

**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**
имени академика С.П.Королева

**СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ
ЭЛЕМЕНТОВ ГТД
В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА

СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ
ЭЛЕМЕНТОВ ГТД
В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

Методические указания

САМАРА 2005

Составители: Бондарчук П.В., Виноградов А.С.

УДК 621.452

Создание расчетных моделей элементов ГТД в конечно-элементном комплексе Ansys:
Метод. указания / Самарск. гос. аэрокосмический ун-т. Сост. Бондарчук П.В., Виноградов А.С., 2005, 32 с.

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями к обязательному минимуму содержания основной образовательной программы регионального (вузовского) компонента подготовки инженера Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования Министерства образования и науки Российской Федерации.

Описаны методики построения конечно-элементных моделей дисков и лопаток ГТД, задания граничных условий и нагрузок и визуализации результатов.

Методические указания предназначены для студентов факультета 2 специальности 160301 – «Авиационные двигатели и энергетические установки» изучающих дисциплины «Динамика и прочность АД и ЭУ».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева.

Рецензент: Балякин В.Б.

Учебное издание

СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ
ЭЛЕМЕНТОВ ГТД
В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

Составители: Бондарчук Петр Владимирович
Виноградов Александр Сергеевич

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
СВЕДЕНИЯ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	2
1 Расчет неравномерно нагретых дисков турбомашин, находящихся в упругопластическом состоянии.....	2
1.1 Подготовка исходных данных для геометрической модели.....	2
1.2 Формирование геометрической модели диска.....	3
1.3 Формирование конечно-элементной модели.....	6
Задание материала.....	8
1.4 Формирование нагрузок и граничных условий.....	9
1.5 Расчет напряженно-деформированного состояния.....	11
1.6 Визуализация результатов.....	11
2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛОПАТКИ.....	14
2.1 Подготовка исходных данных для геометрической модели.....	14
2.2 Формирование геометрической модели лопатки.....	15
2.3 Формирование конечно-элементной модели.....	23
2.4 Формирование нагрузок и граничных условий.....	24
2.5 Расчет напряженно-деформированного состояния.....	27
2.6 Визуализация результатов.....	27
2.7 Расчет частот колебаний лопатки.....	28
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	30

ВВЕДЕНИЕ

Ansys – конечно-элементный комплекс, относящийся к классу тяжелых программ. Как правило, такие программы позволяют вводить команды через командную строку и дублируют в текстовый файл команды графического меню. Это значительно расширяет функциональность комплекса и облегчает пользователю прочностное проектирование путем создания своих маленьких расчетных подпрограмм. Эти подпрограммы могут использоваться на всех этапах работы: от построения модели до визуализации результатов. Команды, используемые в ANSYS, дополненные некоторыми функциями, образуют полноценный фортраноподобный язык программирования, называемый ANSYS Parametric Design Language (APDL). С помощью этого языка решаются некоторые проблемы, возникающие при проектировании деталей двигателей летательных аппаратов.

Необходимо сразу указать, что в результате выполнения данной работы должен быть написан полноценный макрос, обеспечивающий, после изменения параметров, геометрические построения, формирование конечно-элементной модели, задание нагрузок, расчет и предварительную обработку результатов. Основы параметрического моделирования можно освоить, выполнив данную работу.

1 Расчет неравномерно нагретых дисков турбомашин, находящихся в упругопластическом состоянии

В курсовой работе необходимо провести прочностное проектирование диска турбины либо компрессора. Суть данного расчета в оптимизации диска по параметрам: коэффициент запаса – масса. Получив исходную конструкцию (чертеж), необходимо доказать, что у диска конструкция оптимальна и, если это не так, усовершенствовать ее. Для этого нужен ряд последовательных многократных расчетов с целью исследования влияния имеющихся геометрических размеров и охлаждения.

1.1 Подготовка исходных данных для геометрической модели

Выполним учебный расчет, взяв сечение диска, представленное на рисунке ниже.

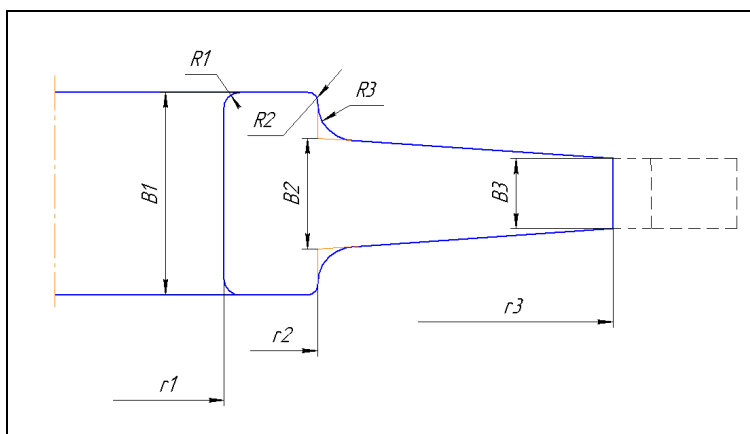


Рисунок 1 - Сечение диска

Для данного диска выбраны 9 параметров – толщины, радиусы изменения толщин и радиусы скруглений. Их численные значения сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Геометрические размеры диска

Параметр	B1	B2	B3	r1	r2	r3	R1	R2	R3
Размер, мм	65	36	22	55	85	180	5	3	12

Для оценки прочности используется осесимметричная модель, то есть для диска задается в качестве геометрической информации только сечение. Осью диска при задании координат точек должна быть ось Y. Задание координат точек производится только для половины

модели, так как диск – симметричный относительно срединной плоскости. Порядок задания координат точек показан на рисунке ниже. Радиусы скруглений будут моделироваться непосредственно в Ansys.

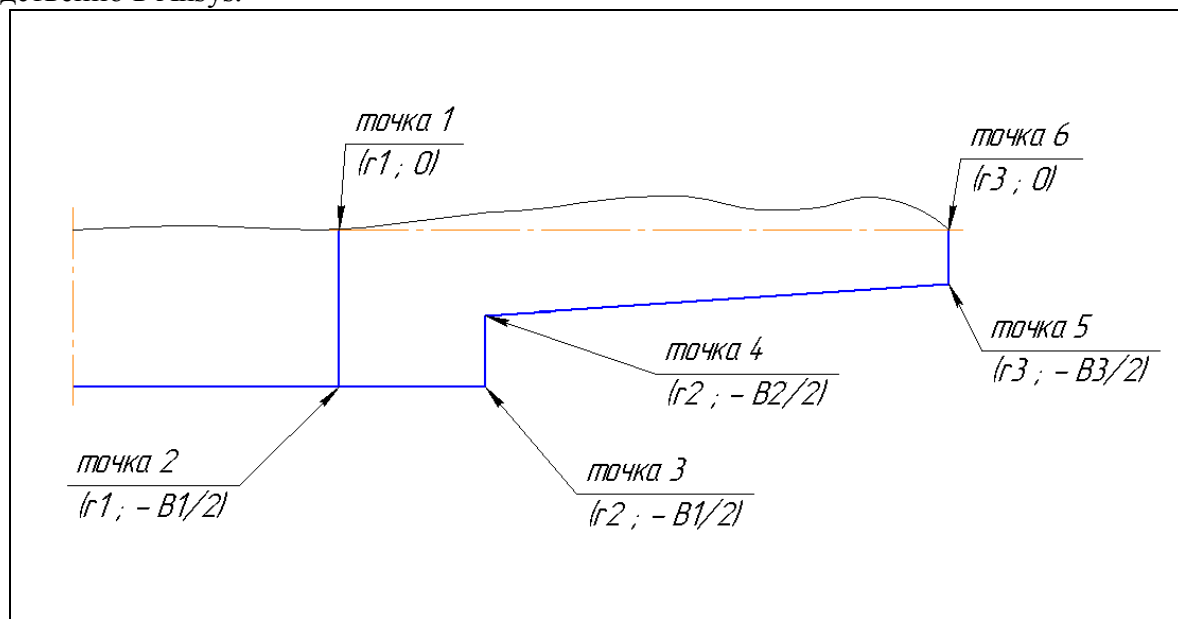


Рисунок 2 - Методика захвата координат точек

1.2 Формирование геометрической модели диска

Итак, есть координаты точек. В рабочем каталоге ANSYS создается текстовый файл, например – disk.txt. Первой строкой в нем записывается команда очистки задания ANSYS от предыдущей информации:

FINISH

/CLEAR, START ! Создание нового файла

/PREP7 ! Вход в препроцессор

Затем в файле задаются нужные величины нагрузок и геометрические параметры:

! Параметры нагрузки

! Температуры ступицы и обода

T_stup = 300

T_obod = 420

! Угловая скорость в рад./сек.

Omega_ = 2000

! Контурная нагрузка

Kontur= - 2.5e5

! Параметры построения

! Толщины

b1 = 65

b2 = 36

b3 = 22

! Радиусы

r1 = 55

r2 = 85

r3 = 180

! Скругления

r1_ = 5

r2_ = 3

r3_ = 12

! Размер КЭ

Size_=2

Чтобы убедиться в работоспособности макроса и правильности задания всех параметров файл сохраняется и запускается на исполнение командой **Utility Menu >File>Read Input from...** Затем убедимся в том, что все параметры считаны **Anslys Utility Menu >Parameters>Scalar Parameters...**

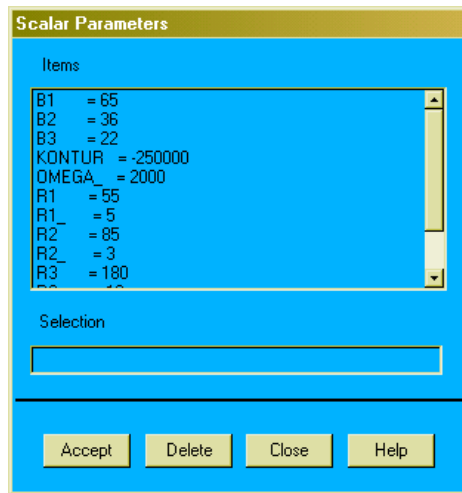


Рисунок 3 – Параметры в Ansys

При создании командного файла можно пользоваться дублированием команд в Ansys. Краткий пример - точки создаются командой **Main Menu> Preprocessor> Create> Key-points> In Active CS.**

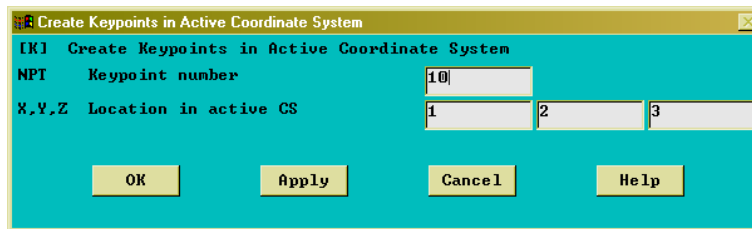


Рисунок 4 - Вид окна ввода точек

При записи в окно значений, как в рисунке выше, получается точка с номером 10 и координатами X=1; Y=2; Z=3. Смотрится последняя команда log-файла **Utility Menu > File> List> Log File.** Она имеет вид:
K,10,1,2,3,

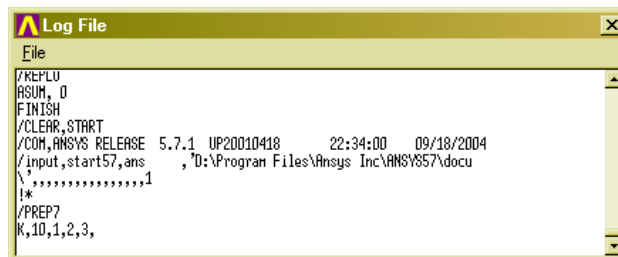


Рисунок 5 - Вид окна LOG файла

Продолжается формирование своего файла. Добавляются команды создания точек сечения. Они, соответственно, имеют вид - **К, №точки, X, Y, Z.** Таким образом, в файл дписывается:

! Создание точек
k,1,r1,0 ,0
k,2,r1,-b1/2,0
k,3,r2,-b1/2,0
k,4,r2,.....
k,5,.....
k,.....

Файл сохраняется и запускается на исполнение командой **Utility Menu> File> Read Input from**. Получатся 6 точек сечения.

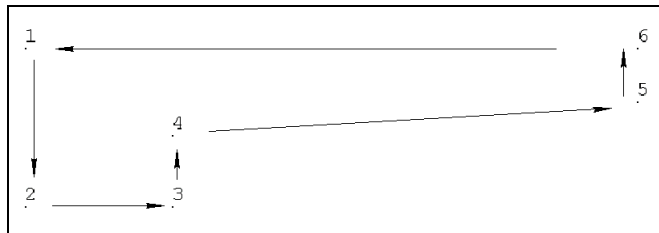


Рисунок 6 - Точки сечения

Затем точки последовательно соединяются линиями 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-1 **Main Menu> Preprocessor> Create> Lines> Straight Line**. Должно получиться как на рисунке ниже.

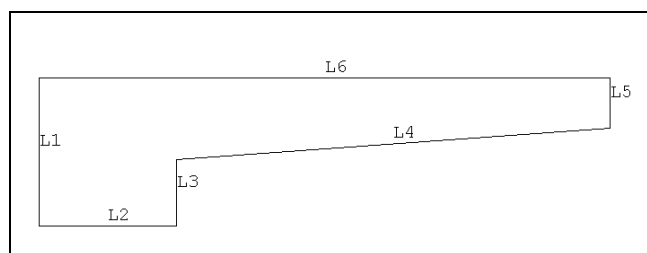


Рисунок 7 - Полученные линии

Создаются три скругления командой **Main Menu> Preprocessor> Create> Line Fillet**, выделяются две линии, нажимается **OK** и вписывается нужный радиус в окно **RAD**.

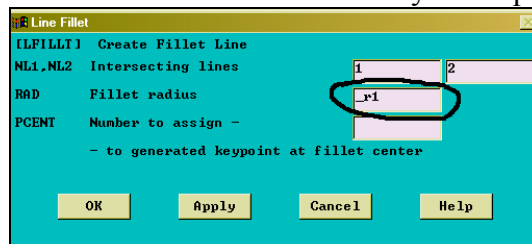


Рисунок 8 - Задание радиуса

Выполненные команды вписываются в свой командный файл из файла ***.log**. Для этого выполняется **Utility Menu> File> List> Log file**. Откроется файл сессии Ansys. Файл листается до последней строчки и из него копируются в свой файл последние выполненные команды (смотри рисунок ниже), сделанные после команд создания точек. Копирование осуществляется только через выделение нужного участка и нажатие комбинации **Ctrl+C**. Полученный результат считывается Ansys - **Utility Menu> File> Read Input from**. *! В дальнейшем, данная последовательность действий повторяется в случае успешного выполнения определенного блока построений без дополнительных указаний.*

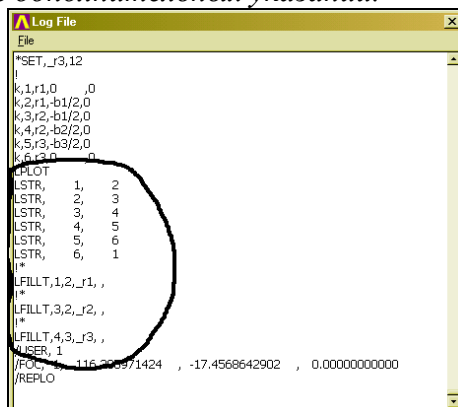


Рисунок 9 - Команды в Log файле

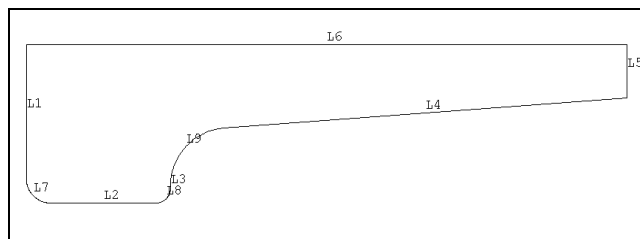


Рисунок 10 – Скругления линий

Создается область по линиям **Main Menu>Preprocessor>Create>Arbitrary>By Lines**. При этом следует обращать внимание на число выделенных линий, так как контур должен быть полностью замкнут для создания области.

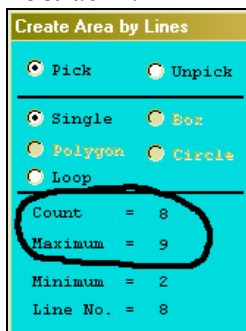


Рисунок 11 -Отображение количества выделенных линий и линий в модели

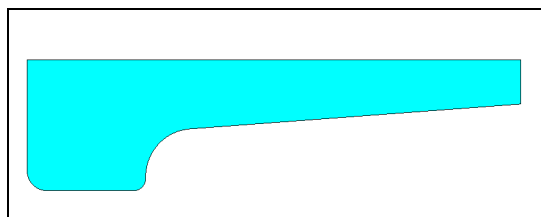


Рисунок 12 - Поверхность половины сечения диска

1.3 Формирование конечно-элементной модели

Задается тип конечного элемента - **Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add...** - выбирается Solid Plane 42. В этом же меню в **Options** элемента опция **K3** выставляется **Axisymmetric**. Производится разбиение на конечные элементы. Вызывается меню **MeshTool**.

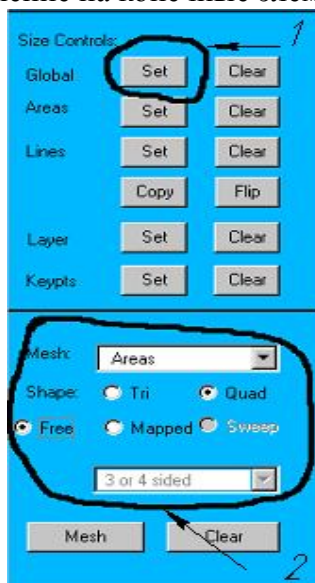


Рисунок 13 – Последовательность действий на MeshTool

В **Size Controls** задается размер конечного элемента **Size** 2 мм, выставляются опции разбиения как на рисунке выше, (разбиение поверхности свободной сеткой четырехгранных элементов) и кнопкой **Mesh** генерируется конечно-элементная модель.

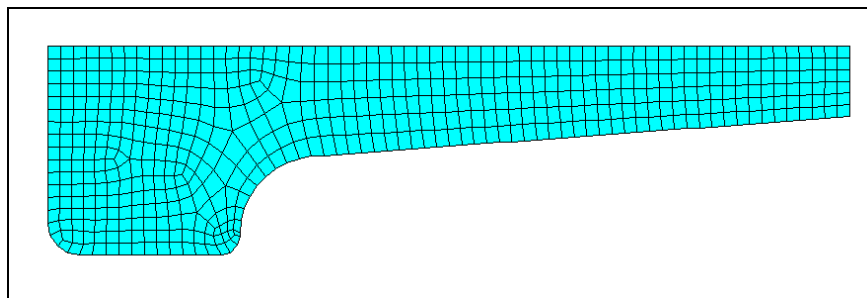


Рисунок 14 - Полученная сетка конечных элементов

Затем производится отражение полученной половины сечения диска для создания полноценной модели **Main Menu> Preprocessor> Reflect> Areas**. Отражение нужно сделать относительно плоскости XZ, копируя получившийся объект.

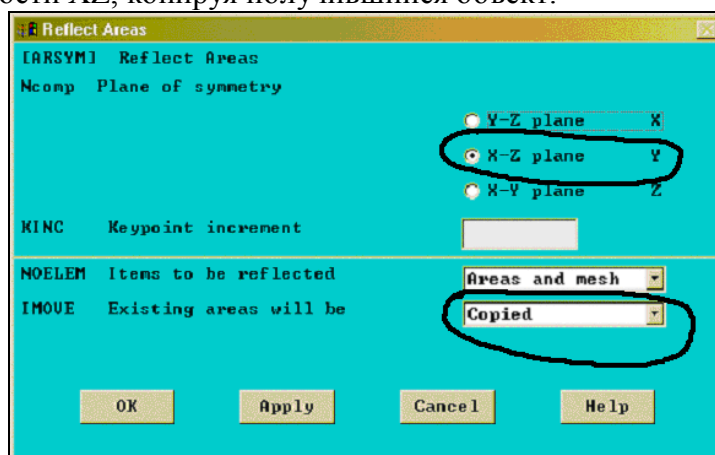


Рисунок 15 - Опции отражения

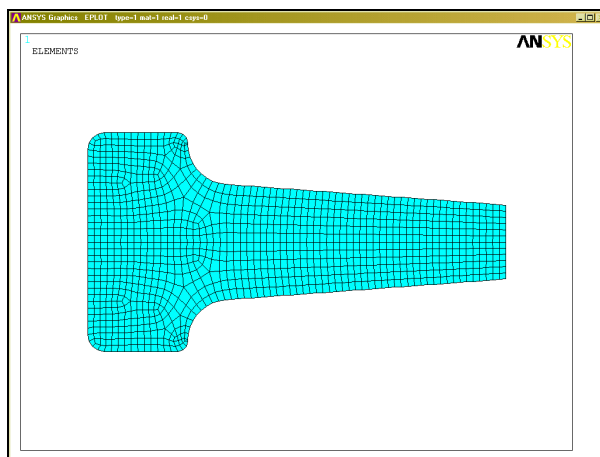


Рисунок 16 - Результат отражения

Для перевода в систему СИ модель масштабируется в 1000 раз - **Main Menu> Preprocessor> Operate> Scale> Areas**.

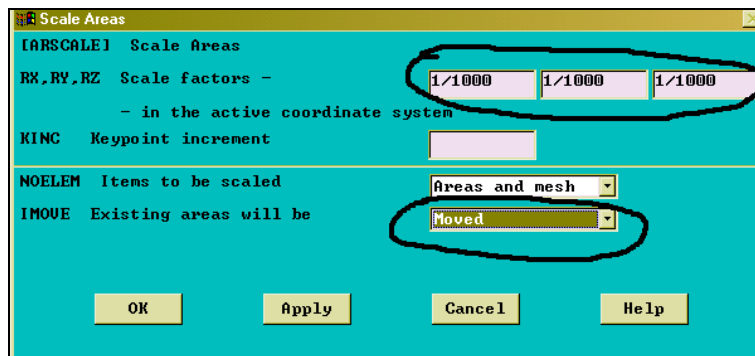


Рисунок 17 - Опции масштабирования

Затем производится слияние совпадающих элементов модели **Main Menu> Preprocessor> Numbering Ctrl> Merge Items**. Это производится из-за того, что две части модели не имеют никакой связи. Каждая из половин имеет на линии разрыва свои узлы, совпадающие с узлами другой половины. Произведенной командой два совпадающих узла сливаются в один и модель становится единой.

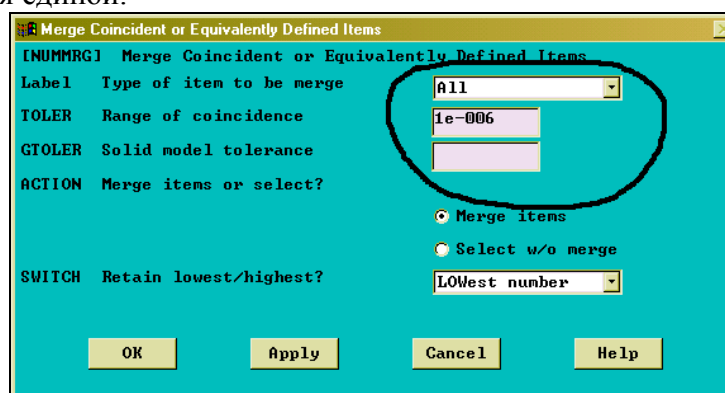


Рисунок 18 - Опции слияния

Для корректного исполнения макроса производится сжатие номеров всех элементов модели **Main Menu> Preprocessor> Numbering Ctrl> Compress Numbers**. Данная команда убирает промежутки между номерами узлов. Например - в модели было всего три узла с номерами 1, 5, 16. После выполнения **Compress Numbers** те же узлы будут с номерами 1, 2, 3.

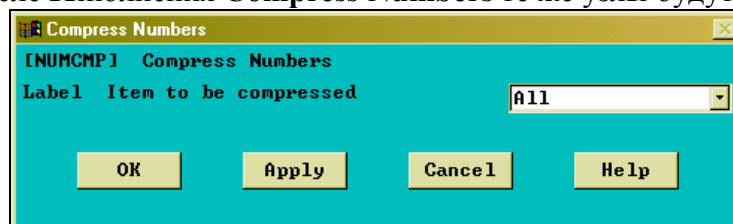


Рисунок 19 - Опции сжатия номеров

1.4 Задание материала

Расчет производится с учетом теории пластичности. Для этого необходимо задать кривую растяжения образца (зависимость напряжения - деформации) при различных температурах **Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models> Structural> Nonlinear> Multilinear Elastic**. В окне кнопка **Add Point** (смотри рисунок ниже) добавляет точку кривой, **Add Temperature** – новую кривую. В окнах **Ti** задается температура, при которой снималась кривая, в окнах **STRAIN** – деформации, а в **STRESS** – напряжения, соответствующие задаваемым деформациям.

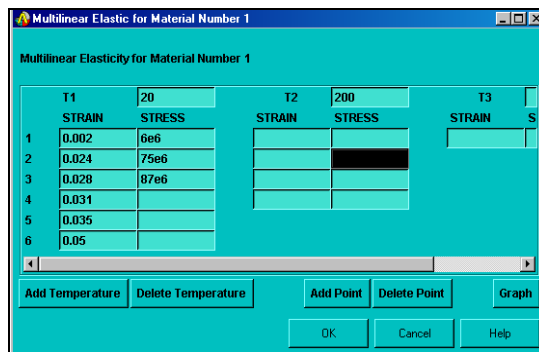


Рисунок 20 – Окно задания материала

Подробнее о способах задания материалов в ANSYS можно прочитать в ANSYS HELP раздел 8.3. Modeling Material Nonlinearities. Кривые растяжения есть в справочнике материалов ВИАМ. В окне задания материала нажатие на кнопку **Graph** приводит к отображению заданных кривых.

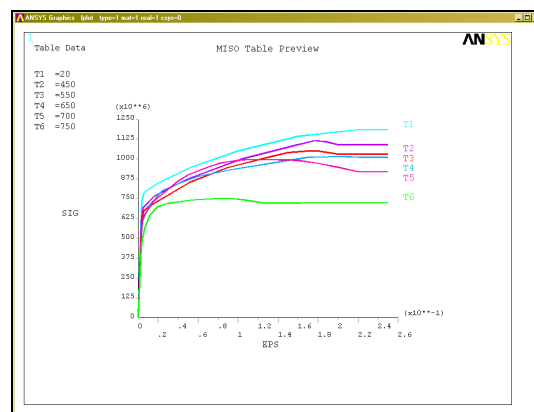


Рисунок 21 - Мультилинейные кривые

Команды Ansys из Log-файла сохраняются в своем командном файле.

1.5 Формирование нагрузок и граничных условий

Производится нагружение диска температурой в зависимости от радиуса с помощью команд APDL. В реальности распределение температур по радиусу диска имеет характер параболы. Именно такой закон необходимо задавать. Ниже, в качестве примера, производится нагружение по линейному закону.

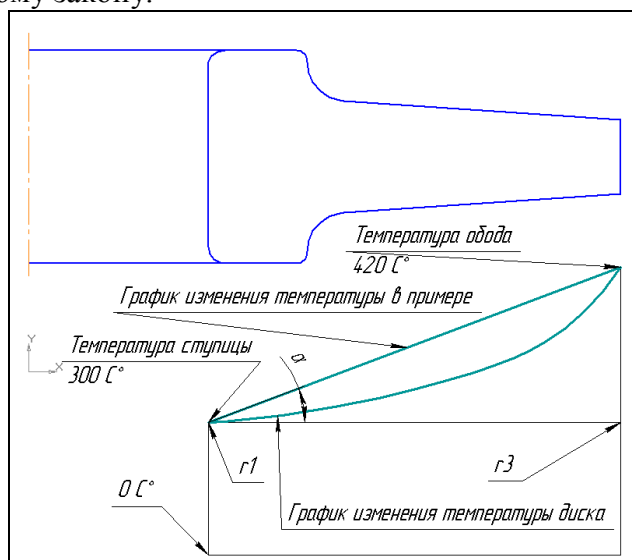


Рисунок 22 - График изменения температуры по радиусу диска

При линейном законе распределения температура в любой точке диска равна сумме постоянной составляющей (300 градусов) плюс координата по оси X, умноженная на тангенс угла альфа. Одним катетом является разница температур, а другим - разница координат. Получаем $T_i = 300 + (X_i - r1) \cdot \frac{(T_{\text{обода}} - T_{\text{ступицы}})}{(r3 - r1)}$.

$$T_i = 300 + (X_i - r1) \cdot \frac{(T_{\text{обода}} - T_{\text{ступицы}})}{(r3 - r1)}$$

Для реализации нагружения в Ansys, согласно этому уравнению, следует воспользоваться циклом DO-ENDDO.

Шаг 1 – Узнается количество узлов в модели. В командную строку вводится ***get, n_count, node, 0, count**. Этой командой создается параметр **n_count**, равный числу узлов.

Шаг 2 – Задается цикл перебора, выполняемый **n_count** раз.

! Находим тангенс угла альфа. Деления на 1000 для перехода в СИ.

_tan=(T_obod-T_stup)/(r3/1000-r1/1000)

! Цикл от 1 до n_count

***do,i,1,n_count**

! Производим нагружение I-того узла температурой

BF,i,TEMP,T_stup+(Nx(i)-r1/1000)*_tan

! Конец цикла

***enddo**

Вам по приведенному примеру необходимо задать квадратичную зависимость температуры от радиуса расположения узла конечно-элементной модели. Причем, больший градиент температуры должен быть на периферии диска.

Выполнив цикл нагружения, отображаем температуры на диске в **Utility Menu> PlotCtrls> Symbols**.

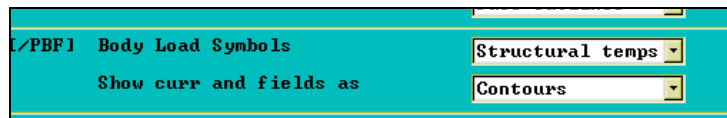


Рисунок 23 – Отображение температуры

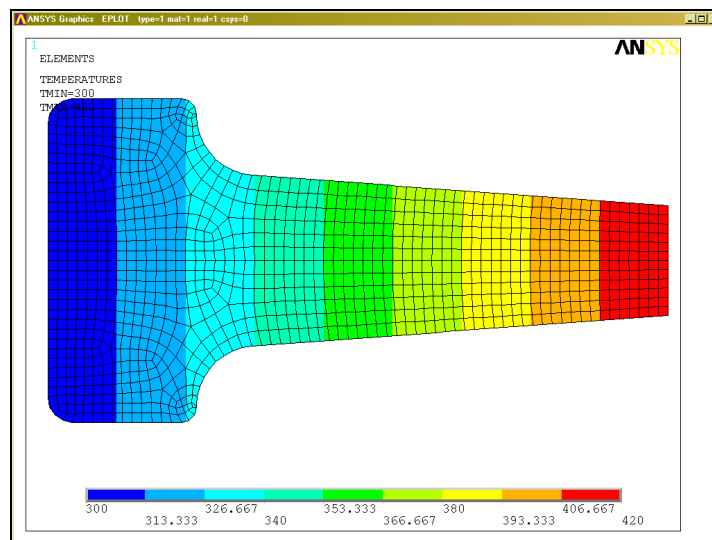


Рисунок 24 – Поля температур на диске

Модель нагружается угловой скоростью **Main Menu> Solution> Apply> Other> Angular Velocity** относительно оси диска – Y.

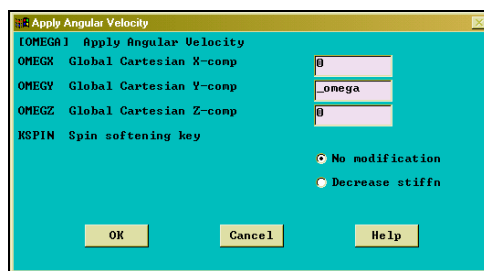


Рисунок 25 – Окно нагружения угловой скоростью

Производится закрепление диска в любой точке на ступице в осевом направлении (Y) - **Main Menu> Solution> Constraints> Apply> On Keypoints.**

На диск также действует контурная нагрузка, сила от немоделировавшихся лопаток и замковой части диска. Ее следует рассчитывать по учебнику Хронина. Рассчитанная нагрузка прикладывается в виде сил отрицательного давления на обод диска **Main Menu> Solution> Apply> Pressure> On Lines.**

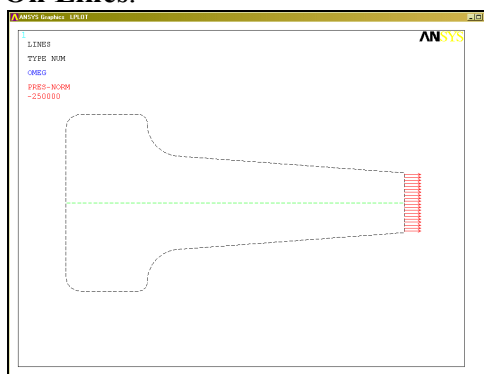


Рисунок 26 - Давление от контурной нагрузки

Давление отображается на линиях (Plot Lines) с помощью **Utility Menu> PlotCtrls> Symbols.**

1.6 Расчет напряженно-деформированного состояния

Производится решение **Main Menu>Solution>Current LS**

1.7 Визуализация результатов

В качестве критерия разрушения необходимо взять **Seqv**. На экран выводятся поля напряжений **Main Menu> General Postproc> Plot Results> Nodal Solu...**

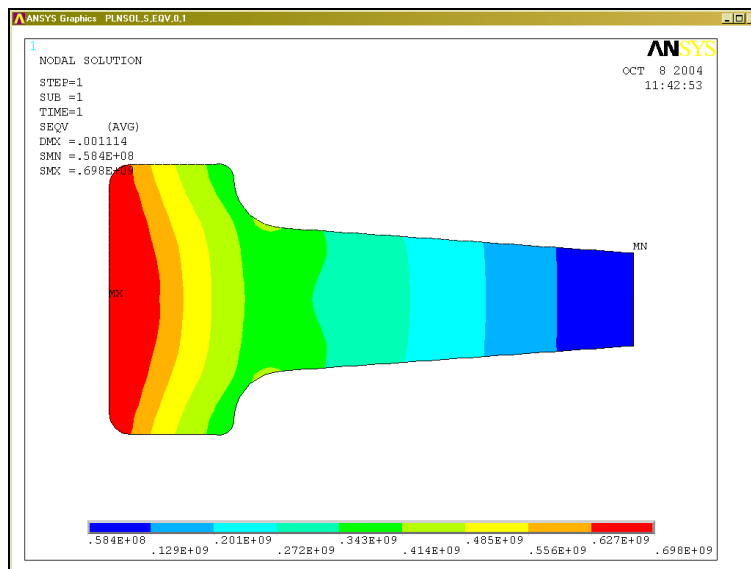


Рисунок 27 - Поля напряжений на диске

Для корректного определения коэффициента запаса диска необходимо учитывать пределы длительной прочности. Формируется макрос расчета коэффициентов запаса. Для этого задается массив типа Table, позволяющий получать значения между заданными, - **Utility Menu> Parameters> Array Parameters> Define.**

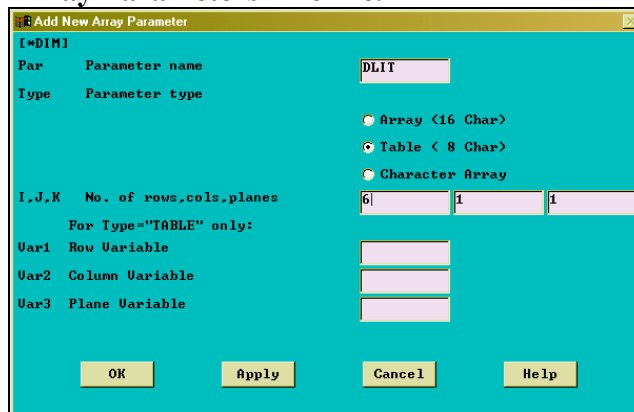


Рисунок 28 - Опции задания массива

После создания массива, нажимается кнопка **EDIT** и он заполняется - первым столбцом идут температуры, а вторым соответствующие им пределы прочности. Затем сохраняются результаты заполнения – **Apply.**

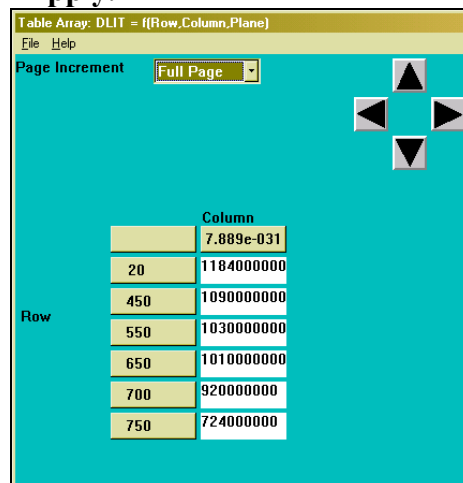


Рисунок 29 - Точки массива

Задается массив для операций макроса **Menu>Parameters>Array Parameters>Define-Edit**

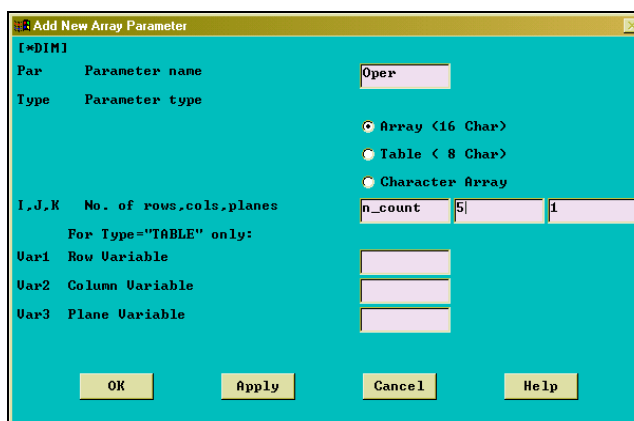


Рисунок 30 - Опции задания массива

Заполняется первый столбец температурами в узлах, причем необходимо записывать созданное ранее квадратическое уравнение.


```

*do, I, 1, n_count
_tan = (T_obod - T_stup) / (r3 / 1000 - r1 / 1000)
Oper(I, 1) = T_stup + (Nx(i) - r1 / 1000) * _tan
*enddo

```

Заполняется второй столбец пределами длительной прочности, соответствующими температурам для каждого узла.

```

*do, i, 1, n_count
Oper(i,2) = Dlit (Oper(i,1))
*enddo

```

Далее следует переход в постпроцессор и заполнение третьего столбца действующими напряжениями.

```

FINISH
/POST1 ! Переход в постпроцессор

```

```

*do, i, 1, n_count
*get, res_, node, i, s, eqv !Задание параметру res_ значения в I узле
Oper(i,3) = res_ ! Заполнение ячейки I 3 го столбца результатом
res_ = !Обнуление параметра
*enddo

```

Производится расчет коэффициентов запаса, равных отношению предела длительной прочности и действующего напряжения в узле.

```

*do, i, 1, n_count
Oper(i,4) = oper(i,2) / oper(i,3) ! Расчет коэффициента запаса
*enddo

```

Для визуализации полей коэффициентов запаса необходимо перейти в препроцессор и “нагрузить” модель температурой, в качестве значений взяв рассчитанные коэффициенты запаса.

```

/prep7
*do,i,1,n_count
BF,i,TEMP,Oper(i,4)
*enddo

```

После выполнения макроса отображаем результаты расчета.

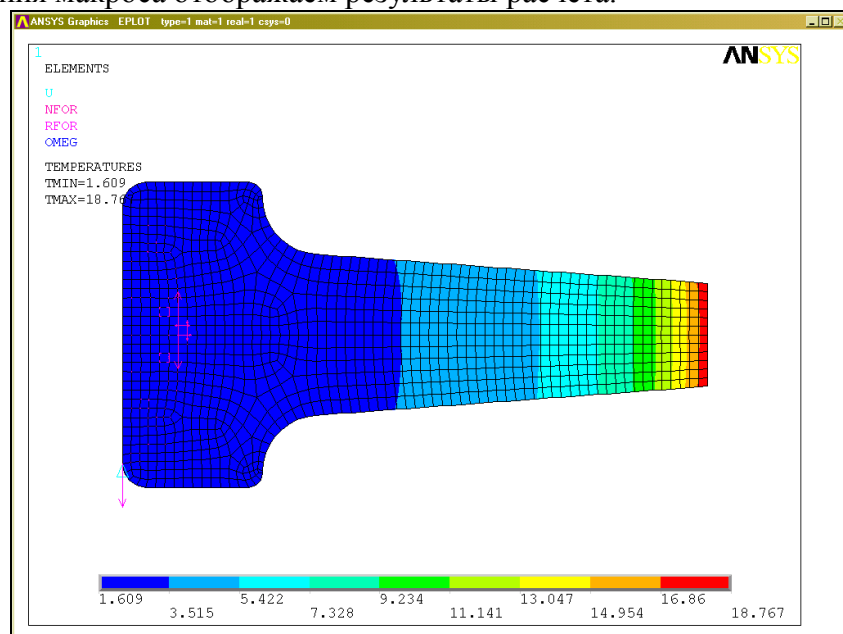


Рисунок 31 - Поля коэффициентов запаса

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛОПАТКИ

После курсового проектирования на кафедре “Теория двигателей”, Вы получаете газодинамические профили лопатки, которые и будут использованы для прочностного проектирования. Перо лопатки должно иметь оптимальную массу и удовлетворять требованиям Норм Прочности. Для этого требуется проведение многократных последовательных расчетов, которые возможно оптимизировать с помощью макроса.

2.1 Подготовка исходных данных для геометрической модели

Лопатка при моделировании твердого тела будем строится по трем сечениям – втулке, среднему сечению и периферии. Для этого необходимо задать в ANSYS геометрические параметры профилей. Предложенная ниже методика построения необходима для того, чтобы при изменении относительной толщины профиля он не искажался и газодинамически максимально соответствовал исходному профилю.

Между корытцем и спинкой строятся касательно к сплайнам окружности таким образом, чтобы профиль описывался максимально точно. Для этого обычно достаточно 9-12 окружностей.

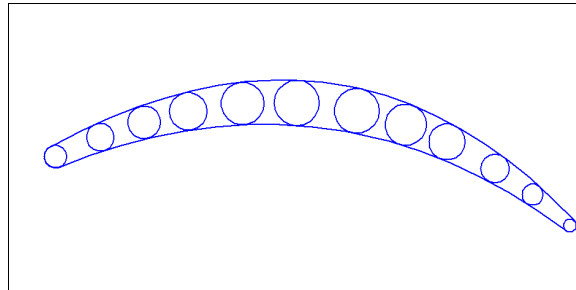


Рисунок 32 - Профиль с вписанными окружностями

Кромки лопатки моделируются упрощенно, заменяется радиусный переход на прямые согласно рисунку, показанному ниже.

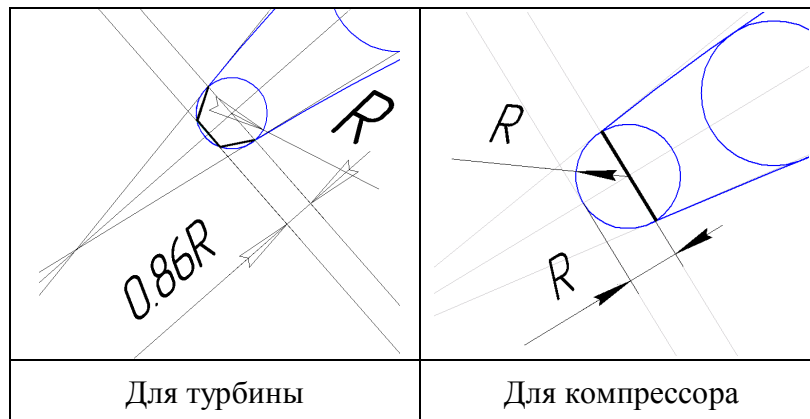


Рисунок 33 - Методика представления кромок для формирования модели

Затем снимаются координаты точек трапеции и пересечения сплайновых линий с окружностями и заносятся в таблицу координат. Координату Z для крайних сечений выбираем как на рисунке ниже. При этом вычисляем и углы раскрытия тракта GP и GW.

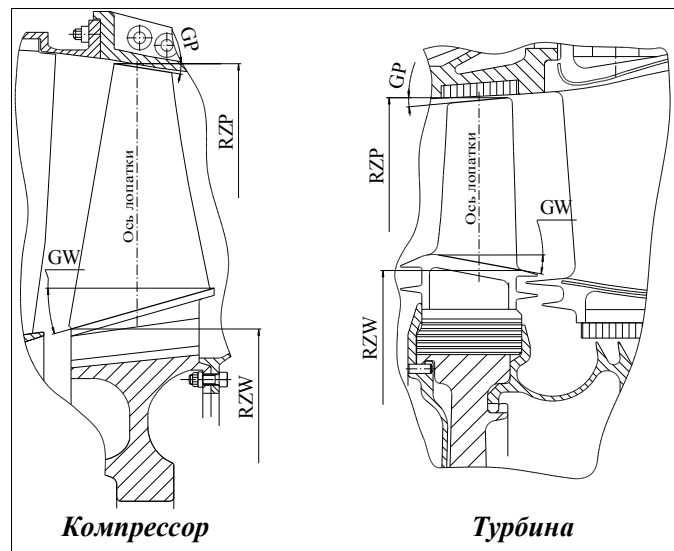


Рисунок 34 - Необходимые данные о радиальном расположении профилей лопатки и углах раскрытия тракта

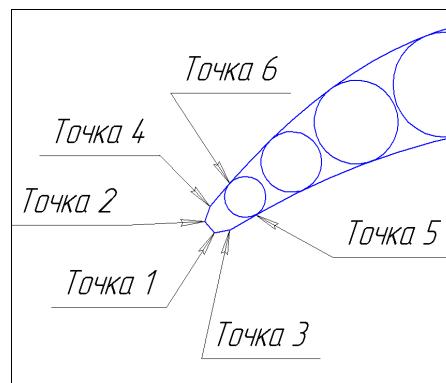


Рисунок 35 - Порядок записи точек в таблицу данных

Итак, есть таблица координат точек. Начинается работа по моделированию в ANSYS.

2.2 Формирование геометрической модели лопатки

В рабочем каталоге ANSYS создается текстовый файл, например – lopatka.txt. Первой строкой в нем записывается команда очистки задания ANSYS от предыдущей информации:

FINISH

/CLEAR, START ! Создание нового файла

/PREP7 ! Вход в препроцессор

Затем начинается ввод точек командой **Main Menu>Preprocessor>Create>Keypoints>In Active CS**

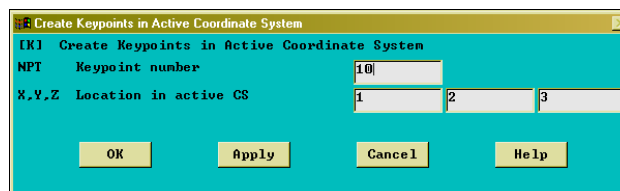


Рисунок 36 - Вид окна ввода точек

При записи параметров, как на рисунке выше, получается точка с номером 10 и координатами X=1; Y=2; Z=3.

В **Utiliti Menu>File>List>Log File** смотрится последняя команда. Она имеет вид: **K,10,1,2,3,**

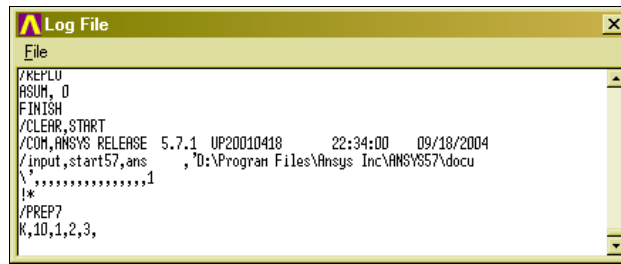


Рисунок 37 - Вид окна LOG файла

По данному примеру продолжается формирование файла с точками одного из сечений. Строка задания точки имеет вид:

K, № точки, X, Y, Z,

!Из окна LOG возможно скопировать что-либо, только выделив нужный участок файла и нажав CTRL+C

Записав последовательно команды создания всех точек в файле и сохранив его, считываем файл командой **UM>Read Input from**

Получаем точки, соответствующие профилю, как на рисунке ниже.

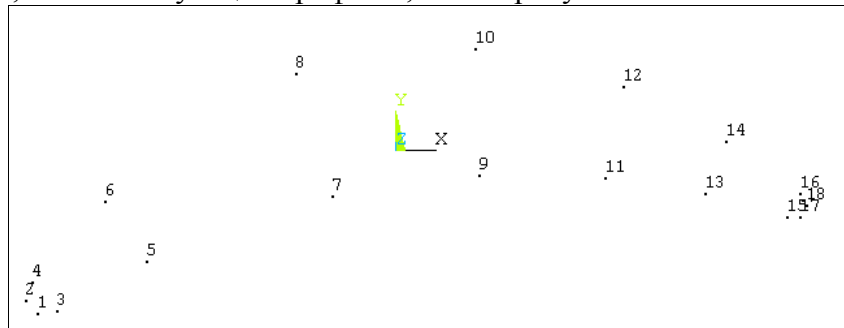


Рисунок 38 - Точки профиля

Затем проводятся некоторые построения для обеспечения утолщения профиля. Между соответствующими друг другу парными точками создается точка начала координат, используя команду **Main Menu> Preprocessor> Create> Keypoints> KP between KPs**. Получим точки, как на рисунке ниже.

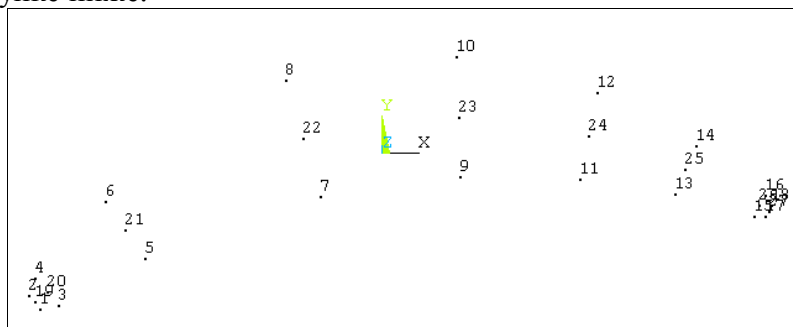


Рисунок 39 - Точки построения профиля и построенные средние точки

Для каждой пары точек создается своя локальная система координат (далее ЛСК) командой - **Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>By 3 Keypoints**. Выделяется сначала средняя точка, затем любая из крайних и любая точка в стороне, например, как на рисунке ниже – точки 22-8-6 для создания ЛСК паре точек 7-8.

! Необходимо каждый раз менять номер ЛСК при ее создании.

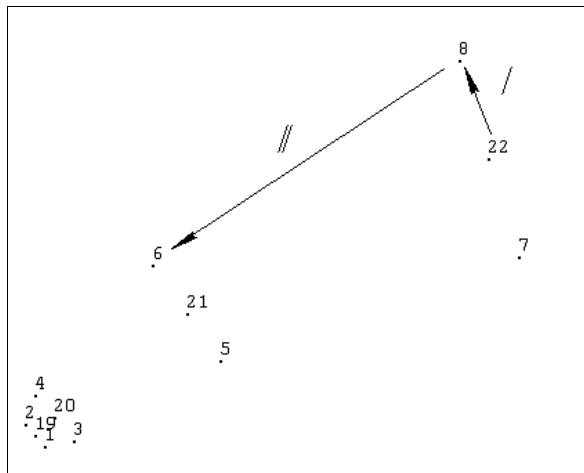


Рисунок 40 - Порядок выбора точек при построении ЛСК

После построения должно получиться как на рисунке ниже – каждой паре точек соответствует своя локальная система координат.

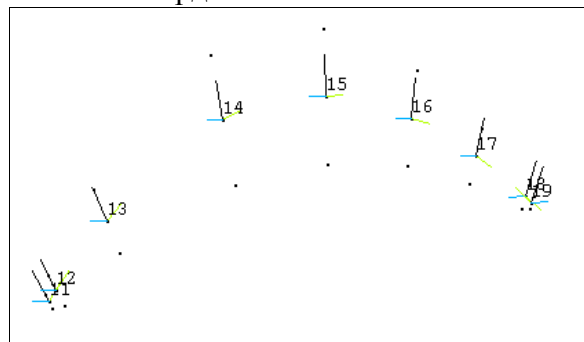


Рисунок 41 - Полученные ЛСК

Задается параметр толщины для всего профиля. В командную строку вводим $\text{delta1}=1.2$. Затем масштабируются последовательно все точки профиля относительно созданных ЛСК. Сначала нужно перейти в систему координат, соответствующую двум раздвигаемым точкам. В командную строку вводим $\text{CSYS}, \text{№ЛСК}$. Например, для точек на левой стороне рисунка - $\text{csys}, 11$.

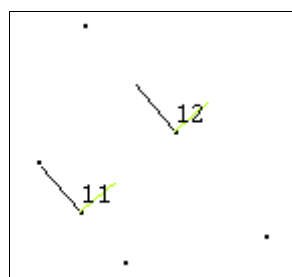


Рисунок 42 - ЛСК между точками

Далее выполняется команда **Main Menu>Preprocessor>Operate>Scale>Keypoints**.

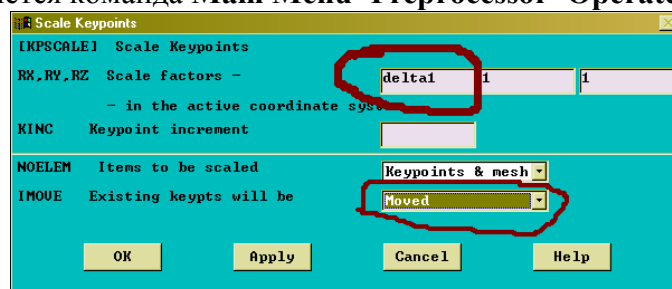


Рисунок 43 - Окно команды масштабирования точек

В качестве параметра масштабирования вводится ранее заданный параметр delta1 и в нижнем окне выбирается moved, для смещения существующих точек, а не создания новых.

По завершению масштабирования переходим в глобальную систему координат командой CSYS,0.

После проделанной работы все команды копируются из LOG файла в свой, файл сохраняется. Из LOG файла можно вычистить “мусор” в виде команд визуализации - /FOS, /REPLO, /VIEW, /ANG. Необходимо убедиться в его работоспособности, запустив файл на исполнение. Продолжаем создание модели. Точки кромок соединяются линиями **Main Menu>Preprocessor>Create>Lines>Straight Line**, а корытца и спинки сплайнами **Main Menu> Preprocessor> Create> Splines>Spline thru KPs**. Получатся линии, как на рисунке ниже.

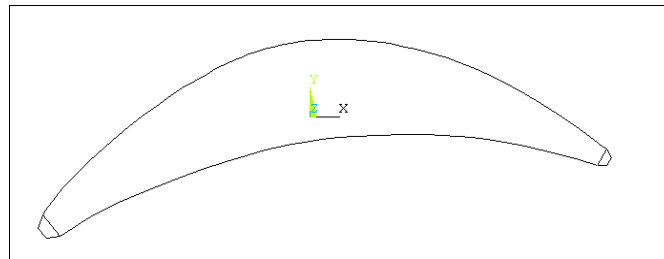


Рисунок 44 - Линии профиля

Далее по созданным линиям создаются три поверхности командой **Main Menu>Preprocessor> Create>Arbitrary>By Lines**.



Рисунок 45 - Полученные поверхности

Для построения лопатки необходимо совместить центры тяжести сечений на одной оси. Совмещать удобнее на оси координат Z. Текущие координаты центра тяжести определяются командой **Main Menu> Preprocessor> Operate>Calc Geom Items>Of Areas**.

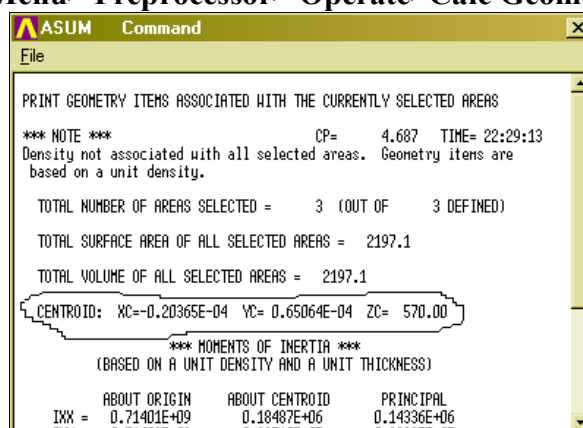


Рисунок 46 - Центро-массовые характеристики профиля (обведены координаты центра тяжести)

На данном этапе все сделанное ранее в своем файле сохраняется. Очевидно, что для смещения профиля и совмещения его центра тяжести с осью нужно сместить каждую точку построения на DX и DY. Кроме того, сместить профиль необходимо для выносов центров тяжести. Все это сделаем с помощью параметров. В начало своего файла заносим строчку значений параметров коррекции и затем прибавляем их к значениям координат точек X и Y, как в примере ниже. Исполняемый файл принимает вид:

```

FINISH
/CLEAR,START
/prepare7
!Параметры коррекции втулочного профиля
dkx=0,20365E-4
dky=-0.65064E-4
!Параметры выносов центра тяжести
dwy=0
dwx=0
!Утолщение втулочного профиля
delta1=1

! Построение точек
k, 1, -59.3391995688+dkx+dwx,55.2650420230+dky+dwy,570
k, 2, -61.3269654697+dkx+dwx,57.5324650249+dky+dwy,570
k, 3, -56.2027300787+dkx+dwx,55.8437794015+dky+dwy,570
k, 4, -60.2738344955+dkx+dwx .....
.....
! Создание промежуточных точек
KBETW,1,2,0,RAT1,0.5,
KBETW,3,4,0,RAT1,0.5,
KBETW,5,.....
.....
!Задание локальных систем координат
CSKP,11,0,19,2,4,1,1,
CSKP,12,0,20,4,6,1,1,
CSKP,13,.....
.....
!Раздвижка профиля
!1 строчка - переход в нужную систему координат
!2 строчка - масштабирование
csys,11
kpscale,1,2,,delta1,1,1, ,0,1
csys,12
kpscale,3,4,,delta1,1,1, ,0,1
csys,13
kpscale,5,6,,delta1,1,1, ,0,1
csys,.....
.....
! Переход в глобальную систему координат
CSYS,0
!Построение линий
LSTR, 4, 2
LSTR, 2, 1
LSTR.....
.....
! Построение сплайнов
FLST,3,7,3
FITEM,3,4
FITEM,3,6
FITEM,3,8
FITEM,3,10
FITEM,3,12
FITEM,3,14
FITEM,3,16
BSPLIN, ,P51X

```

```

FLST,3,.....
.....
! Построение поверхностей
FLST,2,4,4
FITEM,2,4
FITEM,2,3
FITEM,2,2
FITEM,2,1
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,.....
.....
    
```

Таким же образом, по отдельности создаются два других сечения в отдельных файлах. Но нужно обратить внимание на то, что номера точек и линий не должны пересекаться. Для этого нумерацию точек второго сечения нужно начинать со ста, а третьего - с двухсот. Кроме того, необходимо выполнить команду **Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrl>Set Start Number**. При этом, номера созданных линий будут начинаться с введенных значений (требуется выполнять предыдущее условие для точек и для линий и областей) и при запуске последовательно трех файлов с профилями не будет никаких проблем с нумерацией.

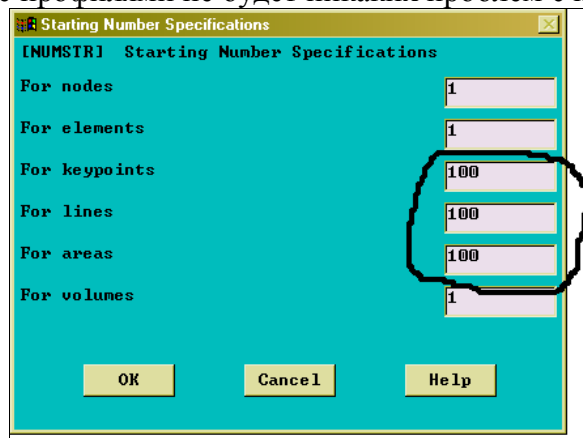


Рисунок - 47 Окно сдвига стартовых номеров при создании точек, линий, поверхностей

По методике, приведенной выше, должны быть созданы три файла с сечениями и они должны без проблем запускаться последовательно.

! Надо убрать /CLEAR, START из второго и третьего по порядку запуска на исполнение файла.

Создается файл Design.txt для остальных построений. В него записываются команды считывания файлов с сечениями. Файл сохраняется и после его выполнения должно получиться то же, что на рисунке ниже.

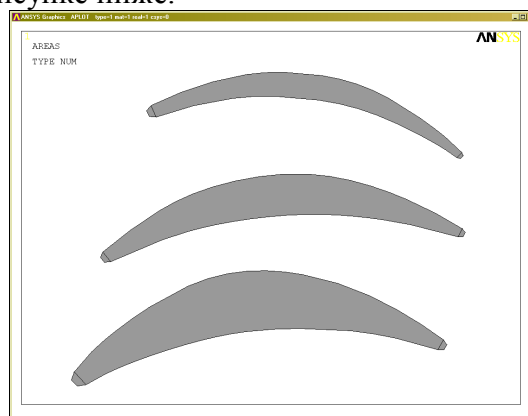


Рисунок 48 – Профили лопатки

Удаляем ненужные поверхности на среднем профиле - **Main Menu> Preprocessor> Delete> Areas Only**.

Создаются поверхности, моделирующие кромки лопаток, командой **Main Menu> Preprocessor> Create> Arbitrary> By Skinning**, выделяя соответствующие скелетные линии последовательно снизу вверх или наоборот.

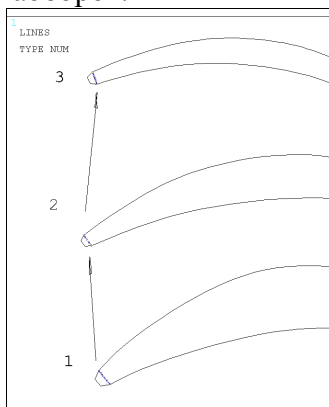


Рисунок 49 - Порядок выделения скелетных линий

Создано восемь поверхностей, ограничивающих объемы кромок лопатки.

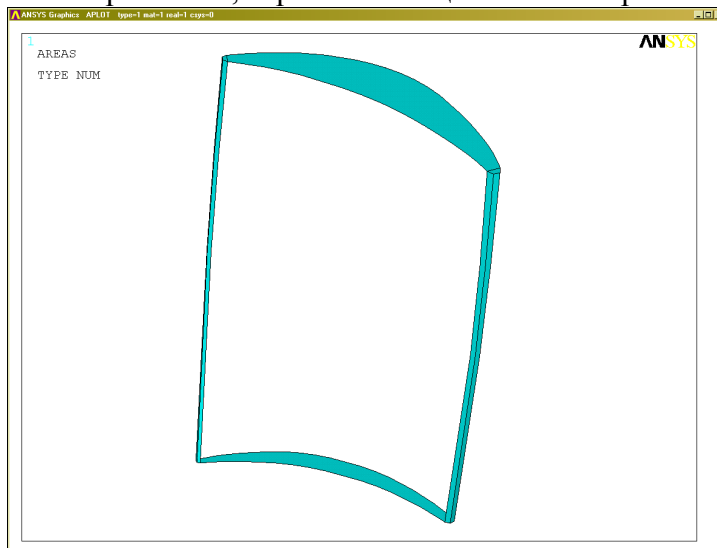


Рисунок 50 – Поверхности ограничивающие кромки

По поверхностям, выделяя соответствующие области, создаются объемы **Main Menu> Preprocessor> Create> Arbitrary> By Areas**. Затем задаются поверхности корытца и спинки, и затем центральный объем по методике, приведенной выше.

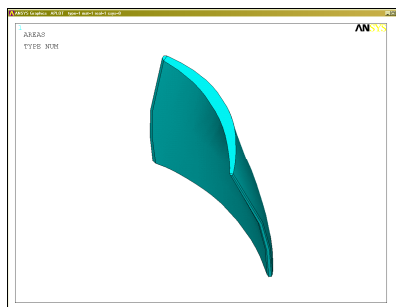


Рисунок 51 - Полученные объемы модели

Произведем создание раскрытия тракта путем “срезания” части объемов под нужным углом. Через панель Pan-Zoom-Rotate модель устанавливается в положение Bot. На перифе-

рийном профиле модели ищется точка модели, наиболее удаленная от центральной оси Z, и на нее помещается центр рабочей системы координат **Utility Menu> WorkPlane> Offset WP to> Keypoints_!** Рабочей плоскостью в рабочей системе координат является плоскость XY. Повернуть рабочую плоскость возможно через меню **Offset WP (Utility Menu>WorkPlane> Offset WP by Increments)** либо командой **WPROTA, THXY, THYZ, THZX**. Поворачивать необходимо на вычисленные углы GP и GW. Вернуть рабочую плоскость в исходное положение возможно с помощью команды **Utility Menu>WorkPlane>Align WP with>Global Cartesian**.

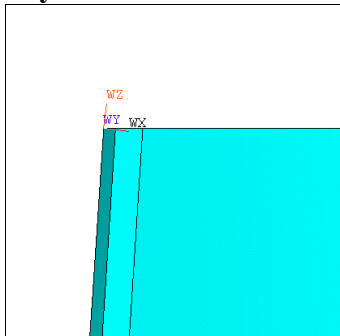


Рисунок 52 - Правильная установка рабочей плоскости

После установки рабочей плоскости и поворота на необходимый угол, выполняется команда деления на части объема **Main Menu> Preprocessor> Operate> Divide> Volu by WrkPlane**. Затем, в случае необходимости, производятся данные действия и для другой части лопатки. Получаем девять разных объемов.

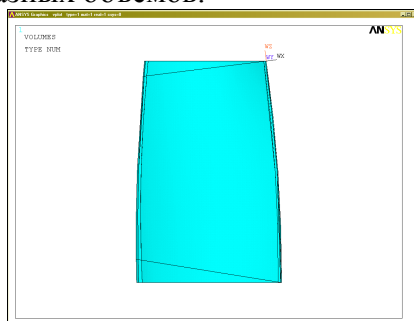


Рисунок 53 – Модель пера лопатки после деления на части

*! При выполнении операции деления возможны некоторые сложности, так как булевы операции с проблемами выполняются на сплайновых поверхностях. Один из выходов – понизить точность выполнения данных операций **Main Menu> Preprocessor> Operate> Settings> Ptol**, другой – удалить проблемные объемы, не удаляя поверхности **Main Menu> Preprocessor> Delete> Volumes Only** и затем разделить уже поверхности, которые можно собрать в объем. Ненужные объемы удаляются полностью **Main Menu> Preprocessor> Delete> Volume and Below**.*

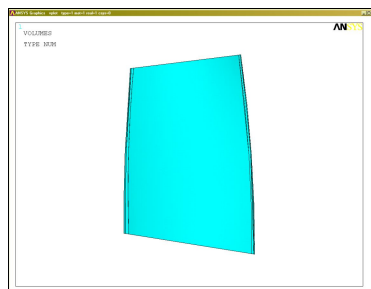


Рисунок 54 - 3D модель пера лопатки

Полученная 3D модель будет служить геометрической основой построения конечно-элементной модели. Все произведенные построения копируются в свой файл и сохраняются.

2.3 Формирование конечно-элементной модели

Задается тип конечных элементов для формирования модели – твердотельный Solid 45 **Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete**. Производится разметка линий периферийной поверхности для задания количества конечных элементов **Main Menu>Preprocessor>Size Cntrls>Picked Lines>NDIV**. На параллельных линиях для упорядоченного разбиения необходимо иметь одинаковое количество элементов. ! По толщине лопатки необходимо задать не менее трех элементов из-за особенности математической модели Solid 45.

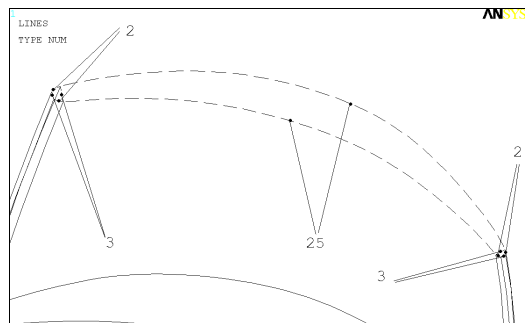


Рисунок 55 - Пример разметки линий профиля

На вертикальной линии выбирается такое количество элементов, чтобы форма отдельного элемента как можно ближе приближалась бы к форме куба. Затем выбираются атрибуты создаваемой конечно-элементной сетки **Main Menu> Preprocessor> Define> All Volumes**. В появившемся подменю выбираем тип элемента Solid 45. Остальные параметры нет необходимости изменять. Все объемы разбиваются командой **Main Menu> Preprocessor> Mesh> Mapped> 4 to 6 sided**. Должна получиться конечно-элементная модель, как на рисунке ниже.

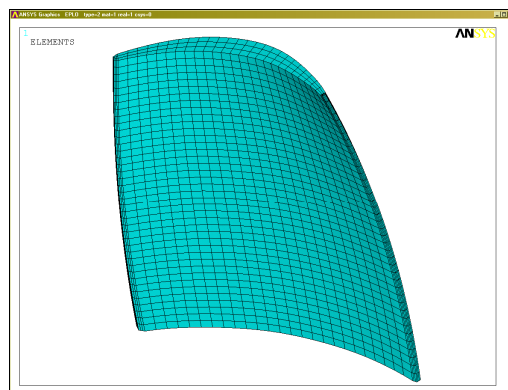


Рисунок 56 – Конечно-элементная модель пера

Элементы имеют ограничения применимости по геометрии по соотношениям линейных и угловых размеров. После получения сетки выполняется команда **Main Menu> Preprocessor> Check Mesh> Plot Bad Elms**. В случае наличия плохих элементов нужно добиться их отсутствия изменением соотношения количества элементов на линиях. После получения приемлемой конечно-элементной модели она масштабируется для перевода в систему СИ.

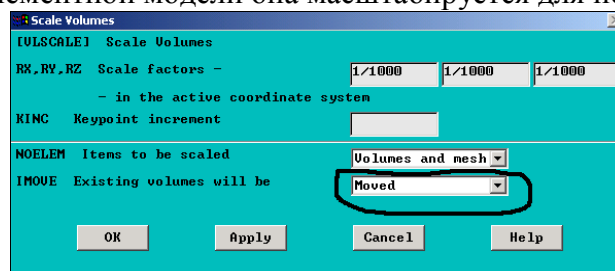


Рисунок 57 – Опции масштабирования лопатки

2.4 Формирование нагрузок и граничных условий

Производится расчет газовой нагрузки.

Погонная окружная нагрузка равна:

$$P_{G.U.i} = \frac{-2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot c_{1ai} \cdot \rho_{1i} \cdot (c_{2ui} - c_{1ui})}{Z_L}$$

Погонная осевая нагрузка равна:

$$P_{G.a.i} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot [(P_{1i} - P_{2i}) + \rho_{1i} \cdot c_{1ai}^2 - \rho_{2i} \cdot c_{2ai}^2]}{Z_L};$$

Z_L - число лопаток.

Суммарная погонная нагрузка равна:

$$P_{G.P.i} = \sqrt{P_{G.a.i}^2 + P_{G.U.i}^2}$$

Определяются направляющие косинусы для приложения нагрузки:

$$\cos(\alpha) = P_{G.a.i} / P_{G.P.i}$$

$$\cos(\beta) = P_{G.U.i} / P_{G.P.i}$$

Определяются значения давлений, действующих на каждый участок лопатки. Для этого необходимо знать длину сплайна, моделирующего корытце на нужном участке **Utiliti Menu > List > Picked Entities > Attributes Lines**. Затем вычисляется давление на поверхность:

$$P_i = P_{G.P.i} / b_i$$

Давления вычисляются для четырех участков, так как в курсовой работе по ТРЛМ рассчитываются пять сечений. После расчета получаем значения давлений на четырех участках лопатки и направляющие косинусы. Они задаются в виде параметров в начале командного файла.

Приложение газовой нагрузки осуществляется через элементы поверхностного эффекта Surf 154 **Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Add > Surface Effect > 3D 4-9node structurl 154 > OK** Выбор опций элемента SURF154. В окне "Element Types" выделяется элемент **SURF154 > Options** и в открывшемся окне устанавливаются следующие опции:

Midsized node **K4** - **Exclude**
Use of normal -Z press load **K6** - **Pos and neg pres**
Pres. Vector orientation on **K11** - **Full Area w/ Tan**
If vector oriented pressure ... **k12** - **Press. Applied > OK**

Задаются реальные постоянные для элементов поверхностного эффекта **Main Menu > Preprocessor > Real Const > SURF154 > OK**. В окне **TKI** вводится величина 0.000005.

Затем выделяются узлы, которые находятся на поверхности корытца. Для этого первоначально выполняется **Utility Menu > Select > Entities > Areas - By Num/Pick > Apply > поверхность > OK**

Затем по выделенной поверхности выделяются узлы, используя то же меню **> Nodes - Attached to > Areas, all > OK**

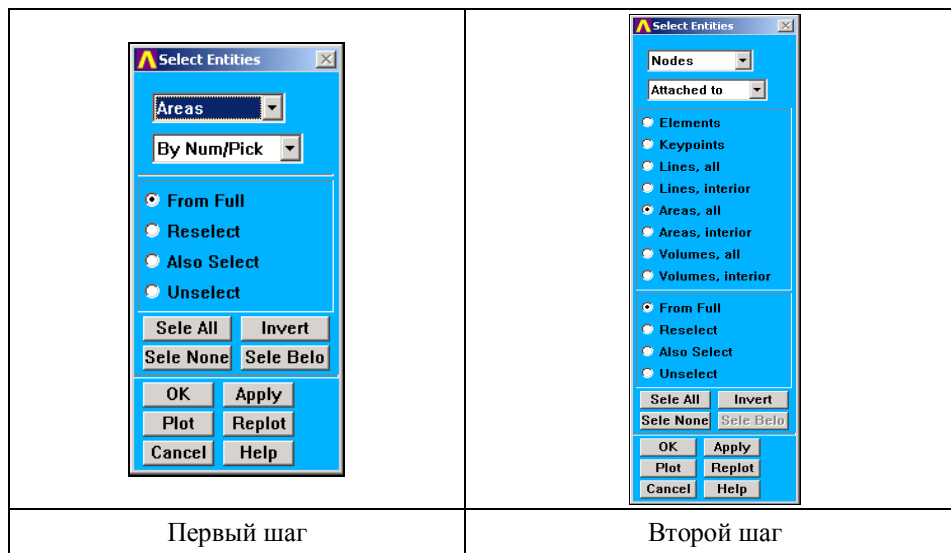


Рисунок 58 – Вид панели выбора

Правильность выделения узлов этой поверхности контролируется визуально, отображая на графическом экране узлы **Utility Menu>Plot>Nodes**.

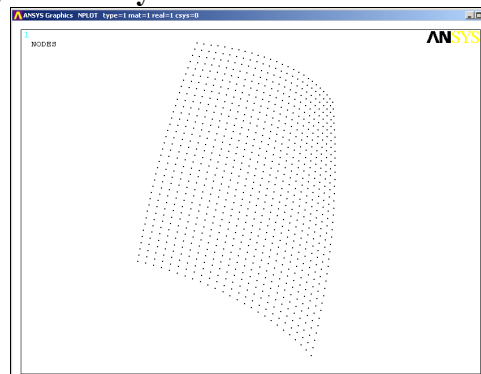


Рисунок 59 – Узлы корытца лопатки

Задаются опции генерации элементов **Main Menu>Preprocessor>Create>Elements>elem attributes**, как на рисунке ниже.

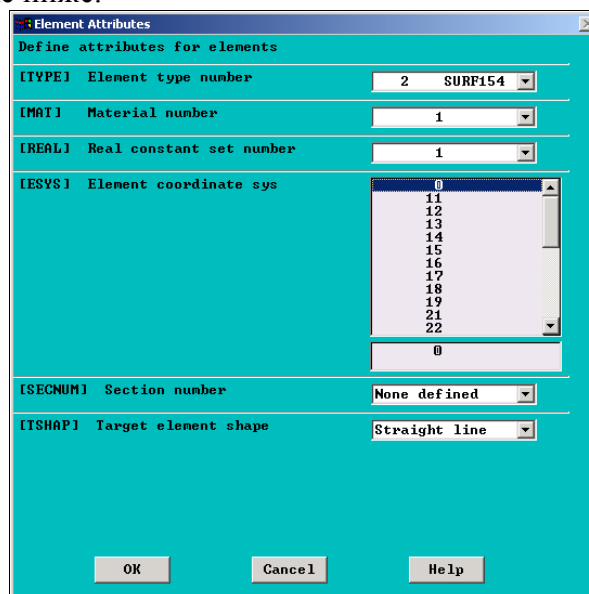


Рисунок 60 – Панель опций генерации элементов поверхностного эффекта

Создаются элементы поверхностных эффектов **Main Menu>Preprocessor>- Modeling->Create>Elements>Surf Effect>-Generl Surface- No extra Node>Pick all**.

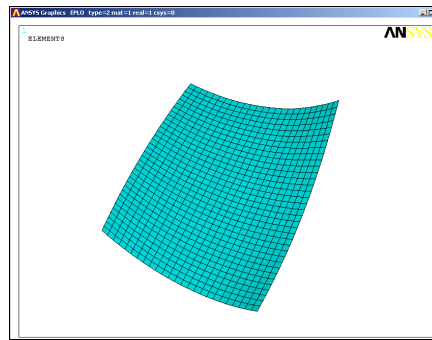


Рисунок 61 – Сгенерированные элементы

Восстанавливается действие всех объектов **Utility Menu>Select Everything**.
 Выделяются только поверхностные элементы **Utility Menu>Select>Entities> Elements - By Elem Name> 154, ANSYS Utility Menu>Plot>Replot**
 Приложение нагрузки следует осуществлять по четырем участкам, согласно рассчитанным величинам нагрузки **Main Menu>Solution> Loads>Apply>Pressure>On Elements>**

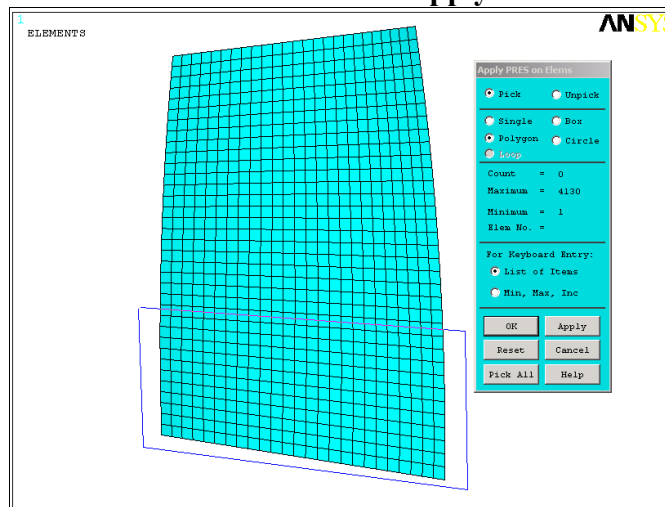


Рисунок 62 – Выделение прикорневого участка

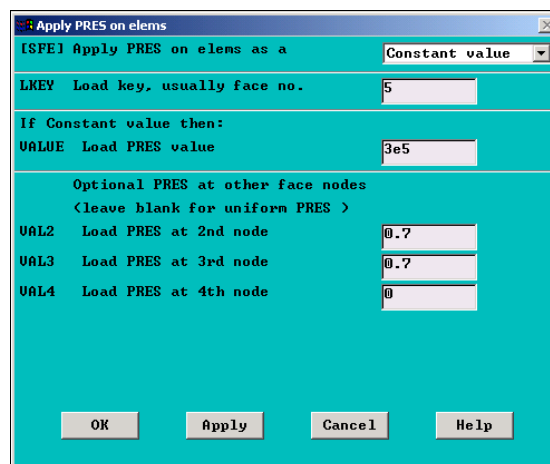


Рисунок 63 – Окно задания нагрузок

В появившемся окне устанавливаем следующие значения:
LKEY – 5;
Value - - значение давления суммарной газовой нагрузки;
VAL2 - компонента суммарной газовой нагрузки по оси X в глобальной системе координат;
VAL3 - компонента суммарной газовой нагрузки по оси Y в глобальной системе координат;
 - задаются направляющие косинусы для осевой и окружной нагрузки,

VAL4 - компонента по оси **Z** в глобальной системе координат - обязательно задается нулевое значение.

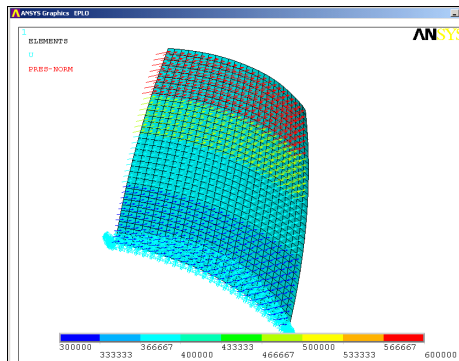


Рисунок 64 – Приложенная газодинамическая нагрузка

Для визуализации давления в виде стрелок выполняется **Utility Menu>PlotCtrls>Symbols: Surf Load Symbols - Pressures Show pres and convect as - Arrows >OK**
Восстанавливается действие всех объектов **Utility Menu> Select Everything**.

Нагрузка от окружной скорости прикладывается через **Main Menu> Solution> Apply>Other> Angular Velocity** в радианах в секунду.

Материал лопатки задается в **Main Menu>Preprocessor>Material Props>...**

2.5 Расчет напряженно-деформированного состояния

Расчет напряженно-деформированного состояния производится через команду **Main Menu> Solution> Solve**.

2.6 Визуализация результатов

Вывод полей перемещений и напряжений в лопатке производится в постпроцессоре. Поля рассчитанных значений выводятся через **Utility Menu>Plot>Results>Contour Plot>Nodal Solution**.

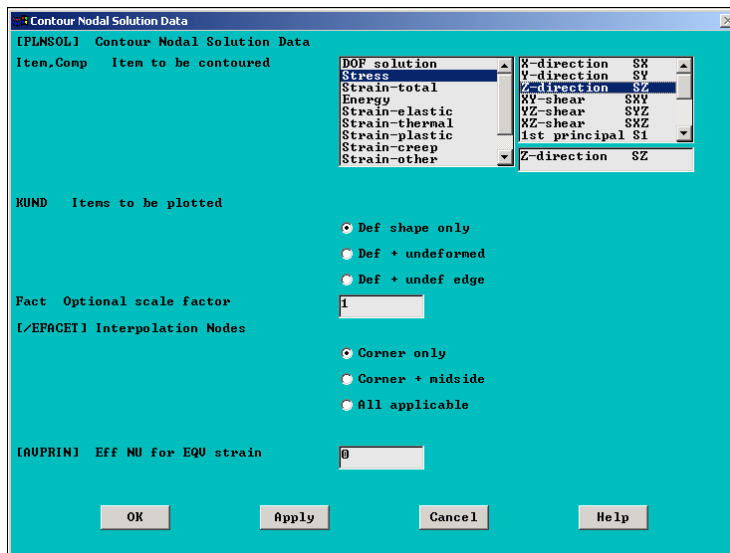


Рисунок 65 – Окно вывода результатов

Для расчета коэффициентов запаса используются осевые напряжения лопатки - **SZ**. В случае появления необходимости вывода результатов по отдельным сечениям можно использовать операции вывода рассчитанных значений по пути **Path Operations**. В качестве примера строится график осевых напряжений для втулочного сечения. Выделяются узлы, принадлежащие втулочному сечению **Utility Menu>Select>Entities> Nodes - By Num/Pick >Apply >укажите узлы>OK**. Затем задается путь графика по наружным узлам сечения, обходя контур начиная от входной кромки **Main Menu>General Postproc>Path Operations>Define Path>By Nodes**. Затем записывается название пути.

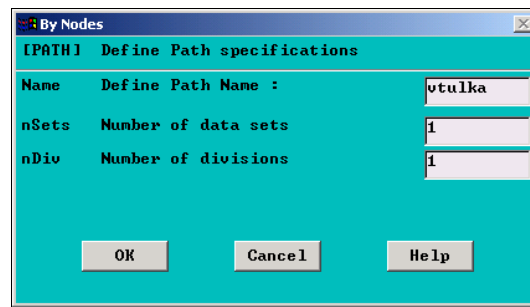


Рисунок 66 - Название заданного пути

Заданный путь можно просмотреть **Main Menu> General Postproc> Path Operations> Plot Path**.

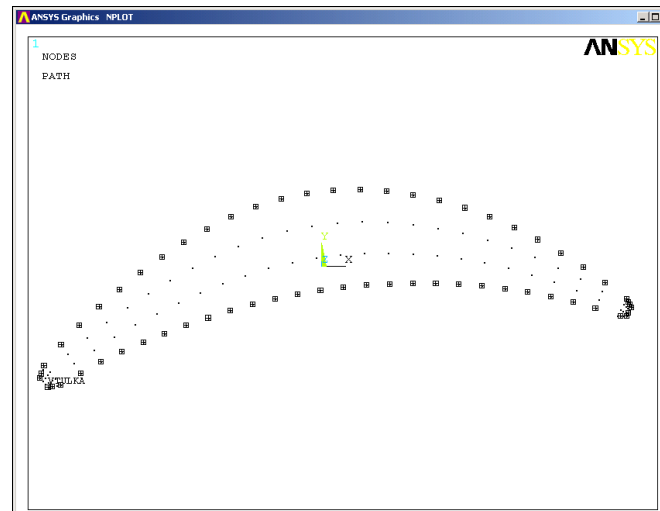


Рисунок 67 – Вид заданного пути

Затем выбирается путь **Main Menu> General Postproc> Path Operations> Recall Path**, результат для отображения, **Main Menu>General Postproc>Path Operations>Map onto Path** и, затем результат выводится на экран **Main Menu>General Postproc> Path Operations>On Graph**.

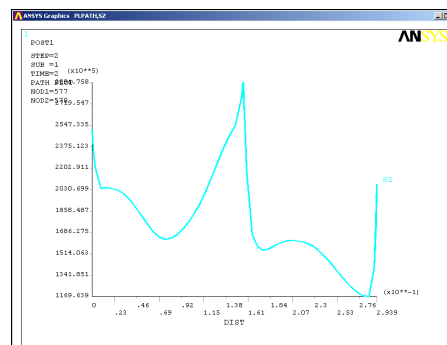


Рисунок 68 – График напряжений по среднему сечению

По завершении указанных действий у Вас должен получиться макрос построения лопатки, с помощью которого можно быстро провести проектирование лопатки рабочего колеса в соответствии с заданием на курсовой проект.

2.7 Расчет частот колебаний лопатки

При расчете точек для построения резонансной диаграммы необходимо учитывать эффект влияния нагружения лопатки центробежными и газодинамическими силами, а также воздействие температуры. Температурное воздействие учитывается изменением свойств материала. Точки диаграммы строятся, считая, что газодинамические нагрузки и температура рабочего тела, измеряются линейно по оборотам. Сам расчет ведется в два этапа. На первом

производится статический расчет с включенной опцией расчета нагружения **Main Menu>Solution> Analysis Options: prestress on.**

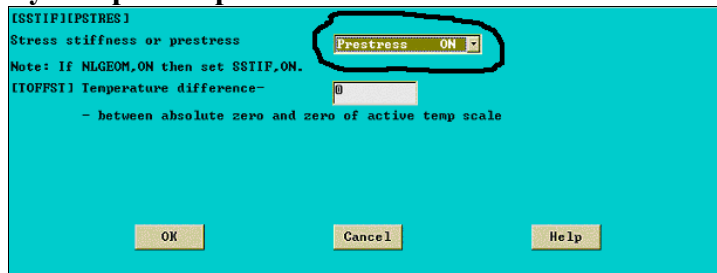


Рисунок 69 - Выбор опции расчета предварительного нагружения в статике

Затем задается тип расчета – модальный - **Main Menu> Solution> New Analysis> Modal.** В опциях расчета **Main Menu>Solution> Analysis Options: Incl Prestress** включается учет напряженного состояния и указывается количество рассчитываемых форм и частот.

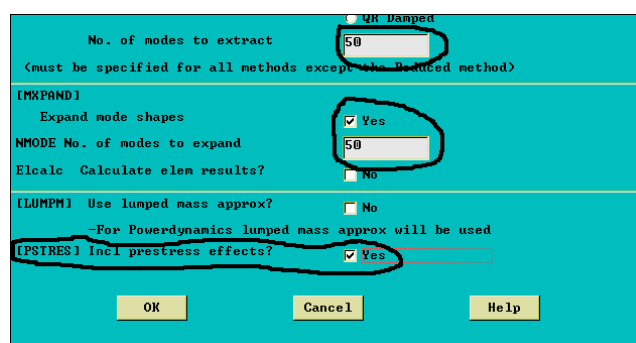


Рисунок 70 - Выбор опций модального анализа

Производится расчет. Результаты расчета частот - **Main Menu> General Postproc> Results Summary.**

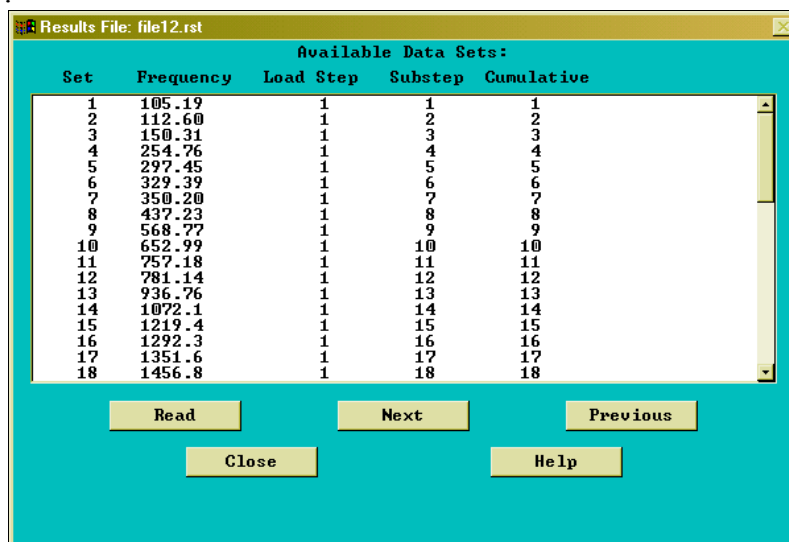


Рисунок 71 – Окно отображения результатов модального анализа

Перед визуализацией формы колебаний выбирается нужная частота в окне результатов и нажимается кнопка **Read**. Для классификации формы колебаний отображаются поля суммарных перемещений лопатки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Основной

1. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. Д.В.Хронина. – М.: Машиностроение, 1989. – 568 с.

Дополнительный

2. Лекции по соответствующим дисциплинам и эксклюзивные методические материалы кафедры КИПДЛА

Учебное издание

Создание расчетных моделей элементов ГТД в конечно-элементном комплексе Ansys
Методические указания

Составители: Бондарчук Петр Владимирович,
Виноградов Александр Сергеевич

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П.Королева.
44086 Самара, Московское шоссе, 34

РЕЦЕНЗИЯ

На методические указания

«СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS»

Авторы: асс. Бондарчук П.В., доц. Виноградов А.С.

Рецензируемое учебное пособие посвящено созданию расчетных моделей элементов конструкции авиационного ГТД студентами специальности 160301 «Авиационные двигатели и энергетические установки» средствами конечно-элементного комплекса ANSYS. Его использование в курсовой работе по курсу «Динамика и прочность АД и ЭУ» позволяет студентам выполнять проектные расчеты дисков и лопаток ГТД.

Учебное пособие содержит сведения о параметрическом моделировании в ANSYS указанных деталей ГТД, задании граничных условий, расчете модели и визуализации результатов. Данное учебное пособие следует использовать совместно с имеющимися кафедральными пособиями по расчету деталей ГТД.

Считаю, что представленное учебное пособие может быть опубликовано малым тиражом для использования на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов для студентов второго факультета форм, изучающих динамику и прочность АД и ЭУ.

Доцент кафедры ОКМ, д. т. н.

Балякин В. Б.

СВЕДЕНИЯ

об авторах учебного пособия

«СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS»

1. Бондарчук П.В.

ассистент кафедры КиПДЛА

2. Виноградов Александр Сергеевич

доцент кафедры КиПДЛА, к.т.н.

ВЫПИСКА

из протокола заседания кафедры КиПДЛА N___

От ____ . ____ 2005 г.

Слушали: Об опубликовании учебного пособия «СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS»
Авторы: асс. Бондарчук П.В., доц. Виноградов А.С.

Решили: Рекомендовать представленные методические указания для издания малым тиражом для использования в курсе "Динамика и прочность АД и ЭУ".

Зав. кафедрой КиПДЛА

Фалалеев С.В.

ВЫПИСКА

из протокола заседания

редакционно-методической комиссии факультета № 2

От __. _____ 2005 г.

Слушали: Об опубликовании методических указаний «СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГТД В КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS»

Авторы: асс. Бондарчук П.В., доц. Виноградов А.С.

Решили: Рекомендовать представленные методические указания для издания малым тиражом для использования в курсе "Динамика и прочность АД и ЭУ".

Председатель ред.-метод. комиссии

фак. №2

В.С. Егорычев