*А.И. ЕРМАКОВ, А.М. УЛАНОВ*

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИНАМИКЕ И ПРОЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ANSYS

**ЧАСТЬ 2**

**2007**

СГАУ

**САМАРА**

*А.И. ЕРМАКОВ, А.М. УЛАНОВ*

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИНАМИКЕ И ПРОЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ANSYS

**ЧАСТЬ 2**

**2007**

СГАУ

**САМАРА**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

*А.И. ЕРМАКОВ, А.М. УЛАНОВ*

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИНАМИКЕ И ПРОЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ANSYS

## ЧАСТЬ 2

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета в качестве лабораторного практикума*

С А М А Р А
Издательство СГАУ
2007

УДК 621.452.3.539.4 (075)
ББК 39.55




**Инновационная образовательная программа «Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий»**

Составители: А. И. Е р м а к о в, А. М. У л а н о в

Рецензент: инженер-конструктор ОАО СКБМ Р. Р. К а р и м о в

**Лабораторный практикум по динамике и прочности авиационных ГТД с использованием пакета ANSYS. Ч.2**: лаб. практикум / *А.И.Ермаков, А.М.Уланов.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 80 с. : ил.

Рассмотрены построение параметрических моделей пера и хвостовика лопатки газотурбинного двигателя, моделирование газовой нагрузки на лопатку, моделирование и расчет на прочность диска рабочего колеса методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS.

Лабораторный практикум предназначен для студентов двигателестроительных факультетов, обучающихся по специальности "Авиационные двигатели и энергетические установки".

УДК 621.452.3.539.4 (075)
ББК 39.55

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

## СОДЕРЖАНИЕ

Общие сведения……4

1. Построение параметрической модели лопатки турбомашины……5
1.1. Построение параметрических моделей сечений пера лопатки.....5
1.2. Построение параметрической модели верхней поверхности хвостовика.....……23
1.3. Построение хвостовика «ласточкин хвост».....…….26
1.4. Моделирование трактовой полки.....……32
1.5. Моделирование удлиненной ножки хвостовика «ласточкин хвост».....……35
1.6. Моделирование хвостовика «ласточкин хвост» при наличии удлиненной ножки....37
1.7. Моделирование елочного хвостовика.....…….39
1.8. Построение поперечного сечения елочного хвостовика на боковых поверхностях обода.....42
2. Моделирование газовой нагрузки на лопатку.....51
3. Моделирование и расчет на прочность диска рабочего колеса……62
3.1. Расчет на прочность с использованием полной модели диска.....62
3.2. Расчет на прочность диска с учетом поворотной симметрии его напряженного состояния.....…….69
3.3. Наложение граничных условий циклической симметрии в диске.....75

# ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Расчет на прочность лопаток и дисков рабочих колес очень важен для обеспечения прочности авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). В современной практике конструирования для расчета на прочность применяются метод конечных элементов и основанные на нем пакеты программ, в частности, ANSYS. Основываясь на знаниях, полученных при изучении пакета ANSYS, курсов по основам метода конечных элементов, по динамике и прочности авиационных ГТД, студент может построить конечно-элементные модели пера лопатки, ее хвостовика, диска, и осуществить их расчет на прочность. Построение параметрических моделей лопатки и хвостовика, использование различных моделей диска позволяет осуществить исследование влияния на прочность различных конструктивных параметров и способствует более глубокому пониманию метода конечных элементов и пакета программ ANSYS, так и повышению точности расчетов.

Выполнение лабораторных работ подробно проработано, вплоть до отдельных операций, выполняемых ANSYS. Работы, входящие в состав практикума, выполняются в течение семестра.

# 1. ПОСТРОЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛОПАТКИ ТУРБОМАШИНЫ

## 1.1. ПОСТРОЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СЕЧЕНИЙ ПЕРА ЛОПАТКИ

1. Создать папку, имя которой включает фамилию студента и номер его группы.
2. Запустить программу «Блокнот»: ***Пуск → Программы → Стандартные → Блокнот***
3. Создать файл под именем Lopatka: ***Файл → Сохранить как → Lopatka.txt***
4. Написать в файле Lopatka.txt (в дальнейшем имя файла указываться не будет) операторы:

***FINISH***
***/CLEAR, START***
***/PREP7***

5. Создать массив координат точек профилей спинки, имеющий размерность 3 x 9 x 3:

****DIM,TC,ARRAY,3,9,3***

6. Создать массив координат точек профилей корытца, имеющий размерность 3 x 9 x 3:

****DIM,TK,ARRAY,3,9,3***

Первый размер массивов позволяет записать значения координат точек X, Y и Z, второй размер показывает номер точки, третий – номер сечения. Сечение с номером 1 должно располагаться в корне лопатки.

7. Присвоить элементам массивов следующие значения (рис.1):

***!Значения координат точек профилей***
***!Втулочное сечение***
***TC(1,1,1)=-0.0224,0.0279,0.0604***
***TC(1,2,1)=-0.0173,0.0255,0.0604***
***TC(1,3,1)=-0.0123,0.0222,0.0604***
***TC(1,4,1)=-0.00750,0.0188,0.0604***
***TC(1,5,1)=-0.00164,0.0144,0.0604***
***TC(1,6,1)=0.00481,0.00764,0.0604***
***TC(1,7,1)=0.0099,-0.00335,0.0604***
***TC(1,8,1)=0.0086,-0.0157,0.0604***
***TC(1,9,1)=-0.000343,-0.0254,0.0604***
***TK(1,1,1)=-0.0229,0.0270,0.0604***
***TK(1,2,1)=-0.0189,0.0233,0.0604***
***TK(1,3,1)=-0.0146,0.0194,0.0604***
***TK(1,4,1)=-0.0106,0.0154,0.0604***
***TK(1,5,1)=-0.00606,0.0101,0.0604***
***TK(1,6,1)=-0.0016,0.0033,0.0604***
***TK(1,7,1)=0.00117,-0.00483,0.0604***
***TK(1,8,1)=0.00091,-0.0133,0.0604***
***TK(1,9,1)=-0.00274,-0.0233,0.0604***

8. Написать операторы, позволяющие построить точки спинки и корытца профиля

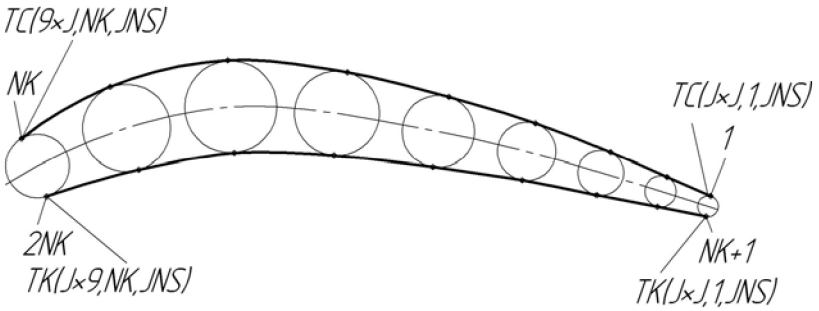


Рис.1. Моделирование профиля

втулочного сечения:

***NK=9***

***NS=3***

****DO,J,1,NK***

***K,J,TC(1,J,1),TC(2,J,1),TC(3,J,1)***

***K,J+NK,TK(1,J,1),TK(2,J,1),TK(3,J,1)***

****ENDDO***

9. Свернуть окно с программой «Блокнот».
10. Запустить программу ***ANSYS.***
11. Построить точки спинки и корытца профиля втулочного сечения:
    - 11.1. ***UM → File → Read Input from…***
    - 11.2. Указать путь до папки с программой ***Lopatka.txt***
    - 11.3. Выбрать файл ***Lopatka.txt***
    - 11.4. Нажать кнопку ***OK***
12. Построить два сплайна по точкам спинки и корытца.
13. Построить поверхность по точкам KP1, KP9, KP18 и KP10

***MM → PrPr → Create → Areas → Arbitrary → Through KPs → KP1, KP9, KP18, KP10 → OK***

14. Определить координату центра тяжести сечения:
    - 14.1. ***MM → PrPr → Operate → Calc Geom Items → Of Areas → Normal → OK***
    - 14.2. Записать координаты XC и YC.
15. Открыть свёрнутое окно с программой «Блокнот».
16. Присвоить элементам массивов TC и TK следующие значения:

***!Среднее сечение***

***TC(1,1,2)=-0.0299,0.0232,0.792***

***TC(1,2,2)=-0.0236,0.0211,0.792***

***TC(1,3,2)=-0.0175,0.0185,0.792***

***TC(1,4,2)=-0.0103,0.0150,0.792***

***TC(1,5,2)=-0.00181,0.00987,0.792***

***TC(1,6,2)=0.00644,0.00324,0.792***

***TC(1,7,2)=0.0122,-0.00599,0.792***

***TC(1,8,2)=0.0142,-0.0159,0.792***

***TC(1,9,2)=0.0115,-0.0270,0.792***

***TK(1,1,2)=-0.0304,0.0223,0.792***

***TK(1,2,2)=-0.0248,0.0186,0.792***

***TK(1,3,2)=-0.0191,0.0153,0.792***

***TK(1,4,2)=-0.0125,0.0112,0.792***

***TK(1,5,2)=-0.00475,0.00584,0.792***

***TK(1,6,2)=0.0021,-0.00056,0.792***

***TK(1,7,2)=0.00658,-0.00818,0.792***

***TK(1,8,2)=0.0087,-0.0163,0.792***

***TK(1,9,2)=0.0094,-0.0272,0.792***

17. Превратить операторы построения точек спинки и корытца профиля втулочного сечения в комментарии.
18. Написать операторы, позволяющие построить точки спинки и корытца профиля среднего сечения.
19. Свернуть окно с программой «Блокнот».
20. Построить точки спинки и корытца среднего сечения.
21. Открыть свёрнутое окно с программой «Блокнот».
22. Присвоить элементам массивов ТС и ТК следующие значения:

***!Периферийное сечение***

***TC(1,1,3)=-0.0362,0.0180,0.98***

***TC(1,2,3)=-0.0287,0.0155,0.98***

***TC(1,3,3)=-0.0208,0.0127,0.98***

***TC(1,4,3)=-0.0115,0.0092,0.98***

***TC(1,5,3)=-0.00283,0.00548,0.98***

***TC(1,6,3)=0.00696,0.000349,0.98***

***TC(1,7,3)=0.0153,-0.00559,0.98***

***TC(1,8,3)=0.0214,-0.0124,0.98***

***TC(1,9,3)=0.0261,-0.0231,0.98***

***TK(1,1,3)=-0.0365,0.0173,0.98***

***TK(1,2,3)=-0.0295,0.0138,0.98***

***TK(1,3,3)=-0.0217,0.0103,0.98***

***TK(1,4,3)=-0.0127,0.00641,0.98***

***TK(1,5,3)=-0.00416,0.00262,0.98***

***TK(1,6,3)=0.00531,-0.00235,0.98***

***TK(1,7,3)=0.013,-0.00822,0.98***

***TK(1,8,3)=0.0188,-0.0143,0.98***

***TK(1,9,3)=0.0251,-0.0235,0.98***

23. Превратить операторы построения точек спинки и корытца профиля среднего сечения в комментарии.
24. Написать операторы, позволяющие построить точки спинки и корытца профиля периферийного сечения.
25. Построить точки спинки и корытца профиля периферийного сечения. Итоговая нумерация точек показана на рис.2.
26. Обеспечение центрирования и выносов центров тяжести сечений.

    26.1. Создать массив СТ размерами 2 х 3 для центрирования сечений (первая размерность – коррекция координат точек, вторая – номер сечения):

****DIM,CT,ARRAY,2,3***

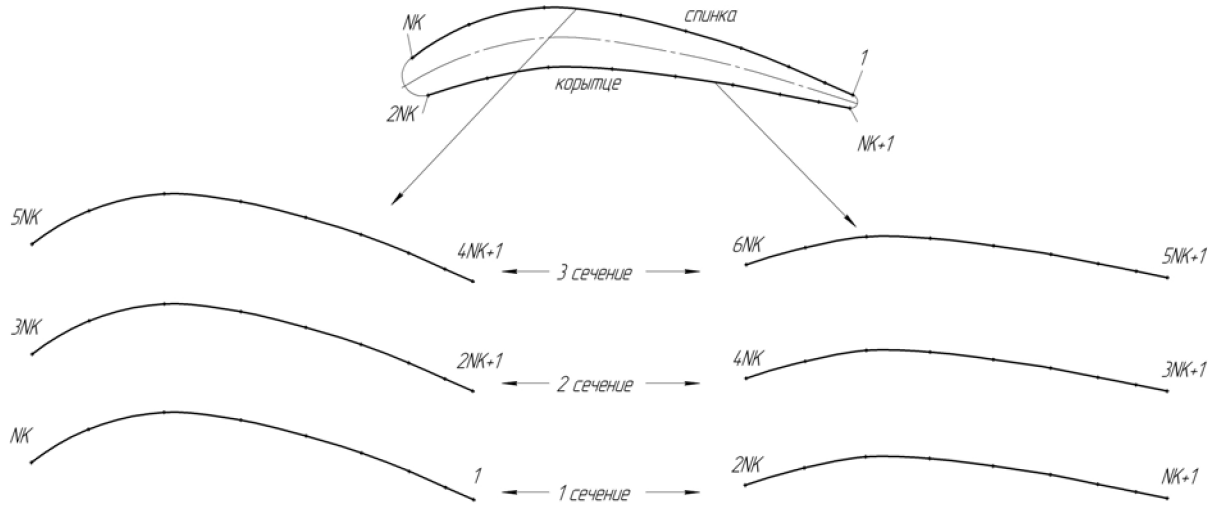

Рис.2. Номера точек спинки и корытца

26.2. Создать массив выносов V размерами 2 x 3 (первая размерность – коррекция координат точек, вторая – номер сечения):

***DIM,V,ARRAY,2,3**

***26.3.*** Написать операторы: ***CT(1,1)=0.0,0.0***

***CT(1,2)=0.0,0.0***

***CT(1,2)=0.0,0.0***

***V(1,3)=0.0,0.0***

***V(1,2)=V(1,3)2,V(2,3)/2***

***V(1,1)=0.0,0.0***

***DO,JNS,1,NS***

***DO,JNK,1,NK***

***DO,JXY,1,2***

***TC(JXY,JNK,JNS)=TC(JXY,JNK,JNS)+CT(JXY,JNS)+V(JXY,JNS)***

***TK(JXY,JNK,JNS)=TK(JXY,JNK,JNS)+CT(JXY,JNS)+V(JXY,JNS)***

***ENDDO***

***ENDDO***

***ENDDO***

27. Превратить все операторы построения точек профилей в комментарии.

28. Написать операторы: ***!*GO,:MFINISH***

***:MFINISH***

Последний оператор должен всегда располагаться в конце программы.

29. Написать операторы, позволяющие построить точки профилей:

***DO,JNS,1,NS***

***DO,JNK,1,NK***

***K,JNK+NK*2(JNS-1),TC(1,JNK,JNS),TC(2,JNK,JNS),TC(3,JNK,JNS)***

***K,JNK+NK*(2*JNS-1),TK(1,JNK,JNS),TK(2,JNK,JNS),TK(3,JNK,JNS)***

***ENDDO***

***ENDDO***

30. Написать операторы: ***GP=5***

***IF,GP,NE,0,THEN***

***ENDIF***

***GP*** – угол, показанный на рис.3.

31. Написать между операторами IF и ENDIF следующие операторы, формирующие периферийное сечение.

31.1. Повернуть рабочую плоскость на угол GP относительно оси X:

***WPRO,,GP***

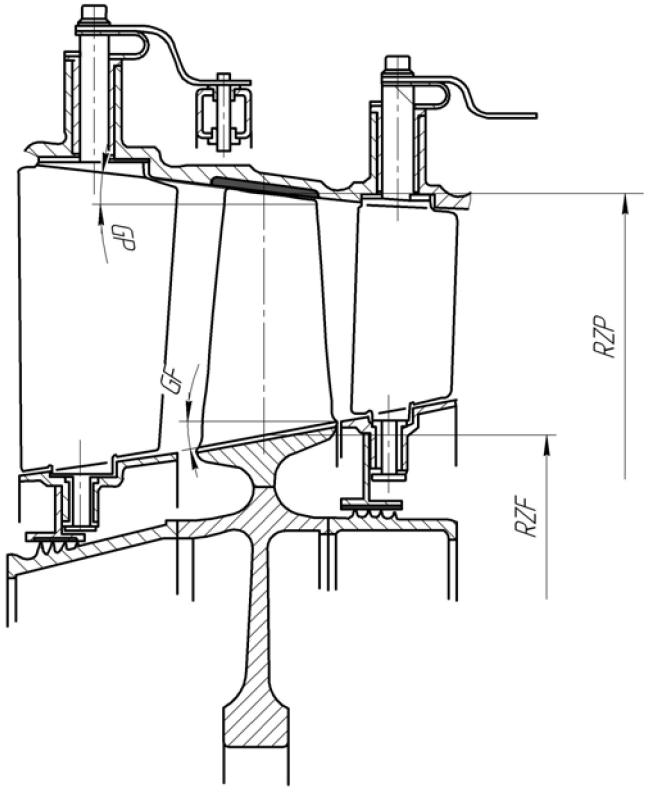


Рис.3. Особенности измерения тракта компрессора и параметры, определяющие втулочное и периферийное сечения.

31.2. Построить сплайны по точкам спинок профилей среднего и периферийного сечений:

***MM → PrPr → Create → Splines → Spline thru KPs → KP19, KP20 …KP27 → Apply***

***MM → PrPr → Create → Splines → Spline thru KPs → KP37, KP38 …KP45 → Apply***

31.3 Войти в LOG-файл (***MM → File → List → Log File***), выделить и скопировать операторы (нажатием комбинации клавиш ‘ctrl+c’):

***FLST,3,9,3***
***FITEM,3,19***
***FITEM,3,20***
***FITEM,3,21***
***FITEM,3,22***
***FITEM,3,23***
***FITEM,3,24***
***FITEM,3,25***
***FITEM,3,26***
***FITEM,3,27***
***BSPLIN, ,P51X***

***FLST,3,9,3***
***FITEM,3,37***
***FITEM,3,38***
***FITEM,3,39***
***FITEM,3,40***
***FITEM,3,41***
***FITEM,3,42***
***FITEM,3,43***
***FITEM,3,44***
***FITEM,3,45***
***BSPLIN, ,P51X***

31.4. Открыть окно с программой «Блокнот». Вставить в файл ‘lopatka.txt’ скопированные операторы (комбинация клавиш ‘shift+insert’).

31.5. Заменить операторы FITEM следующими операторами:

****DO,J,37,45***
***FITEM,3,J***
****ENDDO***

31.6. Аналогично заменить операторы для построения сплайна спинки периферийного сечения.

31.7. Построить по сплайнам поверхность: ***ASKIN,1,2***

31.8. Построить линию пересечения поверхности спинки пера с рабочей поверхностью (рис.4): ***RZP=0.95***

***K,500,V(1,3),V(2,3),RZP***
***KWPAVE,500***
***ASBW,1 (DIVIDE AREA BY WORKPLANE)***

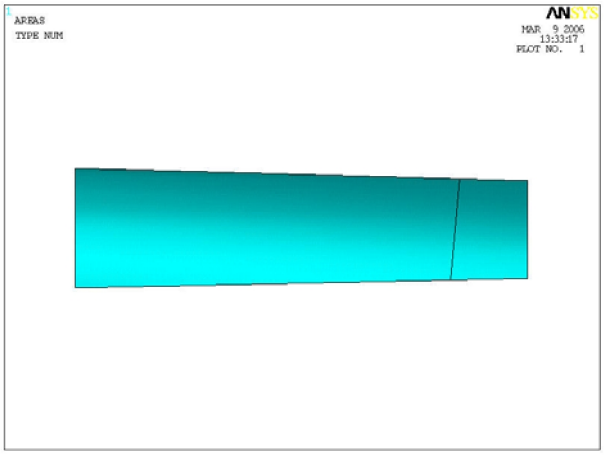


Рис.4. Линия пересечения поверхности спинки пера с рабочей поверхностью

31.9. Построить на линии пересечения девять равномерно расположенных точек:

****DO,JK,0,8***
***KL,7,(1/8)*JK,501***

31.10. Записать координаты построенных точек в массив TC:

***TC(1,JK+1,3)=KX(501),KY(501),KZ(501)***

31.11. Уничтожить точку, построенную на линии пересечения:

***KDELE,501***

****ENDDO***

31.12. Уничтожить поверхность и все созданные линии:

***ADELE, ALL***

***LDELE, ALL***

31.13. Построить сплайны по точкам корытцев профилей среднего и периферийного профилей.

31.14. Построить по сплайнам поверхность.

31.15. Построить линию пересечения поверхности корытца пера с рабочей поверхностью.

31.16. Построить на линии пересечения 9 равномерно расположенных точек.

31.17. Записать координаты точек в массив ТК.

31.18. Удалить все поверхности, линии и точки.

31.19. Построить точки профилей.

31.20. Привести рабочую плоскость в исходное состояние и удалить её изображение: ***WPRO,,-GP***

***WPSTYLE,,,,,,,,0***

32. Сформировать втулочное сечение:

***!GB – угол поворота втулочного сечения***

***GB=-5***

***RZB=0.606***

Аналогично созданию периферийного сечения сформировать втулочное сечение.

33. Уничтожить все точки.

34. Построить точки профилей (результат показан на рис.5).

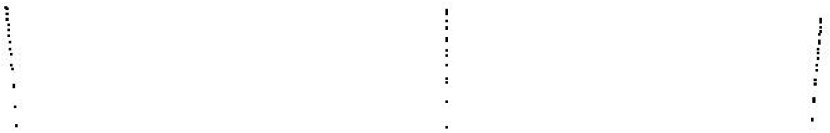

Рис.5. Точки профилей после поворота втулочного и периферийного сечений

35. Создать массив радиусов входных и выходных кромок профилей сечений:

****DIM,R,ARRAY,2,3***

Первая размерность определяет входную – 1 и выходную – 2 кромки, вторая размерность определяет номер сечения.

36. Определить радиусы входных и выходных кромок:

****DO,JNS,1,NS***

***R(1,JNS)=DISTKP(NK+2*NK*(JNS-1),2*NK+2*NK*(JNS-1))/2*1.005***

***R(2,JNS)=DISTKP(1+2*NK*(JNS-1),1+NK+2*NK*(JNS-1))/2*1.005***

****ENDDO***

Здесь в качестве аргументов выступают номера точек, между которыми определяется расстояние (см. рис.2).

37. Напечатать:

***! Моделирование параметрически изменяемой толщины профилей***

38. Построить на мониторе три произвольные точки ***KP1, KP2*** и ***KP3*** (как вершины треугольника).

39. Построить посредине между точками ***KP1*** и ***KP2*** ключевую точку ***KP4***:

***MM → PrPr → Create → Keypoints → KP between KPs***

Выбрать курсором ключевые точки ***KP1*** и ***KP2*** нажать ***OK*** → задать ***RATI=0.5*** → ***OK.***

40. Построить на ключевых точках ***KP4, KP1*** и ***KP3*** локальную систему координат, имеющую номер 12, у которой начало расположено в ключевой точке ***KP4***, ось X направлена в сторону точки ***KP1***, а ось Y – в сторону ключевой точки ***KP3.***

40.1. ***UM → Work Plane → Local Coordinate Systems → Create Local CS → By 3 Key points***

40.2. Выбрать последовательно точки ***KP4*** (начало координат), ***KP1*** (направление оси X) и ***KP3*** (направление оси Y).

40.3. Набрать номер координатной системы (***KCN=12***).

40.4. Выбрать тип координатной системы (***KCS=0***).

40.5. Нажать ***OK.***

40.6. Сделать локальную систему координат активной:

***UM → Work Plane → Change CS to → Specified CS → 12 → OK***

41. Масштабировать точки с заданным коэффициентом:

41.1. ***MM → PrPr → Operate → Scale → Key points***

41.2. Выбрать точки ***KP1*** и ***KP2***.

41.3. Задать ***RX=0.5.***

41.4. Выбрать ***Moved*** в окне ***IMove.***

41.5. Нажать ***OK.***

41.6. ***UM → Plot → Replot.***

42. Проанализировать операторы в log-файле.

43. Написать операторы, позволяющие изменять расстояние между точками спинки и корытца втулочного профиля.

43.1. Создать двумерный массив параметров, управляющих величинами радиусов входных и выходных кромок: ****DIM,KR,ARRAY,2,3***

Здесь значения первой размерности соответствуют: 1 – входные кромки; 2 – выходные кромки. Вторая размерность определяет номер сечения.

43.2. Создать одномерный массив параметров, управляющих толщинами профилей лопатки: ****DIM,KH,ARRAY,3***

43.3. Создать цикл последовательного изменения расстояний между точками спинки и корытца втулочного сечения:

```
KR(1,1)=1,1
KR(1,2)=1,1
KR(1,3)=1,1
KH(1)=1
*DO,JNK,1,NK
KNC=JNK
KNK=JNK+NK
*IF,JNK,LT,NK,THEN
NT1=KNK+1
```

**ELSE*

*NT1=KNK-1*

**ENDIF*

*KBET,KNC,KNK,500,RATI,0.5*

*CSKP,11,0,500,KNK,NT1*

*CSYS,11*

**IF,JNK,EQ,1,THEN*

*KPSCALE,KNC,,,KR(2,1),1,1,,0,1*

*KPSCALE,KNK,,,KR(2,1),1,1,,0,1*

**ELSEIF,JNK,EQ,NK*

*KPSCALE,KNC,,,KR(1,1),1,1,,0,1*

*KPSCALE,KNK,,,KR(1,1),1,1,,0,1*

**ELSE*

*KPSCALE,KNC,,,KH(1),1,1,,0,1*

*KPSCALE,KNK,,,KH(1),1,1,,0,1*

**ENDIF*

*CSDELE,11,,1,*

*KDELE,500*

**ENDDO*

**DO,J,1,2*

*R(J,1)=R(J,1)*KR(J,1)*

**ENDDO*

*CSYS,0*

44. Написать операторы, позволяющие изменять расстояние между точками спинки и корытца всех трёх сечений лопатки.

45. Написать следующие операторы:

*! Моделирование объёма пера*

*! HS – относительная толщина стенки охлаждаемой лопатки*

(относительная толщина стенки охлаждаемой лопатки $H_s = \frac{h_c}{h_{пера}}$, рис. 6)

*!JTL – признание типа лопатки*

*JTL=1 ! – неохлаждаемая лопатка; JTL=2 – охлаждаемая лопатка*

**IF,JTL,EQ,1,THEN*

*! Моделирование неохлаждаемой лопатки*

*HS=0,333*

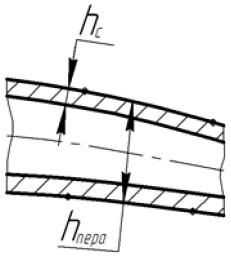


Рис.6. Относительная толщина стенки охлаждаемой лопатки

Написать операторы построения дополнительных ключевых точек, расположенных между ключевыми точками спинки и корытца:

```
*DO,JNS,1,NS
*DO,JNK,1,NK
KNC=JNK+NK*2*(JNS-1)
KNK=JNK+NK*(2*JNS-1)
KBET,KNC,KNK,JNK+6*NK+2*NK*(JNS-1),RATI,HS
KBET,KNC,KNK,JNK+6*NK+NK*(2*JNS-1),RATI,1-HS
*ENDDO
*ENDDO
```

46. Построить дуги входных кромок в трёх сечениях лопатки (рис.7):

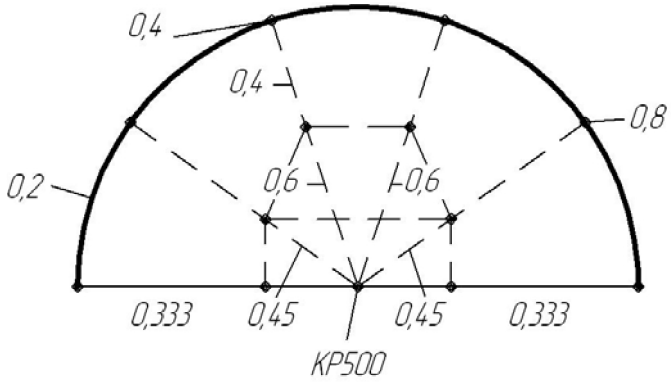


Рис.7. Моделирование кромки неохлаждаемой лопатки

```
*DO,JNS,1,NS
KNC=(2*JNS-1)*NK
KNK=2*NK*JNS
KN3=KNK-1 !третья точка для определения плоскости, в которой расположены дуги
LARC,KNC,KNK,KN3,R(1,JNS)
*ENDDO
```

Построить на дугах входных кромок равномерно расположенные ключевые точки:

```
*DO,JNS,1,NS
*DO,J4,1,4
KL,JNS,1/5*JJ4,12*NK+4*(JNS-1)+J4
*ENDDO
*ENDDO
```

47. Построить ключевые точки, позволяющие разбить входные кромки на 5 объёмов:

```
NKP=12*NK+4*NS
*DO,JNS,1,NS
KNC=NK+2*NK*(JNS-1)
KNK=2*NK+2*NK*(JNS-1)
KNK=2*NK+2*NK*(JNS-1)
KBET,KNC,KNK,500,RATI,0.5
KBET,500,12*NK+4*(JNS-1)+1,NKP+1+4*(JNS-1),RATI,0.45
KBET,500,12*NK+4*(JNS-1)+2,NKP+2+4*(JNS-1),RATI,0.6
KBET,500,12*NK+4*(JNS-1)+3,NKP+3+4*(JNS-1),RATI,0.6
```

***KBET,500,12*NK+4*(JNS-1)+4,NKP+4+4*(JNS-1),RATI,0.45***

***KDELE,500***

****ENDDO***

48. Уничтожить дуги входных кромок.

49. Построить дуги выходных кромок в трёх сечениях.

50. Построить на дугах выходных кромок равномерно расположенные ключевые точки.

51. Построить ключевые точки, позволяющие разбить выходные кромки на 5 объёмов.

52. Уничтожить дуги выходных кромок.

53. Построить между точками, равномерно расположенными на входных и выходных кромках дуги, так, чтобы любая из кромок была представлена пятью дугами, образующими полуокружность (рис.8).

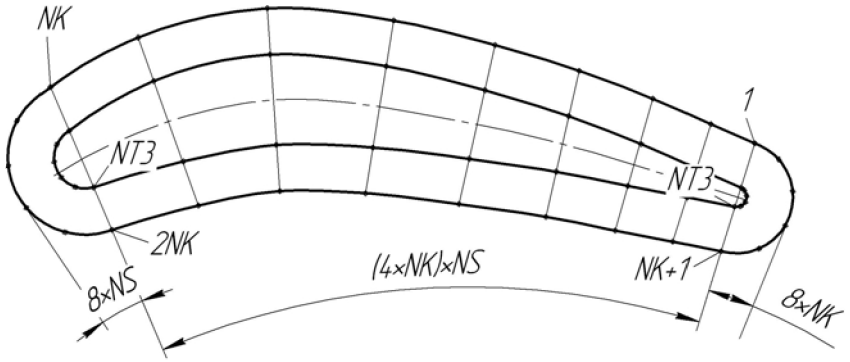


Рис.8. Разделение входной и выходной кромок на пять дуг

54. Построить входные и выходные кромки.

54.1. Построить с помощью пяти дуг входные кромки:

****DO,JNS,1,NS***

***NT=12*NK+1+4*(JNS-1)***

***NT3=7*NK+2*NK*(JNS-1)***

***LARC,NK+2*NK*(JNS-1),NT,NT3,R(1,JNS)***

***LARC,NT,NT+1,NT3,R(1,JNS)***

***LARC,NT+1,NT+2,NT3,R(1,JNS)***

***LARC,NT+2,NT+3,NT3,R(1,JNS)***

***LARC,NT+3,2*NK+2*NK*(JNS-1),NT3,R(1,JNS)***

****ENDDO***

54.2. Построить с помощью пяти дуг выходные кромки.

55. Построить сплайны по ***NK*** точкам спинки, корытца и семейства точек, расположенных в каждом сечении между спинкой и корытцем, получив линии для формирования объемной модели лопатки (рис.9): ***NS1=4*NS***

****DO,JNS1,1,NS1***

***FLST,3,9,3***

****DO,JNK,1,NK***

***FITEM,3,JNK+NK*(JNS1-1)***

****ENDDO***

***BSPLINE,,P51X***

****ENDDO***




Рис.9. Линии для формирования объёмной модели лопатки

56. Формирование объёмной модели неохлаждаемой лопатки.

56.1. Написать операторы построения объёма V1

***DO,J,1,2***

***DP=2*NK*(J-1)***

***DKR=4*(J-1)***

***N1=12*NK***

***N2=12*NK+4*NS***

***N3=12*NK+8*NS***

***N4=12*NK+12*NS***

***V,NK+DP,N1+1+DK,N2+1+DK,7*NK+DP,NK+2*NK+DP,N1+1+4+DK,N2+1+4+DK,7*NK+2***

****NK+DP***

****ENDDO***

56.2. Построить остальные объёмы лопатки.

57. Задать материал для различных объемов в соответствии с рис.10:

***! Задание свойств материала***

***MPTEMP,,,,,,,***

***MPTEMP,1,0***

***MPDATA,EX,1,,2.1e11***

***MPDATA,PRXY,1,,0.3***

***MPTEMP,,,,,,,***

***MPTEMP,1,0***

***MPDATA,DENS,1,,7800***

58. Задать тип конечных элементов и реальную константу:

***ET,1,SOLID45***

***ET,2,SHELL63***

***R,1,0.001, , , , , ,***

***RMORE, , , ,***

***RMORE***

***RMORE, ,***

59. Задать параметры сетки пера лопатки:

***MK=1 ! Входная и выходная кромки***

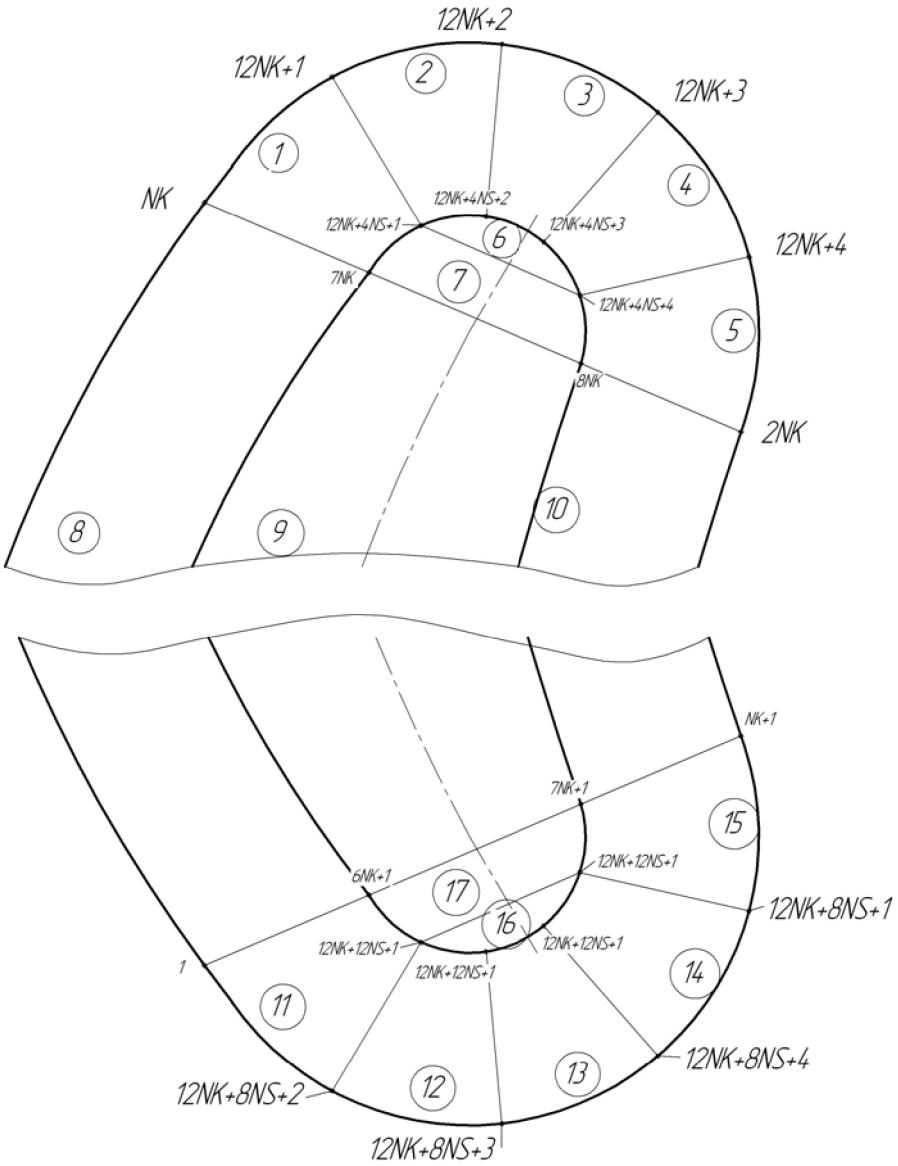


Рис. 10. Объёмная модель неохлаждаемой лопатки

***MB=10 ! По ширине лопатки***

***ML=70 ! По длине лопатки***

60. Задать параметры сетки на линиях модели лопатки:

60.1. ***MM → PrPr → Size Controls → Line – Picked Lines***

60.2. Выбрать с помощью многоугольника все линии входных и выходных кромок.

60.3. Задать ***NDIV=MK***

60.4. Отредактировать оператор ***LESIZE,_Y1,,,MK,1,***

60.5. Выбрать с помощью многоугольника все линии определяющие модель по ширине.

60.6. Скопировать операторы из LOG-файла.

60.7. Отредактировать оператор ***LESIZE,_Y1,,,MB,1,***

60.8. Выбрать с помощью многоугольника все линии определяющие модель по высоте.

60.9. Скопировать операторы из LOG-файла.

60.10. Отредактировать оператор ***LESIZE,_Y1,,,ML,1,***

61. Сгенерировать конечно-элементную (КЭ) модель:

***MM → PrPr → Mesh → Volumes → Mapped → 4 to 6 Sided → Pick All***

62. Скопировать операции создания КЭ модели из LOG-файла.

63. Последовательно изменяя величину ML добиться того, чтобы не было элементов с нарушенным соотношением рёбер.

Проанализировать полученную модель и сравнить результаты с рис. 11, 12 и 13.

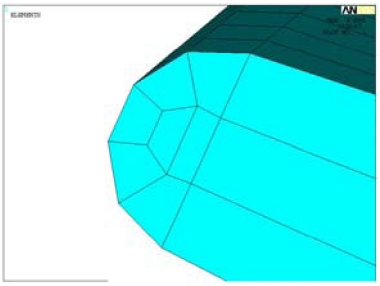

Рис.11. КЭ модель входной кромки лопатки

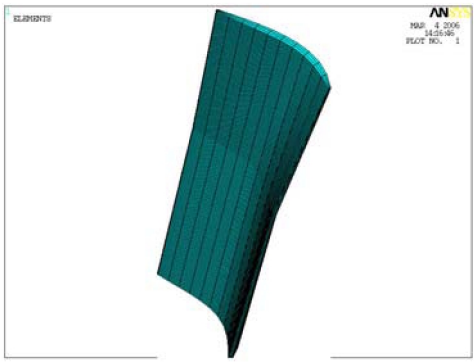

Рис.12. КЭ модель неохлаждаемой лопатки

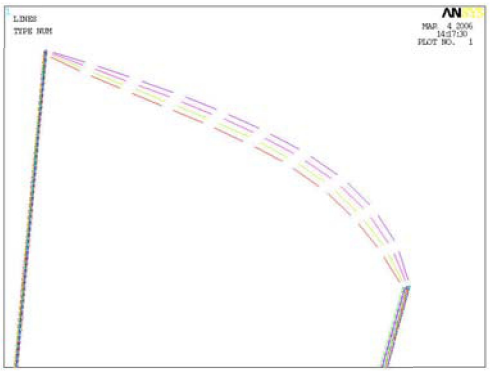

Рис.13. Линии КЭ модели лопатки

64. Моделирование охлаждаемой лопатки:

****IF,JTL,EQ,2,THEN***

****ENDIF***

64.1. Построить дуги входных кромок в трёх сечениях лопатки (рис.14):

****DO,JNS,1,NS***

***KNC=(2*JNS-1)*NK***

***KNK=2*NK*JNS***

***KN3=KNK-1***

***LARC,KNC,KNK,KN3,R(1,JNS)***

****ENDDO***

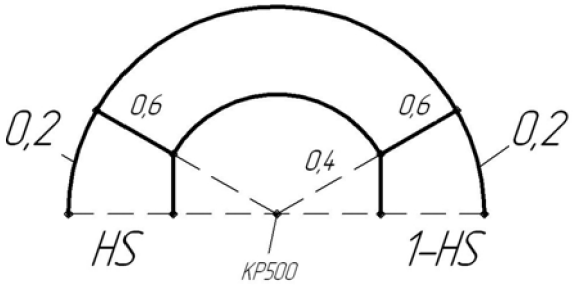


Рис. 14. Моделирование кромок охлаждаемой лопатки

64. 2. Построить на дугах входных кромок по две ключевые точки, делящие дуги в пропорции 2/10 и 8/10:

```
*DO,JNS,1,NS
KL,JNS,0.2,12*NK+2*(JNS-1)+1
KL,JNS,0.8,12*NK+2*(JNS-1)+2
*ENDDO
```

65. Построить ключевые точки для формирования объёмов в области входных кромок, сравнить результат с рис.15:

```
NKP=12*NK+2*NS
*DO,JNS,1,NS
KNC=NK+2*NK*(JNS-1)
KNK=2*NK+2*NK*(JNS-1)
KBET,KNC,KNK,500,RATI,0.5
KBET,500,12*NK+2*(JNS-1)+1,NKP+1+2*(JNS-1),RATI,0.4
KBET,500,12*NK+2*(JNS-1)+2,NKP+2*(JNS-1)+2,RATI,0.4
KDELE,500
*ENDDO
```




Рис.15. Линии и точки входной кромки охлаждаемой лопатки

66. Уничтожить дуги входных кромок: ***LDELE,ALL***

67. Построить дуги выходных кромок в трёх сечениях лопатки.

68. Построить на дугах выходных кромок по две ключевые точки, делящие дуги в пропорции 2/10 и 8/10.

69. Построить ключевые точки для формирования объёмов выходных кромок. Номера точек на входных и выходных кромках показаны на рис.16.

70. Уничтожить дуги выходных кромок.

71. Построить с помощью трёх дуг каждую из входных кромок.

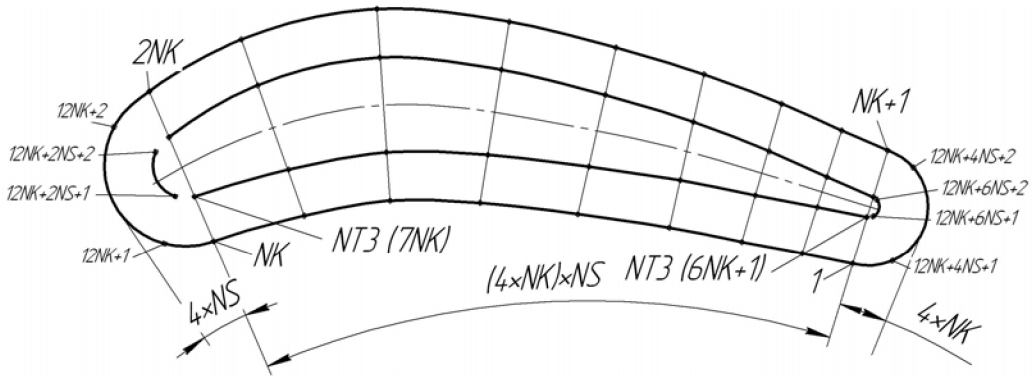


Рис.16. Номера точек охлаждаемой лопатки

***DO,JNS,1,NS***
***NT=12*NK+1+2*(JNS-1)***
***NT3=7*NK+2*NK*(JNS-1)***
***LARC,NK+2*NK*(JNS-1),NT,NT3,R(1,JNS)***
***LARC,NT,NT+1,NT3,R(1,JNS)***
***LARC,NT+1,2*NK+2*NK*(JNS-1),NT3,R(1,JNS)***
***LARC,12*NK+2*NS+1+2*(JNS-1), 12*NK+2*NS+2+2*(JNS-1),NT3,R(1,JNS)***
***ENDDO***

72. Построить с помощью системы из трёх дуг выходные кромки.

73. Построить сегментные сплайны по NK точкам спинки, корытца и семействам точек, расположенных в каждом сечении между спинкой и корытцем:

***NS1=4*NS ! Четыре сплайна в каждом сечении***
***DO,JNS1,1,NS1***
***FLST,2,9,3***
***DO,JNK,1,NK***
***FITEM,2,JNK+NK*(JNS1-1)***
***ENDDO***
***SPLINE,P51X***
***ENDDO***

74. Напечатать операторы построения объёмов V1, V2, V3, составляющих область входных кромок (рис.17):

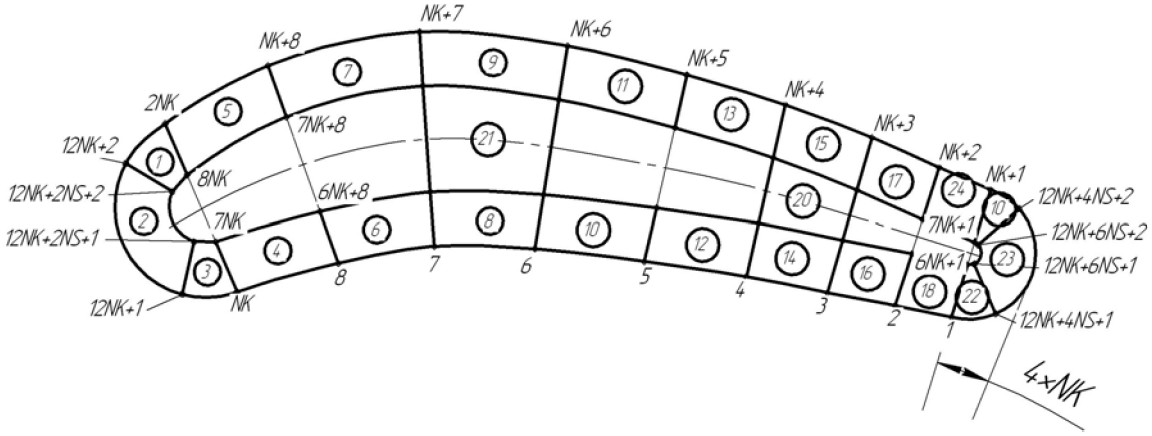


Рис.17. Построение объёмной модели охлаждаемой лопатки

***DO,J,1,2***

***DP=2*NK*(J-1)***

***DK=2*(J-1)***

***N1=12*NK***

***N2=12*NK+2*NS***

***N5=12*NK+4*NS***

***N4=12*NK+6*NS***

***D=2*NK***

***V,N1+2+DK,2*NK+DP,8*NK+DP,N2+2+DK,12*NK+2+2+DK,2*NK+2*NK+DP,8*NK+2*NK+DP,N2+2+2+DK !1 ОБЪЁМ***

***V,N1+1+DK,N1+2+DK,N2+2+DK,N2+1+DK,N1+1+DK+2,N1+2+DK+2,N2+2+DK+2,N2+1+DK+2 !2 ОБЪЁМ***

***V,NK+DP,N1+1+DK,N2+1+DK,7*NK+DP,NK+DP+2*NK,N1+1+DK+2,N2+1+DK+2,7*NK+DP+2*NK !3 ОБЪЁМ***

75. Написать операторы для построения объёмной модели пера: ****DO,J3,0,(NK-2)***

75.1. Объёмы 4,6,…,18

***V,NK-J3+DP,7*NK-J3+DP,7*NK-J3-1+DP,NK-J3-1+DP,NK-J3+DP+D,7*NK-J3+DP+D,7*NK-J3-1+DP+D,NK-J3-1+DP+D***

****ENDDO***

75.2 Написать операторы для объёмов 5,7,…,19 самостоятельно.

****ENDDO***

75.3. Написать операторы самостоятельно для объёмов V20 и V21.

76. Построить объёмы выходной кромки.

77. Задать параметры сетки пера лопатки (рис.18):

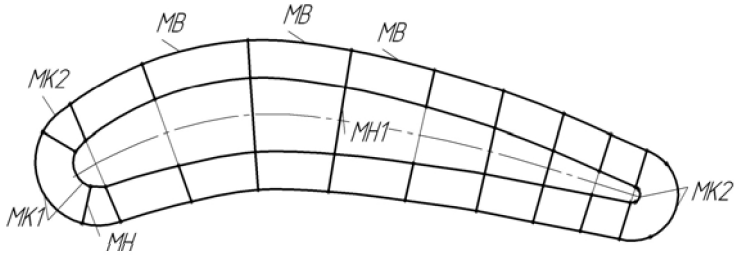


Рис.18. Задание параметров сетки конечных элементов

***!Параметры сетки пера лопатки***

***!Входная и выходная кромки***

***MK1=3***

***MK2=1***

***MH1=1***

***MH=1***

***!По ширине лопатки***

***MB=2***

***!По длине лопатки***

***ML=65***

78. Задать параметры сетки на линиях модели лопатки.

***UM → Select → Entities → Areas → Apply***

79. Выбрать многоугольником площадь корневого сечения:

79.1. Выбрать: ***Select Entities → Lines → Attached to → Areas***

79.2. Нажать ***OK.***

79.3. ***PrPr → Size Controls → Picked Lines***

79.4. Выбрать линии MK1 (см. рис.18).

79.5. Задать ***NDIV=MK1.***

79.6 ***Picked lines.***

79.7. Выбрать линии MK2.

79.8. Задать ***NDIV=MK2.***

79.9. Проделать аналогичные операции для линий ***MH, MH1, MB*** и ***ML.***

80. Аналогичные операции проделать для среднего и периферийного сечений.

Проанализировать полученную модель лопатки и сравнить результаты с рис.19, 20 и 21.

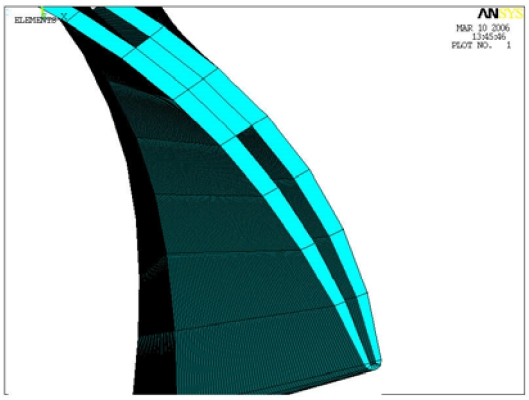

Рис.19. Сечение охлаждаемой лопатки

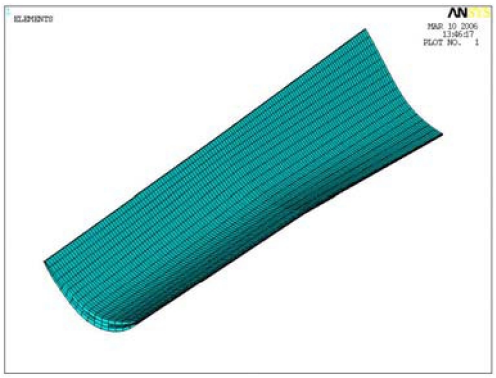

Рис.20. КЭ модель охлаждаемой лопатки

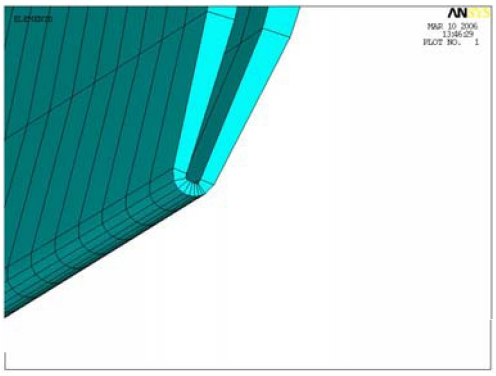

Рис.21. Входная кромка охлаждаемой лопатки

## 1. 2. ПОСТРОЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕРХНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ХВОСТОВИКА

Построение поверхности хвостовика, по которой осуществляется контакт с пером лопатки, пояснено на рис.22. $R_1$ - радиус входной кромки; $R_2$ - радиус выходной кромки.

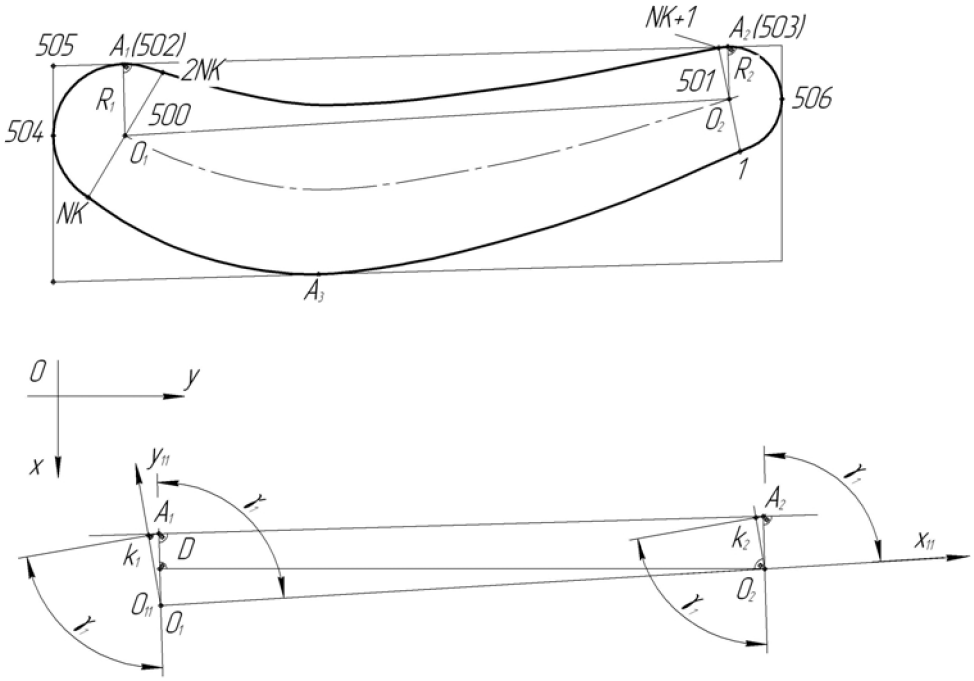


Рис.22. Построение контактной поверхности

Из треугольника $O_1O_2D$ находим: $\gamma_1 = \arccos\dfrac{R_1 - R_2}{O_1O_2}$,

$$\begin{cases} O_1K_1 = R_1 \sin\gamma_1, \\ A_1K_1 = R_1 \cos\gamma_1, \\ O_2K_2 = R_2 \sin\gamma_1, \\ A_2K_2 = R_2 \cos\gamma_1. \end{cases}$$

1. Определить максимальный номер у ранее построенных точек:

***GET,NMAX,KP,0,NUM,MAX***

2. Построить точки $O_1$ и $O_2$ - центры дуг входной и выходной кромок:

***KBET,NK,2*NK,500,RATI,.5***

***KBET,1,NK+1,501,RATI,.5***

3. Определить расстояние между точками $O_1$ и $O_2$:

***O1O2=DISTKP(500,501)***

4. Написать операторы: ***GAM1=ACOS((R(1,1)-R(2,1))/O1O2)***

***GAM2=PI-GAM1***

5. Построить локальную систему координат на точках ***500, 501*** и ***2NK:***

***CSKP,11,0,500,501,2*NK***

***CSYS,11***

6. Построить точки $A_1$ и $A_2$ (см. рис.22):

***K,502,R(1,1)*COS(GAM1),R(1,1)*SIN(GAM1),0***

***K,503,O1O2+R(2,1)*COS(GAM2),R(2,1)*SIN(GAM2),0***

7. Построить локальную систему координат на точках ***502, 503*** и ***500***:

***CSKP,12,0,502,503,500***

***CSYS,12***

8. Найти на спинке втулочного сечения точку, наиболее удалённую от оси X активной системы координат: ***YMAX=0***

****DO,JNK,1,NK***

****IF,YMAX,LT,KY(JNK),THEN***

***YMAX=KY(JNK)***

***IMAX=JNK***

****ENDIF***

****ENDDO***

9. Разместить начало системы координат рабочей плоскости в точке 500:

***KWPAVE,500***

***CSYS,4***

10. Построить точку ***КР504***: ***K,504,0,-R(1,1),0***

Построение трактовой полки пояснено на рис.23 и 24.

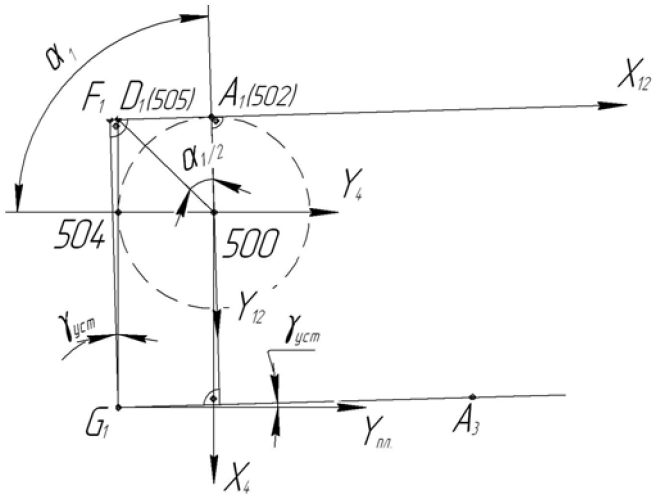


Рис.23. Моделирование трактовой полки (входная кромка)

$$A_1D_1 = R_1 tg\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)$$

$$D_1G_1 = YMAX / \cos\gamma_{уст}$$

11. Определить значение угла $\alpha_1$: ***ALF1=ANGLEK(500,502,504)***

12. Определить длину отрезка $A_1D_1$: ***A1D1=R(1,1)*TAN(ALF1/2)***

13. Определить угол установки $\gamma_{уст}$: ***KWPAVE,502***

***CSYS,4***

***K,506,0,0.005,0***

***GUST=ANGLEK(502,503,506)***

Определить длину отрезка $D_1G_1$: ***D1G1=YMAX/COS(GUST)***

14. Разместить начало системы координат рабочей плоскости в точке 501:

***KWPAVE,501***

***CSYS,4***

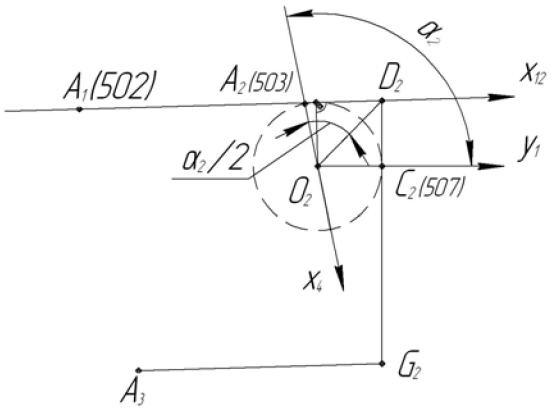


Рис.24. Моделирование трактовой полки (выходная кромка)

15. Построить точку 507 (точка $C_2$): ***K,507,0,R(2,1),0***

16. Определить значение угла $\alpha_2$: ***ALF2=ANGLEK(501,503,507)***

17. Определить координаты точки $D_2$: ***!A1D2=A1A2+A2+D2***

***!A2D2=R2*TAN(ALF2/2)***

***A2D2=R(2,1)*TAN(ALF2/2)***

18. Построить три ключевые точки, определяющие поверхность хвостовика, контактирующую с лопаткой:

***! Параметры, определяющие смещение границ контактой поверхности от профиля втулочного сечения.***

***D1=.001***

***D2=.001***

***DK=.001***

***DC=.001***

***! Построить точки, определяющие контактную поверхность***

***K,NMAX+1,-A1D1-D1/COS(GUST),-DK,0***

***K,NMAX+3,KX(503)+A2D2+D2/COS(GUST),-DK,0***

***KWPAVE,NMAX+1***

***CSYS,4***

***K,NMAX+2,D1G1+(DK+DC)*COS(GUST),0,0***

19. Удалить ключевые точки ***KP500…KP507.***

20. Активизировать глобальную систему координат: ***CSYS,0***

21. Задать стартовые номера для создаваемых линий, поверхностей и объёмов:

***LMAX=1000***

***AMAX=1000***

***VMAX=1000***

***NUMSTR,LINE,LMAX***

***NUMSTR,AREA,AMAX***

***NUMSTR,VOLU,VMAX***

22. Построить между ключевыми точками ***NMAX+1*** и ***NMAX+3*** прямую линию:

***LSTR,NMAX+1,NMAX+3***

Сравнить полученный результат с рис. 25 и 26:

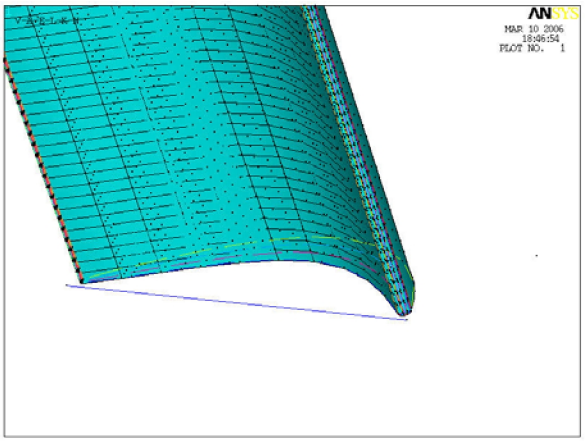

Рис.25. Втулочное сечение лопатки, контактная линия и точка

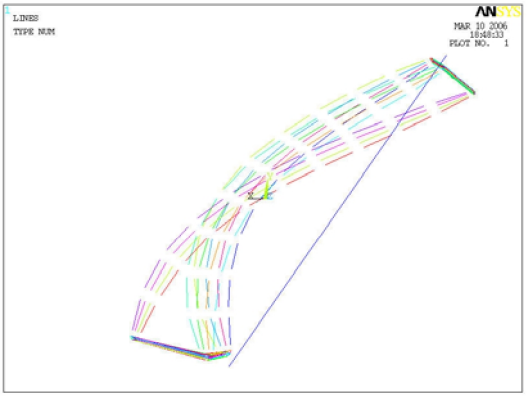

Рис.26. Вид снизу

## 1.3. ПОСТРОЕНИЕ ХВОСТОВИКА «ЛАСТОЧКИН ХВОСТ»

Параметры стандартного хвостовика приведены на рис. 27.

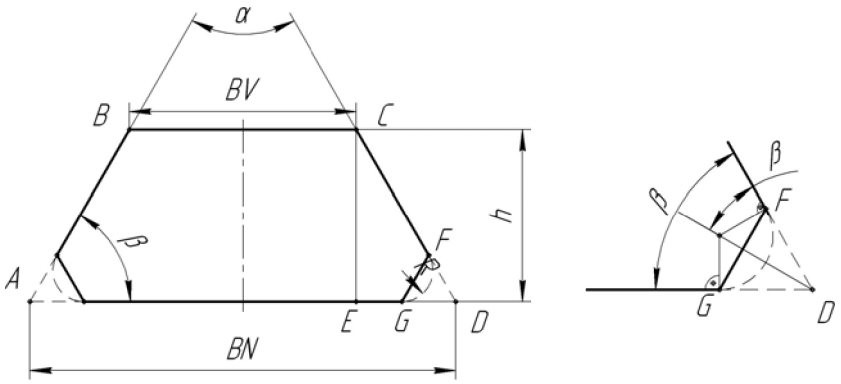


Рис.27. Хвостовик «ласточкин хвост»

Из рис. 27 находим: $\begin{cases} ED = \frac{1}{2}(BN - BV), \\ h = ED \cdot tg\beta, \end{cases} \Rightarrow h = \frac{BN - BV}{2} tg\beta$ ;

$$DF = DG = R \cdot ctg\frac{\beta}{2} .$$

Параметрами модели являются $\beta$, $BN$, $R$.

BN – определяется из построенной контактной поверхности (рис.28).

$$KF = \frac{FD}{CD}; \qquad KG = \frac{FD}{BN}.$$

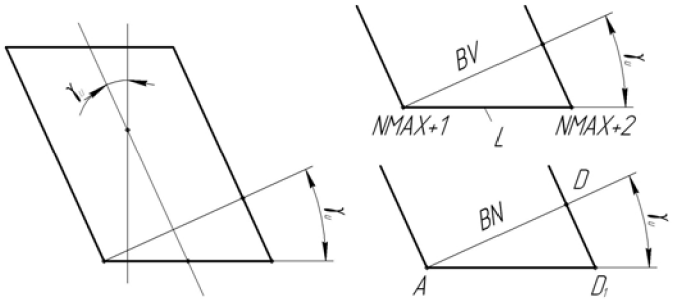


Рис. 28. Контактная поверхность

Из рис.28 определяем: $BV = L \cdot \cos\gamma_u$, $AD_1 = AD / \cos\gamma_u = \dfrac{BN}{\cos\gamma_u}$.

Написать операторы (параметры определяются при помощи рис.29):

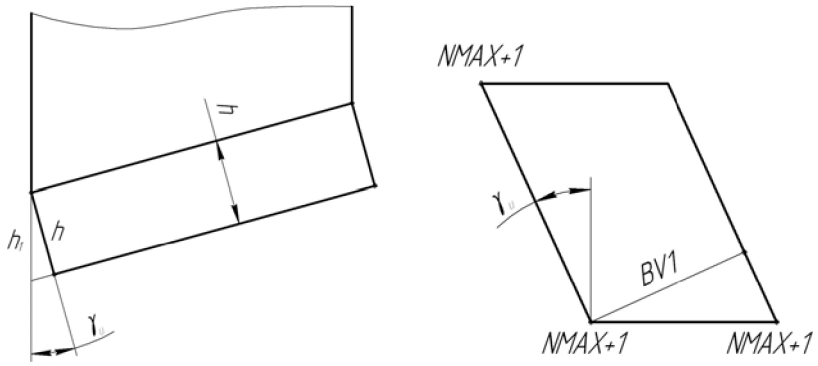


Рис.29. Лопатка и хвостовик

***IF,IXV,EQ,1,THEN***
***!Расчёт параметров хвостовика***
***BN=.036***
***BETTA=70***
***RXV=.002***
***L=DISTKP(NMAX+1,NMAX+2)***
***BETTA=BETTA*PI/180***
***BV=L*COS(GUST) ! переход к профильному сечению для определения KG и KD***
***ED=(BN-BV)/2***
***CD=ED/COS(BETTA)***
***HXV=ED*TAN(BETTA)***
***DF=RXV/TAN(BETTA/2)***
***KF=DF/CD***
***KG=DF/BN***
***BN=BN/COS(GUST)***
***HXV=HXV/COS(GF*PI/180)***

1. Построение сечения хвостовика (рис. 30):

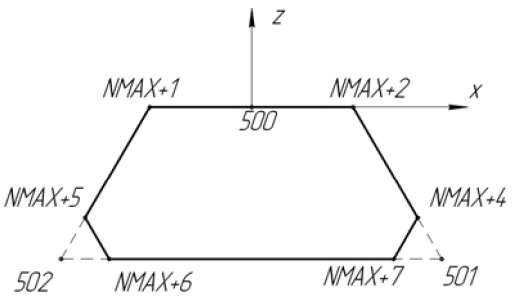

Рис.30. Построение сечения хвостовика

Построить точку 500 между точками ***NMAX+1*** и ***NMAX+2*** и разместить в ней начало координат рабочей поверхности: ***KBET,NMAX+1,NMAX+2,500,RATI,.5***

***KWPAVE,500***

***CSYS,4***

2. Построить точки, определяющие сечение хвостовика:

***K,501,BN/2,,-HXV***

***K,502,-BN/2,,-HXV***

***KBET,501,NMAX+2,NMAX+4,RATI,KF***

***KBET,502,NMAX+1,NMAX+5,RATI,KF***

***KBET,501,502,NMAX+7,RATI,KG***

***KBET,502,501,NMAX+6,RATI,KG***

***KDELE,500***

***KDELE,501***

***KDELE,502***

Сравнить полученный результат с рис.31:

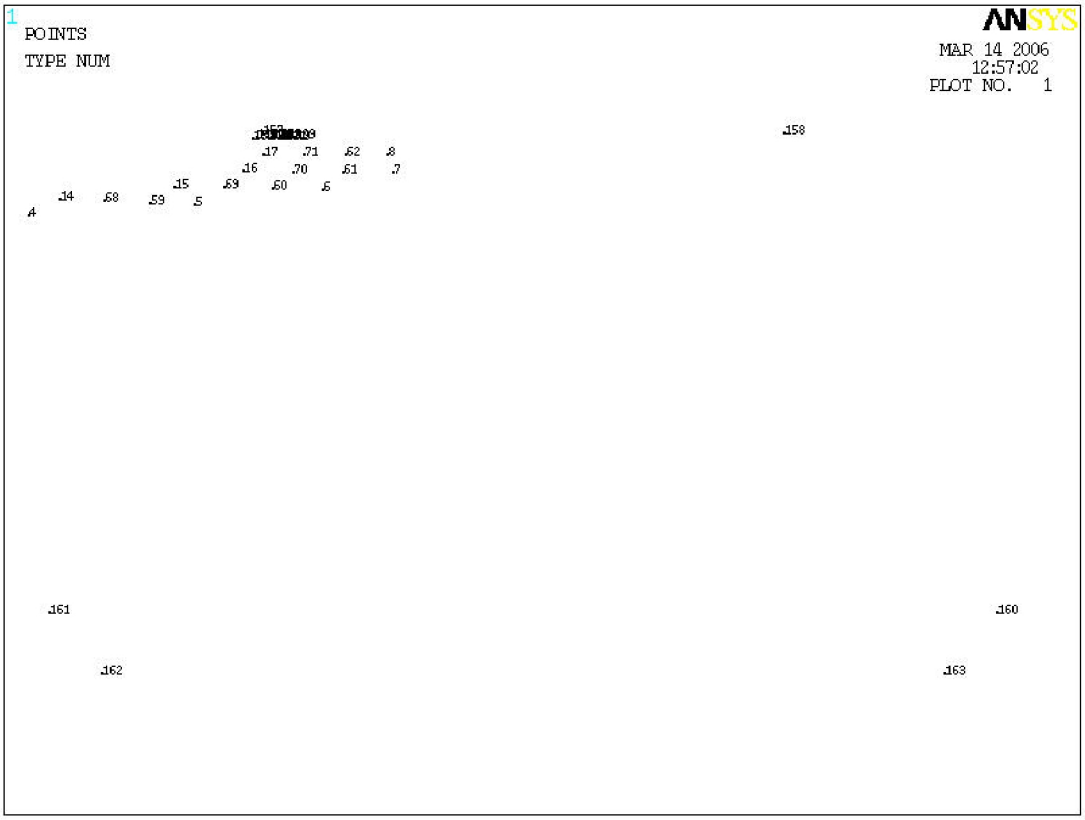

Рис.31. Точки сечения хвостовика

3. Построить две поверхности по точкам NMAX+1,NMAX+2,NMAX+4,NMAX+5 и NMAX+4,NMAX+5,NMAX+6,NMAX+7.

4. Разбить сечение хвостовика на конечные элементы. Задать параметры разбиения в соответствии с рис. 32 (***PrPr → Size Controls → Picked Lines***).

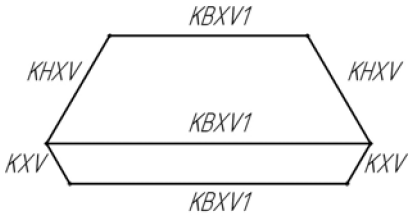


Рис.32. Разбиение сечения хвостовика на конечные элементы

***KBXV1=7***
***KBXV=5***
***KXV=1***
***KLXV=20***

Сгенерировать конечные элементы: ***PrPr → Mesh → Areas → Mapped → 3 or 4 sided.***
Сравнить полученный результат с рис.33.

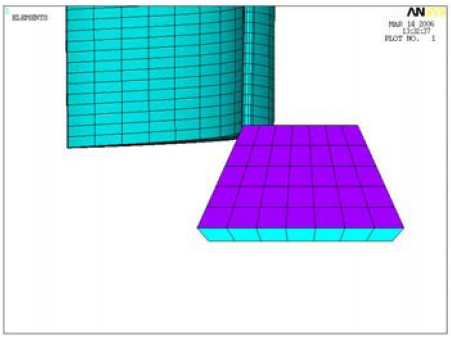

Рис.33. Сечение хвостовика, разбитое на конечные элементы

6. Построить КЭ модель хвостовика выдавливанием сечения вдоль линии.

6.1. ***PrPr → Operate → Extrude/Sweep → Elem Ext Opts***

Выбрать: ***VAL1=20 !KLXV***

***ACLEA*** – *поставить* ***YES***

6.2. В разделе ***Areas*** выбрать ***Along Line***

6.3. Выбрать поверхности сечения хвостовика, нажать ***OK,*** выбрать линию контактной поверхности и нажать ***OK***. Сравнить полученный результат с рис.34 и 35:

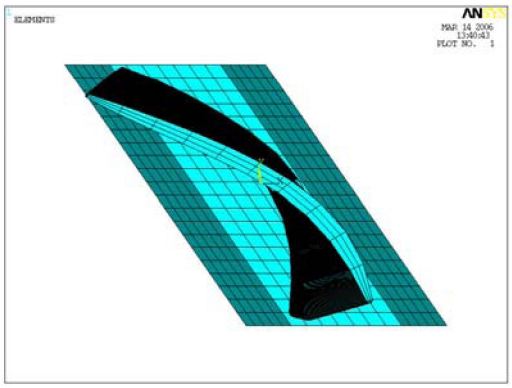

Рис.34. Лопатка и хвостовик, вид сверху

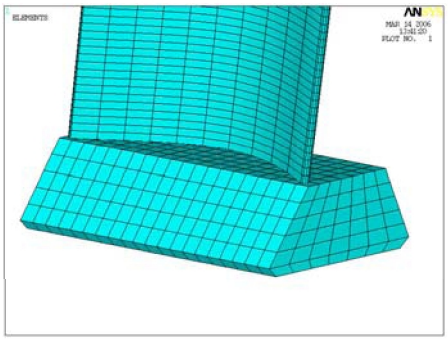

Рис.35. Втулочное сечение лопатки и хвостовик

7. Осуществить стыковку хвостовика с пером лопатки.

7.1. Определить расстояние между узлами конечных элементов хвостовика:

***PrPr → Check Geom → ND distances***

7.2. Ввести в программу параметр стыковки: ***Dxv=0.005***

7.3. Выбрать верхний слой конечных элементов в хвостовике:

***UM → Select → Entities → Elements → By Num/Pick → From Full → Apply***

***Box*** – позволяет выделять элементы, находящиеся внутри рамки (рис.36):

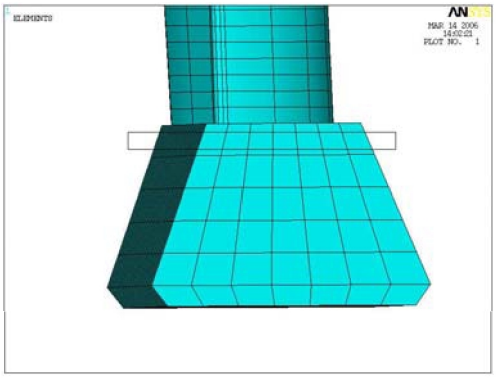

Рис.36. Выделение верхнего слоя конечных элементов хвостовика

7.4. Выбрать объём лопатки, контактирующий с хвостовиком (рис.37):

***UM → Plot → Volumes***

***UM → Select → Entities → Voluems → By Num/Pick → From Full → Apply***

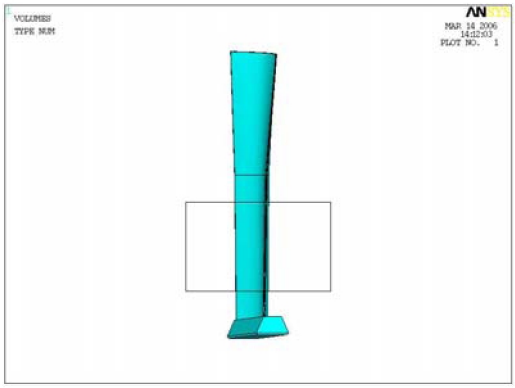

Рис.37. Выделение объёмов контактирующих с хвостовиком

***UM → Plot → Volumes***

7.5. Выбрать поверхности связанные с выбранными объёмами:

***UM → Select → Entities → Areas → Attached to → Volumes → From Full → Apply***

***UM → Plot Areas***

***UM → Select → Entities → Areas → By Num/Pick → Reselect***

Выбрать многоугольником поверхности лопатки, контактирующие с хвостовиком (рис. 38, 39). Нажать ***OK***.

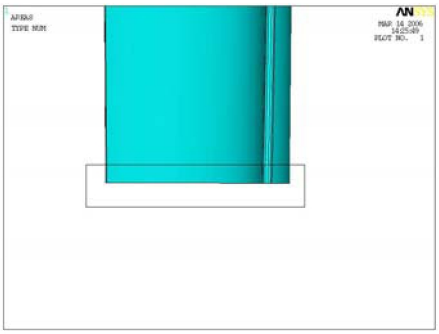

Рис.39. Выделение поверхностей, контактирующих с хвостовиком

***UM → Plot → Areas***

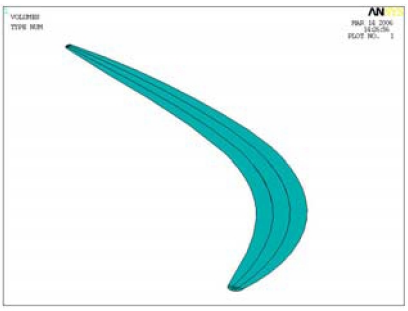

Рис.40. Поверхности лопатки, контактирующие с хвостовиком

7.6. Выбрать узлы, расположенные в контактных поверхностях:

***UM → Select → Entities → Node → Attached to → Areas, all → Also Select***

7.7. Выбрать узлы, принадлежащие элементам верхнего слоя хвостовика:

***UM → Select → Entities → Node → Attached to → Elements → Also Select***

***UM → Plot → Nodes***

7.8. Связать совпадающие с заданным допуском узлы пера и хвостовика лопатки:

***PrPr → Coupling/Ceqn → Coincided Nodes***

8. Вывести на экран конечные элементы.
9. Вывести на экран изображение связанных узлов (рис.40):

***UM → Plot Controls → Symbols → OK***

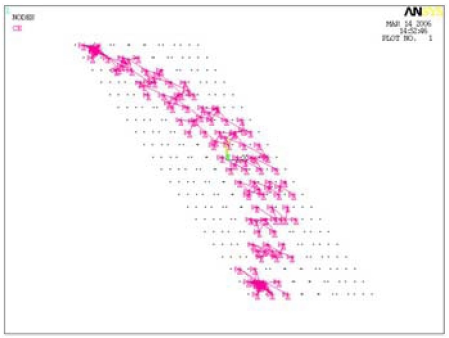

Рис.40. Связи узлов лопатки и хвостовика

10. Вывести на экран полное изображение лопатки и записать операторы из LOG-файла в программу.
11. Уменьшить величину допуска при стыковке пера с хвостовиком.

## 1.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАКТОВОЙ ПОЛКИ

Геометрические параметры трактовой полки приведены на рис. 41.

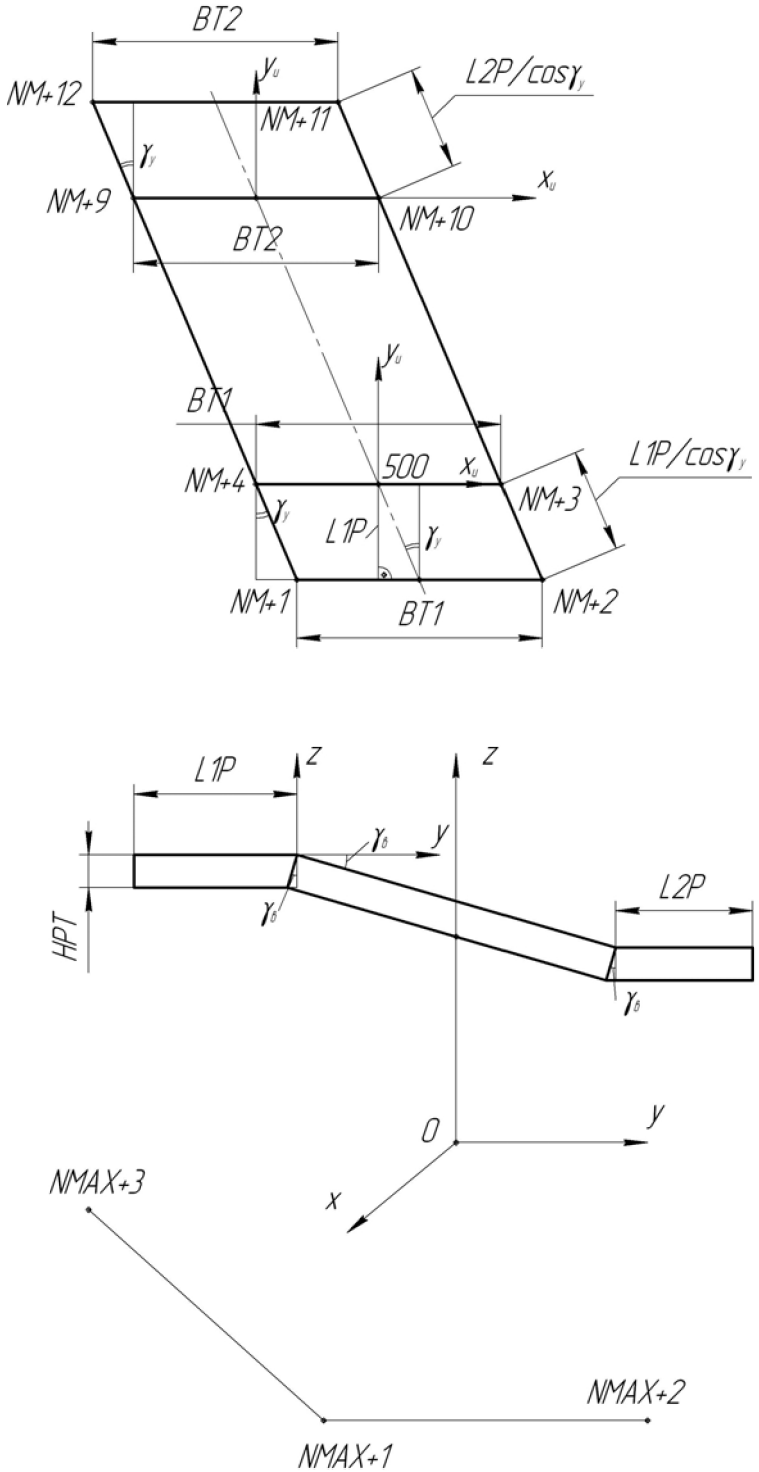


Рис.41. Геометрические параметры трактовой полки

Вычисление параметров BT1 и BT2 с учетом возможного различия радиусов проточной части пояснено на рис.42.

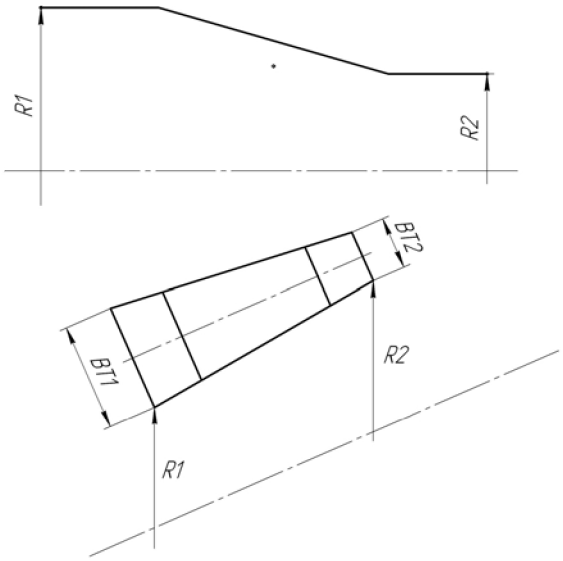


Рис.42. Вычисление BT1 и BT2

Из рис.42 определяем: $$\frac{BT2}{BT1}=\frac{2\pi R_2/n_Л}{2\pi R_1/n_Л}=\frac{R_2}{R_1};$$

$$BT2=BT1\frac{R_2}{R_1}=BT1\frac{z_2}{z_1};$$

$$BT2=BT1*KZ(NMAX+1)/KZ(NMAX+3).$$

Написать операторы:

***IXV=2 ! – моделирование трактовой полки, ножки и замка ласточкин хвост***

****IF,IXV,EQ,2,THEN***

***!Моделирование трактовой полки***

****ENDIF ! IXV=2***

1. Задание параметров трактовой полки:

***BT1=0.028***

***BT2=BT1*KZ(NMAX+1)/KZ(NMAX+3)***

***HPT=0.0015***

***L1P=0.006***

***L2P=0.003***

2. Определить максимальный по величине номер ключевых точек:

****GET,NM,KP,0,NUM,MAX***

3. Построить точку ***500*** между точками ***NMAX+1*** и ***NMAX+2***:

***KBET,NMAX+1,NMAX+2,500,RATI,.5***

4. Определить угол $\gamma_{уст}$:

***GUST=ANGLEK(NMAX+1,NMAX+2,NMAX+3)-PI/2***

5. Расположить начало системы координат рабочей плоскости в точке ***KP500***:

***KWPAVE,500***

***CSYS,4***

6. Построить ключевые точки ***NM+1…NM+8***:

***K,NM+4,-BT1/2,0,0***

***K,NM+3,BT1/2,0,0***

***K,NM+1,-BT1/2+L1P*TAN(GUST),-L1P,0***

***K,NM+2,BT1/2+L1P*TAN(GUST),-L1P,0***

***K,NM+5,-BT1/2+L1P*TAN(GUST),-L1P,-HPT*COS(GF*PI/180)***

***K,NM+6,BT1/2+L1P*TAN(GUST),-L1P,-HPT*COS(GF*PI/180)***

***K,NM+7,BT1/2,HPT*SIN(GF*PI/180),-HPT*COS(GF*PI/180)***

***K,NM+8,-BT1/2,HPT*SIN(GF*PI/180),-HPT*COS(GF*PI/180)***

7. Уничтожить точку ***KP500***:

***KDELE,500***

8. Определить расстояние между точками ***NMAX+1*** и ***NMAX+2***:

***L=DISTKP(NMAX+1,NMAX+2)***

9. Разместить начало системы координат рабочей плоскости в точке ***NMAX+3***:

***KWPAVE,NMAX+3***

***CSYS,4***

10. Построить ключевую точку ***KP500*** с координатами ***x=L/2, y=z=0***:

***K,500,L/2,0,0***

11. Разместить начало системы координат рабочей плоскости в точку ***KP500*** и построить ключевые точки ***NM+9, NM+10, … , NM+16***:

***KWPAVE,500***

***CSYS,4***

***K,NM+9,-BT2/2,0,0***

***K,NM+10,BT2/2,0,0***

***K,NM+12,-BT2/2-L2P*TAN(GUST),L2P,0***

***K,NM+11,BT2/2-L2P*TAN(GUST),L2P,0***

***K,NM+13,-BT2/2,HPT*SIN(GF*PI/180),-HPT*COS(FG*PI/180)***

***K,NM+14,BT2/2,HPT*SIN(GF*PI/180),-HPT,COS(GF*PI/180)***

***K,NM+15,BT2/2-L2P*TAN(GUST),L2P,-HPT*COS(GF*PI/180)***

***K,NM+16,-BT2/2-L2P*TAN(GUST),L2P,-HPT*COS(GF*PI/180)***

12. Создать по точкам объёмную модель трактовой полки (рис.43):

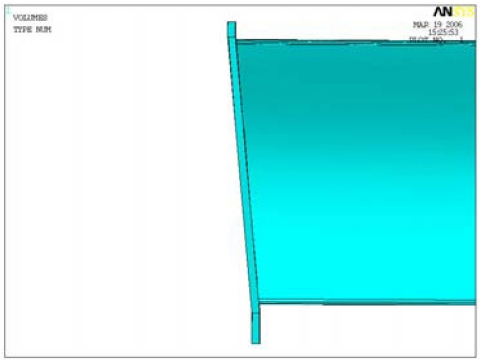

Рис.43. Объёмная модель трактовой полки

13. Создать конечно-элементную модель трактовой полки.

14. Осуществить стыковку трактовой полки и лопатки (рис.44).

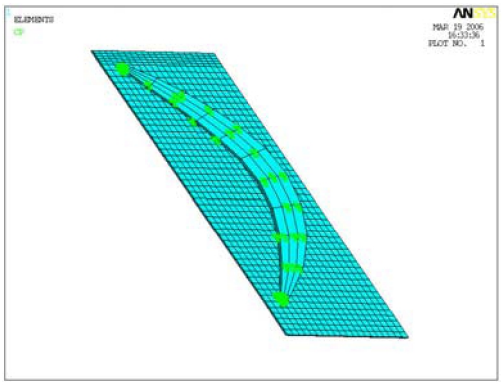

Рис.44. Стыковка трактовой полки и лопатки

15. Вернуться в глобальную систему координат: ***CSYS,0***

## 1.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ УДЛИНЕННОЙ НОЖКИ ХВОСТОВИКА «ЛАСТОЧКИН ХВОСТ»

Геометрические параметры удлиненной ножки приведены на рис.45.

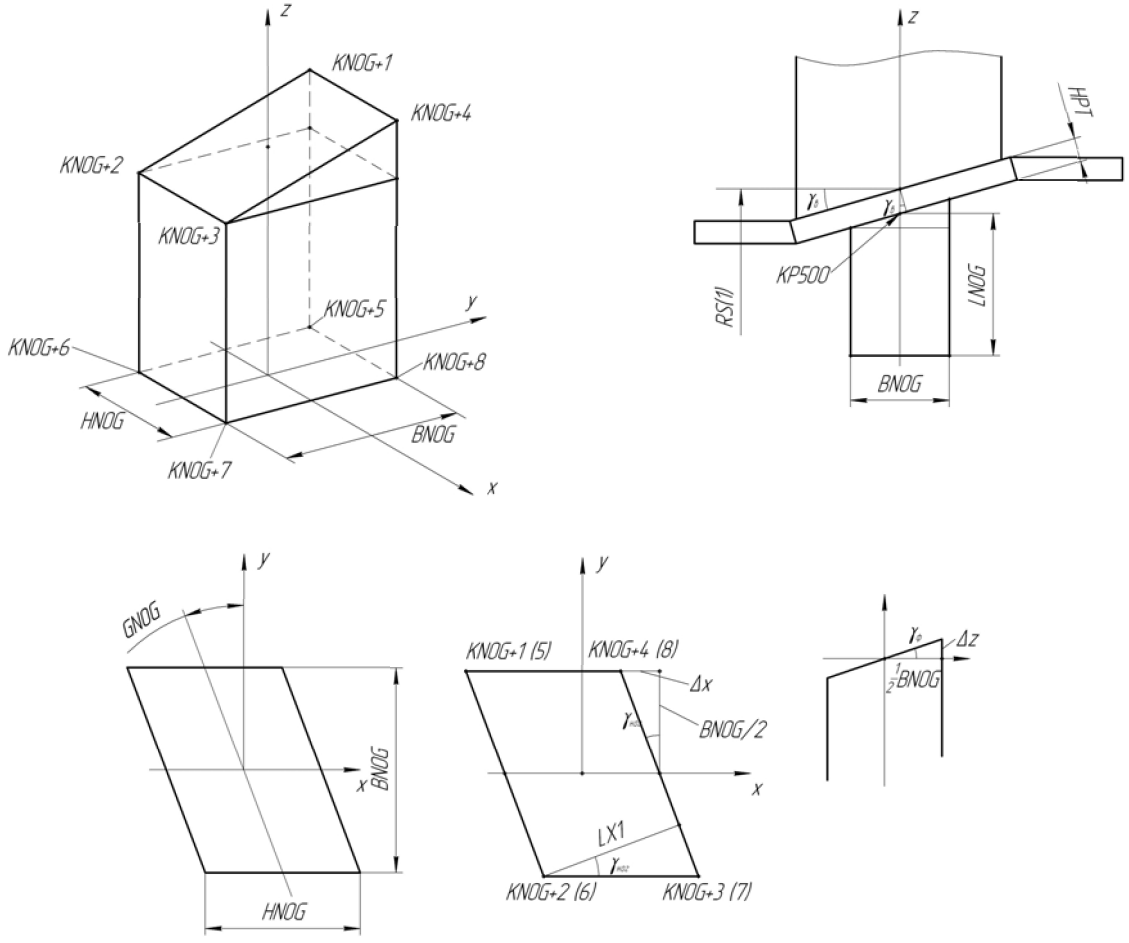


Рис.45. Геометрические параметры удлиненной ножки

Из рис. 45 можно определить: $\Delta z = \frac{1}{2} BNOG \cdot tg\gamma_{в}$, $\Delta x = \frac{1}{2} BNOG \cdot tg\gamma_{НОГ}$.

1. Задать параметры ножки:

*!Параметры ножки*

*GNOG=20*

*HNOG=0.02*

*BNOG=0.03*

*LNOG=0.02*

2. Построить ключевые точки, определяющие объём ножки:

*K,500,0,0,RZB-HPT/COS(GF*PI/180)*

*KWPAVE,500*

*KDELE,500*

*CSYS,4*

**GET,KNOG,KP,0,NUM,MAX*

*DX=0.5*BNOG*TAN(GNOG)*

*DZ=0.5*BNOG*TAN(GF*PI/180)*

*K,KNOG+1,-HNOG/2-DX,BNOG/2,DZ*

*K,KNOG+2,-HNOG/2+DX,-BNOG/2,-DZ*

*K,KNOG+3,HNOG/2+DX,-BNOG/2,-DZ*

*K,KNOG+4,HNOG/2-DX,BNOG/2,DZ*

*K,KNOG+5,-HNOG/2-DX,BNOG/2,-LNOG*

*K,KNOG+6,-HNOG/2+DX,-BNOG/2,-LNOG*

*K,KNOG+7,HNOG/2+DX,-BNOG/2,-LNOG*

*K,KNOG+8,HNOG/2-DX,BNOG/2,-LNOG*

3. Построить по ключевым точкам объём:

*V,KNOG+6,KNOG+7,KNOG+8,KNOG+5,KNOG+2,KNOG+3,KNOG+4,KNOG+1*

Сравнить полученный результат с рис.46 и 47:

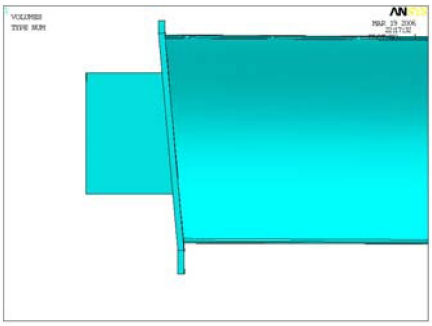

Рис.46. Модель, вид слева

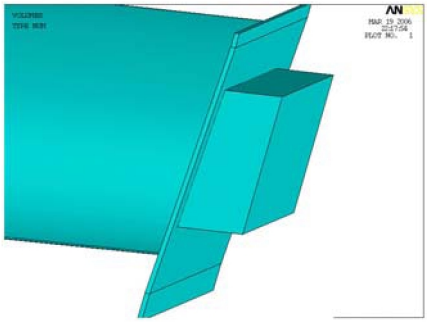

Рис.47. Ножка, полка и лопатка в изометрии

4. Построить конечно-элементную модель ножки.

5. Осуществить стыковку трактовой полки с удлиненной ножкой (рис.48).

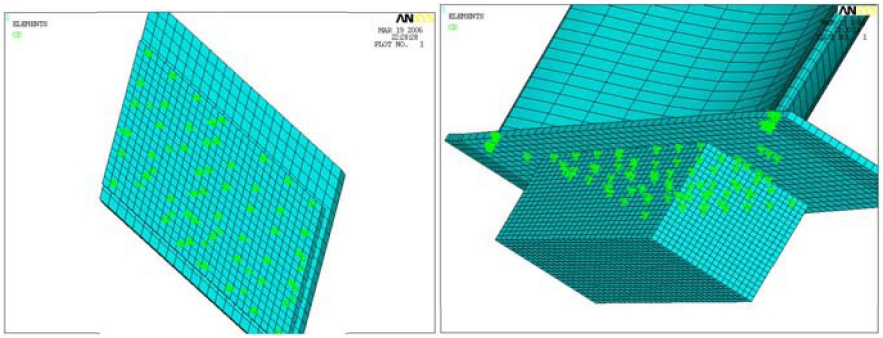

Рис.48. Контактирующие элементы ножки и трактовой полки, и их связи

## 1.6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХВОСТОВИКА «ЛАСТОЧКИН ХВОСТ» ПРИ НАЛИЧИИ УДЛИНЕННОЙ НОЖКИ

1. Скопировать все операторы построения хвостовика «ласточкин хвост». Внести в них следующие изменения с учетом рис.49:

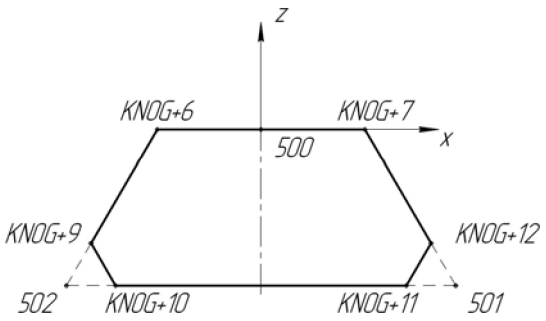


Рис.49. Ключевые точки на хвостовике «ласточкин хвост»

***XV=1 ! 1-ласточкин хвост; 2-ёлочный замок***
****IF,XV,EQ,1,THEN***
***!Расчёт параметров хвостовика***
***BN=.036***
***BETTA=70***
***RXV=.002***
***GUST=GNOG*PI/180***
***L=DISTKP(NMAX+1,NMAX+2)***
***BETTA=BETTA*PI/180***
***BV=DISTKP(KNOG+2,KNOG+3)***
***BV1=BV*COS(GUST)***
***ED=(BN-BV1)/2***
***CD=ED/COS(BETTA)***
***HXV=ED*TAN(BETTA)***
***DF=RXV/TAN(BETTA/2)***
***KF=DF/CD***
***KG=DF/BN***

*BN=BN/COS(GUST)*

*!*** 2*

*KBET,KNOG+6,KNOG+7,500,RATI,.5*

*KWPAVE,500*

*CSYS,4*

*!*** 3*

*K,501,BN/2,,-HXV*

*K,502,-BN/2,,-HXV*

*KBET,501,KNOG+7,KNOG+12,RATI,KF*

*KBET,502,KNOG+6,KNOG+9,RATI,KF*

*KBET,501,502,KNOG+11,RATI,KG*

*KBET,502,501,KNOG+10,RATI,KG*

*Kdele,500*

*Kdele,501*

*Kdele,502*

*!*** 4*

*A,KNOG+6,KNOG+9,KNOG+12,KNOG+7*

*A,KNOG+9,KNOG+10,KNOG+11,KNOG+12*

2. Разбить сечение хвостовика на конечные элементы (рис.50).

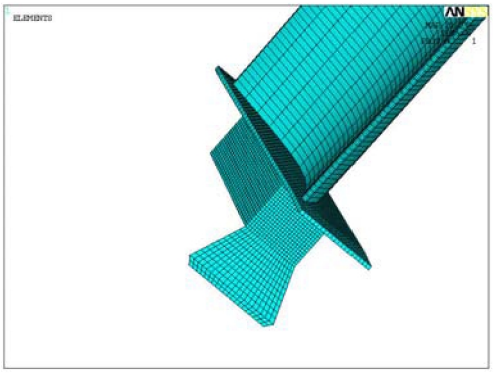

Рис.50. Сечение хвостовика, разбитое на КЭ

3. Построить конечно-элементную модель хвостовика, выдавливанием сечения вдоль линии (рис. 51, 52).

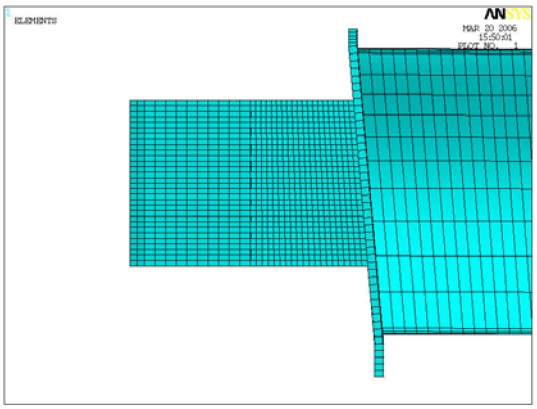

Рис.51. Конечно-элементная модель лопатки, трактовой полки, удлиненной ножки, хвостовика «ласточкин хвост», вид слева

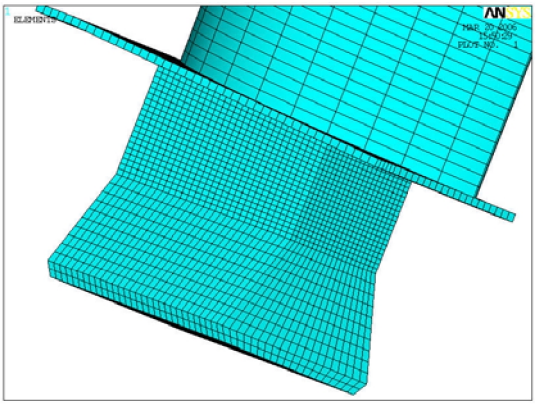

Рис.52. Конечно-элементная модель лопатки, трактовой полки, удлиненной ножки, хвостовика «ласточкин хвост», изометрия

## 1.7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕЛОЧНОГО ХВОСТОВИКА

На основании ОСТ 1 10975-73 схема ёлочного хвостовика выглядит следующим образом (рис.53):

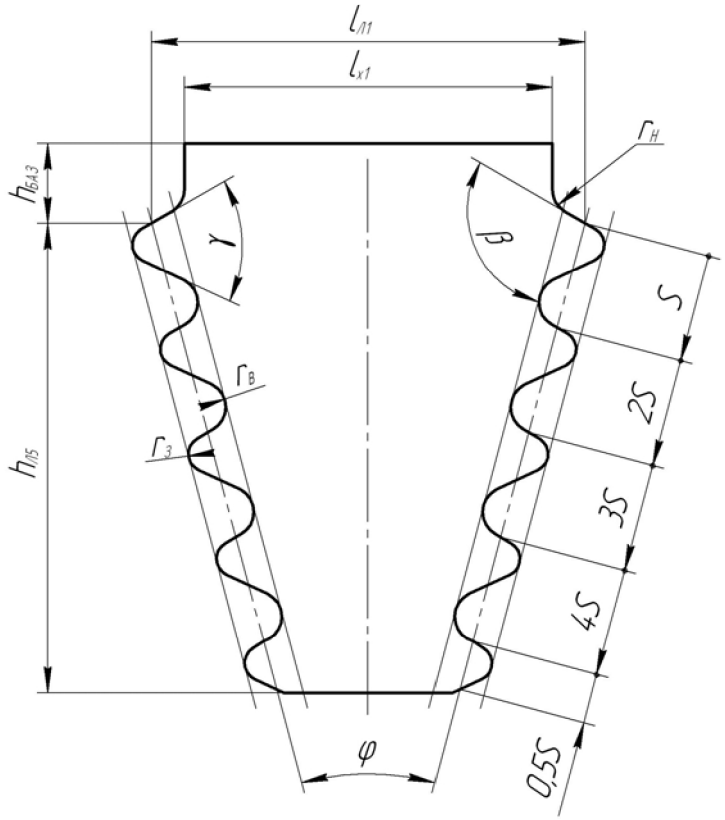


Рис.53. Схема хвостовика ёлочного типа (нормальное сечение)

Из рис.53 и ОСТ 1 10975-73 получаем следующие параметры, определяющие геометрию хвостовика в нормальном сечении:

$h_{Л5}$ - высота хвостовика;

$l_{Л1}$ - ширина хвостовика в базовой плоскости;

$l_{Х1}$ - ширина удлинённой ножки;

$S$ - шаг зубьев;

$r_з$ - радиус вершины зуба;

$r_в$ - радиус впадин;

$r_н$ - радиус сопряжения между хвостовиком и удлиненной ножкой;

$\varphi$ - угол, определяющий клиновидность хвостовика;

$\gamma$ - угол, определяющий клиновидность зуба;

$\beta$ - угол установки контактной поверхности зуба.

Изобразим фрагмент ёлочного хвостовика (рис.54):

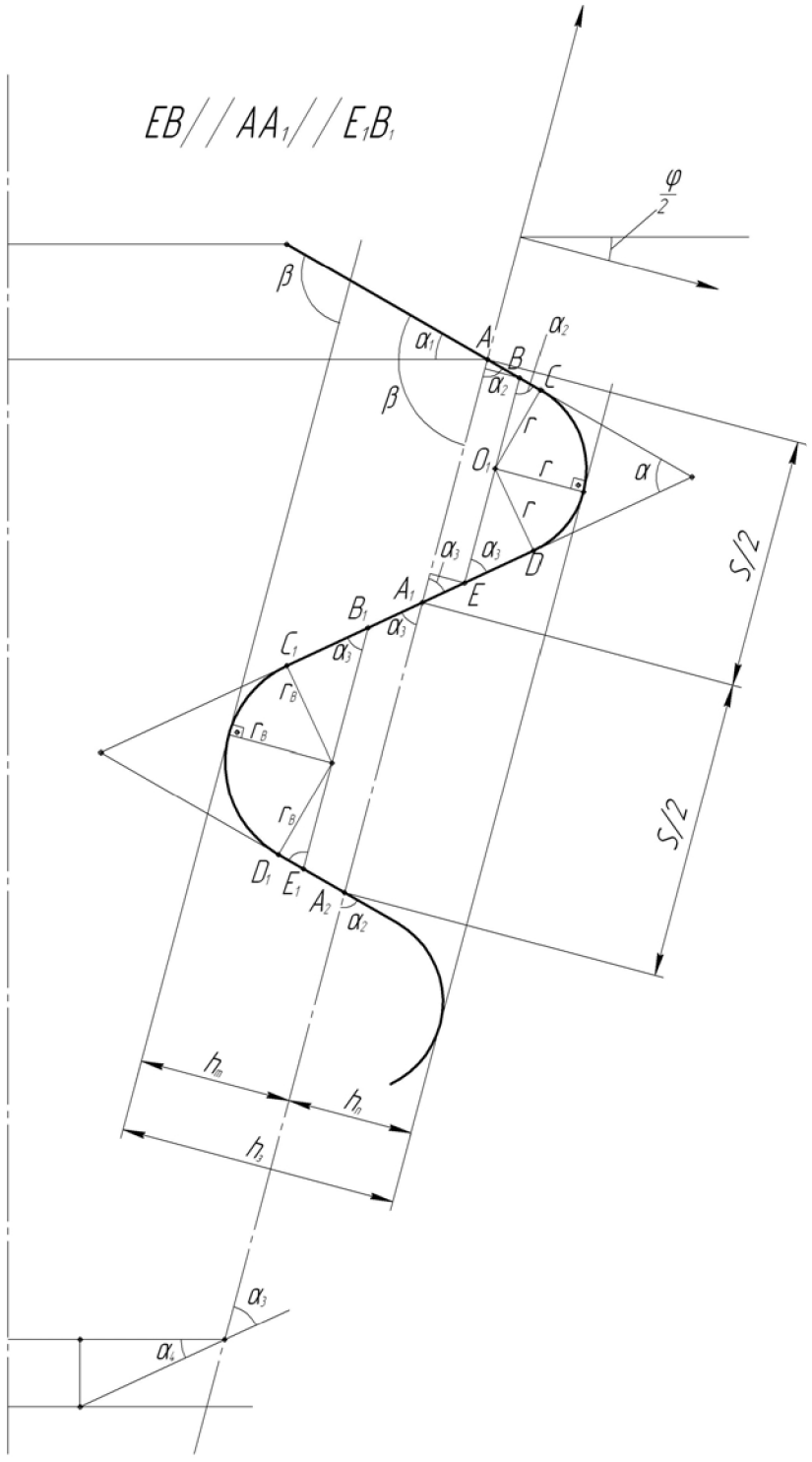


Рис.54. Геометрия вершин и впадин зубьев

Из рис.54 определяем:

$$\alpha_1 = \beta - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2}\right) = \beta + \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{2} = \beta + \frac{\varphi}{2} - 90\,,$$

$$\alpha_1 = \beta + \frac{\varphi}{2} - 90\ ,$$

$$\alpha_2 = 180 - \beta\,,$$

$$\alpha_3 = 180 - \gamma - \alpha_2 = \beta - \gamma\ ,$$

$$\alpha_3 = \beta - \gamma\ ,$$

$$\alpha_4 = 90 - \frac{\varphi}{2} - \alpha_3 = 90 - \frac{\varphi}{2} - \beta - \gamma\ ,$$

$$BC = \frac{r}{tg\alpha_2}\,,$$

$$AB = (h_n - r)/\sin\alpha_2\,,$$

$$AC = AB + BC = r/tg\alpha_2 + (h_n - r)/\sin\alpha_2\,,$$

$$EA_1 = (h_n - r)/\sin\alpha_3\,,$$

$$ED = r/tg\alpha_3\ ,$$

$$A_1D = ED + EA_1 = r/tg\alpha_3 + (h_n - r)/\sin\alpha_3\,,$$

$$h_m = h_3 - h_n\,,$$

$$A_1B_1 = (h_m - r_в)/\sin\alpha_3\,,$$

$$C_1B_1 = r_в/tg\alpha_3\,,$$

$$A_1C_1 = r_в/tg\alpha_3 + (h_m - r_в)/\sin\alpha_3\,,$$

$$E_1D_1 = r_в/tg\alpha_2\,,$$

$$E_1A_2 = (h_m - r_в)/\sin\alpha_2\,,$$

$$A_2D_1 = r_в/tg\alpha_2 + (h_m - r_в)/\sin\alpha_2\,.$$

Выполним следующие построения (рис.55):

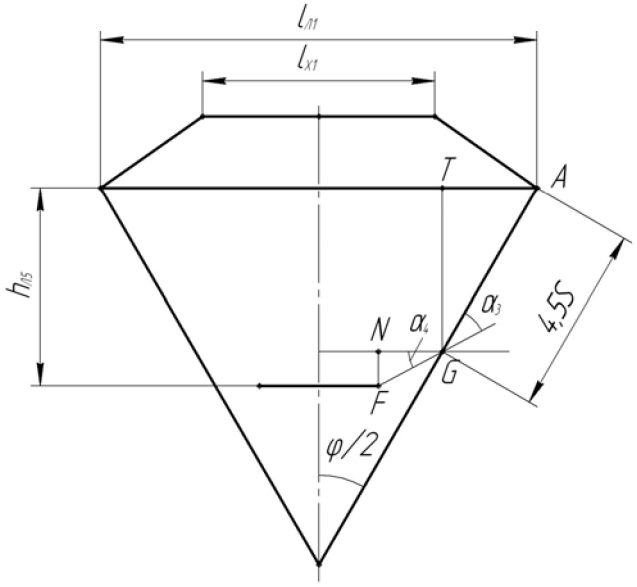


Рис.55. Определение геометрии хвостовика

Из рис.55 определяем: $NF = h_{Л5} - TG$,

$$NF = h_{Л5} - 4{,}5S\cos\frac{\varphi}{2},$$

$$FG = \frac{NF}{\sin\alpha_4} = \left(h_{Л5} - 4{,}5S\cos\frac{\varphi}{2}\right)/\sin\alpha_4 .$$

## 1.8. ПОСТРОЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ЕЛОЧНОГО ХВОСТОВИКА НА БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ОБОДА

Возьмём сечение хвостовика, симметрично расположенное относительно оси $Z_Г$ глобальной системы координат (рис.56). Начало локальной системы координат OXYZ располагаем на оси $Z_Г$ на поверхности хвостовика, по которой он контактирует с удлиненной ножкой. Ось Y локальной системы координат расположим вдоль хвостовика.

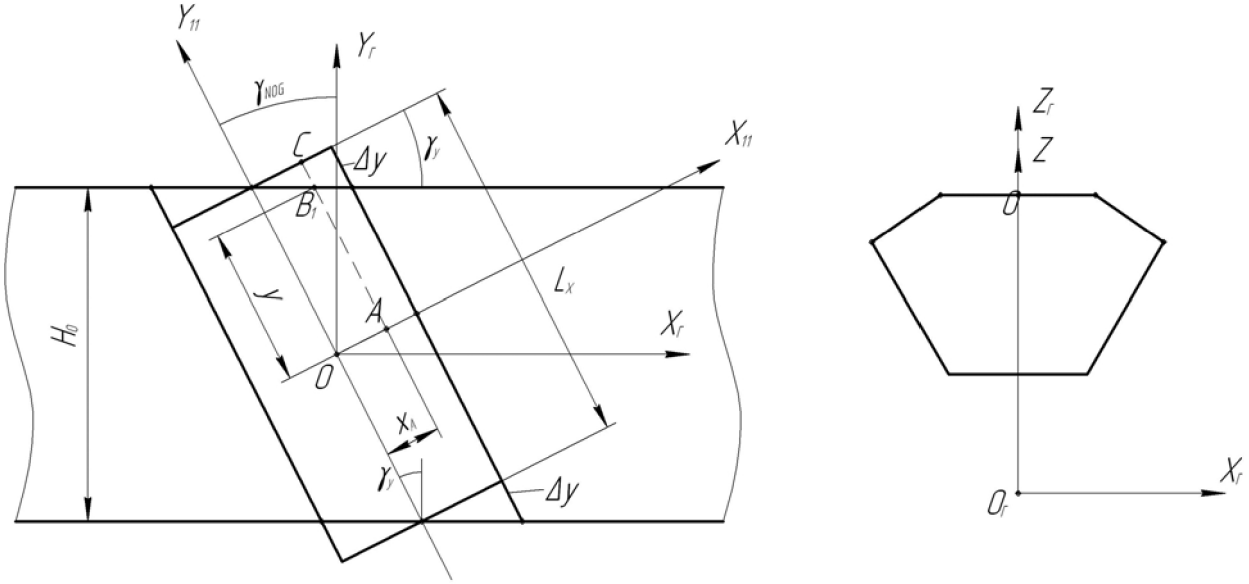


Рис.56. Геометрия обода ёлочного хвостовика

Из рис.56 определяем: $L_X = H_0/\cos\gamma_y$.

Пусть точка А лежит в выбранном нами сечении хвостовика и имеет координаты $x_A$, $y_A$ и $z_A$, примем $y_A = 0$.

Найдём координату проекции этой точки на боковую поверхность обода. На рисунке проекция обозначена точкой В. Очевидно, что $x_A = x_B$ (рис.57).

Из рис.56 и 57 определяем:

$$y_B = AC - CB_1 - ED,$$

$$AC = L_X/2,$$

$$CB_1 = x_A tg\gamma_y,$$

$$ED = -z_A tg\gamma_{ОБ},$$

$$EB = ED/\cos\gamma_y$$

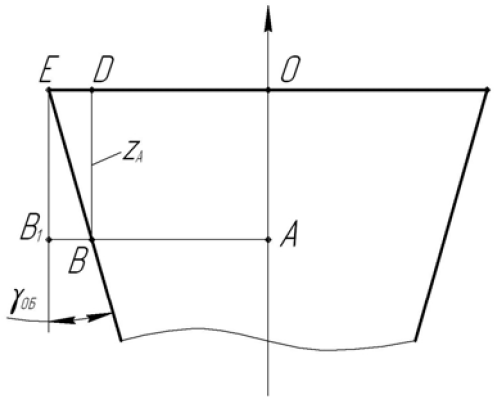


Рис.57. Геометрия обода в поперечном сечении

$$y_B = L_X / 2 + z_A tg\gamma_{ОБ} / \cos\gamma_y - x_A tg\gamma_y \ .$$

Построение хвостовика елочного типа показано на рис.58.

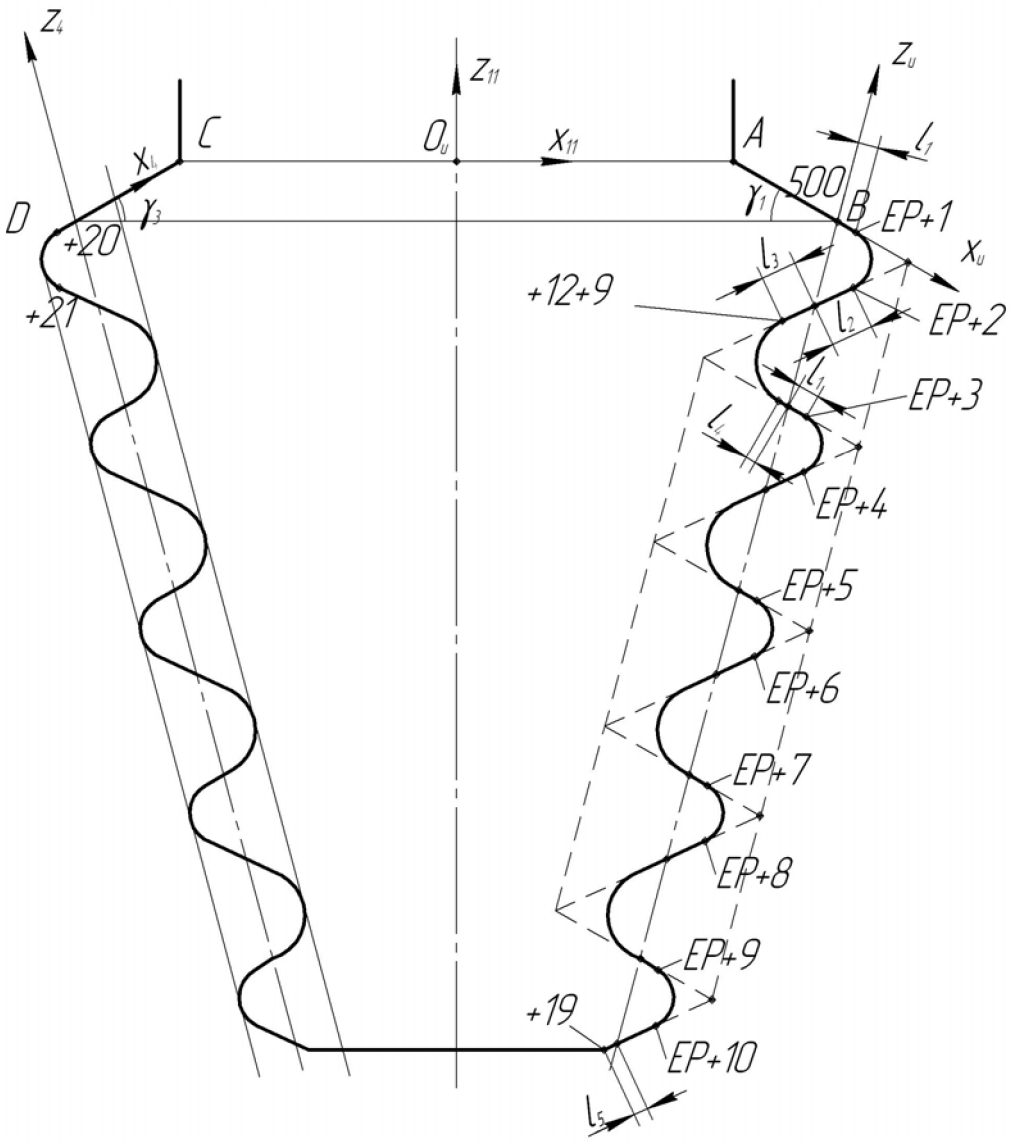


Рис.58. Построение хвостовика елочного типа

Из рис.58 можно определить:

$$l_1 = AC \ ; \ l_2 = A_1D \ ; \ l_3 = A_1C_1 \ ; \ l_4 = A_2D_1 \ ; \ l_5 = GF \ .$$

1. Задать параметры управления моделью:

***!Параметры управления моделью***

***BETTA=105***

***GAMMA=55***

***GOBOD=10***

***FI=30***

***S=0.003***

***RXV=0.0005***

***RBXV=0.0005***

***H3=0.001595***

***HN=0.000797***

***HM=H3-HN***

***LX1=0.02***

***LL1=0.022***

***HL5=0.01335***

***HO=BNOG***

2. Ввести операторы, позволяющие вычислить параметры ёлочного хвостовика:

***!Расчёт параметров ёлочного хвостовика***

****GET,EP,KP,0,NUM,MAX***

***RAD=3.14159/180***

***ALF1=(BETTA+FI/2-90)*RAD***

***ALF2=(180-BETTA)*RAD***

***ALF3=(BETTA-GAMMA)*RAD***

***ALF4=(90-BETTA-FI/2+GAMMA)*RAD***

***G1=BETTA+FI/2-90***

***G2=-(90-BETTA+GAMMA-FI/2)***

***L1=RXV/TAN(ALF2)+(HN-RXV)/SIN(ALF2) !AC***

***L2=RXV/TAN(ALF3)+(HN-RXV)/SIN(ALF3) !A1D***

***L3=RBXV/TAN(ALF3)+(HM-RBXV)/SIN(ALF3) !A1C1***

***L4=RBXV/TAN(ALF2)+(HM-RBXV)/SIN(ALF2) !A2D1***

***L5=(HL5-4.5*S*COS(FI/2*RAD))/SIN(ALF4)***

***LX=HO/COS(GNOG*RAD)***

3. Построить локальную систему координат, в которой будет создаваться конечно-элементная модель хвостовика.

   3.1. Построить ключевые точки, на основе которых будет строиться локальная системы координат (рис.59):

***K,500,0,0,KZ(KNOG+5)***

***K,501,0.01,0.01*TAN(GNOG*RAD),KZ(KNOG+5)***

   3.2. Создать на ключевых точках ***500***, ***501*** и ***KNOG+5*** локальную систему координат №11.

   3.3. Сделать локальную систему координат активной.

   3.4. Уничтожить ключевые точки ***KP500*** и ***KP501.***

4. Построить ключевые точки, определяющие проекцию сечения хвостовика на боковые

поверхности обода:

***K,500,LL1/2,0,-(LL1-LX1)/2*TAN(ALF1)***
***KWPAVE,500***

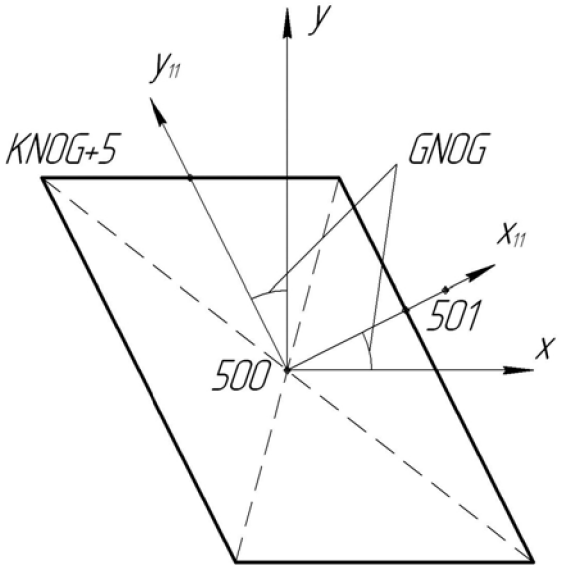


Рис.59. Построение локальной системы координат

4.1. Создать локальную систему координат №12 у которой ось $z_{12}$ совпадает с линией $AA_2$ (рис.60):

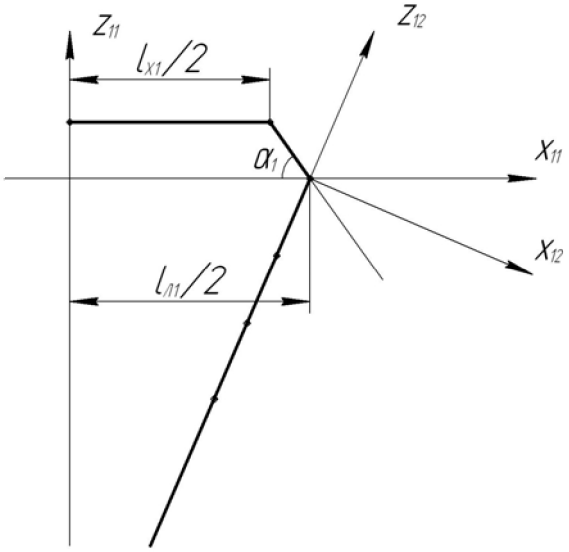


Рис.60. Локальная система координат №12

***WPRO,,,FI/2***
***CSWPLA,12,0,1,1***
***WPRO,,,-FI/2+G1***

5. Построить точки хвостовика:

***!ПОСТРОЕНИЕ ТОЧЕК ХВОСТОВИКА***
***!ПРАВАЯ ЧАСТЬ***
****DO,JX,1,5***
***CSYS,12***

*K,502,0,0,-S*(JX-1)*

*KWPAVE,502*

*CSYS,4*

*K,501,L1,0,0 !Точка 501 это точка А, которая проецируется на боковые поверхности обода*

*CSYS,11*

*LAP=LX/2-KX(501)*TAN(GNOG*RAD)+KZ(501)*TAN(GOB)/COS(GNOG*RAD)*

*LAM=-LX/2-KX(501)*TAN(GNOG*RAD)-KZ(501)*TAN(GOB)/COS(GNOG*RAD)*

*K,EP+2*JX-1,KX(501),LAP,KZ(501)*

*K,EP+2*(JX-1)+20,KX(501),LAM,KZ(501)*

*KDELE,501*

*KDELE,502*

**ENDDO*

**DO,JX,1,4*

*CSYS,12*

*K,502,0,0,-S*(JX)*

*KWPAVE,502*

*CSYS,4*

*K,501,-L4,0,0*

*CSYS,11*

*LAP=LX/2-KX(501)*TAN(GNOG*RAD)+KZ(501)*TAN(GOB)/COS(GNOG*RAD)*

*LAM=-LX/2-KX(501)*TAN(GNOG*RAD)-KZ(501)*TAN(GOB)/COS(GNOG*RAD)*

*K,EP+2*JX+10,KX(501),LAP,KZ(501)*

*K,EP+2*JX+29,KX(501),LAM,KZ(501)*

*KDELE,501*

*KDELE,502*

**ENDDO*

*!---------------------------*

*WPRO,,,-G1*

*WPRO,,,G2*

**DO,JX,1,5*

*CSYS,12*

*K,502,0,0,-S*(JX-1)-S/2*

*KWPAVE,502*

*CSYS,4*

*K,501,L2,0,0*

*CSYS,11*

*LAP=LX/2-KX(501)*TAN(GNOG*RAD)+KZ(501)*TAN(GOB)/COS(GNOG*RAD)*

*LAM=-LX/2-KX(501)*TAN(GNOG*RAD)-KZ(501)*TAN(GOB)/COS(GNOG*RAD)*

*K,EP+2*JX,KX(501),LAP,KZ(501)*

*K,EP+2*JX+19,KX(501),LAM,KZ(501)*

*KDELE,501*

*KDELE,502*
**ENDDO*

**DO,JX,1,4*
*CSYS,12*
*K,502,0,0,-S*(JX-1)-S/2*
*KWPAVE,502*
*CSYS,4*
*K,501,-L3,0,0*
*CSYS,11*
*LAP=LX/2-KX(501)*TAN(GNOG*RAD)+KZ(501)*TAN(GOB)/COS(GNOG*RAD)*
*LAM=-LX/2-KX(501)*TAN(GNOG*RAD)-KZ(501)*TAN(GOB)/COS(GNOG*RAD)*
*K,EP+2*JX+9,KX(501),LAP,KZ(501)*
*K,EP+2*JX+28,KX(501),LAM,KZ(501)*
*KDELE,501*
*KDELE,502*
**ENDDO*
*!------------------------*

Аналогичные операции выполним для второй половины хвостовика:

**GET,EL,KP,0,NUM,MAX*
*CSYS,11*
*K,500,-LL1/2,0,-(LL1-LX1)/2*TAN(ALF1)*
*KWPAVE,500*
*WPRO,,,-FI/2*
*CSWPLA,12,0,1,1*
*WPRO,,,FI/2-G1*
**DO,JX,1,5*
.
.
.
*K,501,-L1,0,0*
*CSYS,11*
.
.
.

6. Построить дуги окружностей:

*!Строим дуги*
**DO,JX,1,5*
*LARC,EP+2*JX-1,EP+2*JX,EL+2*JX-1,RXV*
*LARC,EP+19+2*JX-1,EP+19+2*JX,EL+19+2*JX-1,RXV*
*LARC,EL+2*JX-1,EL+2*JX,EP+2*JX-1,RXV*
*LARC,EL+19+2*JX-1,EL+19+2*JX,EP+19+2*JX-1,RXV*
**ENDDO*

**DO,JX,1,4*

*LARC,EP+2*JX-1+10,EP+2*JX+10,EP+2*JX-1,RXV*

*LARC,EP+19+2*JX-1+10,EP+19+2*JX+10,EP+19+2*JX-1,RXV*

*LARC,EL+2*JX-1+10,EL+2*JX+10,EL+2*JX-1,RXV*

*LARC,EL+19+2*JX-1+10,EL+19+2*JX+10,EL+19+2*JX-1,RXV*

**ENDDO*

Результат сравнить с рис. 61.

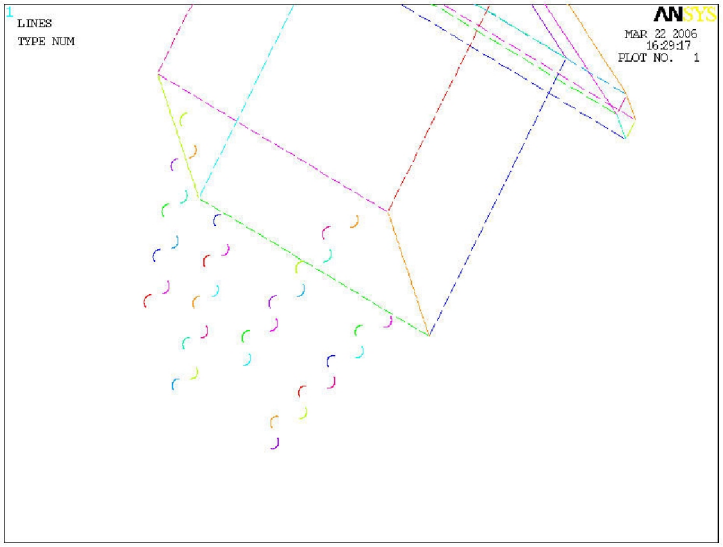


Рис.61. Дуги на зубьях и впадинах хвостовика елочного типа

7. Построить объёмную модель хвостовика:

*V,EP,EP-1,EP-2,EP-3,EP+1,EP+20,EL+20,EL+1*

Остальные 19 объёмов построить аналогично. Сравнить результат с рис.62.

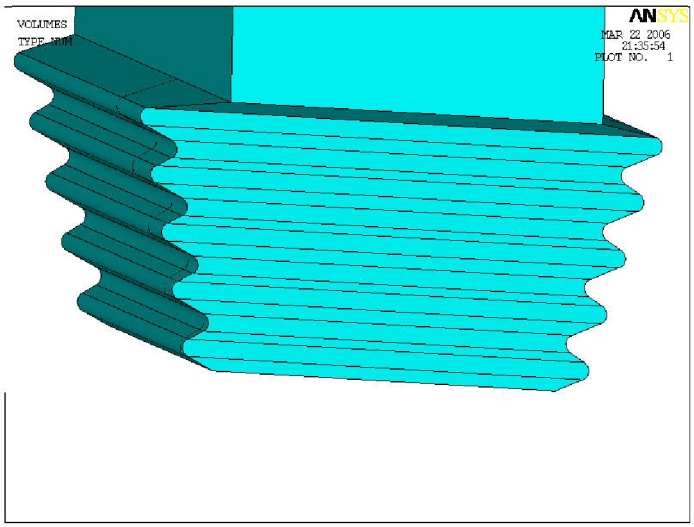


Рис.62. Объёмная модель хвостовика

8. Построить конечно-элементную модель сечения. Количество конечных элементов на линиях сечения показано на рис.63.

Построить конечно-элементную модель хвостовика выдавливанием плоских элементов. Число слоёв элементов вдоль хвостовика NXV=20.

8.1. Определить номера составных объёмов хвостовика и номера поверхностей,

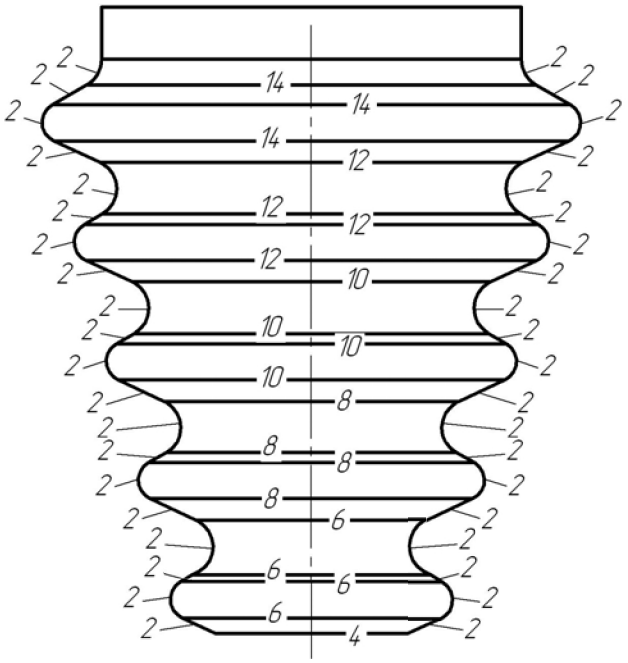


Рис.63. Количество конечных элементов на линиях сечения

образующих торцовые плоскости.

8.2. Выбрать оператором ***Select*** составной объём хвостовика, который контактирует с удлиненной ножкой.

8.3. Выбрать оператором ***Select*** поверхности образующие данный объём.

8.4. Построить конечно-элементную модель выбранного объёма:

***PrPr → Mesh → Volume Sweep → Sweep Opts***

***Val1=20 ! Число слоёв конечных элементов при выдавливании***

***Aclear=YES ! Уничтожение плоской конечно-элементной модели при выдавливании***

***OK***

***MM → PrPr → Mesh → Sweep***

Выбрать объём, в котором будет выдавливаться сетка. Нажать ОК.

Выбрать поверхность, на которой создана конечно-элементная модель. Нажать ОК.

Выбрать противоположную поверхность, по направлению к которой будет выдавливаться плоская сетка. Нажать ОК.

8.5. Проделать аналогичные операции для других составных объёмов хвостовика

***EXTOPT,ACLEAR,1***

***EXTOPT,VSWE,AUTO,0***

***EXTOPT,ESIZE,20,0***

****DO,JX,1,19***

***VSWEEP,1004+(Jx-1),1025+5*(jx-1),1023+5*(jx-1)***

****ENDDO***

Сравнить результат с рис.64.

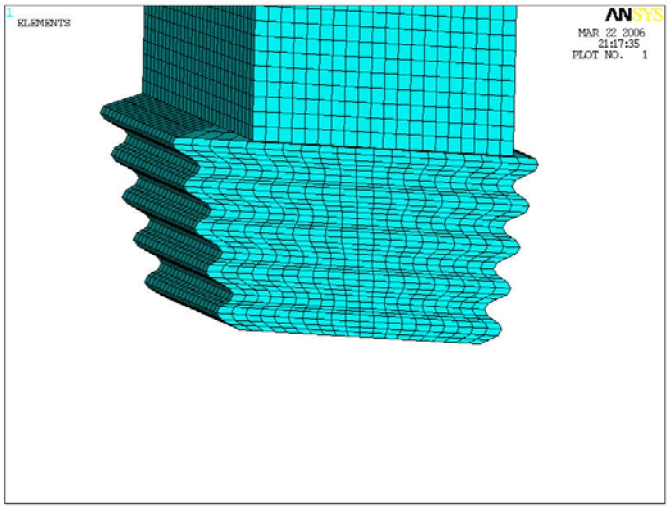


Рис.64. Конечноэлементная модель хвостовика елочного типа

9. Склеить хвостовик с удлинённой ножкой (рис.65).

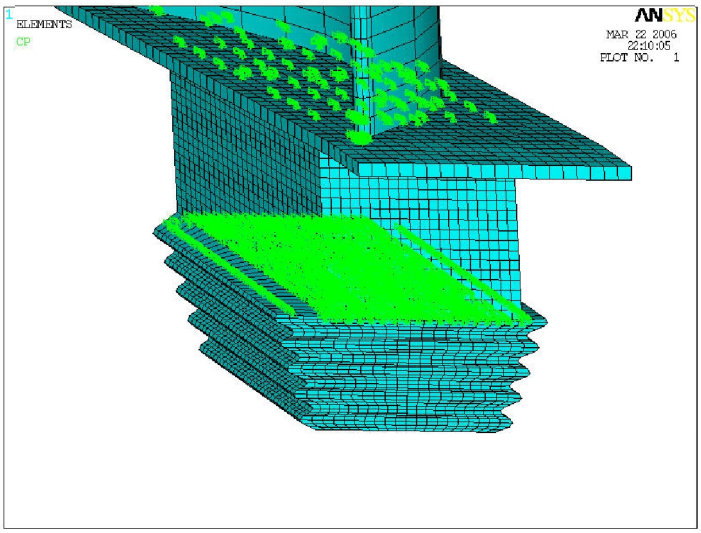


Рис.65. Связи узлов удлинённой ножки и хвостовика

# 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЛОПАТКУ

1. Создать для номеров узлов, расположенных на поверхности корытца профиля, массив ***MNU*** размерностью 100x100:

****DIM,MNU,ARRAY,100,100***

2. Выбрать оператором ***Select*** поверхность корытца, расположенную между втулочным и средним сечениями лопатки (рис.66):

***ASEL,S,,,NS1***

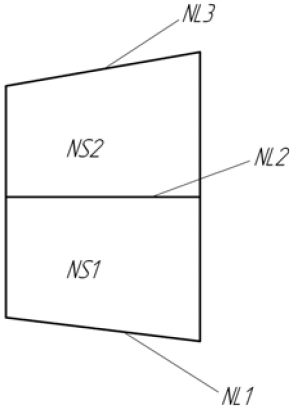


Рис. 66. Линии и поверхности корытца лопатки

3. Выбрать оператором ***Select*** узлы, расположенные на поверхности корытца ***NS1***:

***NSLA,S,1***

4. Записать номера узлов в массив MNU. ML – число конечных элементов, расположенных по длине поверхности, MB – число конечных элементов, расположенных по ширине поверхности корытца (рис. 67):

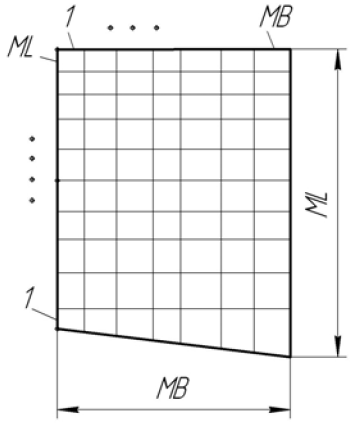


Рис. 67. Количество конечных элементов на поверхности корытца лопатки

4.1. Организовать цикл по количеству узлов на линии NL1:

****DO,J,1,MB+1***

4.2. Построить на линии ***NL1*** точку ***KP500,*** которая делит длину линии ***NL1*** в пропорции ***(J-1)/MB***: ***KL,32,(J-1)/MB,500***

4.3. Построить на линии NL2 точку ***KP600, которая делит длину в пропорции (J-1)/MB***:

***KL,34,(J-1)/MB,600***

4.4. Построить по точкам ***KP500*** и ***KP600*** линию ***NL4***:

***LSTR,500,600***

4.5. Организовать цикл по количеству узлов, расположенных по длине поверхности ***NS1***:

****DO,JJ,1,ML+1***

4.6. Построить на линии ***NL4*** ключевую точку ***KP700***, которая делит длину данной линии в пропорции ***(J1-1)/ML***:

***KL,NL4,(JJ-1)/ML,700***

4.7. Записать в массив ***MNU*** номер узла , наиболее близко расположенного к точке ***KP700***:

***MNU(J1,J)=NODE(KX(700),KY(700),KZ(700))***

4.8. Записать операторы:

***KDELE,700***
****ENDDO***
***LDELE,NL4***
***KDELE,500***
***KDELE,600***
****ENDDO***
***ALLSEL,ALL***

4.9. Выбрать оператором ***Select*** поверхность корытца ***NS2*** и связанные с ней узлы:

***ASEL,S,,,107***
***NSLA,S,1***

4.10. Построить на линиях ***NL2*** и ***NL3*** ключевые точки ***KP500*** и ***KP600***:

****DO,J,1,MB+1***
***KL,NL2,(J-1)/MB,500***
***KL,NL3,(J-1)/MB,600***

4.11. Построить по ключевым точкам ***KP500*** и ***KP600*** линию ***NL4*** и на ней ключевую точку ***KP700***

***LSTR,500,600***
****DO,J1,1,ML***
***KL,NL4,J1/ML,700***

4.12. Записать в массив ***MNU*** номер узла наиболее близко расположенного к точке ***KP700***:

***MNU(J1+1+ML,J)=NODE(KX(700),KY(700),KZ(700))***

4.13. Записать операторы:

***KDELE,700***
****ENDDO***
***LDELE,169***
***KDELE,500***
***KDELE,600***
****ENDDO***
***ALLSEL,ALL***

***5.*** Определить интенсивность газовой нагрузки в сечениях лопатки на трех радиусах (рис.68):

****DIM,PGU,ARRAY,3***
****DIM,PGA,ARRAY,3***

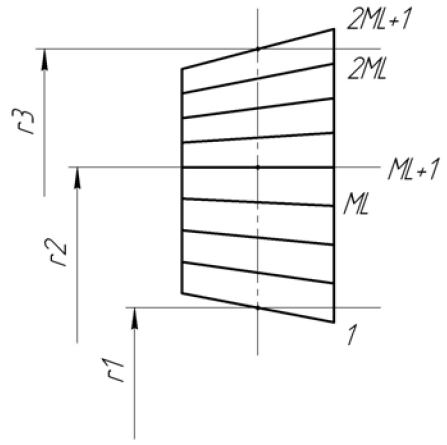


Рис.68. Разделение поверхности корытца лопатки

Газовая нагрузка в окружном и осевом направлениях определяется по формулам:

$$PGU(Y) = -\frac{2\pi r}{z}\rho_1 C_{1a}\left(C_{2u} - C_{1u}\right);$$

$$PGA(Y) = \frac{2\pi r}{z}\left[\left(p_1 - p_2\right) + \rho_1 C_{1a}^2 - \rho_2 C_{2a}^2\right].$$

Алгоритм реализации:

***DIM,PGU,ARRAY,3***
***DIM,PGA,ARRAY,3***
***DIM,RRR,ARRAY,3***
***RRR(1,1)=0.0604,0.792,0.98***
***DO,J,1,3***
***PGU(J)=-2*pi*RRR(J)*Ro(J,1)*C_a(J,1)*(C_u(J,2)-C_u(J,1))/Z*(RRR(2)-RRR(1))***
***PGA(J)=2*pi*RRR(J)*((P(J,1)-P(J,2))+Ro(J,1)*C_a(J,1)*C_a(J,1)-***
***Ro(J,2)*C_a(J,2)*C_a(J,2))/Z*(RRR(2)-RRR(1))***
***ENDDO***

6. Определить интенсивности газовой нагрузки во всех промежуточных сечениях:

$$PGUR = AU\left(r - r_2\right)\left(r - r_1\right) + BU\left(r - r_1\right) + CU;$$

$$PGAR = AA\left(r - r_2\right)\left(r - r_1\right) + BA\left(r - r_1\right) + CA.$$

Легко доказать, что

$$CA = PGA(1); \qquad CU = PGU(1);$$

$$BA = \frac{PGA(2) - PGA(1)}{r_2 - r_1};$$

$$BU = \frac{PGU(2) - PGU(1)}{r_2 - r_1};$$

$$AA = \frac{PGA(3) - PGA(1)}{\left(r_3 - r_2\right)\left(r_3 - r_1\right)} - \frac{PGA(2) - PGA(1)}{\left(r_3 - r_2\right)\left(r_2 - r_1\right)};$$

$$AU = \frac{PGU(3) - PGU(1)}{\left(r_3 - r_2\right)\left(r_3 - r_1\right)} - \frac{PGU(2) - PGU(1)}{\left(r_3 - r_2\right)\left(r_2 - r_1\right)}.$$

Алгоритм реализации:

```
CA=PGA(1)
CU=PGU(1)
BA=(PGA(2)-PGA(1))/(RRR(2)-RRR(1))
BU=(PGU(2)-PGU(1))/(RRR(2)-RRR(1))
AA=(PGA(3)-PGA(1))/((RRR(3)-RRR(2))*(RRR(3)-RRR(1)))-(PGA(2)-PGA(1))/((RRR(3)-
RRR(2))*(RRR(2)-RRR(1)))
AU=(PGU(3)-PGU(1))/((RRR(3)-RRR(2))*(RRR(3)-RRR(1)))-(PGU(2)-PGU(1))/((RRR(3)-
RRR(2))*(RRR(2)-RRR(1)))

*DIM,PGUR,ARRAY,200
*DIM,PGAR,ARRAY,200
*DIM,RR,ARRAY,200

RR(1)=RRR(1)
RR(ML+1)=RRR(2)
RR(2*ML+1)=RRR(3)
dR1=(RRR(2)-RRR(1))/ML        ! ШАГ
dR2=(RRR(3)-RRR(2))/ML
! ЦИКЛ ЗАПОЛНЕНИЯ РАДИУСОВ
*DO,J,1,ML-1
RR(J+1)=RR(J)+dR1
RR(J+ML+1)=RR(J+ML)+dR2
*ENDDO
*DO,J,1,2*ML+1
PGUR(J)=AU*(RR(J)-RRR(2))*(RR(J)-RRR(1))+BU*(RR(J)-RRR(1))+CU
PGAR(J)=AA*(RR(J)-RRR(2))*(RR(J)-RRR(1))+BA*(RR(J)-RRR(1))+CA
*ENDDO
*DO,J,1,2*ML+1
PGUR(J)=AU*(RR(J)-RRR(2))*(RR(J)-RRR(1))+BU*(RR(J)-RRR(1))+CU
PGAR(J)=AA*(RR(J)-RRR(2))*(RR(J)-RRR(1))+BA*(RR(J)-RRR(1))+CA
*ENDDO
```

7. Аппроксимировать газовую нагрузку между сечениями линейной функцией (рис.69):

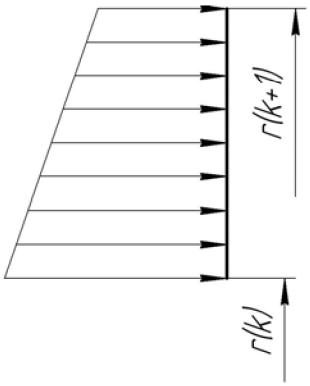


Рис.69. Газовая нагрузка между сечениями

$$PGAR = DA + r + EA;$$
$$PGUR = DU + r + EU.$$

Легко показать, что

$$DA = \frac{PGAR(r_{k+1}) - PGAR(r_k)}{r_{k+1} - r_k},$$
$$DU = \frac{PGUR(r_{k+1}) - PGUR(r_k)}{r_{k+1} - r_k}.$$
$$EA = \frac{r_{k+1} \cdot PGAR(r_k) - r_k \cdot PGAR(r_{k+1})}{r_{k+1} - r_k},$$
$$EU = \frac{r_{k+1} \cdot PGUR(r_k) - r_k \cdot PGUR(r_{k+1})}{r_{k+1} - r_k}.$$

Алгоритм реализации:

```
*DIM,DA,ARRAY,200
*DIM,DU,ARRAY,200
*DIM,EA,ARRAY,200
*DIM,EU,ARRAY,200

*DO,J,1,2*ML
DA(J)=(PGAR(J+1)-PGAR(J))/(RR(J+1)-RR(J))
DU(J)=(PGUR(J+1)-PGUR(J))/(RR(J+1)-RR(J))
EA(J)=(PGAR(J)*RR(J+1)-PGAR(J+1)*RR(J))/(RR(J+1)-RR(J))
EU(J)=(PGUR(J)*RR(J+1)-PGUR(J+1)*RR(J))/(RR(J+1)-RR(J))
*ENDDO
```

8. Привести погонную газовую нагрузку к сосредоточенным силам, действующим в ***2ML+1*** сечениях (рис.70):

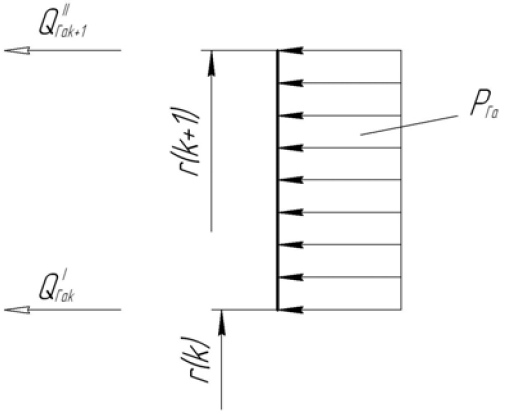


Рис.70. Приведение погонной газовой нагрузки к сосредоточенным силам

$$R_Q = Q'_{Гак} + Q''_{Гак+1},$$
$$M_Q = (r_{k+1} - r_k)Q''_{Гak+1},$$
$$R_P = \int_{r_k}^{r_{k+1}} P_{Га} dr,$$

$$M_P = \int_{r_k}^{r_{k+1}} P_{Га}(r - r_k)dr,$$

$$R_Q = R_P \ ; \ M_Q = M_P.$$

Это позволит записать:

$$Q'_{Гак} + Q''_{Гак+1} = \int_{r_k}^{r_{k+1}} P_{Га}dr,$$

$$Q''_{Гак+1} = \frac{1}{r_{k+1} - r_k} \int_{r_k}^{r_{k+1}} P_{Га}(r - r_k)dr.$$

Откуда находим:

$$Q''_{Гак+1} = \frac{1}{r_{k+1} - r_k} \int_{r_k}^{r_{k+1}} P_{Га} r dr - r_k \frac{1}{r_{k+1} - r_k} \int_{r_k}^{r_{k+1}} P_{Га}dr,$$

$$Q'_{Гак+1} = r_{k+1} \frac{1}{r_{k+1} - r_k} \int_{r_k}^{r_{k+1}} P_{Га}dr - \frac{1}{r_{k+1} - r_k} \int_{r_k}^{r_{k+1}} P_{Га} r dr,$$

или

$$Q'_{Гак} = r_{k+1} J_k - I_k,$$

$$Q''_{Гак+1} = I_k - r_k J_k,$$

где $J_K = \frac{1}{r_{k+1} - r_k} \int_{r_k}^{r_{k+1}} P_{Га}dr = \frac{1}{r_{k+1} - r_k} \int_{r_k}^{r_{k+1}} (DAr + EA)dr = \frac{1}{2} DA(r_{k+1} + r_k) + EA,$

$$I_K = \frac{1}{r_{k+1} - r_k} \int_{r_k}^{r_{k+1}} P_{Га} r dr = \frac{1}{r_{k+1} - r_k} \int_{r_k}^{r_{k+1}} (DAr^2 + EAr)dr = \frac{1}{3} DA(r_{k+1}^2 + r_{k+1} r_k + r_k^2) + \frac{1}{2} EA(r_{k+1} + r_k).$$

Алгоритм реализации:

```
*DIM,JKA,ARRAY,200
*DIM,IKA,ARRAY,200
*DIM,JKU,ARRAY,200
*DIM,IKU,ARRAY,200

*DO,J,1,2*ML
JKA(J)=0.5*DA(J)*(RR(J+1)+RR(J))+EA(J)

IKA(J)=DA(J)/3*(RR(J+1)*RR(J+1)+RR(J+1)*RR(J)+RR(J)*RR(J))+0.5*EA(J)*(RR(J+1)+
RR(J))
JKU(J)=0.5*DU(J)*(RR(J+1)+RR(J))+EU(J)

IKU(J)=DU(J)/3*(RR(J+1)*RR(J+1)+RR(J+1)*RR(J)+RR(J)*RR(J))+0.5*EU(J)*(RR(J+1)+
RR(J))
*ENDDO
```

Сложение сил, действующих в соседних сечениях, показано на рис. 71.

```
*DIM,QA,ARRAY,200
*DIM,QU,ARRAY,200
```

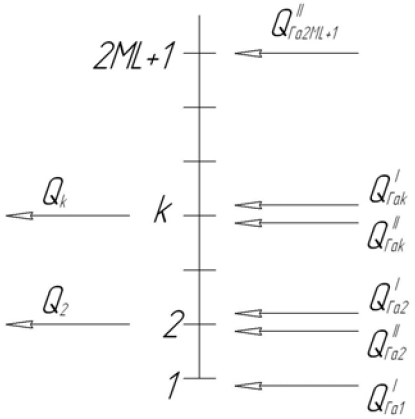


Рис. 71. Сложение сил, действующих в соседних сечениях

***QA(1)=RR(2)*JKA(1)-IKA(1)***
***QU(1)=RR(2)*JKU(1)-IKU(1)***
***QA(2*ML+1)=IKA(2*ML)-RR(2*ML)*JKA(2*ML)***
***QU(2*ML+1)=IKU(2*ML)-RR(2*ML)*JKU(2*ML)***
****DO,J,2,2*ML***
***QA(J)=RR(J+1)*JKA(J)-IKA(J)+IKA(J-1)-RR(J-1)*JKA(J-1)***
***QU(J)=RR(J+1)*JKU(J)-IKU(J)+IKU(J-1)-RR(J-1)*JKU(J-1)***
****ENDDO***

9. Распределить сосредоточенные силы по узлам корытца. Используем систему координат $X_1\,Y_1$, связанную с центром тяжести сечения лопатки (рис.72):

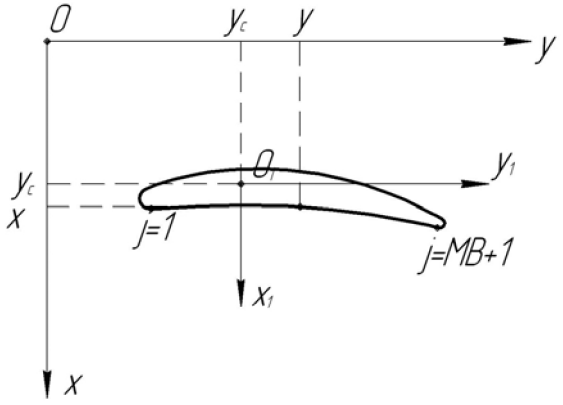


Рис.72. Система координат, связанная с центром тяжести сечения

В этой системе координат получаем: $x_1 = x - x_c$,

$$y_1 = y - y_c .$$

Суммарный вектор газовой нагрузки показан на рис. 73.

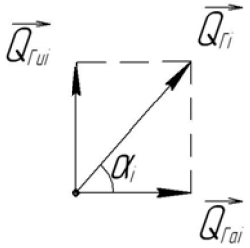

Рис.73. Суммарный вектор газовой нагрузки

$$\vec{Q}_{Гi} = \vec{Q}_{Гai} + \vec{Q}_{Гui},$$

$$Q_{Гi} = \sqrt{Q_{Гai}^2 + Q_{Гui}^2}.$$

$$\cos\alpha_i = \frac{|Q_{Гai}|}{Q_{Гi}}; \sin\alpha_i = \frac{|Q_{Гui}|}{Q_{Гi}}.$$

Положение векторов газовой нагрузки для компрессора и турбины показано на рис.74.

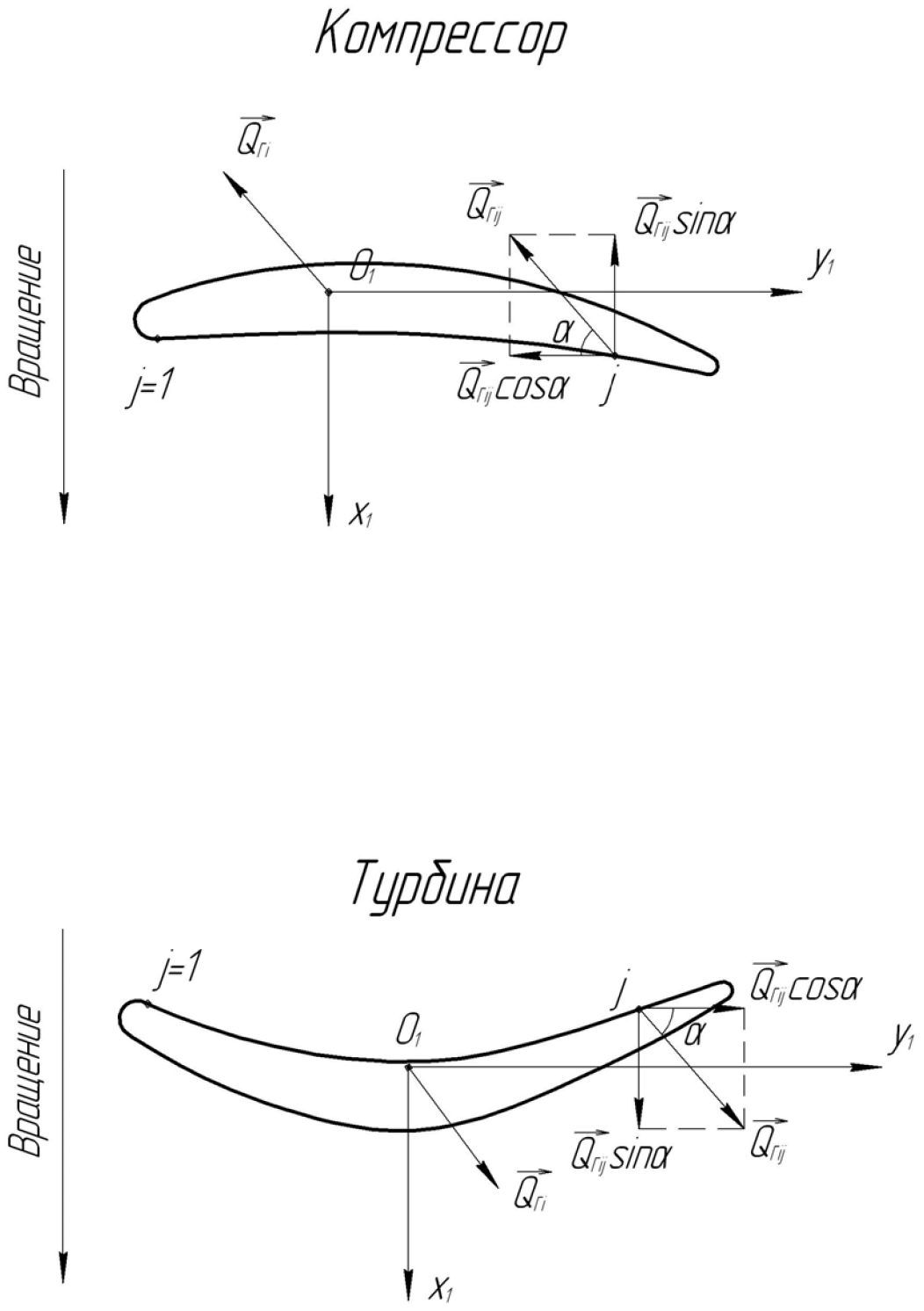


Рис.74. Векторы газовой нагрузки для компрессора и турбины

Примем следующие допущения:

1. Все узловые векторы коллинеарные.
2. Газовая нагрузка распределена по узлам по линейному закону.

$$Q_{\Gamma ij} = AJY_{1ij} + BJ\,.$$

Условия эквивалентного перехода:

$$\sum_{j=1}^{MB+1} Q_{\Gamma ij} = Q_{\Gamma i}\,,$$

$$\mp \sum_{j=1}^{MB+1} Q_{\Gamma ij} \cos\alpha_i x_{1ij} \pm \sum_{j=1}^{MB+1} Q_{\Gamma ij} \sin\alpha_i y_{1ij} = 0\,.$$

Верхний знак для компрессора, нижний – для турбины. Видно, что условия совпадают:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{MB+1} \left(AJ \cdot y_{1ij} + BJ\right) = Q_{\Gamma i}, \\ -\sum_{j=1}^{MB+1} \left(AJ \cdot y_{1ij} + BJ\right) x_{1ij} \cos\alpha_i + \sum_{j=1}^{MB+1} \left(AJ \cdot y_{1ij} + BJ\right) y_{1ij} \sin\alpha_i = 0. \end{cases}$$

Из первого уравнения находим:

$$AJ \cdot \sum_{j=1}^{MB+1} y_{1ij} + (MB+1)BJ = Q_{\Gamma i}\,,$$

$$BJ = \frac{1}{MB+1}\left[ Q_{\Gamma i} - \left( \sum_{j=1}^{MB+1} y_{1ij} \right) AJ \right].$$

Подставляя BJ во второе уравнение, получим:

$$AJ = \frac{Q_{\Gamma i}\left( \cos\alpha_i \sum_{j=1}^{m} x_{1ij} - \sin\alpha_i \sum_{j=1}^{m} y_{1ij} \right)}{\cos\alpha_i \left[ \sum_{j=1}^{MB+1} y_{1ij} \cdot \sum_{j=1}^{MB+1} x_{1ij} - (MB+1) \sum_{j=1}^{MB+1} x_{1ij} y_{1ij} \right] + \sin\alpha_i \left[ (MB+1) \sum_{j=1}^{MB+1} y_{1ij}^2 - \sum_{j=1}^{MB+1} y_{1ij} \cdot \sum_{j=1}^{MB+1} x_{1ij} \right]}.$$

Алгоритм реализации:

```
*DO,JL,1,2*ML+1
XV=VX/(RR(2*ML+1)-RR(1))*(RR(JL)-RR(1))
YV=VY/(RR(2*ML+1)-RR(1))*(RR(JL)-RR(1))
SX=0
SY=0
SXY=0
SYY=0
*DO,JB,1,MB+1
NU=MNU(JL,JB)
X=NX(NU)-XV
Y=NY(NU)-YV
SX=SX+X
SY=SY+Y
SXY=SXY+X*Y
SYY=SYY+Y*Y
```

*ENDDO
QG=SQRT(QA(JL)*QA(JL)+QU(JL)*QU(JL))
COS=ABS(QA(JL)/QG)
SIN=ABS(QU(JL)/QG)
AY=QG*(COS*SX-SIN*SY)/(COS*(SY*SX-(MB+1)*SXY)+SIN*((MB+1)*SYY-SY*SY))
BY=(QG-AY*SY)/(MB+1)
*DO,JB,1,MB+1
NU=MNU(JL,JB)
Y=NY(NU)-YV
FU=(AY*Y+BY)*SIN
FA=(AY*Y+BY)*COS
F,NU,FX,FU
F,NU,FY,FA
*ENDDO
*ENDDO

10. Заключить алгоритм реализации приложения газовой нагрузки между операторами:

*IF,GAZ,EQ,1,THEN
.
.
.
*ENDIF !GAZ=1

11. Проанализировать полученный результат и сравнить его с приведенными ниже рис.75 и 76.

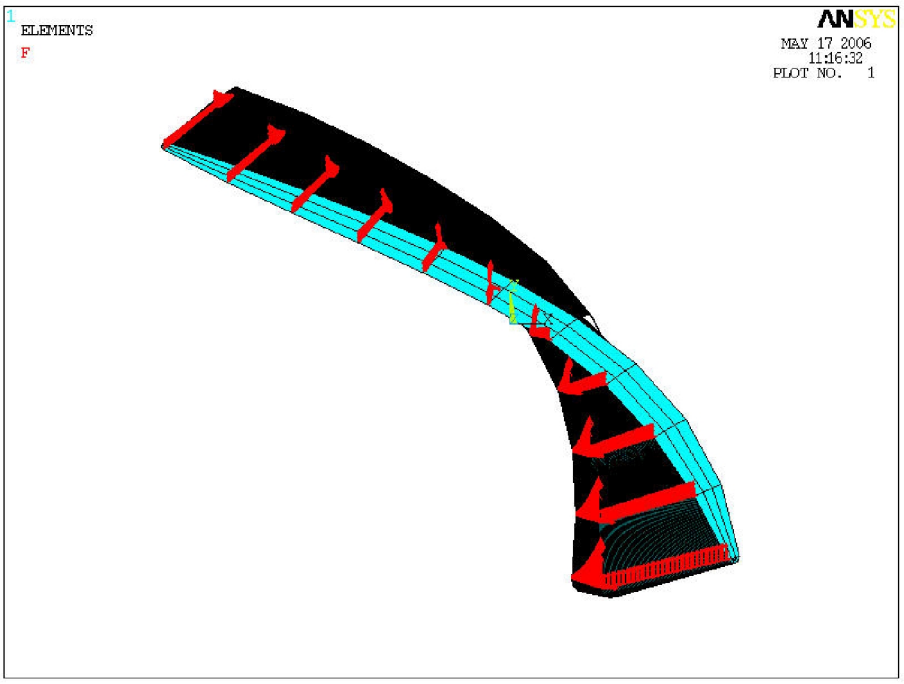


Рис.75. Приложение газовой нагрузки, вид с периферии лопатки

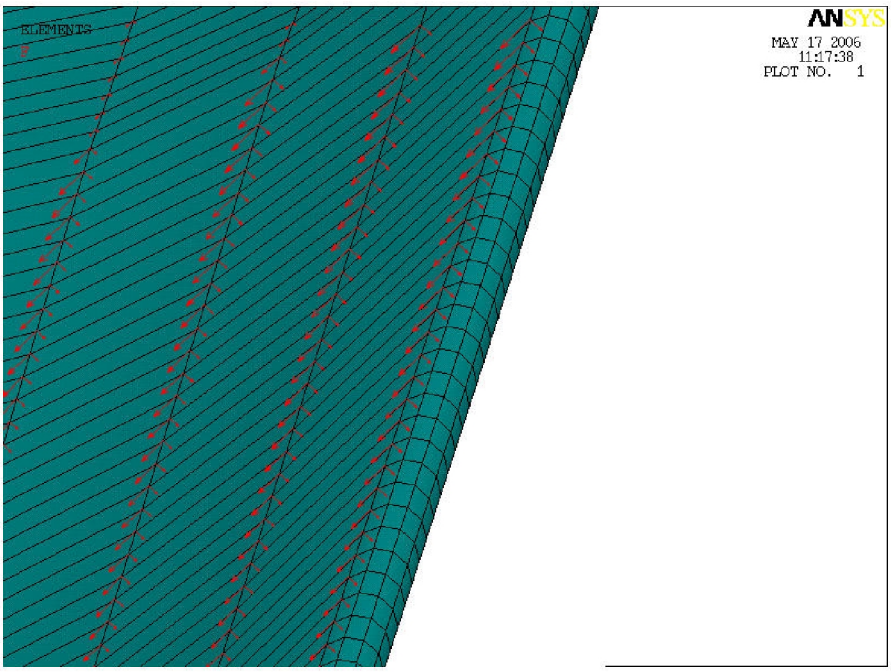


Рис.76. Приложение газовой нагрузки, вид поверхности корытца

# 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ДИСКА РАБОЧЕГО КОЛЕСА

## 3.1. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛНОЙ МОДЕЛИ ДИСКА

1. Построить по ключевым точкам в прямоугольной глобальной системе координат поперечное сечение диска. Сечение представляется в виде трёх поверхностей: ***A1***, ***A2*** и ***A3*** (рис.77). Координаты точек приведены в табл.1.

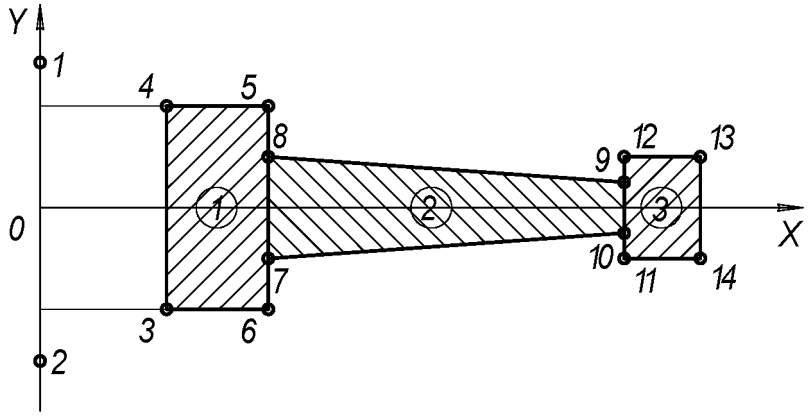


Рис.77. Сечение диска

Таблица 1

| N | X | Y | Z |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0.03 | 0 |
| 2 | 0 | -0.03 | 0 |
| 3 | 0.1 | -0.02 | 0 |
| 4 | 0.1 | 0.02 | 0 |
| 5 | 0.12 | 0.02 | 0 |
| 6 | 0.12 | -0.02 | 0 |
| 7 | 0.12 | -0.01 | 0 |
| 8 | 0.12 | 0.01 | 0 |
| 9 | 0.4 | 0.004 | 0 |
| 10 | 0.4 | -0.004 | 0 |
| 11 | 0.4 | -0.01 | 0 |
| 12 | 0.4 | 0.01 | 0 |
| 13 | 0.44 | 0.01 | 0 |
| 14 | 0.44 | -0.01 | 0 |

2. Построить локальную цилиндрическую систему координат.
   2.1. Поместить начало системы координат рабочей плоскости в начало глобальной системы координат:

***UM → Workplane → Offset WP to → Global Origin***

2.2. Повернуть рабочую плоскость относительно оси ***X*** на угол $90^0$:

***UM → Workplane → Offset WP by Increments***

Установить в меню угол поворота равным $90^0$ и нажать на кнопку положительного поворота рабочей плоскости относительно оси ***X***.

2.3. Создать локальную цилиндрическую систему координат:

***UM → Local Coordinate Systems → Create Local CS → At WP Origin → KCN=11 → Cylindrical → OK***

3. Выбрать в качестве конечных элементов ***Shell 63*** и ***Solid 45.***
4. В реальных константах для элемента типа ***Shell 63*** задать толщину пластины, равную ***1 мм***.
5. Задать характеристики материала диска:

$$E = 2 \cdot 10^{11}\ Па;\ \rho = 7800\, кг/м^3;\ \mu = 0.3\ .$$

6. Разбить сечение на конечные элементы:

6.1. Склеить поверхности сечения.

6.2. Задать в соответствии с рис.78 количество конечных элементов по линиям.

6.3. Объединить три линии на внешнем радиусе сечения ступицы в одну оператором ***Concatenate:***

***PrPr → Concatenate → Line → выбор линий → Ok.***

6.4. Аналогичную операцию проделать с тремя линиями, расположенными на внутреннем радиусе сечения обода.

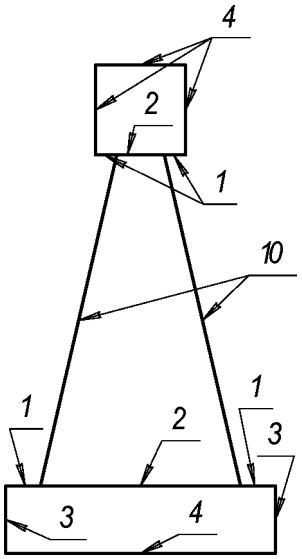


Рис.78. Количество конечных элементов на линиях сечения диска

6.5. Сгенерировать сетку конечных элементов.

6.6. Уничтожить объединение линий:

***PrPr → Concatenate → Del Concats → Lines.***

7. Создать конечно-элементную модель диска вращением сечения на $360^0$:

7.1. Сделать активной глобальную систему координат.

7.2. ***PrPr → Operate → Extrude/Sweep → Elem Ext Opts***.

7.3. Задать ***Val1=10***.

7.4. Задать ***Yes*** в окне ***Aclear***.

7.5. Нажать***OK.***

7.6. ***PrPr →Operate→Extrude/Sweep→Areas→About Axis***.

7.7. Выбрать все три поверхности.

7.8. Задать ось вращения выбором ключевых точек ***1*** и ***2***.

7.9. Задать ***Arc=360$^0$***.

8. Смоделировать граничные условия свободного на внешней и внутренней поверхности диска:

8.1. Сделать активной локальную цилиндрическую систему координат ***№11***.

8.2. Оператором ***Select*** выбрать узлы, принадлежащие внутренней поверхности диска (рис79).

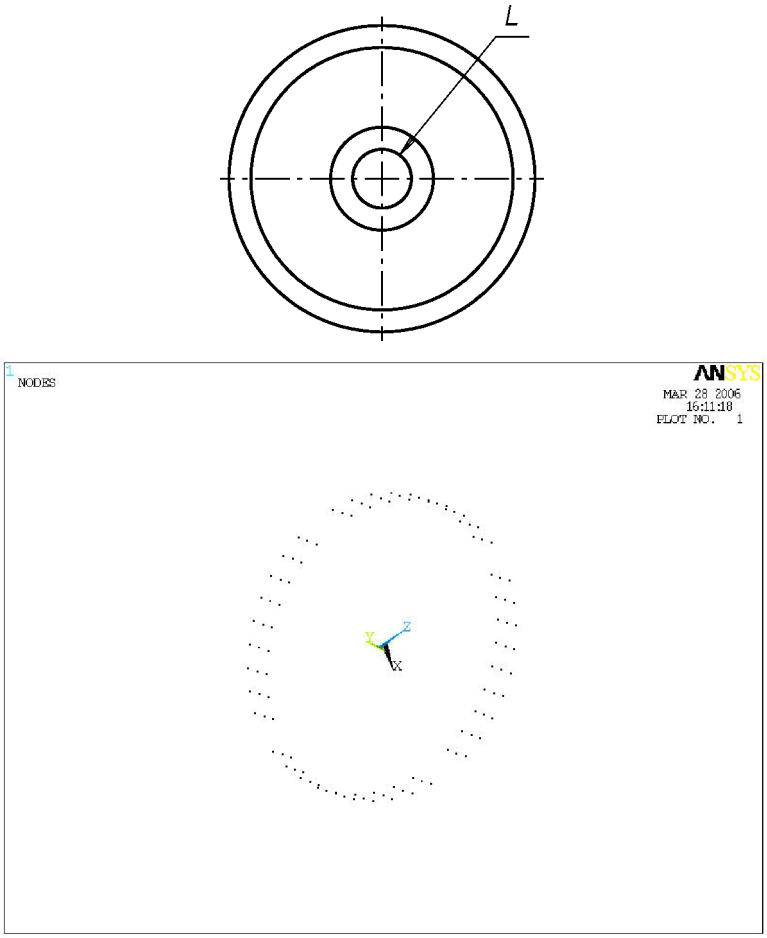


Рис.79. Выбор узлов на внутренней поверхности диска

8.3. Сделать системы координат выбранных узлов совпадающими с системой координат ***№11***:

***PrPr →Move/Modify→Rotate CS→To Active Cs***

8.4. Запретить в выбранных узлах перемещения $U_Z$ и $U_Y$.

8.5. Связать перемещения $U_X$ у двух из выбранных узлов, расположенных диаметрально противоположно:

***PrPr →Coupling/Ceqn→Couple DOFs***.

Выбрать два узла, расположенных на одном диаметре.

Задать ***NSET=1***; ***Lab=$U_X$***.

9. Задать угловую скорость вращения диска относительно глобальной оси ***Y 500 рад/с***.

Сравнить построенный диск с рис.80.

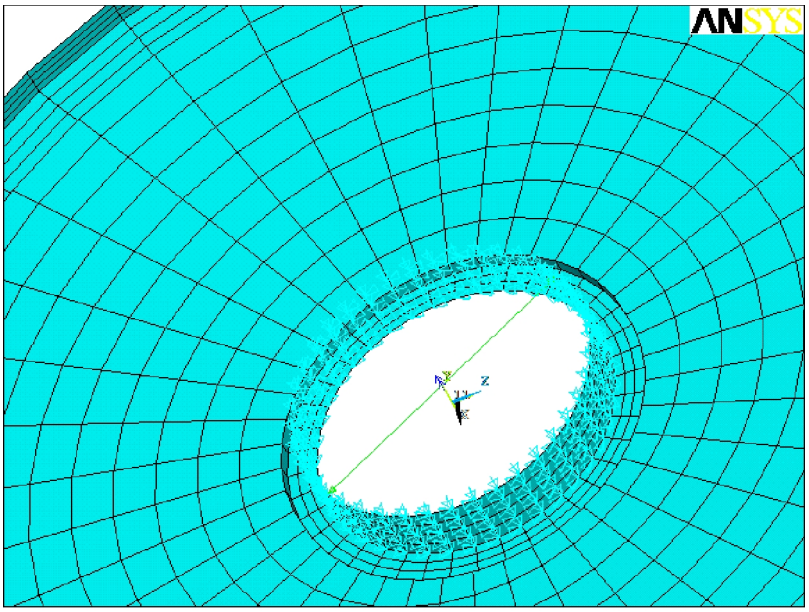


Рис. 80. Полная модель диска

10. Рассчитать статическое напряжение в диске.
11. Вывод результатов расчёта осуществить в локальной цилиндрической системе координат ***№11***:
    11.1. ***GP →Options for Output***
    11.2. Задать в окне ***Rsys "Local system"*** и набрать в окне ***Local system Reference*** число ***11***
12. Построить путь по радиусу диска в срединной его плоскости от внутренней до наружной поверхности:
    12.1. ***UM→Select→Entities→Elements→By Num/Pick→Apply.***
    12.2. Нажать в меню ***Pan-Zoom-Rotate*** кнопку ***"Bot".***
    12.3. Выбрать рамкой (***polygon***) один ряд конечных элементов, расположенных радиально (рис. 81).

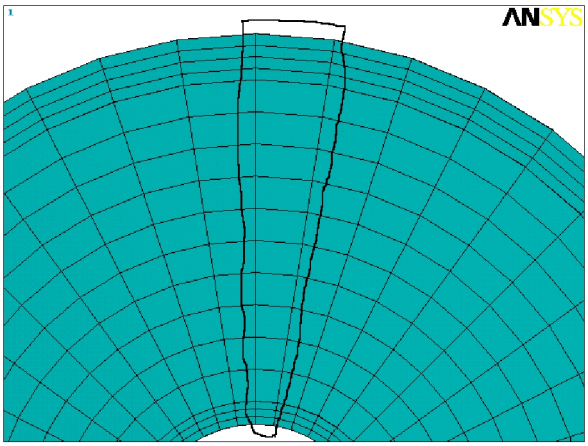


Рис.81. Выбор ряда конечных элементов

    12.4. Задать в меню ***Select Entities*** параметр ***Nodes, Attached to Elements*** и нажать кнопку ***"Ok".***

12.5. Развернуть сектор диска таким образом, чтобы были доступы узлы, расположенные в его срединой плоскости.

12.6. ***GP →Path Operations →Define Path →By Nodes***.

Построить путь с помощью выбора двух узлов, расположенных в его начале и конце. Дать имя пути ***A1*** (рис.82).

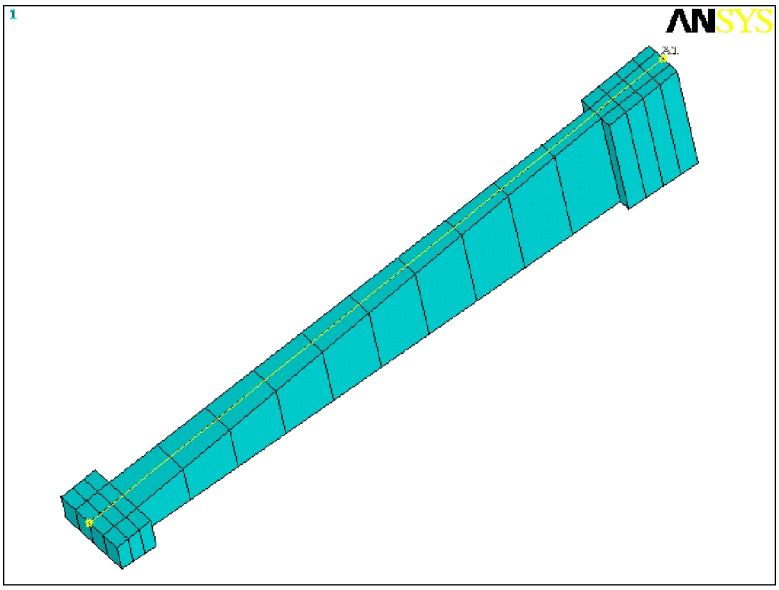


Рис.82. Выбор пути по сектору диска

12.7. ***GP →Path Operations →Map onto Path***.

12.8. Выбрать ***Stress, SX, SY***.

13. Построить график распределения напряжений оператором ***On Graph*** (рис.83).

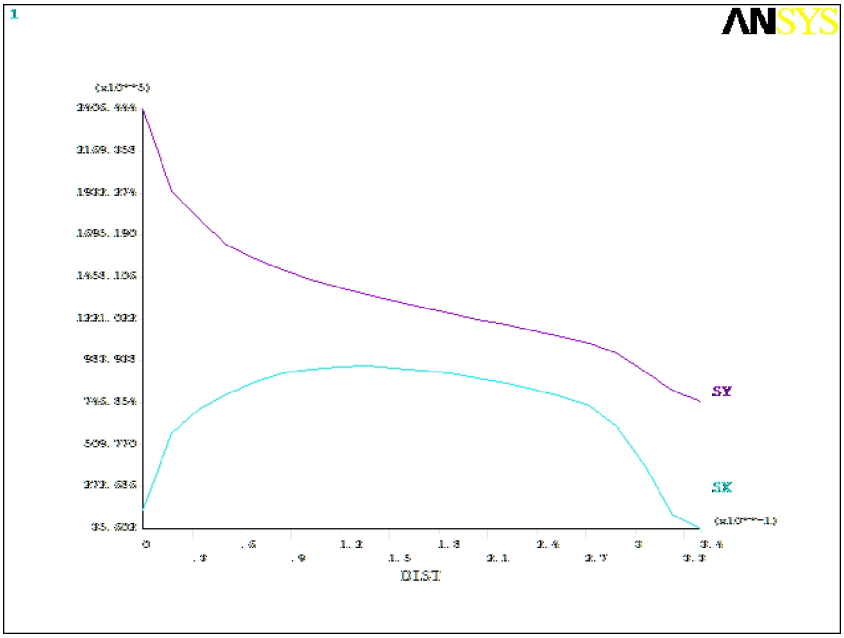


Рис.83. Распределение напряжений по радиусу диска

14. Вывести на экран и записать радиальные напряжения, действующие в узлах выбранного пути:

14.1. ***GP → Path Operations → List Path Items***. Обратить внимание на наличие отрицательных радиальных напряжений в ступице диска (рис. 84). Для объяснения этого факта построить модель ступицы диска и нагрузить её поверхность, по которой она контактирует с полотном диска, давлением P = - 1000 ***МПа***. Модель диска сохранить.

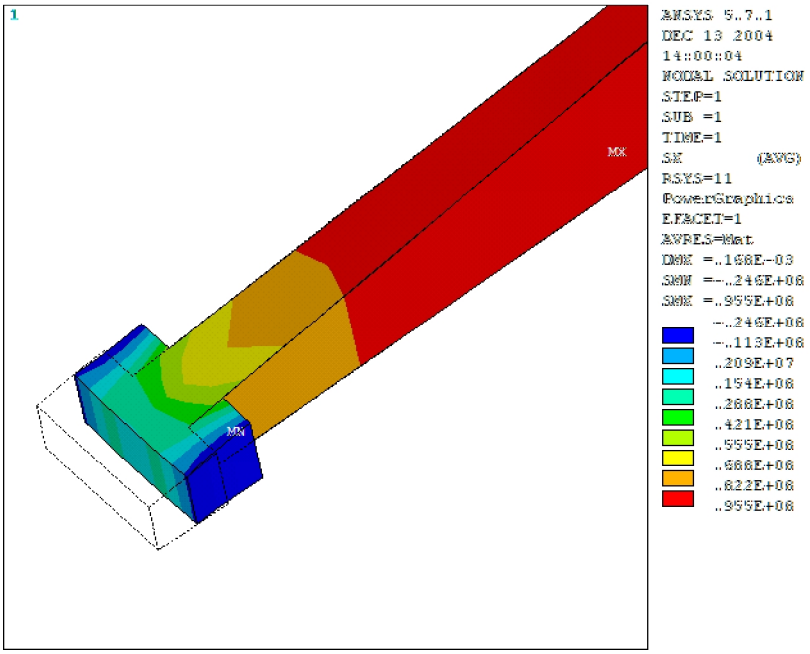


Рис. 84. Напряжения в ступице диска

15. Приложить к узлам, расположенным на периферийной поверхности диска, четыре сосредоточенные силы. Два узла выбрать на оси ***X***, два других – на оси ***Z***. Величину сил принять равной ***40 кН***. Силы направить из диска в радиальных направлениях.
16. Выполнить расчёт и вывести на экран распределение по диску радиальных напряжений (рис.85). Данное напряжённое состояние является напряженным состоянием, обладающим поворотной симметрией.

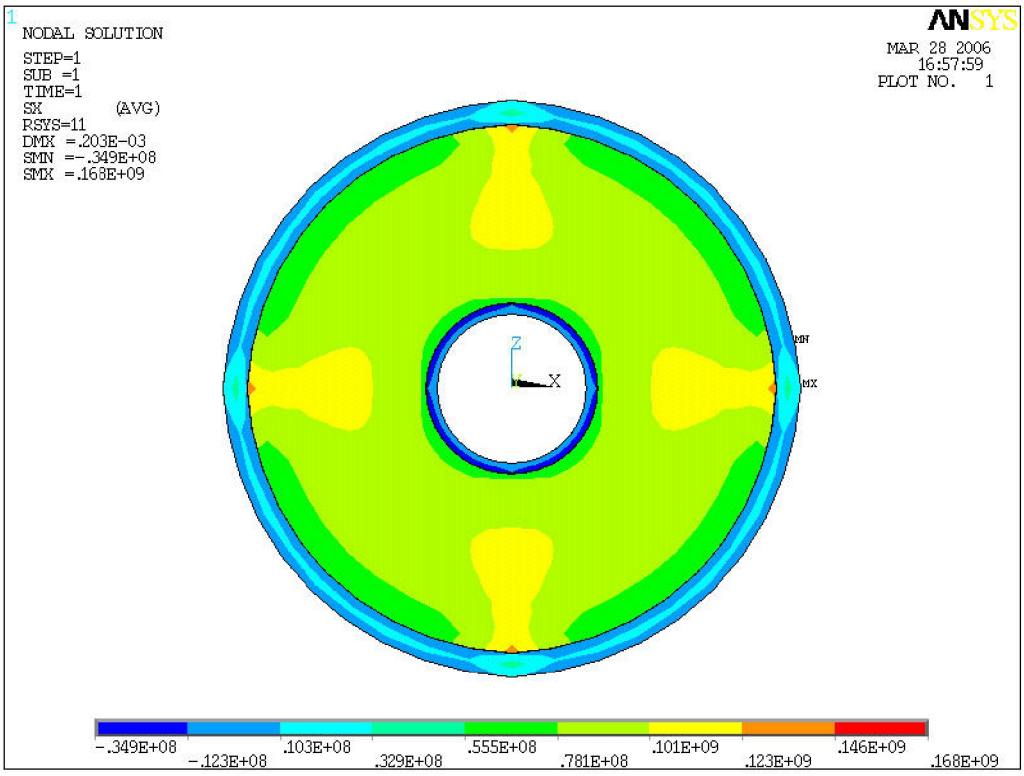


Рис.85. Радиальные напряжения в диске

17. Построить путь ***A1*** и записать напряжения, действующие в образующих его узлах (рис.86).

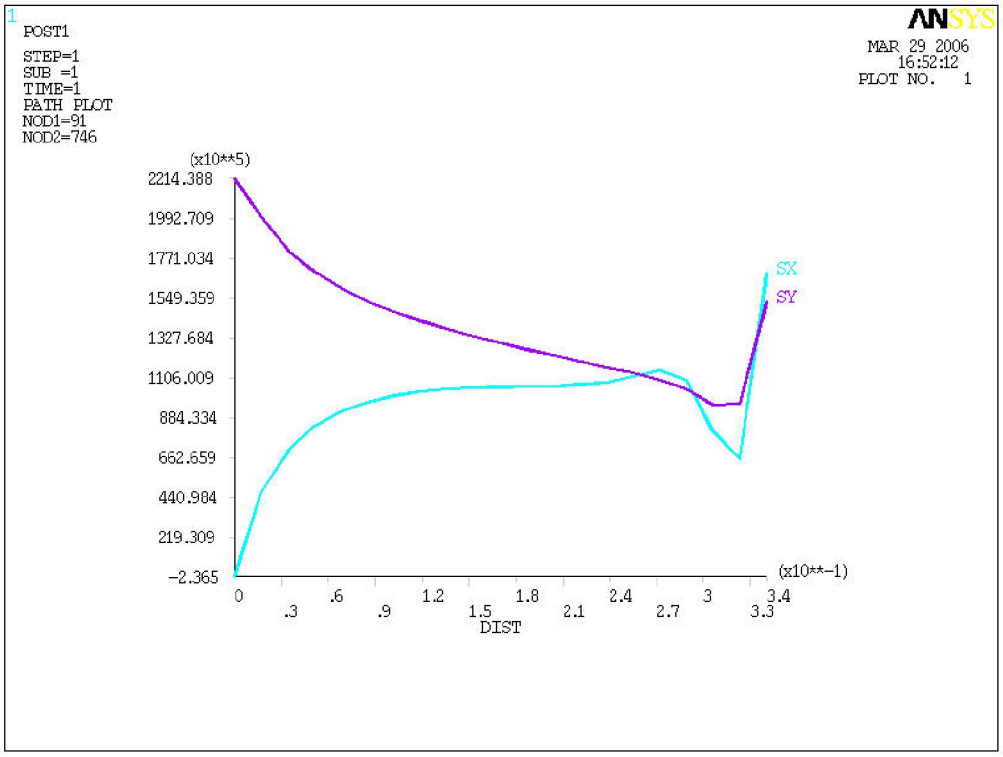


Рис. 86. Распределение напряжений по радиусу диска

## 3.2. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ДИСКА С УЧЕТОМ ПОВОРОТНОЙ СИММЕТРИИ ЕГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

1. Скопировать в новый файл построения ключевых точек и поперечного сечения диска до разбиения на конечные элементы.
2. Построить объём поворотом сечения на $-180^0$ вокруг оси, определяемой ключевыми точками *1* и *2*.
3. Разместить систему координат рабочей плоскости в начало глобальной системы координат:

   ***UM → Workplane → Offset WP to → Global Origin***.
4. Повернуть рабочую плоскость относительно оси ***X*** на угол $90^0$.
5. Создать на базе системы координат рабочей плоскости локальную цилиндрическую систему координат ***№11***.
6. Выбрать тип конечных элементов ***Shell 63*** и ***Solid 45***.
7. Задать аналогичные первому варианту расчёта характеристики материала диска и толщину оболочечного элемента.
8. Повернуть рабочую плоскость на угол $45^0$ вокруг оси ***Z***.
9. Повернуть рабочую плоскость на угол $70^0$ вокруг оси ***Y*** (сектор вырезается плоскостью, направленной под углом $20^0$ к оси диска).
10. Рассечь объём рабочей плоскостью:

    ***PrPr → Operate → Divide → Volume by Workplane***.
11. Установить рабочую плоскость параллельно оси диска, развернув её относительно оси ***Y*** на угол $-70^0$.
12. Повернуть рабочую плоскость относительно оси ***Z*** на угол $-90^0$.
13. Повернуть рабочую плоскость на угол $70^0$ относительно оси ***Y***.
14. Рассечь объём рабочей плоскостью.
15. Удалить отсечённые от половины диска объёмы, оставив период тела.
16. Сгенерировать в одной из торцевых поверхностей сектора диска оболочечные конечные элементы. Параметры сетки брать аналогичные тем, которые были приняты в первом варианте расчёта.
17. Сгенерировать сетку объёмных элементов выдавливанием сетки оболочечных конечных элементов:
    17.1. ***PrPr → Mesh → Volume Sweep → Sweep Opts***.
    17.2. Задать число слоёв конечных элементов ***VAL1=10***.
    17.3. Обеспечить стирание плоских конечных элементов, поставив флажок в окне ***Aclear***.
    17.4. ***PrPr → Mesh → Sweep***.
    17.5. Выбрать половину объёма ступицы, торец которого разбит на плоские конечные элементы, и нажать на ***OK***.
    17.6. Выбрать разбитый на конечные элементы торец и нажать на ***OK***.
    17.7. Выбрать второй торец объёма и нажать на ***Apply***.
    17.8. Выбрать второй составной объём ступицы и нажать на ***OK***.
    17.9. Выбрать торец, разбитый на конечные элементы, и нажать на ***OK***.

17.10. Выбрать второй торец объёма и нажать на ***Apply***.

17.11. Аналогичные операции проделать со всеми другими объёмами сектора. Конечно-элементная модель после всех операций представлена на рис.87.

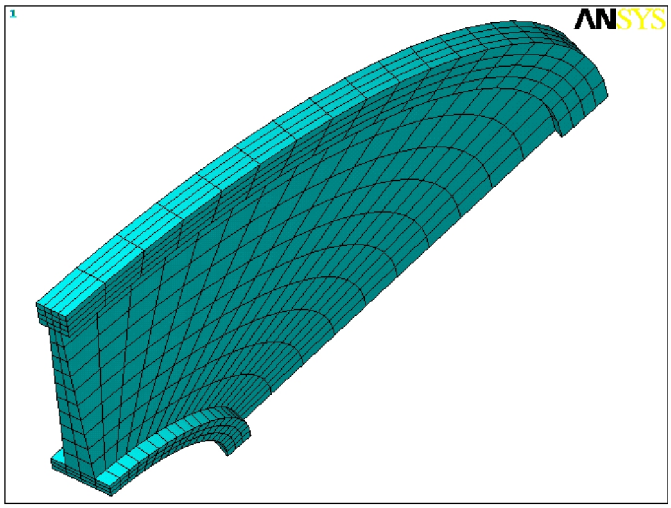


Рис.87. Конечно-элементная модель сектора диска

Далее моделируются граничные условия на торцевых поверхностях периода диска для учета поворотной симметрии его напряженного состояния.

18. Активизировать локальную цилиндрическую систему координат ***№11***.
19. Оператором ***Select*** выбрать одну из торцевых поверхностей ступицы и связанные с ней узлы.
20. Сделать системы координат выбранных узлов совпадающими с локальной системой координат ***№11***.
21. Создать двумерный массив ***MC1*** для записи в него номеров узлов, расположенных в выбранной торцевой поверхности:

****Dim, MC1, Array, 10, 10***

22. Определить номера линий торцевой плоскости ступицы, которые образованы пересечением соответственно внутренней и внешней цилиндрических поверхностей (рис. 88). Линия ***NL2*** образована при выполнении операции ***concatenate***.

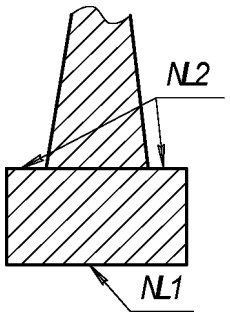


Рис. 88. Линии торцевой плоскости ступицы

23. Образовать цикл для записи номеров узлов в массив ***MC1***. При построении модели было задано:

***NU1=3*** – число узлов по радиусу ступицы;

***NU2=4*** – число узлов по ширине ступицы.

23.1. ***Do, J, 0, 4*** – цикл построения ключевых точек по ширине ступицы.

23.2. Построить на линиях ***NL1*** и ***NL2*** ключевые точки ***500*** и ***600*** (рис.89):

***KL, NL1, 1-J/4, 500***

***KL, NL2, J/4, 600***

23.3. Построить между ключевыми точками ***KP500*** и ***KP600*** прямую линию ***NL3***:

***LSTR, 500, 600***;

23.4. Организовать цикл построения ключевых точек по толщине ступицы. Ключевым точкам присваивать номер ***700***:

****Do, J1, 0, 3***

***KL, NL3, J1/3, 700***

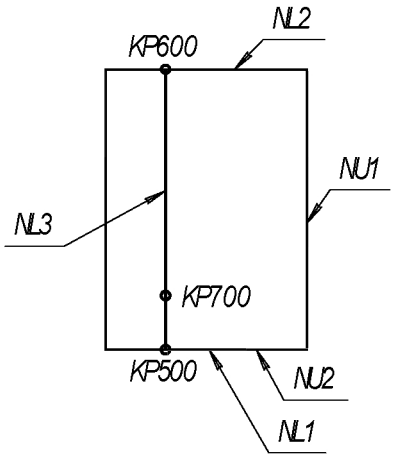


Рис.89. Построение вспомогательных точек

23.5. Записать в массив ***MC1*** номер узла, который расположен рядом с ключевой точкой ***KP 700***:

***MC1(J1+1, J+1)=Node (kx(700), ky(700), kz(700))***;

23.6. Уничтожить вспомогательные точки:

***Kdele, 700***

****Enddo !J1***

***Kdele, 500***

***Kdele, 600***

***Enddo !J***

***Allsel, All***

24. Аналогичные операции проделать для узлов, расположенных на второй торцевой поверхности ступицы, а также для узлов, расположенных на торцевых поверхностях полотна и обода. При записи номеров узлов, расположенных на торце сектора полотна, учесть, что номера узлов, принадлежащих линиям ***L1*** и ***L2***, будут учтены в соответствующих массивах для ступицы и обода (рис.90).

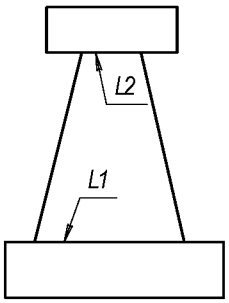


Рис.90. Линии *L1* и *L2*

25. Записать уравнения равенства соответствующих узловых смещений на торцах сектора диска (рис.91):

25.1. Задать начальный номер уравнений ***NNU=0***.

25.2. Записать уравнения для узлов, расположенных на торцах ступицы:

****Do, J, 0, 4***
****Do, J1, 0, 3***
***N1=MC1 (J1+1, J+1)***
***N2=MC2 (J1+1, J+1)***
***NNU=NNU+1***
***CE, NNU, , N1, UX, 1, N2, UX, -1, , UX, 1***
***NNU=NNU+1***
***CE, NNU, , N1, UY, 1, N2, UY, -1, , UY, 1***
***NNU=NNU+1***
***CE, NNU, , N1, UZ, 1, N2, UZ, -1, , UZ, 1***
****Enddo !J1***
****Enddo !J***

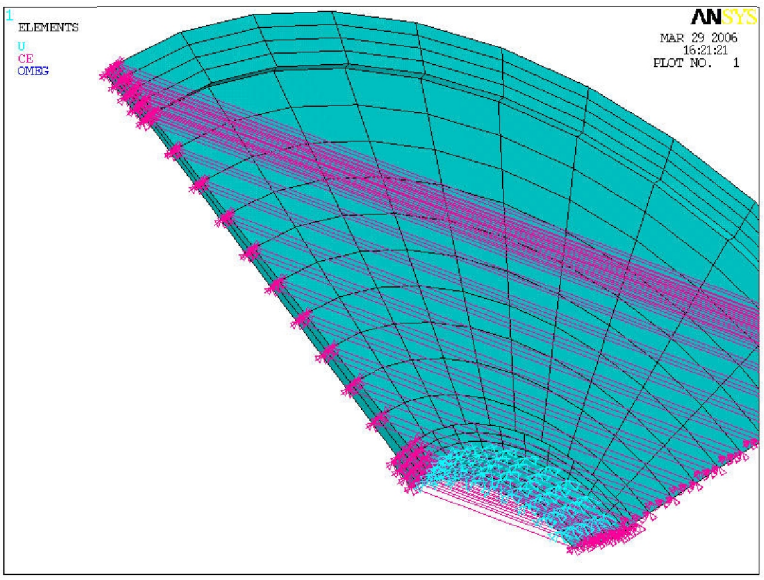


Рис.91. Граничные условия на торцах и внутренней поверхности сектора диска

25.3. Аналогичные уравнения записать для узлов, расположенных на торцевых плоскостях полотна и обода.

26. Задать угловую скорость вращения относительно ***Y 500 рад/с***.

27. Задать граничные условия на внутренней поверхности сектора диска (см. рис. 91):

27.1. Выбрать оператором ***Select*** обе половины одной из дуг внутренней цилиндрической поверхности сектора диска и связанные с ними узлы.

27.2. Повторным выбором из всей совокупности исключить крайние узлы:

***Select Entities → Nodes → By Num/Pick → Reselect → Ok → Polygon***

Выбрать рамкой все узлы кроме крайних (рис.92):

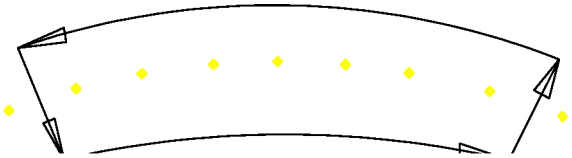

Рис.92. Выбор узлов

27.3. Перевести системы координат узлов в локальную систему координат 11.

27.4. Запретить для всех выбранных узлов перемещения $U_Y$ и $U_Z$.

28. Выполнить расчёт, построить путь ***A1*** (рис. 93 и 94), сравнить напряжения $\sigma_X$, действующие в узлах пути, с рассчитанными ранее при использовании полной модели диска.

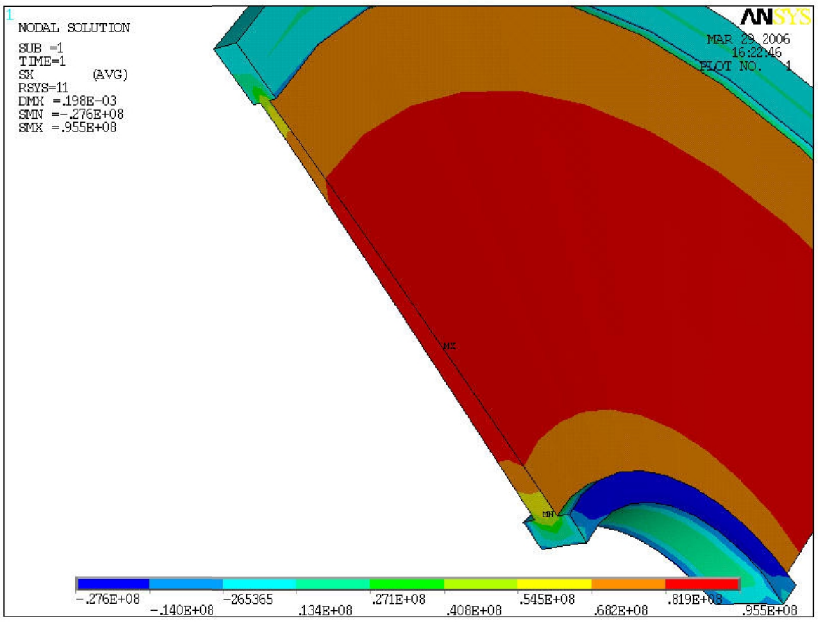


Рис. 93. Напряжения по оси X диска, нагруженного полем центробежных сил

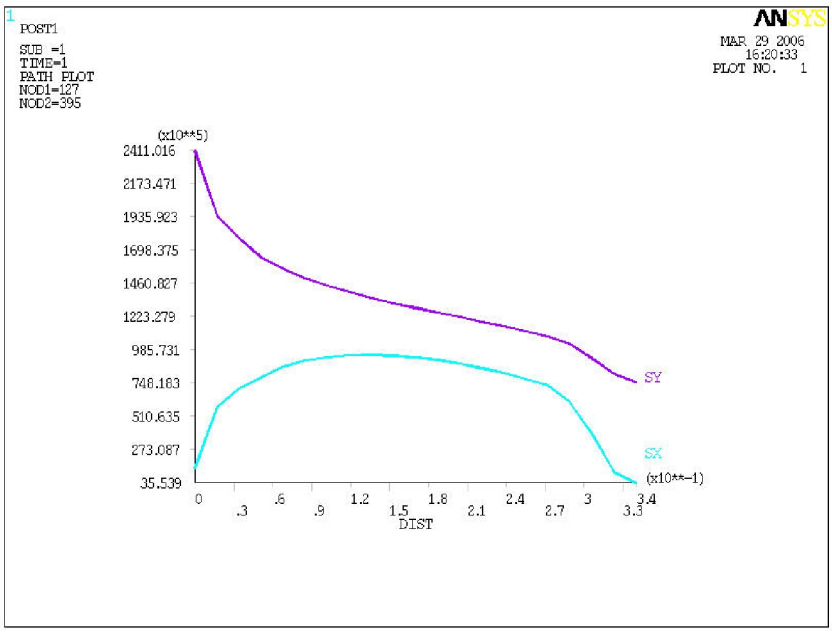


Рис. 94. График напряжений диска, нагруженного полем центробежных сил

29. Приложить к узлу, расположенному на оси Z и внешней цилиндрической поверхности сектора диска силу $F_Z$=40 кН (рис.95).
30. Выполнить расчёт, построить путь *A1* (рис.96 и 97), сравнить напряжения $\sigma_X$, действующие в узлах пути, с рассчитанными ранее при использовании полной модели диска.

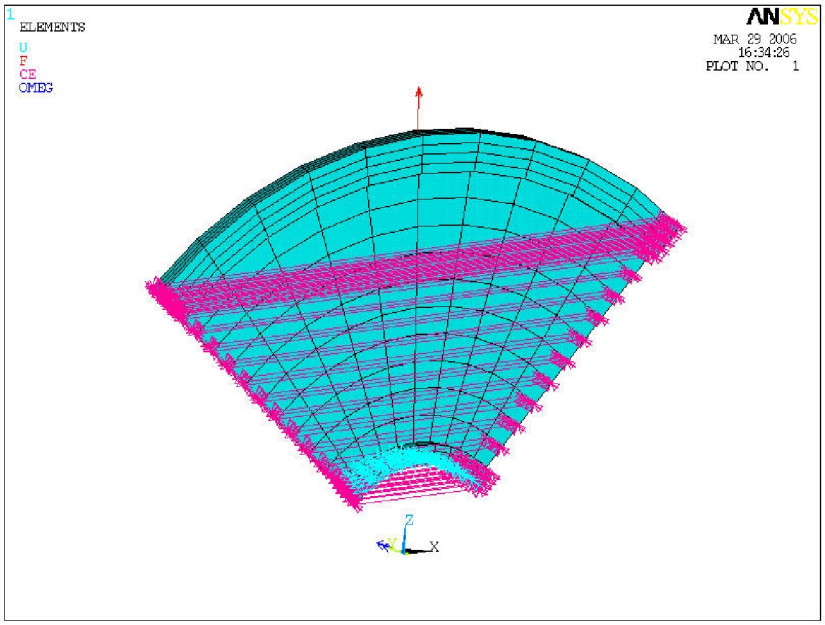


Рис.95. Модель диска, нагруженного полем центробежных сил и сосредоточенной нагрузкой

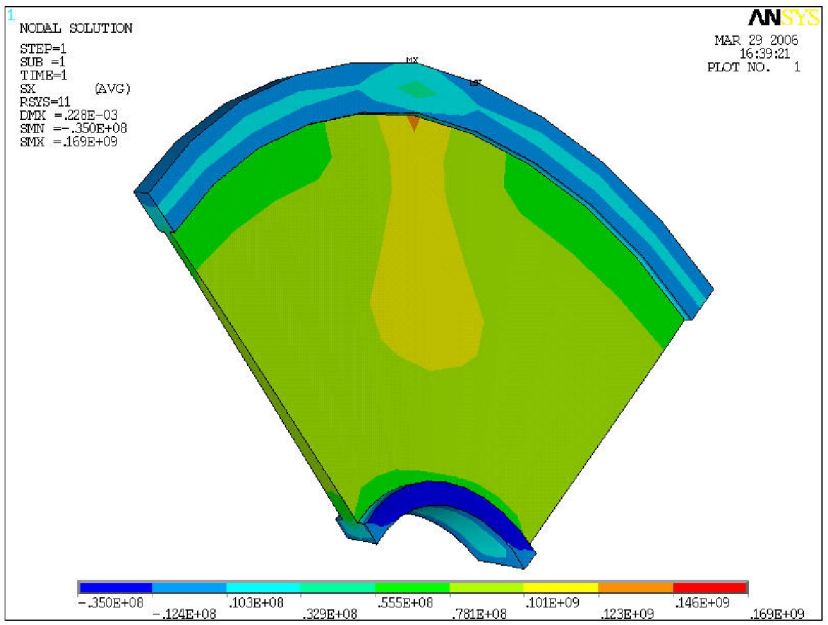


Рис.96. Напряжения по оси X диска, нагруженного полем центробежных сил и сосредоточенной нагрузкой

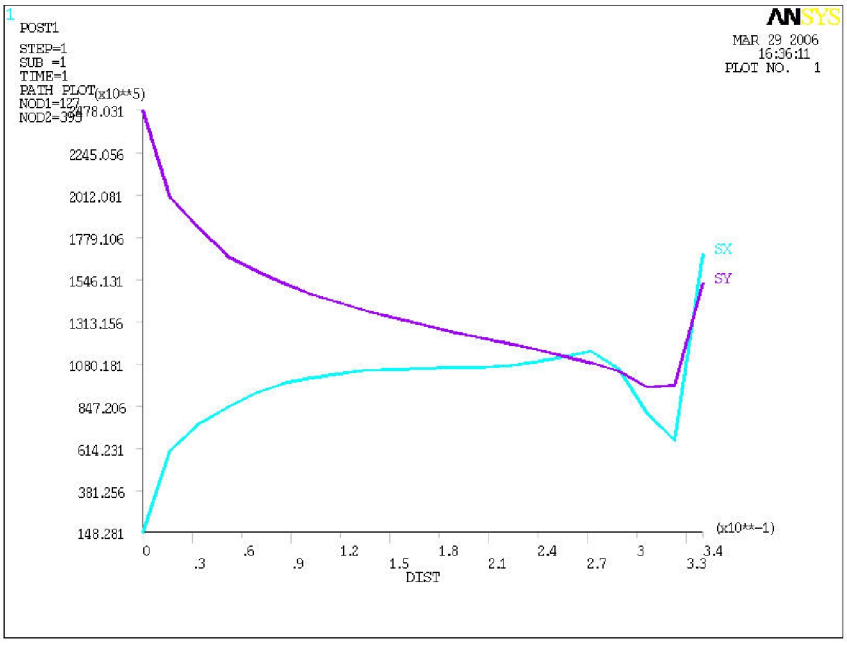


Рис.97. График напряжений диска, нагруженного полем центробежных сил и сосредоточенной нагрузкой

## 3.3. НАЛОЖЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЦИКЛИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ В ДИСКЕ

Граничные условия накладываются с помощью специальной команды, реализованной в ANSYS версии 5.7 и выше.

1. Построить геометрическую модель диска и разбить её на конечные элементы, как было описано в предыдущем разделе.
2. ***PrPr → Coupling/Ceqn → Offset Nodes***.

3. Задать степени свободы для связи поперечных сечений диска в окне ***Lab*** (по умолчанию ***All***).
4. Задать необходимую точность в окне ***TOLER*** (по умолчанию ***0.0001***).
5. Задать номер системы координат в окне ***KCN – №5***.
6. Задать угол циклически симметричного тела (сектора диска) относительно осей системы координат ***№5*** (для данного сектора диска угол равен $90^0$ в окружном направлении, т.е. вокруг оси ***Y*** системы координат ***№5***).
7. Установить совмещение систем координат узлов на боковых гранях сектора командой ***Rotate Nodes*** в окне ***KNONR*** (рис.98).

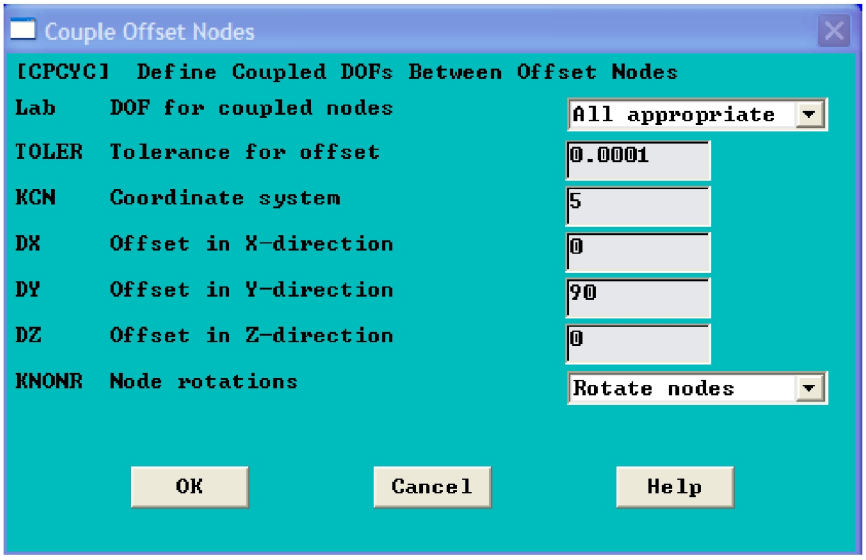


Рис.98. Совмещение систем координат узлов

Модель с наложенными граничными условиями циклической симметрии показана на рис. 99.

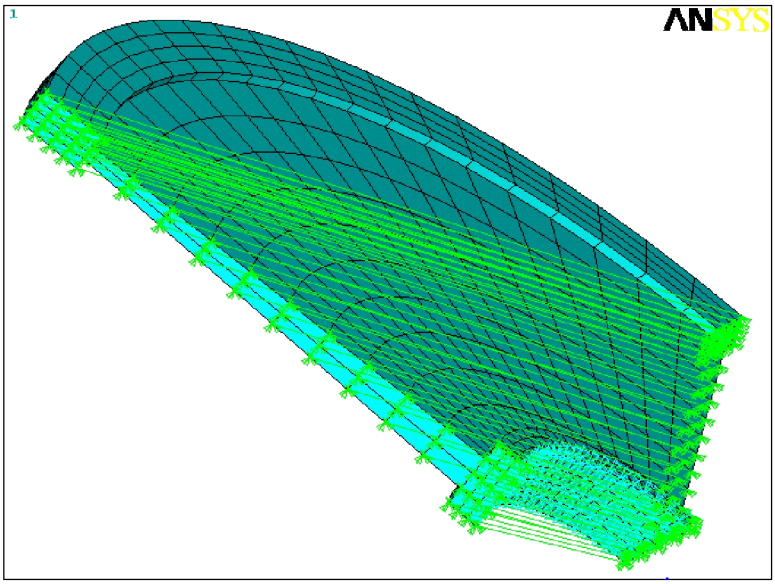


Рис.99. Модель диска, нагруженного полем центробежных сил

8. Выполнить расчёт, построить путь ***A1*** (рис.100 и 101), сравнить напряжения, действующие в узлах пути, с рассчитанными ранее.

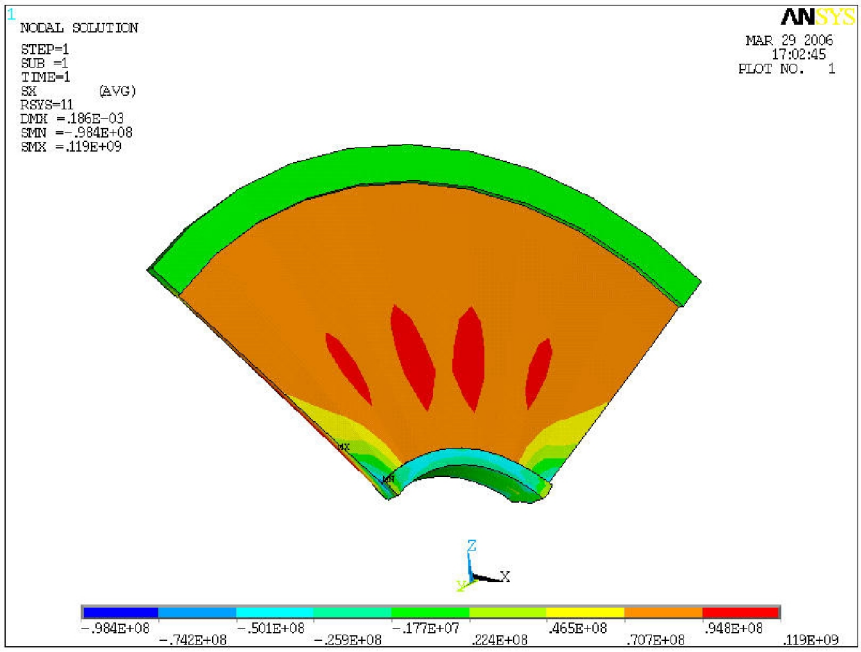


Рис. 100. Напряжения по оси X диска, нагруженного полем центробежных сил

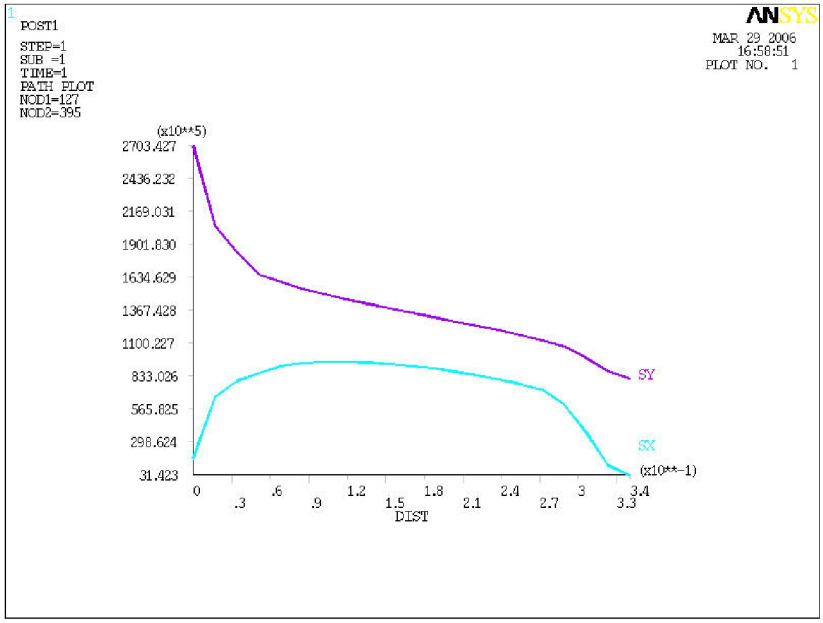


Рис. 101. График напряжений диска, нагруженного полем центробежных сил

9. Приложить к узлу, расположенному на оси Z и внешней цилиндрической поверхности сектора диска силу $F_Z$=40 кН (рис.102).
10. Выполнить расчёт, построить путь *A1* (рис.103 и 104), сравнить напряжения, действующие в узлах пути, с рассчитанными ранее.

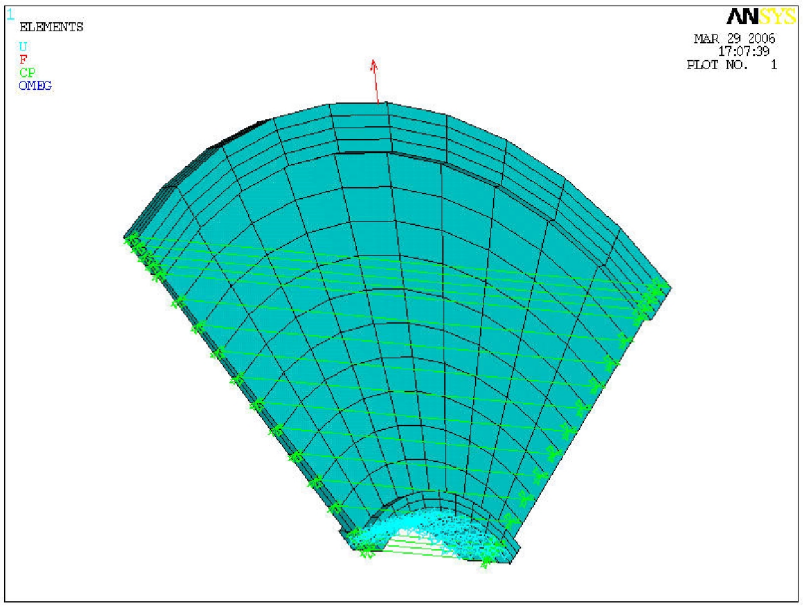


Рис.102. Модель диска, нагруженного полем центробежных сил и сосредоточенной нагрузкой

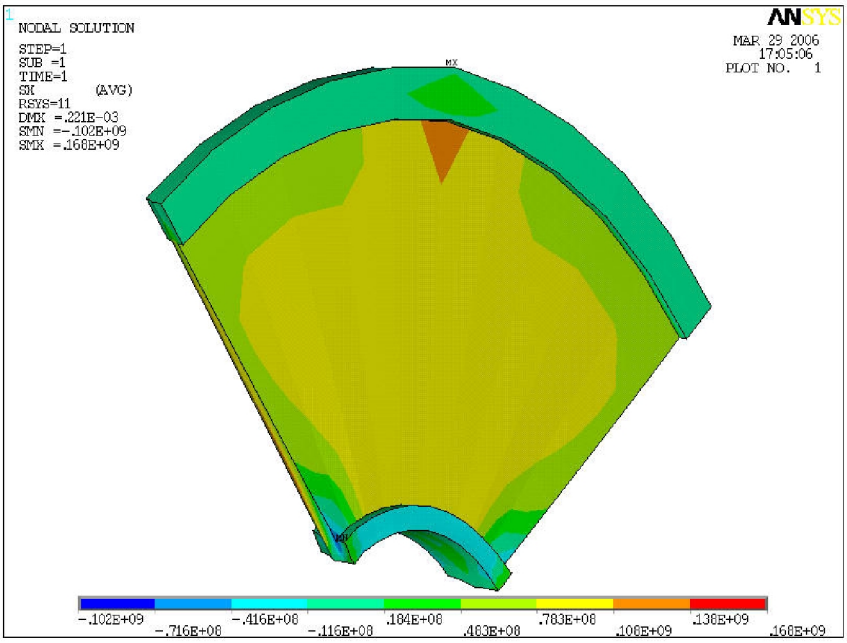


Рис.103. Напряжения по оси X диска, нагруженного полем центробежных сил и сосредоточенной нагрузкой

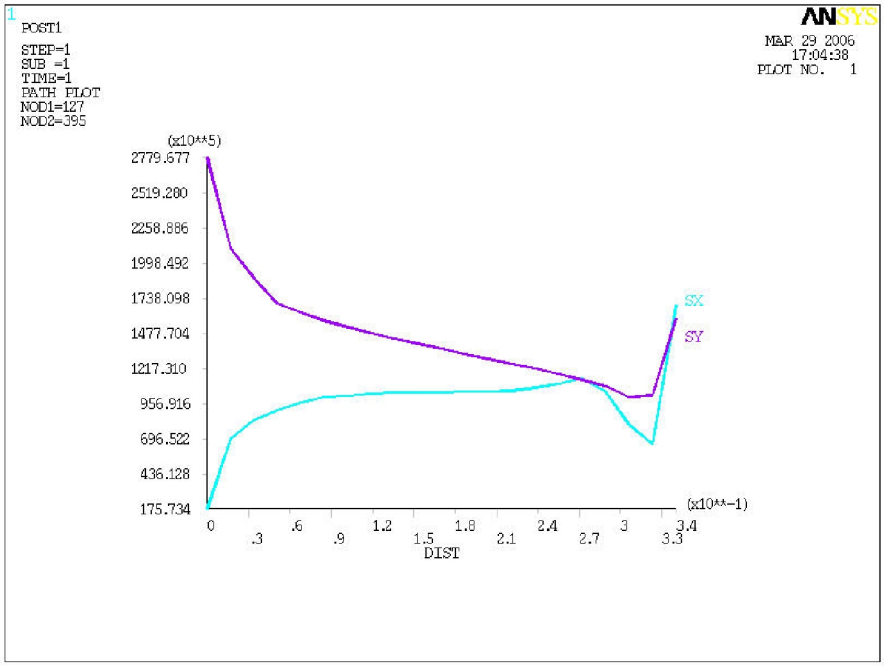


Рис. 104. График напряжений диска, нагруженного полем центробежных сил и сосредоточенной нагрузкой

После всех проведенных расчётов просмотреть графики распределения напряжений и сделать вывод о применимости рассмотренных различных методов расчёта.

Учебное издание

*Ермаков Александр Иванович*
*Уланов Александр Михайлович*

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ДИНАМИКЕ И ПРОЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ГТД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ANSYS
ЧАСТЬ 2**

Технический редактор С. К. Б о ч к а р е в
Редакторская обработка Н. С. К у п р и я н о в а
Корректорская обработка Е. А. Л а р и о н о в а
Доверстка В. С. Т е л е п о в а

Подписано в печать 25.09.07. Формат 60x84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 10,0
Тираж 120 экз. Заказ . ИП-40/2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.