

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Уфимский государственный авиационный технический университет

**ANSYS**  
**ОСНОВЫ РАСЧЕТА НА КОЛЕБАНИЯ**  
**ЭЛЕМЕНТОВ АД И ЭУ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к дипломному проектированию,  
практическим занятиям и курсовому проектированию  
по дисциплине «Конструкция и прочность АД и ЭУ»



Уфа 2008

Составитель Б.К. Галимханов

УДК 004:629.7(07)  
ББК 32973:39.53(я7)

ANSYS. Основы расчета на колебания элементов АД и ЭУ :  
Методические указания к дипломному проектированию,  
практическим занятиям и курсовому проектированию по дисциплине  
«Конструкция и прочность АД и ЭУ» / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т;  
Сост. Б.К. Галимханов – Уфа, 2008. – 29с.

Рассматриваются основы определения собственных частот колебания лопаток турбомашин с учетом начального напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов в САЕ-системе ANSYS. Приводятся особенности создания конечно-элементной модели лопатки, учета температурного состояния, задания граничных условий. Показывается возможность использования результатов расчета для оценки вибрационных характеристик рабочих лопаток.

Предназначены для студентов направления подготовки дипломированных специалистов 160300 – «Двигатели летательных аппаратов» специальности 160301 – «Авиационные двигатели и энергетические установки», а также для студентов других специальностей, изучающих и применяющих в учебном процессе программу ANSYS.

Табл. 7. Ил. 11. Библиогр.: 5 назв.

Рецензенты: докт. техн. наук, проф. Будилов И.Н.,  
канд техн. наук, доц. Харитонов В.Ф.

© Уфимский государственный  
авиационный технический университет, 2008

## Содержание

Введение .....	4
1 Постановка задачи .....	6
1.1 Запуск и настройка программы.....	7
2 Геометрическая модель РЛ.....	7
2.1 Импортирование геометрической модели.....	7
2.2 Создание модели РЛ средствами ANSYS.....	9
3 Определение собственных частот колебаний.....	10
3.1 Выбор типа элемента.....	11
3.2 Задание свойств материала.....	13
3.3 Создание конечно-элементной модели.....	14
3.4 Решение температурной задачи.....	19
3.5 Определение напряженного состояния РЛ.....	21
3.6 Определение собственных частот колебаний.....	22
3.7 Просмотр результатов расчета.....	23
4 Анализ результатов расчета.....	23
Список литературы.....	28

## Введение

Анализ дефектов и отказов газотурбинных двигателей летательных аппаратов (ГТД ЛА) и газотурбинных приводов наземных энергетических установок (ГТП НЭУ) показывает, что их причиной часто бывают разрушения рабочих лопаток (РЛ) из-за повышенных динамических напряжений. На рисунке 1 приведены фотографии с характерными для РЛ изломами (как правило, по одной из форм колебаний).

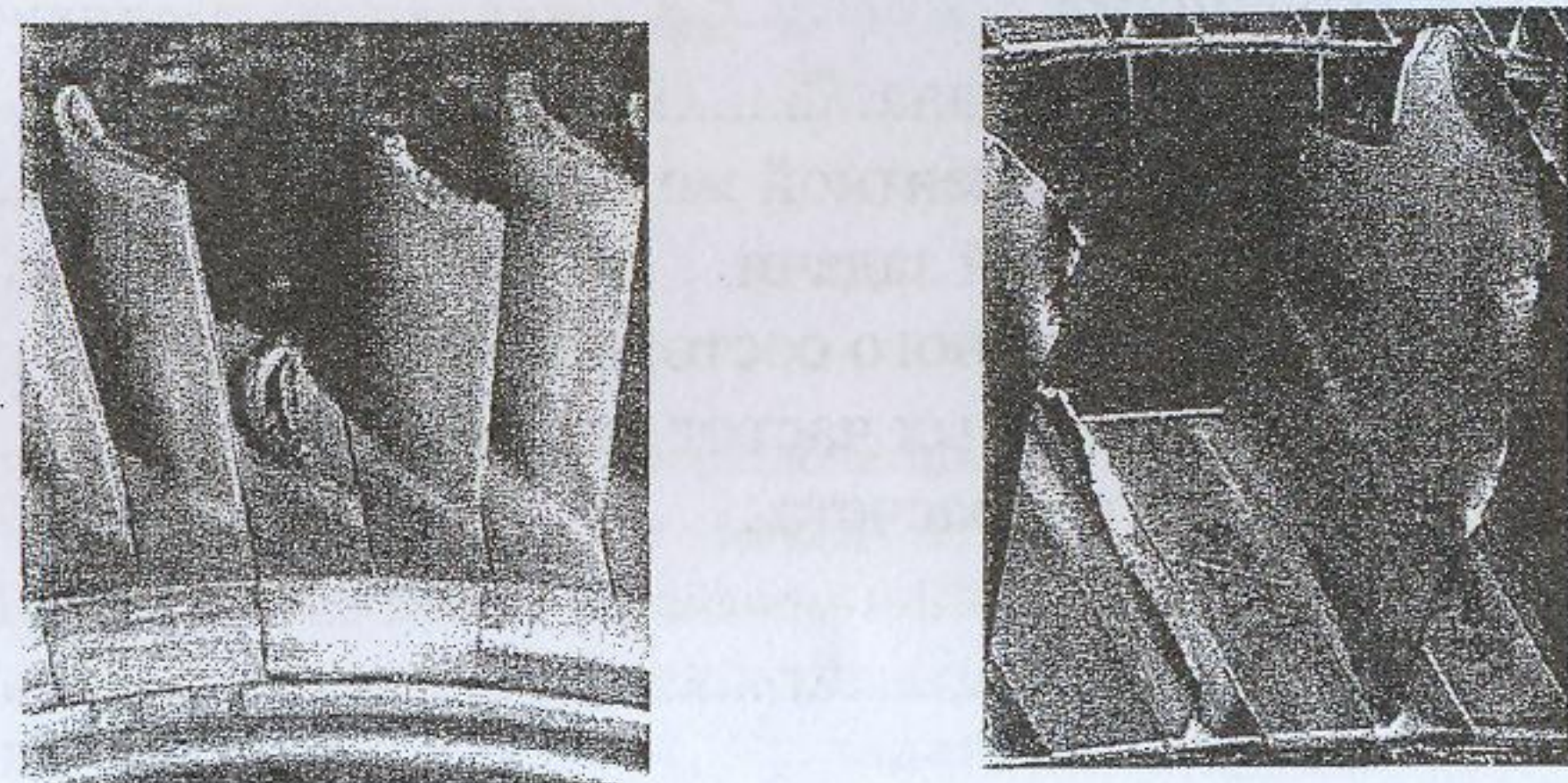


Рисунок 1

Поэтому процесс проектирования авиационных двигателей и энергетических установок (АД и ЭУ) включает в себя проведение сложнейших расчетов по оценке вибрационных характеристик РЛ компрессоров и турбин.

По вычисленным значениям частот собственных колебаний (ЧСК) строится диаграмма зависимости ЧСК от оборотов ротора (диаграмма Кэмпбелла), по которой оценивается возможность проявления резонансных явлений и принимаются решения о необходимости проведения дополнительных конструктивно-технологических мероприятий или установления проходных режимов работы АД.

РЛ турбомашин представляют собой детали сложной формы в виде естественно закрученных стержней (пластин), нагруженных в общем случае центробежными и газовыми силами (РЛ турбины – в условиях повышенной и переменной температуры).

Уточненные расчеты на колебания подобных объектов возможны при использовании современных программ, основанных на методе конечных элементов (МКЭ), например, в САЕ – системе ANSYS (далее ANSYS) [1, 2].

Расчетные схемы РЛ, используемые для оценки значений собственных частот колебаний, могут быть разными по степени детализации объекта. В зависимости от поставленной задачи модели лопаток могут быть представлены профильной частью РЛ с жесткой заделкой корневого сечения – рисунок 2а, полной лопаткой с жесткой заделкой по контактным поверхностям хвостовика – рисунок 2б или сектором рабочего колеса, содержащим одну лопатку (рисунок 2в). В последнем случае необходимо закрепить лопатку относительно диска в направлении паза и задать условие невнедрения лопатки в диск при деформации и перемещениях от действующих нагрузок (в общем случае от центробежных, газовых и температурных усилий) и задать условие цикличности (CYCLIC SECTOR).

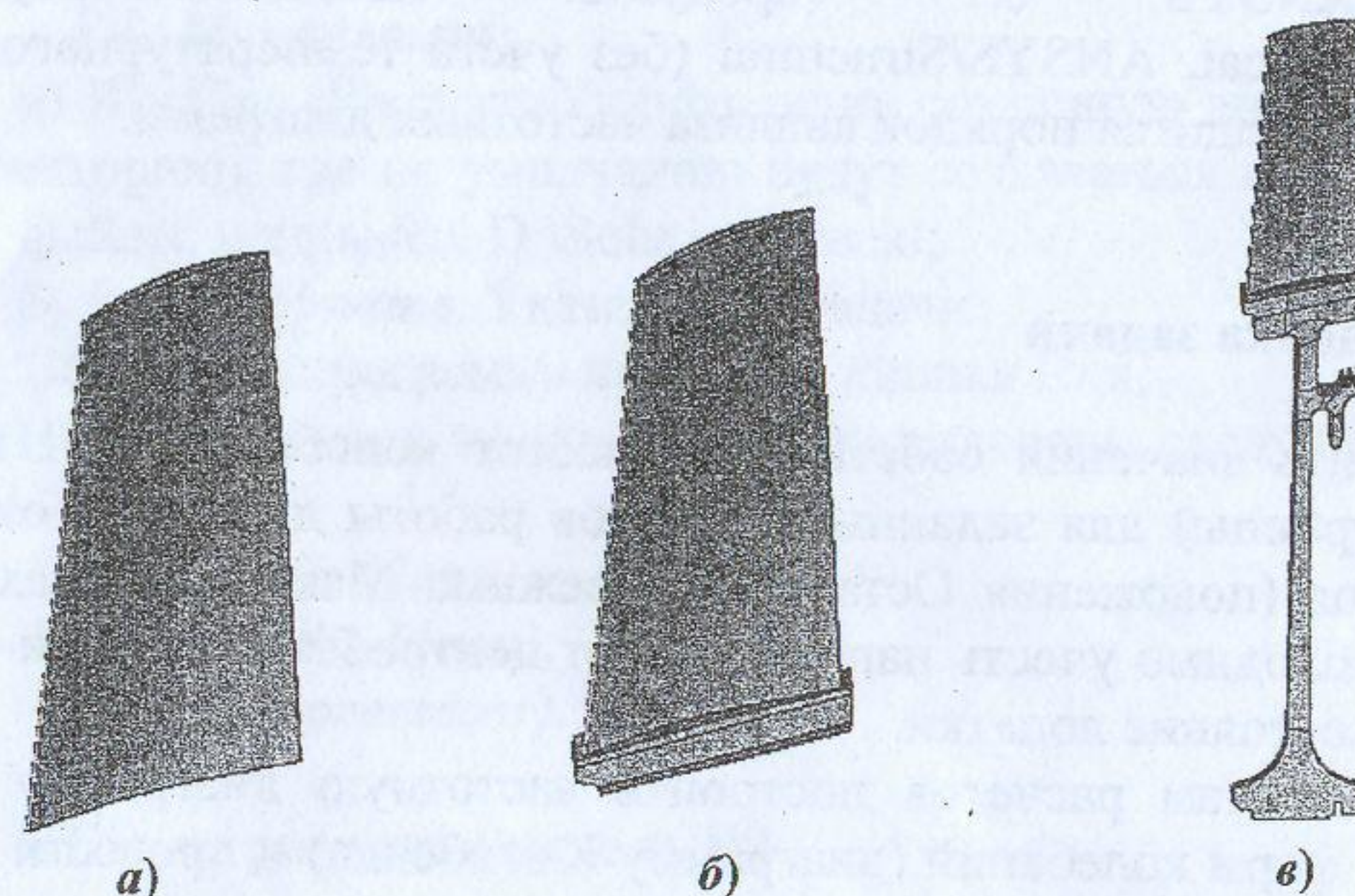


Рисунок 2 – Расчетные схемы

В нижеследующей таблице для примера приведены результаты расчета собственных частот колебаний по пяти первым формам для расчетных схем а и б и восьми формам по схеме в РЛ ТРДФ (материал – титановый сплав).

Таблица

Схема	f, Гц							
	1	2	3	4	5	6	7	8
а	418	1434	1942	3298	4042			
б	411	1408	1917	3240	4007			
в	383	1021	1332	1731	1993	3090	3462	3996

Представленные в таблице результаты показывают удовлетворительное совпадение значений ЧСК для расчетных схем *a* и *б* (ожидаемо, ЧСК профильной части несколько больше, как у более жесткой системы). При расчете по схеме *в* обнаруживаются формы колебаний, характерные для РК в целом. Например, если 1-ые формы лопаточных колебаний и колебаний РК соответствуют друг другу, то 5-ая форма лопаточных колебаний соответствует 8-ой форме РК в целом.

В учебном процессе при выполнении курсовых и дипломных проектов рекомендуется использовать расчетные схемы *a* или *б*.

В методических указаниях рассматривается последовательность решения задачи на собственные колебания с использованием программы ANSYS 8.1 (продукты ANSYS/Multiphysics, ANSYS/Mechanical, ANSYS/Structural (без учета температурного состояния)) и приводится порядок анализа частотных диаграмм.

## 1 Постановка задачи

Определить значения собственных частот колебаний РЛ компрессора (турбины) для заданных режимов работы двигателя от состояния покоя (положения Останов) до режима Максимал (max). В расчетах необходимо учесть напряжения от центробежных сил и температурное состояние лопатки.

По результатам расчетов построить частотную диаграмму для первых трех форм колебаний (диаграмму Кэмпбелла) и провести анализ возможности возникновения резонанса лопаток в диапазоне рабочих оборотов. Определить форму колебаний лопаток.

Исходные данные:

– материал лопатки - компрессора – ВТ8–1,  
турбины – ЖС6У;

– расчетные режимы – обороты ротора и температура лопатки (задается в характерных сечениях РЛ турбины).

Последовательность решения поставленной задачи МКЭ [3]:

- 1) создание или импортирование геометрической модели лопатки;
- 2) выбор типа элемента;
- 3) задание свойств материала;
- 4) создание конечно-элементной модели;
- 5) задание граничных условий по температуре, нагрузкам и перемещениям;

- б) выполнение расчета;
- 7) анализ результатов расчета.

## 1.1 Запуск и настройка программы

После обращения к программе ANSYS на экране откроется окно (панель) настройки среды. Обратит внимание на следующие настройки:

– *Simulation Environment* – указать необходимую программу – ANSYS;

– *License* – указать необходимый продукт – например, ANSYS Mechanical;

– *File Management*:

а) *Working directory*. Указать ранее созданную директорию (путь в директорию), где по умолчанию будут создаваться и храниться рабочие файлы, например: D:\Solution\proekt;

б) *Initial jobname*. Указать имя задачи.

Запустить программу нажатием кнопки Run.

В дальнейшем в тексте будут использованы следующие сокращения:

– *MM ( Main Menu)*;

– *UM ( Utility Menu)*;

– *Prep ( Preprocessor)*.

## 2 Геометрическая модель РЛ

### 2.1 Импортирование геометрической модели

Учитывая сложность геометрии РЛ целесообразным является создание ее объемной модели с использованием САД-системы с учетом радиуса расположения лопатки. За ось вращения может быть принята любая ось основной (глобальной) прямоугольной системы координат (в авиационных ГТД ось вращения – ось ОХ, радиальное направление – ось ОУ).

Импортирование существующей объемной модели РЛ осуществляется в следующей последовательности:

*UM – File > Import >*.

При подводе курсора к команде *Import* на экране появляются расширения, в которых могут быть записаны модели РЛ, выполненной в той или иной CAD – системе:

IGES  
 CATIA  
 CATIA V5  
 Pro/E  
 UG  
 SAT  
 PARA и т.д.

Например, чертежи, выполненные в КОМПАСе, записываются в расширении *IGES*. Другие варианты приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

CAD -система	Расширение	Предпочтительный формат для ANSYS
CATIA 4.x and lower	.model or .dlv	CATIA
CATIA 5.x	.CATPart or .CATProduct	CATIA Version 5
Pro/ENGINEER	.prt	Pro/ENGINEER
Unigraphics	.prt	Unigraphics
Parasolid	.x_t or .xmt_txt	Parasolid
Solid Edge	.x_t or .xmt_txt	Parasolid
SolidWorks	.x_t	Parasolid
Unigraphics	.x_t or .xmt_txt	Parasolid
AutoCAD	.sat	SAT
Mechanical Desktop	.sat	SAT
SAT	.sat	SAT
Solid Designer	.sat	SAT

Указав в диалоговой панели **ANSYS Connection ...** адрес записи модели (диск, папка, файл) нажать *Ok* для импортирования модели в ANSYS (в окошке *Geometry Type* указать *Solid Only*).

Таким образом модель импортируется в ANSYS.

В некоторых случаях после импортирования прорисовываются

только линии. Для “активации” таких примитивов, как площади и объемы, необходимо выполнить команду

*UM – PlotCtrls > Style > Solid Model Facets*

Появляется диалоговая панель *Solid Model Facets*, в которой необходимо указать *Normal Faceting >OK*.

Для нумерации и цветового выделения точек, линий, поверхностей, объемов и т.д. необходимо выполнить команду

*UM – PlotCtrls > Numbering >*

В появившейся диалоговой панели *Plot Numbering Controls* необходимо установить соответствующие опции *Off* или *On* [3]. В окошке */Num (Numbering show with)* для показа модели только в цветовой гамме должна быть установлена опция *Colors*.

## 2.2 Создание модели РЛ средствами ANSYS

Исходными данными для создания геометрической модели являются следующие параметры:

- $D_{вт\ 1(2)}$  – диаметр втулки на входе (выходе);
- $D_{н\ 1(2)}$  – наружный диаметр лопаточного венца на входе в рабочее колесо (выходе из колеса);
- координаты профилей РЛ в корневом, среднем и периферийном сечениях;
- углы установки профилей в корневом, среднем и периферийном сечениях.

Для упрощения создания модели можно принять следующие допущения, несущественно влияющие на результаты динамического анализа:

- корневое сечение расположено на среднем втулочном диаметре;
- концевое (периферийное) сечение расположено на среднем наружном диаметре лопаточного венца;
- вынос центров масс сечений отсутствует.

Последовательность создания геометрической модели РЛ:

1) создать точки, принадлежащие спинке (корыту) профиля. Локальная система координат должна учитывать радиус расположения сечения и угол установки профиля;

2) создать линии спинки (корыта) профиля  
*MM – Prep > Modeling – Create > Lines > Splines > Spline thru KPs*.  
 После этого указать последовательно точки, принадлежащие

спинке (корыту) и нажать *Apply (OK)* в заставке *B-Spline*.

Входную и выходную кромки можно создать либо по известным значениям их радиусов, либо также в виде сплайн-линий с заданием координат соответствующих точек;

3) создать поверхность профиля по четырем линиям – спинка-входная кромка - корыто - выходная кромка [3];

4) создать линии, соединяющие характерные точки сечений (рисунок 2.1);

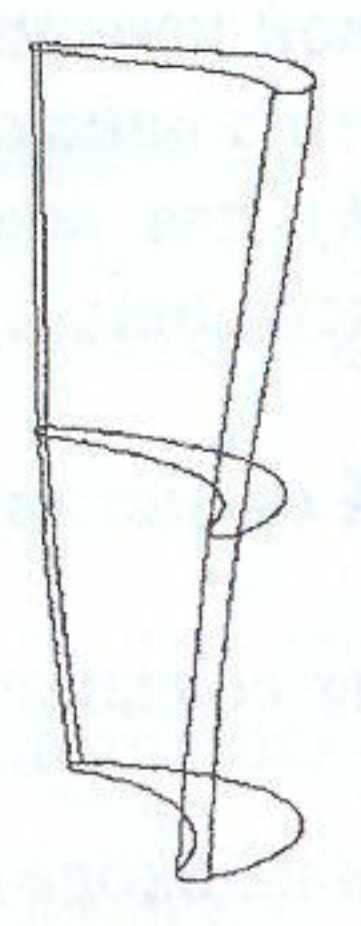


Рисунок 2.1

5) создать соответствующие поверхности по перу лопатки, каждую по четырем линиям (требования ANSYS по созданию криволинейных поверхностей);

б) создать два объема по поверхностям

*MM – Prep >Modeling – Create >Volumes – Arbitrary >By Areas >*.

После появления заставки *Create Volume by Areas* указать поверхности, создающие объем (в данном случае 6 поверхностей для каждого объема) и нажать *Apply (OK)* – последовательность обхода поверхностей произвольна;

После создания геометрической модели профильной части лопатки пользователь при необходимости может построить полную модель РЛ, используя ОСТ 1.11031-81 для хвостовика типа “ласточкин хвост” и ОСТ 1.10975-81 для хвостовика типа “елочка”.

### 3 Определение собственных частот колебаний

Особенности расчета РЛ на колебания будут рассмотрены на примере лопатки турбины, геометрическая модель которой создана в САД-системе *Unigraphics*. Модель записана на диске D в папке

*STUDENT* под названием *RLTVD*.

Геометрическая модель РЛ ТВД, импортированная в ANSYS из UG, показана на рисунке 3.1а.

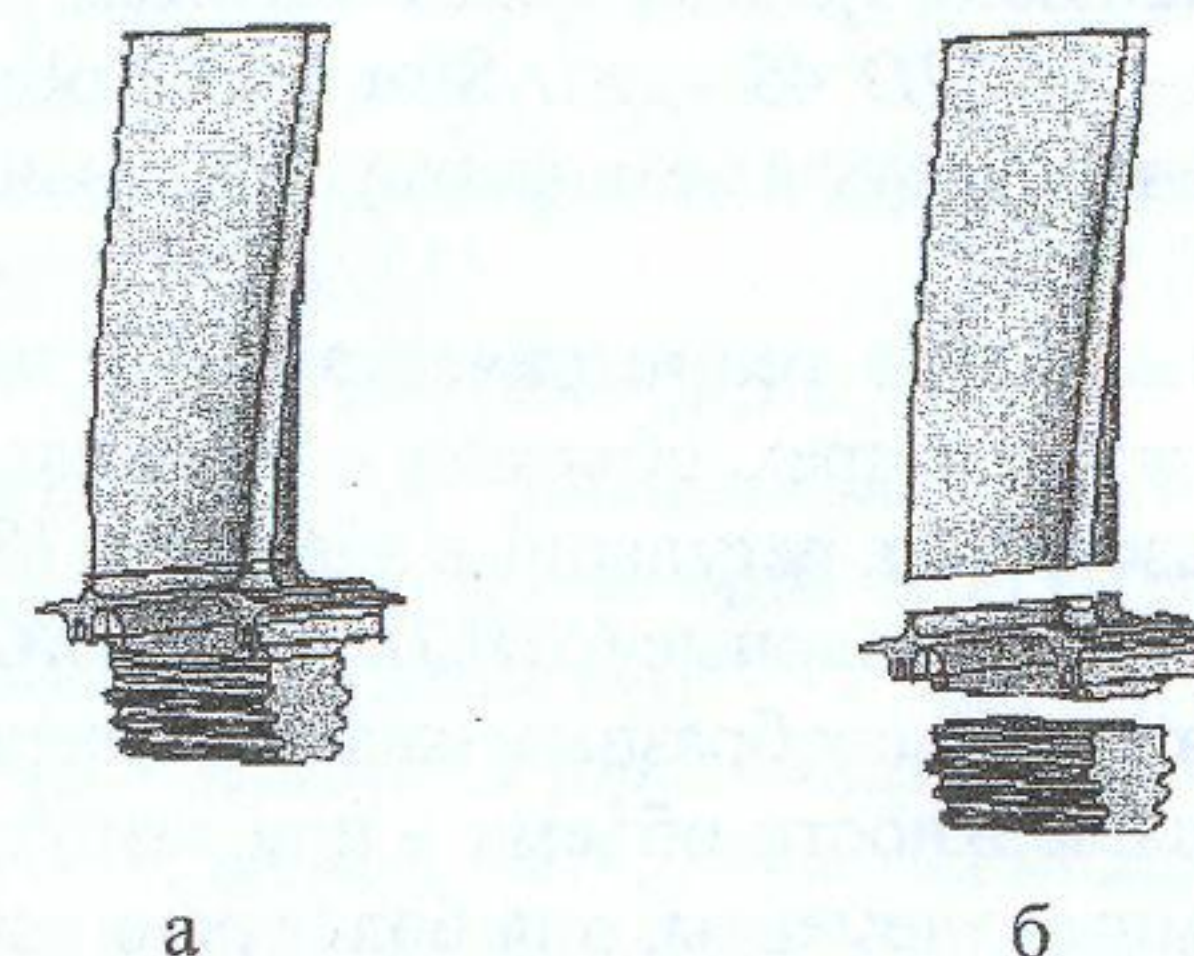


Рисунок 3.1

Исходные данные для расчетов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Параметры		Режимы		
		1	2	3
n, об/мин		0	10000	13000
Т, К	корневое	–	650	800
	среднее	–	750	940
	концевое	–	700	900

### 3.1 Выбор типа элемента

Выбирается из библиотеки элементов с учетом особенностей разбиения объемных моделей и решения задачи динамики при переменном температурном состоянии детали.

В методических указаниях [3] был рассмотрен случай решения совместной (температурной и прочностной) задачи *Structural – Thermal* с использованием элементов типа *Coupled Field*.

В данной постановке используется алгоритм последовательного решения температурной и динамической задач.

За основу принимаются элементы, используемые в задачах *Structural*.

Для объемов произвольной формы рекомендуется использовать элементы 10-ти или 20-ти узловые – **SOLID 92** - 3-D 10-Node Tetrahedral Structural Solid или **SOLID 95** - 3-D 20-Node Structural Solid.

Для объемов “правильной” формы рекомендуется использовать элементы 8-ми узловые – **SOLID 45** - 3-D Structural Solid. При регулярном разбиении элементы будут иметь форму правильных параллелепипедов.

На рисунке 3б представлена геометрическая модель рассматриваемой лопатки, состоящей из трех объемов – профильная часть и хвостовик могут быть разбиты на регулярные элементы (**SOLID 45**), а нижняя полка – только на нерегулярные (**SOLID 92** или **SOLID 95**).

В некоторых случаях целесообразным является первоначальное разбиение на элементы поверхности объема – при затруднениях прямого разбиения на объемные элементы, для более рационального разбиения на объемные элементы. Особенно это важно при наличии “вырожденных” углов на поверхностях, при использовании метода “протяжки” (команда **SWEEP**) и т.п.. Необходимо использовать поверхностный элемент **SHELL 63** – Elastic 4-node (или **SHELL 93** – Elastic 8-node).

Последовательность выбора используемых типов элементов приводится ниже.

**MM – Prep > Element Type > Add/Edit/Delete >**. Появляется диалоговая панель **Element Types** без определенных элементов (**None Defined**).

Нажать кнопку **Add >**.

Появляется диалоговая панель **Library of Element Types**.

В левом списке активизируется строка **Solid**, в правой колонке:

– **Brick 8node 45 > Apply**;

– **10node 92 > Apply**.

В левом списке активизируется строка **Shell**, в правой колонке – **Elastic 4node 63 > OK**.

На панели **Element Types** появляются сообщения

**Type 1 SOLID45**

**Type 2 SOLID92**

**Type 3 SHELL63**.

После этого панель **Element Types** закрывается (**Close**).

Типы элементов для решения температурной задачи (**Thermal Mass Solid**) будут активизированы в дальнейшем при обращении к команде **Switch Elem Type** (“Переключение” типа элемента).

### 3.2 Задание свойств материала

Требуемые для расчетов свойства материала:

– модуль упругости  $E$  (**EX**);

– коэффициент Пуассона  $\nu$  (**NUXY** или **PRXY**);

– плотность  $\rho$  (**DENS**);

– коэффициент линейного расширения  $\alpha$  (**ALPX**);

– коэффициент теплопроводности  $\lambda$  (**KXX**).

В скобках указаны обозначения, используемые в ANSYS.

Ввод свойств материала [4]

**MM – Prep > Material Props > Material Models >**

В диалоговой панели **Define Material Model Behavior** указать:

1) **Structural – Linear >> Elastic >> Isotropic >>** (двойной символ – двойное нажатие мышью). Ввести из таблицы 3.2 значение  $E$  и  $\nu$  (дополнительные столбцы создаются при обращении к кнопке **Add Temperature**).

Таблица 3.2

T, К	293	873	973	1073
$E \cdot 10^{-11}$ , Па	2,0	1,68	1,63	1,57
$\nu$	0,3	0,3	0,3	0,3

В диалоговой панели указать **Ok**;

2) **Structural >> Density >>**

Ввести значение плотности

**DENS 8400 > Ok**.

3) **Structural – Thermal Expansion >> Secant Coefficient >> Isotropic >>**

Ввести из таблицы 3.3 значения коэффициента линейного расширения

Таблица 3.3

T, К	293	773	873	973	1073
$\alpha \cdot 10^6$ , 1/град	11,4	12,5	12,7	12,9	13,2

В диалоговой панели нажать **Ok**

4) **Thermal >> Conductivity >> Isotropic >>**

Ввести из таблицы 3.4 значения коэффициента теплопроводности

Таблица 3.4

Т, К	293	873	973	1073
$\lambda$ , Вт/м·град	9,6	18,4	19,6	21,3

В диалоговой панели нажать *Ok*.

После ввода всех свойств материала закрыть диалоговую панель *Define Material Model Behavior*.

### 3.3 Создание конечно-элементной модели

Разбиение РЛ на элементы может быть проведено несколькими способами. Самым простым, но не самым рациональным, является автоматическое разбиение на элементы одного типа.

Для этого вначале необходимо определить атрибуты:

– типы элемента и материал:

*MM – Prep > Mesh Attributes – Default Attrs >*. В панели *Meshing Attributes* указать номер элемента (*TYPE –1 SOLID45* или *TYPE –2 SOLID92* в зависимости от разбиваемого объема) и номер материала (*MAT – 1 > Ok*);

– уровень разбиения на элементы:

*MM – Prep > Meshing – SizeCtrls > SmartSize – Basic >*. В панели *Basic Smartsize Settings* указать уровень разбиения  $N=6$  (*SizeLevel (LVL) – 6 > Ok*).

Разбиение на элементы осуществляется командой

*MM – Prep > Meshing – Mesh > Volumes – Free >*.

Появляется диалоговая панель *Mesh Volumes*. Мышью указываются разбиваемые объемы, нажимается кнопка *Ok* (если с указанным уровнем разбиваются все объемы, в панели нажимается кнопка *Pick All*).

На рисунке 3.2 показана полученная таким образом конечно-элементная модель профильной части РЛ. Общее количество элементов (*TYPE –2 SOLID92*) и узлов всей лопатки при таком разбиении составляют, соответственно, 334314 и 490850.

Для компьютеров обычной (стандартной) конфигурации данная задача может стать чрезмерно объемной, поэтому возникает необходимость более рационального разбиения РЛ на элементы.

Один из возможных вариантов заключается в разбиении на регулярные (в виде параллелепипедов) элементы профильной части и хво-

стовика РЛ. Вначале для этих объемов устанавливается тип элемента:

*MM – Prep > Mesh Attributes – Picked Volumes >*.

В панели *Volume Attributes* указать номера нужных объемов (или указать мышкой), нажать *OK* и в следующей панели указать тип элемента – (*TYPE –1 SOLID45 > Ok*).



Рисунок 3.2

Последовательность разбиения профильной части:

1) селектирование объема (рекомендуемая операция)

*UM – Select > Entities >*.

В диалоговой панели *Select Entities* установить опции:

– *Volumes, By Num/Pick, From Full – Apply >*.

Появляется диалоговая панель *Select Volumes*. Указать селектируемый объем и нажать *OK*. Для селектирования примитивов более низкого уровня (площади, линии, точки), принадлежащих данному объему, необходимо выполнить команду

*Select Entities > Sele Belo > Replot > Cancel*.

На мониторе появится изображение профильной части РЛ (рисунок 3.3а);

2) установка количества элементов по линиям

*MM – Prep > Meshing – Size Cntrls > Manual Size – Line – Picked Lines >*.

Появляется диалоговая панель *Elements Size on Picked*, указывается соответствующая линия (линии) – *> OK* и в появившейся панели *Element Sizes on Picked Lines* в окошке *NDIV No. of element divisions* указывается количество элементов, на которое будет разбиваться объем в этом направлении *> Apply (Ok)*.



Например, линии по спинке и корыту можно разбить на 20 элементов, по входной и выходной кромкам – на 4 элемента, по высоте лопатки – на 40 элементов;

3) разбиение корневого и концевого сечений на поверхностные элементы

*MM – Prep > Meshing – Mesh > Areas – Mapped – 3 or 4 sided >*

Появляется диалоговая панель *Mesh Areas*. Мышью указываются разбиваемые поверхности, нажимается *Ok* (рисунок 3.3б).

Обратить внимание и записать номер поверхности корневого сечения – в данном примере №84;

4) разбиение объема

*MM – Prep > Meshing – Mesh > Volumes – Mapped > 4 to 6 sided*

Появляется диалоговая панель *Mesh Volumes*, указывается разбиваемый объем, нажимается *Ok* (рисунок 3.3в);

5) уничтожение поверхностных элементов

*MM – Prep > Meshing – Clear > Areas*

В диалоговой панели указать *Pick All > OK*;

6) активация всей модели

*UM – Select > Everything.*

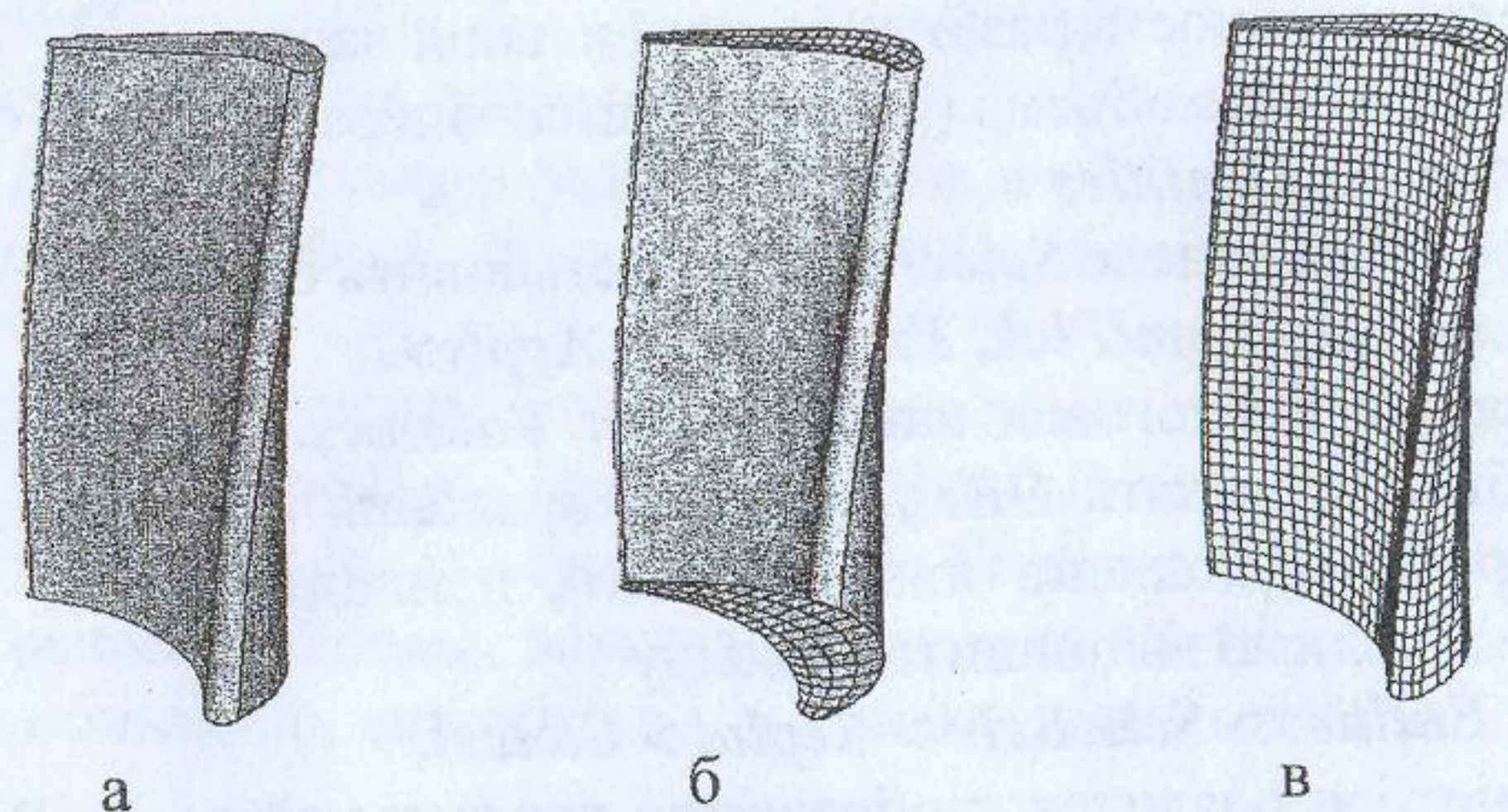


Рисунок 3.3

Последовательность разбиения хвостовика РЛ:

- 1) селектирование объема;
- 2) разбиение одной из торцевых поверхностей хвостовика на элементы (рисунок 3.4а). Элементы могут задаваться их количеством на линиях или размером собственной длины. На верхней линии необходимо указать количество (в данном случае - 12) для более равномерного разбиения как линии, так и верхней поверхности в целом;
- 3) установка количества элементов по длине хвостовика – 30.

Установить и записать номер верхней смежной поверхности – в данном примере №85;

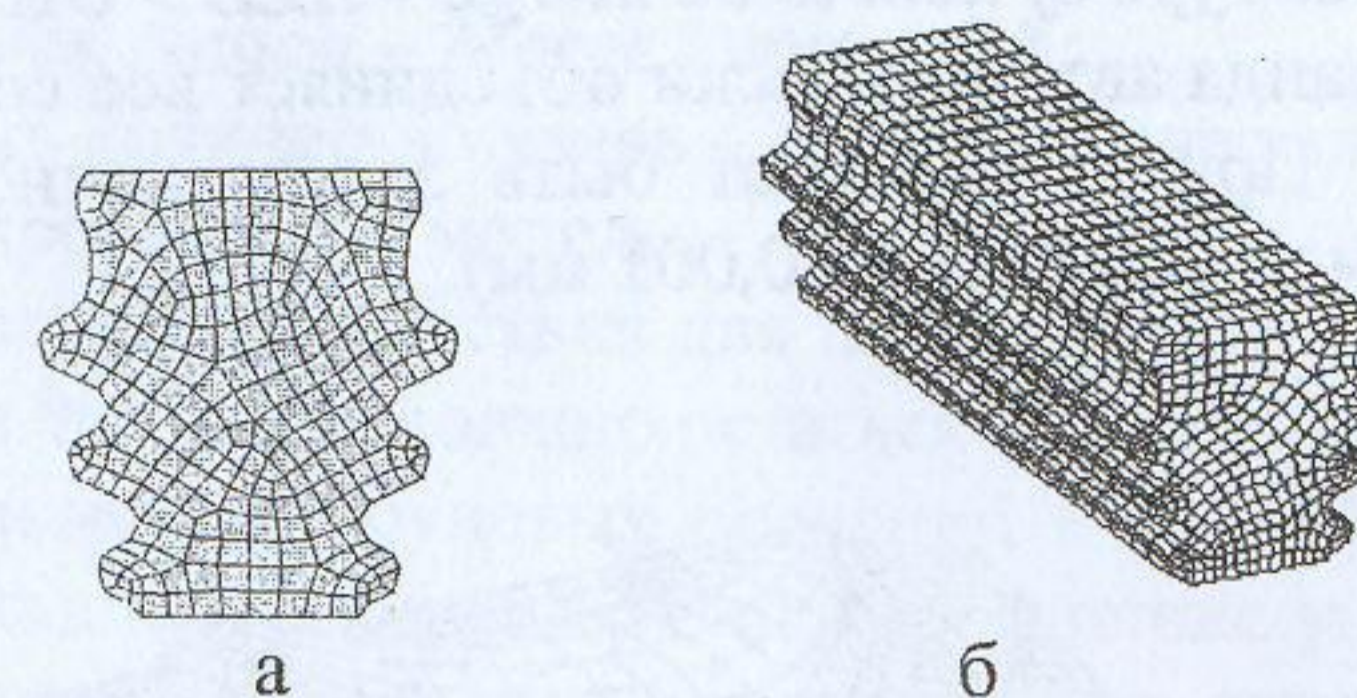


Рисунок 3.4

4) разбиение на объемные элементы методом протягивания

*MM – Prep > Meshing – Mesh > Volume Sweep – Sweep >*. В панели

*Volume Sweeping* указать разбиваемый объем, нажать *OK* (рисунок 3.4б);

5) уничтожение поверхностных элементов;

6) активация всей модели.

Таким образом, двумя вышеуказанными методами объемы разбиваются на регулярные элементы. В данном примере эти методы взаимозаменяемы.

Последовательность разбиения нижней полки:

1) указать тип элемента – *TYPE –2 SOLID92*;

2) селектировать объем;

3) разбить смежные поверхности на идентичные элементы. Установить и записать их номера – в данном примере верхняя поверхность №91, нижняя поверхность №92;

4) разбить (по собственному усмотрению или указанию консультанта) поверхности объема нижней полки на элементы – регулярные и нерегулярные (рисунок 3.5);

5) разбить объем на элементы (рисунок 3.5);

6) уничтожить поверхностные элементы;

7) активация всей модели.

После прорисовывания элементов на мониторе появится конечно-элементная модель РЛ. Данная модель еще не является окончательной – узлы на смежных поверхностях (84 и 91, 85 и 92), совпадая в пространстве, не связаны между собой. Необходима операция по связы-

ванию или по слиянию совпадающих узлов, принадлежащих разным поверхностям:

**MM – Numbering Ctrl's > Merge Items >**  
указать **Label Type of item to be merge – ALL > OK.**

Данная команда автоматически объединяет все совпадающие элементы модели. При этом может быть задана точность совпадения **TOLER** (например точность до 0,001 мм).

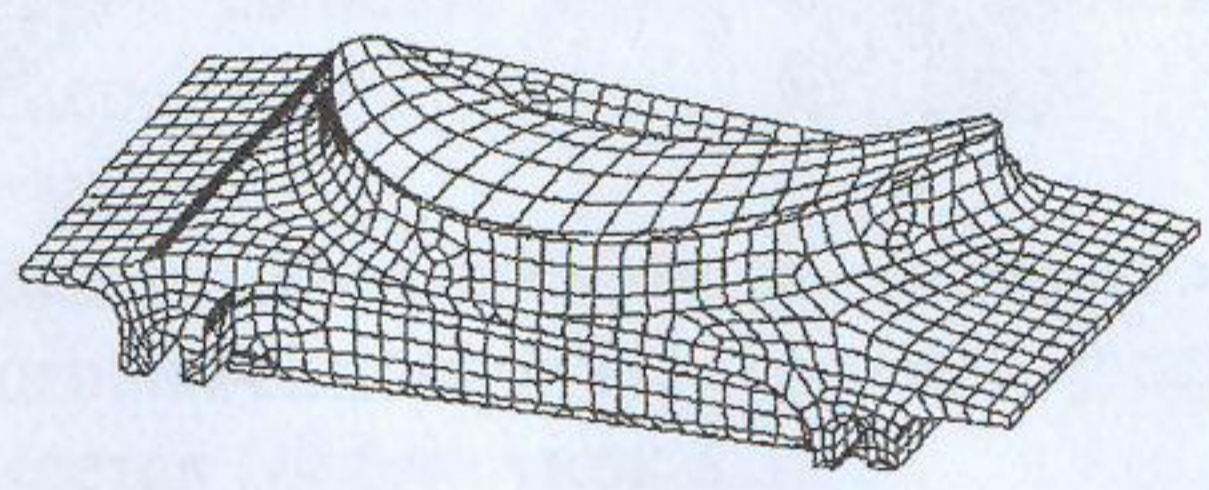


Рисунок 3.5

В рассматриваемом примере более наглядным будет метод слияния узлов на отобранных (селектированных) поверхностях (рекомендуется для пользователей этих методических указаний):

1) селектировать смежные поверхности

**UM – Select > Entities >**  
**– Areas, By Num/Pick, From Full – Apply >.**

Указать селектируемые поверхности (например 84, 91) **> OK.**

**– Select Entities > Sele Belo > Replot > Apply;**

2) селектировать узлы, принадлежащие выбранным поверхностям. Для этого в диалоговой панели **Select Entities** установить опции **Nodes, Attached to, Areas, all, From Full > OK.**

Далее **UM – Plot > Nodes** (рисунок 3.6)



Рисунок 3.6

3) просмотреть количество селектированных узлов

**UM – List > Status – Global Status >**

**/ STAT Command ... Nodes – Number Selected – 210 (узлов);**

4) провести слияние узлов

**MM – Prep > Number Ctrl's – Merge Items.**

В диалоговой панели установить

**Label – Nodes, Action – Merge items > OK;**

5) проверить количество узлов – 105. Слияние узлов произошло;

6) активизировать всю модель.

Провести подобные действия для поверхностей 85 и 92. В результате слияния из 806 узлов должно остаться 403 узла.

При использовании булевых операций в ANSYS по разделению на части объемов геометрической модели слияние узлов не требуется, т.к. поверхность разделения объемов будет принадлежать обеим частям модели.

В итоге конечно-элементная модель будет состоять из 31794 элементов и 42020 узлов, что на порядок меньше полученного при свободном разбиении (данные цифры могут варьироваться в зависимости от некоторых особенностей разбиения нижней полки РЛ).

### 3.4 Решение температурной задачи

В совместных задачах **Structural – Thermal** при последовательном их решении вначале решается температурная задача, т.е. по известным температурам в периферийном, среднем и концевом сечениях определяется температура всей РЛ.

Так как лопатка была разбита на элементы **Structural**, вначале необходимо переключить типы элементов

**MM – Prep > Element Type > Switch Elem Type >.**

Появляется диалоговая панель **Switch Elem Type**. В окошке **Change element type** указать **Struc to Thermal > OK.**

Для просмотра типов элементов использовать обращение

**MM – Prep > Element Type > Add/Edit/Delete >.**

На панели **Element Types** должно появиться сообщение

**Type 1 SOLID70**

**Type 2 SOLID87.**

В этом случае изменение типов элементов состоялось и модель подготовлена к решению температурной задачи.

Для задания температуры в характерных сечениях предлагается использовать способ выделения узлов на этих уровнях с последующим указанием их температур.

**MM – Prepr > Loads > Define Loads > Thermal > Temperature > On**

*Nodes* >.

На первой диалоговой панели *Apply TEMP of Nodes* активизировать *Box* (или *Polygon*), выделить узлы, расположенные на уровне характерного сечения и > *OK*. На второй панели указать *TEMP* и значение температуры для расчетного режима работы двигателя – *Load TEMP Value (VALUE)* ... (см. таблицу 3.1-3-й режим) > *Apply (OK)*.

Таким же образом задать температуру и в других характерных сечениях. Целесообразным является задание температуры и в зоне хвостовика – примерно на 100 °С ниже температуры корневого сечения.

На конечно-элементной модели лопатки появятся метки (при стандартной установке - желтого цвета) (рисунок 3.7).

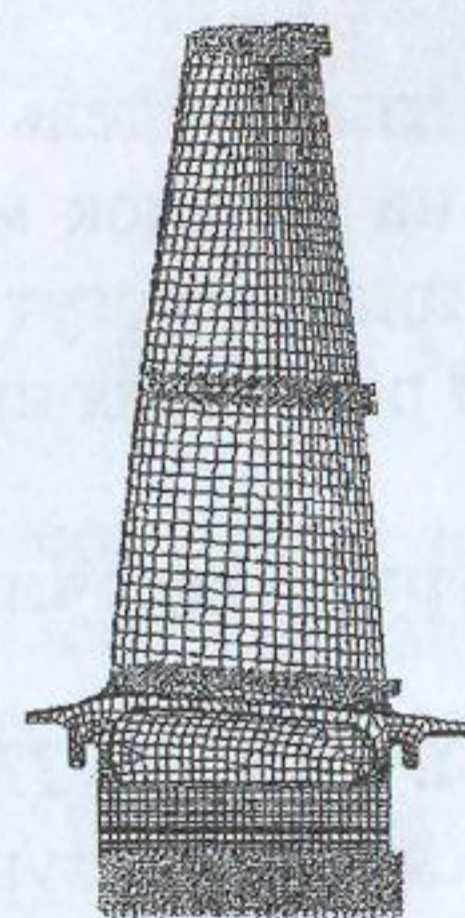


Рисунок 3.7

Перед запуском решения необходимо проверить (установить) тип вычислительного процесса

*MM – Solution > New analysis > Steady – State > OK.*

После этого запускается решение

*MM – Solution > Solve–Current LS.*

Вычислительный процессор запускают через диалоговую панель *Solve Current Load Step > OK.*

В некоторых случаях программа выдает замечания (*WARNING*) по созданной модели. Появляется запрос о продолжении вычислительного процесса. В этом случае для продолжения расчетов указать "Yes".

После выполнения расчетов на экране появляется сообщение (*Note*) – "Solution is done" (Решение получено).

Результатов температурного расчета могут быть просмотрены в

постпроцессоре:

*MM > General Postproc > Plot Results > Contour Plot–Nodal Solu >.*

Появляется диалоговая панель *Contour Nodal Solution Data*, в которой указываются:

*Nodal Solution > Dof Solution > Temperature > OK.*

На мониторе появится модель лопатки с распределенной по объему температурой (в цветовой гамме).

### 3.5 Определение напряженного состояния РЛ

Учет начального НДС РЛ является обязательным при уточненных расчетах на собственные колебания.

После решения температурной задачи в препроцессоре необходимо переключить типы элементов на элементы типа *Solid*:

*Element Type > Switch Elem Type >.*

В диалоговой панели *Switch Elem Type* указать *Thermal to Struc > OK.*

На панели *Element Types* должно появиться сообщение

*Type 1 SOLID45*

*Type 2 SOLID92.*

Конечно-элементная модель подготовлена к решению задач статической прочности.

Расчет напряжений от центробежных сил проводится с учетом температурного состояния лопатки, определенной в температурной задаче.

Приложение нагрузок и граничных условий проводится в следующей последовательности:

а) угловая скорость рабочего колеса

*...>Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Angular Veloc >Global*

В диалоговой панели *Apply Angular Velocity* указать угловую скорость  $\omega$  относительно оси вращения OX (3-й режим)

*OMEGX Global Cartesian X-comp – 1360 > OK;*

б) температура лопатки

*... > Define Loads > Apply > Structural > Temperature > From Therm Analy*

В панели *Apply TEMP from Thermal Analysis* указать имя файла результатов температурного анализа (расширение *rth*). Возможно обращение к клавише *Browse*, позволяющей определить искомым файл

по известному адресу—*D:\Solution\gtd.rth* — Открыть > **OK**;

в) ограничения по перемещениям

> **Define Loads** > **Apply** > **Structural** > **Displacement** > **On Areas** >.

Ограничения в виде жесткой заделки устанавливаются по контактным поверхностям хвостовика лопатки— в рассматриваемом примере — поверхности 96, 102, 107 и 117, 122, 127.

На панели **Apply U, ROT on Areas** указать данные поверхности (возможно использование мышки) > **OK**.

На вновь появившейся панели **Apply U, ROT on Areas** указать **All DOF** > **OK** (остальные опции по умолчанию).

На модели появятся стрелки, указывающие направления ограничений.

Устанавливается вид анализа

**MM – Solution** > **Analysis Type** > **New Analysis – New Analysis** > **Static** > **OK**.

Указываются особенности решения, связанные с дальнейшим учетом НДС лопатки в задачах колебаний

**MM – Solution** > **Analysis Type** > **Analysis Options** >

В диалоговой панели **Static or Steady – State Analysis** в окошке **Stress stiffness or prestress** установить **Prestress ON** > **OK**.

После этого задача запускается на решение

**MM – Solution** > **Solve—Current LS**

После выполнения расчетов на экране появится сообщение— **”Solution is done”**.

При необходимости проверки результатов расчета возможен просмотр напряжений и деформаций лопатки в постпроцессоре.

### 3.6 Определение собственных частот колебаний

Устанавливается вид анализа

**MM – Solution** > **Analysis Type** > **New Analysis – New Analysis** > **Modal** > **OK**.

Опции решения

**MM – Solution** > **Analysis Type** > **Analysis Options** >

В диалоговой панели **Modal Analysis** указать:

– метод решения — **Block Lanczos**;

– количество определяемых частот:

**No. Of modes to extract** — 3;

– количество сохраняемых форм колебаний:

**Expand mode shapes** — 3;

– учет напряженного состояния лопатки

**Incl prestress effect** — **Yes** > **OK**.

В открывшемся окне **Block Lanczos Method** ввести диапазон частот, в котором предположительно находятся искомые частоты:

**FREQB Start Freq** <initial shift> — 0

**FREQE End Frequency** — 5000 > **OK**.

Задача запускается на решение

**Solve** > **Current LS** — **Solve Current Load Step** > **OK**

Сообщение **”Solution is Done”** информирует о завершении решения и получении результатов расчета.

### 3.7 Просмотр результатов расчета

Для просмотра значений вычисленных собственных частот необходимо войти в постпроцессор и выполнить

**MM** > **General PostProc** > **Results Summary**.

На панели **SET,LIST Command** появятся значения частот трех форм колебаний

SET	TIME/FREQ
1	1329
2	2767
3	3835 (Гц)

Для просмотра формы собственных колебаний анимацию колебания можно вывести на экран. Для этого вначале необходимо указать порядковый номер формы (например, третью, последнюю форму)

**MM** > **General PostProc** > **Read results** > **Last Set** >.

Далее на экран выводится анимированные колебания

**UM – PlotCtrls – Animate** > **Mode Shape** >

и на панели **Animate Mode Shape** указать

**DOF solution, USUM** > **OK** (все остальное без изменений).

По анимации определяется форма колебаний — в данном случае крутильная.

### 4 Анализ результатов расчета

Оценка вибрационного состояния РЛ проводится на основании результатов расчета на нескольких режимах и построения диаграммы

Кэмпбелла (резонансной диаграммы) – зависимости значений собственных частот колебаний от частоты вращения ротора (в зависимости от режима работы двигателя) [5].

Результаты расчета ЧСК РЛ ТВД (исходные данные -таблица 3.1) приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Режим	$\omega$ , рад/с	ЧСК, Гц		
		$f_1$	$f_2$	$f_3$
1	0	1305	2913	4150
2	1047	1310	2807	3932
3	1361	1329	2767	3835

Диаграммы Кэмпбелла для этих форм колебаний представлены на рисунке 4.1 – кривые, выполненные утолщенной линией.

Уменьшение значений ЧСК для 2 и 3 форм колебаний в зависимости от оборотов объясняется более значительным влиянием температурного состояния лопатки на модуль упругости материала по сравнению с эффектом растягивающих (центробежных) сил.

На рисунке также указан рабочий диапазон оборотов – от  $n_{\text{мг}}$  до  $n_{\text{мах}}$  – от 3900 до 13000 об/мин.

Частота действия возмущающего фактора пропорциональна оборотам

$$f = k \cdot n_c,$$

где  $k$  – порядок возмущающей гармоники;

$n_c$  – частота вращения рабочего колеса, об/с.

На диаграмме Кэмпбелла частоты действия возмущающих факторов будут представлены в виде центральных лучей, наклон которых зависит от порядка возмущающей гармоники  $k$ . Для примера, 10-ой гармонике при  $n = 6000$  об/мин соответствует частота возмущающего фактора

$$f = 10 \cdot (6000/60) = 1000 \text{ Гц},$$

для  $k = 14$  при тех же оборотах

$$f = 1400 \text{ Гц}.$$

Точки пересечения кривых ЧСК и лучей определяют частоты вращения рабочего колеса  $n_{\text{рез}}$ , при которых возникают резонансные колебания по данной гармонике.

Анализ результатов расчета по основной (изгибной) форме колебаний (нижняя кривая) показывает следующее:

1) опасными могут оказаться гармоники колебаний от  $k=6$  до  $k=21$  – центральные лучи охватывают весь диапазон эксплуатационных оборотов;

2) число элементов конструкции двигателя, находящихся в проточной части, определяющие порядок возмущающих гармоник (на примере двигателя АЛ-31Ф):

- фронтальные устройства кольцевой камеры сгорания с форсунками – 28;
- литые полые стойки, соединяющие наружный и внутренний корпуса камеры сгорания – 14;
- лопатки соплового аппарата ТВД – 42;
- блоки трехлопаточные СА ТВД – 14;
- лопатки соплового аппарата ТНД – 33;
- блоки трехлопаточные СА ТНД – 11 (возможно

воздействие элементов, расположенных за рассматриваемым объектом);

3) источником резонансных колебаний РЛ ТВД по первой изгибной форме в диапазоне эксплуатационных оборотов является пульсации газового потока по 11-ой и 14-ой гармоникам, вызываемые СА ТНД и литыми стойками или блоками СА ТВД;

4) резонансные частоты вращения

$$n_{\text{рез1}} = 5600 \text{ об/мин};$$

$$n_{\text{рез2}} = 7150 \text{ об/мин};$$

5) относительная разность между рабочей и резонансной частотой должна соответствовать следующему условию

$$\Delta = |(n_{\text{уст}} - n_{\text{рез}}) / n_{\text{уст}}| \cdot 100\% \geq 10\%$$

где  $n_{\text{уст}}$  –  $n_{\text{мг}}$ ,  $n_{\text{мах}}$ ,  $n_{\text{ном}}$  – частоты вращения ротора на установившихся режимах работы двигателя – малый газ, максимал, номинальный и т.д.

В данном случае по известным оборотам  $n_{\text{мг}}$  и  $n_{\text{мах}}$

$$\Delta_{\text{мг1}} = |(3900 - 5600) / 3900| \cdot 100\% = 43,6\%;$$

$$\Delta_{\max 1} = |(13000 - 5600)/13000| \cdot 100\% = 56,9\%;$$

$$\Delta_{\text{мг}2} = |(3900 - 7150)/3900| \cdot 100\% = 83,3\%;$$

$$\Delta_{\max 2} = |(13000 - 7150)/13000| \cdot 100\% = 56,9\%.$$

Условия достаточности запаса по оборотам малого газа и максимала выполняются.

Подобные оценки должны быть проведены для всех установившихся режимов работы двигателя.

При опасности возникновения резонансных колебаний лопаток необходимо проанализировать и по возможности использовать ряд конструктивно-технологических мероприятий [5], направленных на:

- устранение причин возбуждения колебаний лопаток;
- изменение конструкции лопатки с целью изменения спектра ЧСК;
- использование в конструкции лопаток демпфирующих устройств.

Резонансные частоты вращения часто остаются в рабочем диапазоне оборотов. При выполнении условия достаточности запаса область резонансных частот являются “проходными” (рисунок 4.1 – заштрихованные зоны) – в процессе раскрутки ротора обеспечиваются условия быстрого прохождения этих зон.

Подобным образом проводится анализ вибрационных характеристик рабочих лопаток турбомашин и принимается решение о работоспособности изделия во всем диапазоне эксплуатационных режимов двигателя.

В процессе проектирования двигателя динамические характеристики лопаток компрессоров и турбин исследуются с учетом возможности проявления резонанса по разным формам колебаний. Для каждой формы колебаний опасными могут быть гармоники разных порядков. Например для рассмотренной выше РЛ ТВД опасными для появления резонанса по 2-й и 3-й формам колебаний являются возмущающие факторы с гармониками 14, 28, 33, 42 и 28, 33, 42, соответственно (см. рисунок 4.1).

В каждом случае необходима тщательная проработка вопросов, связанных с обеспечением работоспособности как лопаток турбомашин, так и двигателя в целом.

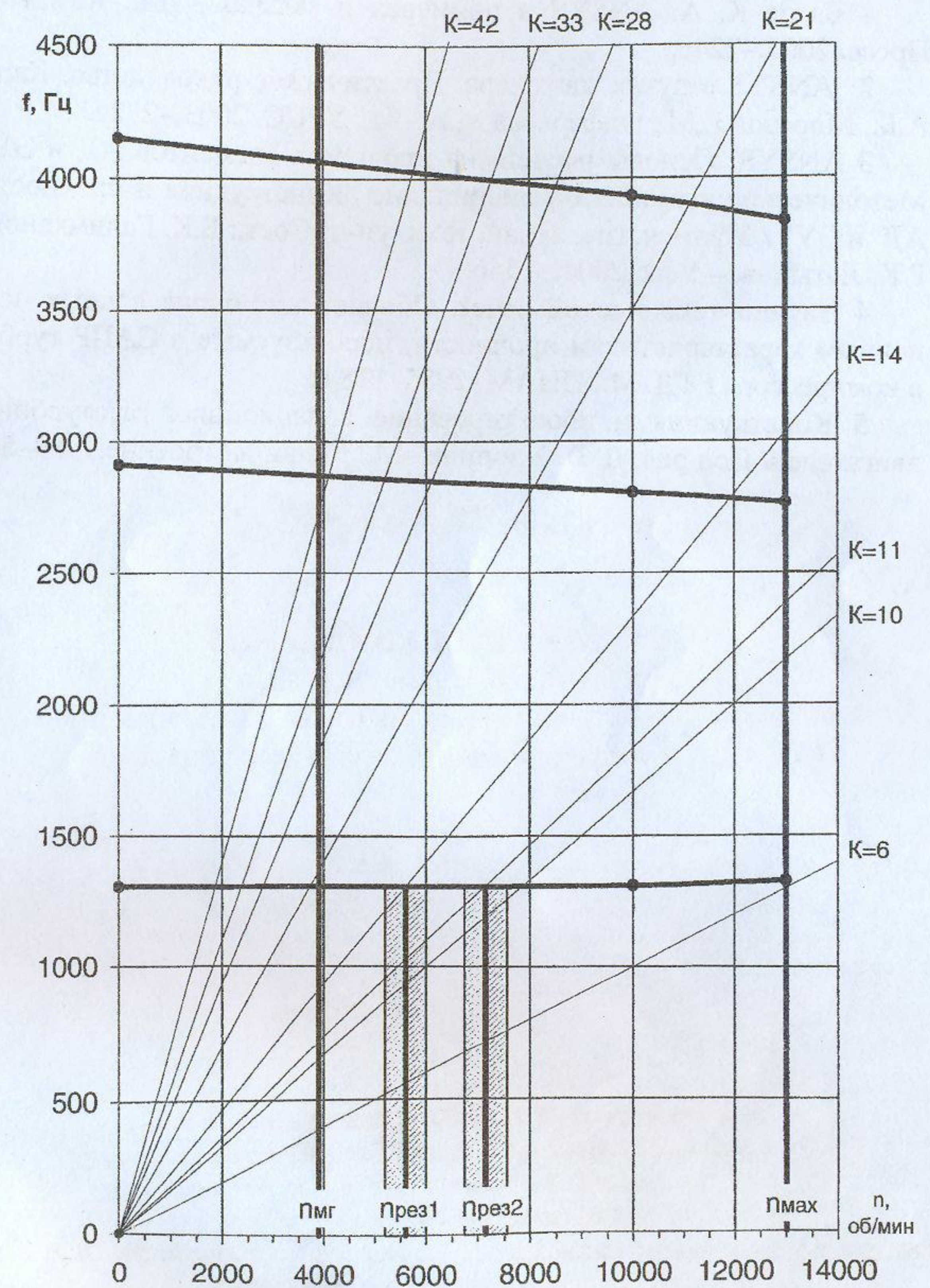


Рисунок 4.1 – Диаграмма Кэмпбелла

## Список литературы

- 1 Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах – М.: Компьютер Пресс, 2002,–224с.
- 2 ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.–М.: УРСС, 2003,–272с.
- 3 ANSYS: Основы расчета на прочность элементов АД и ЭУ. Методические указания по дисциплине “Конструкция и прочность АД и ЭУ” / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, Сост.: Б.К. Галимханов, Р.К. Латыпов. – Уфа, 2004. – 54с.
- 4 Научно-технический отчет. Обоснование банка данных по основным характеристикам прочности, используемые в САПР турбины и компрессора ГТД. М.: ЦИАМ, 1985–118 с.
- 5 Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей/ Под ред. Д. В. Хромина.–М.: Машиностроение,1989–566с.

Составитель ГАЛИМХАНОВ Булат Князевич

## ANSYS ОСНОВЫ РАСЧЕТА НА КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АД И ЭУ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к дипломному проектированию,  
практическим занятиям и курсовому проектированию  
по дисциплине «Конструкция и прочность АД и ЭУ»

Подписано в печать 27.08.2008. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.  
Усл. печ. л. 1,8. Усл. кр.-отг. 1,8. Уч.-изд. л. 1,7.

Тираж 100 экз. Заказ №379

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет  
Центр оперативной полиграфии УГАТУ  
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12