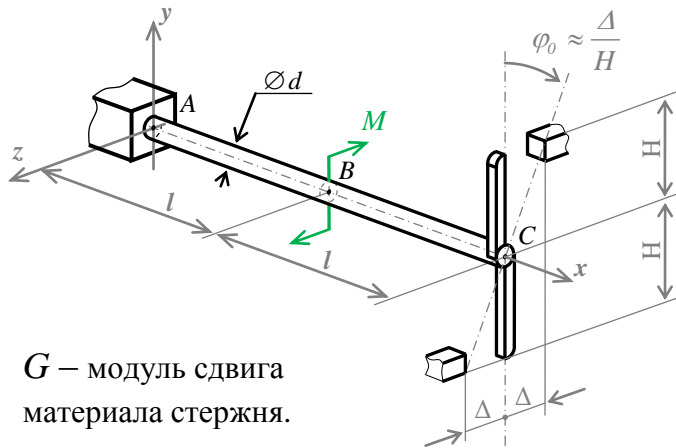


E-06 (ANSYS)

Формулировка задачи:



G – модуль сдвига материала стержня.

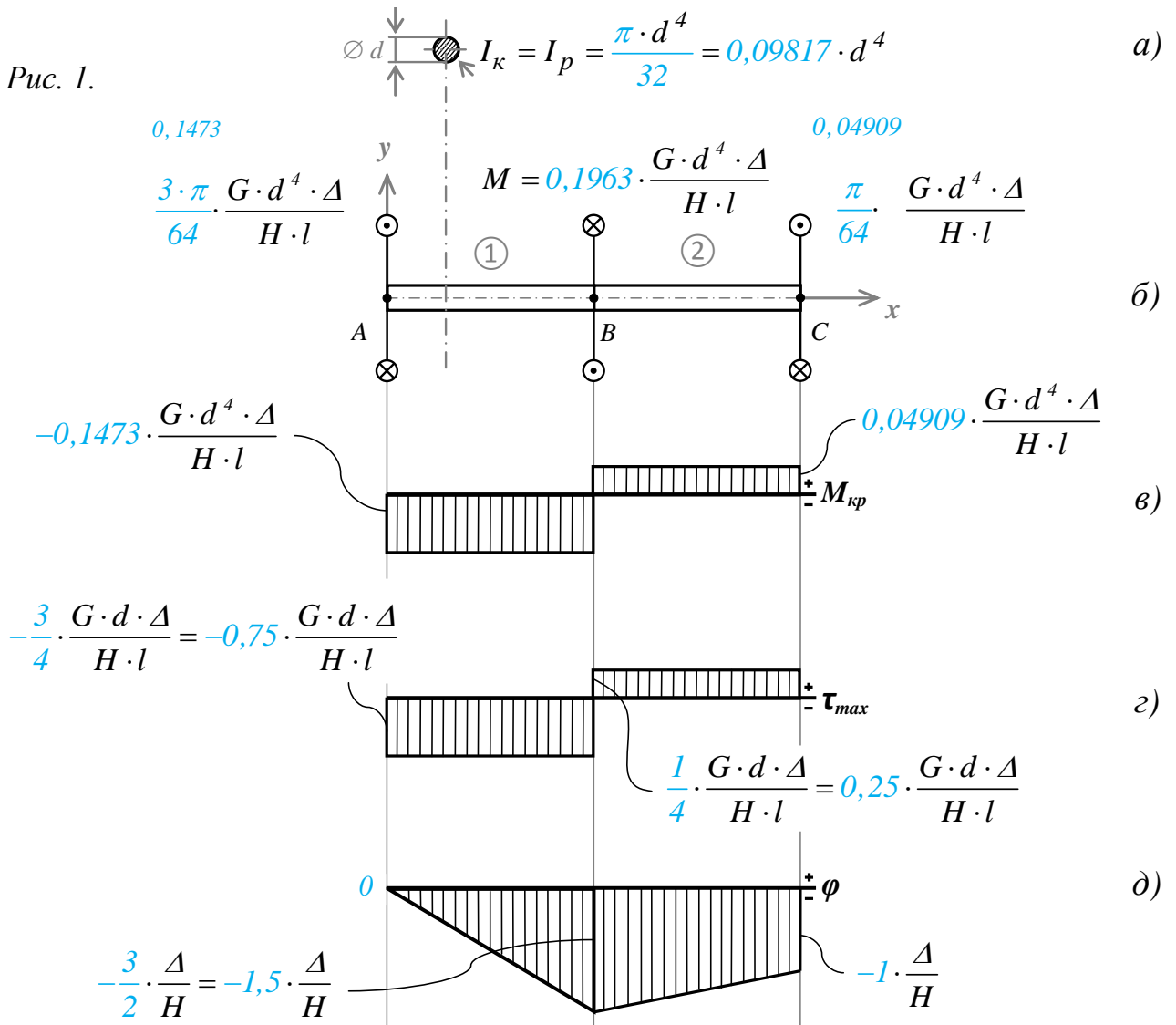
Дано: $G, l, H, \Delta, M = \frac{G \cdot \pi \cdot d^4 \cdot \Delta}{16 \cdot H \cdot l}$;

Упругий стержень нагружен сосредоточенным внешним крутящим моментом M . Точка C может поворачиваться не более, чем на угол φ_0 .

Найти: эпюры $M_{кр}$, τ_{max} , φ .

Аналитический расчёт (см. [E-06](#)) даёт следующие решения:

Рис. 1.

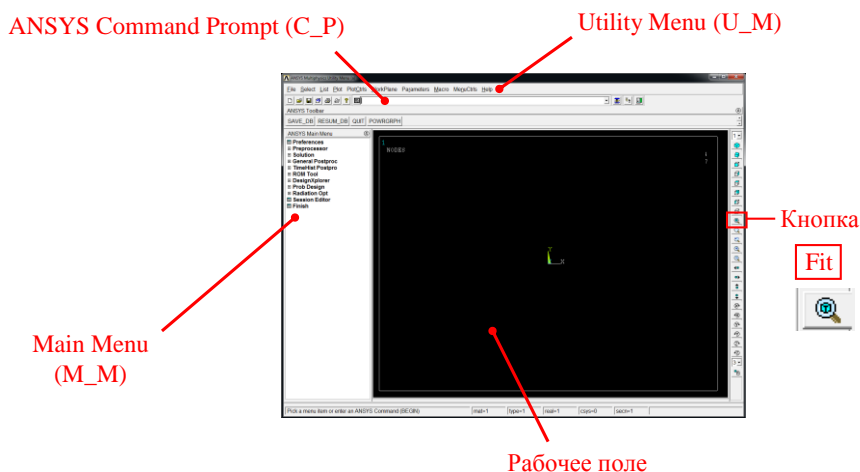


Задача данного примера: при помощи ANSYS Multyphysics получить эти же решения методом конечных элементов.

<http://www.tychina.pro>

Предварительные настройки:

Для решения задачи используется ANSYS Multiphysics 14.0:



С меню M_M и U_M работают мышью, выбирая нужные опции.

В окне C_P вручную вводят текстовые команды, после чего следует нажать на клавиатуре **Enter**.

Меняем чёрный цвет фона на белый:

```
U_M > PlotCtrls > Style > Colors > Reverse Video
```

Скрываем пункты меню, не относящиеся к прочностным расчётам:

```
M_M > Preferences > Отметить "Structural" > ОК
```

При построениях полезно видеть номера узлов и номера конечных элементов (один участок – один конечный элемент):

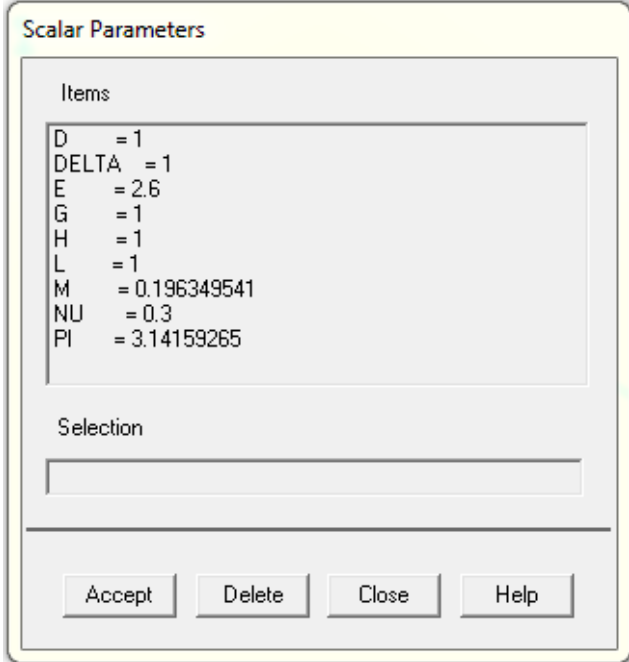
```
U_M > PlotCtrls > Numbering >
Отметить NODE ;
Установить Elem на "Element numbers";
Установить [/NUM] на "Colors&numbers"
> ОК
```

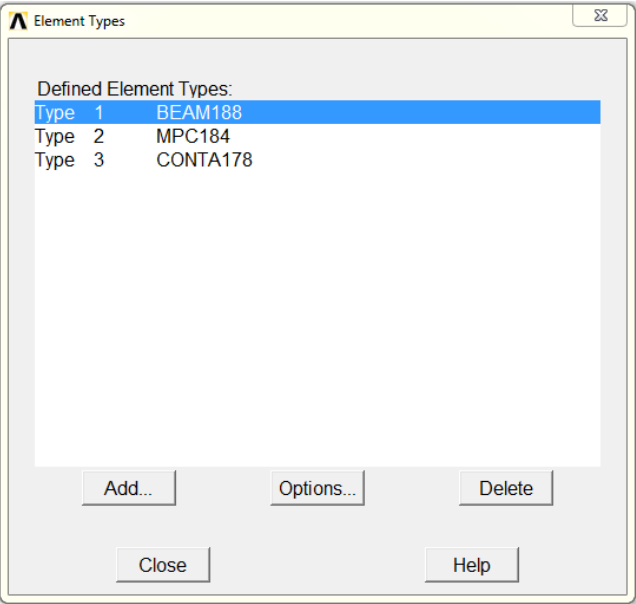
Для большей наглядности увеличим размер шрифта:

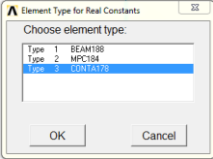

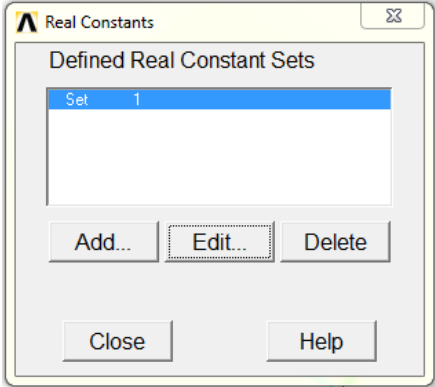

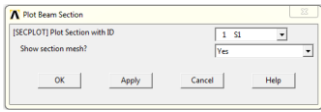
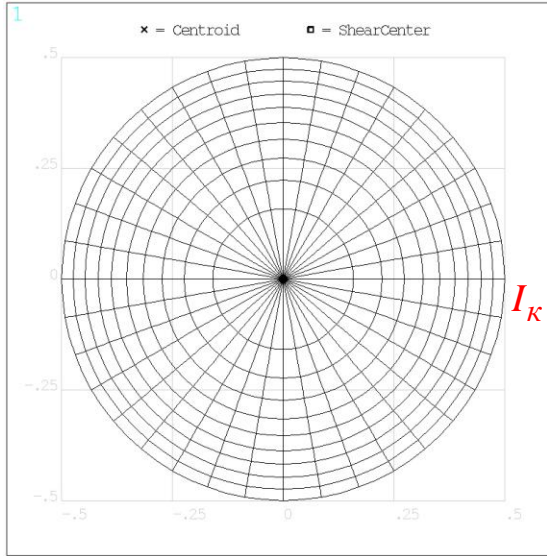
```
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Legend Font >
Установить «Размер» на «22» > ОК
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Entity Font >
Установить «Размер» на «22» > ОК
```

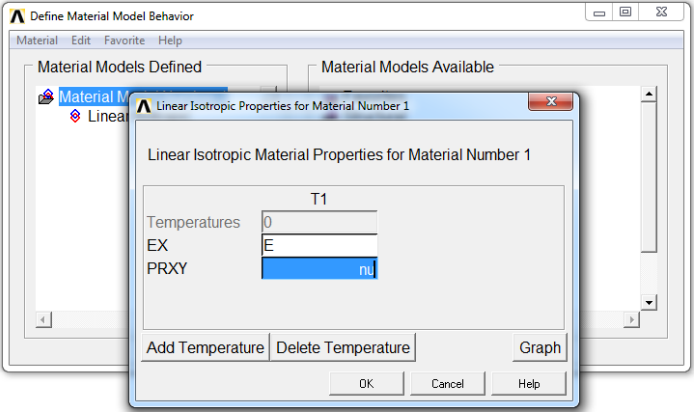
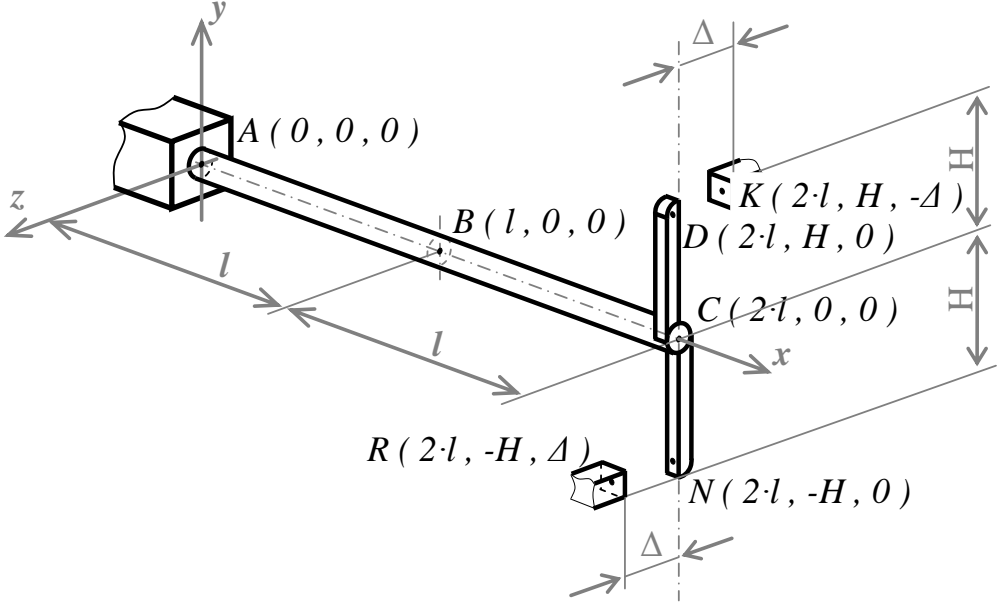
Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.




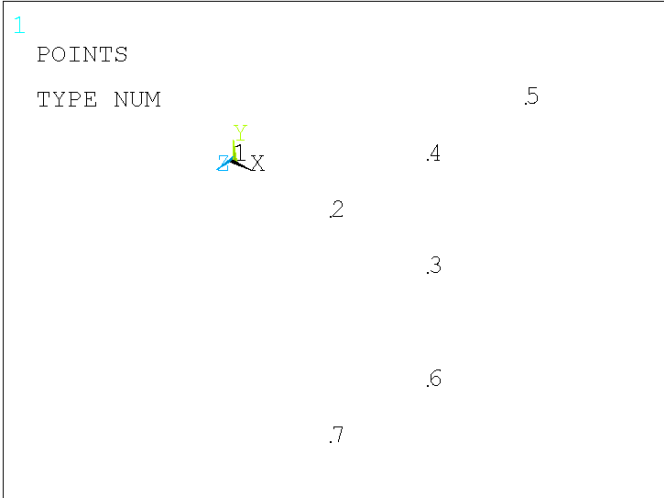
Решение задачи: Приравняв G, d, Δ, H, l и M к единице, результаты получим в виде чисел, обозначенных на *рис.1*. синим цветом.

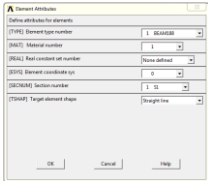
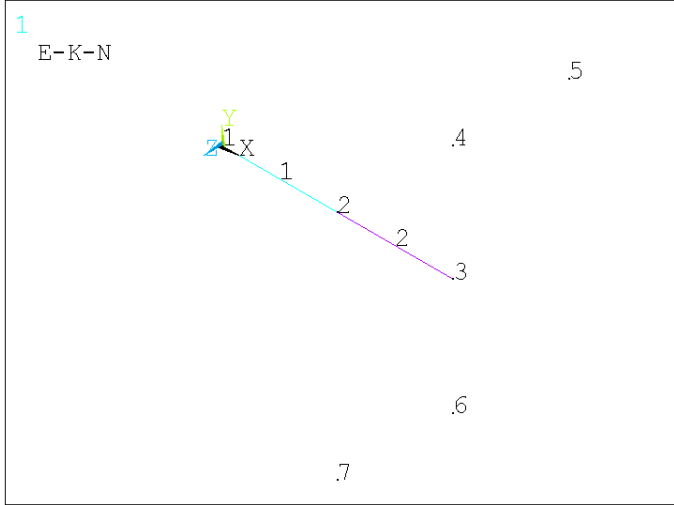
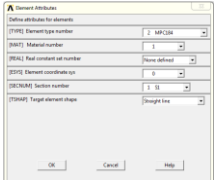
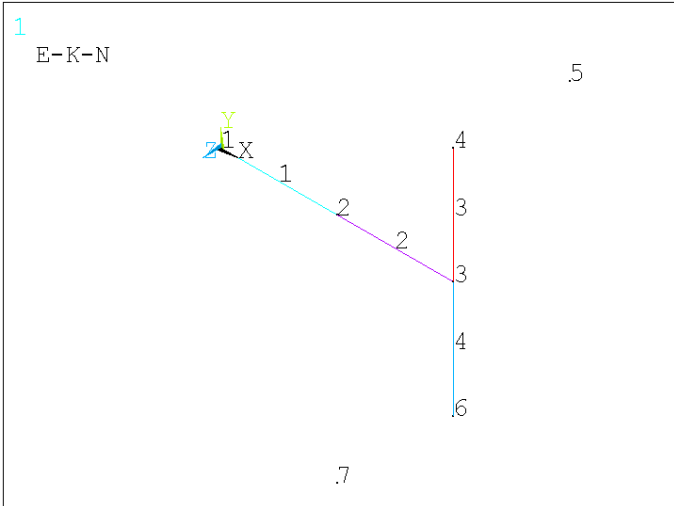
№	Действие	Результат
1	<p><i>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</i></p> <pre> U_M > Parameters > Scalar Parameters > E=2.6 > Accept > nu=0.3 > Accept > G=E/(2*(1+nu)) > Accept > PI=acos(-1) > Accept > d=1 > Accept > Delta=1 > Accept > H=1 > Accept > l=1 > Accept > M=G*pi*D**4*Delta/(16*H*l) > Accept > > Close </pre> <p>При $E=2,6$ и $\nu=0,3$ имеем: $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{2,6}{2,6} = 1$.</p>	

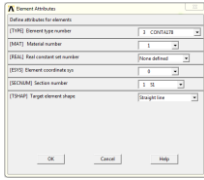
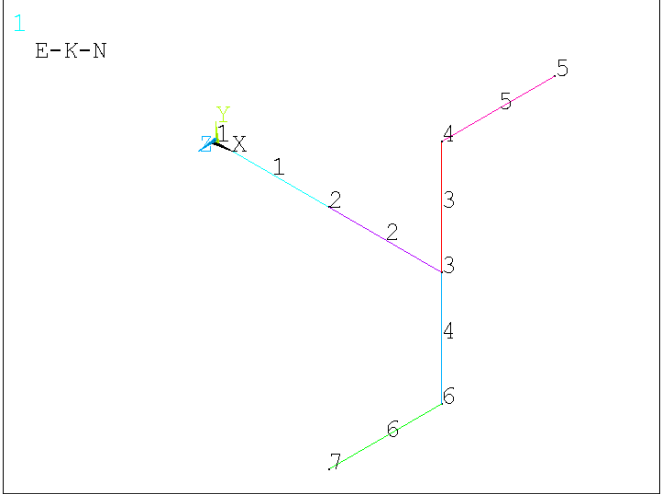
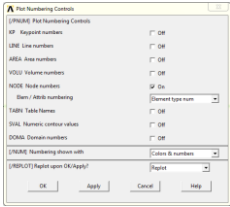
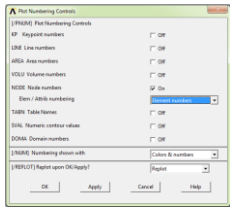
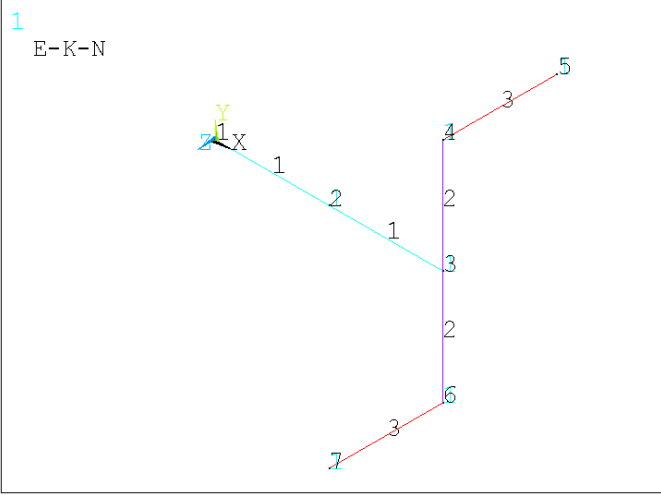
№	Действие	Результат
2	<p>Таблица элементов: 1 – трёхмерный балочный BEAM188; 2 – жёсткий балочный MPC184; 3– контактный элемент CONTA178.</p> <p>M_M > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Add</p> <p>Element reference number пишем 1</p> <p>В левом окошке выбираем "Beam"</p> <p>В правом окошке "2 node 188"</p> <p>> OK ></p> <p>В окошке Element types отметить строчку "1 BEAM188"</p> <p>> Options ></p> <p>K3 установить "Quadratic Form"</p> <p>> OK ></p> <p>> Add ></p> <p>Element reference number пишем 2</p> <p>В левом окошке выбираем "Constraint"</p> <p>В правом окошке "Nonlinear MPC 184"</p> <p>> OK ></p> <p>В окошке Element types отметить строчку "2 MPC184"</p> <p>> Options ></p> <p>K1 установить "Rigid Beam"</p> <p>> OK > OK ></p> <p>> Add ></p> <p>Element reference number пишем 3</p> <p>В левом окошке выбираем "Contact"</p> <p>В правом окошке "nd-to-nd 178"</p> <p>> OK ></p> <p>В окошке Element types отметить строчку "2 CONTA178"</p> <p>> Options ></p> <p>K2 установить "Penalty method"</p> <p>K4 установить "Real const GAP"</p> <p>K5 установить "Nodal coord - Z"</p> <p>> OK > Close</p>	

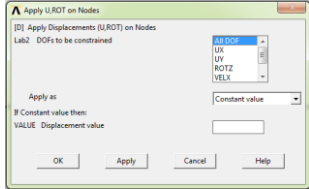
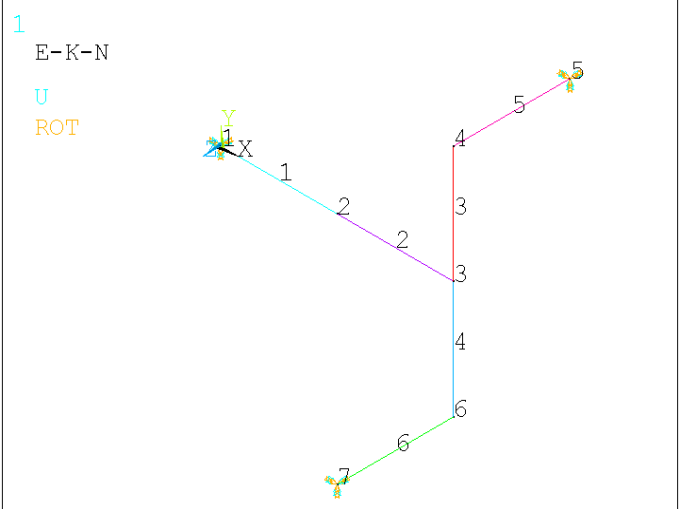
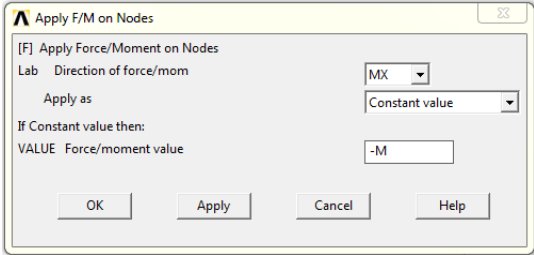
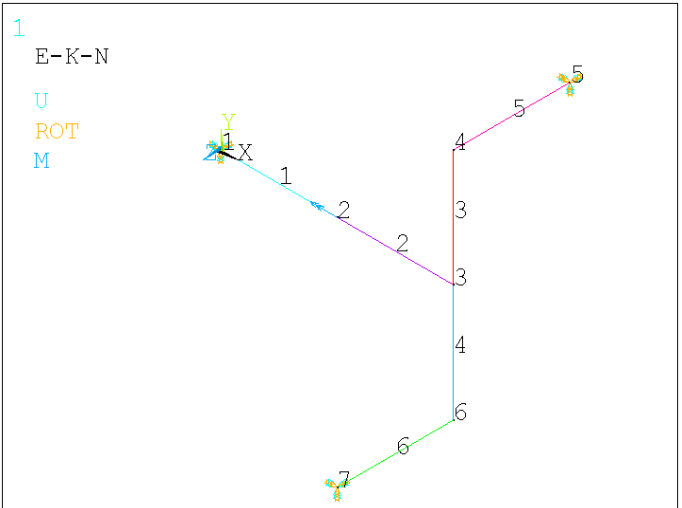
№	Действие	Результат
3	<p>Таблица реальных констант:</p> <p>Жёсткость контакта и величина зазора:</p> <p>M_M > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete > Add</p> <p>В окошке Element Type for Real Constants выбрать CONTA178 > OK ></p> <p>В поле FKN пишем 1e3</p> <p>В поле GAP пишем Delta > OK</p> <p>Видим результат – один набор реальных констант в таблице Real Constants. > Close</p>  	
4	<p>Два поперечных сечения:</p> <p>Сечение S1 диаметром d:</p> <p>M_M > Preprocessor > Sections > Beam > Common Sections</p> <p>ID пишем 1</p> <p>NAME пишем имя сечения S1</p> <p>Sub-Type установить изображение круга</p> <p>Offset To установить "Centroid"</p> <p>R пишем $d/2$ (это радиус круга)</p> <p>N пишем, например, 36 (секторов)</p> <p>T пишем, например, 10 (колец)</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем оба сечения, смотрим геометрическую жёсткость при кручении у сечения S1:</p> <p>M_M > Preprocessor > Sections > Beam > Plot Section</p> <p>[Secplot] установить "1 S1"</p> <p>Show section mesh? установить "Yes"</p> <p>> OK</p> <p>Значение $I_K = 0,09817 \cdot d^4$ совпадает с вычисленным аналитически (рис. 1а.).</p>  	 <p>SECTION ID 1 DATA SUMMARY</p> <p>Section Name = S1</p> <p>Area = .785397</p> <p>Iyy = .049087</p> <p>Iyz = -.120E-17</p> <p>Izz = .049087</p> <p>Warping Constant = 0</p> <p>Torsion Constant = <u>.098174</u></p> <p>Centroid Y = .317E-16</p> <p>Centroid Z = -.673E-17</p> <p>Shear Center Y = -.102E-16</p> <p>Shear Center Z = .194E-17</p> <p>Shear Corr. YY = .857146</p> <p>Shear Corr. YZ = .146E-14</p> <p>Shear Corr. ZZ</p>

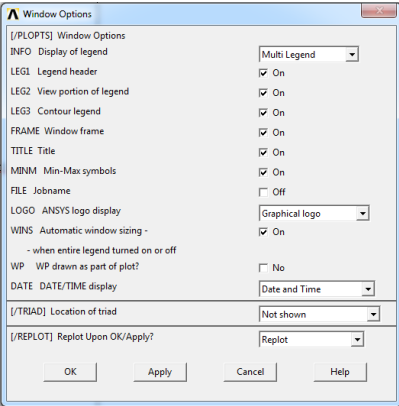
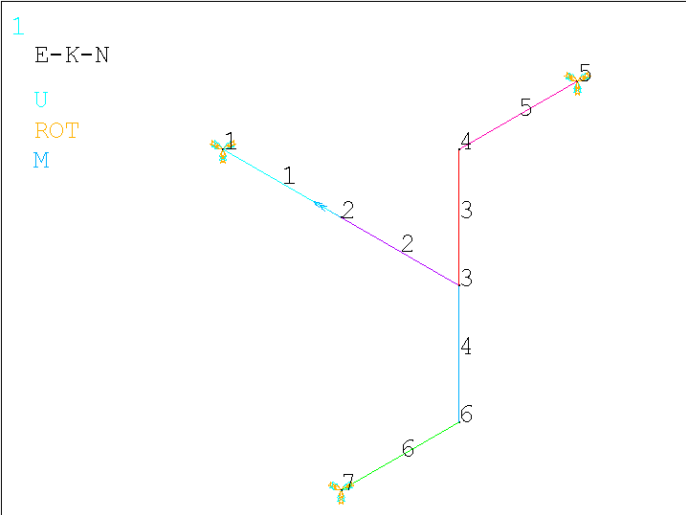
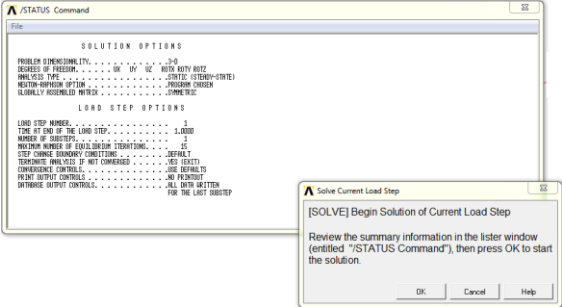
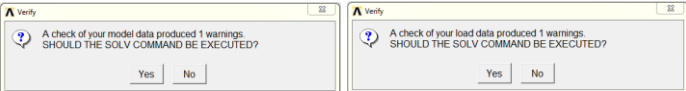
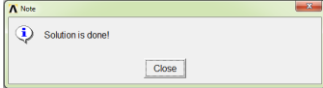
№	Действие	Результат
5	<p><i>Свойства материала стержня – модуль упругости и коэффициент Пуассона:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic > EX пишем "E", PRXY пишем "nu" > ОК</p> <p>Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p>	
6	<p><i>Координаты точек конструкции:</i></p> <p>Определяемся с положением точек относительно глобальной декартовой системы координат. Начало отсчёта поместим, например, в заделке.</p>	 <p style="text-align: center;">Рис. 2.</p>

№	Действие	Результат
Конечноэлементная модель		
7	<p>Узлы 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 в точках A, B, C, D, K, N и R соответственно:</p> <p>Изометрия:  или  потом .</p> <p>Проставляем узлы:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS > NODE пишем 1 X, Y, Z пишем 0, 0, 0 > Apply > NODE пишем 2 X, Y, Z пишем l, 0, 0 > Apply > NODE пишем 3 X, Y, Z пишем 2*l, 0, 0 > Apply > NODE пишем 4 X, Y, Z пишем 2*l, H, 0 > Apply > NODE пишем 5 X, Y, Z пишем 2*l, H, -Delta > Apply > NODE пишем 6 X, Y, Z пишем 2*l, -H, 0 > Apply > NODE пишем 7 X, Y, Z пишем 2*l, -H, Delta > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	

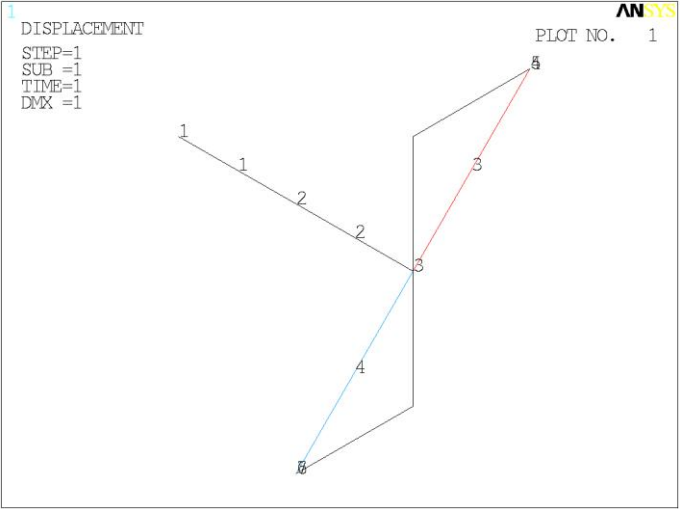
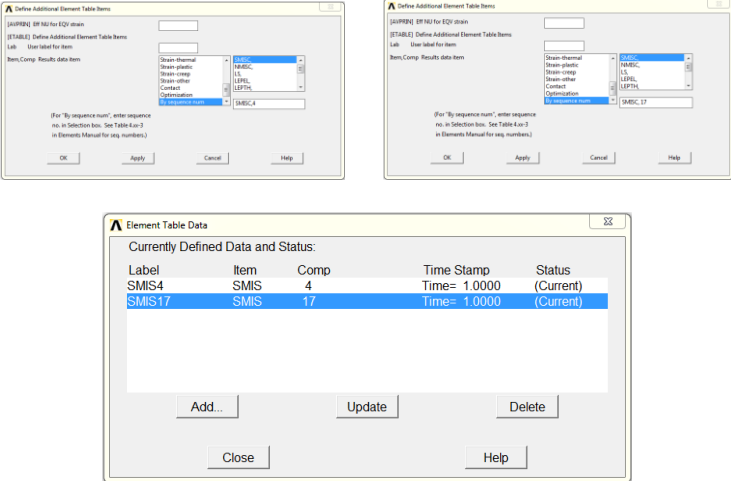
№	Действие	Результат
8	<p><i>Конечные элементы – участки стержня:</i></p> <p>Первый и второй элементы - балочные сечением <i>S1</i>:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Elem Attributes > [TYPE]установить "1 BEAM188" [MAT]установить "1" [SECNUM]установить "1 S1" > ОК</p>  <p>Протягиваем элементы по направлению оси <i>X</i>:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Auto Numbered > Thru Nodes Левой кнопкой мыши последовательно кликаем на узлы 1 и 2 > Apply > 2 и 3 > ОК</p>	
9	<p><i>Конечные элементы – жёсткие лепестки в точке <i>C</i>:</i></p> <p>Третий и четвёртый элементы – абсолютно жёсткие стерженьки:</p> <p>M_M> Preprocessor> Modeling > Create > Elements > > Elem Attributes > [TYPE]установить "2 MPC184" > ОК</p>  <p>Протягиваем элементы в любом направлении:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Auto Numbered > Thru Nodes Левой кнопкой мыши последовательно кликаем на узлы 3 и 4 > Apply > 3 и 6 > ОК</p>	

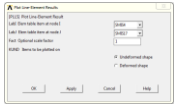
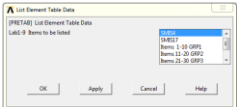
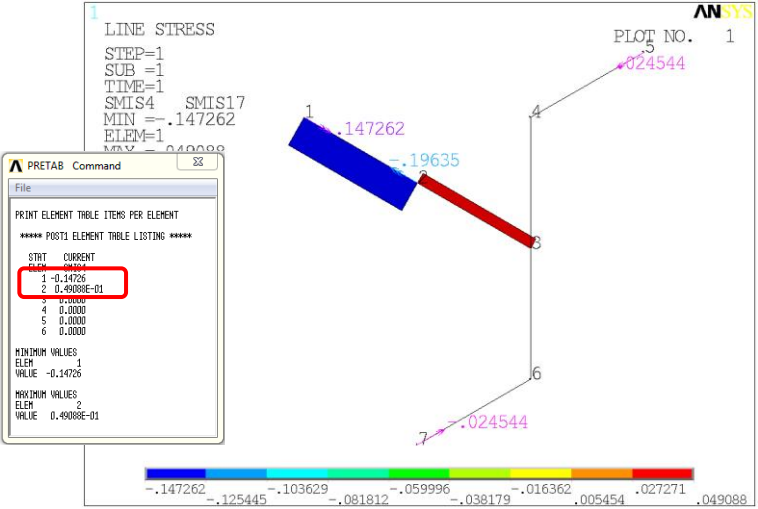
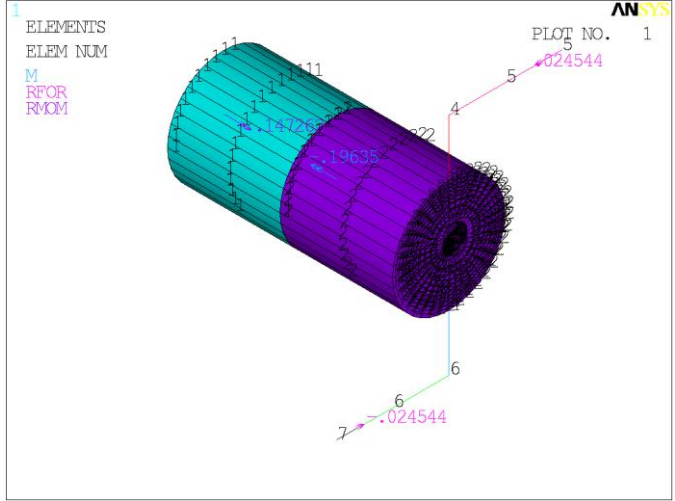
№	Действие	Результат
10	<p><i>Контактные конечные элементы между лепестками и упорами:</i></p> <p>Пятый и шестой элементы – контактные «узел-в-узел»:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Elem Attributes > [TYPE]установить "3 CONTA178" > ОК</p> <p>Протягиваем элементы по направлению оси Z:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Auto Numbered > Thru Nodes</p> <p>Левой кнопкой мыши последовательно кликаем на узлы 5 и 4 > Apply > 6 и 7 > ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> 	
11	<p><i>Проверяем правильность формирования модели:</i></p> <p>Нумеруем элементы по их типу:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Numbering > Установить Elem на "Element type num"; > ОК</p> <p>Возвращаемся к порядковой нумерации элементов:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Numbering > Установить Elem на "Element numbers"; > ОК</p>  	

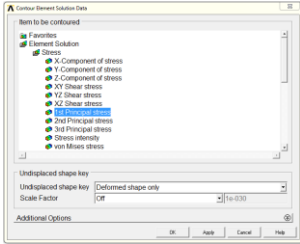
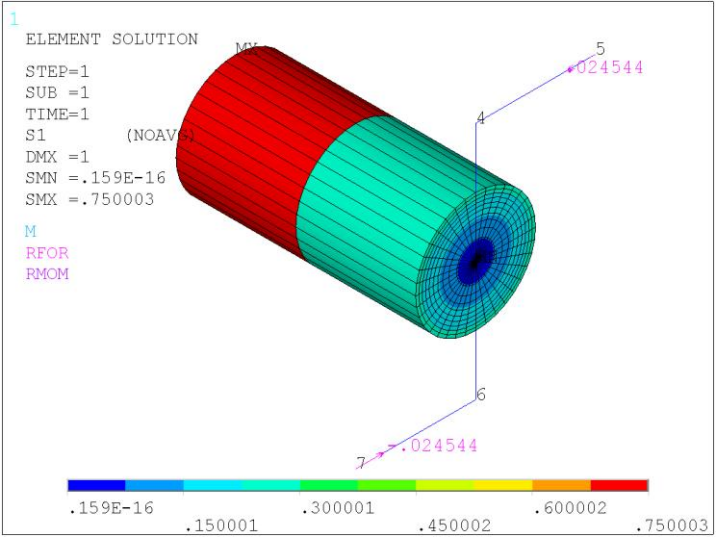

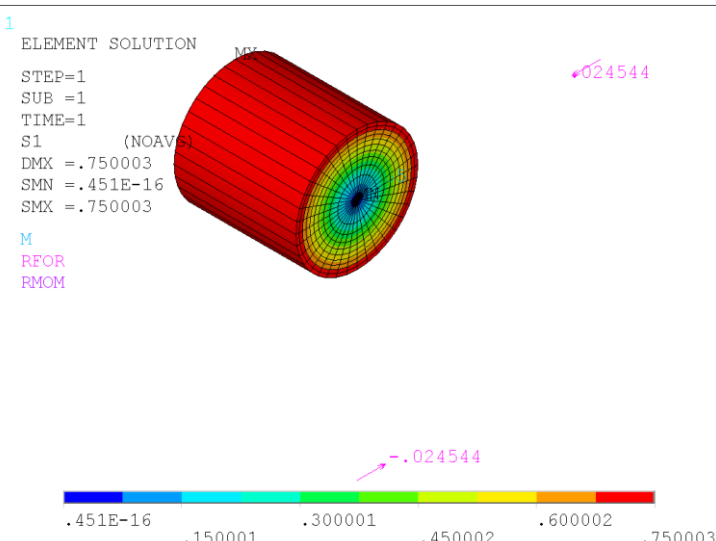
№	Действие	Результат
12	<p><i>Заделки:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes > Левой кнопкой мыши нажать на 1, 5 и 7 узлы > OK > Lab2 установить "All DOF" > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> 	
13	<p><i>Внешний момент:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On nodes > Левой кнопкой мыши нажимаем на узел 2 > OK > Lab установить "MX" VALUE пишем -M > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> 	

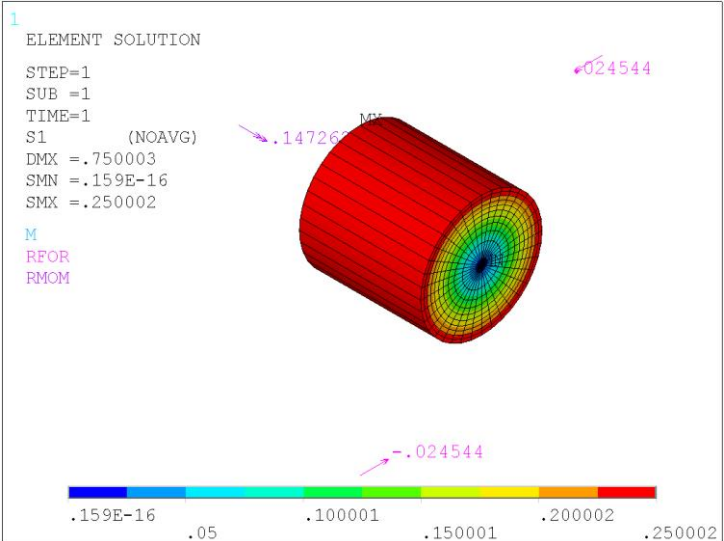
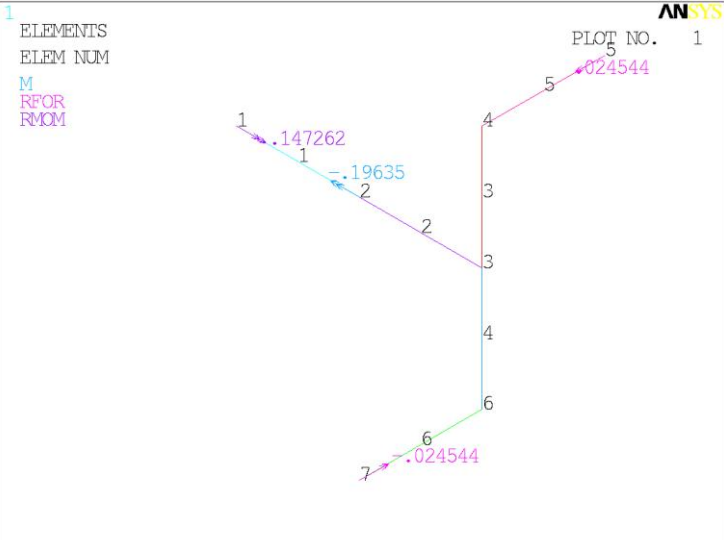
№	Действие	Результат
14	<p>Скрываем оси системы координат:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Window Controls > Window Options > [/Triad] установить "Not Shown" > OK</p> 	
Расчёт		
15	<p>Запускаем расчёт:</p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS</p> <p>Синхронно появляются два окна: белое информационное и серое исполнительное. Белое закрываем, на сером нажимаем ОК.</p> <p>На предупреждающих окнах "Verify" нажимаем ОК.</p> <p>Расчёт пошёл.</p> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Закройте это окно.</p> <p>Расчёт окончен.</p>	  

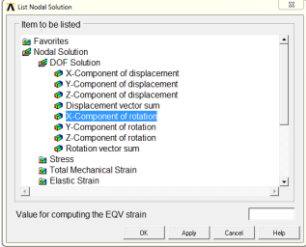
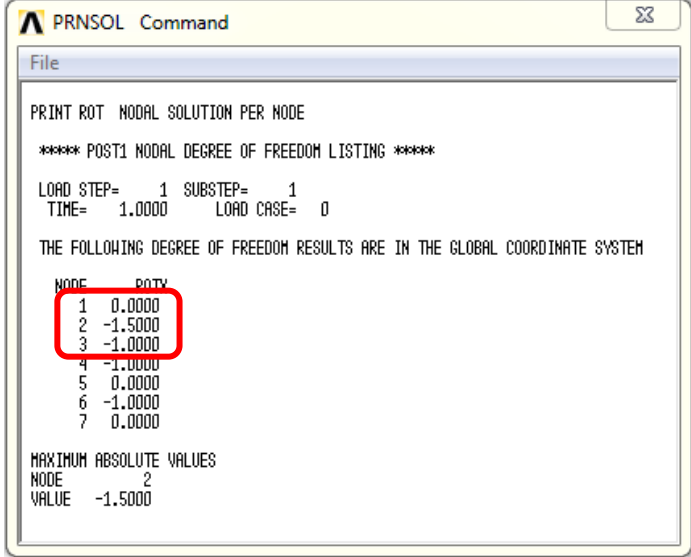
№	Действие	Результат
Просмотр результатов		
16	<p><i>Силовая схема:</i></p> <p>U_M > PlotCtrls > Symbols > [/PBC] устанавливаем в положение "For Individual"</p> <p>Убираем галочку с "Miscellaneous" Surface Load Symbols устанавливаем Pressures Show pres and convect as устанавливаем Arrows > OK ></p> <p>В окне "Applied Boundary Conditions"</p> <p>U установить "Off"</p> <p>Rot установить "Off"</p> <p>F установить "Symbol+Value"</p> <p>M установить "Symbol+Value"</p> <p>> OK ></p> <p>В окне "Reactions"</p> <p>NFOR установить "Off"</p> <p>NMOM установить "Off"</p> <p>RFOR установить "Symbol+Value"</p> <p>RMOM установить "Symbol+Value"</p> <p>> OK ></p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Elements</p> <p>В рабочем поле видим следующее:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Синим цветом начерчен внешний момент; - Фиолетовым цветом начерчен реактивный момент; - Малиновым цветом начерчены реактивные силы на упорах. <p>Реакции совпадают с результатами аналитического расчёта, показанными на <i>рис. 1б</i>. (числа, выделенные синим цветом). Минус означает направление вектора против соответствующей координатной оси X.</p>	<p>1 ELEMENTS ELEM NUM M RFOR RMOM</p>

№	Действие	Результат															
17	<p><i>Деформированная форма конструкции:</i></p> <p>Масштаб устанавливаем 1:1: U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scale DMULT устанавливаем "1.0 (true scale)" > OK</p> <p>Прорисовываем совместно недеформированную (чёрным цветом) и деформированную (цветную) :</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > > Deformed Shape > KUND установить Def + undeformed > OK</p> <p>Чёрным цветом начерчена недеформированная форма конструкции, цветными линиями – конструкция после нагружения.</p>																
18	<p><i>Составление эпюры эпюры внутреннего крутящего момента $M_{кр}$:</i></p> <p>M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Add > "By sequence num", "SMISC,", "4" > Apply > "By sequence num", "SMISC,", "17" > OK > > Close</p>	 <table border="1" data-bbox="1480 1086 2007 1353"> <thead> <tr> <th>Label</th> <th>Item</th> <th>Comp</th> <th>Time Stamp</th> <th>Status</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SMIS4</td> <td>SMIS</td> <td>4</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>SMIS17</td> <td>SMIS</td> <td>17</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> </tbody> </table>	Label	Item	Comp	Time Stamp	Status	SMIS4	SMIS	4	Time= 1.0000	(Current)	SMIS17	SMIS	17	Time= 1.0000	(Current)
Label	Item	Comp	Time Stamp	Status													
SMIS4	SMIS	4	Time= 1.0000	(Current)													
SMIS17	SMIS	17	Time= 1.0000	(Current)													

№	Действие	Результат														
19	<p><i>Прорисовка эпюры внутреннего крутящего момента $M_{кр}$:</i></p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > > Line Elem Res></p> <p>LabI установить "SMIS4" LabJ установить "SMIS17" > OK</p>  <p><i>Пропечатка эпюры внутреннего крутящего момента $M_{кр}$:</i></p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Elem Table Data > Отметить мышью строчку SMIS4 > OK</p>  <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1в.</i> (числа, выделенные синим цветом).</p>	 <pre> LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS4 SMIS17 MIN =-.147262 ELEM=1 MAX =0.049088 </pre> <table border="1"> <thead> <tr> <th>STAT</th> <th>CURRENT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>-0.147262</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.49088E-01</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.0000</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.0000</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.0000</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>0.0000</td> </tr> </tbody> </table> <p>MINIMUM VALUES ELEM 1 VALUE -0.14726</p> <p>MAXIMUM VALUES ELEM 2 VALUE 0.49088E-01</p>	STAT	CURRENT	1	-0.147262	2	0.49088E-01	3	0.0000	4	0.0000	5	0.0000	6	0.0000
STAT	CURRENT															
1	-0.147262															
2	0.49088E-01															
3	0.0000															
4	0.0000															
5	0.0000															
6	0.0000															
20	<p><i>Полноразмерная отрисовка конечных элементов:</i></p> <p>Прорисовываем элементы: U_M > Plot > Elements</p> <p>Отрисовываем элементы полноразмерно, по их поперечным сечениям:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Size and Shape > [/ESHAPE] ставим галочку "on" > OK</p>	 <pre> ELEMENTS ELEM NUM M RFOR R/MOM </pre>														
21	<p><i>Цветовая шкала будет состоять из десяти цветов:</i></p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours > NCONT пишем 10 > OK</p>															

№	Действие	Результат
22	<p><i>Касательные напряжения:</i></p> <p>Перемещения не отображать: U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "0.0 (off)"</p> <p>Раскрасить элементы по величине первого главного напряжения (при чистом сдвиге оно равно касательному напряжению):</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > > Contour Plot > Element Solu > > Element Solution > Stress > > 1st Principial stress > OK</p> 	 <pre> 1 ELEMENT SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 S1 (NOAVG) DMX =1 SMN =.159E-16 SMX =.750003 M RFOR RMOM </pre>
23	<p><i>Конечный элемент №1:</i></p> <p>Прорисовываем: U_M > Plot > Replot</p> <p>Выделяем нужный конечный элемент:</p> <p>U_M > Select > Entities > Устанавливаем "Elements" и "By Num/Pick" Селектор на "From Full" > OK</p> <p>Кликаем левой кнопкой мыши на элемент у заделки > OK</p> <p>Прорисовываем: U_M > Plot > Replot</p> <p>Видим, как касательные напряжения линейно увеличиваются от центра сечения к его краю. На краю $\tau = \tau_{max} = 0,75$, что идентично результатам аналитического расчёта, показанным на <i>рис. 1г.</i> (числа, выделенные синим цветом).</p> <p>Выделяем всё, что есть: U_M > Select > Everything</p> 	 <pre> 1 ELEMENT SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 S1 (NOAVG) DMX =.750003 SMN =.451E-16 SMX =.750003 M RFOR RMOM </pre>

№	Действие	Результат
24	<p>Конечный элемент №2:</p> <p>Прорисовываем: U_M > Plot > Replot</p> <p>Выделяем нужный конечный элемент:</p> <p>U_M > Select > Entities ></p> <p>Устанавливаем "Elements" и "By Num/Pick"</p> <p>Селектор на "From Full"</p> <p>> ОК</p> <p>Кликаем левой кнопкой мыши на элемент у лепестков</p> <p>> ОК</p> <p>Прорисовываем: U_M > Plot > Replot</p> <p>На краю $\tau = \tau_{max} = 0,25$, что идентично результатам аналитического расчёта, показанным на рис. 1г. (числа, выделенные синим цветом).</p> <p>Выделяем всё, что есть: U_M > Select > Everything</p>	<p>1 ELEMENT SOLUTION</p> <p>STEP=1 SUB =1 TIME=1 S1 (NOAVG) DMX =.750003 SMN =.159E-16 SMX =.250002</p> <p>M RFOR RMOM</p>  <p>.159E-16 .05 .100001 .150001 .200002 .250002</p>
25	<p>Вновь изображаем элементы их осями:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Size and Shape ></p> <p>[/ESHAPE] убираем галочку "off"</p> <p>> ОК</p>	<p>1 ELEMENTS</p> <p>ELEM NUM</p> <p>PLOT NO. 1</p> <p>M RFOR RMOM</p> 

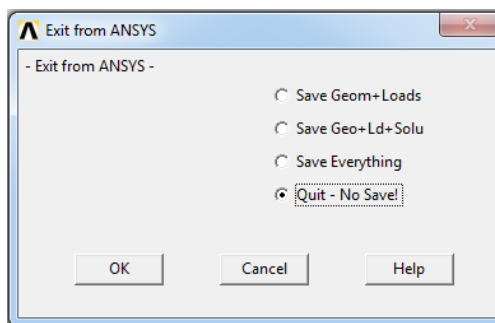
№	Действие	Результат
26	<p>Угловые перемещения узлов (таблица):</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Nodal Solution > Nodal Solution > DOF Solution > X-Component of rotation > OK</p>  <p>Получаем окно “PRNSOL Command” с табличкой, где NODE – номер узла конечноэлементной модели, а ROTX – его вращение относительно оси X:</p> $\varphi_1 = \varphi_A = 0 ;$ $\varphi_2 = \varphi_B = -1,5 \cdot \frac{\Delta}{H} \text{ (точное совпадение с рис.1д.)};$ $\varphi_3 = \varphi_C = -1 \cdot \frac{\Delta}{H} \text{ (точное совпадение с рис.1д.)};$	 <pre> PRNSOL Command File PRINT ROT NODAL SOLUTION PER NODE ***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING ***** LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0 THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM NODE ROTX 1 0.0000 2 -1.5000 3 -1.0000 4 -1.0000 5 0.0000 6 -1.0000 7 0.0000 MAXIMUM ABSOLUTE VALUES NODE 2 VALUE -1.5000 </pre>

Сохраняем проделанную работу:

U_M > File > Save as Jobname.db

Закройте ANSYS:

U_M > File > Exit > Quit - No Save! > OK



После выполнения указанных действий в рабочем каталоге остаются файлы с расширениями “.BCS”, “.db”, “.emat”, “.err”, “.esav”, “.full”, “.log”, “.mntr”, “.rst” и “.stat”.

Интерес представляют “.db” (файл модели) и “.rst” (файл результатов расчёта), остальные файлы промежуточные, их можно удалить.