

*МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*  
федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Гусеничные машины и прикладная механика»  
Секция «Детали машин и прикладная механика»

**РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ПРИМЕНЕНИЕМ  
МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ)**

Методические указания  
к выполнению лабораторных и практических работ  
по курсам «Детали машин и основы конструирования»,  
«Прикладная механика», «Основы проектирования»  
для студентов направлений 140400.62, 150700.62,  
151900.62, 190109.65, 190110.65, 190600.62, 190700.62,  
220400.62, 220700.62, 221700.62, 050100.62

Курган 2015

Кафедра: «Гусеничные машины и прикладная механика»

Дисциплины: «Детали машин и основы конструирования»

(направления 190109.65; 190110.65; 150700.62; 151900.62;  
190600.62);

«Детали машин»

(направление 050100.62);

«Прикладная механика»

(направления 220400.62; 220700.62; 140400.62; 190700.62);

«Основы конструирования»

(направление 050100.62);

«Основы проектирования продукции»

(направление 221700.62);

«Основы проектирования»

(направление 150700.62).

Составила: канд. техн. наук, доцент Л.Н. Тютрина.

Утверждены на заседании кафедры «21» ноября 2013 г.

Рекомендованы методическим советом университета «20» декабря 2013 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Расчеты деталей и узлов механизмов и машин являются важной составляющей их проектирования и конструирования. Современные компьютерные технологии позволяют комплексно провести необходимые вычисления геометрических размеров деталей и узлов в зависимости от ряда факторов: условий эксплуатации, режимов работы, выбранного материала и т.д.

При выполнении прочностных расчетов в курсовом проектировании или на занятиях по дисциплинам «Детали машин и основы проектирования», «Детали машин», «Прикладная механика» и т.п. наравне с программным комплексом расчетов в среде Mathcad используются отдельные программы системы АРМ WinMachine (Автоматизированное Проектирование Машин).

АРМ WinMachine – продукт ООО «Научно-технический центр АПМ (г. Королев, Россия) и представляет собой результат многолетних работ кафедры основ конструирования машин МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Одним из самых точных методов расчета деталей машин на прочность является метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий определить значения напряжений в любой точке плоской или объемной детали.

Метод конечных элементов является наиболее распространенным методом решения широкого круга научных и инженерных задач. Это объясняется простотой понятий МКЭ, присущей ему логичностью и эффективностью применения.

МКЭ характеризуется следующими свойствами:

1) физическая область задачи делится на подобласти, или конечные элементы. В зависимости от поставленной задачи это треугольные либо квадратные элементы (для плоского варианта), пирамиды либо кубы (для объемного варианта);

2) зависимая переменная аппроксимируется функцией специального вида на каждом конечном элементе и, следовательно, во всей области;

3) подстановка аппроксимаций в определяющие уравнения дает систему множества уравнений с неизвестными параметрами. Решая эти уравнения, можно определить значения параметров и, как следствие, получить приближенное решение задачи.

Пакет АРМ WinMachine является доступным и наглядным в понимании проведения проектировочных и проверочных расчетов методом конечных элементов. Система включает в себя расчеты валов, подшипников, зубчатых передач всех типов, расчеты шпоночных и шлицевых соединений.

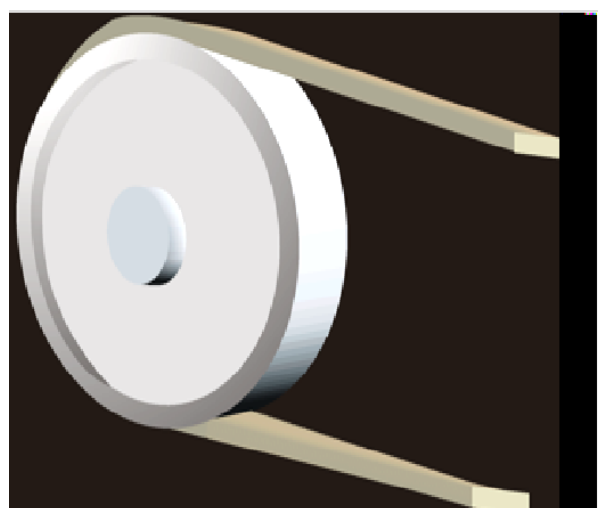
*Целью данной работы является ознакомление со структурой программного пакета и методикой выполнения проектировочных и проверочных расчетов деталей машин и узлов методом конечных элементов в системе АРМ WinMachine.*

# 1 РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

Для расчета механических передач вращением, т.е. элементарных механизмов, служащих для передачи вращающего момента от одного вала (ведущего) другому (ведомому) предназначена система APM WinTrans пакета Win-Machine.

С помощью APM WinTrans можно выполнить проектировочный и проверочный расчет любой механической передачи – зубчатой (цилиндрической, конической, червячной) с внешним и внутренним зацеплением, ременной (плоскоременной, клиноременной).

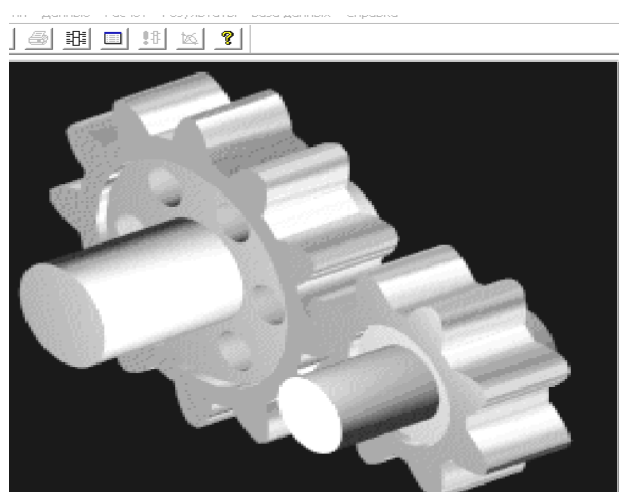
Вначале необходимо задать конструкцию передачи (рисунок 1), ресурс, основные кинематические характеристики выходного вала (мощность, частоту вращения, передаточное число).



Плоскоременная

Мощность на ведущем валу [кВт]	0.0
Обороты ведущего вала [об/мин]	0.0
Передаточное число [-]	0.0
Коэффициент динамичности нагрузки [-]	0.0
Тип регулировки передачи	Не выбран

Мощность	0.00	кВт	Кoeff. динамичности наг
Частота вращения	0.00	об./мин	Межосевое расстояние
Передаточное число	0.00	-	Угол наклона



Зубчатая внешнего зацепления

Момент на выходе [Н*м]	0.0
Обороты на выходе [об/мин]	0.0
Передаточное число [-]	0.0
Требуемый ресурс [час]	0.0
Шестерня [-]	Колесо [-]
Шестерня	Колесо
Не выбрана	Не выбрана
Режим работы	Крепление шестерни на валу
Не выбран	Не выбрано

Момент вращения на ведомом валу	0.00	Н*м	Ширина
Частота вращения ведомого вала	0.00	об./мин	Модуль
Передаточное число	0.00	-	Угол наклона
Ресурс	0.0	час	Кoeff. смещения u
Межосевое расстояние		Нисп	Кoeff. смещения k

Рисунок 1 – Примеры выбора конструкции передачи

Исходные данные появляются в отдельном окне (рисунок 2). При необходимости уже введенные величины можно корректировать.

Момент вращения на ведомом валу	1500.00	Н*м
Частота вращения ведомого вала	45.00	об./мин
Передаточное число	5.00	-
Ресурс	15000.0	час

Рисунок 2 – Окно исходных данных к расчету механической передачи

При проектировочном расчете задаются значения таких параметров, как внешняя нагрузка, материалы, тип термообработки, кинематические характеристики, долговечность.

На основании введенных данных рассчитываются основные геометрические размеры передачи по критериям усталостной прочности зубьев на изгиб и сопротивления выкрашиванию (рисунок 3).



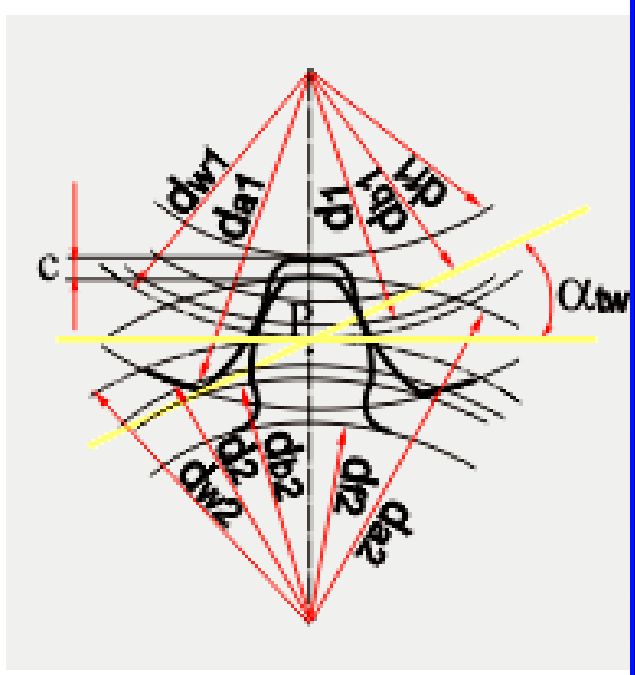
Рисунок 3 – Результаты проектировочного расчета зубчатой передачи

Результатом проектировочного расчета также являются качество передачи и значение сил, действующих в полюсе зацепления «шестерня – колесо» (рисунок 4).

## Качество передачи



$z_{min}$ .....	15.366	[-]
$\alpha_{tw}$ .....	20.5	[град]
$\epsilon_\alpha$ .....	1.688	[-]
$\epsilon_\beta$ .....	0.0	[-]
$\epsilon_\gamma$ .....	1.688	[-]



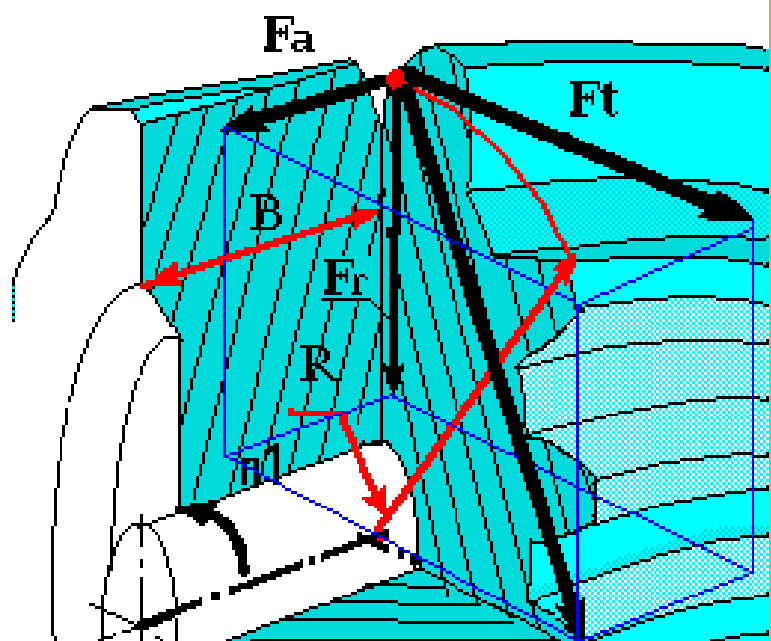
Параметр	Шестерня	Колесо
----------	----------	--------

$\beta_t$ [град]	0.0	0.0
$s_{na}$ [мм]	3.456	3.998
$c$ [мм]	1.25	1.25

Продолжить

Прервать

## Силы в зацеплении



$F_a$ .....	0.0	[Н]
$F_r$ .....	2258.727	[Н]
$F_t$ .....	6041.11	[Н]
$B$ .....	31.5	[мм]
$R$ .....	62.702	[мм]

Продолжить

Прервать

Рисунок 4 – Результаты проверочного расчета зубчатой передачи

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

Сводная таблица параметров материалов (рисунок 5) позволяет студенту проверить условия прочности по контактным напряжениям и напряжениям на изгиб и сделать соответствующие выводы по выполненному расчету.

Если условие прочности по какому-либо критерию не выполняется, студент должен изменить исходные данные для расчета.

В программе реализовано два вида проверочных расчетов: определение максимального момента при заданной долговечности, определение долговечности при заданной нагрузке.

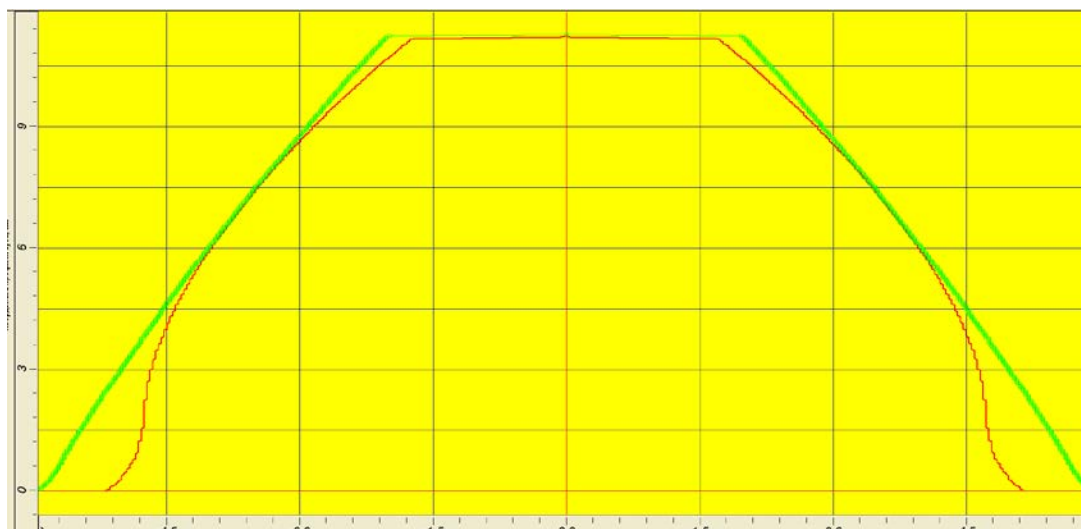


Параметры материалов		
Допускаемые напряжения по контакту		
	554.545	[МПа]
Допускаемые напряжения изгиба:		
Шестерни.....	285.882	[МПа]
Колеса.....	285.882	[МПа]
Твердость поверхности		
Шестерни.....	27.0	[HRC]
Колеса.....	27.0	[HRC]
Действующие напряжения		
Контактное	547.31	[МПа]
Изгибные		
Шестерни.....	176.338	[МПа]
Колеса.....	168.14	[МПа]

Рисунок 5 – Результаты проверочного расчета зубчатой передачи

Результаты расчета выводятся после всех расчетных мероприятий в виде таблиц и сопровождаются (по желанию расчетчика) графическими построениями. В отдельных окнах на экране можно посмотреть профили зубьев шестерни и колеса (рисунок 6 а) и чертеж зубчатого зацепления (рисунок 6 б). В разделе «Черчение» после заполнения «Данных» и «Параметров» чертеж можно сохранить и вывести на печать.

a)



б)

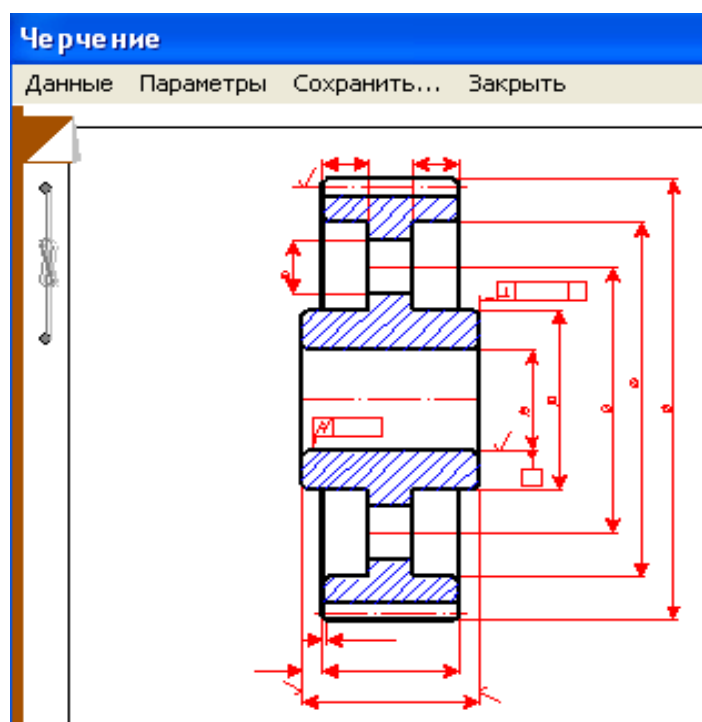


Рисунок 6 – Диалоговое окно графических построений профиля зуба и чертежа зубчатого колеса

## 2 РАСЧЕТ ВАЛОВ

Для расчета и проектирования валов и осей предназначен системный пакет APM WinShaft.

С помощью APM WinShaft могут быть рассчитаны следующие параметры:

- реакции в опорах;
- моменты изгиба и углы изгиба;
- моменты кручения и углы кручения;
- деформации;



- напряжения;
- коэффициент запаса усталостной прочности;
- осевые силы.

Система включает в себя специализированный графический редактор, который позволяет студенту за считанные минуты задать на экране конструкцию вала и приложенные к нему нагрузки.

Исходными данными являются режим работы, материал быстроходного и тихоходного валов, кинематические характеристики (передаточное число, вращающий момент, частота вращения, угловая скорость, действующие в зацеплении силы, длины ступеней валов (рисунки 7, 8). После ведения исходных данных, задаются параметры расчета.

Результаты выдаются в табличном (рисунок 9) и графическом (рисунок 10) вариантах с прочерчиванием всех ступеней вала.

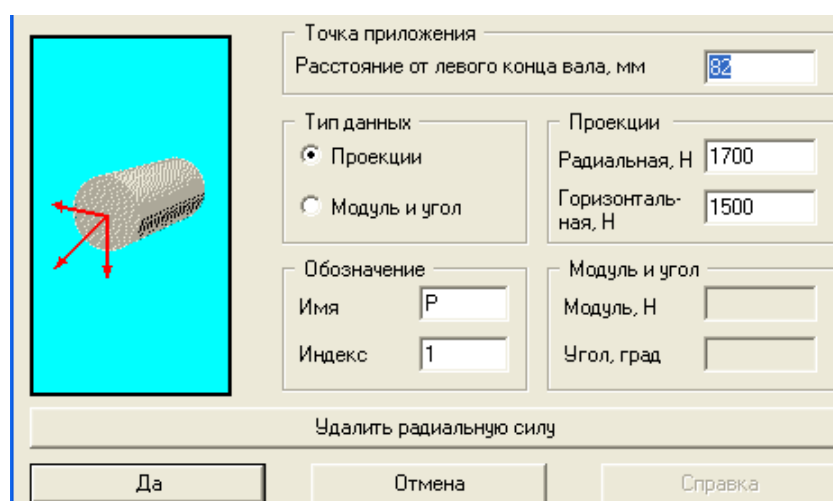


Рисунок 7 – Окно ввода радиальной силы

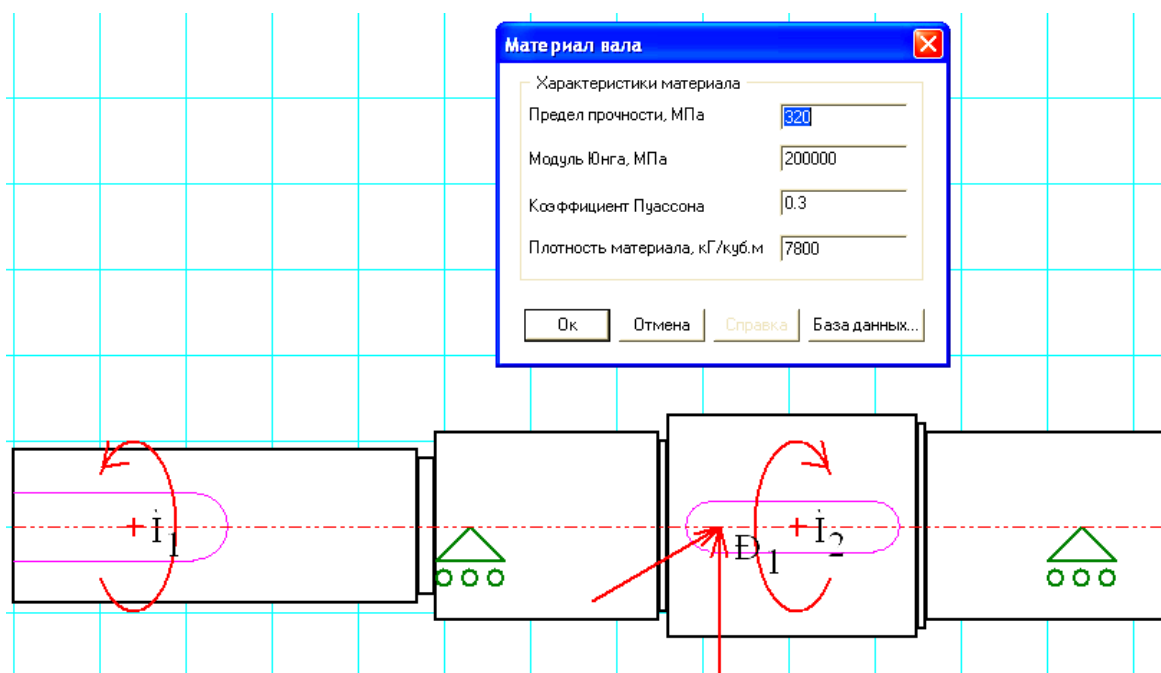


Рисунок 8 – Диалоговое окно выбора материала со схемой закрепления и нагружения вала

Радиальные силы			
N	Расстояние от левого конца вала, мм	Модуль, Н	Угол, град
0	132.00	2267.16	41.42
Моменты кручения			
N	Расстояние от левого конца вала, мм	Значение, Нхм	
0		64.00	1500.00
1		141.00	-1500.00

Реакции в опорах					
N	Расстояние от левого конца вала, мм	Реакция верт., Н	Реакция гориз., Н	Модуль Н	Угол, град
0	53.00	-1005.63	-887.32	1341.14	-131.42
1	124.00	-694.37	-612.68	926.02	-131.42

Рисунок 9 – Табличный вариант результатов расчета вала

Расчетная схема выводится отдельно, и при необходимости можно корректировать исходные данные (значения вращающих моментов, расстояния до опор, силы, длины и диаметры ступеней вала).

Выполняется проектировочный и прочностной расчеты. Результаты выводятся автоматически. Эпюры напряжений могут быть выведены как отдельно, так и параллельно с чертежом вала, что является более наглядным.

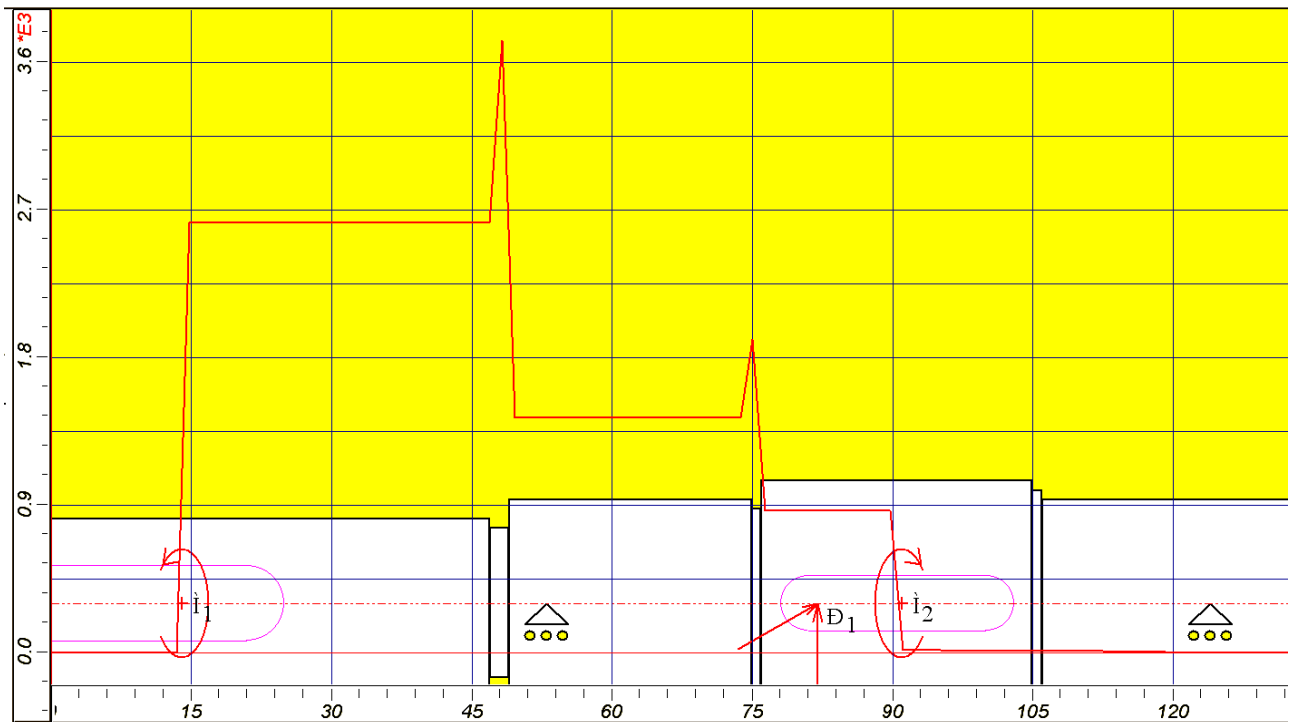


Рисунок 10 – Графический вариант результатов расчета вала

### 3 РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ

Исходными данными являются режим работы, материал быстроходного и тихоходного валов, кинематические характеристики (вращающий момент, частота вращения, угловая скорость, действующие в зацеплении силы, реакции опор, тип подшипника, диаметр участка вала под подшипник) (рисунок 11). Кроме того требуется ввести условия эксплуатации и долговечность устанавливаемого подшипника.

Результаты выдаются в табличном (рисунок 12) и графическом вариантах.

Примеры вывода результатов расчета подшипников представлены на рисунках 13, 14, 15.

**Радиальный шариковый подшипник**

Обозначение

Введите данные по геометрии

Внешний диаметр, мм:

Внутренний диаметр, мм:

Диаметр тел качения, мм:

Число тел качения:

Число рядов:

**Шариковый радиальный подшипник**

Условия работы

Радиальная сила, Н

Скорость вращения, об/мин

Кэфф. динамичности

Тип нагрузки

Постоянная нагрузка  Переменная нагрузка

Рисунок 11 – Диалоговые окна исходных данных к расчету подшипников

**Результаты**

Резюме	
Средняя долговечность, час .....	263.225
Макс. конт. напр., Н/кв.мм .....	1709.793
Выделение тепла, Дж/час .....	84160.483
Осевые биения, мкм .....	26.902
Радиальные биения, мкм .....	2.666
Боковые биения, мкм .....	0.000
Момент трения, Н x м .....	0.149
Потери мощности, Вт .....	23.378

Подшипник

Нагруж.  
 Ненагруж.

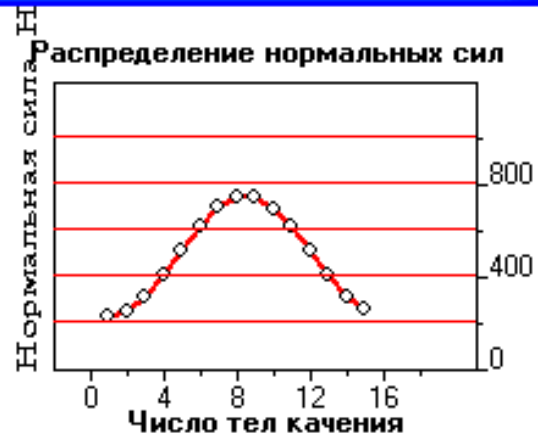
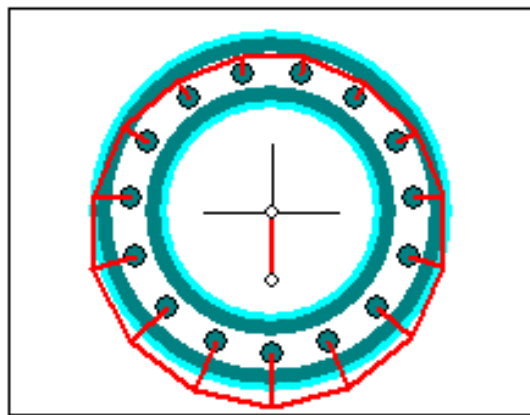
Нормальные силы

Мультипликация

Параметры трения	Биения	Бок. биения
Момент трения	Осев. биения	Бок. биения
<input type="button" value="Табл."/> <input type="button" value="Гисто"/> <input type="button" value="Граф"/>	<input type="button" value="Табл."/> <input type="button" value="Гисто"/>	<input type="button" value="Табл."/> <input type="button" value="Гисто"/>
Потери мощности	Рад. биения	Поле биений
<input type="button" value="Табл."/> <input type="button" value="Гисто"/> <input type="button" value="Граф"/>	<input type="button" value="Табл."/> <input type="button" value="Гисто"/>	<input type="button" value="Граф"/>

Рисунок 12 – Табличный вариант результатов расчета подшипников

### Силы, действующие на тела качения (нагруженный подшипник)



Номер итерации	0	Рад. смещение, мкм...	2.67
Тел качения...	15	Бок. смещение, мкм...	0.00
Нагруженных тел...	15	Осевая сила, Н...	1550.00
Макс. сила, Н...	749.64		

Ok

Следующий

Справка

Рисунок 13 – Результаты расчета нагружения подшипника

### Параметры сил трения (нагруженный подшипник)

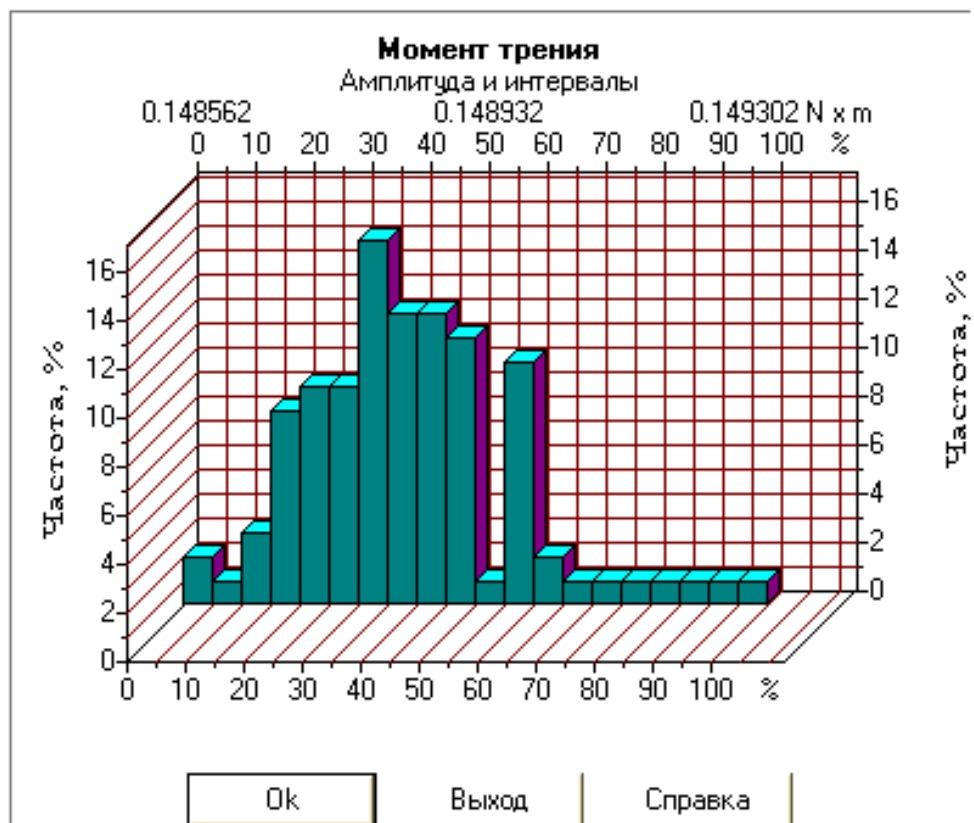


Рисунок 14 – Результаты расчета момента трения

## Параметры сил трения (нагруженный подшипник)



Рисунок 15 – Результаты расчета потерь мощности

На практических занятиях и лабораторных работах студенты рассчитывают заданный объект, варьируя исходные данные и анализируя полученные результаты.

Исходные данные для всех расчетов в системе APM WinMachine задаются преподавателем или выбираются студентом самостоятельно из задания на курсовое проектирование.

Все возможные формы отчета могут быть выведены на формат A4 и вставлены в отчет по лабораторной работе, в расчетно-пояснительную записку курсового проекта (курсовой работы) в виде расчетной части отдельных разделов либо как альтернативный вариант расчета «вручную».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Сайт ООО «НТЦ “АПМ”». URL: <http://apm.ru/> (дата обращения: 29.10.2013).
- 2 Чернавский С. А. и др. Курсовое проектирование деталей машин М. : Альянс, 2005. 415 с.
- 3 Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. М. : Машиностроение, 2008. 560 с.
- 4 Шейнблит А. Е. Курсовое проектирование деталей машин. Калининград : Янтарный сказ, 2008. 454 с.
- 5 Шелофаст В. В., Чугунова Т. Б. Основы проектирования машин. Примеры решения задач. М. : АПМ, 2004. 240 с.

Лариса Николаевна Тютрина

**РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ  
ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ПРИМЕНЕНИЕМ  
МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ)**

Методические указания  
к выполнению лабораторных и практических работ  
по курсам «Детали машин и основы конструирования»,  
«Прикладная механика», «Основы проектирования»  
для студентов направлений 140400.62, 150700.62,  
151900.62, 190109.65, 190110.65, 190600.62, 190700.62,  
220400.62, 220700.62, 221700.62, 050100.62

Редактор Е.А. Могутова

---

Подписано в печать	Формат 60 x 84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл. печ. л. 1,0	Уч.-изд. л 1,0
Заказ	Тираж 25	Не для продажи

---

РИЦ Курганского государственного университета  
640000, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.