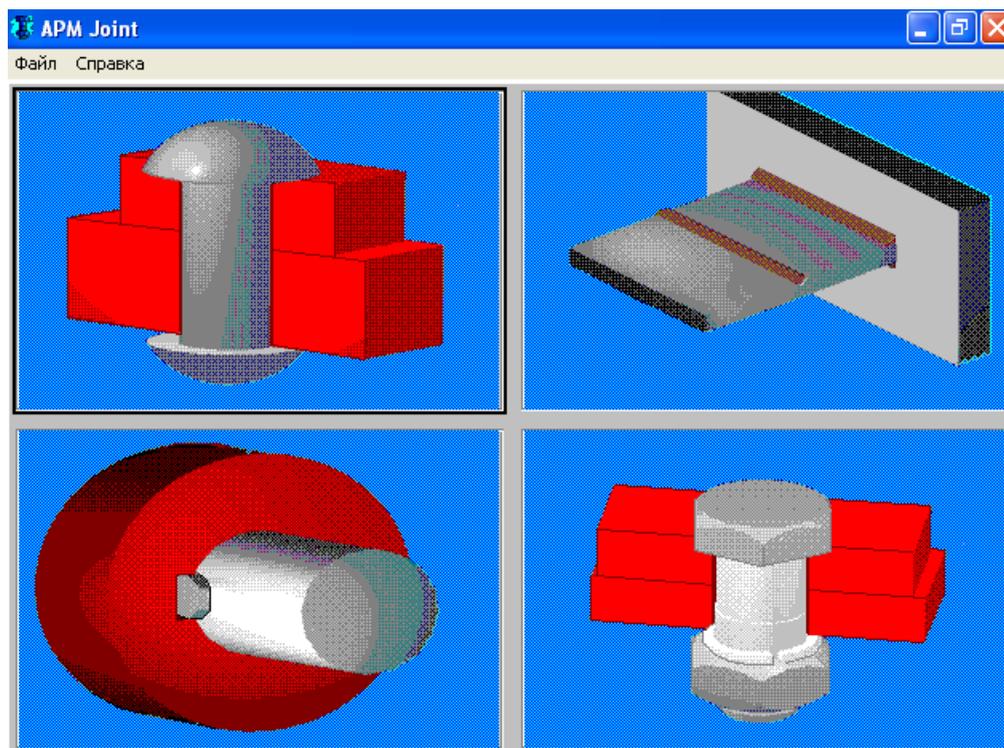
Можно напомнить, что цель любого проектирования состоит в том, чтобы создать равнопрочную и легкую конструкцию, что, для данного объекта, может быть достигнуто изменением разбивки передаточных чисел элементов или изменением коэффициента ширины ко-



лес или выбором соответствующего материала и термообработки. Все операции редактирования и модификации выполняются в интерактивном режиме. Для выполнения такого анализа на печать выводятся такие величины как полный вес элементов привода и занимаемый этой конструкцией объем.



## 5 МОДУЛЬ APM JOINT



Система **APM Joint** предназначена для расчета и проектирования соединений элементов машин. С ее помощью можно выполнить весь комплекс расчетов необходимых при проектировании этих объектов используемых в машиностроении, приборостроении, строительстве. Система позволяет выбрать из большого числа возможных конструкторских решений наиболее выгодное с экономической точки зрения. Расчеты реализованы в форме *проверочного* и *проектировочного*. Под *проектировочным расчетом* понимается комплекс вычислений по определению основных геометрических размеров соединения, а при *проверочном расчете* определяются значения коэффициентов запаса. При этом критерием расчета резьбовых соединений являются условие отсутствия сдвига и раскрытия сопряженных поверхностей, а также статическая и усталостная прочность элементов соединения; сварные швы рассчитываются из условия статической и усталостной прочности; заклепочные соединения рассчитываются из условия прочности при постоянной нагрузке;

Критерием расчета соединений деталей вращения может быть (в зависимости от типа) условие отсутствия сдвига или раскрытия сопряженных поверхностей, либо статическая и усталостная прочность элементов соединения, а также совокупность обоих критериев.



## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**APM Joint** – это модуль для расчета и проектирования соединений.

*Система позволяет рассчитать:*

- групповые резьбовые соединения, поставленные в отверстие с зазором и без, установленные в произвольном порядке и предназначенные для соединения произвольных поверхностей. При этом в качестве элементов крепления могут быть рассчитаны болты, винты и шпильки, работающие при произвольном внешнем нагружении.

- сварные соединения, при произвольной внешней нагрузке и произвольном размещении сварных швов нижеследующих типов:

стыковые;

тавровые;

нахлесточные;

точечная сварка.

- заклепочные соединения произвольного размещения и при произвольном плоском нагружении;

- соединения деталей вращения, конструктивно выполненные как:

соединения с натягом цилиндрической или конической формы;

шлицевые или шпоночные соединения разных типов;

штифтовые соединения радиальные и осевые;

соединения коническими кольцами;

клеммовые соединения различного конструктивного выполнения;

профильные соединения различных модификаций.

### Исходные данные

Исходными данными для расчета соединений являются геометрия соединения, внешние нагрузки, а также ряд других параметров, которые характеризуют выбранные материалы, коэффициенты запаса и т.д. Список этих констант приведен ниже

коэффициент запаса по смятию 1.1... 1.4

коэффициент запаса по сдвигу 1.1 ... 1.4

коэффициент основной нагрузки 0.2 ... 0.3

предел текучести

коэффициент трения

предел прочности

Для всех типов соединений вычисляются следующие геометрические параметры:

**1. Площадь** (кроме точечной сварки).



Под **площадью** для резьбовых, заклепочных и стыковых сварных соединений понимается площадь поверхности стыка, а для тавровых и нахлесточных сварных площадь шва.

**2. Координаты центра масс.**

**3. Осевые моменты инерции**, относительно двух взаимно перпендикулярных осей (X и Y).

**4. Угол наклона главных центральных осей.**

### **Определение**

Главными центральными осями называются две взаимно-перпендикулярные оси, проходящие через цент масс, относительно которых осевые моменты инерции имеют максимальное значение (смещенный момент равен нулю).

Далее рассчитываются параметры характерные для данного типа соединения и типа расчета. Ниже приводятся расчетные параметры по типам.

### **Групповые резьбовые соединения**

Групповые резьбовые соединения с винтами, установленными с зазором.

Для этой группы соединений рассчитываются:

**Сила затяжки болта.**

**Максимальная нагрузка**, действующая на болт.

**Максимальное давление** на стык.

**Диаметр болта** - наружный диаметр резьбы.

При проверочном расчете добавляются коэффициенты запаса:

**Коэффициент запаса выносливости** - отношение допустимого числа циклов нагружения к фактически действующему числу циклов.

**Коэффициент запаса прочности** - отношение предела прочности материала болта, к фактическому напряжению наиболее нагруженного болта.

Групповые резьбовые соединения с винтами, установленными без зазора.

Для этой группы соединений рассчитываются:

**Диаметр болта** - диаметр стержня болта.

**Максимальная сдвигающая нагрузка на болт** - нагрузка, приложенная в плоскости стыка, действующая на наиболее нагруженный болт.

**Минимальная толщина пластины** - наименьшая толщина пластины, при которой фактические напряжения смятия равны допусковым.



При проверочном расчете добавляется коэффициент запаса:

**Коэффициент запаса прочности по сдвигу** - отношение допускаемого напряжения сдвига материала болта к фактически действующему напряжению наиболее нагруженного болта.

В обоих случаях давления в стыке выводятся в виде карты распределения по поверхности стыка.

### **Заклепочные соединения**

**Диаметр заклепки** - диаметр стержня заклепки без внутреннего отверстия. Если заклепка имеет внутреннее отверстие, то расчёт необходимых диаметров следует вести из условия равенства площадей поперечных сечений.

**Максимальная сдвигающая нагрузка на заклепку** - нагрузка, приложенная в плоскости стыка, действующая на наиболее нагруженную заклепку.

**Минимальная толщина пластины** - наименьшая толщина пластины, при которой фактические напряжения смятия равны допускаемым.

При проверочном расчёте добавляется коэффициент запаса:

**Коэффициент запаса прочности по сдвигу** - отношение допускаемого напряжения сдвига материала заклепки к фактически действующему напряжению наиболее нагруженной заклепки.

### **Тавровые и нахлесточные соединения**

**Максимальное эквивалентное напряжение** - напряжение, действующее в наиболее нагруженной точке сварного шва. Под эквивалентным напряжением понимается напряжение растяжения, вызывающее такое же разрушающее воздействие, что и совокупность нормальных и касательных напряжений.

**Катет сварного шва** - геометрическая характеристика поперечного сечения шва, очертания которого напоминают равнобедренный прямоугольный треугольник. Величина катета позволяет определить соответствующий диаметр электрода.

При проверочном расчёте добавляются коэффициенты запаса:



**Коэффициент запаса прочности** - отношение допускаемого напряжения материала сварного шва к фактически действующему эквивалентному напряжению в наиболее нагруженной точке.

**Коэффициент запаса выносливости** - отношение допустимого числа циклов нагружения к фактически действующему числу циклов.

Напряжения в сварном шве выводятся в виде карты напряжений.

### Точечная сварка

#### Диаметр точки.

В проверочном расчете добавляются коэффициенты запаса:

**Коэффициент запаса прочности по сдвигу** - отношение допускаемого напряжения сдвига материала точки к фактически действующему напряжению наиболее нагруженной точки.

**Коэффициент запаса выносливости** - отношение допустимого числа циклов нагружения к фактически действующему числу циклов.

### Стыковая сварка

**Максимальное эквивалентное напряжение** - напряжение, действующее в наиболее нагруженной точке стыка. Под эквивалентным напряжением понимается напряжение растяжения, вызывающее такое же разрушающее воздействие, что и совокупность нормальных и касательных напряжений.

**Коэффициент запаса прочности** - отношение допускаемого напряжения материала стыка к фактически действующему эквивалентному напряжению в наиболее нагруженной точке.

**Коэффициент запаса текучести** - отношение предела текучести материала стыка к фактически действующему эквивалентному напряжению в наиболее нагруженной точке.

При проверочном расчёте добавляется коэффициент запаса:

**Коэффициент запаса выносливости** - отношение допустимого числа циклов нагружения к фактически действующему числу циклов.

Напряжения в стыке выводятся в виде карты напряжений.

### Соединения деталей вращения

#### Шпоночные соединения

Все геометрические параметры шпонки.



Допускаемые напряжения для выбранных материалов соединения.

Действующие напряжения в соединении.

Шпонка выбирается из базы данных в зависимости от текущего стандарта.

### **Соединения цилиндрических деталей с натягом**

Минимальный требуемый натяг из условия не раскрытия/сдвига стыка.

Максимальный натяг из условия контактной прочности деталей соединения.

Набор посадок выбранных из базы данных. Для каждой посадки считается мин/макс сила необходимая для сборки соединения.

### **Соединения конических деталей с натягом**

Необходимая сила затяжки.

Перемещение втулки при затяжке.

Коэффициент запаса по текучести втулки.

### **Соединения коническими кольцами**

Необходимая сила затяжки.

Перемещение втулки при затяжке.

Коэффициент запаса по текучести втулки.

Коэффициент запаса по текучести вала.

### **Штифтовые соединения**

Диаметр штифтов.

Допускаемые напряжения для выбранных материалов соединения.

Действующие напряжения в соединении.

### **Клеммовые соединения**

Диаметр винтов.

Допускаемые напряжения для выбранного материала винта.

Действующие напряжения в соединении.

### **Шлицевые соединения**



Набор выбранных из базы данных соединений.

## Методы и критерии расчёта

### Резьбовые соединения

Критерий расчета групповых резьбовых соединений зависит от способа установки винтов и от вида внешней нагрузки к ним приложенной. В зависимости от этого расчеты бывают на нераскрытие стыка и несдвигаемость деталей в контакте.

Внешние нагрузки, действующие на плоский стык, приводятся к главному вектору и к главному моменту, приложенному к центру масс. Расчетные параметры резьбовых соединений определяются на основании принципа суперпозиции. Винты рассчитываются на статическую и усталостную прочность при растяжении. Расчет усталостной прочности выполняется только в случае переменной внешней нагрузки.

При проверочном расчете определяются значения коэффициентов запаса. В случае установки винтов без зазора критерием их расчета является прочность на срез и на смятие винтов. Нагрузки на винты полученные по результатам расчета представляются в виде карт нагрузки на винты, а давление в контакте представляется в виде карты удельных давлений. Из анализа карты давлений можно определить вероятность разрушения поверхности в контакте. Карты нагрузок на винты дают представления об эффективности их использования.

### Заклепочные соединения

Рассчитываются на срез и смятие при условии нагружении соединений нагрузками действующими в плоскости стыка. Сдвигающие нагрузки на заклепки представляются в виде карты нагрузок.

### Сварные соединения

Статическая прочность сварных соединений выполненных стыковым швом рассчитывается методом конечных элементов, в котором кроме номинальных напряжений определяются и местные в местах их концентрации, что используется при выполнении проверочного расчета на выносливость. Проверочный расчет в этом случае сводится к определению коэффициента запаса статической и усталостной прочности.

Проектировочный расчет угловых швов выполняется методом полярного и осевых моментов инерции и сводится к определению размера катета сварного шва.



Расчет прочности выполняется по эквивалентным напряжениям, полученным на основании энергетической теории прочности. При проектировочном расчете напряженно деформированное состояние сварных швов определяется методом конечных элементов и сводится к расчету коэффициентов запаса статической и усталостной прочности.

Кроме того, для всестороннего анализа напряженное состояние представляется в виде карт эквивалентных напряжений в цветном исполнении, с помощью которых можно определить мало напряженные участки сварного шва и, в случае необходимости, отредактировать конфигурацию с целью получения равнопрочных конфигураций.

### **Соединения деталей вращения**

Для соединений с натягом используется решение задачи Ламе.

Для остальных соединений используется равенство внешней нагрузки и внутренних силовых факторов.

Критерий для расчета соединений деталей вращения зависит от типа соединения и может быть одним из:

Коэффициент запаса по нераскрытию стыка или коэффициент запаса по сдвигу.

Коэффициент запаса по статической и усталостной прочности элементов соединения.

### **Редактор соединений**

Редактор соединений, входящий в состав системы APM Joint, представляет собой специализированный графический редактор, который дает в распоряжение пользователя гибкие и удобные средства для задания геометрии соединения и ввода нагрузок.

### **Компоненты редактора соединений**

Внешний вид редактора соединений **APM Joint** показан на рисунке 5.1. Его основными элементами являются инструментальная панель, информационная панель, линейки и рабочее поле (окно редактирования).

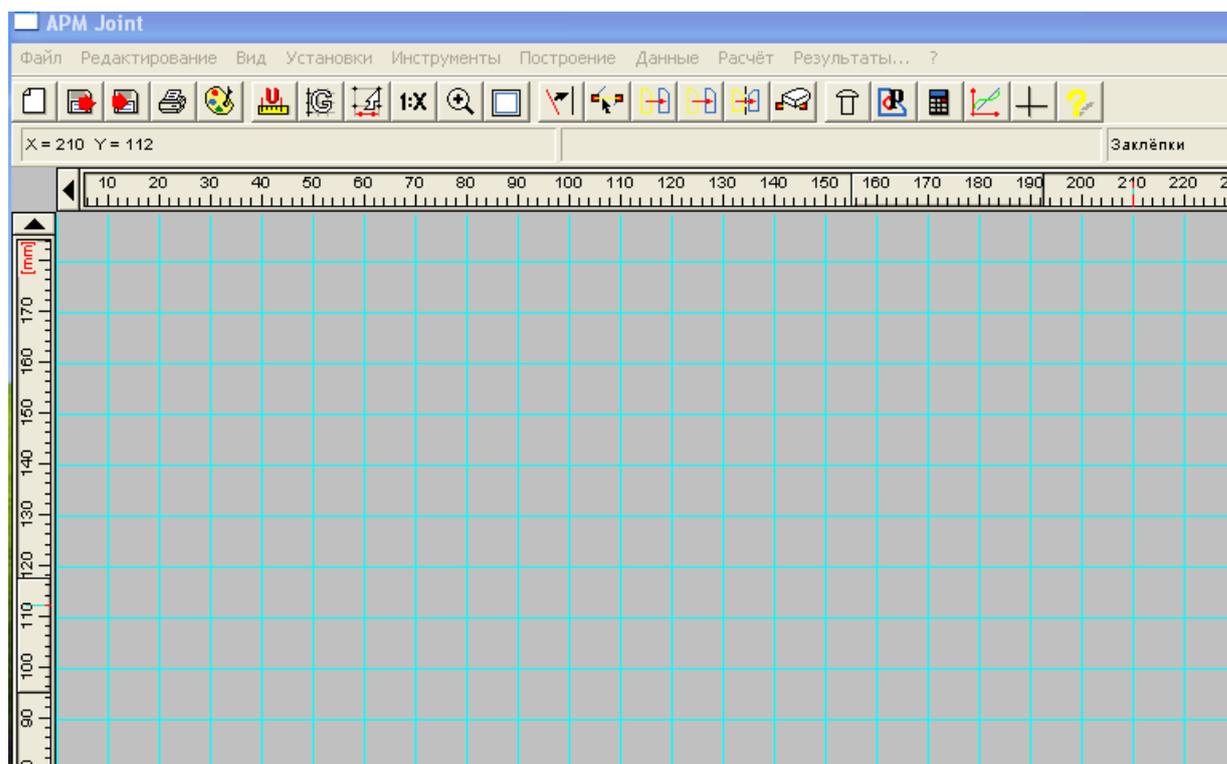


Рисунок 5.1 Внешний вид редактора соединений

### Рабочее поле

Рабочее поле является главным компонентом редактора соединений. В нем отображается геометрия соединения, и выполняются операции по его формированию и изменению. В нем также показываются действующие на соединения нагрузки.

### Линейки

Редактор включает в себя две линейки - вертикальную и горизонтальную. На линейках показаны шкалы, которые зависят от текущего масштаба изображения и текущих единиц измерения. Линейки одновременно являются полосами прокрутки - нажимая кнопки на линейках можно просматривать разные участки рабочей плоскости.

### Информационная панель

Информационная панель используется для вывода текущих значений параметров в процессе проектирования соединения. Набор отображаемых параметров зависит от того, с каким элементом вы работаете. Так, например, при рисовании окружности на информационной панели показываются координаты курсора и радиус (рисунок 5.2).



Рисунок 5.2



## Инструментальная панель

Инструментальная панель содержит кнопки для вызова основных команд редактора, а также для вызова кнопочного меню нижнего уровня (рисунок 5.3). Для вызова нужной команды щелкните левой кнопкой мыши на соответствующей кнопке.



Рисунок 5.3

## Увеличение размеров рабочего поля

Пользователь может увеличить размеры рабочего поля за счет удаления с экрана линеек, инструментальной и информационной панелей. Для этого используются команды **Линейки**, **Панель инструментов**, **Окно статуса** всплывающего меню **Вид**. В любой момент времени каждый из этих элементов можно снова вернуть на экран.

## Масштаб изображения

Для изменения масштаба изображения служит команда **Установки - Масштаб**. В диалоговом окне, показанном на рисунке 5.4. Вы можете ввести нужный масштаб в поле *Масштаб* или выбрать один из стандартных масштабов (1 : 2, 1 : 5, 1 : 10 и т.д.).

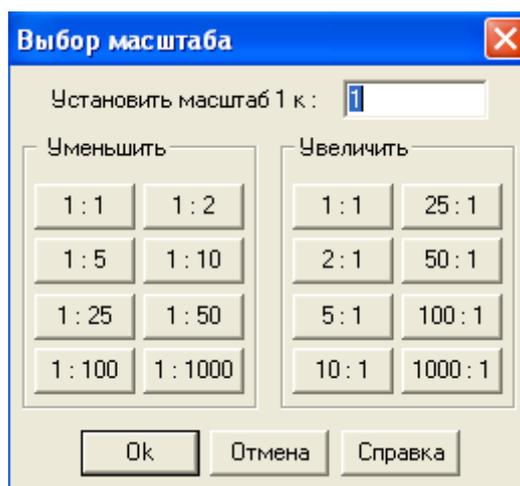


Рисунок 5.4

## Палитры редактора

Палитрой называется совокупность цветов, используемых для рисования графических примитивов, нагрузок, болтов, заклёпок, точек сварки, а также цвета фона и цвета линий вспомогательной сетки. В распоряжении пользователя имеется четыре палитры (“серая”, “белая”, “черная” и “черное на белом”). Для выбора палитры используется команда **Установки - Палитра**.



### Вспомогательная сетка

Для лучшего визуального контроля при рисовании геометрии соединения в поле редактора может выводиться вспомогательная прямоугольная сетка. С помощью команды **Установки – Сетка...** пользователь может выбрать шаг сетки и тип линий сетки.

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ С РЕДАКТОРОМ

### Типы элементов

Все геометрические объекты (линия, отрезок, окружность, дуга, точка), рисуемые с помощью редактора **АПМ Joint**, делятся на *основные* и *вспомогательные*.

Для того чтобы представить себе различие между основными и вспомогательными элементами, полезно вспомнить, как создается обычный “ручной” чертеж. В работе над ним чертежник задает рабочее, “вспомогательные” элементы - точки, линии, окружности и т.п., которые используются для построения основных элементов, составляющих главное содержание чертежа. Допустим объект, который мы должны нарисовать содержит серию отверстий, центры которых лежат на одной линии или на одной окружности. В этом случае удобно сначала задать вспомогательный объект - линию или окружность, которые не будут входить в окончательный вариант чертежа, а используются только для удобства построения и редактирования.

Для задания основных и вспомогательных элементов в **АПМ Joint** используются разные команды: для основных элементов команды меню **Панель инструментов Рисование**, для вспомогательных - **Панель инструментов Вспомогательные**. Основные и вспомогательные элементы различаются и внешне - первые изображаются сплошными линиями, вторые - пунктирными.

### Связи между элементами

Реальные геометрические объекты, включая и те, с которыми приходится иметь дело при проектировании соединений деталей машин, как правило, имеют иерархическую структуру. Это означает, что в их составе можно выделить “главные” элементы, составляющие “скелет” формы и второстепенные, которые можно рассматривать как локальные компоненты. Разделение на основные и второстепенные элементы предусматривает наличие связи между ними - локальные компоненты привязаны к основным. Другим источником иерархичности является построение, в процессе которого удобно использовать вспомогательные элементы, к которым привязываются основные. Еще один важный источник возникновения иерархии - параметризация, ко-



торая также предполагает наличие логических связей между элементами чертежа.

В процессе построения объектов в редакторе **АПМ Joint** между ними устанавливаются связи, тип которых зависит от способа построения каждого элемента.

Эта связь обуславливает зависимость размеров и расположения объекта от параметров объектов, с которыми он связан. Рассмотрим это на конкретных примерах.

Пусть вы построили окружность касательную к двум вспомогательным прямым. Тогда при изменении положения любой из этих прямых изменит свое положение и окружность. Другой пример: допустим, вы построили отрезок, концы которого привязаны к двум узлам, тогда, изменяя положение этих узлов, вы будете изменять размеры и положение отрезка.

### Выбор режима

Для того чтобы нарисовать соединение нужно задать его конструктивные элементы; для проведения расчетов, нужно также ввести нагрузки. **Чтобы нарисовать или отредактировать какой-либо элемент, нужно переключить редактор в режим рисования этого элемента.** Для этого нужно выбрать либо соответствующую кнопку на инструментальной панели, либо команду в меню.

### Рисование

Рисование элемента (примитива) сводится к заданию точек, определяющих его размеры и положение на плоскости, причем эти точки и порядок их ввода зависят от того, каким образом рисуется объект. Так, например, если вы строите окружность по центру и радиусу, то сначала нужно задать центр окружности, а затем установить требуемый радиус. Чтобы задать точку нужно подвести к ней курсор и нажать **левую** кнопку мыши. В процессе перемещения курсора при рисовании примитива на экране рисуется текущая форма (или текущие габариты) элемента, а в окне статуса выводятся текущие значения основных параметров. Нажатие **правой** кнопки мыши в большинстве случаев приводит к отмене предыдущей команды.

### Редактирование

Редактирование в системе **АПМ Joint** включает в себя изменение параметров элементов соединения, а также их удаление. Чтобы перейти в режим редактирования элементов нужно выбрать команду **Редактирование - Редактировать** или нажать соответствующую кнопку. Редактирование осуществляется в несколько этапов и зависит от способа построения элемента и его связи с другими элементами:



1. Выбор редактируемого элемента.
2. Выбор редактируемого параметра.
3. Установка требуемых размеров.
4. Подтверждение установленных размеров.

Рассмотрим каждый этап более подробно.

**Выбор редактируемого элемента.** Чтобы выбрать элемент для редактирования подведите к нему курсор и нажмите левую кнопку мыши. В результате элемент и те объекты, от которых он зависит, выделяются цветом.

**Выбор параметра для редактирования.** Этот этап необязателен, его наличие зависит от того, есть ли необходимость выбора параметра для редактирования. Если такой необходимости нет, этот этап автоматически пропускается. Рассмотрим действия на этом этапе на примере. Допустим, вы редактируете окружность и есть возможность выбора между редактированием радиуса или положения центра (эта возможность появляется, если окружность не зависит от других элементов). Чтобы редактировать положение центра поместите курсор ближе к центру и нажмите левую кнопку мыши, а для изменения радиуса подведите курсор к окружности и нажмите левую кнопку мыши. Или при редактировании отрезка для выбора конца, который вы хотите переместить, подведите к нему курсор и нажмите левую кнопку мыши.

**Установка требуемых размеров.** Установка размеров и положения осуществляется перемещением курсора. При этом на экране рисуется текущая форма элемента, которая зависит от связи элемента с другими. Установите требуемый размер и нажмите левую кнопку мыши.

**Подтверждение установленных размеров.** Этот этап начинается сразу после предыдущего. Во время него изменяются параметры редактируемого элемента и всех связанных с ним. Если это приводит к ошибке, то новые параметры не устанавливаются и элемент остается без изменений.

### Поверхность стыка и контуры

Для расчета резьбовых, заклепочных, а также стыковых сварных соединений необходимо задать поверхность стыка. В **АПМ Joint** поверхность стыка определяется набором контуров. *Контуром* является замкнутая кривая, состоящая из основных элементов, т.е. построенных с помощью команд меню **Построение** - отрезков и дуг.

*Окружность* - простейший вид такого контура. Пользователю предлагаются два вида контуров, которые называются внешний и внутренний. Они различаются вкладом, который дают в результирующую



щую поверхность. *Внешний контур*  отображается толстой линией синего цвета, *внутренний*  - красного. Область, ограниченная внешним контуром, включается в поверхность стыка, а ограниченная внутренним контуром исключается из поверхности. На математическом языке это означает, что к результирующей поверхности и областям, ограниченными внешними контурами, применяется логическая операция ИЛИ, а к областям, ограниченными внутренними контурами операция РАЗНОСТИ. Причем операция РАЗНОСТИ имеет приоритет над ИЛИ, т.е. область, лежащая внутри как внешнего, так и внутреннего контуров, исключается из поверхности стыка. На рисунке 5.5 дается поясняющий пример. Цифрами показаны номера контуров, внешние контура синим цветом внутренние - красным, а результирующая поверхность стыка - серым.

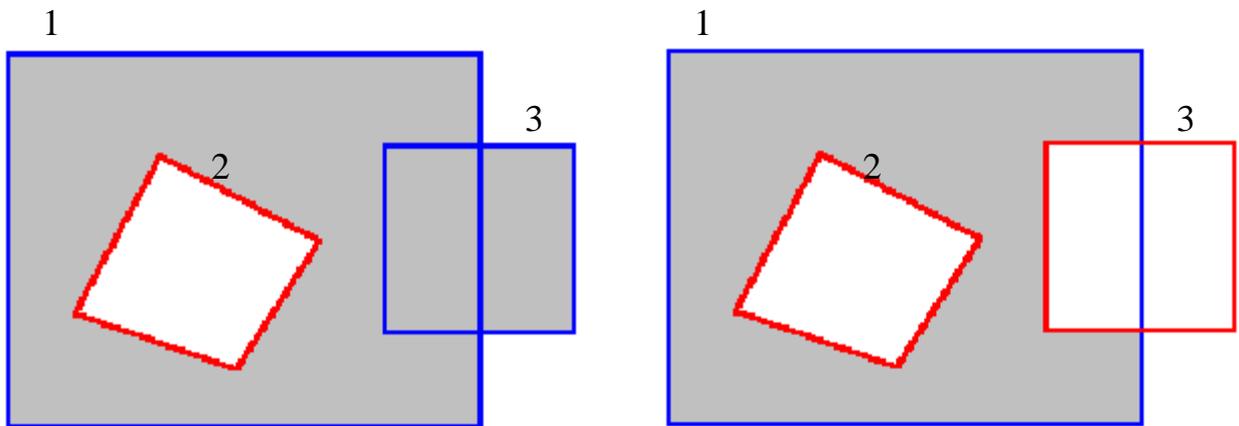


Рисунок 5.5 Пример поверхности и образующих ее контуров

Чтобы задать контур необходимо сначала его нарисовать основными элементами, а затем определить его, как внешний или внутренний используя команды **Данные - Внешний контур**  и **Данные - Внутренний контур** .

### Нагрузки, действующие на соединения

Нагрузки делятся на *нормальные* к плоскости соединения и *касательные* к ней.

Для каждого типа соединения допускаются нагрузки определенного типа: или касательные или как касательные, так и нормальные. Нагрузки вводятся с помощью команд **Данные - Касательная сила**  и **Данные - Нормальная сила** .

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ



Научиться рассчитывать и проектировать соединений элементов машин в системе **APM Joint**.

## **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:**

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ В СРЕДЕ APM JOINT**

Общая схема проектирования и расчета включает в себя следующие шаги:

- 1) Задание геометрии соединения;
- 2) Размещение нагрузок, действующих на соединение;
- 3) Ввод исходных данных, необходимых для расчета;
- 4) Выполнение проектировочного расчета;
- 5) Выполнение проверочного расчета;
- 6) Просмотр результатов расчетов.

Прежде чем приступить к описанию отдельных шагов, напомним определение проектировочного и проверочного расчетов.

*Проектировочный* расчет деталей машин предназначен для определения их основных параметров по формулам, соответствующим главным критериям работоспособности (прочности, износостойкости и пр.).

*Проверочный* расчет является уточняющим; его производят, когда форма и размеры детали уже известны по результатам проектировочного расчета либо приняты исходя из конструктивных требований.

### **Описание отдельных шагов расчета**

#### **1. Задание геометрии соединения**

Для того чтобы ввести геометрию соединения используется специализированный графический редактор, входящий в состав **APM Joint**. Он включает достаточно широкий набор графических примитивов, позволяющий задать соединения произвольной формы с произвольным размещением крепежных элементов.

#### **2. Размещение нагрузок**

Ввод нагрузок осуществляется с помощью редактора, описанного в общих положениях. Пользователь может задать нормальные и касательные силы, при этом касательные силы могут быть приложены как в плоскости соединения, так и на удалении от нее. При выполнении проектировочного расчета задаются постоянные нагрузки, при



проверочном расчете могут быть введены как постоянные, так и переменные нагрузки.

### 3. Ввод исходных данных

Для того чтобы выполнить расчет необходимо задать  характеристики материалов - предел прочности, предел текучести, коэффициент трения, а также значения коэффициентов запаса.

### 4. Проектировочный расчет

Для выполнения проектировочного расчета нужно в меню **Расчет** выбрать **Тип** и затем в появившемся дополнительном меню выбрать **Проектировочный**. После этого следует задать внешние нагрузки и выбрать команду **Расчет - Расчет!**  в главном меню.

### 5. Проверочный расчет

Установите тип расчета командой **Расчет - Тип - Проверочный** и затем выберите команду **Расчет - Расчет!**  в главном меню. При проведении проверочного расчета пользователь может изменить некоторые параметры.

### 6. Просмотр результатов

Для того чтобы просмотреть результаты расчетов используйте команду **Результаты**  главного меню.

## Расчет резьбовых соединений с зазором и без зазора

### Типы резьбы и их основные геометрические параметры.

*Резьбовыми* называются такие разъемные соединения, неподвижность элементов которых обеспечивается за счет деталей (болтов, винтов, шпилек, гаек и др.), имеющих резьбу. Эти соединения являются наиболее распространенными среди разъемных и широко применяются в машиностроении, приборостроении, строительстве и т. д.

Резьба представляет собой поверхность, образованную перемещением профиля по винтовой линии вдоль оси цилиндрической либо конической образующей заготовки. В зависимости от этого различают цилиндрические и конические резьбы. Наибольшее распространение получила цилиндрическая резьба; коническая в основном применяется в соединениях всевозможных труб.

Резьба, нанесенная на наружную поверхность детали, называется наружной, а на внутреннюю - внутренней.

Контур сечения резьбы в плоскости, содержащей ось детали, называется



профилем резьбы. Многообразие типов резьбы определяется выбором контура. По виду профиля в осевом сечении резьба делится на следующие типы (рисунок 5.6 а–г):

- треугольная;
- упорная;
- трубная (разновидность треугольной резьбы, со скругленными выступами);
- трапецидальная.

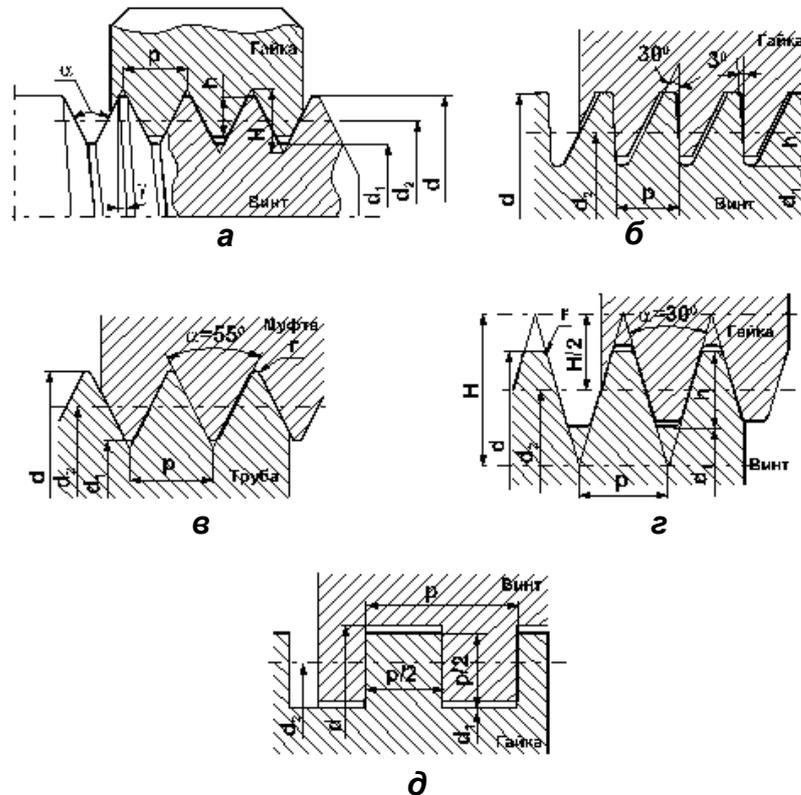


Рисунок 5.6

Частным случаем резьбы трапецидального профиля является прямоугольная резьба (рисунок 5.6 д). Этот тип в настоящее время на практике почти не используется, так как обладает рядом существенных недостатков. Но поскольку расчет резьбы такого профиля имеет теоретическое значение, он рассматривается наряду с остальными.

Винтовая поверхность резьбы может быть образована одновременным движением нескольких контуров. В таком случае резьба считается многозаходной, а величина заходности определяется количеством таких контуров.

По направлению винтовой линии бывают правые и левые резьбы, причем левая применяется крайне редко.

Основными геометрическими параметрами цилиндрической резьбы являются:

- $d, D$  - наружный диаметр;
- $d_1, D_1$  - внутренний диаметр;
- $d_2, D_2$  - средний диаметр (на среднем диаметре ширина канавки равна ширине выступа);
- $\alpha$  - угол профиля, равный углу между смежными сторонами резьбы в плос-



кости осевого сечения;

$R$  - радиус впадины в плоскости осевого сечения;

$p$  - расстояние между одноименными точками смежных витков, измеренное вдоль оси (шаг резьбы);

$n$  - число заходов резьбы;

$\gamma$  - угол подъема винтовой линии.

Геометрические размеры резьб в зависимости от диаметра стандартизованы, что позволяет обеспечить их взаимозаменяемость.

Для стандартной резьбы треугольного профиля (рисунок 5.6 а) угол при вершине равен  $\alpha = 60^\circ$ . Резьба треугольного профиля с таким значением угла называется метрической. Метрические резьбы выполняются с крупным и мелким шагами. Резьба с крупным шагом используется наиболее часто, в то время как область применения резьбы с мелким шагом охватывает только случаи, когда необходимо обеспечить точное осевое перемещение при регулировке или ограничить радиальные размеры винтовой пары.

Угол при вершине, равный  $\alpha = 30^\circ$ , принимается для стандартных трапецидальных резьб. Резьбы, нарезанные на конической поверхности, являются герметичными, и при их использовании нет необходимости устанавливать дополнительные уплотнения.

Обеспечению герметичности служит также трубная резьба, которая широко применяется для соединения труб и различной арматуры.

По назначению резьбы делятся на крепежные (к каковым относятся: метрическая с треугольным профилем; трубная; круглая; резьба винтов, предназначенных для скрепления деревянных деталей) и резьбы винтовых механизмов (трапецидальная, упорная, прямоугольная). Однако эта классификация является несколько условной, поскольку нет строгих правил использования какой-либо из резьб только как крепежной, или только в качестве резьбы винтовых механизмов.

Наибольшие потери на трение, величина которых зависит от угла профиля, имеет метрическая резьба. Так как при крепеже трение играет положительную роль, то во избежание произвольного отвинчивания именно резьбы треугольного профиля являются основными для крепежных деталей. Трапецидальная и упорная резьбы используются в винтовых передачах (преобразующих вращательное движение в поступательное), так как они обладают наименьшими потерями на трение, и, как следствие, более высоким коэффициентом полезного действия. Упорная резьба применяется при больших односторонних осевых нагрузках.

**Винтовая пара.** На практике применяются три принципиально различные конструктивные схемы установки деталей крепления (рисунок 5.7 а–с).

Типы резьбовых соединений. Прежде всего, это крепление винтом и гайкой (иногда пара винт - гайка называется болтом). Винт представляет собой стержень с головкой и одним резьбовым концом. Такой тип крепления используется для сборки деталей малой толщины (рисунок 5.7 а).

В том случае, если одна из собираемых деталей имеет большие линейные размеры, то рекомендуется использовать соединение винтом (рисунок 5.7 б). Как правило, винты устанавливаются в отверстие с зазором. В этом случае гайкой служит та часть одной из соединяемых деталей, на которой нарезана резьба.

Если предполагаются частые сборка и разборка резьбового соединения, то вместо винта целесообразно воспользоваться шпилькой и гайкой. *Шпилька* - это стержень, на обоих концах которого нарезана резьба. Одним концом шпилька заворачивается до упора в резьбовое отверстие на одной из собираемых деталей, а



на другом конце на шпильку навинчивается гайка (рисунок 5.7 в). Таким образом, шпилька постоянно находится в отверстии, и даже при частых сборке и разборке разрушения витков резьбы не произойдет.

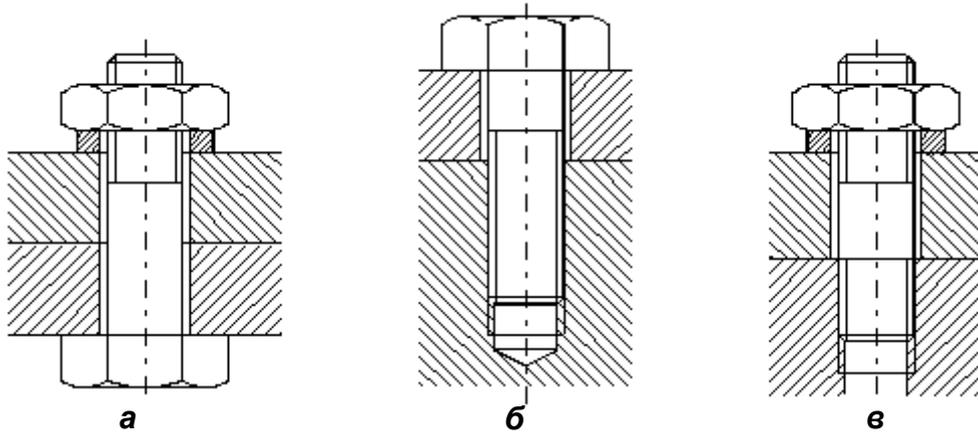


Рисунок 5.7

## 1. Задание геометрии

Для того чтобы определить геометрию резьбового соединения нужно задать форму опорной поверхности и разместить на ней болты.

Форма опорной поверхности задается совокупностью ее внешних и внутренних границ. Допустимы многосвязные поверхности, состоящие из нескольких отдельных фрагментов. Границы поверхности состоят из *контуров*. Контур представляет собой замкнутую линию и может быть *простым* или *составным*. Простой контур образован одним графическим примитивом, например, прямоугольником или окружностью.

Составной контур состоит из последовательности примитивов (отрезков линий, дуг), а также фрагментов, отсекаемых от них другими примитивами.

После того как задана опорная поверхность, необходимо разместить на ней болты. Для этого служит команда **Данные – Болты**



## 2. Ввод нагрузок

Нагрузки могут быть приложены в любой точке. Для болтов без зазора они могут быть только в плоскости стыка, с зазором, как в плоскости стыка, так и в перпендикулярной к ней. Нагрузки вводятся

выбором пункта меню **Данные - Нормальная сила**  и **Касательная сила** . Силы можно вводить на любом этапе проектирование соединения.



### 3. Ввод исходных данных

Исходные данные, необходимые для расчета резьбовых соединений описаны в общих положениях.

### 4. Проектировочный расчет

В процессе расчета вычисляются геометрические параметры соединения и нагрузки, действующие на болты и на плоскость стыка.

### 5. Проверочный расчет

Проверочный расчет выполняется после проектировочного при неизменной геометрии. Для его проведения необходимо задать переменные внешние нагрузки. Это делается с помощью тех же пунктов меню, что и при проектировочном расчете **Данные - Нормальная сила**, и **Данные - Касательная сила**.

В данном типе расчета можно изменять диаметр болтов, что будет влиять на значения коэффициентов запаса, с помощью команды меню **Данные - Дополнительный параметр**.

#### **Упражнение 5.1 Расчет кронштейна, нагруженного отрывающей силой**

**Задание.** Подберите винты группового резьбового соединения кронштейна, изображенного на рисунке 5.8, где  $a = 50$  мм. Соединение нагружено сосредоточенной силой  $F = 10000$  Н, приложенной под углом  $\alpha = 30^\circ$ .

Винты установлены в отверстие с зазором и изготовлены из стали со следующими характеристиками: предел прочности  $\sigma_b = 600$  МПа; предел текучести  $\sigma_r = 400$  МПа. Коэффициент трения в резьбе и на торце  $f = 0,15$ . Общее количество винтов  $z = 9$ .

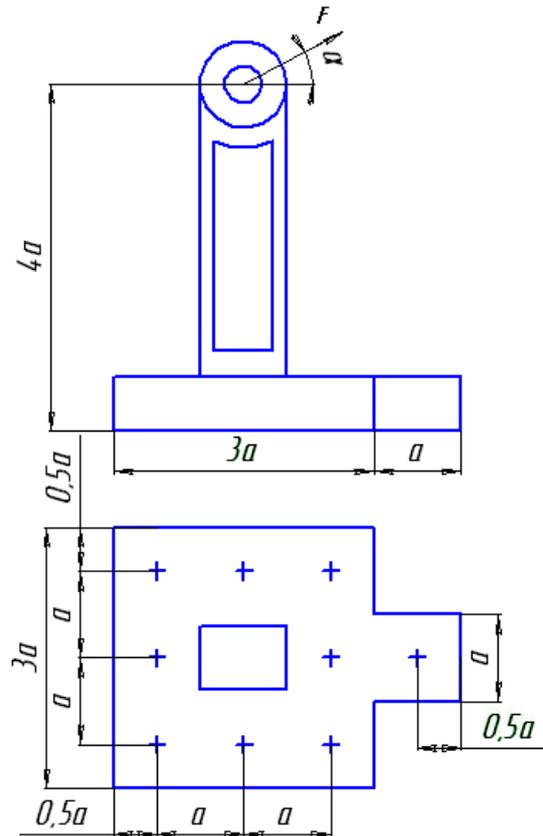


Рисунок 5.8

### Расчет

Для расчета соединения в модуле **АПМ Joint** необходимо задать форму стыка, координаты расположения болтов, постоянные параметры (предел текучести, предел прочности, коэффициент запаса по сдвигу, коэффициент основной нагрузки и др.) и действующие на соединение внешние силы.

Задание внешней нагрузки имеет некоторые особенности. Дело в том, что резьбовое соединение в общем случае может находиться под действием как отрывающих, так и сдвигающих усилий. Если сдвигающие силы окажутся незначительными по сравнению с отрывающими, программа **АПМ Joint** выполнит расчет по критерию нераскрытия стыка. Если же превалирующими окажутся сдвигающие силы, то диаметр винтов будет выбран из условия отсутствия сдвига.

Таким образом, для того чтобы расчет был проведен именно по отрывающим нагрузкам, необходимо исключить возможное влияние горизонтальной составляющей силы  $F_h$ , т.е. среди внешних нагрузок указать только вертикальную силу  $F_v$  и момент, создаваемый силой  $F_h$ .

### Упражнение 5.3 Заклепочные соединения



Проектирование заклепок полностью аналогично проектированию болтов без зазора.

**Задание 1.** Задайте геометрию

Геометрия заклёпочных соединений задаётся точно также как и для резьбовых соединений. Единственное отличие состоит в том, что заклёпки расставляются с помощью команды **Данные – Заклёпки** .

**Задание 2.** Введите нагрузки

Внешние нагрузки могут действовать только в плоскости стыка т.к. для заклёпки рассчитывается только срез. Ввод нагрузок выполняется с помощью команды **Данные - Касательная сила** .

**Задание 3.** Введите исходные данные

Исходные данные, необходимые для расчёта заклёпочных соединений описаны в общих положениях.

**Задание 4.** Выполните проектировочный и проверочный расчёты

Для заклёпочных соединений аналогичны расчётам для резьбовых соединений без зазора.

**Упражнение 5.4 Тавровые и нахлёсточные сварные соединения**

**Задание 1.** Задайте геометрию

Эти соединения состоят из сварных швов. Шов задаётся множеством отрезков, дуг и окружностей, которые строятся с помощью команд меню графического редактора **Построение** редактора APM Joint.

**Задание 2.** Введите нагрузки

Допускаются нагрузки как нормальные, так и касательные к плоскости стыка. Они вводятся командами теми же командами что и для резьбовых соединений.

**Задание 3.** Выполните проверочный расчет



Для его проведения необходимо задать переменные внешние нагрузки. Вы можете также задавать катет сварного шва и эффективный коэффициент концентрации напряжений с помощью команды меню **Данные - Дополнительные параметры**.

### **Упражнение 5.5 Точечная сварка**

#### **Задание 1.** Задайте геометрию

Для задания геометрии необходимо расставить точки, используя команду **Данные - Точки**.

#### **Задание 2.** Введите нагрузки

В данном типе соединений допускаются только нагрузки, действующие в плоскости стыка.

#### **Задание 3.** Выполните проверочный расчёт

Для его проведения необходимо задать переменные внешние нагрузки. Вы можете также задавать диаметр точки и эффективный коэффициент концентрации напряжений с помощью команды меню **Данные - Дополнительные параметры**.

### **Упражнение 5.6 Стыковые сварные соединения**

#### **Задание 1.** Задайте геометрию

Геометрия стыковых соединений задается точно также как и для резьбовых.

#### **Задание 2.** Введите нагрузки

Допускаются нагрузки как нормальные, так и касательные к плоскости стыка. Они вводятся теми же командами что и для резьбовых соединений.

#### **Задание 3.** Выполните проверочный расчёт

Для его проведения необходимо ввести переменные внешние нагрузки, а также эффективный коэффициент концентрации напряжений с помощью команды меню **Данные - Дополнительные параметры**.



## 6 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТРЕХ-МЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В МОДУЛЕ APM STRUCTURE 3D

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

APM Structure3D представляет собой универсальную систему для расчета стержневых, пластинчатых, оболочечных, твердотельных, а также смешанных конструкций.

С помощью программы можно рассчитать произвольную трехмерную конструкцию, состоящую из стержней произвольного поперечного сечения, пластин, оболочек и объемных деталей при произвольном нагружении и закреплении. При этом соединения элементов в узлах может быть как жестким, так и шарнирным.

В результате выполненных системой APM Structure3D расчетов вы можете получить следующую информацию:

- нагрузки на концах элементов конструкции;
- карту напряжений по длине стержней и по поверхности пластин и оболочек конструкции;
- деформацию произвольной точки;
- карту распределения напряжений в произвольном сечении стержня;
- эпюры изгибающих и крутящих моментов, поперечных и осевых сил и т.д. для отдельного стержня и для конструкции в целом
- коэффициент запаса устойчивости конструкции по Эйлеру
- напряженно-деформированное состояние конструкции при больших перемещениях (геометрически нелинейная задача)
- частоты и формы собственных колебаний конструкции;
- изменение напряженно-деформированного состояния конструкции под действием произвольно меняющихся во времени нагрузок.

### Редактор трехмерных конструкций

#### Виды

В основе работы редактора лежит операция проецирования на плоскость. Такая плоскость называется *видовой плоскостью* или просто *видом*. При редактировании конструкции пользователь работает с такими видовыми плоскостями. Видовая плоскость характеризуется двумя параметрами - *поворотом* и *положением*. Поворот определяет направление нормали плоскости и задается двумя углами  $\varphi$  и  $\theta$ , как и в сферической системе координат. Второй параметр - положение в пространстве задается вектором.

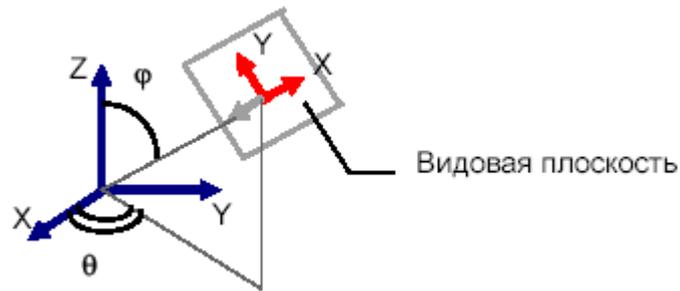


Рисунок 6.1 Видовая плоскость в пространстве

Иногда, например, при параллельном переносе плоскости в пространстве, удобно задавать положение плоскости *глубиной*, скалярной величиной, равной расстоянию от центра координат до плоскости, аналогом  $\rho$  в сферической системе координат.

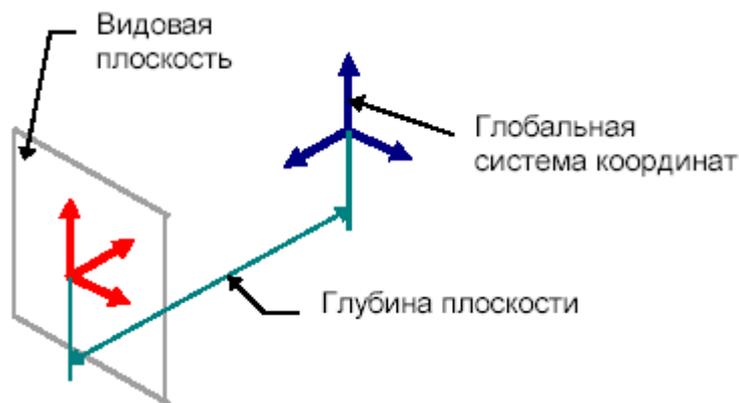


Рисунок 6.2 Глубина вида

Видовая плоскость имеет систему координат, у которой направление оси Z совпадает с направлением нормали, а оси X и Y лежат в самой плоскости. В дальнейшем система координат плоскости будет называться *локальной*, а система координат мира - *глобальной*. Часто бывает удобно работать с локальными.

Виды бывают *главные*, когда направление нормали совпадает с одной из осей системы координат. Такими видами являются вид *сверху*, *снизу*, *справа*, *слева*, *спереди* и *сзади*. Если направление нормали не совпадает с направлением одной из осей системы координат, то такой вид называется *произвольным*.

В редакторе пользователю доступны 4 вида, которые представляют собой отдельные окна, которые можно открывать, закрывать и располагать на экране так, как это удобно пользователю. Изначально видовые плоскости установлены как вид спереди, слева, сверху и произвольный или изометрический.

Для того чтобы изображение оптимально размещалось на экране, пользователь может его *масштабировать* и *прокручивать*.



## Элементы редактора

Редактор конструкций содержит в себе окна видов, меню, панели управления и панель состояния. Элементами вида являются узлы, стержни, нагрузки различного вида, вспомогательные точки, такие как центр вращения и центр локальной системы координат и т.д. Все элементы вида изображаются отдельным цветом. Пользователь может изменять цвета всех элементов вида и сохранять эти установки цветов в группах называемых *палитрой* (команда **Вид - Палитра**). Элементы редактора и вида показаны ниже на рисунке 6.3.

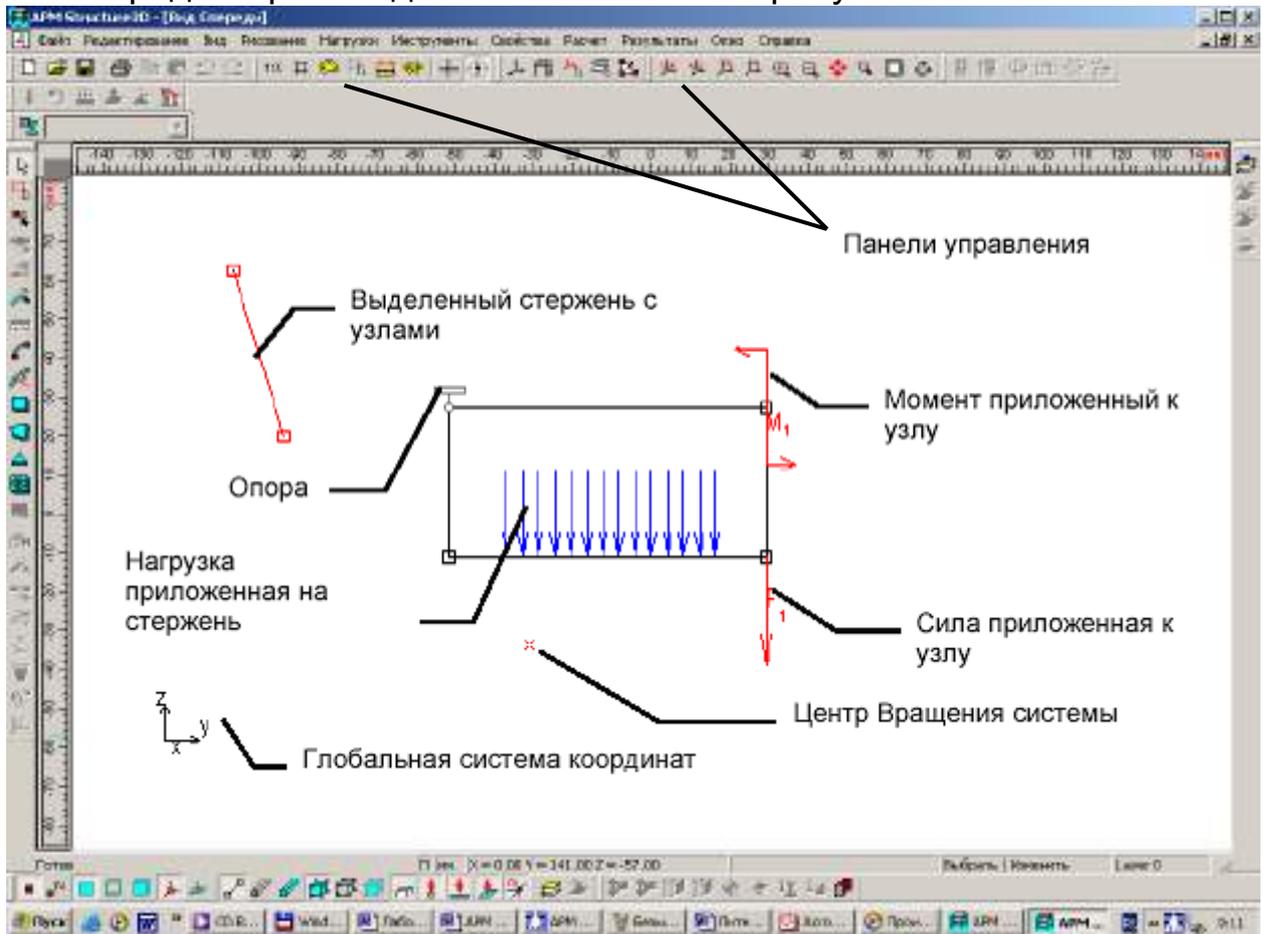


Рисунок 6.3 Элементы редактора и вида

Панель состояния служит для отображения основной нужной информации по текущей работе. Эта информация включает в себя единицы измерения длины конструкции, координаты курсора, информация необходимая для текущей операции, например при рисовании окружности ее радиус, и название текущей операции. Панель состояния редактора конструкции показана ниже на рисунке 6.4.



Рисунок 6.4 Структура панели состояния редактора Structure3D

### Шаг курсора

Изменение координат курсора в редакторе происходит согласно *шагу курсора*. Шаг курсора определяет, до какой степени точности происходит округление координат при передвижении курсора в виде. В редакторе используются два шага курсора: *линейный* и *угловой*. Линейный шаг определяет точность округления координат и длин, угловой шаг - точность округления углов в таких операциях, как рисование дуги или стержня по углу и длине. Для изменения значений шагов курсора используйте команду **Вид - Шаг Курсора** . По умолчанию линейный шаг курсора равен 1 единице измерения, угловой - 1 градусу.

Для того чтобы облегчить процесс редактирования редактор конструкций *Structure3D* работает с помощью режима *привязки к узлам*. Каждый узел в видовой плоскости имеет *область чувствительности*. Если курсор попадает в область чувствительности узла, то координаты курсора автоматически приравниваются координатам узла. Например, если вы, рисуя окружность, задаете центр так, что курсор попадет в зону чувствительности какого-нибудь узла, то центр окружности будет в точности располагаться в проекции этого узла на видовую плоскость. Узел, в чью зону чувствительности попадает курсор, окрашивается другим цветом. Размер области чувствительности может задаваться пользователем командой **Вид - Шаг Курсора** и равен по умолчанию 20 пикселям. Привязка отключена при нажатой клавише SHIFT.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Научиться работать с модулем **APM Structure3D**.



## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Упражнение 6.1 Задание элементов конструкции

Основными элементами трехмерной конструкции являются узлы, стержни, пластины и объемные элементы. *Узел* - это точка соединения нескольких стержней. *Стержень* - прямолинейная балка. *Пластина* - плоский трех или четырех – узловый элемент. *Объемный элемент* – 3х-мерный элемент в форме 8и – узлового октаэдра, 6и – узловой треугольной призмы или 4х – узлового тетраэдра. Узлы, стержни, пластины и объемные элементы могут вводиться в произвольной последовательности.

#### Задание 1. Создайте несколько узлов

Узлы создаются при помощи команды **Новый узел** . Вначале необходимо выбрать такую видовую плоскость, чтобы она содержала в себе ту точку, в которую вы хотите поместить узел, после этого, следя за координатами в панели управления, необходимо щелкнуть мышкой в точке с нужной координатой. Если нужно отредактировать положение этого узла либо определить его координаты, необходимо щелкнуть в этом же режиме по выбранному узлу правой кнопкой мыши. Тогда появится диалоговое окно (рисунок 6.5), в котором можно уточнить координаты созданного узла либо организовать в этом узле шарнир.

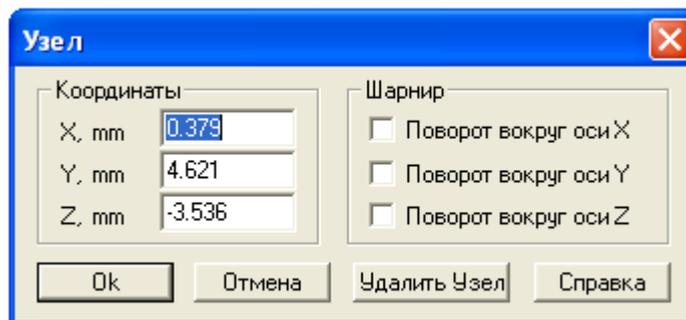


Рисунок 6.5

#### Задание 2. Создайте стержни различными способами

Стержни могут быть созданы двумя способами.

Первый способ (команда **Рисование - Стержень - По Координатам (Новый стержень)** ) позволяет вам рисовать стержень, используя координаты его узлов. Команда устанавливает режим простановки стержней. В этом режиме могут соединяться уже существующие узлы или создаваться новые. Первым щелчком задается первый узел, вторым второй. Если вы уже выбрали или создали первый узел, нажатием правой кнопки мыши вы можете отменить команду.



Второй способ позволяет рисовать стержень, задавая начальный узел, направление и длину. Для его использования выберите команду **Рисование - Стержень - По Длине и Углу** . Команда переводит редактор в режим построения стержней в плоскости вида, задавая направление и длину. Стержень может быть построен только из уже существующего узла. Направление стержня может отсчитываться от горизонтали или от другого стержня. Если первым щелчком мыши выбирается узел, то отсчет угла ведется от горизонтали, если выбирается стержень, то отсчет угла ведется от этого стержня, в таком случае следующим щелчком необходимо выбрать узел. Следующий щелчок мыши фиксирует направление стержня, после чего можно изменять только длину стержня. Последний щелчок создает стержень. Правый щелчок мыши вызывает диалоговое окно (рисунок 6.6), которое позволяет уточнить угол и длину стержня или отменить команду.

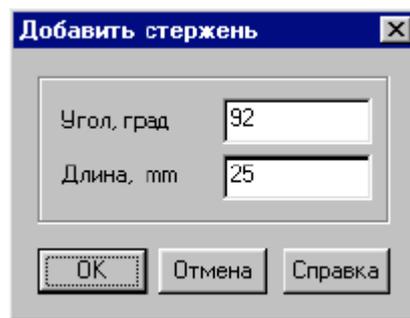


Рисунок 6.6 Диалоговое окно **Добавить Стержень**

Кроме этого вы можете поставить дополнительный узел на стержне или его продолжении командой **Рисование - Узел - На Стержне (Новый узел на стержне)** ). Первым щелчком мыши выберите нужный стержень, затем мышью двигайте появившийся узел, вторым щелчком мыши зафиксируйте положение узла в пространстве.

При этом появляется диалоговое окно, в котором можно подкорректировать положение узла на стержне. Положение узла задается двумя способами: координатой относительного одного из концов стержня или отношением полной длины стержня к длине части стержня. Переключатели группы *Положение Узла* позволяют выбирать один из этих способов. Переключатели группы *Отсчет координаты от* позволяют выбирать один из двух узлов стержня в качестве системы отсчета.

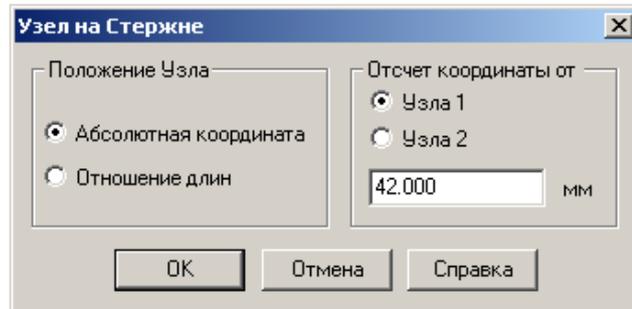


Рисунок 6.7 Диалоговое окно Узел на Стержне

Команда **Рисование - Стержень - Разбить Стержень**  позволяет разбить стержень на произвольное количество равных частей. После вызова команды на экране появляется диалоговое окно, которое позволяет задать число стержней.

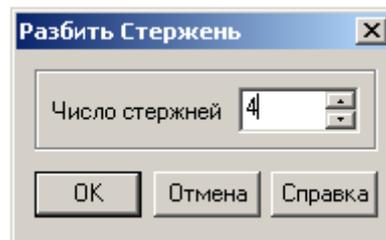


Рисунок 6.8 Диалоговое окно Разбить Стержень

### Сечения стержней

Каждому стержню должно быть присвоено определенное сечение. Сечения хранятся в библиотеках сечений. Система включает в себя библиотеки со стандартными профилями металлопроката. Файлы библиотек сечений имеют расширение *s/b*.

Чтобы задать стержню или группе стержней сечение из библиотеки используйте команды **Свойства - Сечение выделенным стержням (Сечения Выделенным)**  и **Свойства - Сечение всей Конструкции (Сечение всей Конструкции)** .

Создание нового сечения осуществляется в редакторе сечений, в который можно перейти командой **Файл - Новый - Сечение**. Процесс задание сечения полностью совпадает с заданием сечения в редакторах балок. Совпадают и команды этих двух редакторов. Кроме команд рисования сечения в редактор сечений *Structure3D* добавлены команды для создания библиотеки сечений, а также добавления и получения сечения из уже существующей библиотеки.

### Точка привязки сечения стержня

Ось стержня может проходить через любую точку сечения. Точка привязки сечения (или ее смещение) устанавливается командой **Свойства - Точка привязки сечения**. По умолчанию ось стержня



проходит через центр масс сечения, что соответствует нулевому смещению (рисунок 6.9 а). На рисунке 6.9 б показан пример стержня с привязкой сечения по центру снизу.

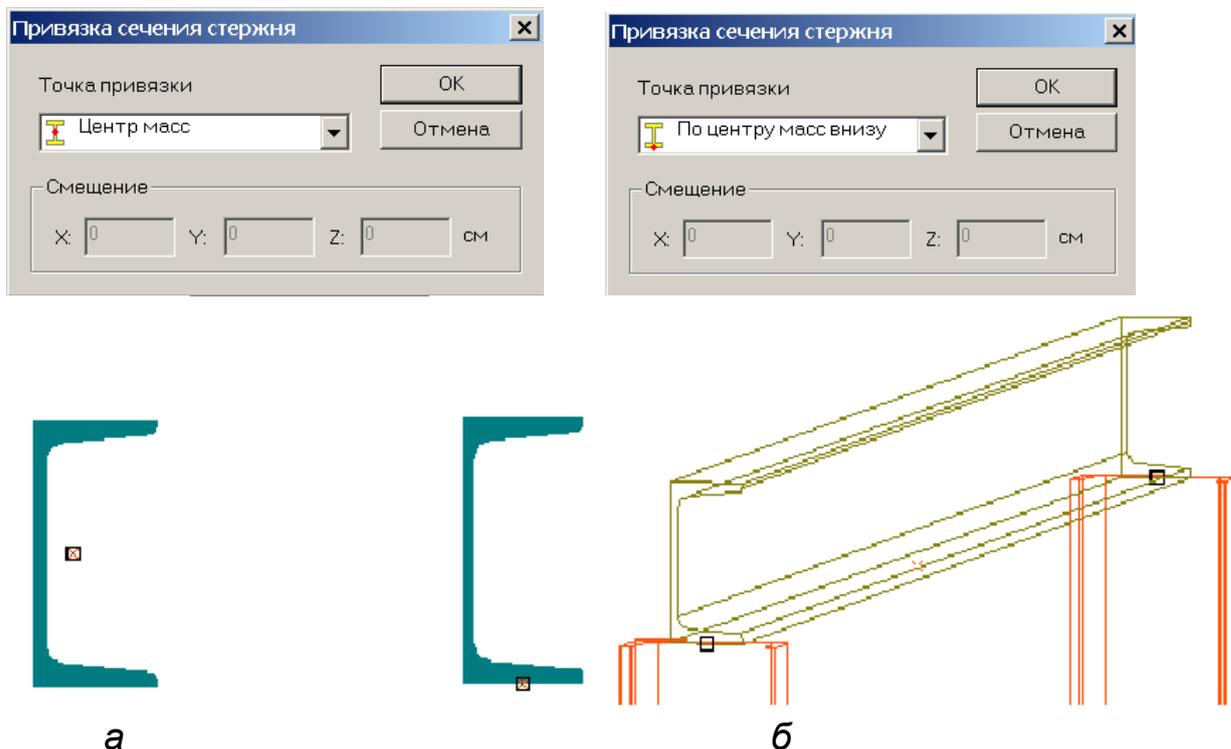


Рисунок 6.9 Точка привязки сечения

### Задание 3. Удалите построенные объекты

Для удаления объекта его вначале необходимо выделить. Для этого используются команды **Редактирование – Выбрать элемент** , **Редактирование – Выбрать группу элементов** . Затем выделенные элементы удаляются при помощи кнопки на клавиатуре **Delete**.

**Задание 4.** Создайте произвольные пластины в виде прямоугольника, параллелограмма, треугольника. Разбейте пластины

Пластина может быть задана как прямоугольник и параллелограмм, произвольный четырехугольник или как произвольный треугольник. Для этого используются команды **Рисование - Пластина – Четырехугольная прямоугольная** , **Рисование - Пластина – Четырехугольная произвольная**  и **Рисование - Пластина – Треугольная**  соответственно.



Кроме этого любую пластину можно разбить на одинаковые части командой **Рисование - Пластина - Разбить пластину** . *Количество элементов* задает количество элементов по двум направлениям в системе координат пластины. *Тип элемента* позволяет задать тип элемента. После разбивки исходная пластина удаляется.

**Задание 4.1**

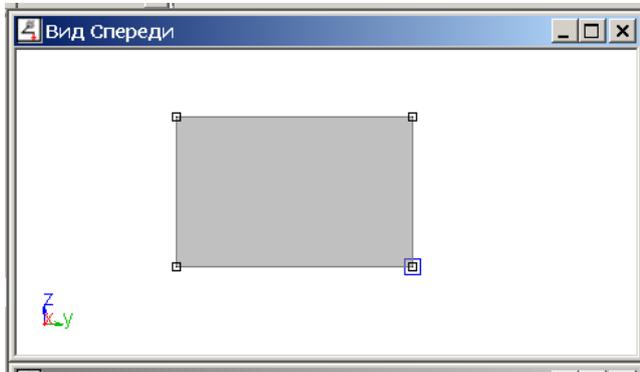


Рисунок 6.10

**Задание 4.2** Разбейте пластину на четырехугольные пластины: направление X – 10 элементов, направление Y – 20 элементов

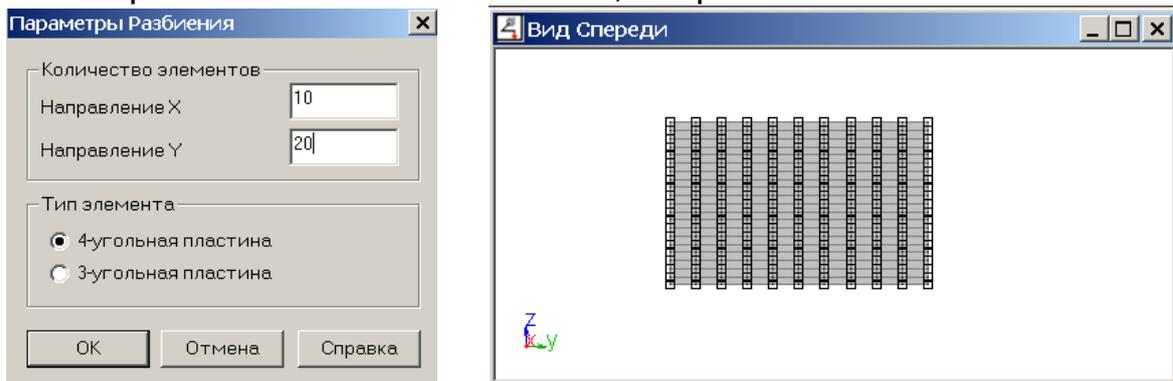


Рисунок 6.11

**Задание 4.3**

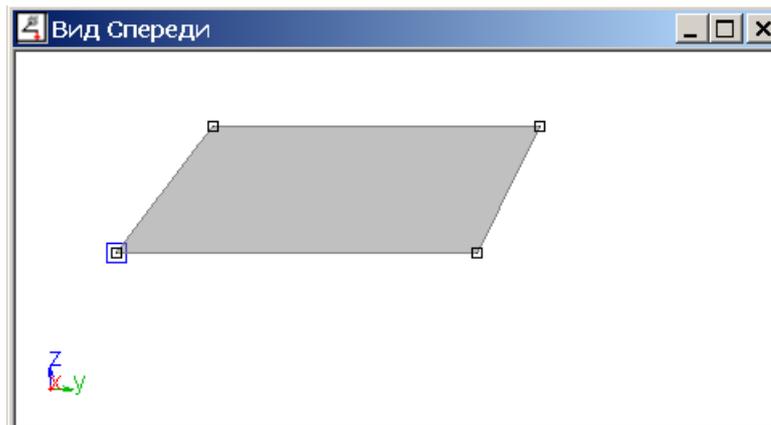


Рисунок 6.12



**Задание 4.4** Разбейте пластину  на четырехугольные пластины: направление X – 10 элементов, направление Y – 20 элементов

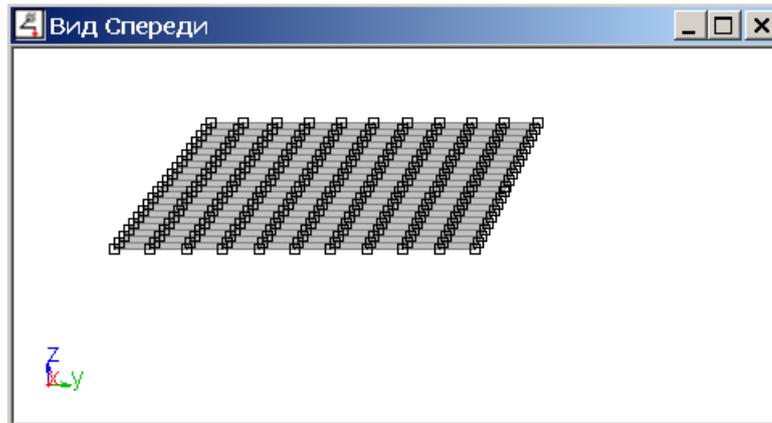


Рисунок 6.13

**Задание 4.5**

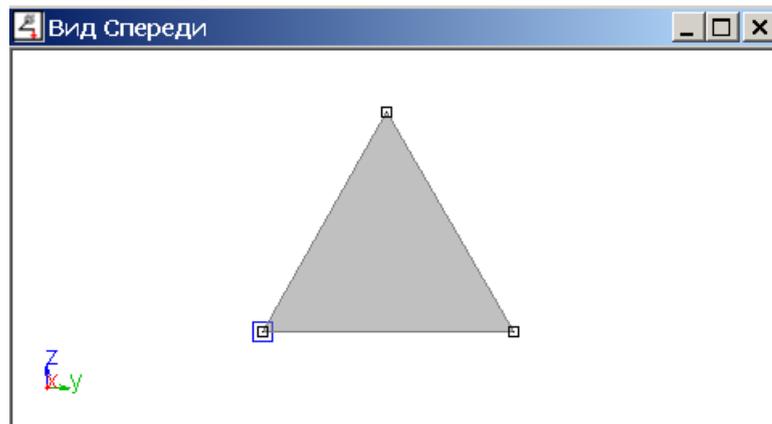


Рисунок 6.14

**Задание 4.6** Разбейте пластину  на треугольные пластины: направление X – 5 элементов, направление Y – 10 элементов

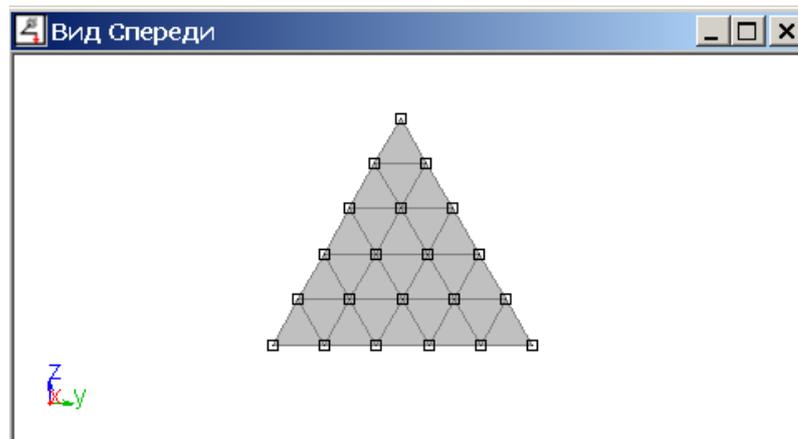


Рисунок 6.15

**Задание 4.7** Разбейте четырехугольник (рисунок 6.16, 6.17)

Любую область, в том числе и многосвязанную, можно покрыть сеткой из пластин. Для этого используйте команду **Рисование - Пластина - Произвольная с Разбиением** . Каждый щелчок мыши добавляет один узел в контур, для замыкания контура необходимо выбрать первый узел контура. После замыкания контура необходимо нажать клавишу "Enter"

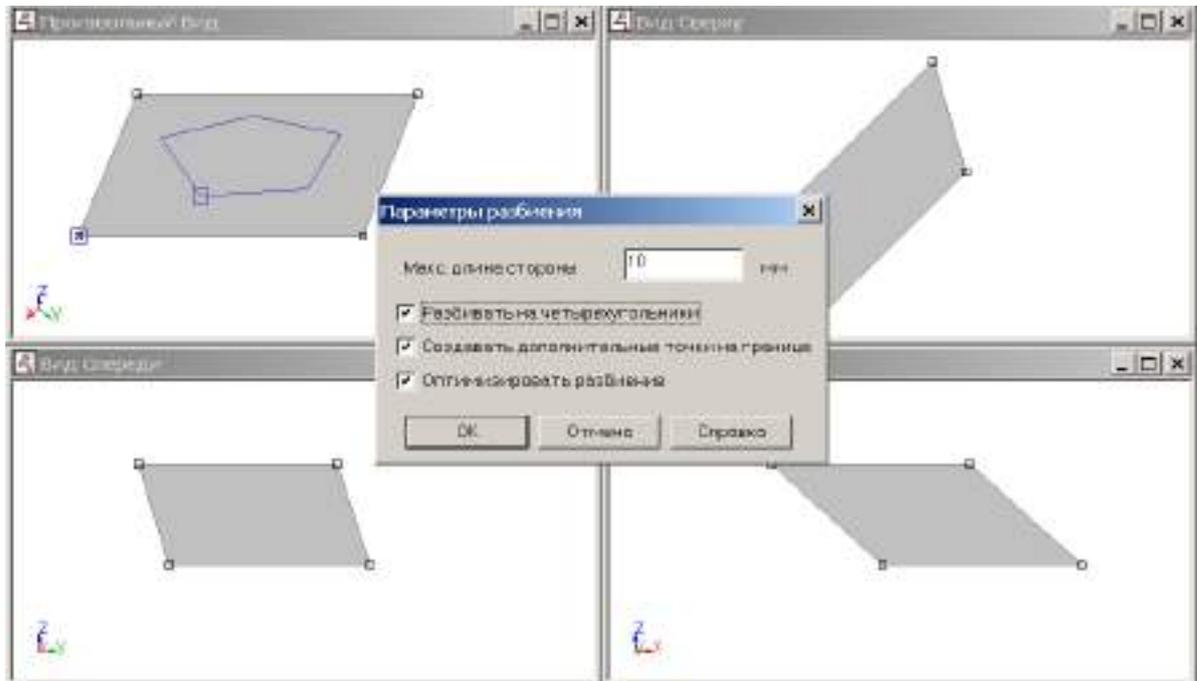


Рисунок 6.16

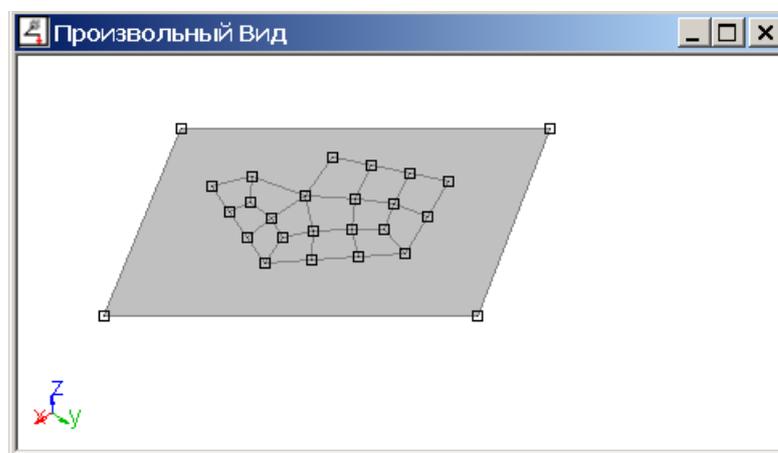


Рисунок 6.17

**Задание 5.** Создайте объемный элемент прямоугольный параллелепипед (**Рисование – Объемные элементы – Прямоугольный параллелепипед**) с размерами длина  $X = 100$  мм, длина  $Y = 120$  мм,



длина  $Z = 150$  мм (рисунок 6.18) и разбейте  его на 10 элементов (рисунок 6.19)

Команда **Прямоугольный параллелепипед** устанавливает режим создания прямоугольного параллелепипеда со сторонами параллельными глобальным осям координат, состоящего из 8-узловых конечных элементов. *Количество элементов* задает количество разбиений по ребрам параллелепипеда. В этом режиме могут использоваться уже существующие узлы или создаваться новые. Первым щелчком мыши задается точка вставки, вторым – точка, определяющая пространственную диагональ параллелепипеда. Если вы уже выбрали или создали первый узел, нажатием правой кнопки мыши вы можете отменить команду. Команда использует режим привязки, когда выбирает уже созданные узлы.

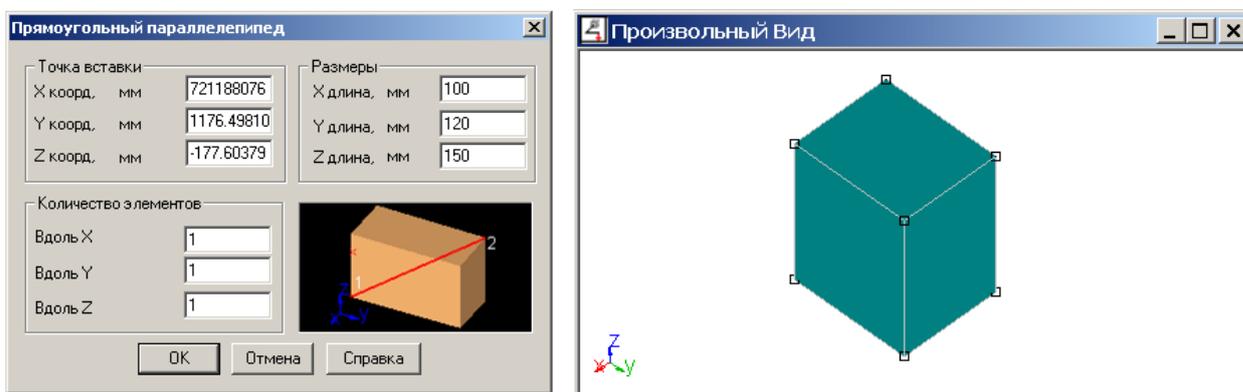


Рисунок 6.18 Диалоговое окно Прямоугольный параллелепипед

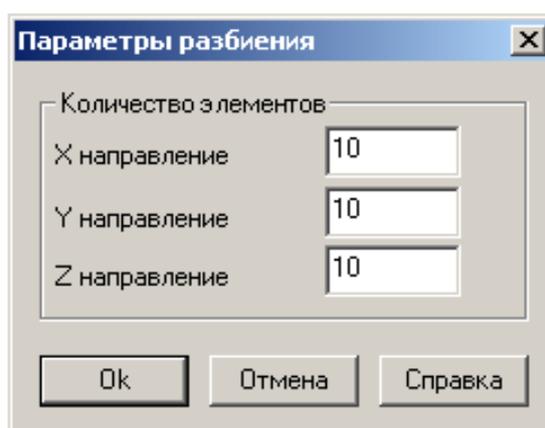


Рисунок 6.19 Диалоговое окно Параметры разбиения объемного элемента

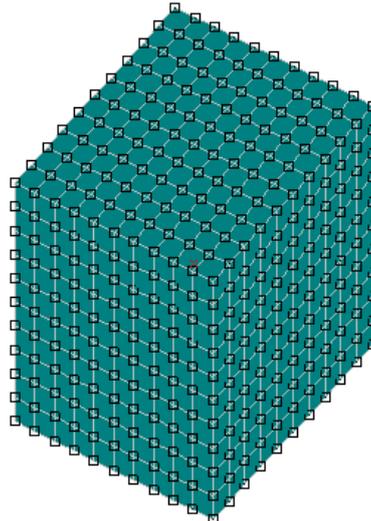


Рисунок 6.20 Конечный результат операций

**Задание 6.** Научитесь создавать произвольные объемные 8, 6, 4 – узловые объемные элементы

В редакторе вы можете создавать объемные элементы несколькими способами.

1) Командой **Рисование - Объемные элементы - 8-узловой элемент**, которая устанавливает режим создания 8-узловых объемных элементов. Элемент задается восемью узлами. В этом режиме могут соединяться уже существующие узлы или создаваться новые. Первым щелчком мыши задается первый узел, вторым второй и так далее. Если вы уже выбрали или создали первый узел, нажатием правой кнопки мыши вы можете отменить команду. Команда использует режим привязки, когда выбирает уже созданные узлы. При вводе узлов КЭ необходимо следить за локальной нумерацией узлов. Требуется следующий порядок ввода узлов: 0-1-2-3-4-5-6-7, 0-3-2-1-4-7-6-5, 0-1-5-4-3-2-6-7, 0-4-5-1-3-7-6-2 и т.п.

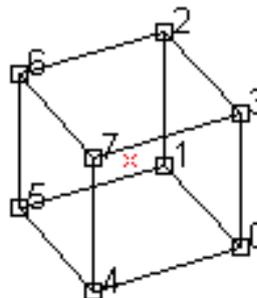


Рисунок 6.21

При неправильном порядке ввода узлов будет создан вырожденный элемент. Примеры вырожденных элементов:

0-1-2-3-5-6-7-4      0-1-2-3-4-7-6-5

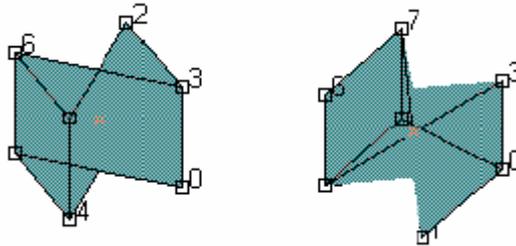


Рисунок 6.22

2) Команда **Рисование - Объемные элементы - 6-узловой элемент** устанавливает режим создания 6-узловых объемных элементов. Элемент задается шестью узлами. В этом режиме могут соединяться уже существующие узлы или создаваться новые. Первым щелчком мыши задается первый узел, вторым второй и так далее. Если вы уже выбрали или создали первый узел, нажатием правой кнопки мыши вы можете отменить команду. Команда использует режим привязки, когда выбирает уже созданные узлы.

При вводе узлов КЭ необходимо следить за локальной нумерацией узлов. Требуется следующий порядок ввода узлов:

0-2-3-1-5-4, 0-3-2-1-4-5, 1-4-5-0-3-2, 1-5-4-0-2-3 и т.п.

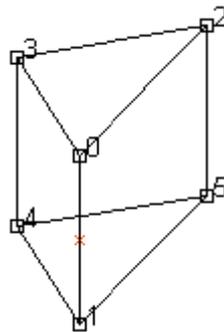


Рисунок 6.23

3) Команда **Объемные элементы - 4-узловой элемент** устанавливает режим создания 4-узловых объемных элементов.

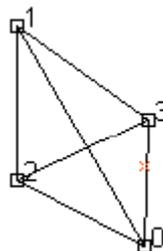


Рисунок 6.24



### Задание 7. Создайте толстостенную трубу

Команда **Рисование - Объемные элементы - Толстостенная труба** устанавливает режим создания толстостенной трубы, произвольно ориентированной в пространстве, состоящей из 8-узловых конечных элементов. Труба может быть как замкнутой, так и разомкнутой в окружном направлении. В этом режиме могут использоваться уже существующие узлы или создаваться новые. Если вы уже выбрали или создали первый узел, нажатием правой кнопки мыши вы можете отменить команду. Команда использует режим привязки, когда выбирает уже созданные узлы. *Первым щелчком мыши задается точка вставки, вторым – точка, определяющая длину и направление трубы, третьим – точка, определяющая начальный угол и внутренний радиус трубы (радиус вычисляется как расстояние от точки до оси трубы), четвертым – точка, определяющая конечный угол (отсчет угла идет по правилу правого винта, т.е. если смотреть по направлению вектора оси трубы, то угол отсчитывается по часовой стрелке) и внешний радиус трубы.*

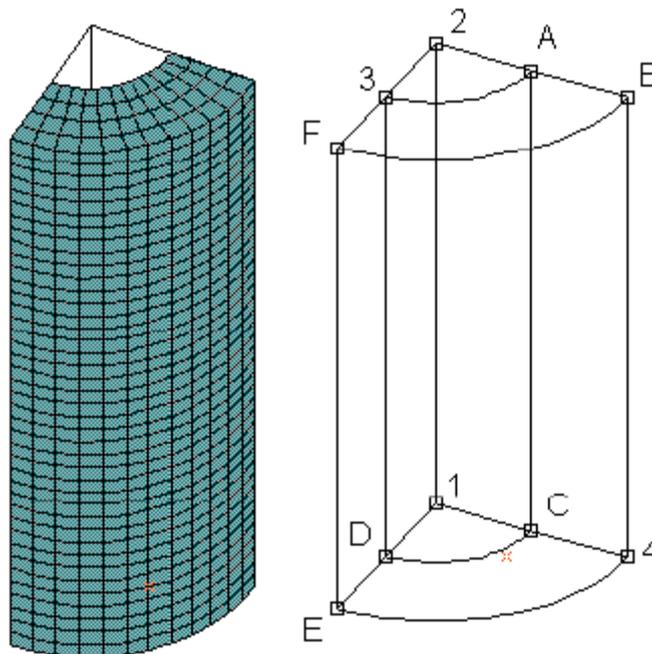


Рисунок 6.25

Для построения незамкнутого в окружном направлении участка трубы ZABFDC4E необходимо задать 4 точки: Точки 1 и 2 задают ось трубы, точка 3, определяющая начальный угол и внутренний диаметр трубы может располагаться в любом месте прямой D3, точка 4, определяющая конечный угол и внешний диаметр может располагаться в любом месте прямой B4.



В появившемся диалоге можно отредактировать все введенные ранее параметры. *Количество элементов* задает количество разбиений трубы в радиальном, окружном и осевом направлениях. Для построения трубы, замкнутой в окружном направлении, отметьте флажок *на 360 градусов*. В этом случае координаты точки, определяющей конечный угол, игнорируются.

**Задание 7.1** Создайте толстостенную трубу: внутренний диаметр 20 мм, внешний – 40 мм; количество элементов по толщине, образующей и длине 10 (рисунок 6.26)

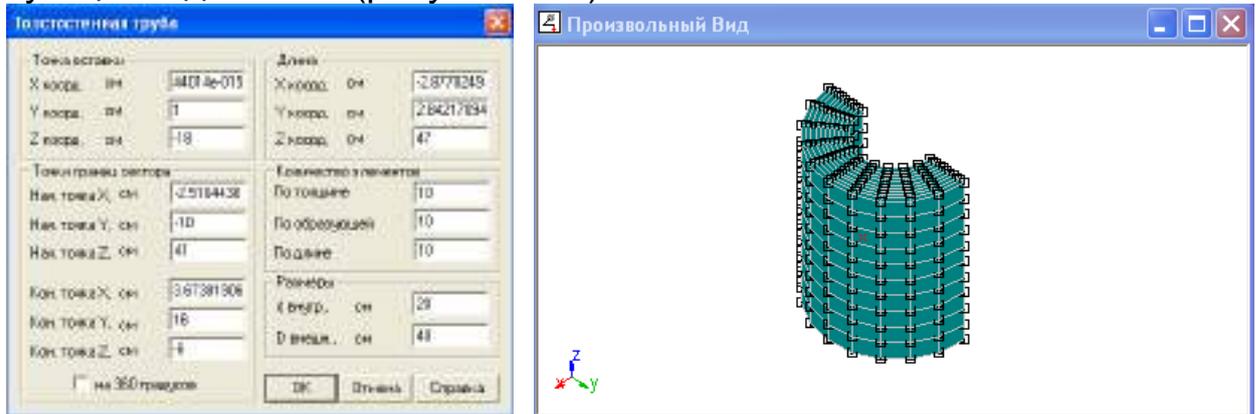


Рисунок 6.26

**Задание 7.2** Постройте эту же трубу, замкнутую в окружном направлении, отметив флажок *на 360 градусов*

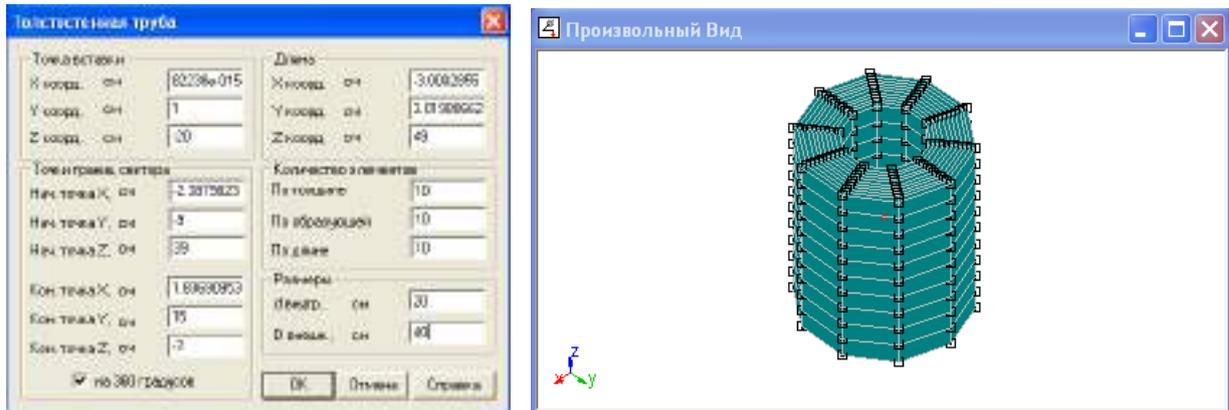


Рисунок 6.27

**Задание 8.** Задайте материал конструкции – Сталь 45 в нормализованном состоянии

Чтобы задать материал элементам конструкции используйте команду **Свойства - Материалы...** . Для задания материала группе элементов их необходимо предварительно выбрать командой **Редак-**



тирование - Выбрать элемент или Редактирование - Выбрать группу элементов.

**Задание 9.** Научитесь отображать конструкцию разными способами

Конструкция в редакторе может отображаться разными способами. При работе с редактором часто возникает необходимость отображать элементы только определенного класса, например только узлы и нагрузки на них и спрятать остальные элементы. Помимо этого некоторые элементы могут отображаться разными способами.

Для управления уровнем визуализации в редакторе используются инструменты, которые называются *фильтры*. Фильтры определяют, показывается ли определенный элемент и на каком уровне. Стержни могут показываться с помощью трех уровней визуализации:

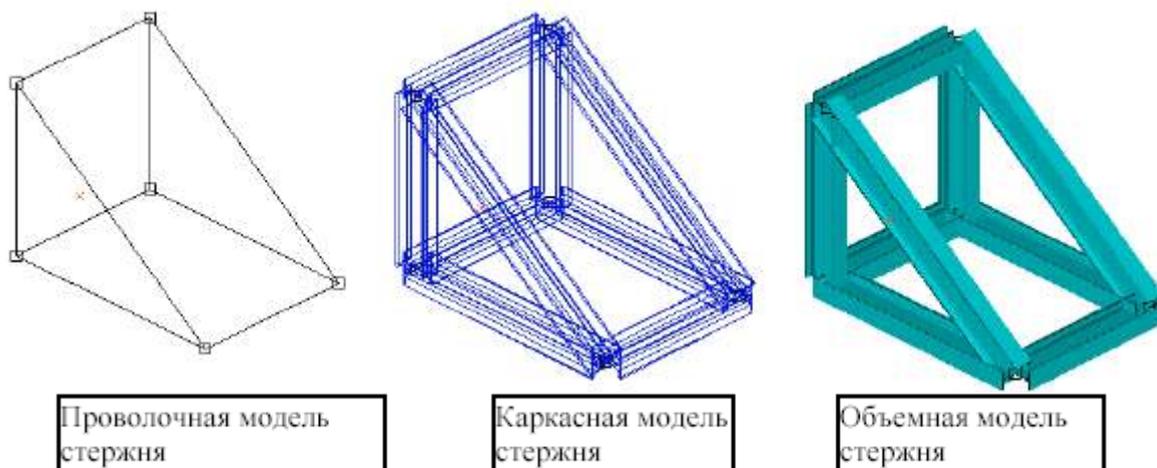


Рисунок 6.28

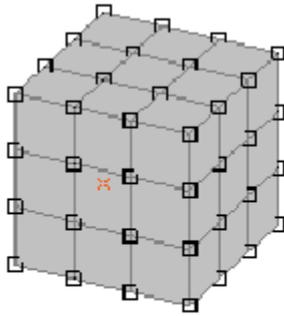
Пластины также отображаются с помощью трех уровней визуализации:



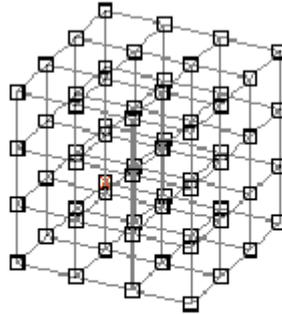
Рисунок 6.29



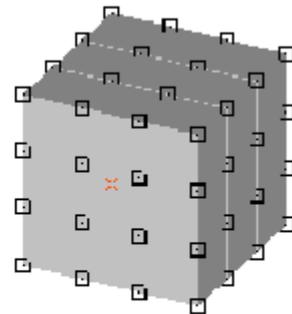
Объемные элементы:



Пластиночная модель  
объемного элемента



Каркасная модель  
объемного элемента



Модель объемного  
элемента с освещением

Рисунок 6.30

Все фильтры вида доступны пользователю на панели инструментов *Фильтры вида*



Рисунок 6.31

**Задание 9.1** Отобразите произвольную пластину  и отобразите ее тремя способами: плоская  (рисунок 6.32, а), проволочная  (рисунок 6.32, б) и объемная  (рисунок 6.32, в)

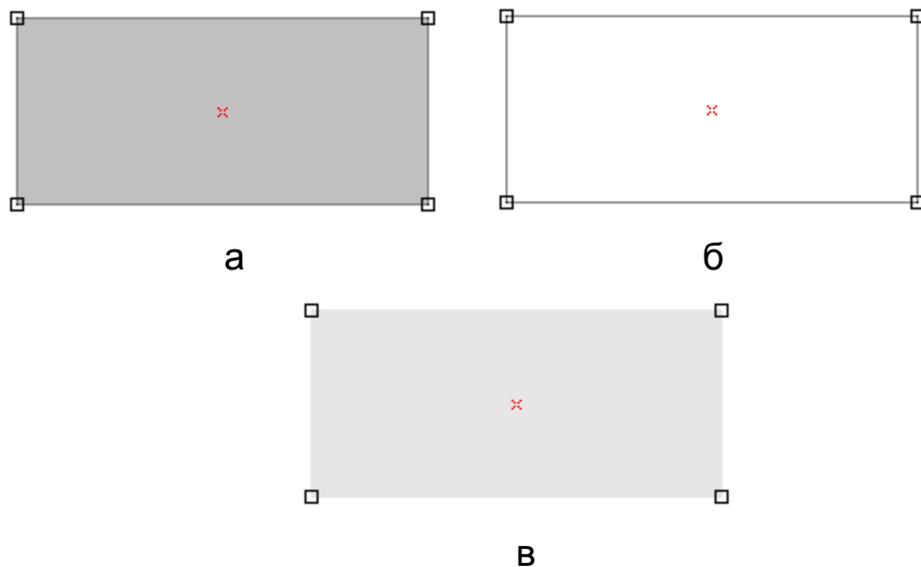


Рисунок 6.32

**Задание 9.2** Отобразите произвольный параллелепипед и отобразите его тремя способами: объемным  (рисунок 6.33, а), прово-



лочным объемным элементом  (рисунок 6.33, б) и объемным элементом с освещением  (рисунок 6.33, в)

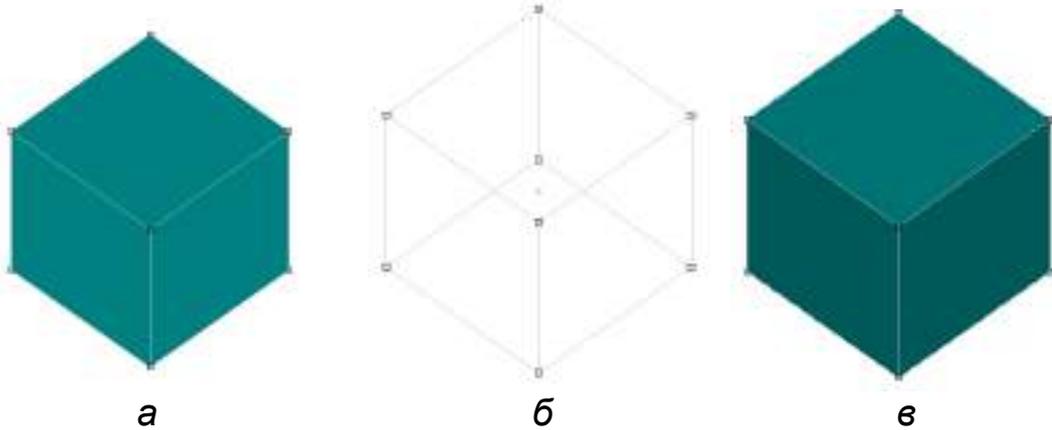


Рисунок 6.33

### Слои

При создании конструкции большой сложности, пользователь работает с большим количеством элементов. Для организации работы элементы объединяются в группы, которые называются *слоями*. По умолчанию все элементы хранятся в одном слое. Пользователь может создавать новые слои, назначать им имена, назначать активный, отключать/включать или удалять их. Редактор всегда имеет один активный слой, в который помещаются элементы при создании. Элементы, которые находятся в выключенном слое, не показываются на экране и недоступны для выделения.

Выделенные элементы могут быть перемещены из тех слоев, в которых они находятся в активный слой. При удалении слоя, который содержит элементы, последние перемещаются в активный слой. Организатор работы со слоями вызывается командой

**Инструменты - Слои....** Чтобы поместить выделенные элементы в активный слой используется команда **Инструменты - Добавить в текущий слой**.

### Упражнение 6.2 Операции с элементами

**Задание 1.** Начертите произвольную пластину (рисунок 6.34, а) и выделите ее (рисунок 6.34, б)

Для выполнения различных операций с конструкцией или частью конструкции необходимо предварительно выделить те элементы, для которых будут выполняться эти операции. Выбирать элементы конструкции можно по одному или группой. Для выбора используйте команды меню **Редактирование: Выбрать элемент**  или **Выбрать группу элементов** .

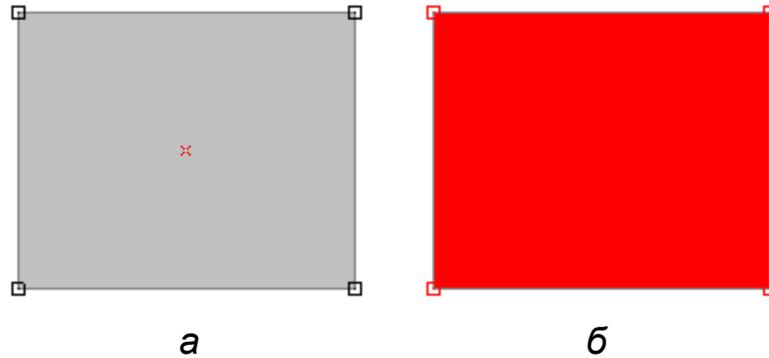


Рисунок 6.34

**Задание 2.** Скопируйте и вставьте пластину, используя команды **Копировать/Вставить**

Эта пара операций позволяет создать копию выделенной части конструкции в памяти и далее вставить скопированные элементы из памяти в редактор конструкций. Вставленная копия при этом выделяется и ее можно переместить в нужное место. Конструкция может быть вставлена многократно. Смотреть команды **Инструменты - Копировать**  и **Инструменты – Вставить** .

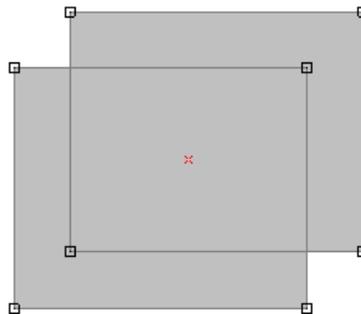


Рисунок 6.35

**Задание 3.** Умножьте конструкцию с числом секций равным 5 по образцу (рисунок 6.39)

Этот инструмент позволяет вам создавать многосекционные конструкции. Это операция характеризуется вектором расстояния между секциями и числом секций. Кроме этого данная операция позволяет создавать объемные элементы из пластин. При создании объемных элементов инструментом умножения необходимо помнить, что кроме объемных элементов создаются и пластины, копированием исходной на вектор умножения. Данная операция выполняется командой **Инструменты – Умножить** .

Вначале следует выбрать узел, стержень, пластину или группу произвольной комбинации этих элементов, чтобы команда стала дос-



тупной. Затем нужно задать вектор, характеризующий одну секцию и число секций. Первое нажатие мыши задает начало вектора, второе - конец вектора. После этого появляется диалоговое окно (рисунок 6.36), в котором можно подкорректировать значение вектора и задать число секций. При создании объемных элементов из пластин инструментом умножения необходимо помнить, что кроме объемных элементов создаются и пластины, копированием исходной на вектор умножения.

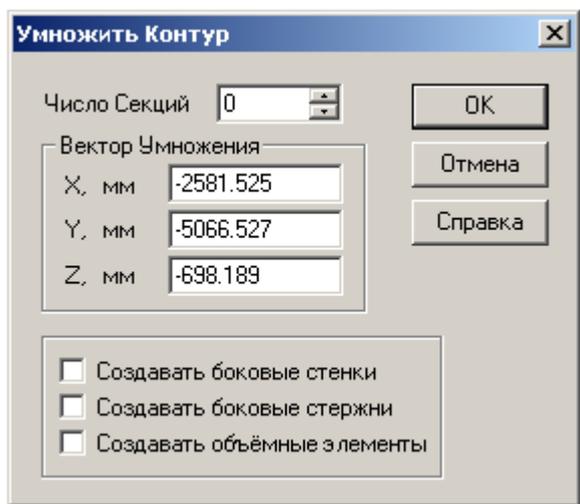


Рисунок 6.36 Диалоговое окно Умножить Контур

Ниже показаны примеры применения операции *Умножить* для разных конструкций и с различными параметрами.

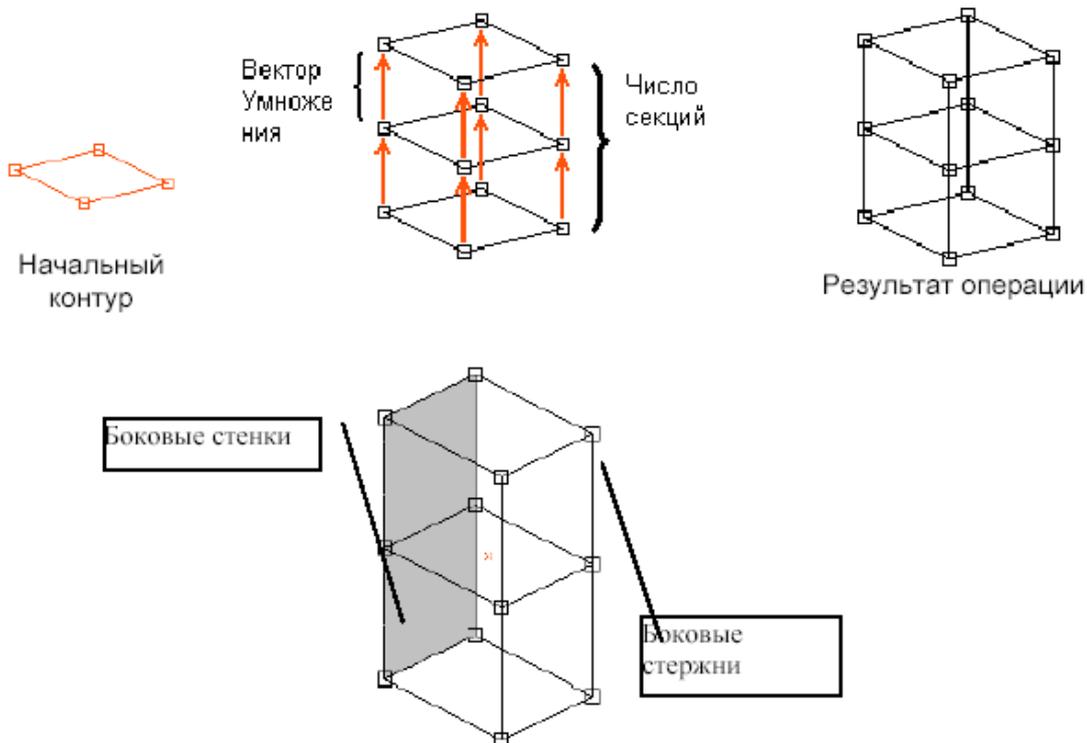


Рисунок 6.37 Пояснение операции Умножить (стержни и пластины)

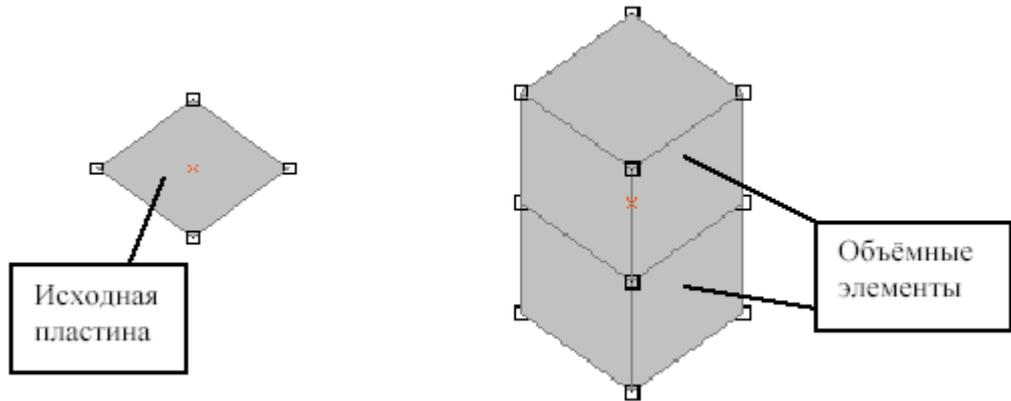


Рисунок 6.38 Пояснение операции Умножить (объемные элементы)

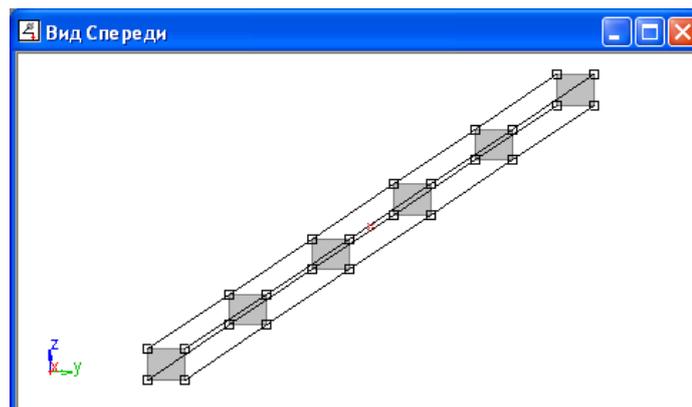


Рисунок 6.39

**Задание 4.** Вытолкните конструкции, так как это показано на образце (рисунок 6.41)

Операцию **Вытолкнуть**  (Инструменты - Выталкивание) можно рассматривать как модифицированную операцию **Умножить конструкцию**. Она позволяет создавать многосекционные конструкции с линейным изменением размеров и поворотом секций. Эта операция характеризуется вектором перемещения одной секции, числом секций, коэффициентом изменения размеров и углом поворота секций. Операция работает с выделенными элементами.

Вначале следует выбрать узел, стержень, пластину или группу произвольной комбинации этих элементов, чтобы команда стала доступной. Затем нужно задать вектор, характеризующий одну секцию. Первое нажатие мыши задает начало вектора, причем в качестве начала вектора необходимо задавать существующий узел. Этот узел становится базовым для изменения размеров, и поворот секции будет осуществляться вокруг данного узла в плоскости перпендикулярной вектору перемещения. Второе - конец вектора. После этого появляется диалоговое окно (рисунок 6.40), в котором можно подкорректиро-



вать значение вектора, задать число секций, полный угол поворота секции и коэффициент изменения размеров. Вектор умножения задается для одной секции, т.е. для N секций общий вектор умножения будет в N раз больше, а угол поворота и коэффициент изменения размеров задаётся для общего количества секций, т.е. для каждой секции угол поворота будет делиться на N, а размеры будут изменяться по линейному закону. При создании объемных элементов из пластин инструментом умножения необходимо помнить, что кроме объемных элементов создаются и пластины, копированием исходной на вектор выталкивания.

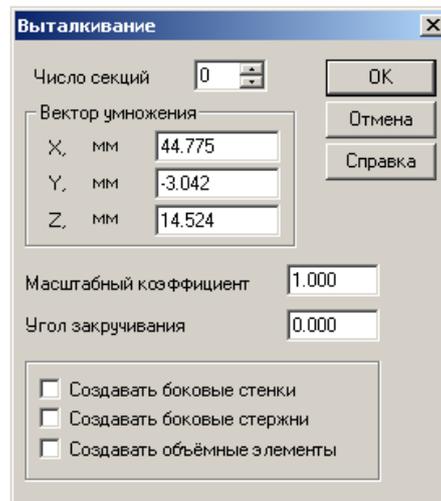


Рисунок 6.40 Диалоговое окно Вытолкнуть

Выталкивание происходит в несколько шагов:

- Копирование выделенных узлов и узлов, принадлежащих выделенным элементам на вектор выталкивания;
- Поворот скопированных узлов вокруг базового;
- Масштабирование узлов относительно базового;
- Создание стержней, пластин и объемных элементов;

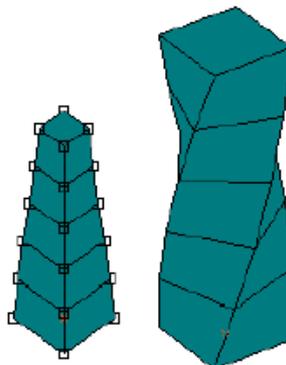


Рисунок 6.41 Результаты операции **Вытолкнуть**



### Задание 5. Поверните произвольную конструкцию

Операция **Повернуть**  (**Инструменты – Повернуть**) позволяет вам поворачивать элементы в плоскости вида, то есть вокруг вектора перпендикулярного видовой плоскости, поэтому перед поворотом необходимо перейти к нужному виду. Поворот осуществляется вокруг центра вращения. После того как вы выделили те элементы, которые вам необходимо повернуть щелкните мышкой в виде по выделенным элементам и поворачивайте элементы мышкой. Панель управления будет показывать вам текущий угол поворота. Приращение угла поворота осуществляется по *угловому шагу*. Правый щелчок мыши отменяет команду.

**Задание 6.** Создайте зеркальную копию (симметричную) конструкции (рисунки 6.42, 6.43)

Операция **Симметрия**  (**Инструменты - Зеркало**) позволяет создать зеркальную копию (симметрию) конструкции или части конструкции. Операция работает с выделенными элементами. Симметрия строится относительно плоскости симметрии, перпендикулярной виду. Для задания плоскости симметрии необходимо нарисовать линию - след плоскости симметрии в видовой плоскости. Для задания плоскости симметрии необходимо нарисовать линию - след плоскости симметрии в видовой плоскости. Первый щелчок мыши определяет первую точку линии, второй щелчок определяет вторую точку и создает копию. В данном режиме вы можете использовать привязку к узлам при рисовании линии. Правый щелчок мыши отменяет команду.

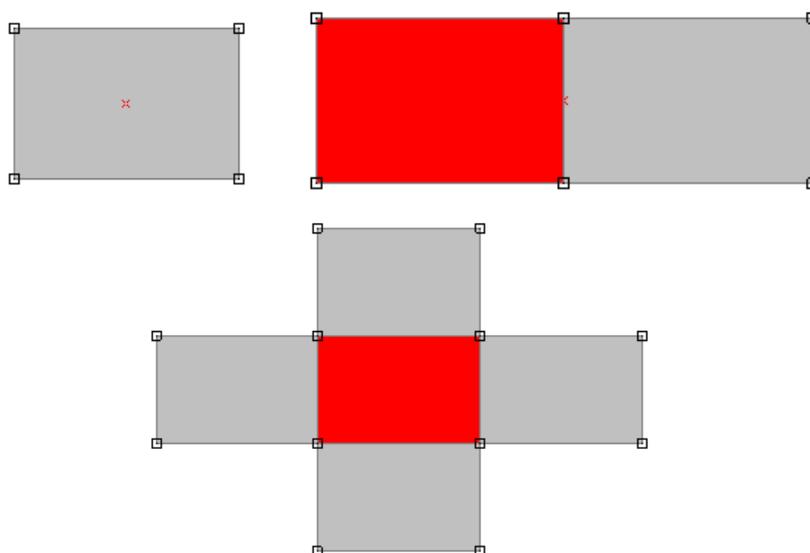


Рисунок 6.42

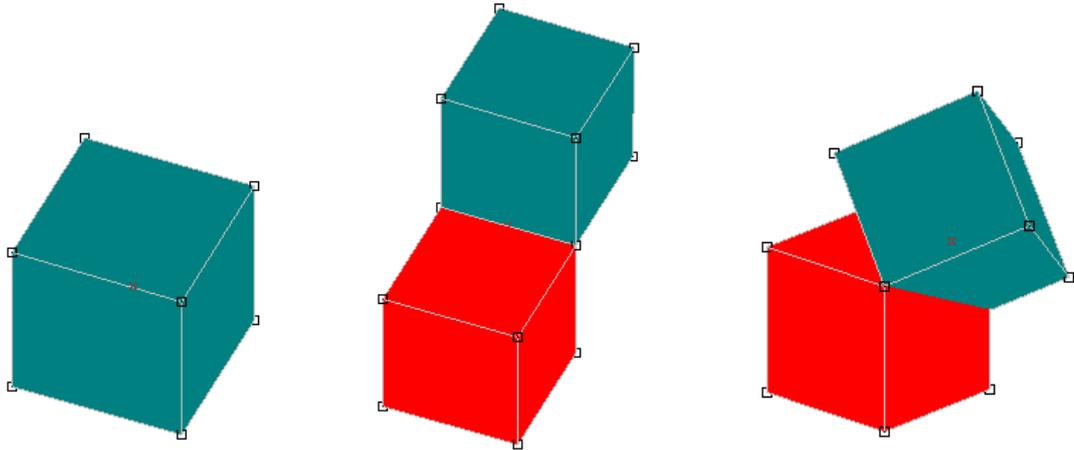


Рисунок 6.43

**Задание 7.** Создайте полярный массив по образцам

Операция **Полярный массив**  (**Инструменты – Полярный массив**) позволяет создать полярный массив из элементов конструкции или части конструкции. Операция работает с выделенными элементами. Массив характеризуется вектором вращения и полным углом поворота. Операция обладает возможностью не только копировать, но и соединять последовательные копии конструкции стержнями, пластинами или объемными элементами (см. команду Умножить). Угол поворота задается для общего количества секций, т.е. при общем количестве копий  $N$ , для каждой секции угол поворота будет делиться на  $N$ . Ниже приведен пример выполнения операции полярный массив для дуги из стержневых элементов с созданием боковых пластин (рисунок 6.44).

Вначале следует выбрать узел, стержень, пластину, объемный элемент или группу произвольной комбинации этих элементов, чтобы команда стала доступной. Затем нужно задать вектор - ось вращения. Первое нажатие мыши задает начало вектора, причем в качестве начала вектора необходимо задавать существующий узел. Через этот узел будет проходить ось вращения. Второе нажатие мыши - конец вектора. После этого появляется диалоговое окно, в котором задаются остальные параметры: количество секций, угол и включается возможность соединения копий стержнями, пластинами или объемными элементами.

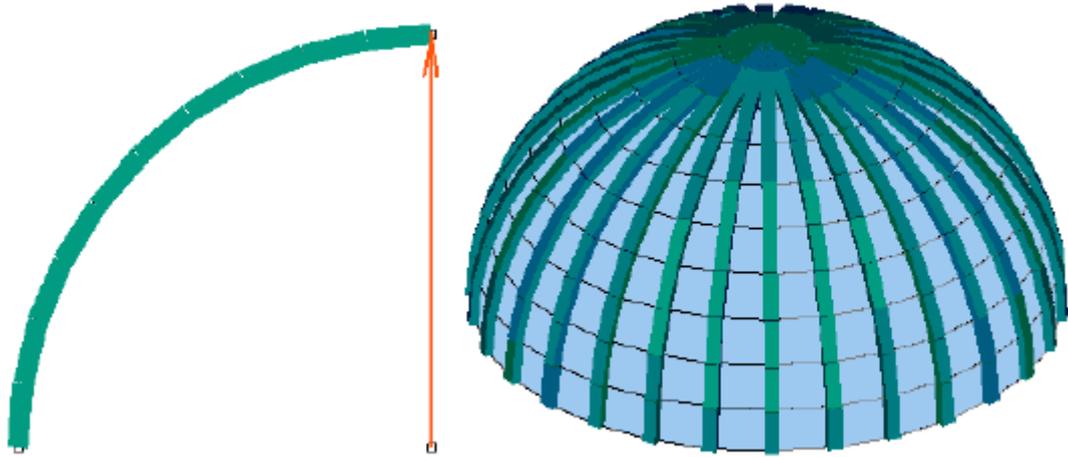


Рисунок 6.44 Операция **Полярный массив**

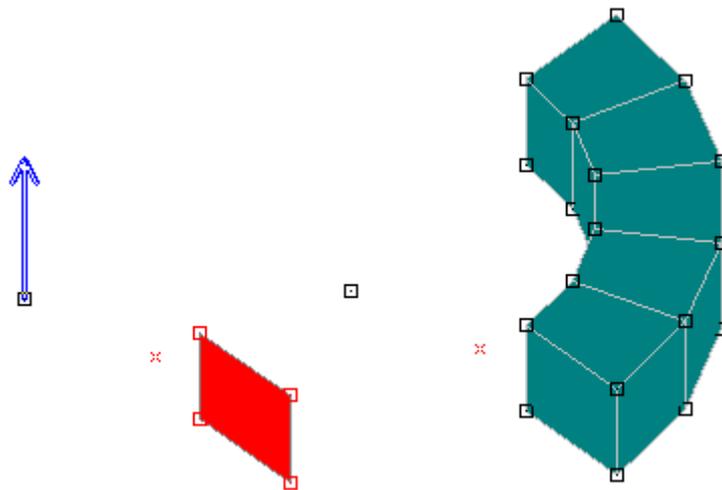


Рисунок 6.45 Пример применения команды **Полярный массив** с созданием объемных элементов

**Задание 7.1** Начертите произвольную дугу с числом стержней равным 40 и создайте полярный массив по образцу (рисунок 6.46)

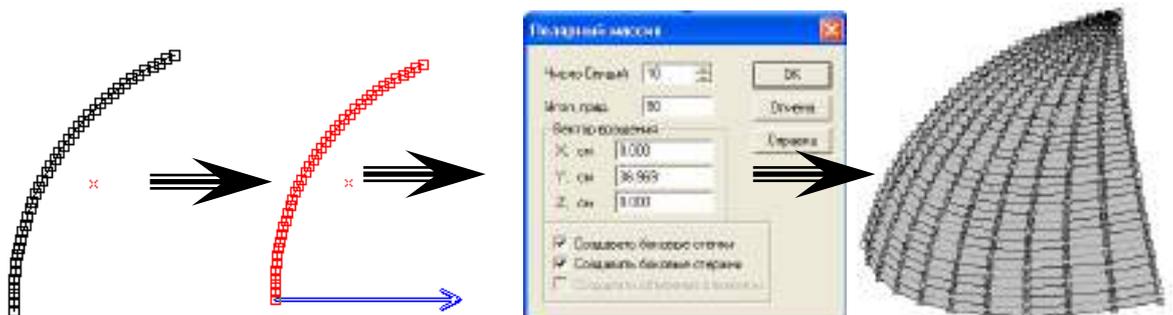


Рисунок 6.46



**Задание 7.2** Начертите произвольную треугольную пластинку и создайте полярный массив по образцу (рисунок 6.47)

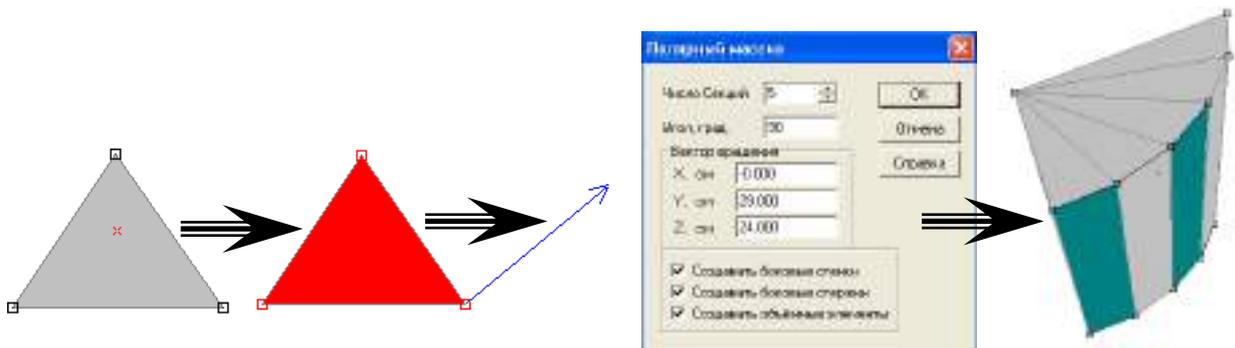


Рисунок 6.47

**Задание 8.** Научитесь выравнивать объекты

Операция **Выравнивание узлов**  (**Инструменты – Выравнивание узлов**) – позволяет выравнивать выделенные узлы по координатам базового узла. С помощью этого инструмента можно “спроектировать” узлы на плоскость, проходящую через базовый узел и параллельную одной из координатных плоскостей, или на прямую, проходящую через базовый узел и параллельную одной из осей координат.

Для проектирования узлов на плоскость параллельную плоскости XY глобальной системы координат необходимо выбрать узел, лежащий в этой плоскости и отметить галочкой *Выровнять по оси Z* в окне диалога. Если отметить пункты *Выровнять по оси X* и *Выровнять по оси Y* то узлы будут спроектированы на прямую, параллельную оси Z.

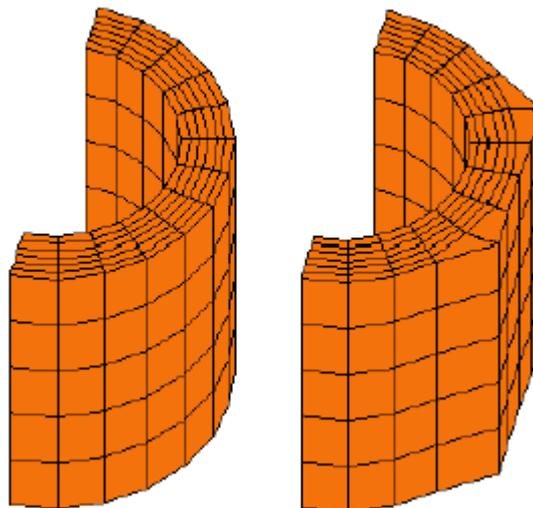


Рисунок 6.48 Операция Выравнивание узлов



### Задание 9. Создайте произвольные опоры

Редактор поддерживает различные типы опор. Опора в редакторе рассматривается как параметр узла. Опора определяется следующими параметрами: запретами перемещений узла вдоль осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и запретами поворота узла вокруг осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . В произвольном узле конструкции можно запретить перемещения во всех или некоторых направлениях. В общем случае можно запретить 6 перемещений: 3 поступательных и 3 вращательных. Задание опоры заключается в выборе запрещенных степеней свободы (перемещений) в узле. Направление степеней свободы задаются в системе координат узла. По умолчанию система координат узла совпадает с глобальной. Можно запретить перемещения узла конструкции в произвольном направлении, установив в нем соответствующим образом локальную систему координат.

Команда **Рисование - Опора**  устанавливает режим простановки опор.

Кроме этого, в узле могут быть заданы упругие закрепления. Упругое закрепление характеризуется жесткостью для соответствующей степени свободы (перемещения). Для поступательного перемещения - это сила при единичном перемещении узла в заданном направлении, для углового перемещения - это момент при повороте на один градус вокруг заданной оси. Упругое закрепление задается для локальной системы координат узла. Упругие закрепления задаются командой **Рисование - Упругое закрепление** .

### Упражнение 6.3 Работа с Меню Нагрузки

Нагрузки, действующие на конструкцию, могут быть приложены в виде узловых нагрузок, нагрузка на стержневые элементы и на пластины. Кроме этого, к конструкции может быть приложена нагрузка в виде перемещения в опорах и собственный вес конструкции.



Рисунок 6.49

**Задание 1.** Задайте узловую нагрузку и момент по образцу (рисунки 6.50-6.53)

К узлам могут быть приложены сосредоточенные силы и моменты. Узловая нагрузка задается в глобальной системе координат. Узло-



вая нагрузка задается командой меню **Нагрузки - Сила к Узлу (Сила )**.

После выбора узла появляется соответствующее диалоговое окно (рисунок 6.50). Все действия с нагрузкой (установка, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

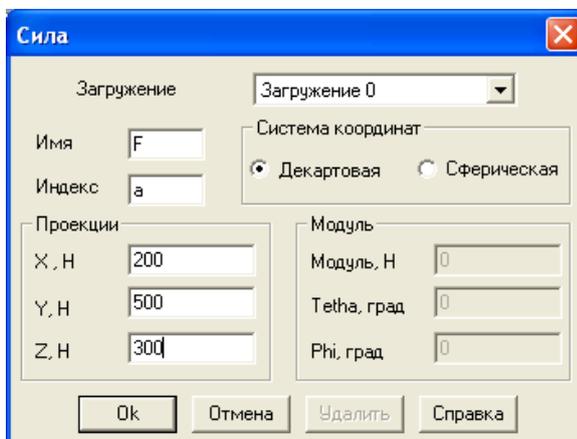


Рисунок 6.50 Диалоговое окно Сила

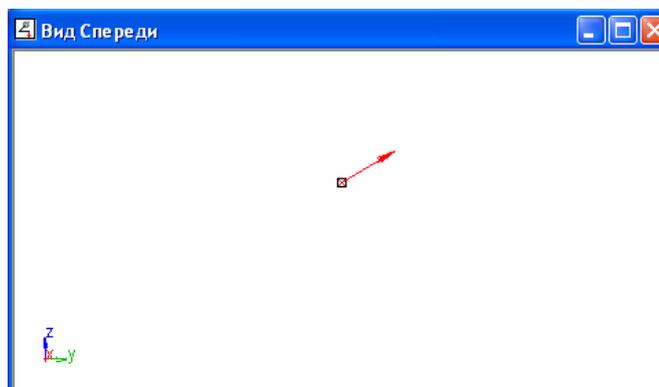


Рисунок 6.51

Также узловая нагрузка задается командой **Нагрузки - Момент к Узлу (Момент )**. После выбора узла появляется соответствующее диалоговое окно (рисунок 6.52). Все действия с нагрузкой (установка, изменение, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.

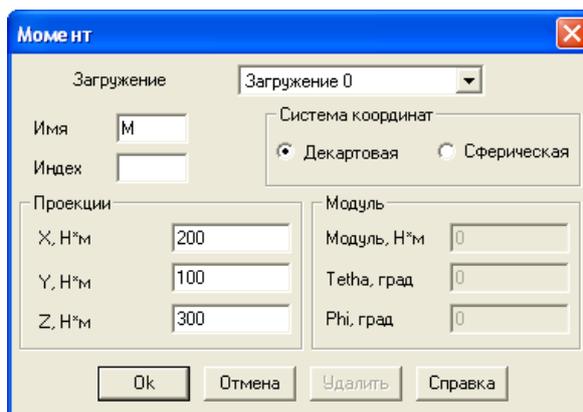


Рисунок 6.52 Диалоговое окно Момент

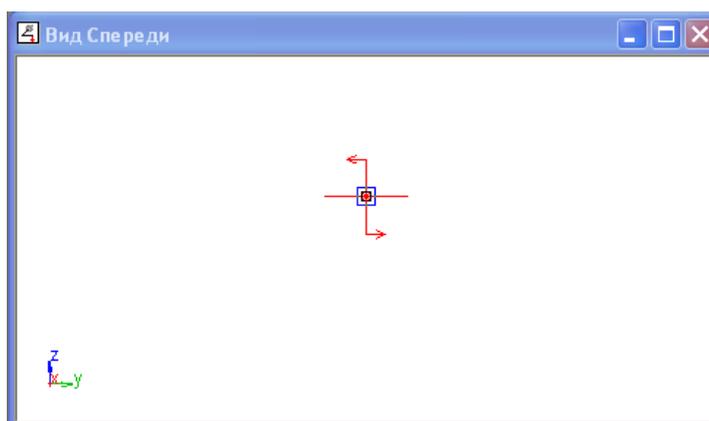


Рисунок 6.53

### **Задание 2.** Научитесь задавать нагрузки на стержневой элемент

На стержневой элемент могут быть приложены следующие типы нагрузок: *сосредоточенные силы и моменты, трапецевидные и равномерно распределенные силы и моменты*. Сосредоточенные силы и моменты могут быть приложены в произвольной точке стержня и задаются в системе координат стержня. Распределенные силы могут быть заданы как в системе координат стержня, так и в глобальной системе координат. Распределенные моменты задаются в системе координат стержня. Нагрузки к стержню прикладываются с помощью команд меню **Нагрузки - Локальная на Стержень (Нагрузка на стержень )** и **Нагрузки - Глобальная на Стержень**.

Команда **Нагрузка на стержень ** устанавливает режим постановки нагрузки на стержень или группу стержней. Чтобы ввести нагрузку на один стержень вам необходимо в этом режиме выбрать стержень, нажав на нем мышкой, после чего появляется окно редактора ввода нагрузок на стержень (рисунок 6.54). В этом редакторе становятся доступными команды для перехода в режим задания конкретного типа нагрузки из меню **Тип Нагрузки на Стержень (Нагрузки - Тип Нагрузки на Стержень )**. Ранее введенные нагрузки редактиру-



ются по нажатию правой кнопки мыши (в плоскости  $xy$  или в осевом направлении) или по нажатию правой кнопки мыши одновременно с клавишей SHIFT (в плоскости  $xz$ ).

Чтобы задать нагрузку группе стержней предварительно выделите требуемые стержни с помощью команды **Выбрать** и в этом режиме щелкните мышкой на одном из выделенных стержнях, после чего появляется окно редактора ввода нагрузок на этих стержнях. Далее выберите одну из команд меню **Тип Нагрузки на Стержень** для задания соответствующей нагрузки.

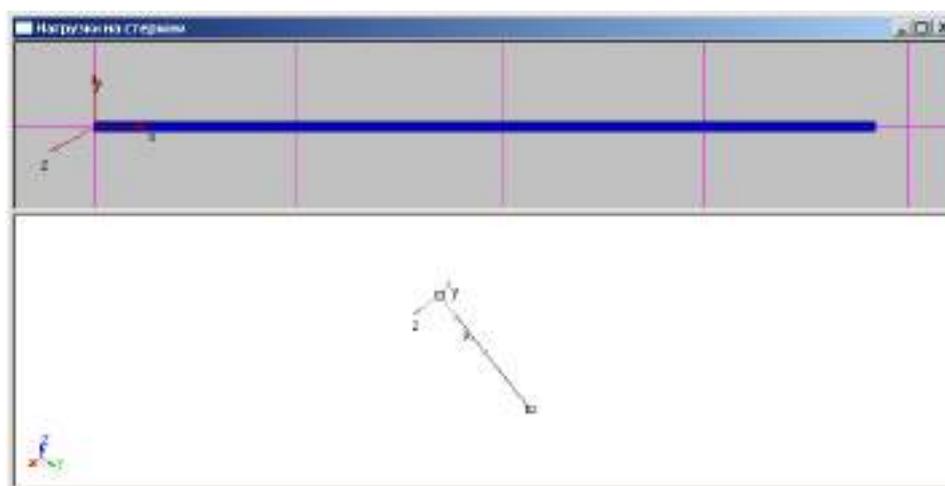


Рисунок 6.54 Окно для ввода нагрузки на стержни

Команда **Глобальная на Стержень** устанавливает режим постановки нагрузки на стержень или группу стержней. Чтобы ввести нагрузку на один стержень вам необходимо в этом режиме выбрать стержень, нажав на нем мышкой, после чего появляется окно редактора ввода нагрузок на стержень (рисунок 6.55).

Чтобы задать нагрузку группе стержней предварительно выделите требуемые стержни с помощью команды **Выбрать** и в этом режиме щелкните мышкой на одном из выделенных стержне, после чего появляется окно редактора ввода нагрузок на этих стержнях. Направление действия сил задается вектором в трехмерном пространстве. Координаты этого вектора вводятся в поля ввода *Направление в глобальной системе координат*. Например, если нужно задать Нагрузку 2 Н/мм в направлении обратном оси Z, то можно в поле *Значение силы* ввести 2 и в полях *Направление* ввести 0, 0, -1 или в поле *Значение силы* ввести -2 и в полях *Направление* ввести 0, 0, 1. Нагрузка добавляется в загрузение, установленное в списке загрузений.

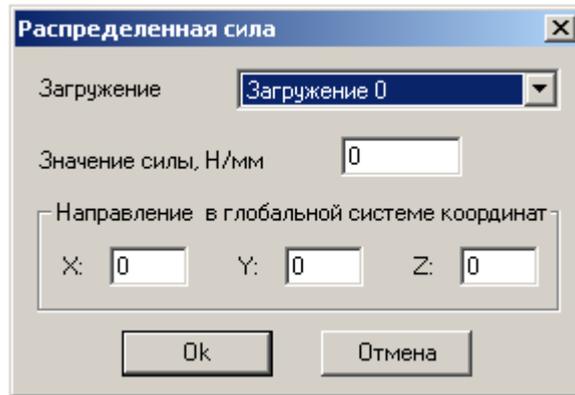


Рисунок 6.55 Диалоговое окно Распределенная сила

### Задание 3. Научитесь задавать нагрузки на поверхность

Поверхностная нагрузка представляется в виде равномерного давления на пластину командой меню **Нагрузки - Нормальная нагрузка на пластину** . Команда устанавливает режим ввода нормальной нагрузки на пластины. Нагрузка прикладывается на пластины выделенные с помощью команды **Выбрать**. В этом режиме нажмите левую кнопку мыши на одной из требуемых пластин, после чего появится окно диалога ввода нагрузки.

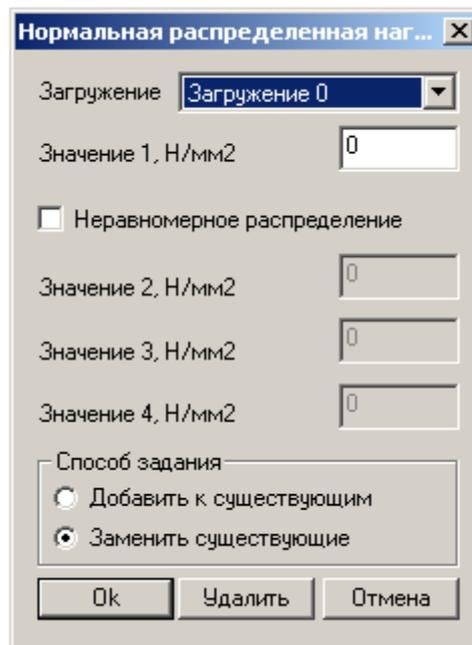


Рисунок 6.56 Диалоговое окно Нагрузка на пластину

Чтобы удалить нормальную нагрузку у выделенных пластин нажмите кнопку **Удалить** в этом диалоговом окне. Все действия с нагрузкой (добавление, замена, удаление) выполняются в загрузении, выбранном из списка загрузений.



## Перемещение в опоре

К конструкции может быть приложена нагрузка в виде перемещения в опоре. Перемещение может быть поступательным и вращательным. При расчете учитываются только перемещения в направлениях зафиксированных степеней свободы. Перемещение в опоре задается в локальной системе координат узла с помощью команды меню **Нагрузки - Перемещение в Узле (Перемещение в опоре )**.

## Сосредоточенная масса

В произвольный узел конструкции можно поставить сосредоточенную массу, которая будет учитываться при расчете собственных частот и вынужденных колебаниях. Чтобы задать массу группе узлов, они должны быть предварительно выделены командой **Выбрать** или **Выбрать группу**. Значение массы задается в локальной системе координат узла.

## Загружения

Загружение может включать в себя комбинацию нагрузок любого вида и характеризуется именем и двумя состояниями: включен/выключен и активный/неактивный. Далее поведение конструкции можно рассчитать от любого загружения и от комбинации загружений. Работа с загружениями аналогична работе со слоями. Если загружение выключено, то нагрузки из него не будут отображаться на экране. Если загружение активно, то при задании новой нагрузки по умолчанию будет предлагаться поместить ее в активное загружение.

Для создания нового или редактирования старого загружения используется команда **Нагрузки - Загружения**. Эта команда вызывает диалог *Загружения*, показанный ниже.

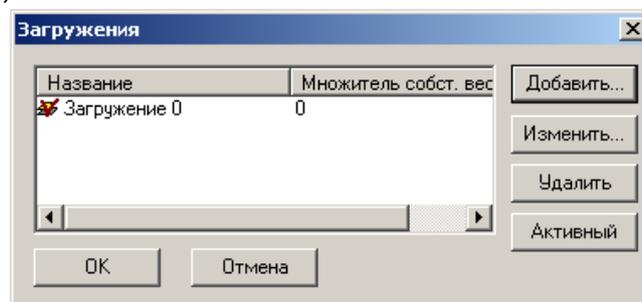


Рисунок 6.57 Диалог Загружения

Чтобы создать новое загружение нажмите кнопку *Добавить....*

Чтобы изменить старое загружение щелкните на нем в списке и нажмите кнопку *Изменить....*

Чтобы удалить загружение выделите его в списке и нажмите кнопку *Удалить*.



Нажмите кнопку *Активный* чтобы сделать активным выбранное в списке загрузке.

### Комбинация загрузений

Комбинация загрузений представляет собой линейную комбинацию загрузений. Для создания комбинации загрузений используется команда **Нагрузки - Комбинация загрузений....** Эта команда вызывает диалог *Комбинация загрузений*, показанный ниже. Чтобы добавить загрузку в комбинацию нужно выбрать загрузку в выпадающем списке загрузений, ввести для него множитель и нажать кнопку *Добавить*. Чтобы изменить множитель загрузки, выберите требуемое загрузку в списке загрузений или множителей, в поле Множитель задайте новое значение и нажмите кнопку *Изменить*. Чтобы удалить загрузку из комбинации загрузений, выберите требуемое загрузку в списке загрузений или множителей и нажмите кнопку *Удалить*.

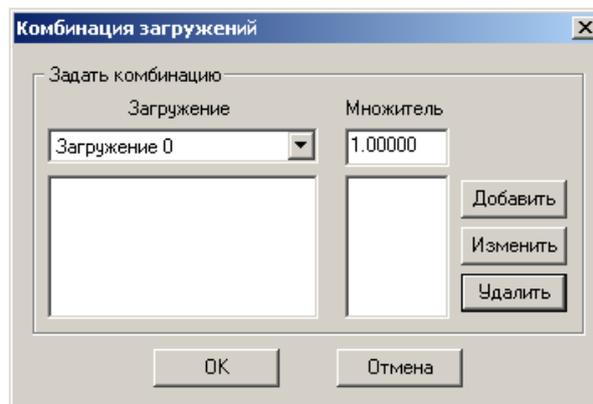


Рисунок 6.58 Диалог Комбинация загрузений

### Конструктивные элементы

Конструктивный элемент моделирует физически однородный элемент конструкции – стойку рамы, сплошнотенчатый ригель, пояс фермы и т. д. После создания для конструктивных элементов может быть проведена проверка несущей способности сечений.

В качестве конструктивного элемента рассматривается непрерывная цепочка стержневых конечных элементов, обладающая следующими свойствами:

- элементы, входящие в цепочку, лежат на одной прямой без разрывов;

- все элементы цепочки имеют одинаковый тип;

- у всех элементов цепочки одинаково ориентированы оси локальной системы координат;

- элементы цепочки могут входить только в один конструктивный элемент.



элементы, входящие в конструктивный элемент имеют один и тот же материал.

Основные принципы работы с конструктивными элементами совпадают с принципами работы со слоями (см. выше). Порядок создания конструктивного элемента:

1) Создать и сделать активным пустой конструктивный элемент и закрыть окно диалога;

Для этого используется команда **Результаты - Конструктивные элементы**, которая вызывает окно диалога (рисунок 6.59), для создания, редактирования свойств, удаления конструктивных элементов, а также просмотра результатов расчёта и подбора сечений.

В левом верхнем поле диалога находится список конструктивных элементов. Стержни, входящие в выбранный элемент, подсвечиваются в текущем виде редактораконструкций.

Для создания нового конструктивного элемента в указанном диалоге нажмите кнопку *Новый элемент*, затем выберите в списке новый элемент и нажмите кнопку *Активный*.

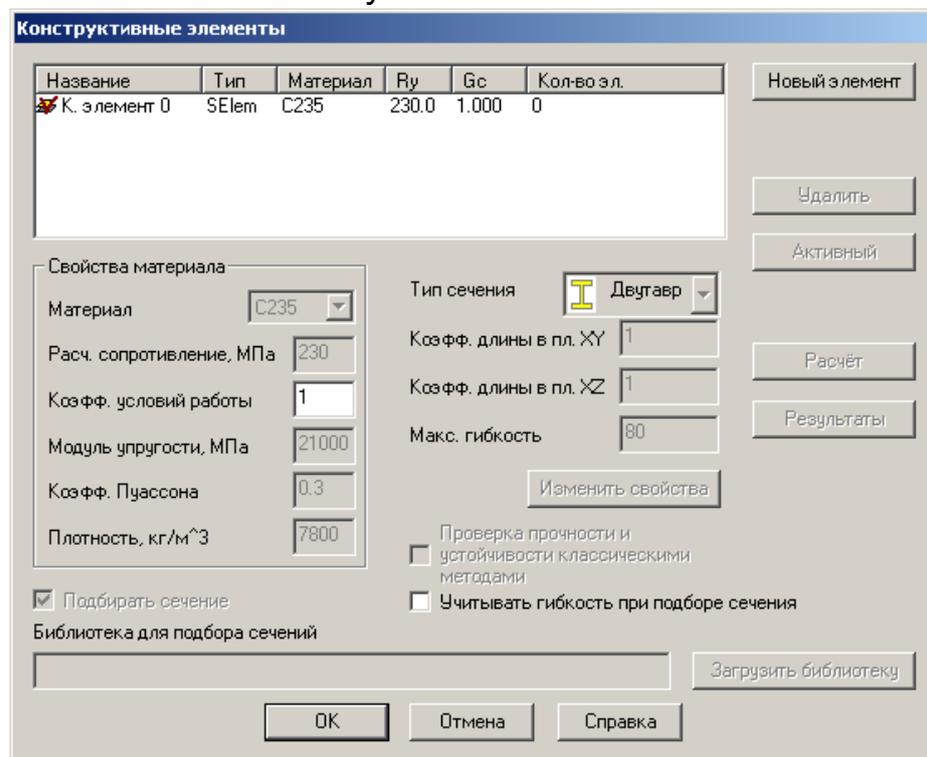


Рисунок 6.59 Диалоговое окно Конструктивные элементы.





ла и крестик в левом верхнем углу от него. Крестик соответствует точному местоположению указателя мыши. Перемещение указателя мыши по полю окна сопровождается непрерывным отслеживанием текущих координат его положения на панели статуса. В нашем (и большинстве других) случае нет необходимости знать точные координаты создаваемого узла. Поэтому щелкаем левой кнопкой мыши в произвольном месте поля окна, и в этом месте появляется узел. Если нужно отредактировать положение этого узла либо определить его координаты, щелкните в этом же режиме по выбранному узлу правой кнопкой мыши. Тогда появится диалоговое окно, в котором можно уточнить координаты созданного узла либо организовать в этом узле шарнир. В последнем случае необходимо разрешить какие-либо повороты вокруг осей в глобальной или локальной системе координат. Глобальная система координат изображается в левом нижнем углу каждого окна.

Итак, первый узел нашей будущей конструкции создан. Далее нам нужно будет отрисовать стержень в соответствии с размерами, указанными на рисунке 6.61.

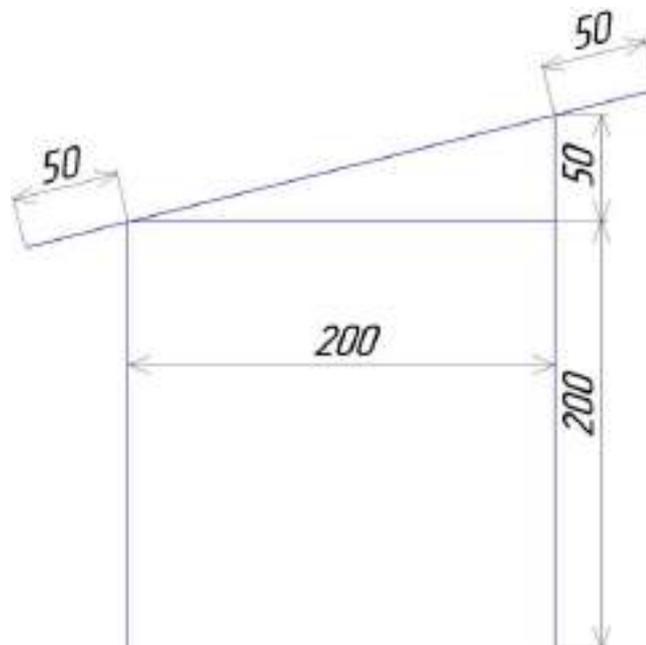


Рисунок 6.61 Плоская передняя рама конструкции

Проще всего это сделать, воспользовавшись режимом **Стержень по длине и углу** , которому соответствует кнопка на панели инструментов **Нарисовать** (меню **Рисование-Стержень-По длине и углу**). Она становится активной только после того, как был создан хотя бы один узел. При нажатии этой кнопки указатель мыши приобретает вид, соответствующий созданию нового стержневого элемента с крестиком для точного позиционирования. Как только мы приближаемся



к выбранному узлу, он подсвечивается синим цветом, что свидетельствует о том, что к нему будет осуществлена привязка. Щелкаем в зоне чувствительности привязки, и, отпустив левую кнопку мыши, перемещаем указатель в направлении будущего стержня. Для точного задания положения стержня щелкаем правой кнопкой мыши, после чего появляется диалоговое окно **Добавить стержень** для задания координат стержня.

В этом окне задается положение стержня по длине и углу. Угол (угловое положение) стержня измеряется в градусах в направлении против часовой стрелки относительно положительного направления горизонтальной оси. Длина стержня измеряется в тех же единицах, которые приняты для данной конструкции. При появлении диалогового окна **Добавить стержень** необходимо уточнить угол и длину создаваемого нами вертикального стержня. В окна этого диалога следует ввести значения 90 (вертикальное направление, вверх) и 200. После нажатия кнопки «ОК» на окне (или **ENTER** на клавиатуре) появится стержень длиной 200 см, направленный вертикально вверх относительно первого узла конструкции.

Скорее всего, целиком стержень такой длины не поместится в окно на экране монитора. Существует специальный режим **Подогнать под окно** , позволяющий вписать всю конструкцию в соответствующее окно на экране монитора. Кнопка этого режима расположена на панели инструментов **3D Вид**, располагающейся в правой верхней части окна. Затем, используя кнопки этой же панели инструментов **Увеличить вид**, **Уменьшить вид** и **Прокрутить вид** , добиваемся положения отрисованного нами стержня в соответствии с его положением в раме (рисунок 6.61).

Далее таким же образом изображаем последовательно горизонтальный и вертикальный стержни, каждый длиной по 200 см. В результате получается П-образная конструкция (рисунок 6.62).

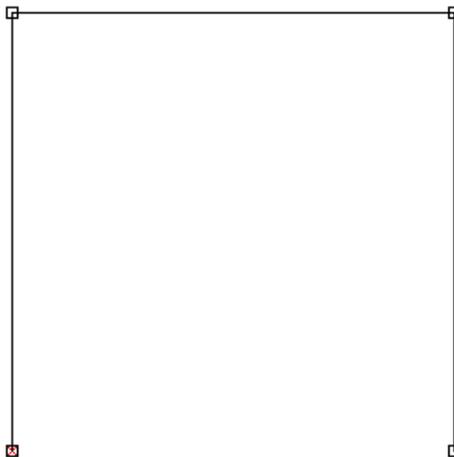


Рисунок 6.62



Аналогично из правого верхнего узла получившейся рамы создаем вертикально вверх стержень длиной 50 см.

Для получения балочного элемента, соответствующего козырьку крыши, следует соединить левый верхний узел П-образной конструкции с верхним узлом последнего стержня, созданного справа. Сделать это проще всего с использованием режима **Новый стержень**  - Кнопка этого режима — шестая сверху в левой вертикальной панели инструментов (меню **Рисование-Стержень-По Координатам**). Этот режим в основном предназначен для соединения стержнями двух узлов конструкции, но может использоваться также и для создания новых стержней. Для этого следует выбрать узел, к которому будет осуществлена привязка (или, отслеживая текущие координаты начального узла стержня, выбрать точку начала стержня), и щелкнуть по нему левой кнопкой мыши. Затем, перемещая мышь, отметить второй конец стержня другим щелчком мыши. Второй конец стержня может быть также выбран исходя из отслеживания текущих координат второй точки стержня, которые появляются в окне статуса. Там отображается текущая длина отрезка в заданных единицах конструкции и угол наклона этого стержня к положительному направлению горизонтальной оси.

Для получения нового узла (как на стержне, так и на его продолжении) нужно использовать режим **Новый узел на стержне**, который включается кнопкой на панели инструментов **Нарисовать** (меню **Рисование-Узел-На стержне**).

Ему соответствует четвертая сверху кнопка на левой вертикальной панели инструментов. Далее выбираем тот стержень конструкции, на котором (или на продолжении которого) необходимо создать новый узел. Для этого перекрестие указателя мыши следует привести на стержень и щелкнуть по нему. Выделится стержень, и появятся его продолжения влево и вправо. Перемещая мышь в том направлении, где создается новый узел, нужно щелкнуть левой кнопкой мыши еще раз, после чего появится диалоговое окно ввода координат нового узла (рисунок 6.63).

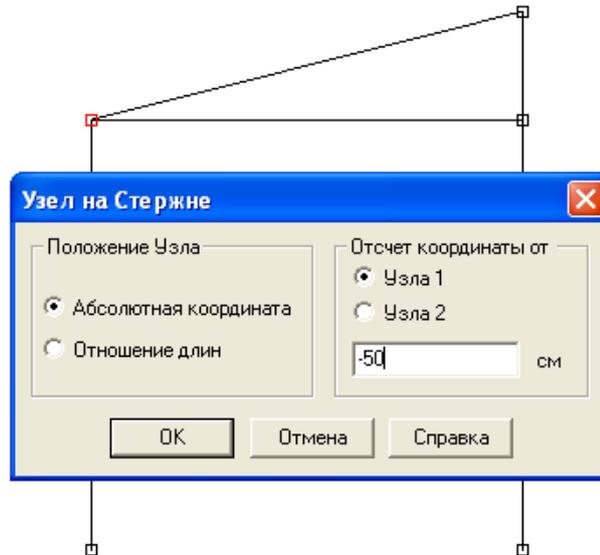


Рисунок 6.63 Диалоговое окно **Узел на Стержне**

Положение нового узла можно задать двумя способами:

- абсолютной координатой (относительно начала или конца стержня);
- отношением длин.

В нашем случае удобнее задавать положение нового узла относительно узлов на концах стержня. Узел 1 (начало стержня), относительно которого показывается текущее значение координат, по умолчанию выделяется красным цветом.

В окне ввода координаты нужно обязательно уточнить ее значение, имея в виду, что знак определяет направление этой координаты относительно выделенного узла. Знак «плюс» показывает направление «внутри» стержня, а «минус» — «наружу» относительно выделенного узла.

Если есть необходимость задать координаты нового узла (или узла на стержне) относительно другого конца стержня, выберите **Отсчет координаты от Узла 2**. Выбранный узел опять будет выделен красным цветом. Нажатие кнопки «ОК» (или **ENTER** на клавиатуре) позволит завершить ввод нового узла.

Если вновь созданный узел расположен вне стержня на его продолжении, то его следует соединить с узлом на стержне с помощью режима **Новый узел на стержне**.

Аналогично продлеваем крышу автобусной остановки в другую сторону (рисунок 6.64).

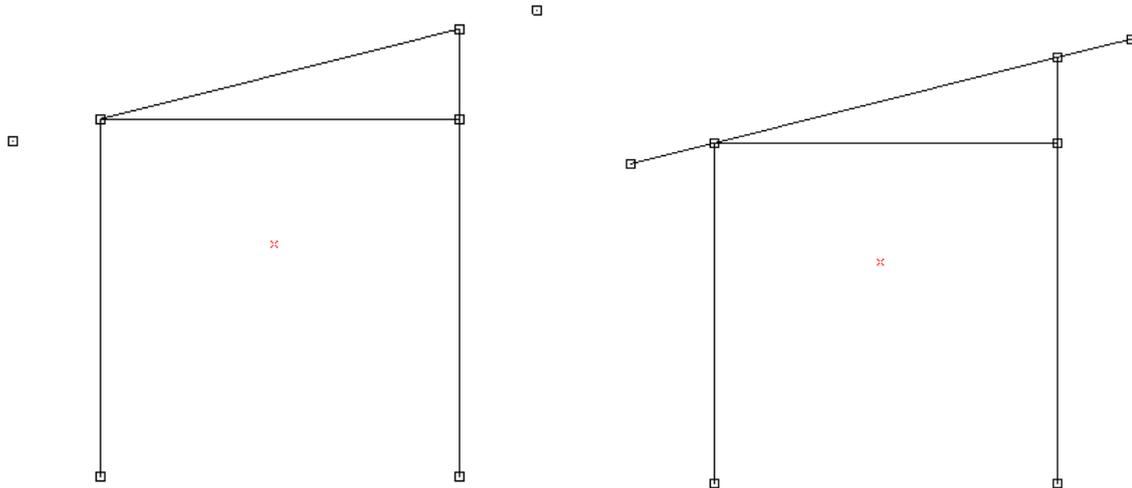


Рисунок 6.64

**СОВЕТ ПОЛЬЗОВАТЕЛЮ!** Нужно стараться изобразить на плоской раме максимально возможное количество присущих данной конструкции атрибутов, таких как выноски, крыши и т. п., а только потом размножить плоскую раму в требуемом направлении. Это значительно упростит процесс создания трехмерной конструкции и сократит затрачиваемое на него время.

### Размножение плоской рамы в заданном направлении

Для размножения данной плоской рамы в каком-либо направлении желательно находиться в том окне вида, в котором направление размножения будет явно видно. Лучше всего для этого подходят **«Вид спереди»** или **«Вид сверху»**.

Но, если построение плоской рамы проходило в одном окне (напомним, что до сих пор мы работали в окне «Вид слева»), а размножение предполагается осуществлять в другом, то предварительно нужно нажать среднюю кнопку **Свернуть в окно** на выбранном окне. Это вызовет появление на экране монитора всех четырех окон, в каждом из которых будет содержаться соответствующее данному виду изображение созданной нами плоской рамы.

Скорее всего, получится так, что не во все окна эта рама сможет поместиться целиком. Чтобы вписать изображение конструкции, в нашем случае рамы, в какое-либо окно, следует сделать это окно активным, щелкнув левой кнопкой мыши при нахождении ее указателя либо в окне, либо на его заголовке. Заголовок активного окна выделится синим цветом. Затем воспользуемся уже известной нам кнопкой **Подогнать под окно**  и все изображение конструкции полностью впишется в активное окно.

Далее выберем одно из окон, например **«Вид Спереди»**, и развернем его. В этом окне содержится соответствующая проекция соз-



данной плоской рамы, т. е. в виде вертикального стержня с узлами в различных местах.

Прежде чем размножить какие-либо элементы конструкции в заданном направлении, нужно выделить эти элементы, указав тем самым программе, с какими элементами будут в дальнейшем производиться операции. Для выделения элементов существует два режима: первый — выделение отдельных элементов конструкции, второй — выделение группы элементов с помощью рамки.

Первый режим включается кнопкой **Выбрать** , это верхняя кнопка на левой вертикальной панели инструментов **Нарисовать** (меню **Редактирование - Выбрать элемент**). Указатель мыши при этом автоматически приобретает форму стрелки. В этом режиме можно выделить отдельный элемент конструкции (узел, стержень, пластину), щелкнув по нему указателем мыши. Выделенный объект окрашивается в красный цвет. Если после выделения одного элемента щелкнуть по другому, то выделится второй элемент, а выделение с первого снимется. При необходимости выделения в этом режиме нескольких элементов конструкции следует выделение последующих производить при нажатой кнопке **SHIFT** на клавиатуре.

Второй режим включается кнопкой **Выбрать Группу**  на инструментальной панели **Нарисовать** (меню **Редактирование - Выбрать группу элементов**). Форма указателя мыши — прямоугольная рамка (окно) с крестиком в левой верхней части. Выбор группы элементов происходит посредством выделения их окном при нажатой левой кнопке мыши. Для того чтобы группа элементов конструкции была выделена, она должна **ПОЛНОСТЬЮ** попасть в окно выбора элементов. После выделения вся группа окрашивается в красный цвет. Выделение окном слева направо и справа налево происходит одинаково.

В нашем случае в режиме **Выбрать Группу** мы выделяем всю раму целиком, после чего она приобретает красный цвет и становится готова к последующему размножению.

Для размножения конструкции (или какой-либо ее части) следует перейти в режим **Умножить**  нажатием соответствующей кнопки на панели **Инструменты**, располагающейся в центральной верхней части окна (меню **Инструменты - Умножить**). После перехода в этот режим нужно показать направление умножения с помощью вектора умножения, который начинает отрисовываться после первого щелчка левой кнопки мыши и заканчивается вторым щелчком этой же кнопки. Нажатие правой кнопки позволяет отменить начатое рисование. После второго нажатия левой кнопки мыши появляется диалоговое окно **Умножить контур** (рисунок 6.65), в котором задаются пара-



метры **Вектора Умножения**, текущие координаты которого в глобальной системе координат занесены в соответствующие окна.

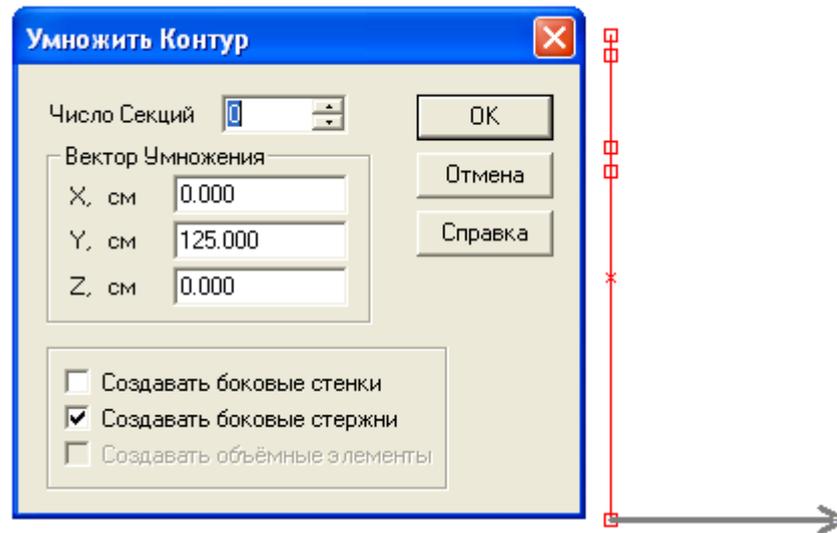


Рисунок 6.65 Диалоговое окно **Умножить контур**

В соответствии с постановкой задачи (см. рисунок 6.60) нам необходимо размножить подготовленную плоскую раму только в направлении оси  $Y$ , с интервалом в 200 см, так чтобы общая длина трехмерной конструкции составила 400 см (4 м). Обеспечить такую длину может **Число Секций**, равное 2. Таким образом, в результате умножения исходной плоской рамы будет создана трехмерная конструкция общей длиной 4 м, состоящая из двух секций, длиной 200 см каждая, в направлении оси  $Y$ . Включенный флажок **Создавать боковые стержни** будет означать, что от каждого узла плоской рамы в направлении вектора размножения (в данном случае — оси  $Y$ ) протянутся дополнительные стержни. Нажатие кнопки «ОК» (или ENTER на клавиатуре) позволит выполнить такое умножение.

Результаты умножения наиболее удобно просматривать в окне **Произвольный Вид**. Для этого восстанавливаем все окна и разворачиваем окно **Произвольный вид**. Если вписать все изображение конструкции в окно, то получится примерно такая картинка, как на рисунке 6.66.

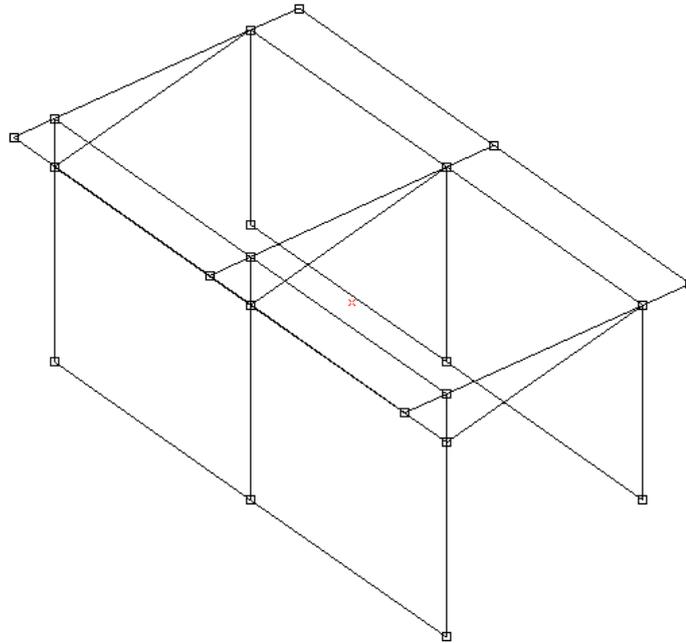


Рисунок 6.66 Трехмерная конструкция, полученная после операции умножения

Обратите внимание, что та плоская рама, которая использовалась для размножения с целью получения трехмерной конструкции, осталась выделенной. Поскольку в выделении уже отпала необходимость (операция выполнена), его нужно снять. Для снятия выделения требуется войти в один из режимов выделения объектов, нажав кнопку **Выбрать** или **Выбрать Группу** на панели инструментов **Нарисовать** (меню **Редактирование - Выбрать элемент** или **Выбрать группу элементов**), и щелкнуть в любом месте поля окна правой кнопкой мыши.

**СОВЕТ ПОЛЬЗОВАТЕЛЮ!** Желательно взять себе за правило **ВСЕГДА** снимать выделение после завершения выполнения какой-либо операции.

#### **Замечание**

*Что может произойти, если вы забыли снять выделение после выполнения предыдущей операции и перешли к следующей?*

*Дело в том, что APM Structure3D позволяет проводить большое количество операций не с одним элементом, а с группой. Перед выполнением такой операции, как уже говорилось, все участвующие в ней элементы следует выделить. Если же выделение с группы или отдельного элемента конструкции не снять, то программа будет рассматривать их как предназначенные для выполнения последующей операции.*

### **Подготовка стержневой модели конструкции к расчету**

В результате выполнения всех вышеперечисленных операций мы получим так называемую «*проволочную*» модель конструкции, в которой каждый стержень изображен в виде тонкой проволоки, располагающейся по центру тяжести будущего сечения. Но каждый стержень имеет конкретные размеры и соединен с помощью узлов с остальными стержнями конструкции. Такую совокупность стержней, имеющих опре-



деленные длины и соединенных в общую конструкцию, будем называть собственно *конструкцией*. Для того чтобы можно было произвести расчет этой конструкции на прочность, необходимо дополнительно задать:

- поперечные сечения каждому из стержней;
- опоры для созданной конструкции, определяющие ее положение в пространстве;
- внешние нагрузки, действующие на конструкцию (или хотя бы собственный вес ее элементов);
- параметры материала элементов конструкции.

Жесткого порядка подготовки стержневой конструкции к расчету нет: последовательность операций может быть произвольной, но, по крайней мере, три первых пункта должны быть выполнены.

Игнорирование последнего пункта, касающегося материала элементов конструкции, не приведет к прерыванию процесса вычисления, поскольку по умолчанию всем элементам конструкции присваиваются параметры материала, соответствующего по своим характеристикам стали **СтЗкп**. Если у пользователя есть необходимость изменить материал или всех элементов, или отдельных (предварительно выделенных) стержней, он может сделать это с помощью специального окна **Материал (Свойства - Материалы)** (рисунок 6.67).

Параметр	Значение
Название	Сталь
Предел текучести, [МПа]	235
Модуль Юнга, [МПа]	200000
Коэффициент Пуассона, [-]	0.3
Плотность, [кг/м <sup>3</sup> ]	7800
Коэффициент температурного расширения, [1/С]	1.2e-005
Коэффициент теплопроводности, [Вт/мК]	1

Рисунок 6.67 Диалоговое окно ввода свойств материала



## Задание параметров материала

В APM Structure 3D материал характеризуется четырьмя параметрами:

- предел текучести (МПа);
- модуль Юнга (МПа);
- коэффициент Пуассона;
- плотность (кг/м<sup>3</sup>).

Пользователь может или задать эти параметры самостоятельно, заполнив соответствующие строки, или нажать кнопку **База данных** и выбрать материал оттуда. В этом случае свойства выбранного материала автоматически перенесутся из базы данных в соответствующие строки.

Если заданные параметры материала нужно присвоить всем элементам конструкции — нажмите кнопку **Задать всем**. Если же данный набор параметров характерен для одного элемента или группы элементов — кнопку **Задать выделенным**. Разумеется, предварительно этот элемент (или группа) должны быть выделены.

### Замечание

*Следует иметь в виду, что реально в расчете используются все параметры, кроме предела текучести. На сегодняшний день этот параметр носит информативный характер. Дело в том, что ряд содержащихся в базе данных материалов или не имеет предела текучести (хрупкие материалы, как, например чугун), или о нем просто нет сведений в известных нам справочниках. Для таких материалов в графе «Предел текучести» базы данных стоит ноль, и, следовательно, при выборе пользователем этого материала в соответствующей строке окна также появится ноль. Но при нажатии кнопки (**Задать выделенным** или **Задать всем**) программа просит ввести значение предела текучести. В этом случае рекомендуется ввести значение либо допустимого напряжения, либо предела прочности, что позволит произвести расчет на прочность.*

## Задание поперечных сечений

К моменту запуска на расчет всем стержневым элементам конструкции должно быть присвоено определенное поперечное сечение. Заранее отметим, что форма поперечного сечения может быть произвольной, в том числе многосвязной, и каких-либо ограничений в этом смысле нет.

Следует помнить о другом ограничении, налагаемом на стержневые элементы. Как уже говорилось выше, для обеспечения заданной точности расчетов они должны быть *тонкими*, то есть такими, максимальный поперечный размер сечения которых по крайней мере в пять раз меньше характерного размера стержня. Под характерным размером будем понимать максимальную длину прямолинейного (но, возможно разбитого на более мелкие состав-



ные части) стержня. Если стержень представляется в форме дуги или окружности (или же имеет изогнутые под небольшими углами колена), то в качестве характерного размера выступает соответственно длина дуги, окружности или общая длина «коленчатого» стержня.

### Библиотека сечений

Сечение, которое необходимо присвоить стержневому элементу, предварительно должно быть помещено в библиотеку сечений APM Structure3D. В комплекте с APM Structure3D поставляются заполненные библиотеки стандартных сечений, среди них:

- **Ugol\_1.slb** — библиотека стандартных уголковых равнобоковых сечений;
- **Ugol\_2.slb** — библиотека стандартных уголковых неравнобоковых сечений;
- **Shveller.slb** — библиотека стандартных швеллеров;
- **Dvutavr.slb** — библиотека стандартных двутавровых сечений и другие, количество которых постоянно увеличивается.

Кроме того, при инсталляции APM Structure3D создается пустая библиотека **Deflib.slb**, в которую могут заноситься поперечные сечения, создаваемые пользователем.

При внесении в библиотеку какого-либо сечения автоматически происходит расчет его параметров.

Расчетными параметрами сечения являются:

- момент инерции в горизонтальной плоскости относительно центра тяжести сечения;
- момент инерции в вертикальной плоскости;
- угол наклона главных осей;
- момент инерции в горизонтальной плоскости относительно главных осей;
- момент инерции в вертикальной плоскости относительно главных осей;
- полярный момент инерции;
- жесткость на кручение;
- площадь поперечного сечения.

Данные параметры носят информативный характер и не могут быть изменены пользователем по своему усмотрению.

Кнопки в окне задания сечений из библиотеки позволяют выполнить следующие операции:

- **«Информация»** — получить информацию о данной библиотеке и количестве сечений в ней;
- **«Обмен»** — перенести выбранное сечение в другую библиотеку.



ку;

- «ОК» — присвоить выбранное сечение из библиотеки всем или выделенным стержням;
- «Загрузить» — загрузить другую библиотеку;
- «Отмена» — закрыть данное окно;
- «Новая» — создать новую библиотеку;
- «Удалить сечение» — удалить выбранное сечение из данной библиотеки;
- «Справка» — вызвать помощь-справку.

### Создание нового сечения

Новое сечение может быть либо непосредственно создано в редакторе поперечных сечений, либо импортировано в этот редактор через файл формата **DXF**. Последний способ значительно проще и удобнее, поэтому мы рекомендуем создавать новое сечение с помощью входящего в состав APM WinMachine чертежно-графического редактора *APM Graph*. Однако если по каким-либо причинам пользователю потребуется задать сечение с помощью встроенного редактора поперечных сечений — ниже будет показано, как это можно сделать.

Для входа в редактор поперечных сечений в меню **Файл** выбираем **Новый - Сечение**, после чего загружается редактор поперечных сечений (рисунок 6.68).

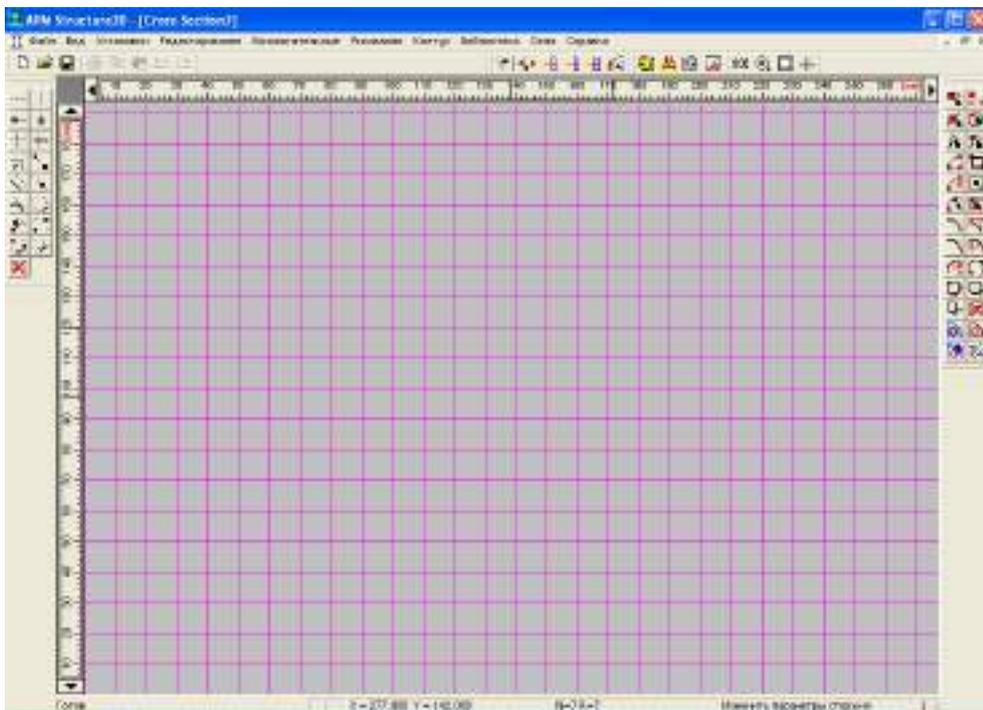


Рисунок 6.68 Внешний вид окна редактора поперечных сечений APM Structure3D



Данный редактор включает в себя набор примитивов и инструментальных средств для создания и редактирования поперечных сечений. По сравнению с графическим редактором *APM Graph*, а также большинством существующих сегодня графических плоских редакторов, его возможности несколько ограничены. Поэтому предусмотрена возможность импорта плоской графики в формате **DXF**. Для этого в меню **Файл** следует выбрать опцию **Импорт**. В результате импорта плоский графический объект будет изображен в поле чертежа редактора.

Для создания чертежа поперечного сечения непосредственно во внутреннем редакторе служат две панели инструментов, располагаемые слева и справа от поля чертежа. Левая вертикальная панель инструментов **Вспомогательные элементы** (меню **Вспомогательные**) представляет собой набор вспомогательных средств, выполняющих в основном различные сервисные функции. С помощью этих инструментов можно создать вспомогательные (тонкие) линии, намечающие, например, положения центров будущих окружностей, оси симметрии объекта, оси зеркального отображения и т. п. Создаваемые вспомогательные линии не оказывают никакого воздействия на поперечное сечение.

Правая вертикальная инструментальная панель **Нарисовать** (меню **Рисование**) предназначена для отрисовки отдельных примитивов чертежа, таких как точки, отрезки, прямоугольники, дуги, окружности, фаски, скругления и т. п. Нажатием соответствующей кнопки на этой инструментальной панели пользователь задает либо режим рисования какого-нибудь примитива, либо параметры фаски или скругления.

Опция отмены операций в редакторе создания сечений отсутствует. Поэтому если при создании объекта была допущена какая-нибудь ошибка, этот объект следует удалить, предварительно выделив.

Кнопка **Выбрать объекты**  находится на инструментальной панели **Редактирование**, располагаемой в левой верхней части окна редактора (меню **Редактирование - Выбрать**). Чтобы выделить объект (объекты), нужно в этом режиме или последовательно щелкнуть указателем мыши на объектах, или выделить объекты рамкой. Независимо от направления рисования рамки (справа налево или слева направо) выделяются только те объекты, которые целиком попали в рамку (охватывающая рамка). Для снятия выделения с одного объекта надо еще раз щелкнуть на выделенном объекте левой кнопкой мыши. Снятие выделения со всех выделенных объектов производится щелчком правой кнопки мыши в поле чертежа.



После выделения ненужных объектов их следует удалить с помощью кнопки **Удалить выбранное**  на этой же инструментальной панели **Редактирование** (меню **Редактирование - Удалить выбранное**).

В качестве примера создадим поперечное сечение, показанное на рисунке 6.69.

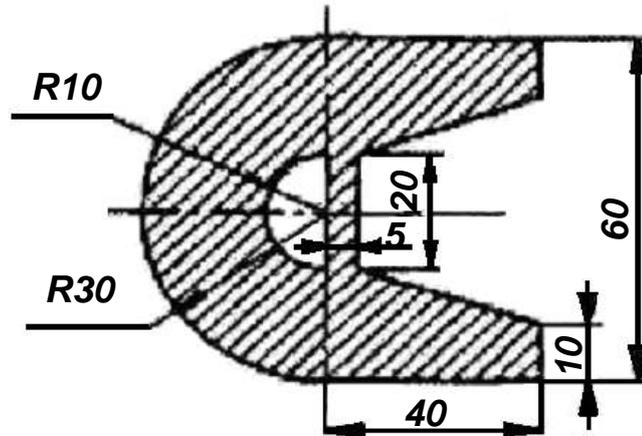


Рисунок 6.69 Чертеж поперечного сечения

Прежде всего, обратим внимание, что в данном случае все линейные размеры и радиусы кратны 5 мм, поэтому имеет смысл установить шаг курсора равным 5 мм. Для этого на инструментальной панели «**Установки**», располагающейся в правой верхней части редактора, включаем кнопку **Шаг курсора**  (меню **Установки - Шаг курсора**). Это вызывает появление диалогового окна, позволяющего задать шаг курсора в линейных и угловых единицах, а также область чувствительности привязки. В соответствующем окне задаем линейный шаг курсора — 5 мм. Поскольку по умолчанию шаг сетки равен 10 мм, то возможными положениями курсора будут узлы сетки и середина расстояния между узлами. Если установить шаг курсора равным шагу сетки, то курсор будет привязываться к узлам сетки.

**1. Отрисовка дуг окружностей.** Начнем построение с отрисовки дуг. В первую очередь обозначим на чертеже некоторые характерные точки поперечного сечения, в данном случае это центры дуг и их верхние и нижние точки. Для этого на левой панели инструментов **Вспомогательные элементы**  выберем кнопку **2 взаимно перпендикулярные прямые** (меню **Вспомогательные – Линия - Перпендикулярные**) и в произвольном месте поля экрана в узле сетки ставим первую точку, соответствующую центру двух дуг чертежа. Отступив от этой точки по 3 клетки вверх и вниз, ставим в узлах сетки еще две точ-



ки, отстоящие от центра окружностей на величину большого радиуса — 30 мм. Аналогичным образом на расстоянии 10 мм от центра вверх и вниз получаем точки, принадлежащие дуге малого (10 мм) радиуса.

После этого воспользуемся инструментом **Дуга по концам и центру**  правой панели **Нарисовать** (меню **Рисование – Дуга - 2Конца&Центр**). В этом режиме щелкаем мышью сначала на первой верхней точке, принадлежащей одной из дуг (например, радиуса 10 мм), затем на второй (нижней), и третий щелчок на центре дуги завершает ее рисование. Последовательность задания точек дуги выбирается таким образом, чтобы направление отрисовки дуги от первой точки ко второй было бы против часовой стрелки. Аналогично создаем дугу радиуса 30 мм.

Тот же результат можно получить с использованием другого инструмента из правой панели **Нарисовать**, а именно кнопки **Дуга по центру и концам**  (меню **Рисование – Дуга - Центр&2Конца**). В этом случае порядок рисования дуг будет несколько иным (первая верхняя точка дуги, вторая, нижняя точка дуги, центр дуги), но направление отрисовки дуг и в этом случае должно быть против часовой стрелки.

**2. Отрисовка отрезков прямой.** Для отрисовки отрезков прямой используются два режима рисования: **Свободный конец отрезка**  (меню **Рисование – Отрезок - Свободный конец**) и **Конец отрезка в узле**  (меню **Рисование – Отрезок - Выбрать узел**). Обе эти кнопки расположены на правой вертикальной панели инструментов **Нарисовать**. Первая из них позволяет изображать отрезки прямой без привязки к точкам ранее отрисованных объектов, а вторая — обеспечивает принудительную привязку к имеющимся на рисунке узлам.

Ясно, что поперечное сечение стержня должно ограничиваться замкнутыми контурами: наружным (одним или несколькими) и внутренними (если у стержня есть отверстия). Режим **Конец отрезка в узле** как раз и осуществляет принудительную привязку конца отрезка к уже существующим точкам, обеспечивая тем самым замыкание контуров.

Для замыкания внутреннего контура, образованного дугой радиуса 10 мм и перемычкой, используем режим **Конец отрезка в узле** — щелкаем левой кнопкой мыши вблизи точек конца дуги малого радиуса. Это приведет к появлению перемычки, соединяющей эти точки.

Переходим теперь к изображению правой части сечения (рисунок 6.69). Для того, чтобы обеспечить привязку начала создаваемого отрезка к верхнему концу дуги радиуса 30 мм, также воспользуемся кнопкой **Конец отрезка в узле**, и, щелкнув вблизи верхнего конца дуги, обеспечим привязку к этой точке. Конец этого отрезка должен



быть свободным, поэтому по завершении отрисовки следует нажать кнопку **Свободный конец отрезка**.

При перемещении мыши в процессе рисования в строке статуса (в нижней части окна) показываются, кроме текущих координат указателя мыши, еще и параметры изображаемого отрезка— длина и угол с положительным направлением горизонтальной оси. Контролируя эти параметры, щелкаем в той точке, в которой длина отрезка равна 40 мм, а угол равен нулю. Данная операция фиксирует полученную точку. Одновременно с этим от зафиксированной точки тянется линия нового отрезка, а в статусной строке отображаются его новые параметры. Последовательно, из отрезков прямой, строим правую часть сечения, пользуясь как параметрами отрезков, так и сеткой. Конец последнего (седьмого) отрезка должен быть привязан к нижней точке дуги радиуса 30 мм. Поэтому перед изображением последнего отрезка нужно перейти в режим **Конец отрезка в узле** (меню **Рисование – Отрезок - Выбрать узел**) и щелчком вблизи нижнего края дуги привязать конец отрезка к этой точке. На этом создание сечения завершается (рисунок 6.70).

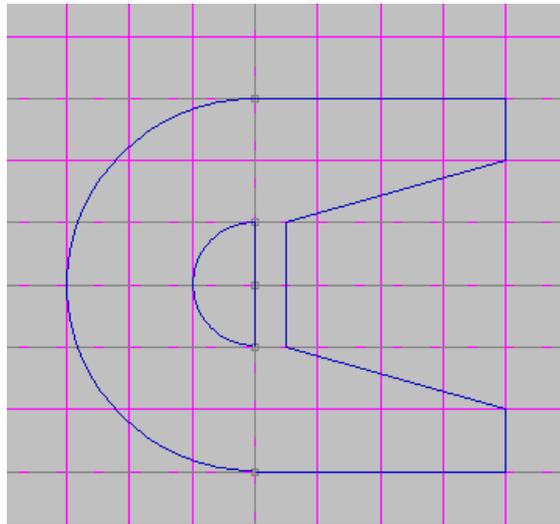


Рисунок 6.70

**3. Выделение контуров поперечного сечения.** Для того чтобы подготовленный рисунок стал поперечным сечением, в нем необходимо выделить внешний и внутренние контуры. Для этого в панели **Рисование** есть специальные кнопки — **Внешний контур**  (меню **Контур - Внешний**) и **Внутренний контур**  (меню **Контур - Внутренний**). После нажатия кнопки **Внешний контур** (меню **Контур - Внешний**) следует щелкнуть по элементу наружного контура, и он должен выделиться синим цветом. Аналогично в режиме **Внутренний контур** (меню **Контур - Внутренний**) красным цветом выделяются все внутренние контуры.



После этого целесообразно включить кнопку **Показать поверхность** , при этом вся площадь поперечного сечения будет закрашена белым цветом (рисунок 6.71).

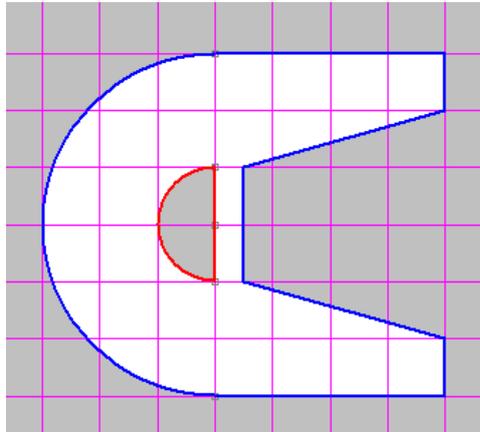


Рисунок 6.71

#### **Замечание**

*Соответствующие контуры могут быть выделены только в том случае, если они замкнуты.*

Иногда случается, что пользователем при создании рисунка контура не применялись инструменты, обеспечивающие привязку к узлам (либо при создании чертежа поперечного сечения в графическом редакторе *APM Graph* не использовались инструменты привязок). Тогда выделить соответствующие контуры не удастся.

В этом случае, находясь в данном редакторе сечений, нужно найти незамкнутый элемент контура и перерисовать его заново, действуя по следующей схеме: в режиме рисования отрезка **Конец отрезка в узле** поочередно замыкать части контура и проверять (путем выделения), замкнута ли данная часть.

### **Внесение нового сечения в библиотеку**

Для внесения созданного сечения в библиотеку сечений следует выбрать в меню **Библиотека** опцию **Добавить в библиотеку**, после чего на экране появляется окно **Добавить сечение в библиотеку** (рисунок 6.72).

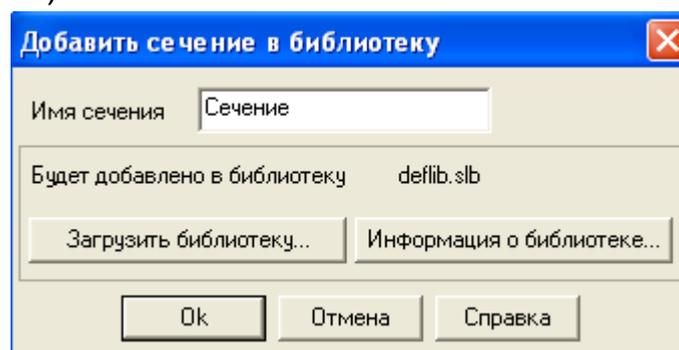


Рисунок 6.72 Диалоговое окно **Добавить сечение в библиотеку**



Затем нужно нажать **Загрузить библиотеку**, указав в появившемся окне путь к этой библиотеке (в нашем случае это библиотека **def-lib.slb**), и ввести в окне имя сечения, под которым оно будет добавлено в библиотеку. После нажатия кнопки «ОК» программа начинает расчет геометрических параметров сечения, по окончании которого данное сечение будет добавлено в соответствующую библиотеку.

В процессе расчета геометрических параметров нового сечения в него «вписываются» стержневые конечные элементы треугольной формы. По умолчанию используется равномерная сетка разбиения, а количество конечных элементов приблизительно равно 3200. Это справедливо для большинства поперечных сечений, отдельные элементы которых имеют размеры значительно большие, чем поперечный размер вписываемого конечного элемента.

Но пользователь может изменить заданные по умолчанию параметры разбиения поперечного сечения, выбрав пункт **Параметры разбиения** в меню **Библиотека**. Это приведет к открытию окна **Параметры разбиения**, в строки которого следует ввести соответствующие значения.

Необходимость изменять параметры разбиения может возникнуть, например, если поперечное сечение стержня имеет элементы, размеры которых соизмеримы с размерами конечного элемента. В этом случае использование равномерной сетки разбиения приведет к заметным ошибкам, поэтому предпочтительно использовать неравномерную сетку, обеспечивающую более точное вписывание конечных элементов в сложное поперечное сечение.

Однако в абсолютном большинстве случаев параметры разбиения, заданные по умолчанию, соответствуют решаемой задаче и не требуют корректировки.

#### **Замечание**

*В том случае, если в состав подготовленного к внесению в библиотеку сечения входят тонкостенные фрагменты, размеры которых соизмеримы с размерами конечных элементов, программа затратит значительное время на «вписывание» последних в сечение. Причем время будет тем большим, чем тоньше такой фрагмент. Пользователю необходимо дождаться завершения выполнения этого этапа, хотя внешне все выглядит так, будто программа «зависла».*

### **Присвоение поперечных сечений стержневым элементам конструкции**

После того, как необходимая пользователю библиотека поперечных сечений сформирована, остается присвоить сечения из библиотеки соответствующим стержневым элементам конструкции. Удобнее сначала задать всем стержням то сечение, которое имеют



большинство элементов всей конструкции, а уже затем «переприсвоить» другое сечение тем элементам, которых меньше.

Пусть, например, у рассматриваемой конструкции все элементы имеют созданное нами поперечное сечение (см. рисунок 6.71). В этом случае мы зададим всем элементам конструкции сложный профиль.

Для присвоения сечения всем элементам конструкции используем кнопку **Сечение всем**  инструментальной панели **Свойства** (меню **Свойства - Сечение всей Конструкции**). *Обратите внимание, что в этом случае выделения всех элементов не требуется.* Выбор этой опции приведет к открытию диалогового окна задания сечения из библиотеки, в котором с помощью кнопки **Загрузить** указываем путь к библиотеке deflib.slb. После загрузки аналогичного окна библиотеки deflib.slb выбираем нужное нам сечение и нажимаем кнопку **ОК**. Программа уточнит, действительно ли мы собираемся задать сечение всем стержням, и, получив подтверждение, присвоит данное сечение всем стержневым элементам конструкции.

Ориентация сечений также присваивается стержням по умолчанию, на основании направления стержня (от начала к концу) и исходной ориентации данного сечения в библиотеке сечений. Напомним, что началом стержня является его начальный узел, т. е. тот, с которого начиналось создание данного стержня.

После завершения выполнения данной операции можно посмотреть изображение конструкции не только в «проволочном» виде (рисунок 6.73, а), но и в виде контурной (кнопка **Проволочные сечения**  на нижней инструментальной панели **Фильтры вида**) или твердотельной (рисунок 6.73, б) (кнопка **Объемные сечения**  ) моделей. В обоих случаях ясно видна форма и ориентация присвоенных различным элементам сечений. Вращая конструкцию, пользователь может выбрать наиболее удобный ракурс для просмотра как всей конструкции, так и ее элементов.



Рисунок 6.73



Однако просмотр ориентации сечения стержня (или нескольких стержней) удобнее проводить все-таки на проволочной модели **Показать стержни**  конструкции в режиме **Ориентация сечения** , включаемом соответствующей кнопкой на панели **Свойства** (меню **Свойства - Ориентация сечения**). Если предварительно какие-то стержни были выделены, то ориентация их сечений показывается автоматически после нажатия этой кнопки, если нет — щелкните мышью по интересующему вас стержню, и программа выдаст нужную информацию. Изменить масштаб показа сечения можно клавишами «+»/«—» на клавиатуре.

В этом же режиме можно поворачивать сечение отдельного стержня вокруг своей оси, для чего следует щелкнуть мышью в непосредственной близости от этого стержня. При этом показываемое красным цветом сечение станет зеленым. Перемещение мыши по полю вида в горизонтальном направлении будет сопровождаться поворотом сечения вокруг своей оси. Внизу, на панели статуса, появится числовое значение угла поворота данного сечения в градусах. Шаг угла поворота равен шагу курсора в угловом направлении, по умолчанию принимаемому за 1 градус (рисунок 6.74).

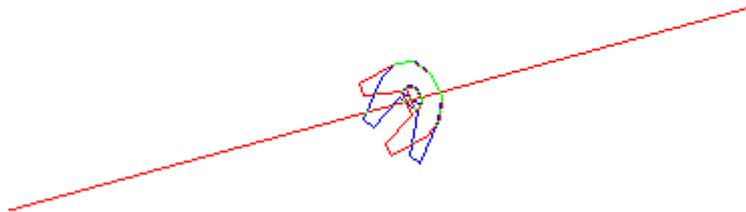


Рисунок 6.74

Если при просмотре ориентации сечения были выделены несколько стержней, а затем один из них повернут на определенный угол, то на такой же угол будут повернуты и все остальные выделенные стержни.

**ВАРИАНТЫ**

# APM Trans

## Проектировочный расчет зубчатой цилиндрической косозубой передачи внешнего зацепления

### ВАРИАНТ 1

#### Заданные параметры:

Передача: *Косозубая*

Зацепления: *Внешнего*

Тип расчета: *Проектировочный*

#### Основные данные

Режим работы	<i>Постоянный</i>
<i>Термообработка</i>	
Шестерня	<i>Закалка</i>
Колесо	<i>Закалка</i>
Крепление шестерни на валу	<i>Симметрично</i>
Нереверсивная передача	
Момент на выходе, Н·м	<i>1000.00</i>
Обороты на выходе, об./мин.	<i>100.00</i>
Передаточное число	<i>3.00</i>
Требуемый ресурс, час	<i>10000.00</i>
Число зацеплений	
Шестерня	<i>1</i>
Колесо	<i>1</i>
<i>Твердость поверхности зубьев</i>	
Шестерни	<i>45.00</i>
Колеса	<i>45.00</i>
Межосевое расстояние	<i>Стандартное</i>
<i>Коэффициент смещения</i>	
Шестерни	<i>0</i>
Колеса	<i>0</i>

**Проектировочный расчет зубчатой  
цилиндрической косозубой передачи внешнего зацепления**

**ВАРИАНТ 2**

**Заданные параметры:**

Передача: *Косозубая*

Зацепления: *Внешнего*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Режим работы	<i>Тяжелый</i>
Термообработка	
Шестерня	<i>Улучшение</i>
Колесо	<i>Улучшение</i>
Крепление шестерни на валу	<i>Симметрично</i>
Нереверсивная передача	
Момент на выходе, Н·м	<i>800.00</i>
Обороты на выходе, об./мин.	<i>80.00</i>
Передаточное число	<i>2.00</i>
Требуемый ресурс, час	<i>10000.00</i>
Число зацеплений	
Шестерня	<i>1</i>
Колесо	<i>1</i>
Твердость поверхности зубьев	
Шестерни	<i>45.00</i>
Колеса	<i>45.00</i>
Межосевое расстояние	<i>Стандартное</i>
Коэффициент смещения	
Шестерни	<i>0</i>
Колеса	<i>0</i>

**Проектировочный расчет зубчатой  
цилиндрической косозубой передачи внешнего зацепления**

**ВАРИАНТ 3**

**Заданные параметры:**

Передача: *Косозубая*

Зацепления: *Внешнего*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Режим работы	<i>Постоянный</i>
Термообработка	
Шестерня	<i>Закалка</i>
Колесо	<i>Закалка</i>
Крепление шестерни на валу	<i>Симметрично</i>
Нереверсивная передача	
Момент на выходе, Н·м	<i>850.00</i>
Обороты на выходе, об./мин.	<i>100.00</i>
Передаточное число	<i>3.00</i>
Требуемый ресурс, час	<i>10000.00</i>
Число зацеплений	
Шестерня	<i>1</i>
Колесо	<i>1</i>
Твердость поверхности зубьев	
Шестерни	<i>45.00</i>
Колеса	<i>45.00</i>
Межосевое расстояние	<i>Стандартное</i>
Коэффициент смещения	
Шестерни	<i>0</i>
Колеса	<i>0</i>

**Проектировочный расчет зубчатой  
цилиндрической косозубой передачи внешнего зацепления**

**ВАРИАНТ 4**

**Заданные параметры:**

Передача: *Косозубая*

Зацепления: *Внешнего*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Режим работы	<i>Тяжелый</i>
Термообработка	
Шестерня	<i>Закалка</i>
Колесо	<i>Закалка</i>
Крепление шестерни на валу	<i>Симметрично</i>
Нереверсивная передача	
Момент на выходе, Н·м	<i>950.00</i>
Обороты на выходе, об./мин.	<i>70.00</i>
Передаточное число	<i>3.00</i>
Требуемый ресурс, час	<i>10000.00</i>
Число зацеплений	
Шестерня	<i>1</i>
Колесо	<i>1</i>
Твердость поверхности зубьев	
Шестерни	<i>45.00</i>
Колеса	<i>45.00</i>
Межосевое расстояние	<i>Стандартное</i>
Коэффициент смещения	
Шестерни	<i>0</i>
Колеса	<i>0</i>

**Проектировочный расчет зубчатой  
цилиндрической косозубой передачи внешнего зацепления**

**ВАРИАНТ 5**

**Заданные параметры:**

Передача: *Косозубая*

Зацепления: *Внешнего*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Режим работы	<i>Легкий</i>
Термообработка	
Шестерня	<i>Улучшение</i>
Колесо	<i>Улучшение</i>
Крепление шестерни на валу	<i>Симметрично</i>
Нереверсивная передача	
Момент на выходе, Н·м	<i>1000.00</i>
Обороты на выходе, об./мин.	<i>100.00</i>
Передаточное число	<i>2.00</i>
Требуемый ресурс, час	<i>10000.00</i>
Число зацеплений	
Шестерня	<i>1</i>
Колесо	<i>1</i>
Твердость поверхности зубьев	
Шестерни	<i>45.00</i>
Колеса	<i>45.00</i>
Межосевое расстояние	<i>Стандартное</i>
Коэффициент смещения	
Шестерни	<i>0</i>
Колеса	<i>0</i>

**Проектировочный расчет зубчатой  
цилиндрической косозубой передачи внешнего зацепления**

**ВАРИАНТ 6**

**Заданные параметры:**

Передача: *Косозубая*

Зацепления: *Внешнего*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Режим работы	<i>Легкий</i>
Термообработка	
Шестерня	<i>Закалка</i>
Колесо	<i>Закалка</i>
Крепление шестерни на валу	<i>Симметрично</i>
Нереверсивная передача	
Момент на выходе, Н·м	<i>700.00</i>
Обороты на выходе, об./мин.	<i>60.00</i>
Передаточное число	<i>3.00</i>
Требуемый ресурс, час	<i>10000.00</i>
Число зацеплений	
Шестерня	<i>1</i>
Колесо	<i>1</i>
Твердость поверхности зубьев	
Шестерни	<i>45.00</i>
Колеса	<i>45.00</i>
Межосевое расстояние	<i>Стандартное</i>
Коэффициент смещения	
Шестерни	<i>0</i>
Колеса	<i>0</i>

**Проектировочный расчет клиноременной передачи  
ВАРИАНТ 1**

**Заданные параметры:**

Передача: *Клиноременная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип натяжного устройства	<i>Не выбран</i>
Мощность на ведущем валу, кВт	7.6
Частота вращения ведущего вала, об/мин	1000
Передаточное число	3
Коэффициент динамичности нагрузки	1.1
Максимально число ремней	5
Угол наклона передачи, град	0

**Проектировочный расчет клиноременной передачи  
ВАРИАНТ 2**

**Заданные параметры:**

Передача: *Клиноременная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип натяжного устройства	<i>Не выбран</i>
Мощность на ведущем валу, кВт	7
Частота вращения ведущего вала, об/мин	900
Передаточное число	2
Коэффициент динамичности нагрузки	1.1
Максимально число ремней	6
Угол наклона передачи, град	0

**Проектировочный расчет клиноременной передачи  
ВАРИАНТ 3**

**Заданные параметры:**

Передача: *Клиноременная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип натяжного устройства	<i>Не выбран</i>
Мощность на ведущем валу, кВт	7.4
Частота вращения ведущего вала, об/мин	930
Передаточное число	2
Коэффициент динамичности нагрузки	1.1
Межосевое расстояние, мм	800
Максимально число ремней	4
Угол наклона передачи, град	0

**Проектировочный расчет клиноременной передачи  
ВАРИАНТ 4**

**Заданные параметры:**

Передача: *Клиноременная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип натяжного устройства	<i>Не выбран</i>
Мощность на ведущем валу, кВт	<i>6.9</i>
Частота вращения ведущего вала, об/мин	<i>900</i>
Передаточное число	<i>3</i>
Коэффициент динамичности нагрузки	<i>1.1</i>
Межосевое расстояние, мм	<i>800</i>
Максимально число ремней	<i>6</i>
Угол наклона передачи, град	<i>0</i>

---

**Проектировочный расчет клиноременной передачи  
ВАРИАНТ 5**

**Заданные параметры:**

Передача: *Клиноременная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип натяжного устройства	<i>Не выбран</i>
Мощность на ведущем валу, кВт	<i>7.1</i>
Частота вращения ведущего вала, об/мин	<i>920</i>
Передаточное число	<i>2</i>
Коэффициент динамичности нагрузки	<i>1.1</i>
Межосевое расстояние, мм	<i>800</i>
Максимально число ремней	<i>5</i>
Угол наклона передачи, град	<i>0</i>

**Проектировочный расчет клиноременной передачи  
ВАРИАНТ 6**

**Заданные параметры:**

Передача: *Клиноременная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип натяжного устройства	<i>Не выбран</i>
Мощность на ведущем валу, кВт	<i>6.8</i>
Частота вращения ведущего вала, об/мин	<i>900</i>
Передаточное число	<i>2</i>
Коэффициент динамичности нагрузки	<i>1.1</i>
Межосевое расстояние, мм	<i>800</i>
Максимально число ремней	<i>3</i>
Угол наклона передачи, град	<i>0</i>

**Проектировочный расчет цепной передачи  
ВАРИАНТ 1**

**Заданные параметры:**

Передача: *Цепная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип цепи	<i>Роликовая повышенной точности</i>
Режим работы	<i>Плавная нагрузка</i>
Тип смазки цепи	<i>Периодическая смазка</i>
Момент на ведущей звездчке, Н·м	76
Обороты ведущей звездочки, об/мин	180
Передаточное отношение	2
Требуемый ресурс, час	40
Рядность цепи	1
Тип звездочки	
Критерий расчета	<i>По статике</i>

**Проектировочный расчет цепной передачи  
ВАРИАНТ 2**

**Заданные параметры:**

Передача: *Цепная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип цепи	<i>Втулочная</i>
Режим работы	<i>Спокойная нагрузка</i>
Тип смазки цепи	<i>Непериодическая смазка</i>
Момент на ведущей звездчке, Н·м	70
Обороты ведущей звездочки, об/мин	200
Передаточное отношение	3
Требуемый ресурс, час	30
Рядность цепи	1
Тип звездочки	
Критерий расчета	<i>По статике</i>

**Проектировочный расчет цепной передачи  
ВАРИАНТ 3**

**Заданные параметры:**

Передача: *Цепная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип цепи	<i>Роликовая повышенной точности</i>
Режим работы	<i>Спокойная нагрузка</i>
Тип смазки цепи	<i>Непериодическая смазка</i>
Момент на ведущей звездочке, Н·м	70
Обороты ведущей звездочки, об/мин	200
Передаточное отношение	3
Требуемый ресурс, час	30
Рядность цепи	1
Тип звездочки	
Критерий расчета	<i>По статике</i>

**Проектировочный расчет цепной передачи  
ВАРИАНТ 4**

**Заданные параметры:**

Передача: *Цепная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип цепи	<i>Роликовая нормальной точности</i>
Режим работы	<i>Спокойная нагрузка</i>
Тип смазки цепи	<i>Внутри шарнирная</i>
Момент на ведущей звездочке, Н·м	70
Обороты ведущей звездочки, об/мин	200
Передаточное отношение	3
Требуемый ресурс, час	30
Рядность цепи	1
Тип звездочки	
Критерий расчета	<i>По статике</i>

**Проектировочный расчет цепной передачи  
ВАРИАНТ 5**

**Заданные параметры:**

Передача: *Цепная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип цепи	<i>Роликовая повышенной точности</i>
Режим работы	<i>Плавная нагрузка</i>
Тип смазки цепи	<i>Непериодическая смазка</i>
Момент на ведущей звездочке, Н·м	80
Обороты ведущей звездочки, об/мин	200
Передаточное отношение	3
Требуемый ресурс, час	30
Рядность цепи	1
Тип звездочки	
Критерий расчета	<i>По статике</i>

**Проектировочный расчет цепной передачи  
ВАРИАНТ 6**

**Заданные параметры:**

Передача: *Цепная*

Тип расчета: *Проектировочный*

**Основные данные**

Тип цепи	<i>Роликовая нормальной точности</i>
Режим работы	<i>Плавная нагрузка</i>
Тип смазки цепи	<i>Периодическая смазка</i>
Момент на ведущей звездочке, Н·м	80
Обороты ведущей звездочки, об/мин	170
Передаточное отношение	3
Требуемый ресурс, час	30
Рядность цепи	1
Тип звездочки	
Критерий расчета	<i>По статике</i>

# APM SHAFT

## РАСЧЕТ ВАЛА НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ВАРИАНТ 1

**Задание.** Выполните расчет вала (см. рисунок) на сопротивление усталости (определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность), приняв:

$$T_1 = T_2 = 1000 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F_{r1} = 8 \text{ кН};$$

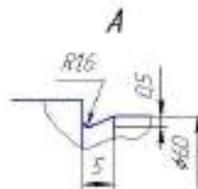
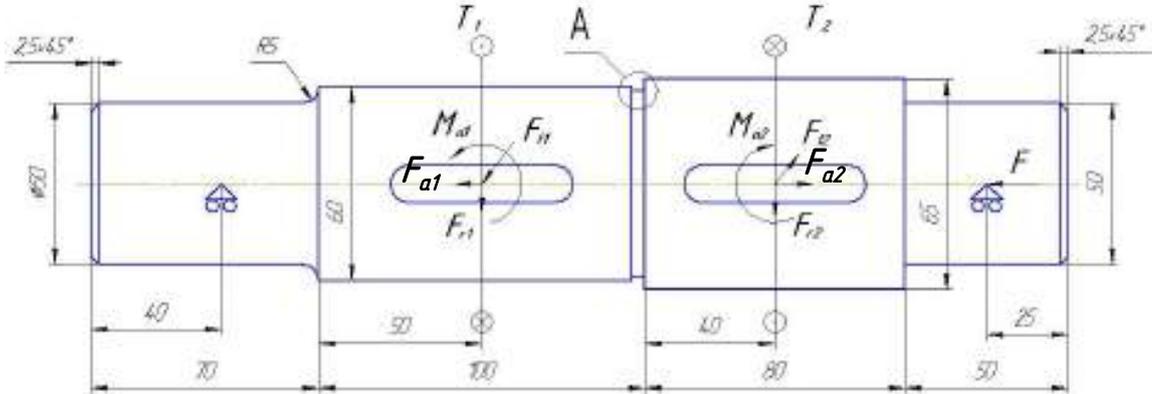
$$F_{r2} = 10 \text{ кН};$$

$$F_{a1} = 1 \text{ кН};$$

$$F_{a2} = 3 \text{ кН};$$

$$M_{a1} = M_{a2} = 100 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F = 2 \text{ кН}.$$



### Материал

Вал изготовлен из стали 55 со следующими характеристиками:

предел прочности:	$\sigma_b = 700 \text{ МПа};$
предел текучести:	$\sigma_t = 420 \text{ МПа};$

**Тип** – сталь конструкционная (прокат)

**Группа** – в улучшенном состоянии размером от 40 до 100 мм

### Шпонка

	Шпонка 1:	Шпонка 2:
Расстояние от левого торца секции вала, мм	25	20
Длина, мм	50	40
Ширина, мм	18	18
Глубина, мм	3,4	3,4

### Ресурс работы вала

Ресурс работы, час	5000
Частота вращения вала, об/мин	100

Задайте 4 опасных сечения на расстоянии от левого торца вала: 1 сечение – 70 мм, 2 сечение – 120 мм, 3 сечение – 170 мм, 4 сечение – 210 мм.

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений: переход с галтелью -  $K_{\sigma}=1,55$ ;  $K_{\tau} = 1,40$ ; переход с канавкой -  $K_{\sigma}=1,95$ ;  $K_{\tau} = 1,55$ ; шпоночная канавка -  $K_{\sigma}=1,89$ ;  $K_{\tau} = 1,71$ .

**Анализируя полученные результаты (коэффициент запаса по усталостной прочности), нужно сделать вывод о том, в каких сечениях данный вал имеет недостаточную усталостную прочность, то есть для которого значение коэффициента запаса меньше допустимого  $s < s_a = 2,2$  и определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность.**

## РАСЧЕТ ВАЛА НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ВАРИАНТ 2

**Задание.** Выполните расчет вала (см. рисунок) на сопротивление усталости (определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность), приняв:

$$T_1 = T_2 = 2200 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F_{r1} = 5 \text{ кН};$$

$$F_{a1} = 3 \text{ кН};$$

$$F_{t1} = 13,5 \text{ кН};$$

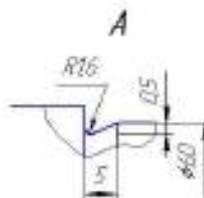
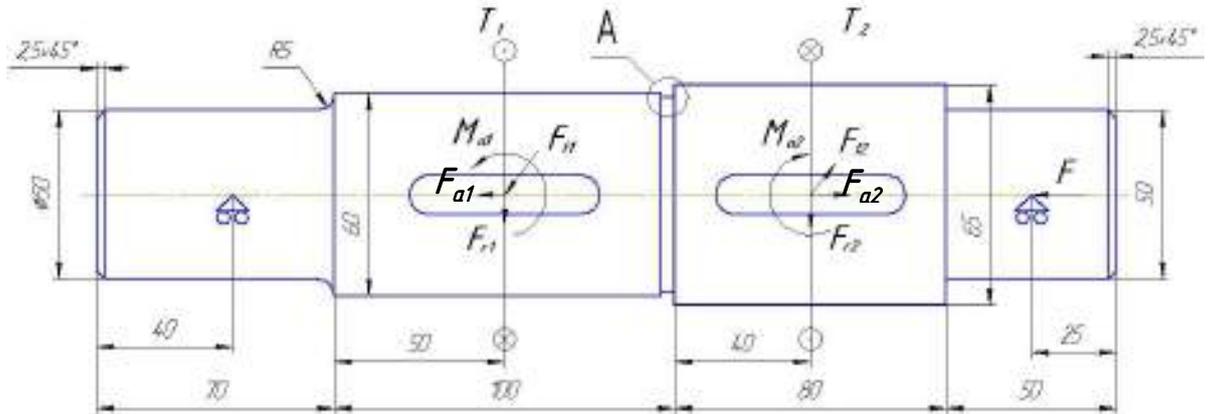
$$F_{r2} = 15 \text{ кН};$$

$$F_{a2} = 7 \text{ кН};$$

$$F_{t2} = 41 \text{ кН};$$

$$M_{a1} = M_{a2} = 310 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F = 4 \text{ кН}.$$



### Материал

Вал изготовлен из стали 55 со следующими характеристиками:

предел прочности:	$\sigma_b = 700 \text{ МПа};$
предел текучести:	$\sigma_t = 420 \text{ МПа};$

**Тип** – сталь конструкционная (прокат)

**Группа** – в улучшенном состоянии размером от 40 до 100 мм

### Шпонка

	Шпонка 1:	Шпонка 2:
Расстояние от левого торца секции вала, мм	25	20
Длина, мм	50	40
Ширина, мм	18	18
Глубина, мм	3,4	3,4

### Ресурс работы вала

Ресурс работы, час	5000
Частота вращения вала, об/мин	100

Задайте 4 опасных сечения на расстоянии от левого торца вала: 1 сечение – 70 мм, 2 сечение – 120 мм, 3 сечение – 170 мм, 4 сечение – 210 мм.

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений: переход с галтелью -  $K_\sigma = 1,55$ ;  $K_\tau = 1,40$ ; переход с канавкой -  $K_\sigma = 1,95$ ;  $K_\tau = 1,55$ ; шпоночная канавка -  $K_\sigma = 1,89$ ;  $K_\tau = 1,71$ .

**Анализируя полученные результаты (коэффициент запаса по усталостной прочности), нужно сделать вывод о том, в каких сечениях данный вал имеет недостаточную усталостную прочность, то есть для которого значение коэффициента запаса меньше допустимого  $s < s_a = 2,2$  и определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность.**

## РАСЧЕТ ВАЛА НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ ВАРИАНТ 3

**Задание.** Выполните расчет вала (см. рисунок) на сопротивление усталости (определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность), приняв:

$$T_1 = T_2 = 1500 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F_{r1} = 3 \text{ кН};$$

$$F_{a1} = 4 \text{ кН};$$

$$F_{t1} = 10 \text{ кН};$$

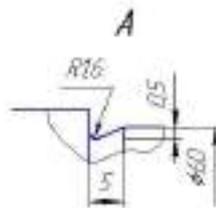
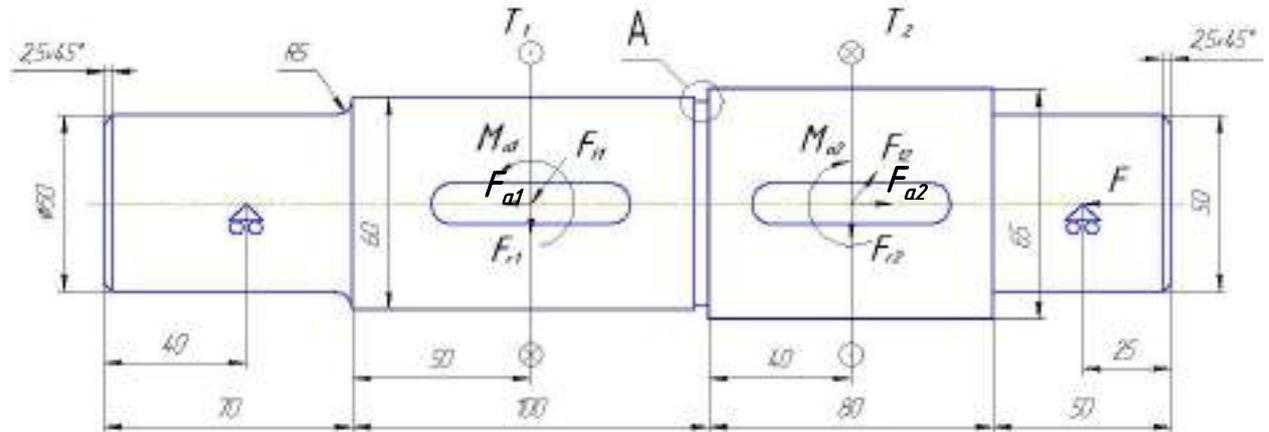
$$F_{r2} = 8 \text{ кН};$$

$$F_{a2} = 9 \text{ кН};$$

$$F_{t2} = 20 \text{ кН};$$

$$M_{a1} = M_{a2} = 250 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F = 5 \text{ кН}.$$



### Материал

Вал изготовлен из стали 55 со следующими характеристиками:

предел прочности:	$\sigma_b = 700 \text{ МПа};$
предел текучести:	$\sigma_t = 420 \text{ МПа};$

**Тип** – сталь конструкционная (прокат)

**Группа** – в улучшенном состоянии размером от 40 до 100 мм

### Шпонка

	Шпонка 1:	Шпонка 2:
Расстояние от левого торца секции вала, мм	25	20
Длина, мм	50	40
Ширина, мм	18	18
Глубина, мм	3,4	3,4

### Ресурс работы вала

Ресурс работы, час	5000
Частота вращения вала, об/мин	100

Задать 4 опасных сечения на расстоянии от левого торца вала: 1 сечение – 70 мм, 2 сечение – 120 мм, 3 сечение – 170 мм, 4 сечение – 210 мм.

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений: переход с галтелью -  $K_\sigma = 1,55$ ;  $K_\tau = 1,40$ ; переход с канавкой -  $K_\sigma = 1,95$ ;  $K_\tau = 1,55$ ; шпоночная канавка -  $K_\sigma = 1,89$ ;  $K_\tau = 1,71$ .

**Анализируя полученные результаты (коэффициент запаса по усталостной прочности), нужно сделать вывод о том, в каких сечениях данный вал имеет недостаточную усталостную прочность, то есть для которого значение коэффициента запаса меньше допустимого  $s < s_a = 2,2$  и определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность.**

# РАСЧЕТ ВАЛА НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

## ВАРИАНТ 4

**Задание.** Выполните расчет вала (см. рисунок) на сопротивление усталости (определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность), приняв:

$$T_1 = T_2 = 2100 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F_{r1} = 5 \text{ кН};$$

$$F_{a1} = 4 \text{ кН};$$

$$F_{t1} = 14 \text{ кН};$$

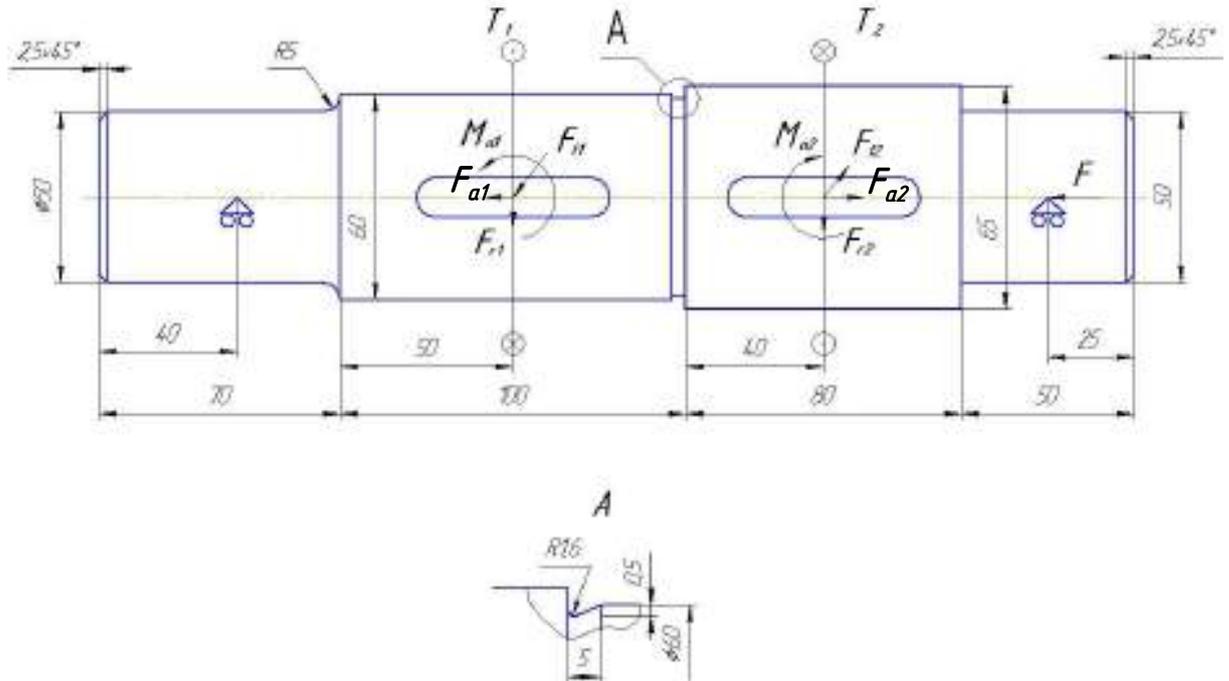
$$F_{r2} = 11 \text{ кН};$$

$$F_{a2} = 10 \text{ кН};$$

$$F_{t2} = 25 \text{ кН};$$

$$M_{a1} = M_{a2} = 320 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F = 6 \text{ кН}.$$



### Материал

Вал изготовлен из стали 55 со следующими характеристиками:

предел прочности:	$\sigma_b = 700 \text{ МПа};$
предел текучести:	$\sigma_t = 420 \text{ МПа};$

**Тип** – сталь конструкционная (прокат)

**Группа** – в улучшенном состоянии размером от 40 до 100 мм

### Шпонка

	Шпонка 1:	Шпонка 2:
Расстояние от левого торца секции вала, мм	25	20
Длина, мм	50	40
Ширина, мм	18	18
Глубина, мм	3,4	3,4

### Ресурс работы вала

Ресурс работы, час	5000
Частота вращения вала, об/мин	100

Задать 4 опасных сечения на расстоянии от левого торца вала: 1 сечение – 70 мм, 2 сечение – 120 мм, 3 сечение – 170 мм, 4 сечение – 210 мм.

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений: переход с галтелью -  $K_\sigma = 1,55$ ;  $K_\tau = 1,40$ ; переход с канавкой -  $K_\sigma = 1,95$ ;  $K_\tau = 1,55$ ; шпоночная канавка -  $K_\sigma = 1,89$ ;  $K_\tau = 1,71$ .

**Анализируя полученные результаты (коэффициент запаса по усталостной прочности), нужно сделать вывод о том, в каких сечениях данный вал имеет недостаточную усталостную прочность, то есть для которого значение коэффициента запаса меньше допустимого  $s < s_a = 2,2$  и определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность.**

# РАСЧЕТ ВАЛА НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

## ВАРИАНТ 5

**Задание.** Выполните расчет вала (см. рисунок) на сопротивление усталости (определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность), приняв:

$$T_1 = T_2 = 2500 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F_{r1} = 4 \text{ кН};$$

$$F_{a1} = 2 \text{ кН};$$

$$F_{t1} = 12 \text{ кН};$$

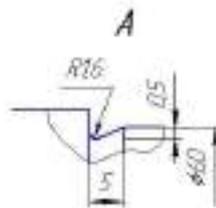
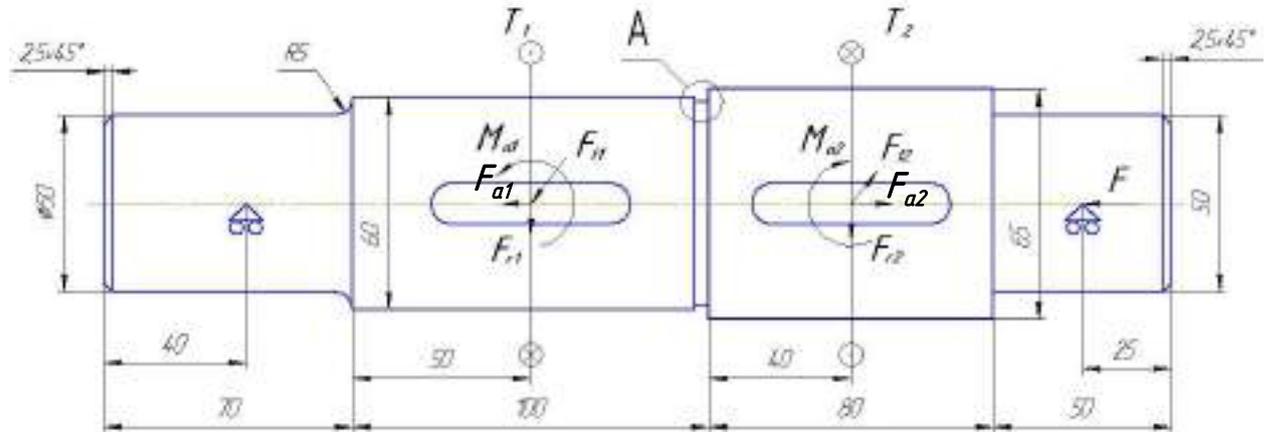
$$F_{r2} = 10 \text{ кН};$$

$$F_{a2} = 5 \text{ кН};$$

$$F_{t2} = 23 \text{ кН};$$

$$M_{a1} = M_{a2} = 400 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F = 3 \text{ кН};$$



### Материал

Вал изготовлен из стали 55 со следующими характеристиками:

предел прочности:	$\sigma_b = 700 \text{ МПа};$
предел текучести:	$\sigma_t = 420 \text{ МПа};$

**Тип** – сталь конструкционная (прокат)

**Группа** – в улучшенном состоянии размером от 40 до 100 мм

### Шпонка

	Шпонка 1:	Шпонка 2:
Расстояние от левого торца секции вала, мм	25	20
Длина, мм	50	40
Ширина, мм	18	18
Глубина, мм	3,4	3,4

### Ресурс работы вала

Ресурс работы, час	5000
Частота вращения вала, об/мин	100

Задать 4 опасных сечения на расстоянии от левого торца вала: 1 сечение – 70 мм, 2 сечение – 120 мм, 3 сечение – 170 мм, 4 сечение – 210 мм.

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений: переход с галтелью -  $K_\sigma = 1,55$ ;  $K_\tau = 1,40$ ; переход с канавкой -  $K_\sigma = 1,95$ ;  $K_\tau = 1,55$ ; шпоночная канавка -  $K_\sigma = 1,89$ ;  $K_\tau = 1,71$ .

**Анализируя полученные результаты (коэффициент запаса по усталостной прочности), нужно сделать вывод о том, в каких сечениях данный вал имеет недостаточную усталостную прочность, то есть для которого значение коэффициента запаса меньше допустимого  $s < s_a = 2,2$  и определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность.**

# РАСЧЕТ ВАЛА НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

## ВАРИАНТ 6

**Задание.** Выполните расчет вала (см. рисунок) на сопротивление усталости (определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность), приняв:

$$T_1 = T_2 = 3000 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F_{r1} = 5 \text{ кН};$$

$$F_{a1} = 5 \text{ кН};$$

$$F_{t1} = 15 \text{ кН};$$

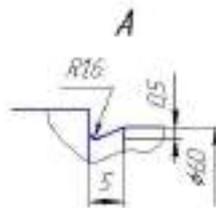
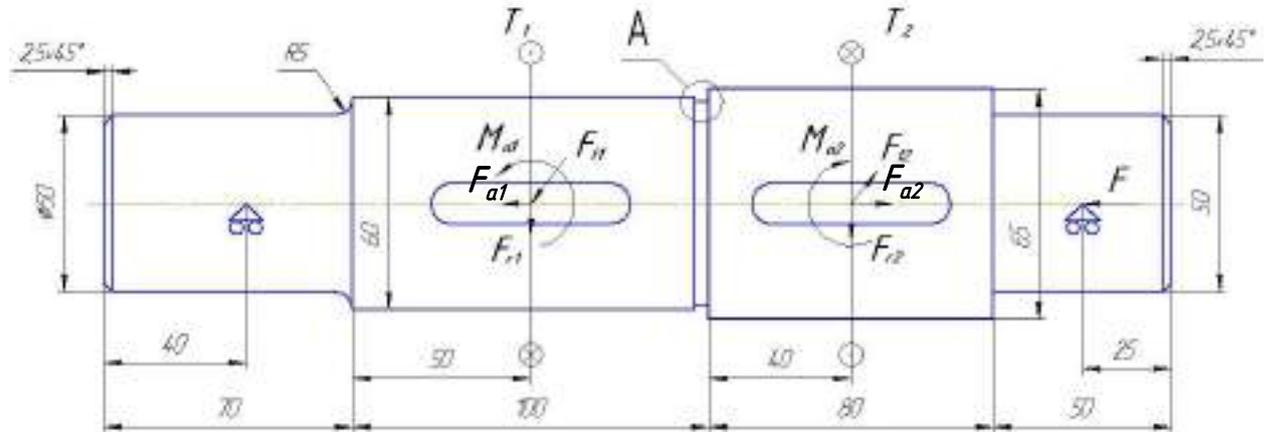
$$F_{r2} = 12 \text{ кН};$$

$$F_{a2} = 11 \text{ кН};$$

$$F_{t2} = 30 \text{ кН};$$

$$M_{a1} = M_{a2} = 500 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$F = 6 \text{ кН}.$$



### Материал

Вал изготовлен из стали 55 со следующими характеристиками:

предел прочности:	$\sigma_b = 700 \text{ МПа};$
предел текучести:	$\sigma_t = 420 \text{ МПа};$

**Тип** – сталь конструкционная (прокат)

**Группа** – в улучшенном состоянии размером от 40 до 100 мм

### Шпонка

	Шпонка 1:	Шпонка 2:
Расстояние от левого торца секции вала, мм	25	20
Длина, мм	50	40
Ширина, мм	18	18
Глубина, мм	3,4	3,4

### Ресурс работы вала

Ресурс работы, час	5000
Частота вращения вала, об/мин	100

Задать 4 опасных сечения на расстоянии от левого торца вала: 1 сечение – 70 мм, 2 сечение – 120 мм, 3 сечение – 170 мм, 4 сечение – 210 мм.

Эффективные коэффициенты концентрации напряжений: переход с галтелью -  $K_\sigma = 1,55$ ;  $K_\tau = 1,40$ ; переход с канавкой -  $K_\sigma = 1,95$ ;  $K_\tau = 1,55$ ; шпоночная канавка -  $K_\sigma = 1,89$ ;  $K_\tau = 1,71$ .

**Анализируя полученные результаты (коэффициент запаса по усталостной прочности), нужно сделать вывод о том, в каких сечениях данный вал имеет недостаточную усталостную прочность, то есть для которого значение коэффициента запаса меньше допустимого  $s < s_a = 2,2$  и определить расстояние от начала вала, в котором он имеет наименьшую усталостную прочность.**

# РАСЧЕТ ВАЛА

## ВАРИАНТ 1

**Задание.** Выполните расчет вала, приняв:

### Размеры секций вала

Номер секции	Длина, мм	Левый диаметр, мм	Правый диаметр, мм
Первая секция	50	40	40
Вторая секция	60	50	50
Третья секция	70	65	65
Четвертая секция	68	55	55
Пятая секция	50	40	40

### Размеры отверстий в 4 и 5 секциях

Отверстие в секции	Длина, мм	Левый радиус, мм	Правый радиус, мм
Пятая секция	45	8	8
Четвертая секция	46	6	6

### Фаски

Место расположения	Угол, град	Ширина, мм
В начале вала	45	4
В конце вала	45	2

### Галтели

Галтель между секциями	Радиус, мм
Первой и второй	2
Четвертой и пятой	3

**Канавка между 3 и 4 секциями** – выбрать первый тип

**Шпонка** – прямоугольная на 3 секции

Расстояние от левого торца секции вала, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина, мм
13	42	12	2

### Опоры

Тип	Расстояние от левого торца вала, мм
	30
	276

### Поперечная сила

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекция	
	Вертикальная, Н	Горизонтальная, Н
142	-5000	7000

**Распределенная сила** – вертикальная

Расстояние от левого торца вала до левой границы, мм	Расстояние от левого торца вала до правой границы, мм	Удельная сила на левой границе, Н/мм	Удельная сила на правой границе, Н/мм
7	45	35	20

### Распределенная сила – горизонтальная

Расстояние от левого торца вала до левой границы, мм	Расстояние от левого торца вала до правой границы, мм	Удельная сила на левой границе, Н/мм	Удельная сила на правой границе, Н/мм
55	100	-36	40

### Осевые силы

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Н
142	-4000
276	4000

### Момент изгиба

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекция	
	Вертикальная, Нм	Горизонтальная, Нм
142	800	0

### Момент кручения

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Нм
142	1200
297	-1200

**Материал** – Сталь конструкционная (прокат), обозначение – 50, группа – в нормализованном состоянии

**Ресурс работы** – 10000 час, частота вращения – 300 мин<sup>-1</sup>.

**Выполните общий расчет вала.**

**Выполните расчет динамических характеристик**, задав сосредоточенную массу, равную 2 кг на расстоянии от левого торца вала 142 мм.

**После расчета вала сгенерируйте его рабочий чертеж в формате редактора APM Graph в папку “ОКК” под именем “Вал”, расположенной на локальном диске “С”.**

# РАСЧЕТ ВАЛА

## ВАРИАНТ 2

**Задание.** Выполните расчет вала, приняв:

### Размеры секций вала

Номер секции	Длина, мм	Левый диаметр, мм	Правый диаметр, мм
Первая секция	50	40	40
Вторая секция	60	50	50
Третья секция	70	65	65
Четвертая секция	68	55	55
Пятая секция	50	40	40

### Размеры отверстий в 4 и 5 секциях

Отверстие в секции	Длина, мм	Левый радиус, мм	Правый радиус, мм
Пятая секция	45	8	8
Четвертая секция	46	6	6

### Фаски

Место расположения	Угол, град	Ширина, мм
В начале вала	45	4
В конце вала	45	2

### Галтели

Галтель между секциями	Радиус, мм
Первой и второй	2
Четвертой и пятой	3

**Канавка между 3 и 4 секциями** – выбрать первый тип

### Шпонка – прямоугольная на 3 секции

Расстояние от левого торца секции вала, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина, мм
13	42	12	2

### Опоры

Тип	Расстояние от левого торца вала, мм
	30
	276

### Поперечная сила

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекция	
	Вертикальная, Н	Горизонтальная, Н
142	-5000	7000

### Распределенная сила – вертикальная

Расстояние от левого торца вала до левой границы, мм	Расстояние от левого торца вала до правой границы, мм	Удельная сила на левой границе, Н/мм	Удельная сила на правой границе, Н/мм
7	45	35	20

**Распределенная сила – горизонтальная**

Расстояние от левого торца вала до левой границы, мм	Расстояние от левого торца вала до правой границы, мм	Удельная сила на левой границе, Н/мм	Удельная сила на правой границе, Н/мм
55	100	-36	40

**Осевые силы**

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Н
142	-7000
276	7000

**Момент изгиба**

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекция	
	Вертикальная, Нм	Горизонтальная, Нм
142	800	0

**Момент кручения**

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Нм
142	2000
297	-2000

**Материал** – Сталь конструкционная (прокат), обозначение – 50, группа – в нормализованном состоянии

**Ресурс работы** – 10000 час, **частота вращения** – 300 мин<sup>-1</sup>.

**Выполните общий расчет вала.**

**Выполните расчет динамических характеристик**, задав сосредоточенную массу, равную 2 кг на расстоянии от левого торца вала 142 мм.

**После расчета вала сгенерируйте его рабочий чертеж в формате редактора APM Graph в папку “ОКК” под именем “Вал”, расположенной на локальном диске “С”.**

# РАСЧЕТ ВАЛА

## ВАРИАНТ 3

**Задание.** Выполните расчет вала, приняв:

### Размеры секций вала

Номер секции	Длина, мм	Левый диаметр, мм	Правый диаметр, мм
Первая секция	50	40	40
Вторая секция	60	50	50
Третья секция	70	65	65
Четвертая секция	68	55	55
Пятая секция	50	40	40

### Размеры отверстий в 4 и 5 секциях

Отверстие в секции	Длина, мм	Левый радиус, мм	Правый радиус, мм
Пятая секция	45	8	8
Четвертая секция	46	6	6

### Фаски

Место расположения	Угол, град	Ширина, мм
В начале вала	45	4
В конце вала	45	2

### Галтели

Галтель между секциями	Радиус, мм
Первой и второй	2
Четвертой и пятой	3

**Канавка между 3 и 4 секциями** – выбрать первый тип

**Шпонка** – прямоугольная на 3 секции

Расстояние от левого торца секции вала, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина, мм
13	42	12	2

### Опоры

Тип	Расстояние от левого торца вала, мм
	30
	276

### Поперечная сила

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекция	
	Вертикальная, Н	Горизонтальная, Н
142	-5000	7000

**Распределенная сила** – вертикальная

Расстояние от левого торца вала до левой границы, мм	Расстояние от левого торца вала до правой границы, мм	Удельная сила на левой границе, Н/мм	Удельная сила на правой границе, Н/мм
--	---	--------------------------------------	---------------------------------------

7	45	35	20
---	----	----	----

### Распределенная сила – горизонтальная

Расстояние от левого торца вала до левой границы, мм	Расстояние от левого торца вала до правой границы, мм	Удельная сила на левой границе, Н/мм	Удельная сила на правой границе, Н/мм
55	100	-36	40

### Осевые силы

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Н
142	-4000
276	4000

### Момент изгиба

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекция	
	Вертикальная, Нм	Горизонтальная, Нм
142	800	0

### Момент кручения

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Нм
142	1200
297	-1200

**Материал** – Сталь конструкционная (прокат), обозначение – 10, группа – в нормализованном состоянии

**Ресурс работы** – 10000 час, **частота вращения** – 300 мин<sup>-1</sup>.

**Выполните общий расчет вала.**

**Выполните расчет динамических характеристик**, задав сосредоточенную массу, равную 2 кг на расстоянии от левого торца вала 142 мм.

**После расчета вала сгенерируйте его рабочий чертеж в формате редактора APM Graph в папку “ОКК” под именем “Вал”, расположенной на локальном диске “С”.**

# РАСЧЕТ ВАЛА

## ВАРИАНТ 4

**Задание.** Выполните расчет вала, приняв:

### Размеры секций вала

Номер секции	Длина, мм	Левый диаметр, мм	Правый диаметр, мм
Первая секция	50	40	40
Вторая секция	60	50	50
Третья секция	70	65	65
Четвертая секция	68	55	55
Пятая секция	50	40	40

### Размеры отверстий в 4 и 5 секциях

Отверстие в секции	Длина, мм	Левый радиус, мм	Правый радиус, мм
Пятая секция	45	8	8
Четвертая секция	46	6	6

### Фаски

Место расположения	Угол, град	Ширина, мм
В начале вала	45	4
В конце вала	45	2

### Галтели

Галтель между секциями	Радиус, мм
Первой и второй	2
Четвертой и пятой	3

**Канавка между 3 и 4 секциями** – выбрать первый тип

### Шпонка – прямоугольная на 3 секции

Расстояние от левого торца секции вала, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина, мм
13	42	12	2

### Опоры

Тип	Расстояние от левого торца вала, мм
	30
	276

### Поперечная сила

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекция	
	Вертикальная, Н	Горизонтальная, Н
142	-5000	7000

### Распределенная сила – вертикальная

Расстояние от левого	Расстояние от левого	Удельная сила на левой	Удельная сила на п
----------------------	----------------------	------------------------	--------------------

торца вала до левой границы, мм	торца вала до правой границы, мм	границе, Н/мм	вой границе, Н/мм
7	45	35	20

#### Распределенная сила – горизонтальная

Расстояние от левого торца вала до левой границы, мм	Расстояние от левого торца вала до правой границы, мм	Удельная сила на левой границе, Н/мм	Удельная сила на правой границе, Н/мм
55	100	-36	40

#### Осевые силы

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Н
142	-4000
276	4000

#### Момент изгиба

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекция	
	Вертикальная, Нм	Горизонтальная, Нм
142	800	0

#### Момент кручения

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Нм
142	1200
297	-1200

**Материал** – Сталь углеродистая (прокат), обозначение – Ст3кп, группа – толщиной от 40 до 100 мм

**Ресурс работы** – 10000 час, **частота вращения** – 700 мин<sup>-1</sup>.

**Выполните общий расчет вала.**

**Выполните расчет динамических характеристик**, задав сосредоточенную массу, равную 2 кг на расстоянии от левого торца вала 142 мм.

**После расчета вала сгенерируйте его рабочий чертеж в формате редактора APM Graph в папку “ОКК” под именем “Вал”, расположенной на локальном диске “С”.**

# РАСЧЕТ ВАЛА

## ВАРИАНТ 5

**Задание.** Выполните расчет вала, приняв:

### Размеры секций вала

Номер секции	Длина, мм	Левый диаметр, мм	Правый диаметр, мм
Первая секция	50	40	40
Вторая секция	60	50	50
Третья секция	70	65	65
Четвертая секция	68	55	55
Пятая секция	50	40	40

### Размеры отверстий в 4 и 5 секциях

Отверстие в секции	Длина, мм	Левый радиус, мм	Правый радиус, мм
Пятая секция	45	8	8
Четвертая секция	46	6	6

### Фаски

Место расположения	Угол, град	Ширина, мм
В начале вала	45	4
В конце вала	45	2

### Галтели

Галтель между секциями	Радиус, мм
Первой и второй	2
Четвертой и пятой	3

**Канавка между 3 и 4 секциями** – выбрать первый тип

**Шпонка** – прямоугольная на 3 секции

Расстояние от левого торца секции вала, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина, мм
13	42	12	2

### Опоры

Тип	Расстояние от левого торца вала, мм
	30
	276

### Поперечная сила

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекция	
	Вертикальная, Н	Горизонтальная, Н
142	-10000	12000

**Распределенная сила – вертикальная**

Расстояние от левого торца вала до левой границы, мм	Расстояние от левого торца вала до правой границы, мм	Удельная сила на левой границе, Н/мм	Удельная сила на правой границе, Н/мм
7	45	35	20

**Распределенная сила – горизонтальная**

Расстояние от левого торца вала до левой границы, мм	Расстояние от левого торца вала до правой границы, мм	Удельная сила на левой границе, Н/мм	Удельная сила на правой границе, Н/мм
55	100	-36	40

**Осевые силы**

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Н
142	-4000
276	4000

**Момент изгиба**

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекция	
	Вертикальная, Нм	Горизонтальная, Нм
142	1500	0

**Момент кручения**

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Нм
142	1200
297	-1200

**Материал** – Сталь углеродистая (прокат), обозначение – Ст3кп, группа – толщиной от 40 до 100 мм

**Ресурс работы** – 10000 час, частота вращения – 100 мин<sup>-1</sup>.

**Выполните общий расчет вала.**

**Выполните расчет динамических характеристик**, задав сосредоточенную массу, равную 2 кг на расстоянии от левого торца вала 142 мм.

**После расчета вала сгенерируйте его рабочий чертеж в формате редактора APM Graph в папку “ОКК” под именем “Вал”, расположенной на локальном диске “С”.**

# РАСЧЕТ ВАЛА

## ВАРИАНТ 6

**Задание.** Выполните расчет вала, приняв:

### Размеры секций вала

Номер секции	Длина, мм	Левый диаметр, мм	Правый диаметр, мм
Первая секция	50	40	40
Вторая секция	60	50	50
Третья секция	70	65	65
Четвертая секция	68	55	55
Пятая секция	50	40	40

### Размеры отверстий в 4 и 5 секциях

Отверстие в секции	Длина, мм	Левый радиус, мм	Правый радиус, мм
Пятая секция	45	8	8
Четвертая секция	46	6	6

### Фаски

Место расположения	Угол, град	Ширина, мм
В начале вала	45	4
В конце вала	45	2

### Галтели

Галтель между секциями	Радиус, мм
Первой и второй	2
Четвертой и пятой	3

**Канавка между 3 и 4 секциями** – выбрать первый тип

**Шпонка** – прямоугольная на 3 секции

Расстояние от левого торца секции вала, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина, мм
13	42	12	2

### Опоры

Тип	Расстояние от левого торца вала, мм
	30
	276

### Поперечная сила

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекция	
	Вертикальная, Н	Горизонтальная, Н

142	-10000	12000
-----	--------	-------

#### Распределенная сила – вертикальная

Расстояние от левого торца вала до левой границы, мм	Расстояние от левого торца вала до правой границы, мм	Удельная сила на левой границе, Н/мм	Удельная сила на правой границе, Н/мм
7	45	35	20

#### Распределенная сила – горизонтальная

Расстояние от левого торца вала до левой границы, мм	Расстояние от левого торца вала до правой границы, мм	Удельная сила на левой границе, Н/мм	Удельная сила на правой границе, Н/мм
55	100	-36	40

#### Осевые силы

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Н
142	-4000
276	4000

#### Момент изгиба

Расстояние от левого торца вала, мм	Проекции	
	Вертикальная, Нм	Горизонтальная, Нм
142	1500	0

#### Момент кручения

Расстояние от левого торца вала, мм	Значение, Нм
142	1200
297	-1200

**Материал** – Сталь конструкционная (прокат), обозначение – 08, группа – в нормализованном состоянии

**Ресурс работы** – 10000 час, частота вращения – 100 мин<sup>-1</sup>.

**Выполните общий расчет вала.**

**Выполните расчет динамических характеристик**, задав сосредоточенную массу, равную 2 кг на расстоянии от левого торца вала 142 мм.

**После расчета вала сгенерируйте его рабочий чертеж в формате редактора APM Graph в папку “ОКК” под именем “Вал”, расположенной на локальном диске “С”.**

# APM BEAR

## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ВАРИАНТ 1

**Задание.** Подберите подшипники качения для опор выходного вала червячного редуктора.

Частота вращения вала	25 об/мин
Требуемый ресурс работы при вероятности безотказной работы 90%	$L_h' = 20000$ часов
Режим нагружения	постоянный
Силы: осевая сила	1852 Н
радиальная сила на нагруженной опоре	5198 Н
радиальная сила на ненагруженной опоре	4018 Н
Коэффициент динамичности	1,3
Схема установки подшипника	схема "X"

### РАСЧЕТ

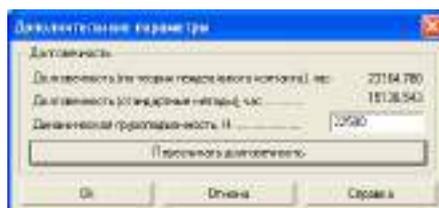
1. В меню **Данные – Тип подшипника** выберите из шариковых подшипников позицию **Радиально-упорный подшипник**.

2. В меню **Данные – Геометрия** выберите подшипник 46109 из встроенной базы данных.

3. В меню **Данные – Точность** задайте величины биений внутреннего и внешнего кольца, выбрав значения из базы данных для нулевого класса точности изготовления (минимальный и максимальный диаметры взять в параметрах для выбранного подшипника: меню **Данные – Геометрия**).

4. В меню **Данные – Условия** работы указать схему установки подшипника, величины действующих на опоры сил и тип нагрузки.

5. После выполнения расчета значение долговечности для выбранного подшипника, подсчитанное стандартными методами (по теории идеального контакта), можно просмотреть в диалоговом окне **Дополнительные параметры** (меню **Результаты**, кнопка **Еще...**). Для этого необходимо вставить нужное значение динамической грузоподъемности для выбранного подшипника (см. меню **Данные – Геометрия – База данных – Подшипник 46109**) и нажать **Пересчитать долговечность**.



6. Как видно из рисунка для заданных условий нагружения подшипник 46109 является непригодным к применению, так как его расчетный ресурс работы меньше требуемого:

$$L_h < L_h' = 15130 \text{ часов} < 20000 \text{ часов}$$

7. Подобрать подшипник, у которого расчетный ресурс превышает требуемый  $L_h > L_h'$

## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ВАРИАНТ 2

**Задание.** Подберите подшипники качения для опор выходного вала червячного редуктора.

Частота вращения вала	30 об/мин
Требуемый ресурс работы при вероятности безотказной работы 90%	$L_n' = 20000$ часов
Режим нагружения	постоянный
Силы: осевая сила радиальная сила на нагруженной опоре радиальная сила на ненагруженной опоре	1900 Н 5000 Н 4000 Н
Коэффициент динамичности	1,3
Схема установки подшипника	схема "X"

### РАСЧЕТ

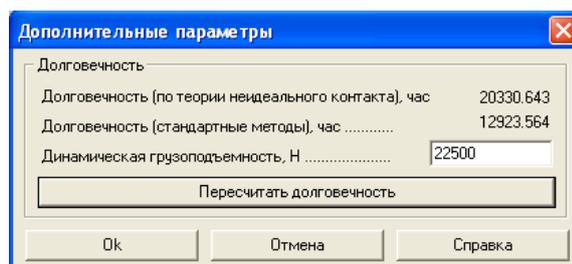
1. В меню **Данные – Тип подшипника** выберите из шариковых подшипников позицию **Радиально-упорный подшипник**.

2. В меню **Данные – Геометрия** выберите подшипник 46109 из встроенной базы данных.

3. В меню **Данные – Точность** задайте величины биений внутреннего и внешнего кольца, выбрав значения из базы данных для нулевого класса точности изготовления (минимальный и максимальный диаметры взять в параметрах для выбранного подшипника: меню **Данные – Геометрия**).

4. В меню **Данные – Условия работы** указать схему установки подшипника, величины действующих на опоры сил и тип нагрузки.

5. После выполнения расчета значение долговечности для выбранного подшипника, подсчитанное стандартными методами (по теории идеального контакта), можно просмотреть в диалоговом окне **Дополнительные параметры** (меню **Результаты**, кнопка **Еще...**). Для этого необходимо вставить нужное значение динамической грузоподъемности для выбранного подшипника (см. меню **Данные – Геометрия – База данных – Подшипник 46109**) и нажать **Пересчитать долговечность**.



6. Как видно из рисунка для заданных условий нагружения подшипник 46109 является непригодным к применению, так как его расчетный ресурс работы меньше требуемого:

$$L_n < L_n' = 12923 \text{ часов} < 20000 \text{ часов}$$

7. Подобрать подшипник, у которого расчетный ресурс превышает требуемый  $L_n > L_n'$

## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ВАРИАНТ 3

**Задание.** Подберите подшипники качения для опор выходного вала червячного редуктора.

Частота вращения вала	40 об/мин
Требуемый ресурс работы при вероятности безотказной работы 90%	$L_h' = 20000$ часов
Режим нагружения	постоянный
Силы: осевая сила радиальная сила на нагруженной опоре радиальная сила на ненагруженной опоре	2000 Н 6000 Н 5000 Н
Коэффициент динамичности	1,3
Схема установки подшипника	схема "X"

### РАСЧЕТ

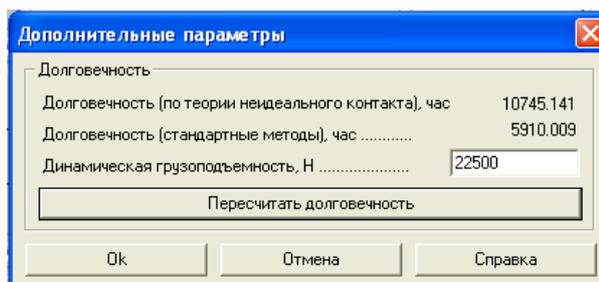
1. В меню **Данные – Тип подшипника** выберите из шариковых подшипников позицию **Радиально-упорный подшипник**.

2. В меню **Данные – Геометрия** выберите подшипник 46109 из встроенной базы данных.

3. В меню **Данные – Точность** задайте величины биений внутреннего и внешнего кольца, выбрав значения из базы данных для нулевого класса точности изготовления (минимальный и максимальный диаметры взять в параметрах для выбранного подшипника: меню **Данные – Геометрия**).

4. В меню **Данные – Условия работы** указать схему установки подшипника, величины действующих на опоры сил и тип нагрузки.

5. После выполнения расчета значение долговечности для выбранного подшипника, подсчитанное стандартными методами (по теории идеального контакта), можно просмотреть в диалоговом окне **Дополнительные параметры** (меню **Результаты**, кнопка **Еще...**). Для этого необходимо вставить нужное значение динамической грузоподъемности для выбранного подшипника (см. меню **Данные – Геометрия – База данных – Подшипник 46109**) и нажать **Пересчитать долговечность**.



6. Как видно из рисунка для заданных условий нагружения подшипник 46109 является непригодным к применению, так как его расчетный ресурс работы меньше требуемого:

$$L_h < L_h' = 5910 \text{ часов} < 20000 \text{ часов}$$

7. Подобрать подшипник, у которого расчетный ресурс превышает требуемый  $L_h > L_h'$

## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ВАРИАНТ 4

**Задание.** Подберите подшипники качения для опор выходного вала червячного редуктора.

Частота вращения вала	20 об/мин
Требуемый ресурс работы при вероятности безотказной работы 90%	$L_h' = 20000$ часов
Режим нагружения	постоянный
Силы: осевая сила радиальная сила на нагруженной опоре радиальная сила на ненагруженной опоре	1900 Н 5000 Н 4000 Н
Коэффициент динамичности	1,3
Схема установки подшипника	схема "X"

### РАСЧЕТ

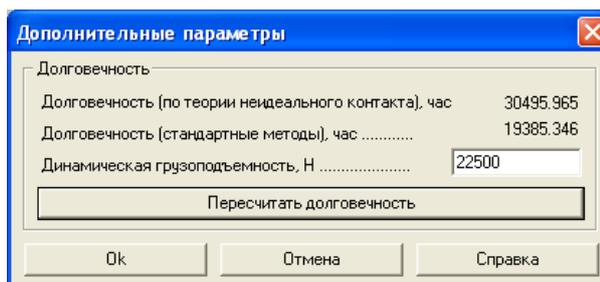
1. В меню **Данные – Тип подшипника** выберите из шариковых подшипников позицию **Радиально-упорный подшипник**.

2. В меню **Данные – Геометрия** выберите подшипник 46109 из встроенной базы данных.

3. В меню **Данные – Точность** задайте величины биений внутреннего и внешнего кольца, выбрав значения из базы данных для нулевого класса точности изготовления (минимальный и максимальный диаметры взять в параметрах для выбранного подшипника: меню **Данные – Геометрия**).

4. В меню **Данные – Условия работы** указать схему установки подшипника, величины действующих на опоры сил и тип нагрузки.

5. После выполнения расчета значение долговечности для выбранного подшипника, подсчитанное стандартными методами (по теории идеального контакта), можно просмотреть в диалоговом окне **Дополнительные параметры** (меню **Результаты**, кнопка **Еще...**). Для этого необходимо вставить нужное значение динамической грузоподъемности для выбранного подшипника (см. меню **Данные – Геометрия – База данных – Подшипник 46109**) и нажать **Пересчитать долговечность**.



6. Как видно из рисунка для заданных условий нагружения подшипник 46109 является непригодным к применению, так как его расчетный ресурс работы меньше требуемого:

$$L_h < L_h' = 19385 \text{ часов} < 20000 \text{ часов}$$

7. Подобрать подшипник, у которого расчетный ресурс превышает требуемый  $L_h > L_h'$

## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ВАРИАНТ 5

**Задание.** Подберите подшипники качения для опор выходного вала червячного редуктора.

Частота вращения вала	50 об/мин
Требуемый ресурс работы при вероятности безотказной работы 90%	$L_h' = 20000$ часов
Режим нагружения	постоянный
Силы: осевая сила радиальная сила на нагруженной опоре радиальная сила на ненагруженной опоре	2300 Н 6000 Н 5000 Н
Коэффициент динамичности	1,3
Схема установки подшипника	схема "X"

### РАСЧЕТ

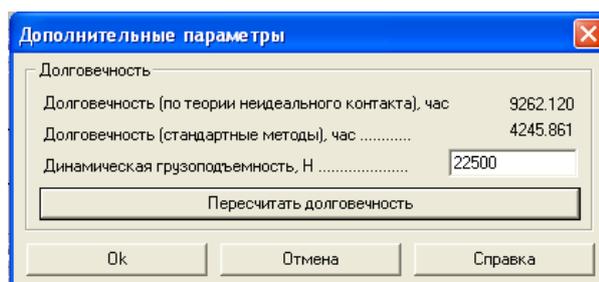
1. В меню **Данные – Тип подшипника** выберите из шариковых подшипников позицию **Радиально-упорный подшипник**.

2. В меню **Данные – Геометрия** выберите подшипник 46109 из встроенной базы данных.

3. В меню **Данные – Точность** задайте величины биений внутреннего и внешнего кольца, выбрав значения из базы данных для нулевого класса точности изготовления (минимальный и максимальный диаметры взять в параметрах для выбранного подшипника: меню **Данные – Геометрия**).

4. В меню **Данные – Условия работы** указать схему установки подшипника, величины действующих на опоры сил и тип нагрузки.

5. После выполнения расчета значение долговечности для выбранного подшипника, подсчитанное стандартными методами (по теории идеального контакта), можно просмотреть в диалоговом окне **Дополнительные параметры** (меню **Результаты**, кнопка **Еще...**). Для этого необходимо вставить нужное значение динамической грузоподъемности для выбранного подшипника (см. меню **Данные – Геометрия – База данных – Подшипник 46109**) и нажать **Пересчитать долговечность**.



6. Как видно из рисунка для заданных условий нагружения подшипник 46109 является непригодным к применению, так как его расчетный ресурс работы меньше требуемого:

$$L_h < L_h' = 4246 \text{ часов} < 20000 \text{ часов}$$

7. Подобрать подшипник, у которого расчетный ресурс превышает требуемый  $L_h > L_h'$

## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ВАРИАНТ 6

**Задание.** Подберите подшипники качения для опор выходного вала червячного редуктора.

Частота вращения вала	30 об/мин
Требуемый ресурс работы при вероятности безотказной работы 90%	$L_h' = 20000$ часов
Режим нагружения	постоянный
Силы: осевая сила радиальная сила на нагруженной опоре радиальная сила на ненагруженной опоре	2000 Н 5500 Н 4500 Н
Коэффициент динамичности	1,3
Схема установки подшипника	схема "X"

### РАСЧЕТ

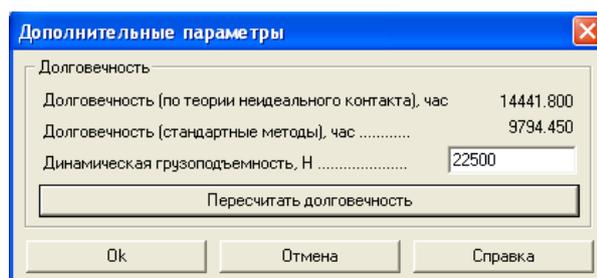
1. В меню **Данные – Тип подшипника** выберите из шариковых подшипников позицию **Радиально-упорный подшипник**.

2. В меню **Данные – Геометрия** выберите подшипник 46109 из встроенной базы данных.

3. В меню **Данные – Точность** задайте величины биений внутреннего и внешнего кольца, выбрав значения из базы данных для нулевого класса точности изготовления (минимальный и максимальный диаметры взять в параметрах для выбранного подшипника: меню **Данные – Геометрия**).

4. В меню **Данные – Условия работы** указать схему установки подшипника, величины действующих на опоры сил и тип нагрузки.

5. После выполнения расчета значение долговечности для выбранного подшипника, подсчитанное стандартными методами (по теории идеального контакта), можно просмотреть в диалоговом окне **Дополнительные параметры** (меню **Результаты**, кнопка **Еще...**). Для этого необходимо вставить нужное значение динамической грузоподъемности для выбранного подшипника (см. меню **Данные – Геометрия – База данных – Подшипник 46109**) и нажать **Пересчитать долговечность**.



6. Как видно из рисунка для заданных условий нагружения подшипник 46109 является непригодным к применению, так как его расчетный ресурс работы меньше требуемого:

$$L_h < L_h' = 9794 \text{ часов} < 20000 \text{ часов}$$

7. Подобрать подшипник, у которого расчетный ресурс превышает требуемый  $L_h > L_h'$

## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ВАРИАНТ 1

**Задание.** Подберите подшипники для вала редуктора (рисунок 1) при следующих исходных данных. Диаметр в месте посадки подшипников  $d = 60$  мм,  $n = 100$  мин<sup>-1</sup>, ресурс  $L'_h = 20\ 000$  ч, режим нагрузки – средний равновероятный, допускаемые двухкратные кратковременные перегрузки, температура подшипника  $t < 100^\circ\text{C}$ , реакции опор по рисунку 2 –  $F_{R1} = 10417$  Н,  $F_{R2} = 16381$  Н,  $F_a = 906$  Н и направлена в сторону левой опоры. Коэффициент динамичности – 1.3.

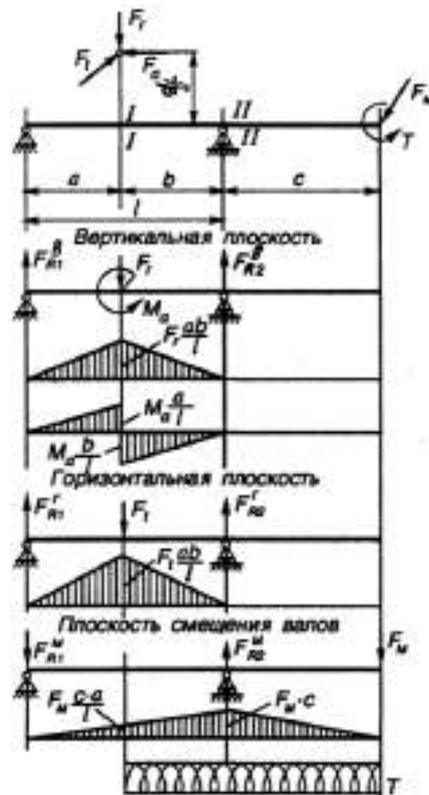
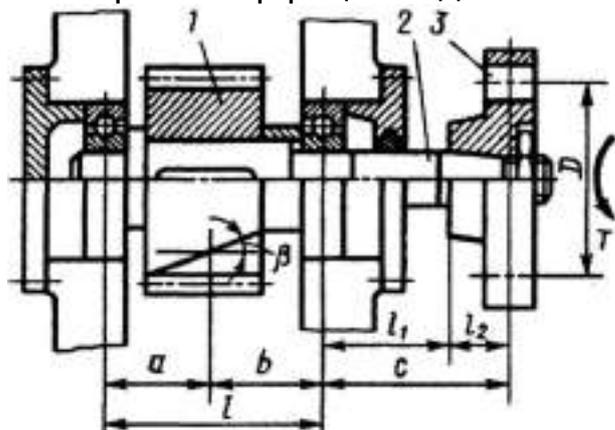


Рисунок 1 Вал с элементами, расположенными на нем: 1 – шестерня; 2 – вал; 3 – полумуфта

Рисунок 2

### РАСЧЕТ

1. Учитывая сравнительно небольшую осевую силу  $F_a$ , назначьте шариковые радиальные подшипники средней серии, условное обозначение 312 ГО.

2. Определите эквивалентную динамическую нагрузку на подшипник с учетом переменного режима нагружения

$$F_{mR1} = K_E F_{R1}; \quad F_{mR2} = K_E F_{R2}; \quad F_{ma} = K_E F_a$$

где  $K_E$  – коэффициент эквивалентности; находится в зависимости от режима нагрузки:

Режимы нагрузки:

0 – постоянный; I – тяжелый; II – средний равновероятный; III – средний нормальный; IV – легкий; V – особо легкий

Режим нагрузки	0	I	II	III	IV	V
$K_E$	1,00	0,80	0,63	0,56	0,50	0,40

3. Расчет вести с учетом переменного режима нагружения.

4. Сделайте вывод о пригодности данных подшипников.

## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ВАРИАНТ 2

**Задание.** Подберите подшипники для вала редуктора (рисунок 1) при следующих исходных данных. Диаметр в месте посадки подшипников  $d = 60$  мм,  $n = 250$  мин<sup>-1</sup>, ресурс  $L'_h = 20\,000$  ч, режим нагрузки – средний равновероятный, допускаемые двухкратные кратковременные перегрузки, температура подшипника  $t < 100^\circ\text{C}$ , реакции опор по рисунку 2 –  $F_{R1} = 10417$  Н,  $F_{R2} = 16381$  Н,  $F_a = 906$  Н и направлена в сторону левой опоры. Коэффициент динамичности – 1.3.

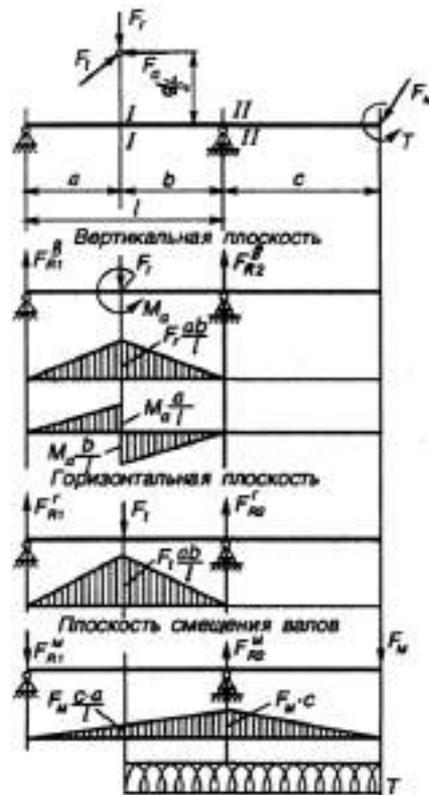
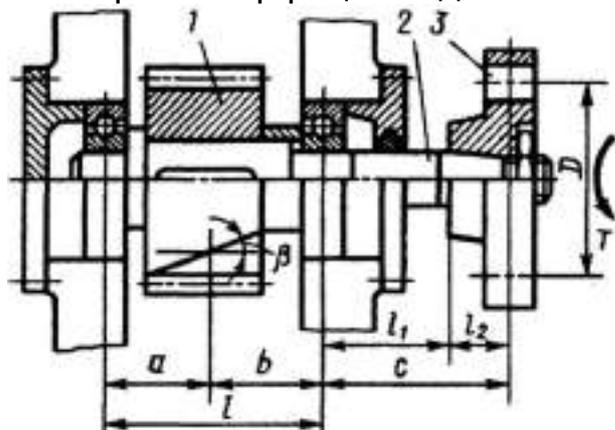


Рисунок 1 Вал с элементами, расположенными на нем: 1 – шестерня; 2 – вал; 3 – полумуфта

Рисунок 2

### РАСЧЕТ

1. Учитывая сравнительно небольшую осевую силу  $F_a$ , назначьте шариковые радиальные подшипники средней серии, условное обозначение 312 ГО.

2. Определите эквивалентную динамическую нагрузку на подшипник с учетом переменного режима нагружения

$$F_{mR1} = K_E F_{R1}; \quad F_{mR2} = K_E F_{R2}; \quad F_{ma} = K_E F_a$$

где  $K_E$  – коэффициент эквивалентности; находится в зависимости от режима нагрузки:

Режимы нагрузки:

0 – постоянный; I – тяжелый; II – средний равновероятный; III – средний нормальный; IV – легкий; V – особо легкий

Режим нагрузки	0	I	II	III	IV	V
$K_E$	1,00	0,80	0,63	0,56	0,50	0,40

3. Расчет вести с учетом переменного режима нагружения.

4. Сделайте вывод о пригодности данных подшипников.

## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ВАРИАНТ 3

**Задание.** Подберите подшипники для вала редуктора (рисунок 1) при следующих исходных данных. Диаметр в месте посадки подшипников  $d = 60$  мм,  $n = 180$  мин<sup>-1</sup>, ресурс  $L'_h = 20\,000$  ч, режим нагрузки – средний равновероятный, допускаемые двухкратные кратковременные перегрузки, температура подшипника  $t < 100^\circ\text{C}$ , реакции опор по рисунку 2 –  $F_{R1} = 10417$  Н,  $F_{R2} = 16381$  Н,  $F_a = 906$  Н и направлена в сторону левой опоры. Коэффициент динамичности – 1.3.

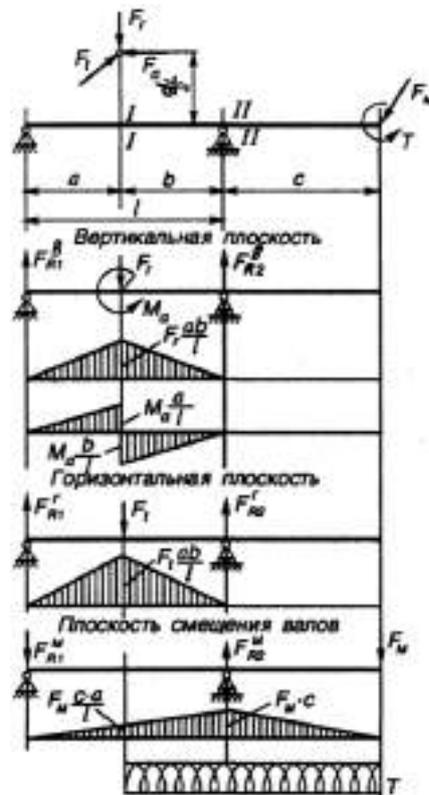
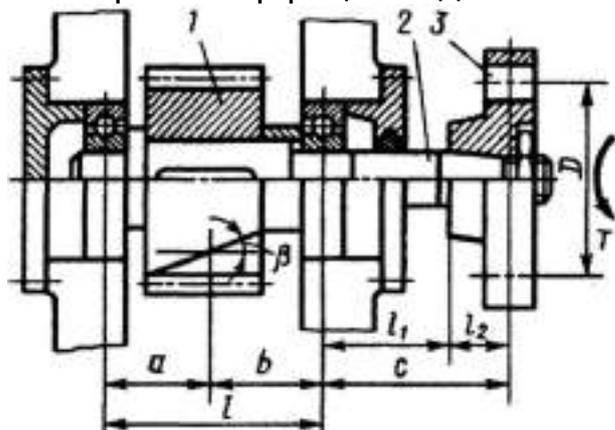


Рисунок 1 Вал с элементами, расположенными на нем: 1 – шестерня; 2 – вал; 3 – полумуфта

Рисунок 2

### РАСЧЕТ

1. Учитывая сравнительно небольшую осевую силу  $F_a$ , назначьте шариковые радиальные подшипники средней серии, условное обозначение 312 ГО.

2. Определите эквивалентную динамическую нагрузку на подшипник с учетом переменного режима нагружения

$$F_{mR1} = K_E F_{R1}; \quad F_{mR2} = K_E F_{R2}; \quad F_{ma} = K_E F_a$$

где  $K_E$  – коэффициент эквивалентности; находится в зависимости от режима нагрузки:

Режимы нагрузки:

0 – постоянный; I – тяжелый; II – средний равновероятный; III – средний нормальный; IV – легкий; V – особо легкий

Режим нагрузки	0	I	II	III	IV	V
$K_E$	1,00	0,80	0,63	0,56	0,50	0,40

3. Расчет вести с учетом переменного режима нагружения.

4. Сделайте вывод о пригодности данных подшипников.



## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ВАРИАНТ 5

**Задание.** Подберите подшипники для вала редуктора (рисунок 1) при следующих исходных данных. Диаметр в месте посадки подшипников  $d = 60$  мм,  $n = 90$  мин<sup>-1</sup>, ресурс  $L'_h = 20\ 000$  ч, режим нагрузки – средний равновероятный, допускаемые двухкратные кратковременные перегрузки, температура подшипника  $t < 100^\circ\text{C}$ , реакции опор по рисунку 2 –  $F_{R1} = 10417$  Н,  $F_{R2} = 16381$  Н,  $F_a = 906$  Н и направлена в сторону левой опоры. Коэффициент динамичности – 1.3.

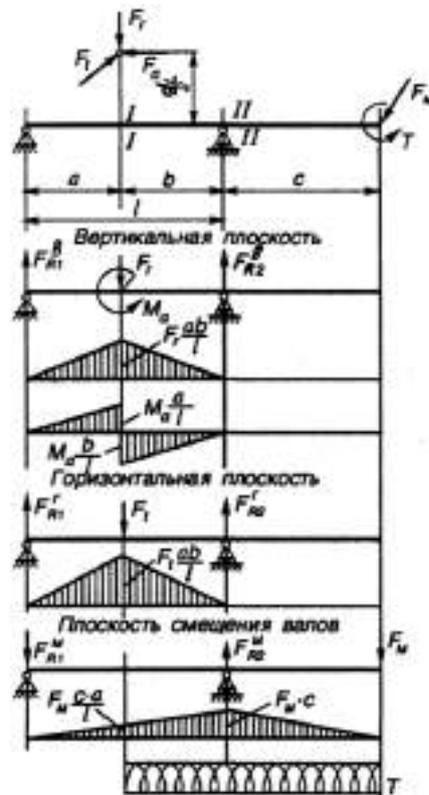
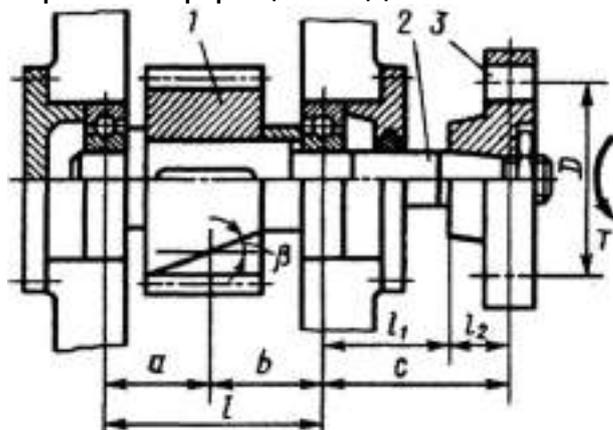


Рисунок 1 Вал с элементами, расположенными на нем: 1 – шестерня; 2 – вал; 3 – полумуфта

Рисунок 2

### РАСЧЕТ

1. Учитывая сравнительно небольшую осевую силу  $F_a$ , назначьте шариковые радиальные подшипники средней серии, условное обозначение 312 ГО.

2. Определите эквивалентную динамическую нагрузку на подшипник с учетом переменного режима нагружения

$$F_{mR1} = K_E F_{R1}; \quad F_{mR2} = K_E F_{R2}; \quad F_{ma} = K_E F_a$$

где  $K_E$  – коэффициент эквивалентности; находится в зависимости от режима нагрузки:

Режимы нагрузки:

0 – постоянный; I – тяжелый; II – средний равновероятный; III – средний нормальный; IV – легкий; V – особо легкий

Режим нагрузки	0	I	II	III	IV	V
$K_E$	1,00	0,80	0,63	0,56	0,50	0,40

3. Расчет вести с учетом переменного режима нагружения.

4. Сделайте вывод о пригодности данных подшипников.

## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ВАРИАНТ 6

**Задание.** Подберите подшипники для вала редуктора (рисунок 1) при следующих исходных данных. Диаметр в месте посадки подшипников  $d = 60$  мм,  $n = 350$  мин<sup>-1</sup>, ресурс  $L'_h = 20\,000$  ч, режим нагрузки – средний равновероятный, допускаемые двухкратные кратковременные перегрузки, температура подшипника  $t < 100^\circ\text{C}$ , реакции опор по рисунку 2 –  $F_{R1} = 10417$  Н,  $F_{R2} = 16381$  Н,  $F_a = 906$  Н и направлена в сторону левой опоры. Коэффициент динамичности – 1.3.

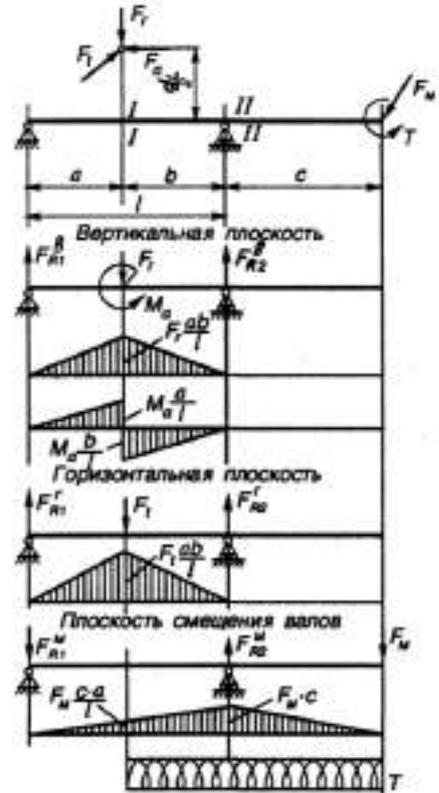
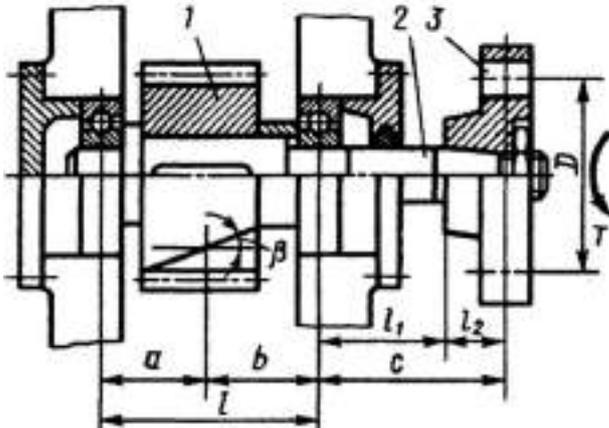


Рисунок 1 Вал с элементами, расположенными на нем: 1 – шестерня; 2 – вал; 3 – полушар

Рисунок 2

### РАСЧЕТ

1. Учитывая сравнительно небольшую осевую силу  $F_a$ , назначьте шариковые радиальные подшипники средней серии, условное обозначение 312 ГО.

2. Определите эквивалентную динамическую нагрузку на подшипник с учетом переменного режима нагружения

$$F_{mR1} = K_E F_{R1}; \quad F_{mR2} = K_E F_{R2}; \quad F_{ma} = K_E F_a$$

где  $K_E$  – коэффициент эквивалентности; находится в зависимости от режима нагрузки:

Режимы нагрузки:

0 – постоянный; I – тяжелый; II – средний равновероятный; III – средний нормальный; IV – легкий; V – особо легкий

Режим нагрузки	0	I	II	III	IV	V
$K_E$	1,00	0,80	0,63	0,56	0,50	0,40

3. Расчет вести с учетом переменного режима нагружения.

4. Сделайте вывод о пригодности данных подшипников.

# АРМ JOINT

## РАСЧЕТ ГРУППЫ ВИНТОВ, НАГРУЖЕННЫХ СДВИГАЮЩЕЙ СИЛОЙ

### ВАРИАНТ 1

Рассчитать группу винтов крепления пластин, нагруженных сдвигающей силой (см. рисунок). Соединение нагружено постоянной внешней силой  $F = 8000$  Н, действующей под углом  $30^\circ$ . Расстояние между винтами 50 мм.

Коэффициент трения в резьбе и на поверхности соединяемых деталей.....0.15;

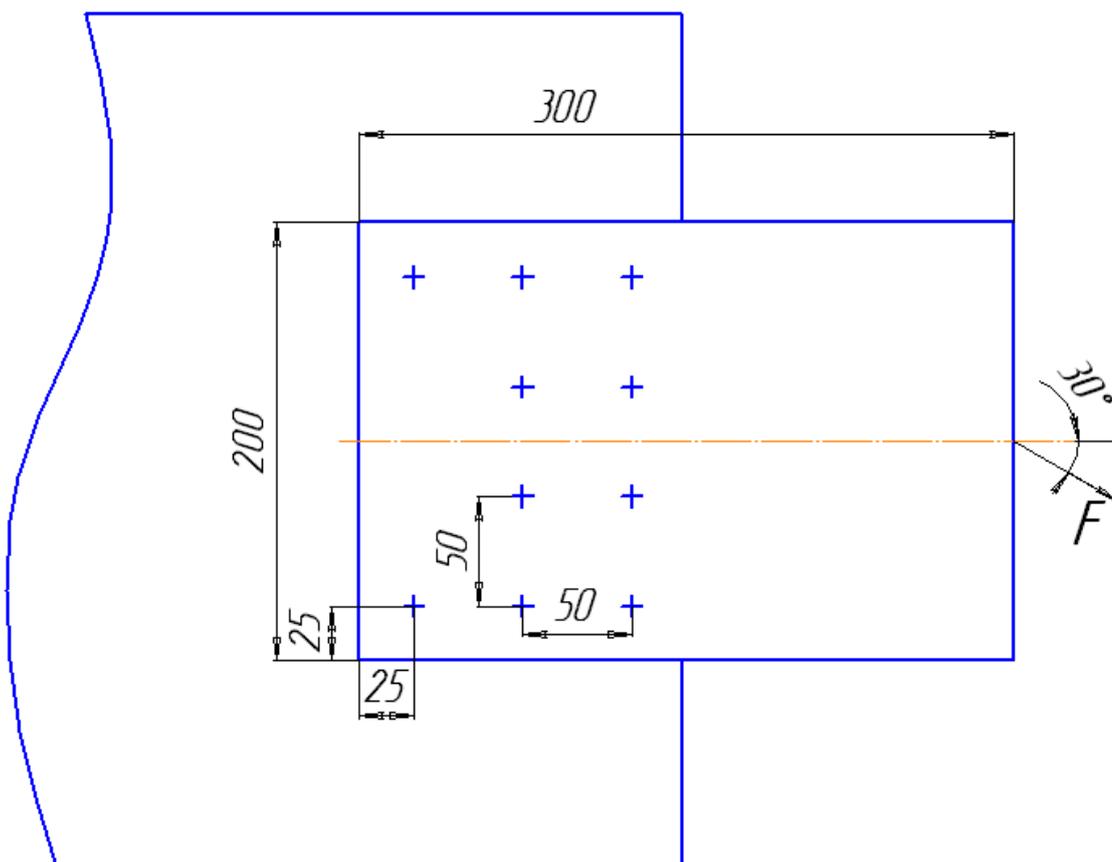
Коэффициент запаса по сдвигу .....1.3;

Предел прочности материала винта.....400 МПа;

Предел текучести.....240 МПа.

**Задачу решить в двух вариантах:**

- а) винты установлены в отверстие с зазором;
- б) винты установлены без зазора.



# РАСЧЕТ ГРУППЫ ВИНТОВ, НАГРУЖЕННЫХ СДВИГАЮЩЕЙ СИЛОЙ

## ВАРИАНТ 2

Рассчитать группу винтов крепления пластин, нагруженных сдвигающей силой (см. рисунок). Соединение нагружено постоянной внешней силой  $F = 10000 \text{ Н}$ , действующей под углом  $30^\circ$ . Расстояние между винтами 50 мм.

Коэффициент трения в резьбе и на поверхности соединяемых деталей.....0.15;

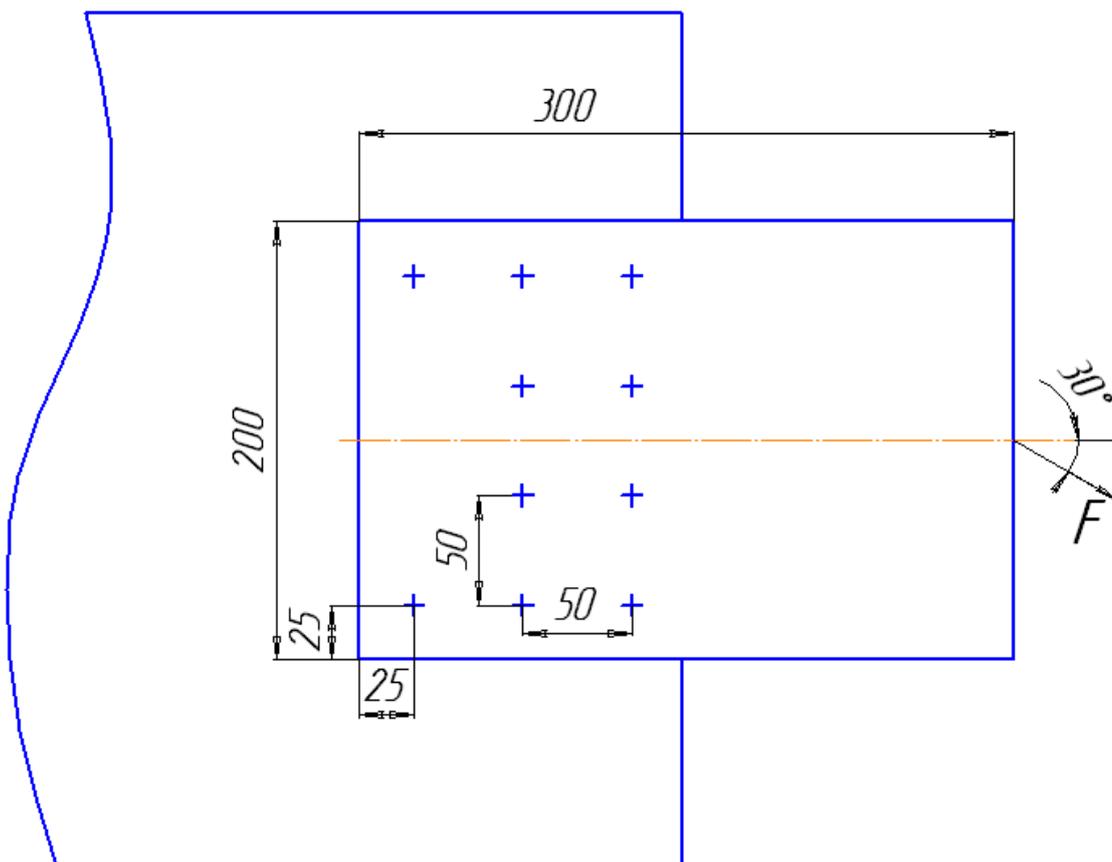
Коэффициент запаса по сдвигу .....1.3;

Предел прочности материала винта.....400 МПа;

Предел текучести.....240 МПа.

### Задачу решить в двух вариантах:

- а) винты установлены в отверстие с зазором;
- б) винты установлены без зазора.



# РАСЧЕТ ГРУППЫ ВИНТОВ, НАГРУЖЕННЫХ СДВИГАЮЩЕЙ СИЛОЙ

## ВАРИАНТ 3

Рассчитать группу винтов крепления пластин, нагруженных сдвигающей силой (см. рисунок). Соединение нагружено постоянной внешней силой  $F = 5000$  Н, действующей под углом  $30^\circ$ . Расстояние между винтами 50 мм.

Коэффициент трения в резьбе и на поверхности соединяемых деталей.....0.15;

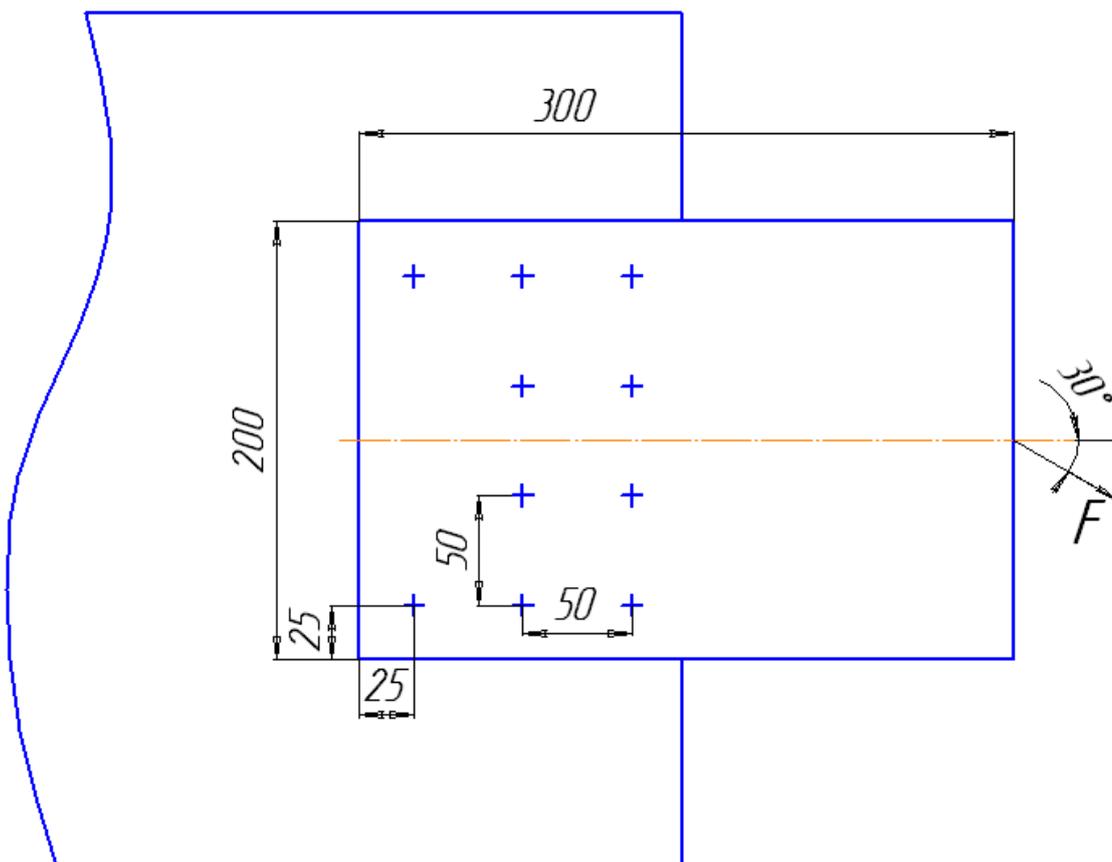
Коэффициент запаса по сдвигу .....1.3;

Предел прочности материала винта.....400 МПа;

Предел текучести.....240 МПа.

### Задачу решить в двух вариантах:

- а) винты установлены в отверстие с зазором;
- б) винты установлены без зазора.



# РАСЧЕТ ГРУППЫ ВИНТОВ, НАГРУЖЕННЫХ СДВИГАЮЩЕЙ СИЛОЙ

## ВАРИАНТ 4

Рассчитать группу винтов крепления пластин, нагруженных сдвигающей силой (см. рисунок). Соединение нагружено постоянной внешней силой  $F = 3000$  Н, действующей под углом  $30^\circ$ . Расстояние между винтами 50 мм.

Коэффициент трения в резьбе и на поверхности соединяемых деталей.....0.15;

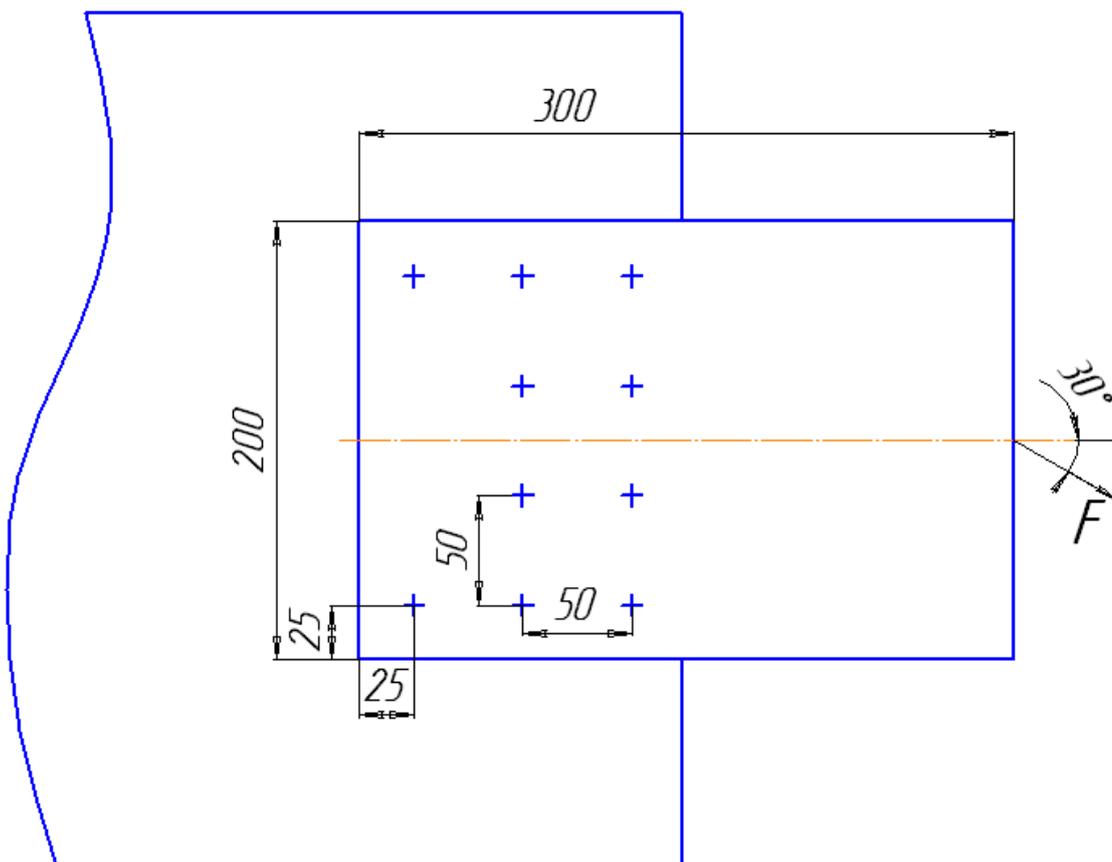
Коэффициент запаса по сдвигу .....1.3;

Предел прочности материала винта.....400 МПа;

Предел текучести.....240 МПа.

### Задачу решить в двух вариантах:

- а) винты установлены в отверстие с зазором;
- б) винты установлены без зазора.



# РАСЧЕТ ГРУППЫ ВИНТОВ, НАГРУЖЕННЫХ СДВИГАЮЩЕЙ СИЛОЙ

## ВАРИАНТ 5

Рассчитать группу винтов крепления пластин, нагруженных сдвигающей силой (см. рисунок). Соединение нагружено постоянной внешней силой  $F = 12000$  Н, действующей под углом  $30^\circ$ . Расстояние между винтами 50 мм.

Коэффициент трения в резьбе и на поверхности соединяемых деталей.....0.15;

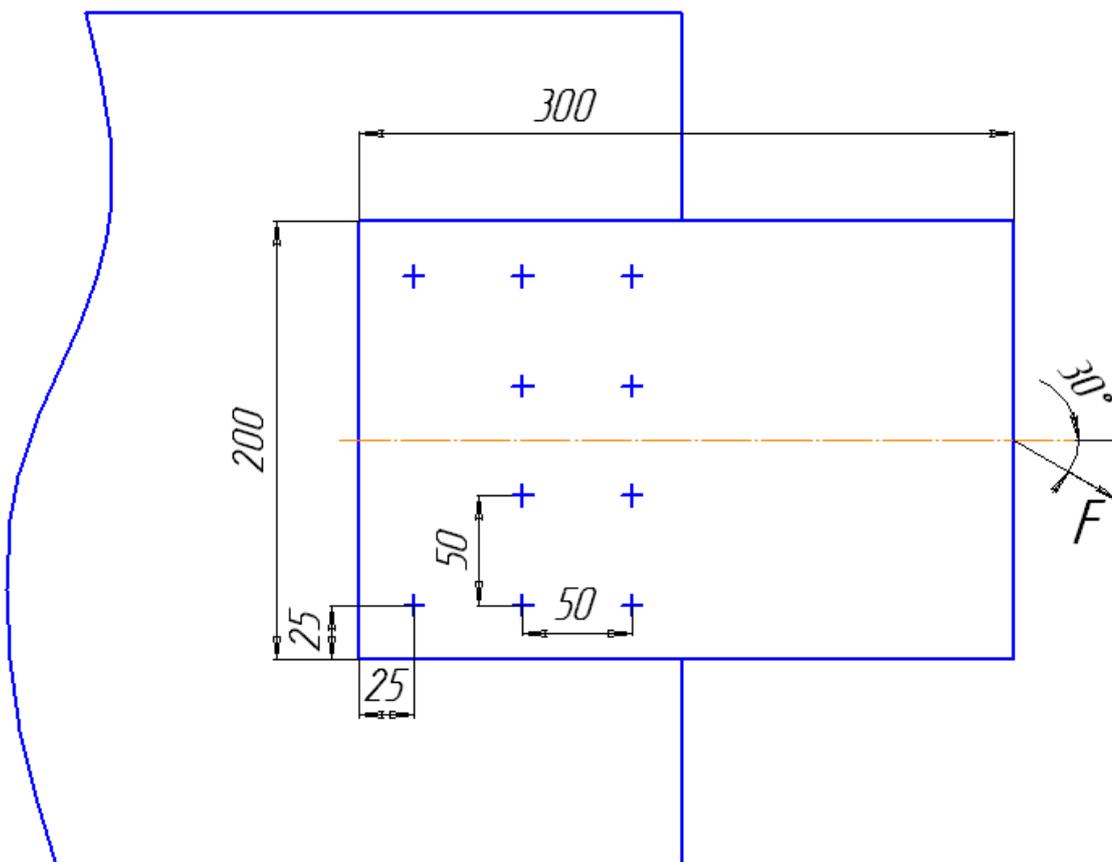
Коэффициент запаса по сдвигу .....1.3;

Предел прочности материала винта.....400 МПа;

Предел текучести.....240 МПа.

### Задачу решить в двух вариантах:

- а) винты установлены в отверстие с зазором;
- б) винты установлены без зазора.



# РАСЧЕТ ГРУППЫ ВИНТОВ, НАГРУЖЕННЫХ СДВИГАЮЩЕЙ СИЛОЙ

## ВАРИАНТ 6

Рассчитать группу винтов крепления пластин, нагруженных сдвигающей силой (см. рисунок). Соединение нагружено постоянной внешней силой  $F = 15000$  Н, действующей под углом  $30^\circ$ . Расстояние между винтами 50 мм.

Коэффициент трения в резьбе и на поверхности соединяемых деталей.....0.15;

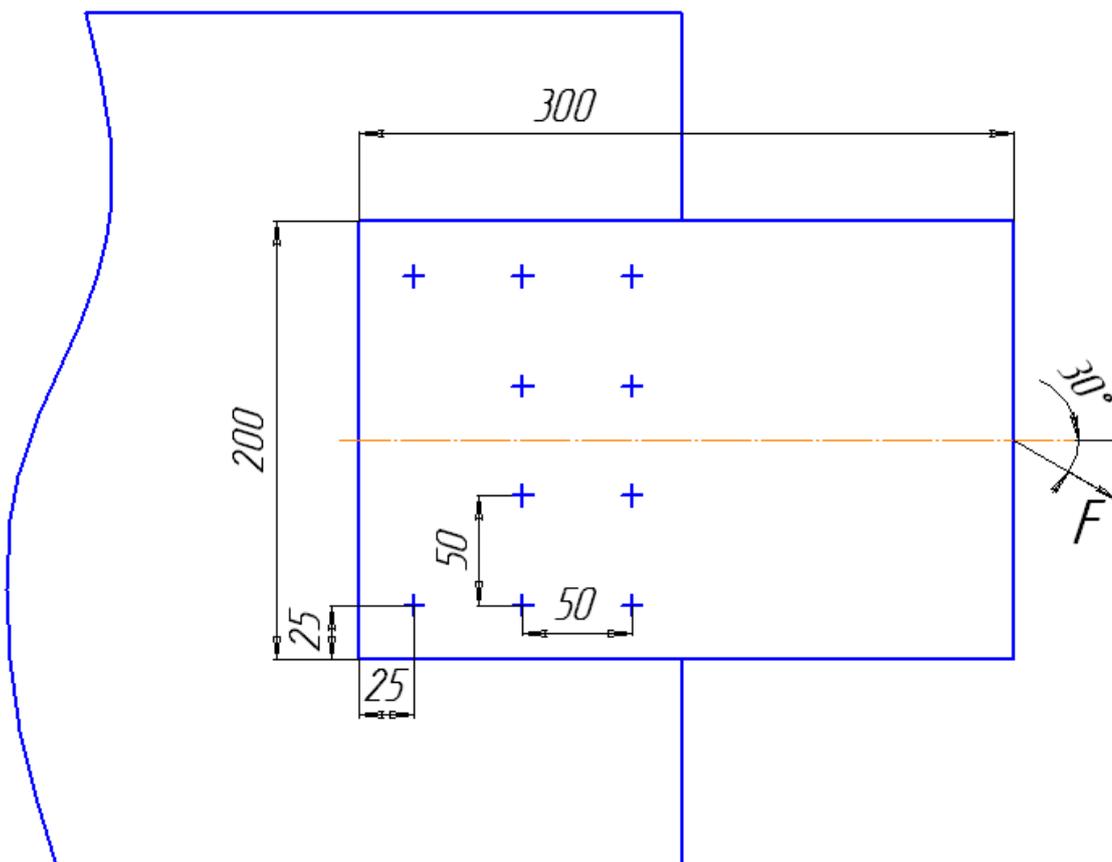
Коэффициент запаса по сдвигу .....1.3;

Предел прочности материала винта.....400 МПа;

Предел текучести.....240 МПа.

### Задачу решить в двух вариантах:

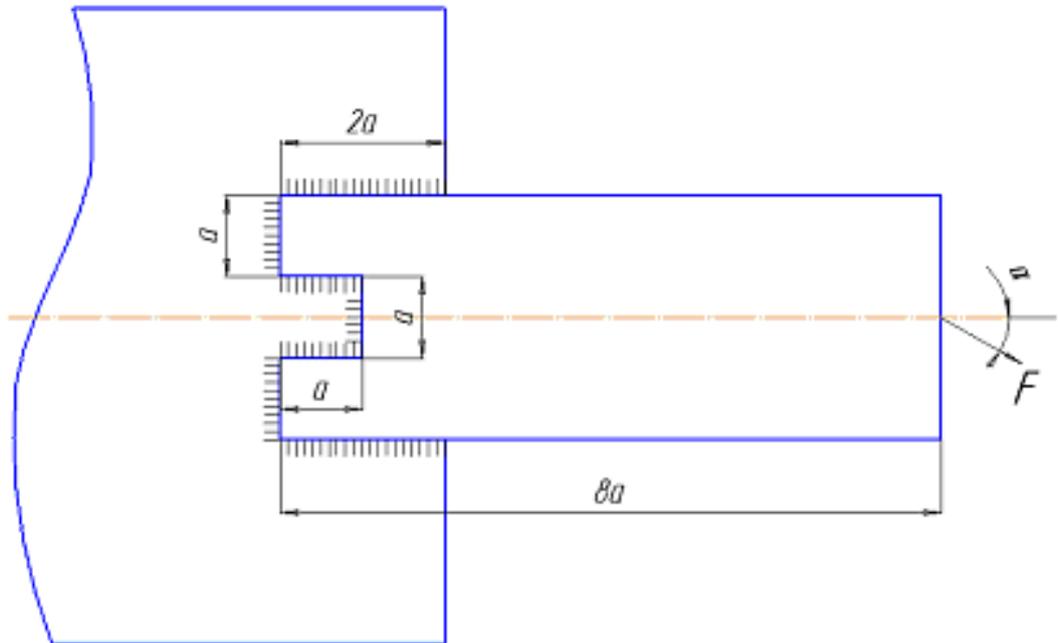
- а) винты установлены в отверстие с зазором;
- б) винты установлены без зазора.



# РАСЧЕТ НАХЛЕСТОЧНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

## ВАРИАНТ 1

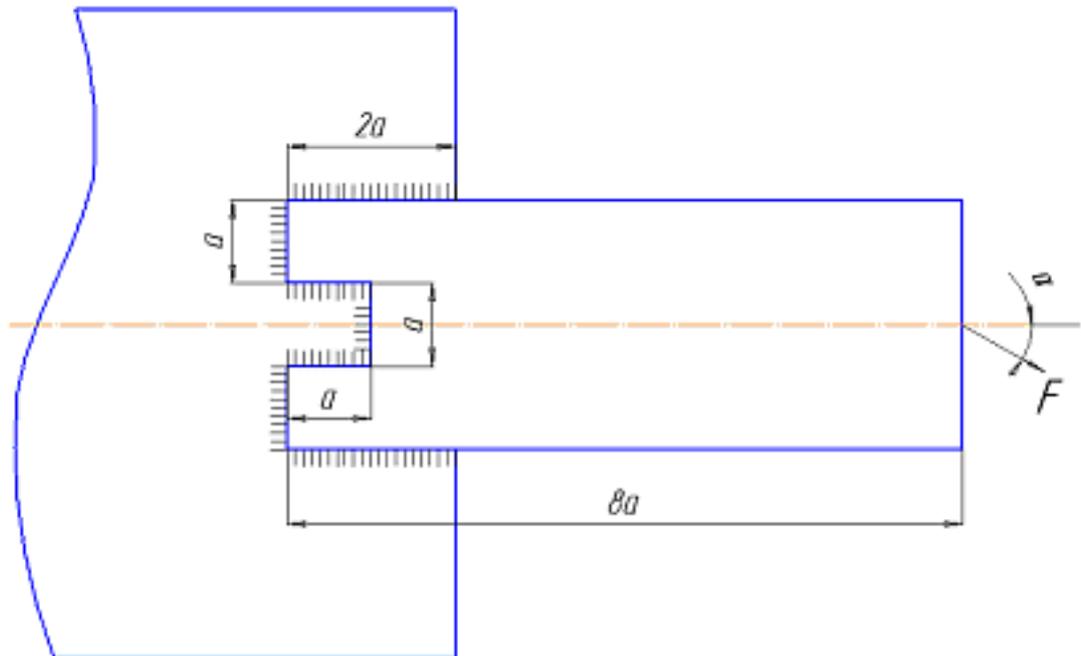
Рассчитать нахлесточное сварное соединение, изображенное на рисунке, если  $a = 50$  мм. Соединение нагружено силой  $F = 22$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Предел текучести материала деталей  $\sigma_r = 400$  МПа. Коэффициент запаса текучести деталей крепления 1.5.



# РАСЧЕТ НАХЛЕСТОЧНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

## ВАРИАНТ 2

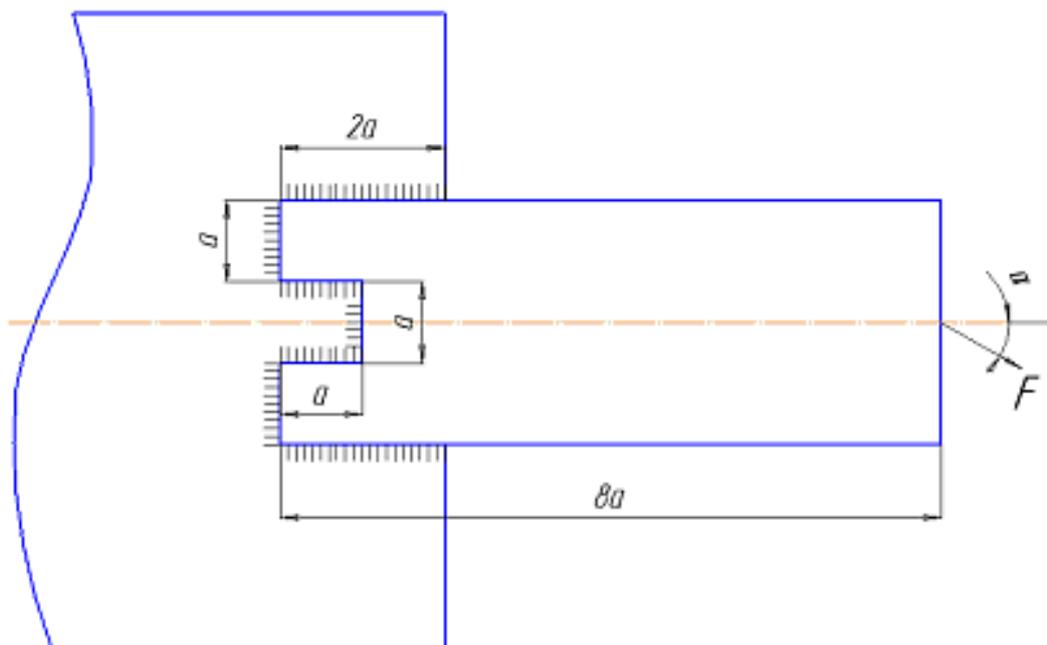
Рассчитать нахлесточное сварное соединение, изображенное на рисунке, если  $a = 50$  мм. Соединение нагружено силой  $F = 25$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Предел текучести материала деталей  $\sigma_r = 400$  МПа. Коэффициент запаса текучести деталей крепления 1.5.



## РАСЧЕТ НАХЛЕСТОЧНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

### ВАРИАНТ 3

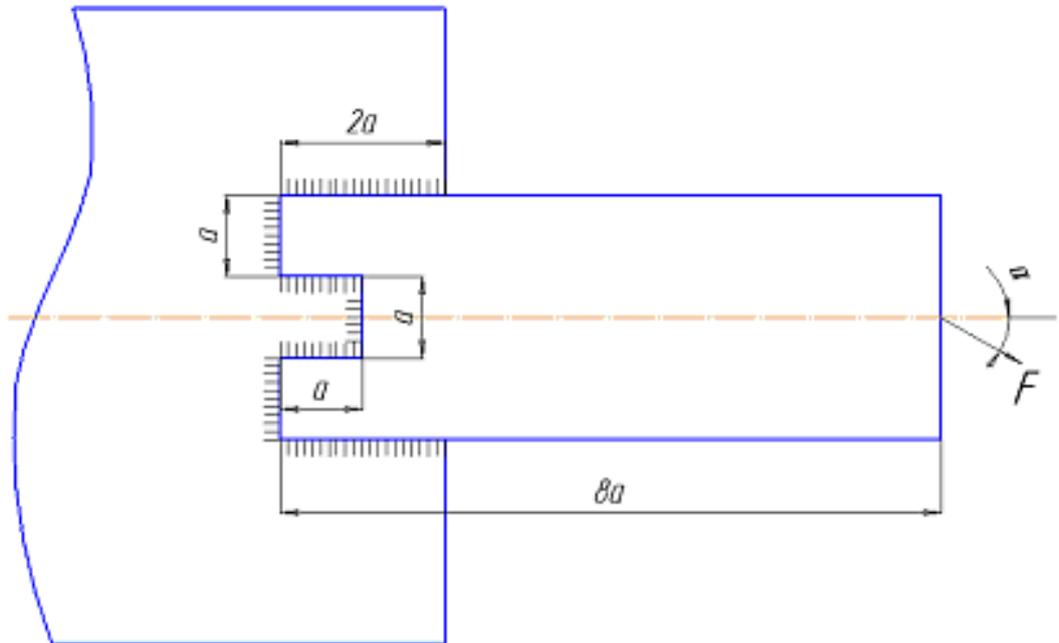
Рассчитать нахлесточное сварное соединение, изображенное на рисунке, если  $a = 50$  мм. Соединение нагружено силой  $F = 30$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Предел текучести материала деталей  $\sigma_r = 400$  МПа. Коэффициент запаса текучести деталей крепления 1.5.



# РАСЧЕТ НАХЛЕСТОЧНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

## ВАРИАНТ 4

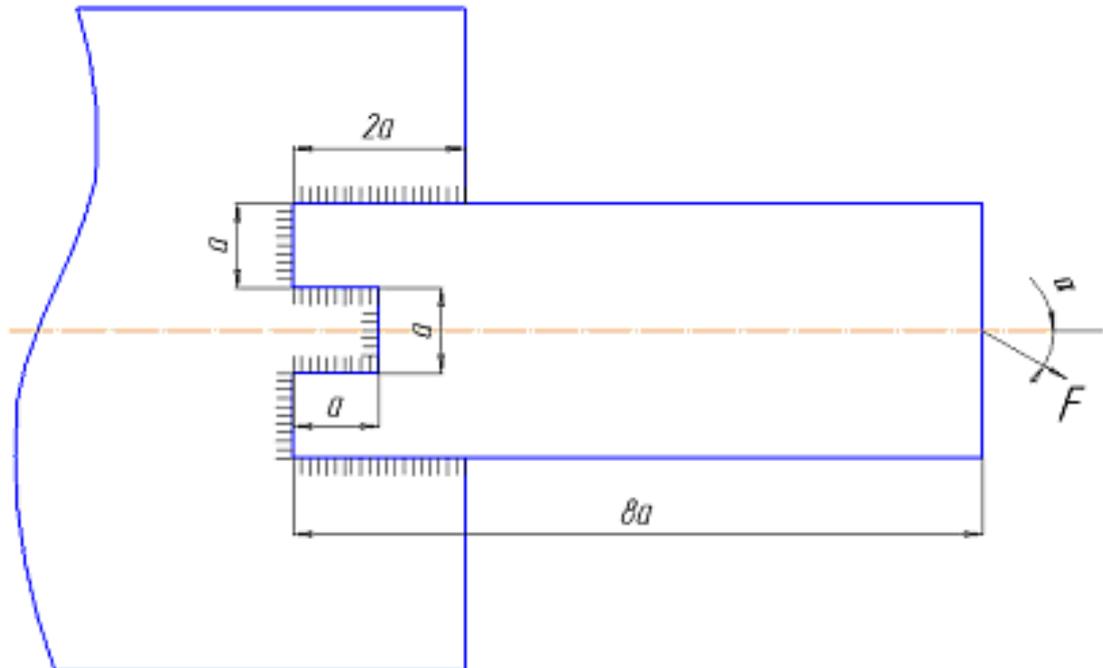
Рассчитать нахлесточное сварное соединение, изображенное на рисунке, если  $a = 50$  мм. Соединение нагружено силой  $F = 32$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Предел текучести материала деталей  $\sigma_r = 400$  МПа. Коэффициент запаса текучести деталей крепления 1.5.



# РАСЧЕТ НАХЛЕСТОЧНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

## ВАРИАНТ 5

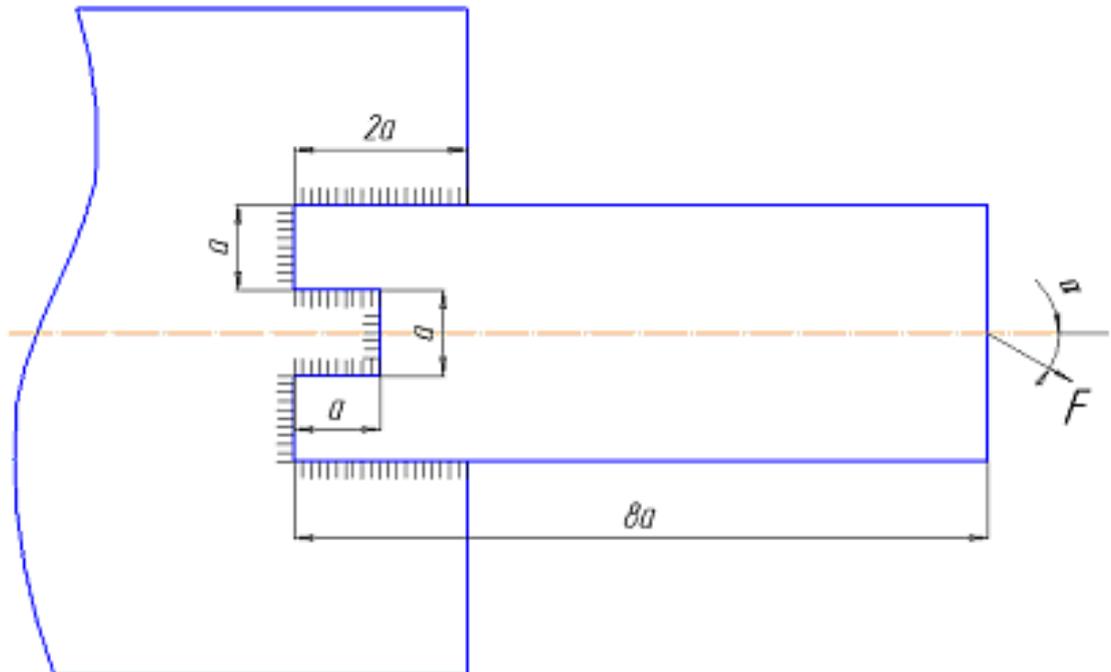
Рассчитать нахлесточное сварное соединение, изображенное на рисунке, если  $a = 50$  мм. Соединение нагружено силой  $F = 34$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Предел текучести материала деталей  $\sigma_r = 400$  МПа. Коэффициент запаса текучести деталей крепления 1.5.



# РАСЧЕТ НАХЛЕСТОЧНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

## ВАРИАНТ 6

Рассчитать нахлесточное сварное соединение, изображенное на рисунке, если  $a = 50$  мм. Соединение нагружено силой  $F = 37$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Предел текучести материала деталей  $\sigma_r = 400$  МПа. Коэффициент запаса текучести деталей крепления 1.5.



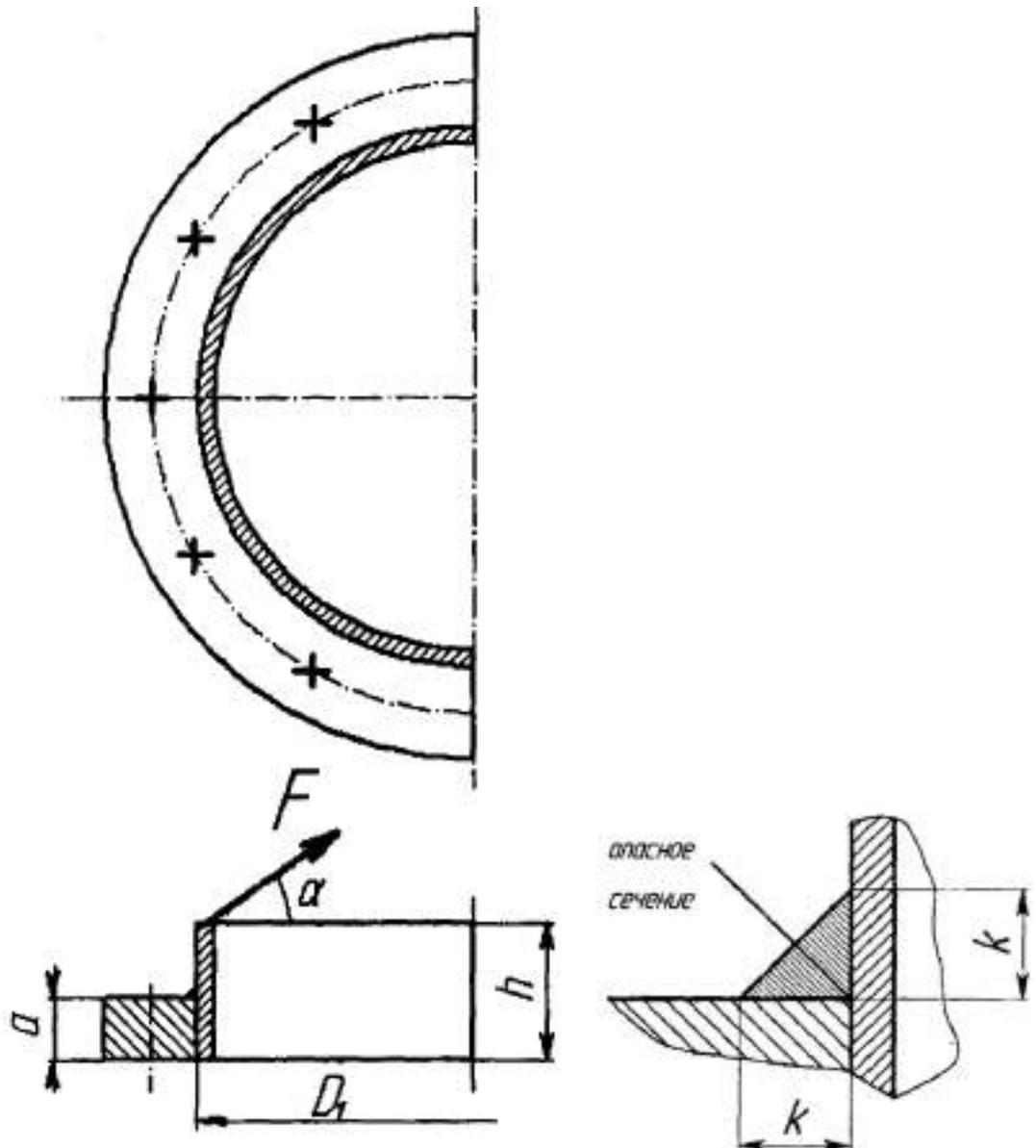
# РАСЧЕТ ТАВРОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

## ВАРИАНТ 1

Рассчитать тавровый сварной шов, между трубой и полуфланцем. Полуфланец нагружен постоянной силой  $F = 10$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Параметры соединения:  $D_1 = 300$  мм;  $h = 40$  мм;  $a = 10$  мм. Толщина трубы  $\delta = 5$  мм. Материал свариваемых деталей – сталь 3:  $\sigma_r = 240$  МПа; коэффициент запаса текучести деталей крепления – 2.

Рассмотреть два варианта соединения:

- угловым швом;
- стыковым швом.



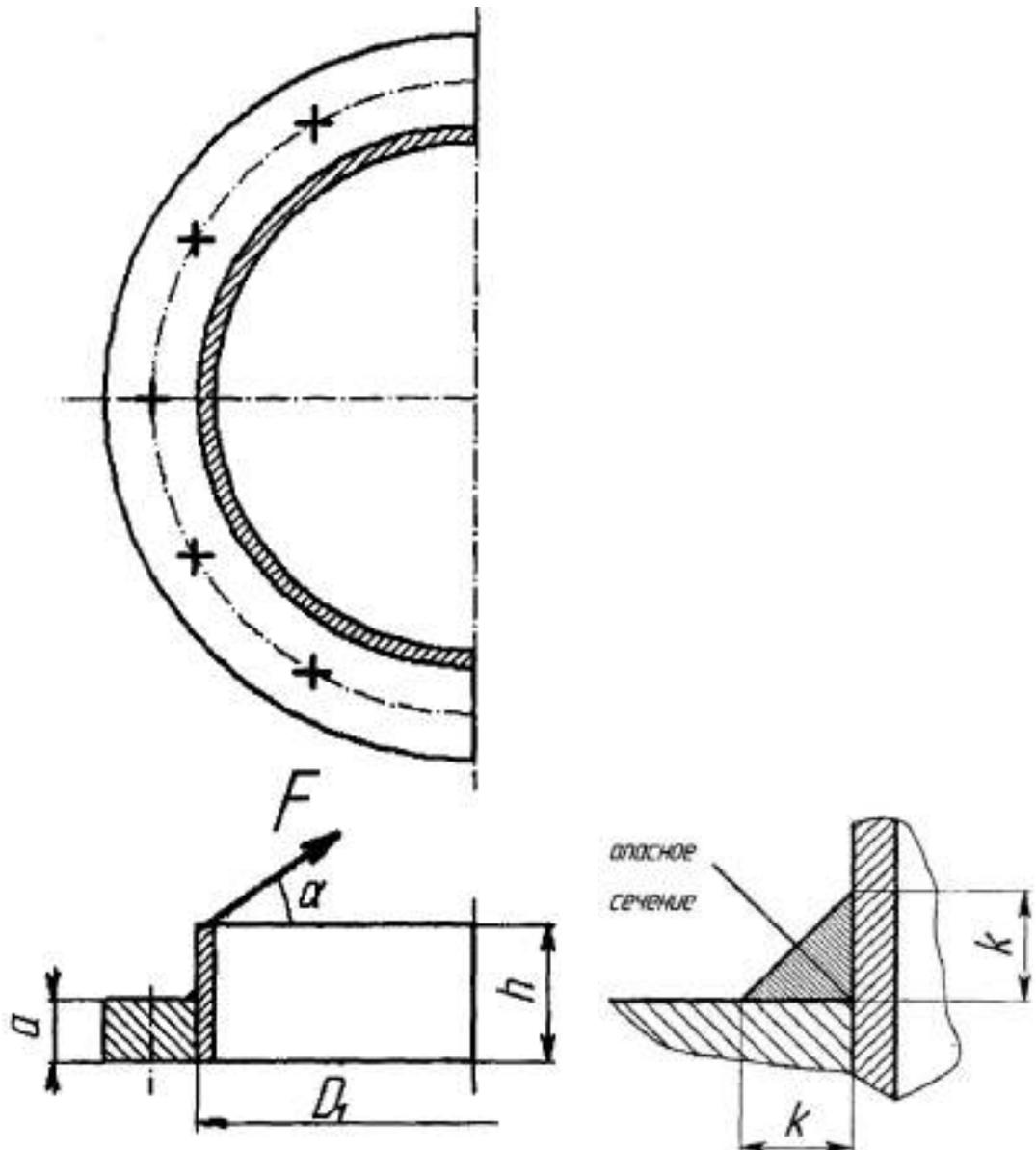
# РАСЧЕТ ТАВРОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

## ВАРИАНТ 2

Рассчитать тавровый сварной шов, между трубой и полуфланцем. Полуфланец нагружен постоянной силой  $F = 15$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Параметры соединения:  $D_1 = 300$  мм;  $h = 40$  мм;  $a = 10$  мм. Толщина трубы  $\delta = 5$  мм. Материал свариваемых деталей – сталь 3:  $\sigma_r = 240$  МПа; коэффициент запаса текучести деталей крепления – 2.

Рассмотреть два варианта соединения:

- угловым швом;
- стыковым швом.



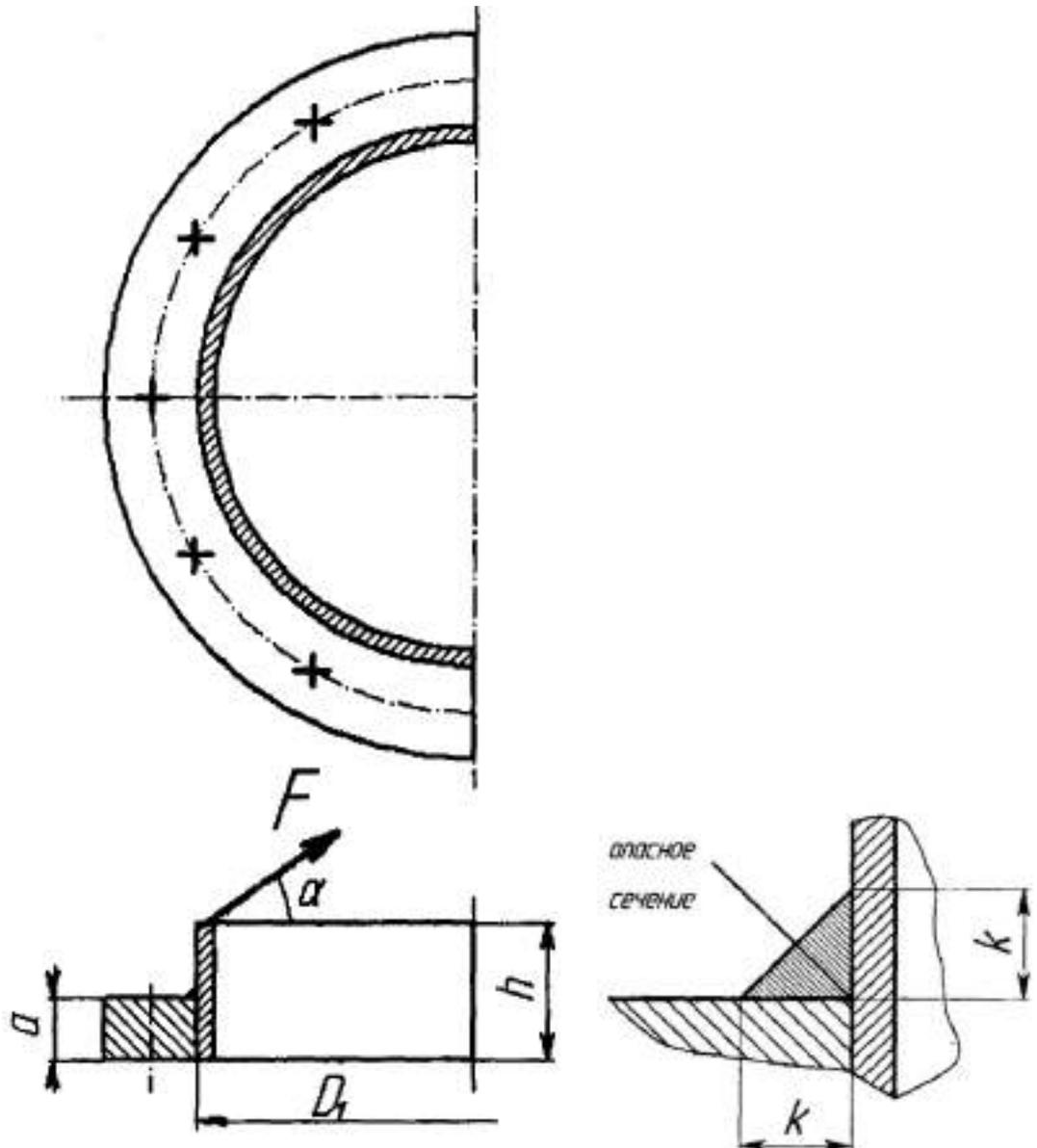
# РАСЧЕТ ТАВРОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

## ВАРИАНТ 3

Рассчитать тавровый сварной шов, между трубой и полуфланцем. Полуфланец нагружен постоянной силой  $F = 5$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Параметры соединения:  $D_1 = 300$  мм;  $h = 40$  мм;  $a = 10$  мм. Толщина трубы  $\delta = 5$  мм. Материал свариваемых деталей – сталь 3:  $\sigma_r = 240$  МПа; коэффициент запаса текучести деталей крепления – 2.

Рассмотреть два варианта соединения:

- угловым швом;
- стыковым швом.



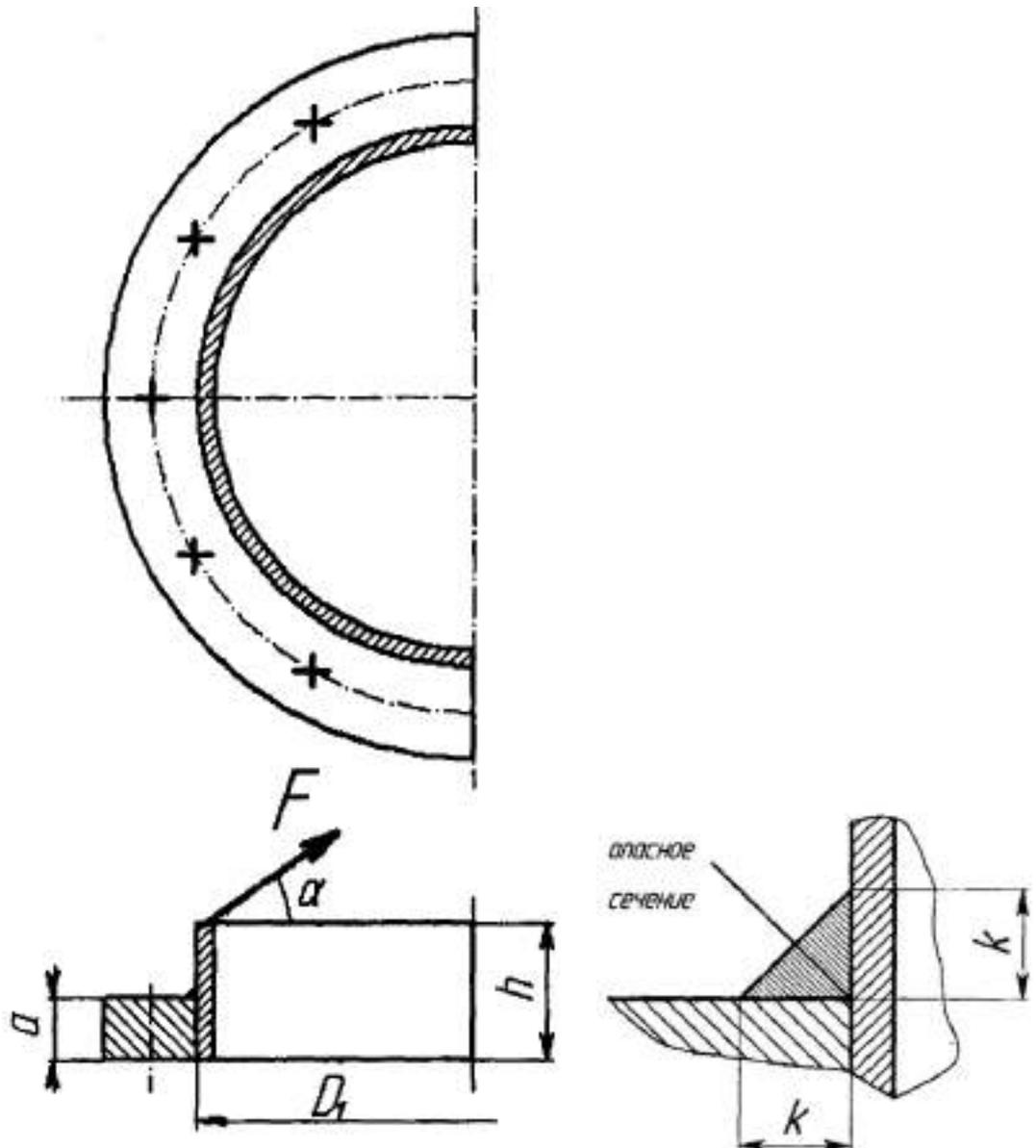
# РАСЧЕТ ТАВРОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

## ВАРИАНТ 4

Рассчитать тавровый сварной шов, между трубой и полуфланцем. Полуфланец нагружен постоянной силой  $F = 12$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Параметры соединения:  $D_1 = 300$  мм;  $h = 40$  мм;  $a = 10$  мм. Толщина трубы  $\delta = 5$  мм. Материал свариваемых деталей – сталь 3:  $\sigma_r = 240$  МПа; коэффициент запаса текучести деталей крепления – 2.

Рассмотреть два варианта соединения:

- угловым швом;
- стыковым швом.



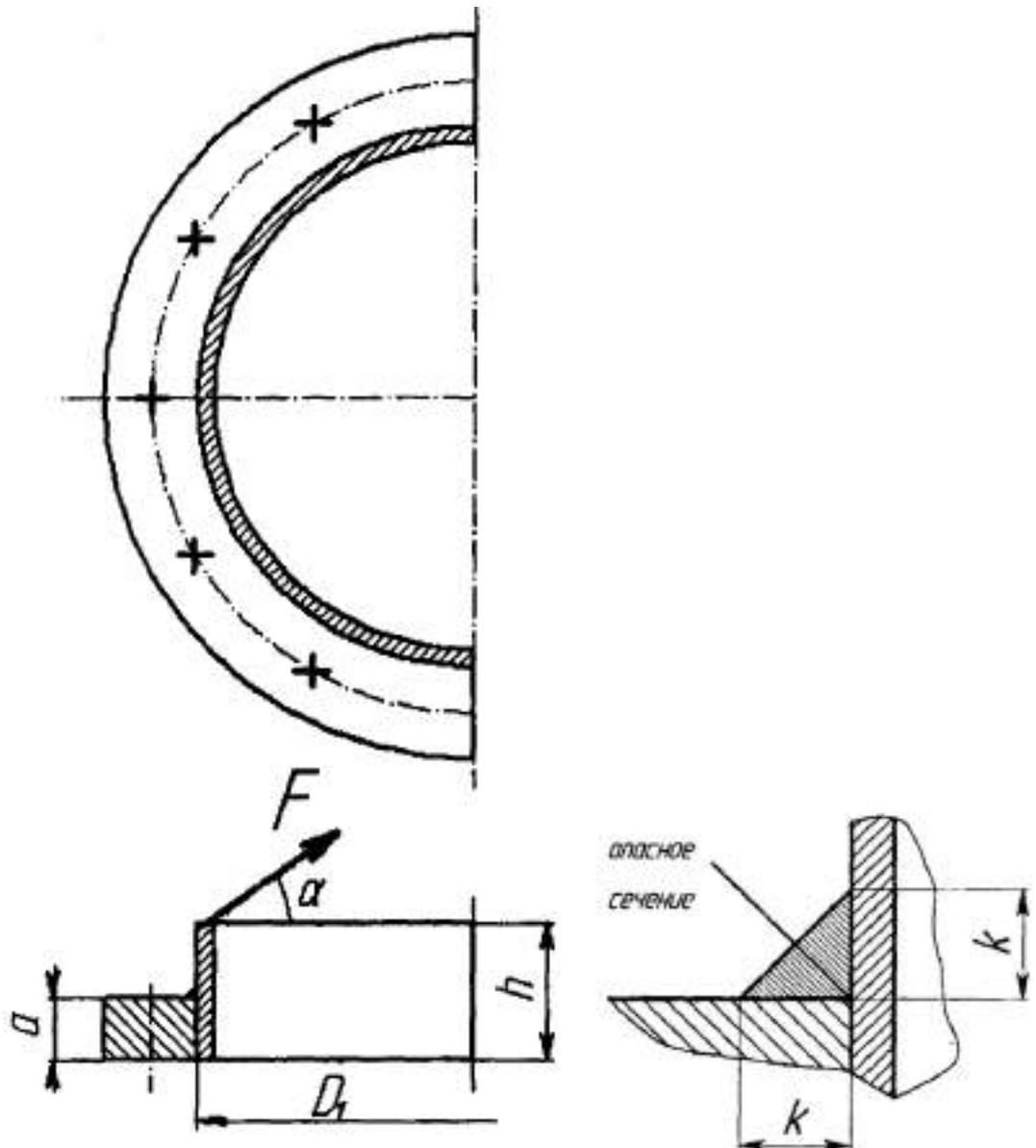
# РАСЧЕТ ТАВРОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

## ВАРИАНТ 5

Рассчитать тавровый сварной шов, между трубой и полуфланцем. Полуфланец нагружен постоянной силой  $F = 16$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Параметры соединения:  $D_1 = 300$  мм;  $h = 40$  мм;  $a = 10$  мм. Толщина трубы  $\delta = 5$  мм. Материал свариваемых деталей – сталь 3:  $\sigma_r = 240$  МПа; коэффициент запаса текучести деталей крепления – 2.

Рассмотреть два варианта соединения:

- угловым швом;
- стыковым швом.



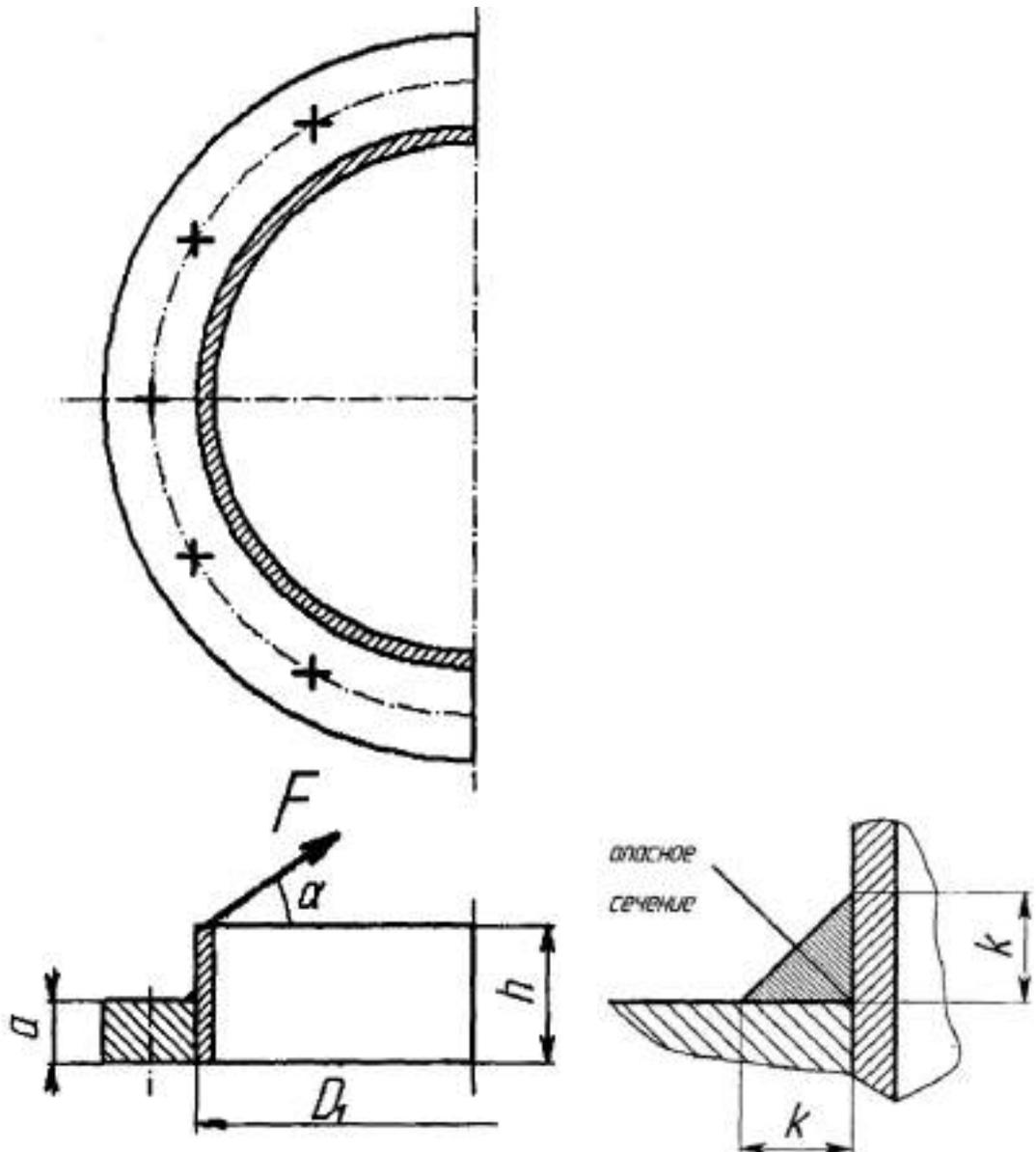
# РАСЧЕТ ТАВРОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

## ВАРИАНТ 6

Рассчитать тавровый сварной шов, между трубой и полуфланцем. Полуфланец нагружен постоянной силой  $F = 20$  кН, действующей под углом  $\alpha = 30^\circ$ . Параметры соединения:  $D_1 = 300$  мм;  $h = 40$  мм;  $a = 10$  мм. Толщина трубы  $\delta = 5$  мм. Материал свариваемых деталей – сталь 3:  $\sigma_r = 240$  МПа; коэффициент запаса текучести деталей крепления – 2.

Рассмотреть два варианта соединения:

- угловым швом;
- стыковым швом.



# APM Structure 3D

## СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ НАВЕСА ГАРАЖА ВАРИАНТ 1

Задание – создайте трехмерную модель

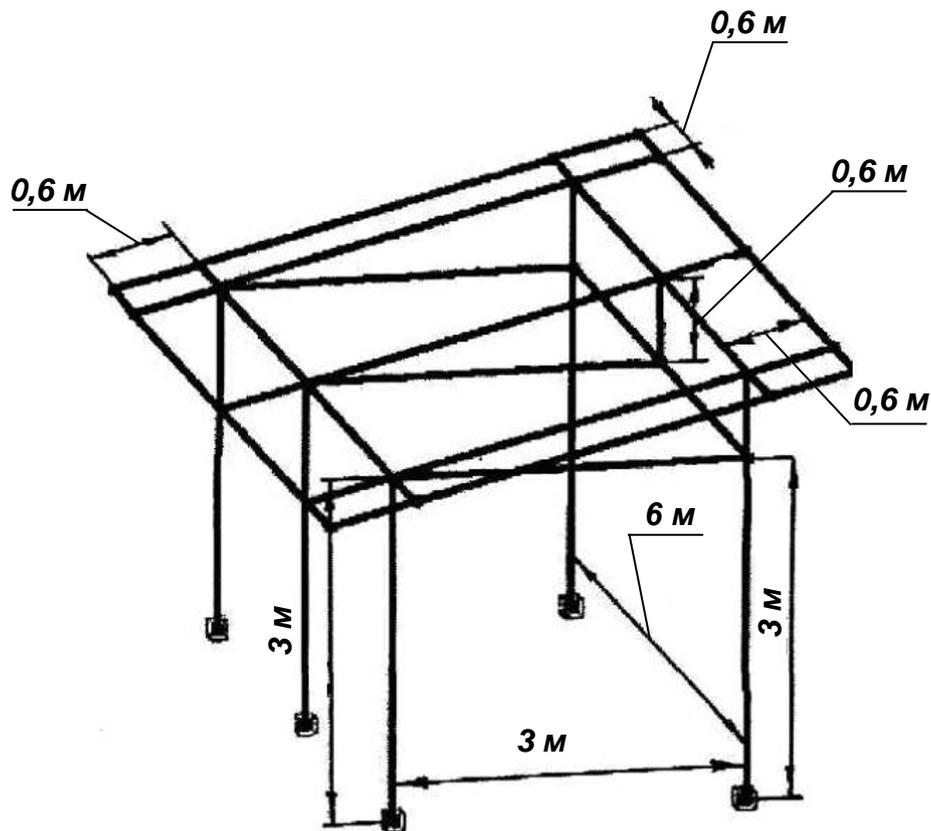


Рисунок 1 Трехмерная конструкция навеса

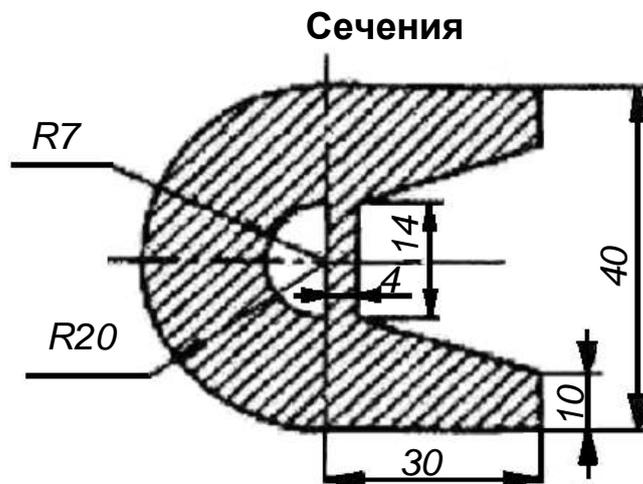


Рисунок 2 Чертеж поперечного сечения элементов крыши

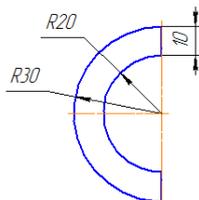
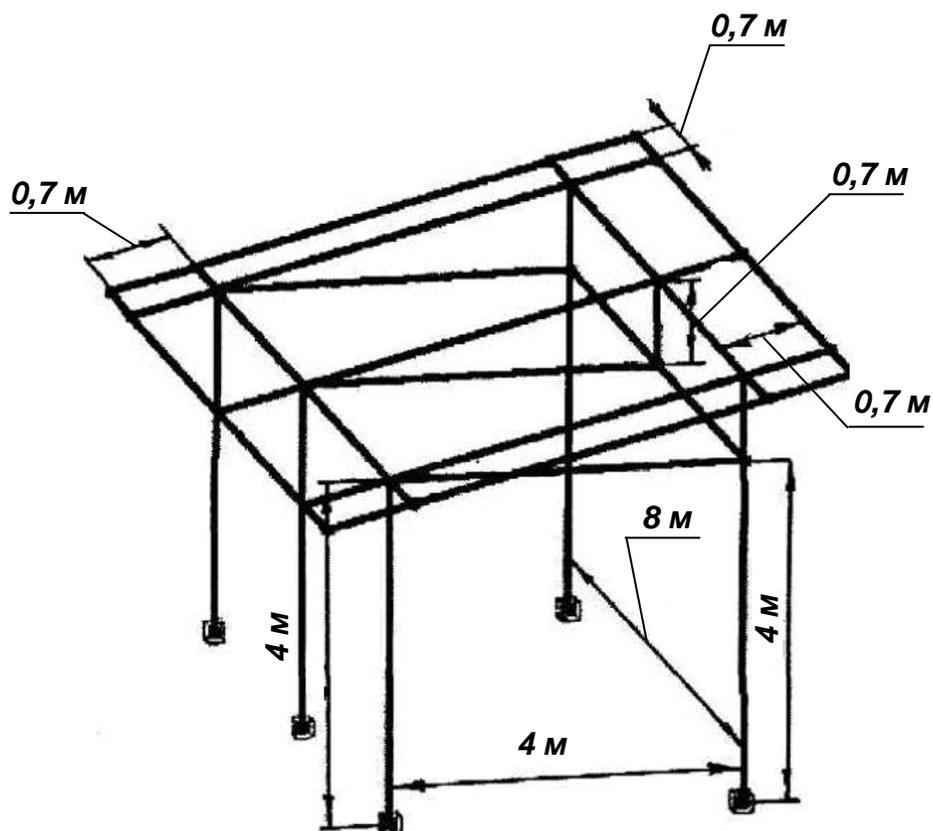


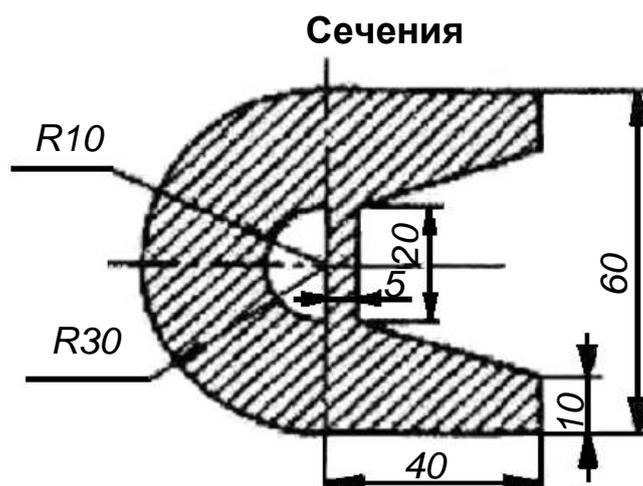
Рисунок 3 Чертеж поперечного сечения остальных элементов конструкции

# СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ НАВЕСА ГАРАЖА ВАРИАНТ 2

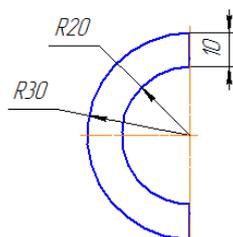
**Задание** – создайте трехмерную модель



**Рисунок 1** Трехмерная конструкция навеса



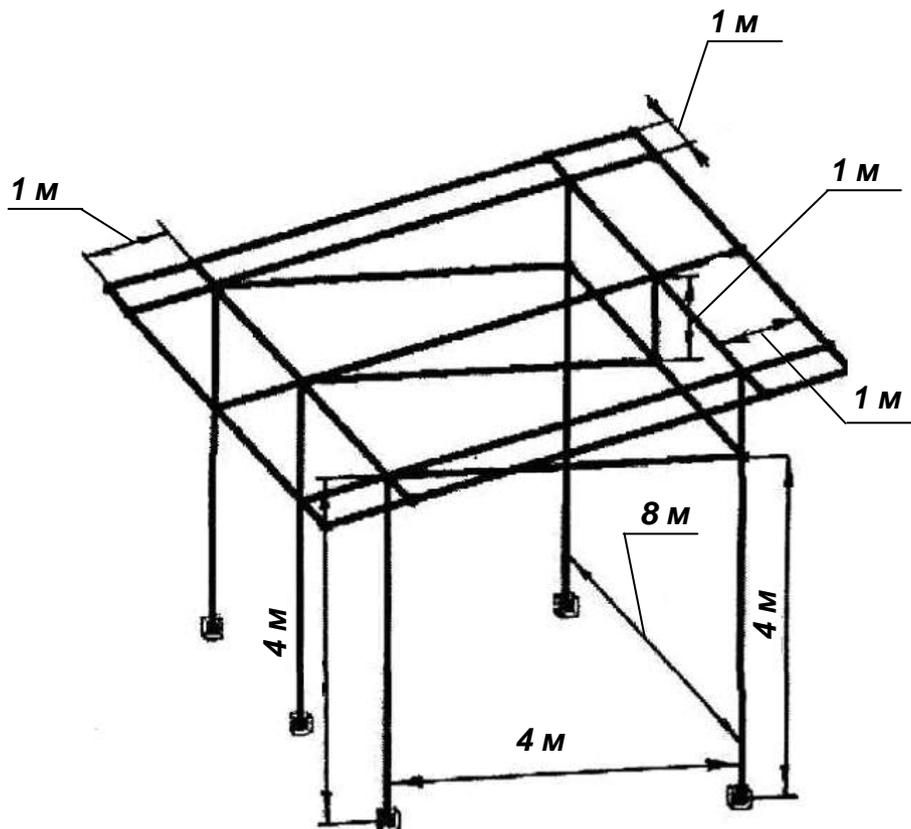
**Рисунок 2** Чертеж поперечного сечения элементов крыши



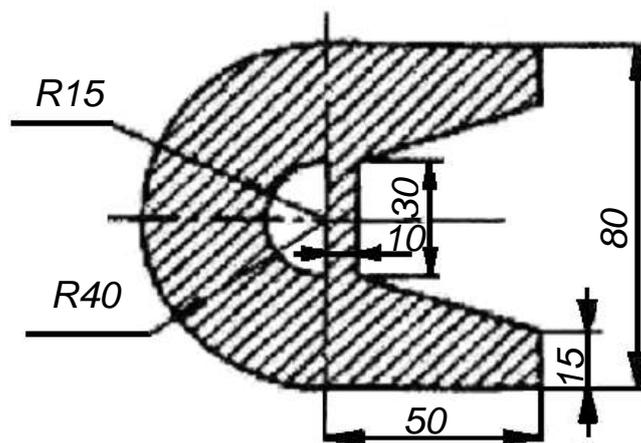
**Рисунок 3** Чертеж поперечного сечения остальных элементов конструкции

# СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ НАВЕСА ГАРАЖА ВАРИАНТ 3

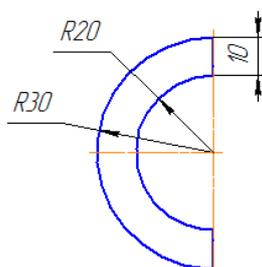
**Задание** – создайте трехмерную модель



**Рисунок 1** Трехмерная конструкция навеса  
**Сечения**



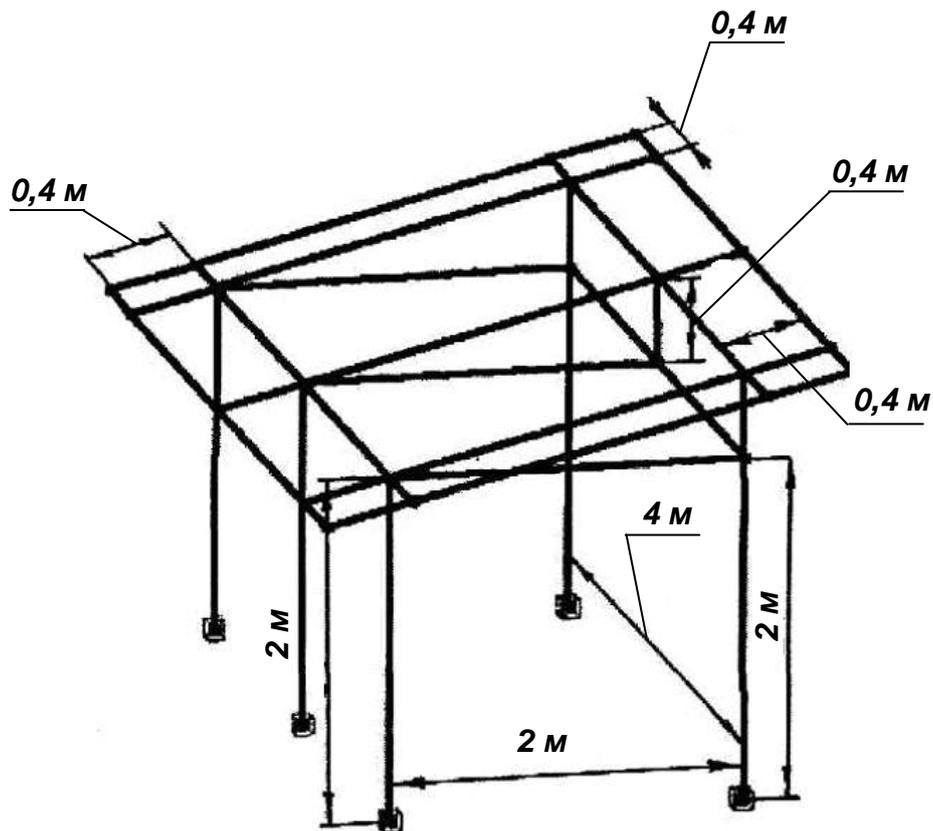
**Рисунок 2** Чертеж поперечного сечения элементов крыши



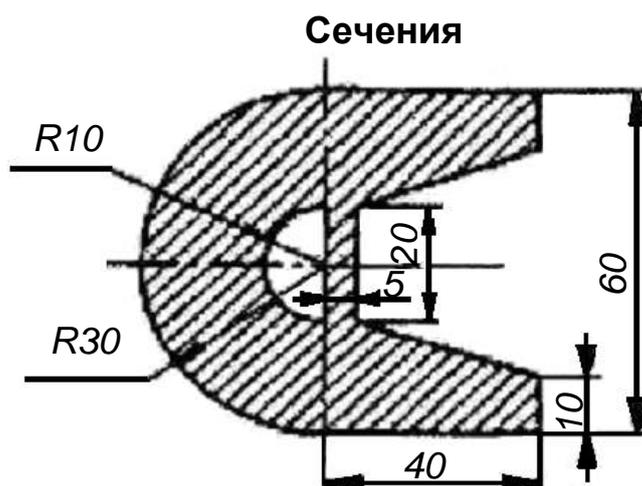
**Рисунок 3** Чертеж поперечного сечения остальных элементов конструкции

# СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ НАВЕСА ГАРАЖА ВАРИАНТ 4

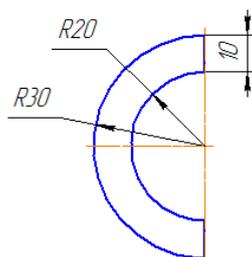
**Задание** – создайте трехмерную модель



**Рисунок 1** Трехмерная конструкция навеса



**Рисунок 2** Чертеж поперечного сечения элементов крыши



**Рисунок 3** Чертеж поперечного сечения остальных элементов конструкции



# СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ НАВЕСА ГАРАЖА ВАРИАНТ 6

**Задание** – создайте трехмерную модель

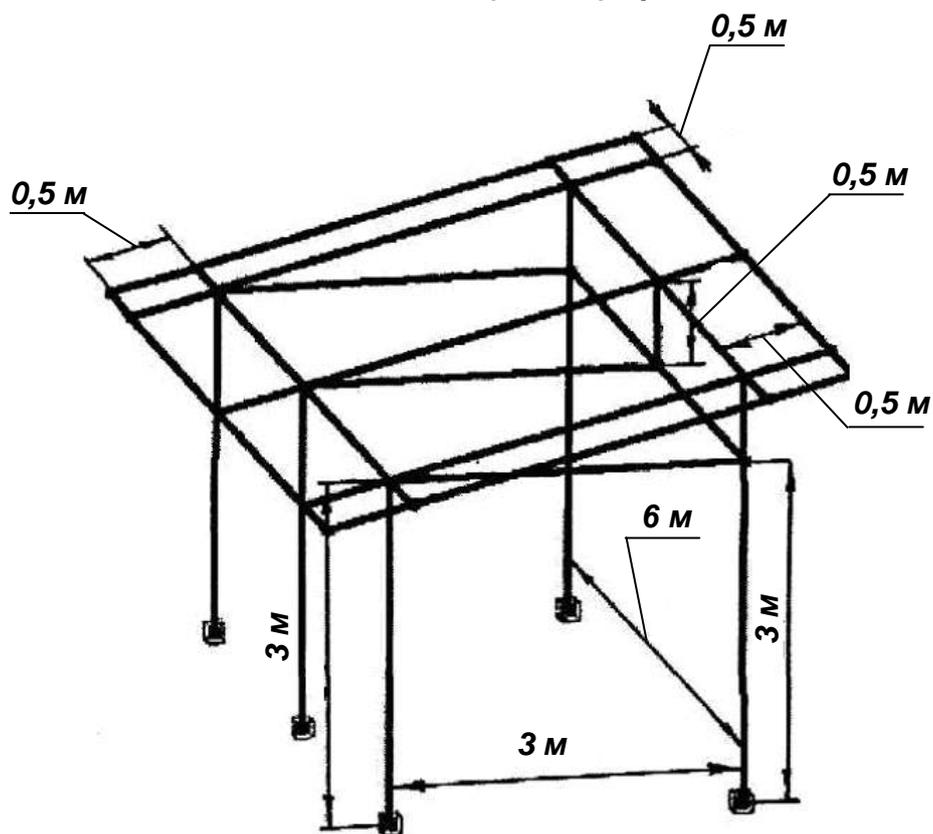


Рисунок 1 Трехмерная конструкция навеса

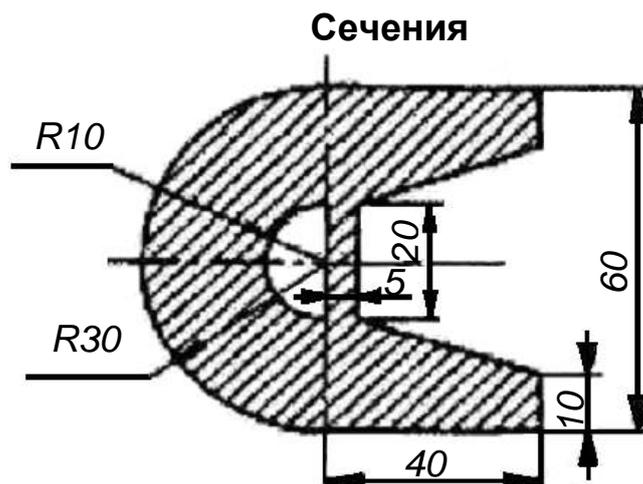


Рисунок 2 Чертеж поперечного сечения элементов крыши

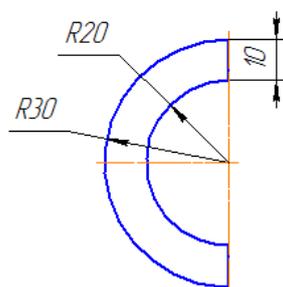


Рисунок 3 Чертеж поперечного сечения остальных элементов конструкции

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Замрий А.А. проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure3D. – М.: Издательство АПМ. 2004. – 208 с.
2. Пакет лицензионных программ APM WinMachine (v. 8.4, 8.5, 9.0, 9.3).
3. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин. – М.: Изд-во АПМ. – 472 с.
4. Шелофаст В.В., Чугунова Т.Б. Основы проектирования машин. Примеры решения задач. – М.: Изд-во АПМ. – 240 с.