

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА**

Кафедра «МЕХАНИКА И ПРОМЫШЛЕННАЯ ИНЖЕНЕРИЯ»

**Методические указания для практических и лабораторных работ
по дисциплинам «Детали машин», «Прикладная механика» и
«Сопротивление материалов» с применением ANSYS**

**для студентов инженерных направлений очной и дистантной
форм обучения**

Бишкек 2015

«Рассмотрено»
на заседании кафедры
«Механика и промышленная
инженерия»
Прот. № 8 от 06.05.2015

«Одобрено»
Методической комиссией
Кыргызско-Германского
технического института
Прот. № 6 от 23.04.15

УДК 626.35.55

Составители: Ж.Ж.Тургумбаев, Гапарова Ж.Т., Тургумбаев С.Дж.

Методические указания для практических и лабораторных работ по дисциплинам «Детали машин», «Прикладная механика» и «Сопротивление материалов» с применением ANSYS для студентов инженерных направлений очной и дистантной форм обучения /КГТУ им. И. Раззакова; Сост.: Ж.Ж.Тургумбаев, Гапарова Ж.Т., Тургумбаев С.Дж. / - Б.: ИЦ «Текник», 2015. - 32 с.

В методических указаниях даны примеры программ стержневых и балочных конструкций. Разработана программа плоского изгиба балки. Выполнена программа решения кручения стержней. Детально изложены приемы обращения с программой для расчета напряженно-деформированного состояния линейных и плоских задач сопротивления материалов.

Предназначено для студентов, магистров и аспирантов инженерных направлений очной и дистантной форм обучения.

Рецензент - д.т.н., профессор М.З.Алмаматов

В данной работе приведены методические рекомендации по решению задач на примере решения конкретных задач с помощью ANSYS. Программы написаны для работы в командном (*Command(s)*) или интерактивном (*GUI*) режимах. В некоторых случаях приведены как командный, так и интерактивные варианты программ.

Стержневые и балочные конструкции Консольная балка

Подробно рассмотрим классический пример балки, жестко заземленной одним концом и нагруженный поперечной силой P на другом конце (рис. 1).

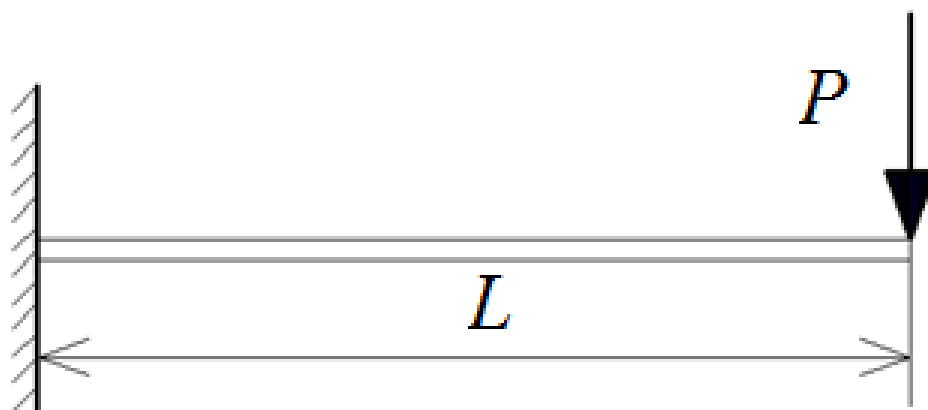


Рис. 1

Балка имеет следующие размеры и свойства:

длина (*length*) = 2,5 м;

высота (*depth*) – 0,10 м;

ширина (*width*) - 0,0 75 м;

нагрузка (*load*) = 15 кН;

модуль упругости $E = 210$ ГПа

(1 Гпа = 10^9 Н/м²);

Заметим, что исходные данные в этой задаче представлены в смешанной системе единиц. Однако дальнейшем в программу ANSYS исходные данные будут вводиться в системе единиц СИ, что потребует в некоторых случаях применения переводных коэффициентов.

Решение задачи проведем в интерактивном режиме (GUI).

Предварительная подготовка (Preprocessing)

Решение данной задачи начинается с ввода заголовка:

Utility menu → File → Change Title...

В открывшемся окне **Change Title** печатаем имя задачи: *cont_beam*,

OK

Для решения задачи требуется двести некоторое количество переменных:

Utility menu → Parameters → Scalar Parameters...

В нижнем однострочном поле *Selection* открывшегося окна печатаем название и величину вводимых параметров:

$length = 2,5$
 $depth = 0,1$
 $width = 0,075$
 $xsect = depth * width$
 $inertiaz = (width * depth ** 3) / 12$

После печати каждого из перечисленных выше параметров нажатием кнопки **Accept** переводим его к верхнее окно *Items*. Ввод всех параметров завершается закрытием окна (кнопка **Close**).

Геометрию балки зададим с помощью ключевых точек (*keypoints*):

Main Menu → Preprocessor → - Modeling - → Keypoints → In Active CS...

Выбор *In Active CS (Active Coordinate System)* позволит задавать положение ключевых точек в текущей глобальной системе координат.

Для данной задачи ключевые точки достаточно разместить по концам балки. В открывшемся окне вводим номер первой ключевой точки **1** к поле *Keypoint number (Номер ключевой точки)*, а также ее координаты x, y, z ($0, 0, 0$) в поле *Location in Active CS (Положение в действующей координатной системе)*. Ввод завершается нажатием кнопки **Apply** (Применить).

Аналогично вводятся номер (2) и координаты ($length, 0, 0$) второй ключевой точки.

Завершается ввод ключевых точек нажатием **OK**.

Для проверки правильности ввода ключевых точек рекомендуется распечатать их список:

Utility menu → List → Keypoints...

Пример полученной таким образом распечатка приводится ниже:

```
LIST ALL SELECTED KEYPOINTS. DSYS=0  
*****ANSYS — ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 5.6  
*****  
ANSYS/ED  
00000000 VERSION = INTEL NT 19:31:49 JUL 28, 2002  
CP = 91.780  
Cont_beam  
*****  
*  
* ANSYS VERSION FOR EDUCATIONAL PURPOSES ONLY *  
* *  
*****  
NO. X,Y,ZLOCATION THXY, THXZ, THZX  
ANGLES  
1 0.000000 0.000000 0.000000 0.0000 0.0000 0.0000  
2 2500.000 0.000000 0.000000 0.0000 0.0000 0.0000
```

Для показа введенных ключевых точек в графическом окне можно рекомендовать два метода:

1) ввести следующие две команды в окне ANSVS Input (каждую команду вводить отдельно нажатием кнопки Enter):

/pnum,kp,1

kplot

Первая из этих команд включает нумерацию ключевых точек, а вторая — выводит их на экран.

2) выбрать в меню:

Utility menu → PlotCtrls → Numbering...

В раскрывшемся окне *Plot Numbering Controls* в поле *Keypoint numbers* поставить флажок *On* и закрыть окно нажатием **OK**.

Теперь для получения модели балки свяжем между собой нарисованные ключевые точки прямой линией:

Preproces... → - Modeling - → Create → - Lines - → Lines → Straight Line...

Появившемся курсором отметим на графическом экране обе введенные ключевые точки.

OK.

Далее модель балки необходимо разбить на некоторое количество конечных элементов, однако предварительно программе необходимо сообщить, какого типа элементы мы планируем использовать:

Preproces... → Element Type → Add/Edit/Delete... → Add...

В открывшемся окне *Library of Element Types* (*Библиотека типов элементов*) выбрать:

Beam → 2D elastic → OK/

После этого к открывшемуся окну *Element Types* должна появиться запись:

Type 1 BEAM3.

Выбираем в том же окне *Options...* и во вновь открывшемся окне: *BEAM3 element type options*; в поле *Member force + moment output (K6)* выбираем: *Include Output*. Закрываем окно: **OK**.

Закрываем окно *Element Types* нажатием **Close**.

Установим теперь размеры элементов:

Main Menu → Preproces... → Real Constants... → Add...

В раскрывшемся окне *Element Type for Real Constant* выбираем: *Type 1 BEAM3 → OK*.

В окне *Real Constants for BEAM3* вставляем в соответствующие поля:

AREA: xsect

IZZ: inertias

HEIGHT: depth

Закрываем окна: **OK → Close**.

Теперь зададим свойства материала балки:

Main Menu → Preproces... → Material Props → - Constant - → Isotropic...

В соответствующие поля окна *Isotropic Material Properties* вводим:

EX: 2.1e7

NUXY: 0.3

OK

На последнем этапе предварительной подготовки сообщаем программе размеры элементов. Допустим, мы хотим разбить балку на 10 элементов длиной 250 мм каждый:

Main Menu → **Preproces...** → **Meshing-** → **- SizeCtrls-** **ManualSize-** → **Glohal-** → **Size.**

В поле **Size** вводим 250 и закрываем нажатием **OK**.

Теперь программа получила всю информацию для создания сетки конечных элементов:

Main Menu → **Preproces...** → **Meshing-** → **Mesh** → **Lines.**

Появившейся стрелкой-курсором отметим ключевые точки на концах линии - модели балки. Эта линия после нажатия **OK** и будет разбита на конечные элементы.

Изобразим полученную сетку на графическом дисплее. Сначала надо пронумеровать элементы: **PlotCtrls** → **Numbering**, а в поле *Elem & Attrib numbering* установить *Element numbers*. Для наглядности рисунка остальные поля этого окна должны быть пустыми (*Off*). Тогда лишняя нумерация не будет загромождать рисунок. Эта операция, как и предыдущие, должна завершаться нажатием **OK**. Теперь изобразим на графическом дисплее перенумерованные элементы: **Utility menu** → **Plot** → **Elements.**

Таким образом, конечно-элементная модель балки создана. Целесообразно сохранить ее в файле: **Utility menu** → **File** → **Save As...** В открывшемся окне *Save DataBase* ввести имя файла с обязательным расширением *.db*.

Теперь меню *Preprocessor* можно закрыть.

Наложение граничных условий, нагружение и решение (Solution)

Откроем меню *Solution (Решение)*:

Main Menu → **Solution** → **New Analysis** → **Static.**

Наложим граничные условия (жесткая заделка в узле 1).

Main Menu → **Solution** → **-Loads-** → **Apply** → **-Structural-** → **Displacement** → **On nods.**

Образовавшимся курсором отметим узел 1 на графическом изображении модели балки. В этом узле запрещены линейные перемещения вдоль координатных осей и поворот, поэтому в открывшемся окне *Apply U, ROT on Nodes* выберем *All DOF* (Все степени свободы).

Приложим поперечную нагрузку к противоположному концу балки (узел 2):

Main Menu → **Solution** → **-Loads-** → **Apply** → **Force/Moment** → **On Nodes.**

Отметим образовавшимся курсором узел 2 и нажмем **ОК**. В открывшемся окне *Apply F/M on Nodes* в соответствующие поля введем FY (направление силы P, поле *Lab*) и - 15000 (величина силы P, поле *VALUE*). После нажатия **ОК** изображение вектора силы появится в графическом окне.

Теперь необходимо задать направление и величину силы тяжести:

Main Menu → **Solution** → **-Loads-** → **Apply** → **Structural -** → **Gravity...**

В открывшемся окне *Apply (Gravitational) Acceleration* ввести в поле *ACELY* = 9.81 (ускорение силы тяжести, направленное вертикально вниз).

Теперь можно приступить к решению задачи:

Main Menu → **Solution** → **- Solve** → **Current LS.**

Это означает, что решение должна быть получено ив текущем шаге нагружения (*Current Load Step, LS*). В открывшемся окне *Solve Current Load Step* нажать **ОК**. Через некоторое время решение будет закончено, о чем свидетельствует появление сообщения **Solution is done!**

Обзор результатов (*Postprocessing*)

Main Menu → **General Postproc** → **- Read Results -** → **By Load Step...**

В открывшемся окне выбрать *Load Step 1 (Шаг погружения 1)*.

Для изображения изогнутой формы балки (рис. 2):

Main Menu → **General Postproc** → **Plot Results** → **Deformed Shape...**

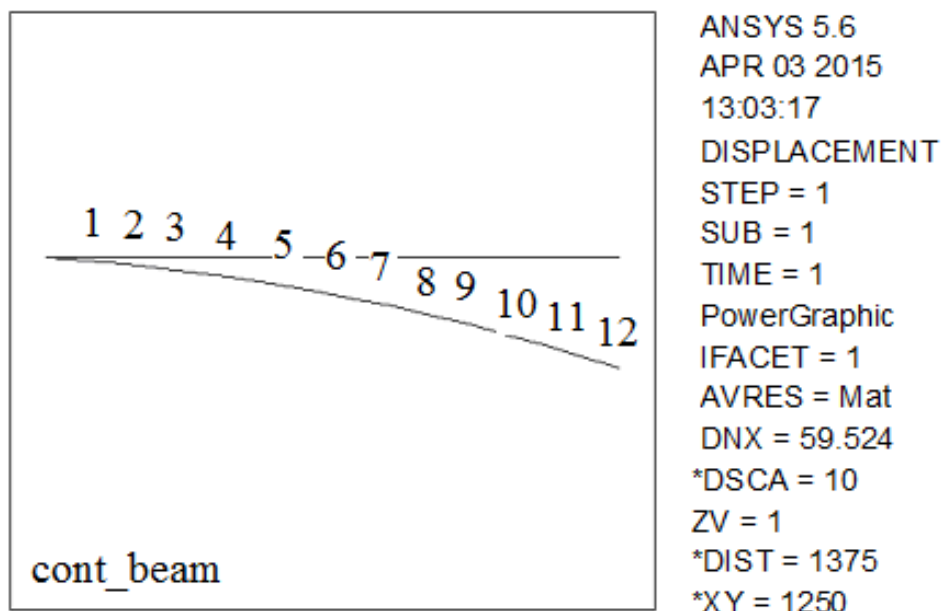


Рис. 2

Заметим, что на приведенном рисунке показана нумерация узлов, а не элементов.

Для составления таблицы прогибов:

Main Menu → General Postproc → List Results → - Sorted Listing - → Sort Nodes...

Далее, в поле *ORDER* выбрать *Ascending Order*, в поле *Item, Comp* выбрать *geometry*, в правом окне выбрать *Node loc X* (*Координаты узлов по оси X*). На графическом экране появится таблица координат узлов (рис. 3).

Main Menu → General Postproc → List Results → Nodal Solution...

В открывшемся окне *List Nodal Solution* выбрать *DOF Solution* и *ALL DOFs*. Полученная таким образом таблица прогибов балки (смещений узлов вдоль оси *Y*) показана на рис. 4.

LIST ALL SELECTED NODES. DSYS = 0						
NODE	X	Y	Z	THXY	THYZ	THZX
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
2	2.5000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
3	0.25000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
4	0.50000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
5	0.75000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
6	1.0000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
7	1.2500	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
8	1.5000	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
9	1.7500	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
10	2.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
11	2.2500	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00

Рис. 3

PRINT DOF NODAL SOLUTION PER NODE			
***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING*****			
LOAD STEP = 1 SUBSTEP = 1			
TIME = 1.000 LOAD CASE = 0			
THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN GLOBAL COORDINATES			
NODE	UX	UY	ROTZ
1	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	-0.86310E-03	-0.67857E-02
3	0.0000	-0.33333E-02	-0.12857E-01
4	0.0000	-0.72321E-02	-0.18214E-01
5	0.0000	-0.12381E-01	-0.22857E-01
6	0.0000	-0.18601E-01	-0.26786E-01

7	0.0000	-0.25714E-01	-0.30000E-01
8	0.0000	0.33542E-01	-0.32500E-01
9	0.0000	-0.41905E-01	-0.34286E-01
10	0.0000	-0.50625E-01	-0.35357E-01
11	0.0000	-0.59524E-01	-0.35714E-01

Рис. 4

Плоский изгиб балки

Рассмотрим задачу о прямом изгибе в одной плоскости упругой многопролетной балки с кусочно-постоянными изгибными жесткостями.

Внешними силовыми факторами вызывающими такой изгиб, могут являться сосредоточенные силы, моменты и распределенные нагрузки с кусочно-линейным изменением интенсивности. При решении задачи надо учесть собственный вес балки.

Схема конструкции показана на рис. 5 а. Прямой поперечный изгиб здесь осуществляется в плоскости Oxy . Задачу решаем в системе СИ.

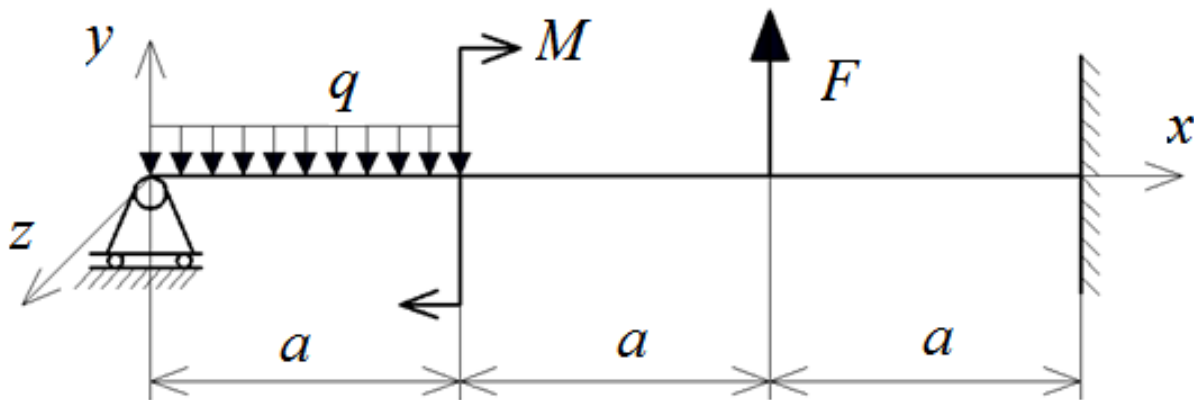


Рис. 5, а

Примем:

$$a = 2\text{ м}; q = 2 \cdot 10^4 \text{ Н/м};$$

$$M = 2 \cdot 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}; F = 3 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

$$E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2; A = 2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$J_{zz} = 2,03 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4; h = 0,2 \text{ м}.$$

Плотность материала балки $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$.

Текст программы, предназначенной для решения данной задачи и пакетной режиме показан ниже.

Отметим, что подходящим конечным элементом, для задач плоского изгиба является балочный элемент типа *BEAM3*. Для этого элемента силы F считаются положительными, если их направления совпадают с положительным направлением оси Oy . Наоборот, распределительные нагрузки q считаются положительными, если их направления противоположны направлению $+y$. Наконец, моменты $M = M_z$ положительны при направлениях вращения против часовой стрелки.

Степенями свободы *BEAM3* являются узловые перемещения *UX*, *UY* и угол поворота *ROTZ*.

Балку необходимо разбивать на конечные элементы *BEAM3* так, чтобы в пределах каждого элемента были постоянны изгибные жесткости *EJ_{zz}*, распределенные нагрузки менялись бы линейно или были постоянными, а внутри элементов не находились бы опоры и точки приложения активных сил и моментов.

Ниже приводится текст программы для работы в пакетном режиме:

```

/batch                ! пакетный режим /batch
/title, bending of the beam
/prep 7               ! входим в процессор /prep 7
/show, beam, grph    ! в режиме /batch задаем вывод графики в файл
                    ! beam.grph
et, 1, beam 3        ! элементы с TYPE = 1 – балочные КЭ BEAM3
keypot, 1, 9, 9      ! keypot(9) = 9 для beam3 – вывод в 9-и
                    ! промежуточных точках
r, 1, 2.89e-3,2.03e-5,0.2
                    ! real const. типа real = 1: (двутавр N 20a)
                    ! площадь поперечного сечения AREA = 2,89·10-3 м2
                    ! момент инерции IZZ = 2,03·10-5 м4,
                    ! высота HEIGHT = 0,2 м
mp, ex, 1, 2e11       ! для материала 1 модуля Юнга EX = 2·1011 Н/м2
mp, nuxy, 1, 0.3     ! для материала 1 коэф. Пуассона NUXY = 0,3
mp, dens, 1,7800     ! плотность материала 1 DENS = 7800 кг/м3
n_el = 3             ! вводим параметр для количества элементов
abeam = 2           ! abeam – параметр длины первого пролета балки
                    ! (200 см)
n,1                 ! определяем узлы по координатам
n,3,2* abeam
n,4,3* abeam
e,1,2               ! определяем элементы beam3 с узлами 1 и 2,
e,2,3               !                               2 и 3,
e,3,4               !                               3 и 4
save                ! сохранение результатов построения модели и сетки
finish              ! выход из препроцессора

/solu               ! входим в решатель / solution
antype, static      ! статический тип анализа
                    !*** задаем условия закрепления
d,1,uy              ! Uy = 0 в узле 1 (шарнирно-подвижная опора)
d,4,ux              ! Ux = 0 в узле 4 (жесткая заделка)
d,4,uy              ! Uy = 0 в узле 4 (жесткая заделка)
d,4,rotz            ! ROTZ = 0 в узле 4 (жесткая заделка)

```

```

sfbeam,1,,press,2e4      ! задаем постоянную распределенную нагрузку
                          ! на элементе 1  $PRES = 2 \cdot 10^4$  Н/м
                          ! (положительным значением  $PRES$  считается
f,2,mz,-2e4              ! направление против оси + y)
                          ! задаем момент  $MZ = - 2 \cdot 10^4$  Н/м в узле 2
                          ! (положительным считается  $mz$ , направленный
                          ! против
                          ! часовой стрелки)
                          ! задание сил  $F_y$  иди  $F_x$  (если оси действуют)
                          ! проводится
                          ! аналогична с заменой  $M_z$  на  $F_y$  или  $F_x$  (сила  $F_y$ 
                          ! положительна,
                          ! если направлена по оси +y, т.е. наоборот, но
                          ! сравнению с  $PRES$ )
f,3,fy,3e4               ! задаем силу  $FY = 3 \cdot 10^4$  Н, приложенную в узле 3
acel,0,9.8,0             ! задаем ускорение силы тяжести ( $g = 9,8$  м/с2),
                          ! действующее на всю конструкцию
allsel,all               ! выделение всей конструкция перед началом расчета
solve                    ! решим СЛАУ МКЭ
finish                    ! выход из процессора решения
!
/post1                    ! входим в постпроцессор  $POST1$ 
set,1,1                  ! считываем данные о решении
prrsol                   ! печатаем опорные реакции
/psc,u,,1                ! показываем условия закрепления
/psc,f,,1                ! показываем силы
/psc,cp,,1               ! показываем связанные степени свободы
/psc,m,,1                ! показываем моменты
/psf,pres,norm,1         ! показываем распределенные нагрузки
/pnum,node,1             ! нумеруем узлы при графическом показе
eplot                    ! нарисовать элементы
/pnum,node,0             ! не нумеруем узды при графическом показе
/pnum,eleme,1           ! пронумеровать элементы
/number,1                ! занумерованные элементы показывать различным
                          ! цветом, но без нумерации
eplot                    ! нарисовать элементы
                          ! далее следует вывод перерезывающих сил,
                          ! изгибающих
                          ! моментов уравнения изогнутой оси балки и
                          ! изгибных
                          ! напряжений н 11 равноотстоящих точках каждого
                          ! элемента
*dim,x_coord,array,n_el*11 ! массив для x-координат
*dim,q_y,array,n_el*11    ! массив для перерезывающих сил

```

```

*dim,m_z,array,n_el*11      ! массив для изгибающих моментов
*dim,u_y,array,n_el*11     ! массив для прогибов балки
*dim,sigma,,array,n_el*11  ! массив для изгибных напряжений
/output, beam, res         ! задаем текстовый вывод в файл beam.res
prrsol                    ! вывод реакций опор
/com,
/nopr
*vwrite
(5x,'x',8x,'q_y',10x,'M_z',10x,'u_y',10x,'S_yy')
*vwrite
(1x,'-----')
*do,i,1,n_el              ! цикл по элементам
n1_nood=nelem(i,1)       ! определяем номера граничных узлов n1_nood
n2_nood=nelem(i,2)       ! и n2_nood i-го элемента
nx1_nood=nx(n1_nood)     ! определяем x – координаты граничных узлов
                          ! nx1_nood и
nx2_nood=nx(n2_nood)     ! nx2_nood
l_elem=nx2_nood-
nx1_nood                 ! находим длину i-го элемента
hx=l_elem/10            ! hx — расстояние между 11 точками вывода в i-м
                          ! элементе
uy1=uy(n1_nood)         ! uy1, uy2 - перемещения в узлах i-го элемента
uy2=uy(n2_nood)
tz1=rotz(n1_nood)       ! tz1, tz2 – углы поворота в узлах i-го элемента
tz2=rotz(n2_nood)
esel,s,elem,,i,i       ! выбираем элемент с номером i
/gopr
* vwrite,i              ! выводим текущий номер элемента
(/20x,' element n = ',f2.0)
/nopr
*do,ii,1,11            ! цикл по точкам элементов
j = ii+(i-1)*11        ! j - текущий номер элементов массивов
xx = nx1_nood+hx*(ii-1) ! xx – x-координата j-й точки
x_coord(j)=xx
ksi = (ii-1)*0.2-1     ! ksi – значение, соответствующее xx
                          ! в локальной системе координат
                          ! вычисляем u_y(j) в j-й точке с использованием
                          ! функции аппроксимации перемещений на элементе
uu=0.5*(uy1+uy2+(uy2-uy1)*ksi*(3-ksi*ksi)*0.5)
uu = uu+0.125*l_elem*(tz1*(1-ksi)-tz2*(1+ksi))*(1-ksi*ksi)
u_y(j)=uu
etable,sig,ls,ii*3-1   ! из таблицы etable выбираем указатели на sbyt,
                          ! mfor,
                          ! mmomz

```

```

etable,qq_y,smisc,ii*6-4      ! для  $\sigma$ ,  $q_y$ ,  $m_z$  согласно документации по
                              ! ВЕАМЗ
etable,mm_z,smisc,ii*6      ! при KEYOPT (9) = 9
*get,ss,elem,i,etab,sig     ! определяем  $\sigma$ ,  $q_y$ ,  $m_z$ 
*get,ss,elem,i,etab,qq_y    ! по найденным указателям
*get,mm,elem,i,etab,mm_z
qq=-qq                       ! перерезывающая сила в ANSYS имеет
                              ! противоположный знак по сравнению с принятым
                              ! для эпюр перерезывающих сил

sigma(j)=ss
q_y(j)=qq
m_z(j)=mm
/gopr
*vwrite,xx,qq,mm,uu,ss      ! вывод найденных значений
(1x,f7.1,3x,e10.4,3 x,e10.4,3 x,e10.4,3 x,e10.4,3)
/nopr
*enddo
*enddo
/output
esel,all
finish
/post26                      ! входим в постпроцессор /POST26
store,allos,n_el*11         ! подготавливаем место для размещения
                              ! переменных для графиков
/xrang,nx(nelem(1,1)),nx(nelem(n_el,2))
                              ! изменение переменной  $x$ 
                              ! совпадает с длиной балки
/axlab,x,x-coordinate      ! задаем подпись для оси абсцисс
/color,curve,whit,1,6      ! цвет кривых на графиках - белый
/color,grid,whit           ! цвет сетки - белый
/plopts,info,off
/plopts,frame,off
grid,1                      ! задаем вывод сетки на графиках
vput,x_coord(1),1          ! помещаем а переменные 1-5
vput,q_y(1),2              ! соответствующие массивы
vput,m_z(1),3
vput,u_y(1),4
vput,sigma(1),5
xvar,1                      ! задаем переменную по оси  $x$ 
/output,beam,res,,append   ! восстанавливаем текстовый вывод
                              ! в файл beam.res с записью в конец файла
/com,*****
/com, vari 2 – q_y
/com, vari 3 – m_z

```

```

/com, vari 4 – u_y
/com, vari 5 – sigma_yy
/com, time – x-coordinate
/com,*****
extreme,2,5          ! вывод экстремальных значений переменных 2-5
/output
                    ! далее последовательно задаем надписи по осям
                    ! ординат
                    ! и записываем в графический файл beam.grph
                    ! графики
                    ! перерезывающих сил  $q_y$ , изгибающих моментов
                    !  $m_z$ 
                    ! перемещений  $u_y$ , изгибных напряжений  $\sigma_{yy}$ 

/window,1,1top
/axlab,y,sh force  $q_y$ 
plvar,2
/window,1,off
/noerase
/window,2,rtop
/axlab,y,bend mom  $m_z$ 
plvar,3
/window,2,off
/window,3,1,bot
/axlab,y,displ  $u_y$ 
plvar,4
/window,3,off
/window,4,rbot
/axlab,y,bend str  $s_y$ 
plvar,4
finish
/exit                ! окончание работы программы

```

Результатом выполнения программы является текстовый файл *beam.res* и графический файл *beam.grph*.

В текстовом файле *beam.res* содержатся данные об опорных реакциях и численных значениях для всех четырех эпюр вместе с их максимумами и минимумами. Фрагмент распечатки файла *beam.res* приводится ниже:

```

          PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE
***** ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 5.6 *****
ANSYS/ED
00000000 VERSION = INTEL NT 00:11:38 AUG 29, 2002 CP =28.890
bending of the beam
***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****
THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN GLOBAL COORDINATES

```

<i>NODE</i>	<i>FX</i>	<i>FY</i>	<i>MZ</i>
1		21793.	
4	0.0000	-10468.	6783.7
<i>TOTAL VALUES</i>			
<i>VALUE</i>	0.0000	11325.	6783.7
<i>x</i>	<i>q_y</i>	<i>M_z</i>	<i>u_y</i>
			<i>S-yy</i>

element n=1.

0.0	0.2179E+05	0.2728E-11	0.0000E+00	-.1344E-07
0.2	0.1775E+05	0.3954E+04	-.8363E-03	-.1948E+08
0.4	0.1370E+05	0.7100E+04	-.1603E-02	-.3497E+08
0.6	0.9661E+04	0.9436E+04	-.2297E-02	-.4648E+08
0.8	0.5617E+04	0.1096E+05	-.2916E-02	-.5401E+08
1.0	0.1572E+04	0.1168E+05	-.3455E-02	-.5755E+08
1.2	-.2472E+04	0.1159E+05	-.3913E-02	-.5711E+08
1.4	-.6516E+04	0.1069E+05	-.4286E-02	-.5268E+08
1.6	-.1056E+05	0.8987E+04	-.4570E-02	-.4427E+08
1.8	-.1460E+05	0.6470E+04	-.4764E-02	-.3187E+08
2.0	-.1865E+05	0.3145E+04	-.4863E-02	-.1549E+08

element n = 2.

2.0	-.1865E+05	0.2314E+05	-.4863E-02	-.1140E+09
2.2	-.1869E+05	0.1941E+05	-.4806E-02	-.9562E+08
2.4	-.1874E+05	0.1567E+05	-.4557E-02	-.7718E+08
2.6	-.1878E+05	0.1192E+05	-.4154E-02	-.5870E+08
2.8	-.1883E+05	0.8155E+04	-.3634E-02	-.4017E+08
3.0	-.1887E+05	0.4386E+04	-.3033E-02	-.2161E+08
3.2	-.1891E+05	0.6076E+03	-.2390E-02	-.2993E+07
3.4	-.1896E+05	-.3179E+04	-.1741E-02	0.1566E+08
3.6	-.1900E+05	-.6975E+04	-.1124E-02	0.3436E+08
3.8	-.1905E+05	-.1078E+05	-.5751E-03	0.5310E+08
4.0	-.1909E+05	-.1459E+05	-.1323E-03	0.7189E+08

element n = 3.

4.0	0.1091E+05	-.1459E+05	-.1323E-03	0.7189E+08
4.2	0.1087E+05	-.1242E+05	0.1772E-03	0.6116E+08
4.4	0.1082E+05	-.1025E+05	0.3647E-03	0.5048E+08
4.6	0.1078E+05	-.8088E+04	0.4512E-03	0.3984E+08
4.8	0.1073E+05	-.5937E+04	0.4579E-03	0.2925E+08
5.0	0.1069E+05	-.3795E+04	0.4057E-03	0.1869E+08
5.2	0.1064E+05	-.1661E+04	0.3158E-03	0.8184E+07
5.4	0.1060E+05	0.4632E+03	0.2092E-03	-.2282E+07
5.6	0.1056E+05	0.2579E+04	0.1070E-03	-.1270E+08
5.8	0.1051E+05	0.4686E+04	0.3027E-04	-.2308E+08
6.0	0.1047E+05	0.6784E+04	0.0000E-00	-.3342E+08

Эпюры перерезывающих сил (*sh force q_y*), изгибающих моментов (*bend mom m_z*), прогибов (*displ u_y*) и изгибающих напряжений (*bend str s_y*) показаны на рис. 5 б.

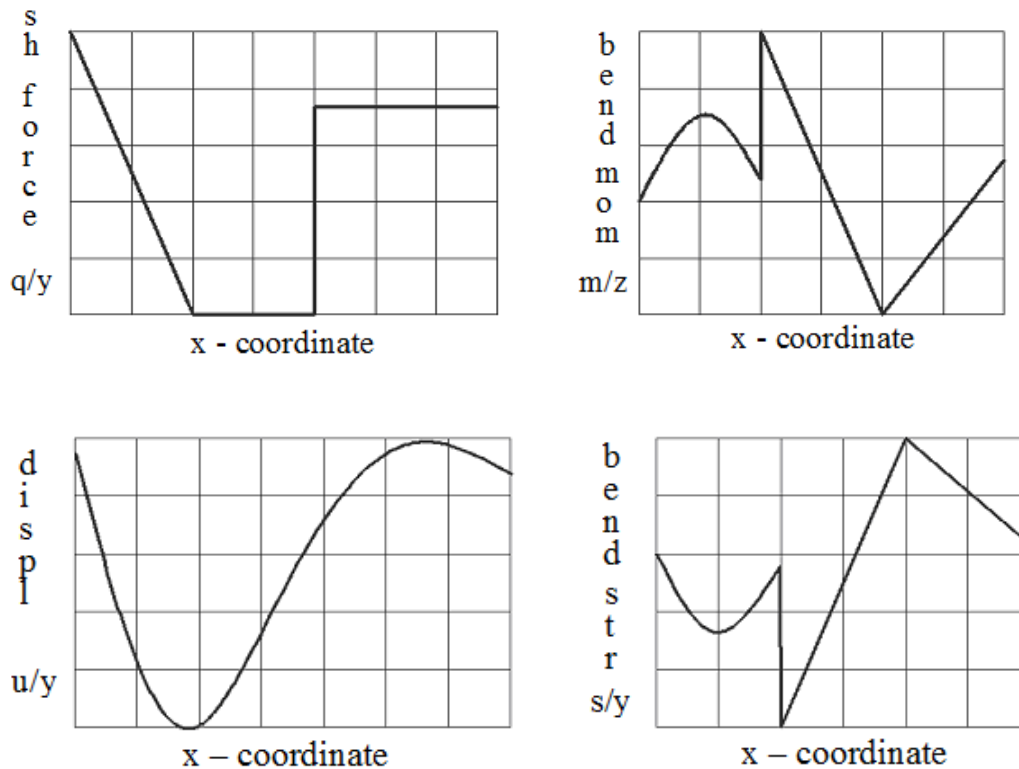


Рис. 5, б

Можно предложить и другой вид постпроцессорной обработки результатов расчета: вместо построения графиков, как на рис. 5 б, строить эпюры соответствующих величин с обозначением цветом диапазона рассматриваемой величины. Этот метод нагляднее, но требует более мелкой сетки элементов. На той сетке, которая представлена в рассматриваемой задаче, он оказался менее точным.

Фрагмент программы для реализации построения эпюр при постпроцессорной обработке результатов приводится ниже.

```

/post1                ! входим в постпроцессор POST1
                    ! показ деформированной формы балки

set,first
pldisp,1

                    ! построение эпюры поперечных сил
etable,qyi,smisc,2   ! таблица значений поперечной силы в узле i
                    ! (присвоено qyi)
etable,qyj,smisc,62  ! таблица значений поперечной силы в узле j
                    ! (присвоено qyj)

plls,qyi,qyj,-3      ! графический вывод
etable,mzi,smisc,6   ! построение эпюры изгибающих моментов

```



```

etable,mziil1,smisc,12
etable,mziil2,smisc,18
etable,mziil3,smisc,24
etable,mziil4,smisc,30
etable,mziil5,smisc,36
etable,mziil6,smisc,42
etable,mziil7,smisc,48
etable,mziil8,smisc,54
etable,mziil9,smisc,60
etable,mzj,smisc,66
pl1s,mzi,mzj,3
etable,szi,ls,2

```

! построение эпюры изгибающих напряжений
!.на верхн. поверхности балки

```

etable,szji,ls,32
pl1s,szi,szj,3
finish
/exit

```

! окончание работу программы

В результате работы программы в файле *beam.grph* будут содержаться четыре рисунка: деформированная и недеформированная формы балки (рис. 5 б), эпюра поперечных сил (рис. 5 г), эпюра изгибающих моментов (рис. 5 д) и эпюра изгибающих напряжений (рис. 5 е).

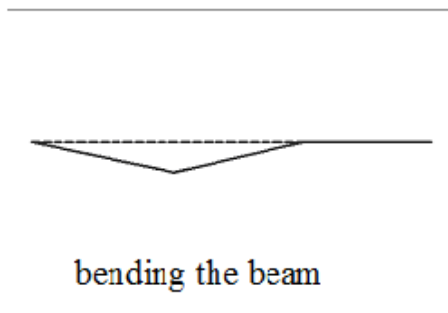


Рис. 5, в

ANSYS 5.6
APR 27 2015
14:45:32
PLOT NO 1
LINE SRESS

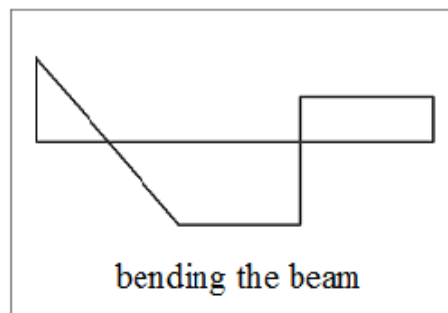


Рис. 5, г

ANSYS 5.6
APR 27 2015
14:45:32
PLOT NO 2
LINE SRESS

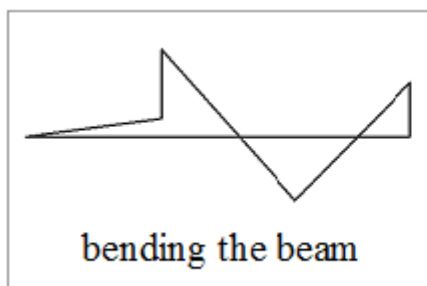


Рис. 5, д

ANSYS 5.6
APR 27 2015
14:45:32
PLOT NO 3
LINE SRESS

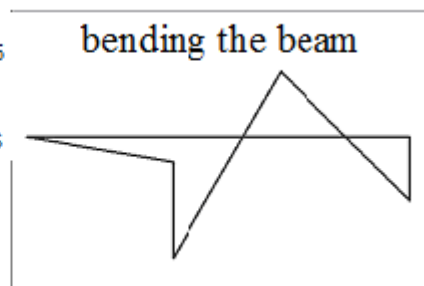


Рис. 5, е

ANSYS 5.6
APR 27 2015
14:45:32
PLOT NO 4
LINE SRESS

Как уже отмечалось выше, описанный метод построения эпюр имеет существенный недостаток: эпюры изгибающих моментов на участках с постоянной распределенной нагрузкой оказываются линейными, хотя известно, что они должны быть представлены квадратичными параболами. Это объясняется тем, что графическое построение эпюр в данной программе опирается на команду [p]lls] постпроцессора /POST1. Это команда действительно предназначена для графического показа заданных характеристик в виде эпюр, но графики этих характеристик по команде [p]lls] линейны в пределах одного конечного элемента и строятся по значениям характеристик на концах элементов. Кроме того, использование опции KEYOPT (9)=9 для элементов BEAM3 при построении эпюр по команде [p]lls] не дает уточнения формы эпюры, т.к. для команды [p]lls] нет доступа к данным в девяти промежуточных точках, устанавливаемых по опции KEYOPT (9)=9.

Кручение стержней

При решении задач на подходящими типами конечных элементов являются BEAM4 и PIPE16. Эти элементы задаются узловыми смещениями UX, UY, UZ и углами поворота ROTX, ROTY, ROTZ в двух концевых узлах. С их помощью можно решать разнообразные задачи растяжения-сжатия, изгиба и кручения стержневых систем (в том числе и для сложного напряженного состояния).

Элемент BEAM4 является обобщением плоского балочного элемента BEAM3 на трехмерный случай. Если ось x – продольная ось элемента, то крутящим моментом является момент относительно этой оси - MX.

Для задач кручения стержней требуется задавать модуль сдвига G, а также специальную геометрическую характеристику поперечного сечения J_k , которая для кругового сечения совпадает с полярным моментом инерции J_p .

Для стержней круглого сечения предпочтительнее использовать «трубчатый» элемент PIPE16. Этот элемент представляет собой полую трубку, и для сплошного круглого стержня следует задать толщину трубки, равную радиусу сечения. Среди констант элемента (Real Constants) достаточно определить внешний диаметр OD и толщину стенки TKWALL:

Command(s):

R,NSET,OD,TKWALL.

GUI:

Male Menu → Preprocessor → Real Constants

В качестве примера рассмотрим следующую задачу. Стальной стержень круглого сечения с заземленными торцами скручивается двумя равными и одинаково направленными моментами $M = 8 \cdot 10^4$ (Н·см) (рис. 6).

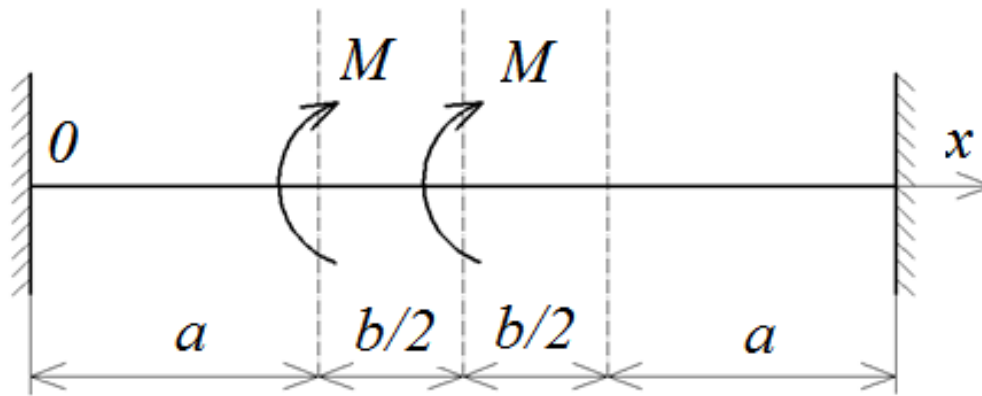


Рис. 6

Геометрические данные задачи следующие: диаметр стержня $d = 10$ см; $a = 60$ см; $b = 80$ см. Требуется определить реакции в заделках и угол закручивания в сечении $x = a + b/2$.

Ниже приводятся варианты программы для решения данной задачи, соответствующие двум типам конечных элементов: *BEAM4* и *PIPE 16*.

```

/!batch
/com ! итоговые результаты записываются в стандартный
! файл вывода*.out
/title, torsion of a circular ! кручение стержня круглого сечения
rod
! ***** вариант с конечными элементами типа BEAM4 *****
/!prepr7 ! входим в препроцессор /prepr7
! задачу решаем в системе СГС

pi = 3.1416
dr = 10 ! dr – диаметр стержня
ar = 60 b2r = 40 ! ar, b2r – геометрические параметры
jpol1 = pi*dr**4/32 ! константа для полярного момента инерции
et,1beam4 ! балочные КЭ типа BEAM4
r,1pi*dr**2/4,jpol1/2 ! задаем константы элемента BEAM4:
! площадь поперечного сечения area = pi*dr**2/4;
! момент инерции IZZ = jpol/2

rmore,,jpol1 ! полярный момент инерции
mp,ex,1,2e6 ! модуль Юнга EX = 2·106 (Н/см2)
mp,gxy,1,8e5 ! модуль сдвига GXY = 8·105 (Н/см2)
n,1 ! определяем узлы по координатам
n,2,ar
n,3,ar+b2r
n,4,ar+b2r*2
n,5,(ar+b2r)*2
*do,i,1,4 ! определяем элементы BEAM4
e,i,i+1

```

```

*enddo
finish
/solu                ! входим в решатель /solution
antype,static        ! статический тип анализа
d,1,all,0,,5,4       ! задаем условия закрепления в узлах 1 и 5
f,2,mx,8e4           ! задаем крутящие моменты в узлах
outpr,basic,1        ! вывод основных результатов в стандартный файл
solve                ! решаем СЛАУ МКЭ
finish
    !***** вариант с конечными элементами типа PIPE16*****
/prep7
et,1,pipe16          ! КЭ – трубки PIPE16
r,1,dr,dr/2          ! константы элемента PIPE16
                    ! внешний диаметр сечения dr,
                    ! толщина стенок трубы tkwall = dr/2 (сплошная труба)
finish
/solu
solve
finish
/exit

```

В результате выполнения программы в файле *jobname.out* (*jobname* - имя создаваемых рабочих файлов, задается при входе в ANSYS) среди различной выходной информации найдем значения реактивных моментов:

$MX = - 8 \cdot 10^4$ (Н·см) и угол закручивания $ROTX = 0,0061$ рад $\approx 03^\circ$.

Кривые стержни

Для расчета кривых стержней круглого сечения в ANSYS существует конечный элемент типа *PIPE18*. Этот элемент представляет собой искривленную полу трубку, отличаясь от *PIPE16* именно наличием кривизны.

При расчете кривых стержней с помощью элемента *PIPE18* в списке констант элемента требуется задать следующие величины: внешний диаметр *OD*, толщину стенки *TKWALL* и радиус кривизны *RADCUR*. Для этого используется команда:

Command(s):

R,NSET,OD,TKWALL,RADCUR.

GUI:

Main Menu → **Preprocessor** → **Real Constants**

При формировании элемент *PIPE18* необходимы три узла: два граничных и узел, определяющий положение центра кривизны элемента. В качестве примера рассмотрим стержень круглого поперечного сечения с диаметром $D = 2$ см, согнутый в виде полукольца радиусом $R = 20$ см и нагруженный в своей плоскости радиальной силой $F_1 = 100$ Н и тангенциальной силой $F_2 = 150$ Н (рис. 7 а).

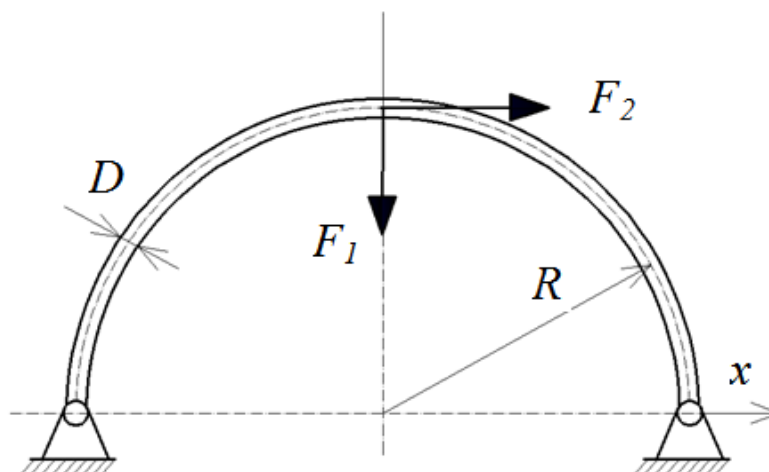


Рис. 7, а

Для построения эпюр на криволинейных стержнях можно использовать команду **PLLS**. Напомним, что по команде **PLLS** набор линейных эпюр строится на линиях, соединяющих узлы элементов. Поэтому для более точной картинки эпюр нужно дополнительно сгенерировать узлы и элементы. Чем мельче будут элементы, тем лучше будут выглядеть и получающиеся эпюры.

Следует также отметить, что при рисовании плоской системы кривых стержней плоскости Oxy , в соответствии с документацией по элементу *PIPE18*, поперечные силы в узлах будут находиться и позициях *SMISC,3* и *SMISC,9* (как *MFORZ*), а изгибающие моменты — в позициях *SMISC,5* и *SMISC,11* (как *MMOMY*) элементной таблицы *ETABLE*. Это также отличает процедуры рисования эпюр для элементов *PIPE18* от рассмотренного ранее случая с элементами *BEAM3*. Соответствующая программа *CURVED BAR 2*, в основе которой лежит программа для расчета криволинейных стержней приводится ниже:

```

/batch                ! пакетный режим /batch
/title, curved bar 2  ! заголовок: кривой брус 2
/show, curved bar 2,grph ! задаем вывод графики в файл curved bar 2.grph
/prep7                ! входим в препроцессор /prep7, все данные
                        ! в системе СГС
dr = 2                ! dr - диаметр стержня
ar = 20               ! ar – радиус кривизны
et,1,pipe18          ! КЭ – искривленные трубки PIPE18
r,1,dr,dr/2,ar      ! константы элемента PIPE 18: внешний
                        ! диаметр
                        ! сечения OD = dr, толщина стенок трубы
                        ! tkwall = dr/2
                        ! (сплошная труба), радиус кривизны
                        ! radcur = ar
mp,ex,1,2e6          ! модуль Юнга EX = 2·106 Н/см2
mp,nuxy,.3           ! коэффициент Пуассона NUXY = 0,3

```

```

n_fill = 20          ! число дополнительных узлов на каждом
                    ! участке в  $90^0$ 
csys,1              ! переходим в цилиндрическую систему
                    ! координат
n,1                 ! определяем узлы по координатам
n,2,ar,180
n,2+n_fill,ar,90
n,2+n_fill,n_fill-1 ! генерируем  $n\_fill-1$  равноотстоящих узлов
                    ! между узлами 2 и  $2 + n\_fill$ 
n,2+n_fill*2,ar
fill,2+n_fill,2+n_fill*2,n_fill-1 ! генерируем  $n\_fill-1$  равноотстоящих узлов
                    ! между узлами  $2 + n\_fill$  и  $2+n\_fill*2$ 
csys,0              ! возвращаемся в декартову систему координат
*do,I,2,1+n_fill*2
e,I,i+1,1
*enddo
finish
/solu               ! входим в решатель / solution
antype,static       ! статический тип анализа
d,all,uz,0
d,2,ux,0$d,2,uy,0   ! задаем условия закрепления в узлах
d,2+n_fill*2,ux,0 $ d,2+n_fill*2,uy,0
f,2+n_fill,fy,-100   ! задаем силу  $F_1 = 100 H$  в узле  $2+n\_fill$ 
f,2+n_fill,fx, 150   ! задаем силу  $F_2 = 150 H$  в узле  $2+n\_fill$ 
solve
finish
/post1
! согласно документации по КЭ PIPE 18
! определяем указатели на значения нормальных и поперечных сил и
! изгибающих моментов на концах элементов
etable,mforxi,smisc,1 ! smisc,1 - нормальная сила  $N$  в узле  $i$ 
etable,mforxj,smisc,7 ! smisc,7 - нормальная сила  $N$  в узле  $j$ 
etable,mforxi,smisc,3 ! smisc,3 – поперечная сила  $Q$  в узле  $i$ 
etable,mforxj,smisc,9 ! smisc,9 – поперечная сила  $Q$  в узле  $j$ 
etable,mmomzi,smisc,5 ! smisc,5 – изгибающий момент  $M$  в узле  $i$ 
etable, mmomzj,smisc,11 ! smisc,11– изгибающий момент  $M$  в узле  $j$ 
/output, curved bar 2, res ! направляем вывод в файл curved bar 2.res
prrsol              ! печатаем опорные реакции
pretab,mforyi,mforyj ! печатаем поперечные силы
pretab,mforyi,mforyj ! печатаем нормальные силы
pretab,mmomxi,mmomzj ! печатаем изгибающие моменты
/output
/pnum,node,1        ! нумеровать узлы при графическом показе
pldisp,1            ! показ деформированной формы стержня

```

eplot	! нарисовать элементы
/pbc,u,,1	! показывай граничные условия, силы и
	! моменты
/pbc,f,,1	
/pbc,m,,1	
/psf,pres,norm,1	! показывать распределенные нормальные
	! нагрузки
/pnum,elem,1	! нумеровать элементы
/pnum,node,0	! не нумеровать узлы
/number,1	! занумерованные объекты показывать
	! только различным цветом без нумерации
/zoom,1,scrn,,,1.7	! масштабировать окно для удобства
/pbs,all,,0	! не показывать граничные условия, силы и
	! моменты
/psf,pres,norm,0	! не показывать распределенные нагрузки
/pnum,elem,0	! не нумеровать элементы
/traid,off	! не показывать начало н систему координат
plls,mforyi, mforyj,2	! графический показ эпюры поперечных сил Q
plls,mforyi, mforyj,2	! графический показ эпюры нормальных сил N
plls,mmomzi,mmomzj,-2	! графический показ эпюры изгибающих
	! моментов M
finish	
/exit	

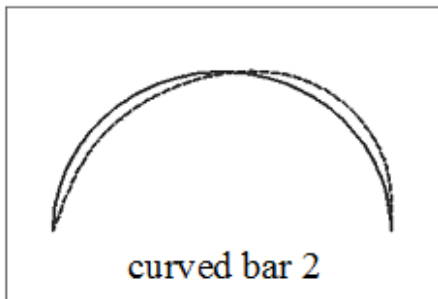


Рис.7, б

ANSYS 5.6
APR 07 2015
14:01:15

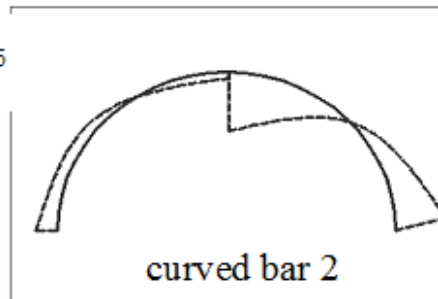


Рис.7, в

ANSYS 5.6
APR 07 2015
15:31:26

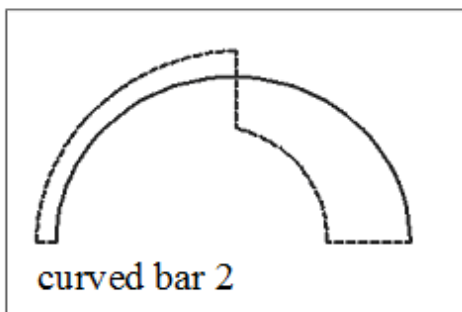


Рис.7, г

ANSYS 5.6
APR 08 2015
10:45:32

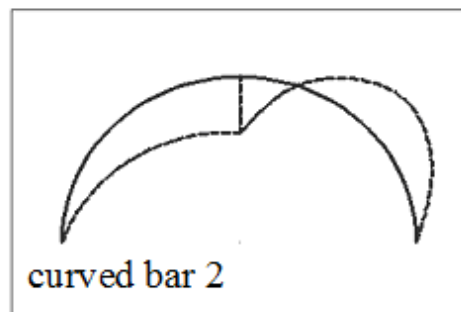


Рис.7, д

ANSYS 5.6
APR 08 2015
10:45:32

На рис. 7 б-д приведены результаты, полученные по программе *CURVED*

BAR 2. Рис. 7 б иллюстрирует деформационную форму бруса, а на рис. 7 в-д приведены, соответственно, эпюры перерезывающих сил, нормальных сил и изгибающих моментов.

Начальные деформации

Начальную относительную деформацию для стержневых и балочных элементов типа *LINK* и *BEAM* можно задать как константу *ISTRN* элемента в разделе *Real Constant*. Для задач сопротивления материалов с начальными деформациями характерно наличие жесткого элемента конструкции. Жесткая часть конструкции не должна деформироваться и, следовательно, не может состоять из стержневых или балочных конечных элементов. Однако она накладывает ограничения на перемещения углов конечно-элементной модели в виде некоторых уравнений связей. В *ANSYS* узловые перемещения можно подчинить уравнениям связей (*constant equation*), используя команду:

Command(s):

CE, NEQN, CONST, NODE1, Lab1, C1, NODE2, Lab2, C2, NODE3, Lab3, C3

Main Menu → Preprocessor → Conplng/Ceqn → Constraint Eqn

Здесь *NEQN* - ссылочный номер уравнения связи, *Lab1, Lab2, Lab3* – обозначения перемещений в узлах *NODE1, NODE2* и *NODE3* соответственно, и уравнение имеет вид:

$$CONST = Lab1 * C1 + Lab2 * C2 + Lab3 * C3.$$

В качестве примера рассмотрим следующую задачу (рис. 8).

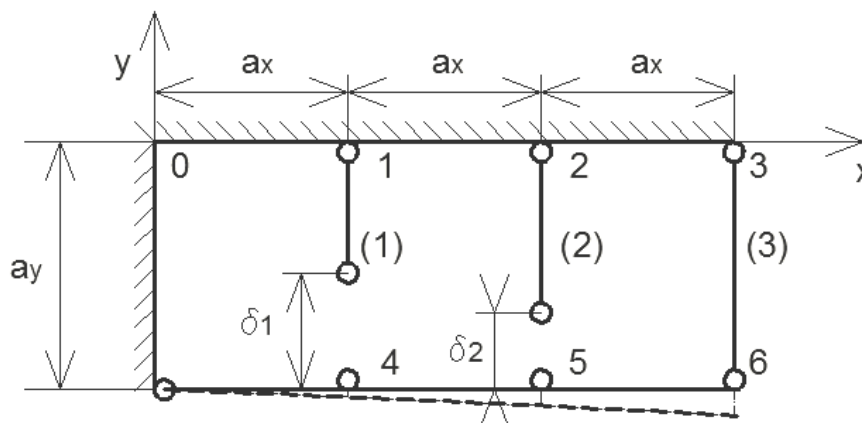


Рис. 8

Жесткий брус подвешен на трех стальных стержнях с одинаковым поперечным сечением площадью 25 см^2 каждый, расположенных на расстояниях $a_x = 100 \text{ см}$ друг от друга. Стержень 3 имеет длину $a_y = 100 \text{ см}$. Стержень 2 короче стержня 3 на $\delta_2 = 0,05 \text{ см}$, а стержень 1 короче стержня 3 на $\delta_1 = 0,06 \text{ см}$. Требуется определить напряжения в стержнях после сборки всей конструкции.

Будем считать, что вес стержни работают только на растяжение-сжатие вдоль оси *y*. Тогда отдельный стержень можно моделировать конечным элементом типа *LINK1*. Зададим узлы и элементы ($U_x = 0$) так, как показано на рис. 8.

Из простых геометрических соображений находим, что жесткий брус определяет следующие соотношения между перемещен нами U_{uj} в узлах с номерами $j = 4, 5, 6$:

$U_{v5} - 2U_{v4} = 0$; $U_{v6} - 3U_{v4} = 0$. Эти два уравнения и будут являться уравнениями связей между узлами.

Для учета начальной деформации стержней 1 и 2 и отсутствия начальной деформации в стержне 3 определим три набора констант для элементов *LINK1*. Для первого и второго зададим площадь поперечного сечения и начальную деформацию стержней, а для третьего набора - только площадь поперечного сечения.

Программа для решения данной задачи в пакетном режиме, составленная на основе соответствующей программы, приведена ниже.

```

/batch                ! пакетный режим /BATCH
/title,Init_stersses ! заголовок: начальные деформации
/com                  ! текстовые результаты сохраняются в файле
                    ! Init_str.res
/prep7                ! входим в препроцессор /PREP7
antype,static         ! статический тип анализа, все данные в системе СГС
ax=100$ ay=100        ! геометрические размеры
delt1=0.06            ! начальное удлинение стержня 1
delt2=0.05            ! начальное удлинение стержня 2
area=25               ! площади поперечных сечений стержней
Mp,ex,1,2e6           ! MAT = 1: модуль Юнга  $E_X = 2 \cdot 10^6$ , Н/см2
Et,1,link1            ! TYPE = 1: стержневой КЭ типа LINK1
r,1,area,delt1/(ay-delt2) ! REAL = 1: area = 25 см2 (определенно выше)
! ISTRN = del1/(ay-delt1) – относительная начальная деформация стержня 1
r,2,area,delt2/(ay-delt2) ! REAL = 2: area = 25
! ISTRN = del2/(ay-delt2) – относительная начальная деформация стержня 2
r,3,area               ! REAL = 3: area = 25
n,1,ax$n,2,2*ax$n,3,3*ax ! создаем узлы
n,4,ax,-ay$n,5,2*ax,-ay$n,6,3*ax,-ay
    ! создаем КЭ с различными Real Const.
real,1$e,1,4
real,2$e,2,5
real,3$e,3,6
d,all,ux,0            ! считаем перемещения  $U_x$  для всех узлов равными 0
d,1,uy,0,,3          ! закрепляем верхние узлы (1,2,3) по оси Y
se,1,0,5,uy,1,4,uy,-2 ! задаем 1-е уравнение связи:  $UY_5 + (-2) * UY_4 = 0$ 
se,2,0,6,uy,1,4,uy,-3 ! задаем 2-е уравнение связи:  $UY_6 + (-3) * UY_4 = 0$ 
save
finish
/solu                 ! находим в решатель /solution
solve                 ! решаем СЛАУ

```

```

finish
/post1
! согласно документации по LINK1 определяем указатели на значения
! осевых усилий и напряжений в стержнях
etable,forax,smisc,1      ! Smisc, 1 - осевое усилие
etable,sigax,ls,1        ! Ls, 1 - осевое напряжение
/output,Init_str,rea      ! Направляем вывод в файл Init_str.res
pretab,forax,sigax       ! Печатаем усилия и напряжения
/output
finish
/exit

```

Фрагмент выходного файла *Init_str.res* показан ниже:

```

*****ansys—engineering analysis system release 5.6*****
  ansys/ed
00000000 version = intel nt 07:23:55 aug 21, 2002 cp = 25.040
Init_stresses
*****post1 element table listing *****
stat current current
elem forax  sigax
  1 24301.  972.03
  2 13578.  543.11
  3 -17152. -686.08

minimum values
elem 3 3
value -17152. -686.08

maximum values
elem 1 1
value 24301 972.03

```

Таким образом, результатом работы программы будут следующие значения напряжения в стержнях: $\delta_1 = 972.03 \text{ Н/см}^2$; $\delta_2 = 543.11 \text{ Н/см}^2$; $\delta_3 = -686.08 \text{ Н/см}^2$, при этом стержни 1 и 2 окажутся растянутыми, а стержень 3 - сжатым.

Температурные напряжения

При решении задач с температурными деформациями (напряжениями) необходимо задавать в списке свойств материалов коэффициент температурного расширения α , который в ANSYS определяется как ALPX по команде:

```

Command (s):
MP, ALPX,NMAT, VALUE_ALPX

```

GUI:

Main Menu → **Preprocessor** → **Material Props** → **Polynomial**

(в случае температурной зависимости свойств материала),

где $NMAT$ - номер материальных свойств, $VALUE_ALPX$ - значение коэффициента температурного расширения материала.

В качестве примера рассмотрим ступенчатый стержень из двух разнородных материалов, жестко заземленный слева, а между правым торцом и жесткой опорой имеется зазор $\Delta = 0,05$ см (рис. 9). Стержень нагревается на $\Delta = 40^\circ$ С. Геометрические параметры: $a = 50$ см; $F = 10$ см². Модули упругости материалов: медь - $E = 0,8 \cdot 10^6$ Н/см²; сталь - $E = 2 \cdot 10$ Н/см². Коэффициенты температурного расширения: медь - $\alpha = 165 \cdot 10^{-7}$, град⁻¹; сталь - $\alpha = 125 \cdot 10^{-7}$, град⁻¹.

Требуется определить наибольшие по абсолютной величине напряжения в стержне.

Конечно-элементная модель ступенчатого стержня на рис. 9.

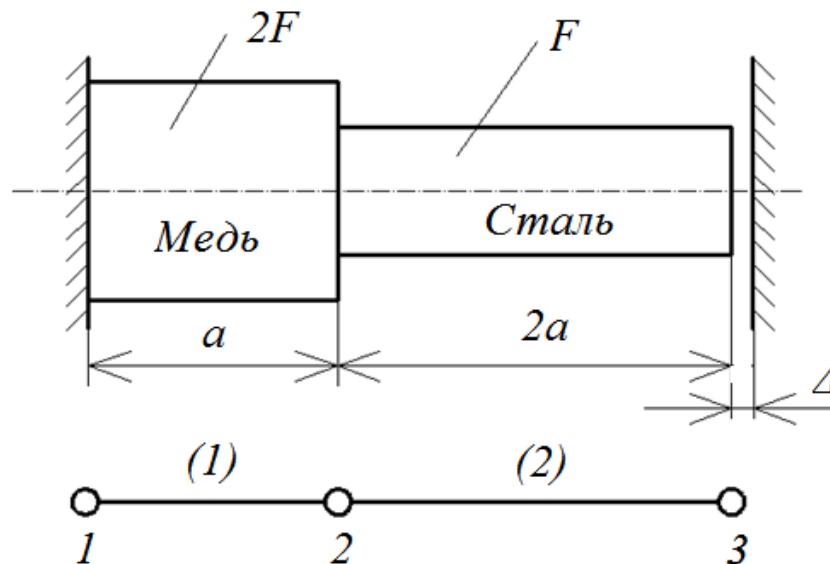


Рис. 9

Ниже представлена программа для определения температурных полей, трактуемых в ANSYS как объемные силы (*Body Loads*):

```
/batch ! пакетный режим
/com,
/com ! текстовые результаты сохраняются
! в файле Temp.res
/prep7 ! входим в препроцессор /PREP7
antype,static ! статический тип анализа,
! все данные в системе СГС
ax=50 ! геометрический размер
ar1=20 $ ar2=10 ! площади поперечных сечений
```

```

mp,ex,1,0.8e6          ! MAT = 1 медь, E=0,8·106, Н/см2
mp,alpx,1,165e-7      ! для MAT =1 α=165·10-7
mp,ex,2,2e6           ! MAT = 2 сталь, E=2·106, Н/см2
mp,alpx,2,125e-7      ! для MAT =2 α=125·10-7
                       ! TYPE=1: стержневой конечный
et,1,link1            элемент
                       ! LINK1
r,1,ar1 $ r,2,ar2     ! REAL 1 и 2 с разными площадями
n,1,0 $ n,2,ax $ n,3,3*ax ! создаем узлы
  ! создаем КЭ с различными MP и Real Const.
mat,1 $ real,1 $ e,1,2
mat,2 $ real,2 $ e,2,3
d,1,all,0             ! ограничиваем все перемещения в
                       узле 1
d,3,ux,0.05           ! ограничиваем все перемещения в
                       узле 3
! tref,20              ! так можно задать референсную
                       ! температуру (или начало отсчета
                       ! температурной шкалы) TREF=200.
                       ! По умолчанию TREF=0.
bfunif,temp,40        ! задаем постоянную температуру
                       ! T:T- TREF=40
  ! другие способы задания температуры T(T- TREF=40):
! bf,all,temp,40      ! для всех узлов
! bfe,all,temp,1,40   ! для всех элементов
finish
/solu                  ! входим в решатель /solution
solve                  ! решаем СЛАУ
finish
/post1
  ! согласно документации для конечного элемента LINK1 определяем
  ! указатели на значения осевым усилий к напряжений в стержнях
etable,forax,smisc,1   ! smisc, 1 – осевое усилие
Etable,sigax,ls,1     ! ls,1 – осевое напряжение
/output,temp,res       ! направляем вывод в файл Temp.res
Pretab,forax,sigax    ! печатаем усилия и напряжения
/output
finish
/exit

```

Фрагмент выходного файла Temp.res показан ниже:

```

*****ansys–engineering analysis system release 5.6*****
ansys/ed
00000000 version = intel nt 22:59:55 aug 21, 2002 cp = 29.710

```

***** *post1 element table listing* *****

stat current current

elem forax sigax

1 -4061.5 -203.08

2 -4061.51 -406.15

minimum values

elem 1 2

value -4061.51 -406.15

maximum values

elem 1 1

value -4061.51 -203.08

Таким образом, в результате выполнения данной программы получаются следующие напряжения в стержнях: $\delta_1 = -203,08 \text{ Н/см}^2$; $\delta_2 = -406,15 \text{ Н/см}^2$ соответственно ($1 \text{ Н/см}^2 = 0,1 \text{ Мпа}$).

Литература

1. Каплун А.Б. и др. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. - М.: Едиториал, УРСС, 2003. - 272 с.
2. Наседкин А. В. Конечно-элементное моделирование на основе ANSYS / В сб.: ANSYS 5.5/ED (Московское представительство CAD-FEM GmbH), (Ansys_cdding_russian/ Education/ Structural/ Beams&Shells, 1999).
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. - 392 с.
4. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Наука, 1980. - 254 с.
5. ANSYS Basic Analysis Procedures Guide. ANSYS Release 5.6. ANSYS Inc., 1998.
6. Тургумбаев Ж.Ж., Гапарова Ж.Т., Тургумбаев С.Дж. Редукторлорду доборлоодо ЭЭМди колдонуу / КГТУ им. И.Раззакова. - Б.: ИЦ «Текник», 2014. - 32 с.

Корректор *Эркинбек к. Ж.*
Редактор *Турдукулова А.К.*
Тех.редактор *Кочоров А.Д*

Подписано к печати 3.08.2015 г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.
Бумага офс. Печать офс. Объем 2 п.л. Тираж 75 экз. Заказ 350. Цена 34.2с.
Бишкек, ул. Сухомлинова, 20. ИЦ “Текник” КГТУ им. И.Раззакова, т.: 54-29-43
е-mail: beknur@mail.ru

