



## 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).

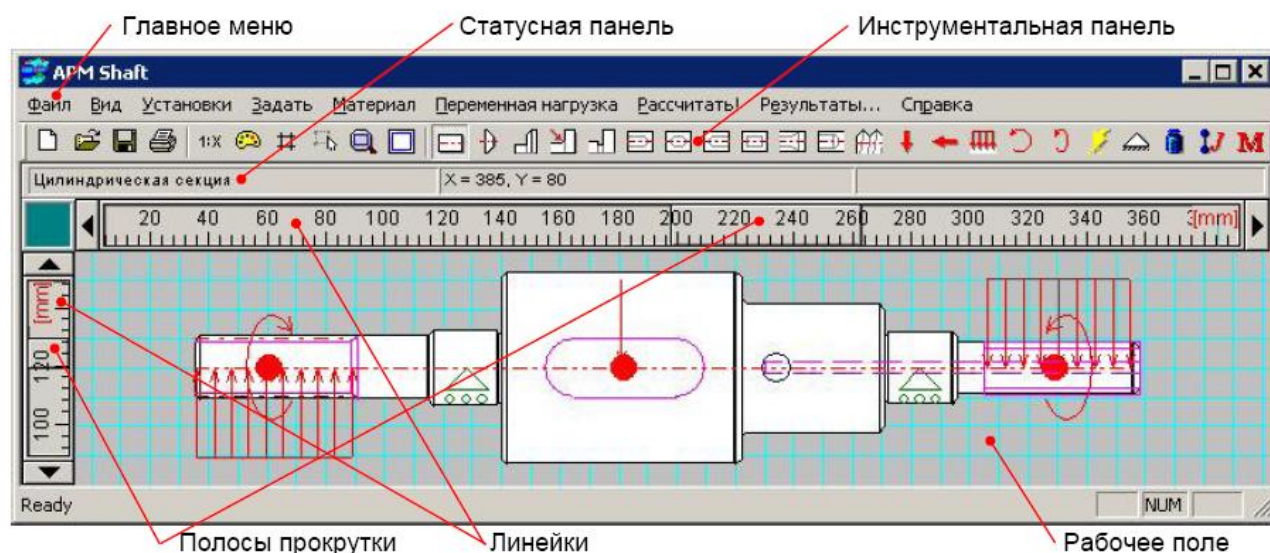


Рисунок 2.1 Общий вид **APM Shaft**





## Главное меню

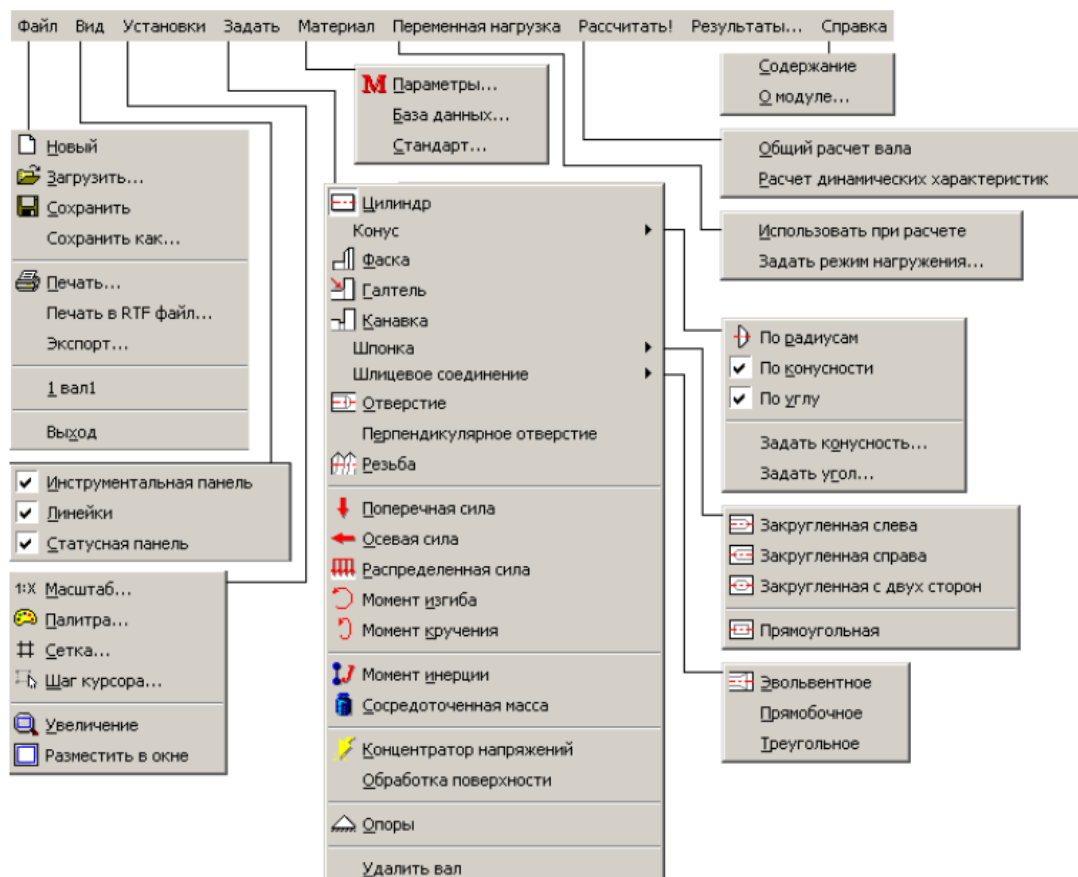


Рисунок 2.2 Структура главного меню системы **APM Shaft**

## 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.).

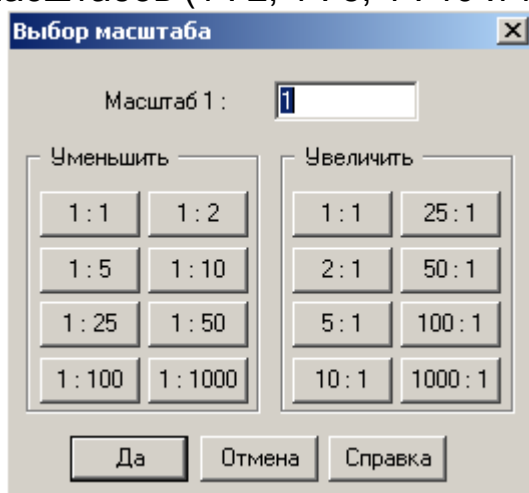




Рисунок 2.3

### **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 <b>APM Shaft</b> (*.wsh)
	 Сохранить	Сохранение исходных данных и результатов расчетов в файл <b>APM Shaft</b> (*.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 <b>APM Graph</b> (*.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 расчетов
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