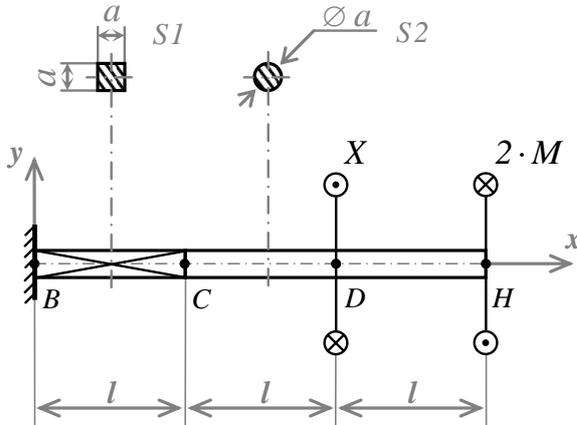


E-04 (ANSYS)

Формулировка задачи:

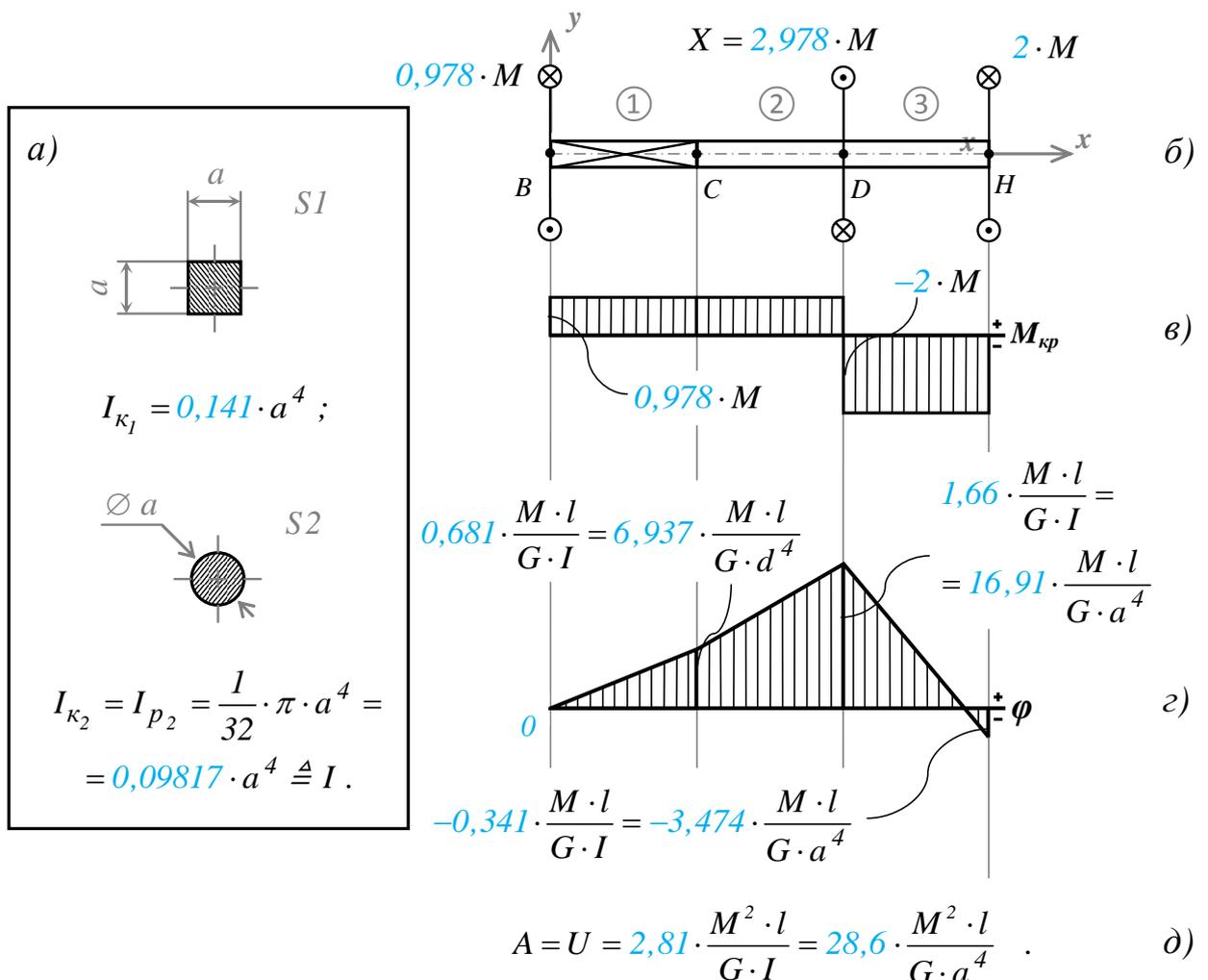


Дано: l, M, a, G ;

Стержень переменного поперечного сечения нагружен двумя внешними крутящими моментами. Величина момента X подобрана таким образом, что выполняется условие: $\varphi_C = -2 \cdot \varphi_H$

Найти: X, A, U , эпюры $M_{кр}$ и φ .

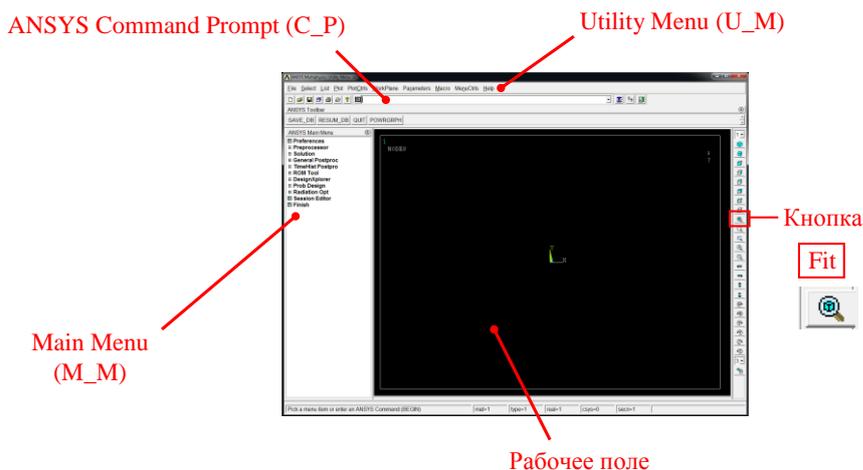
Аналитический расчёт (см. [E-04](#)) даёт следующие решения:



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

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" > OK
```

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

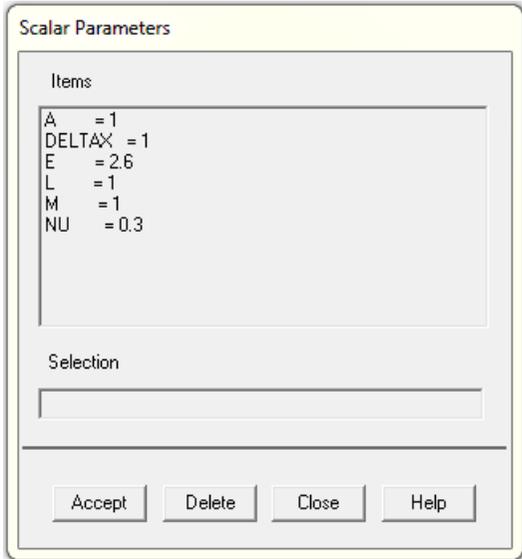
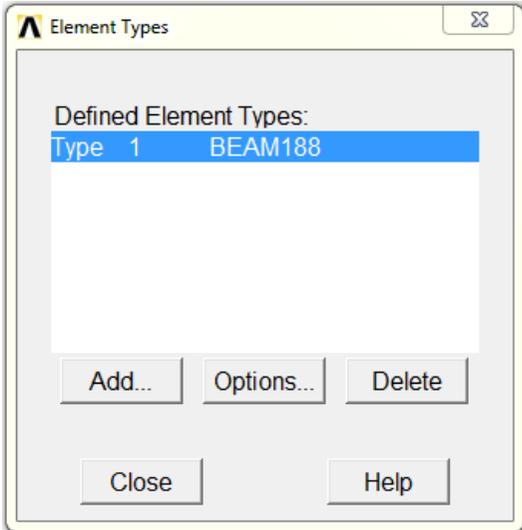
```
U_M > PlotCtrls > Numbering >
Отметить NODE ;
Установить Elem на "Element numbers";
Установить [/NUM] на "Colors&numbers"
> OK
```

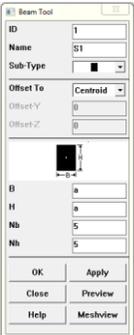
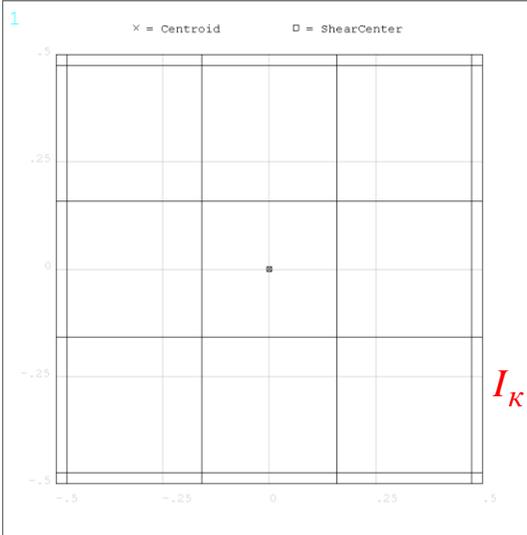
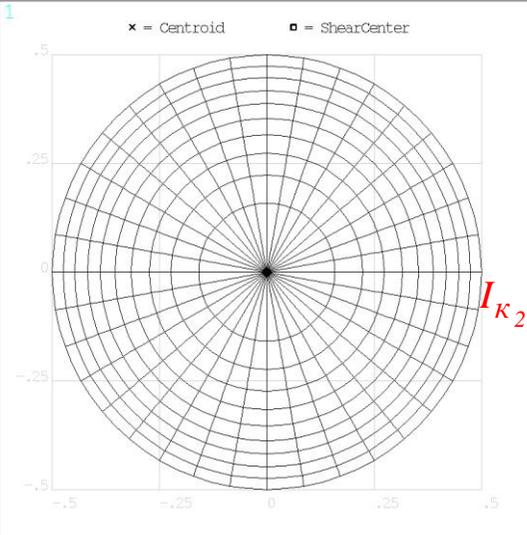
Для большей наглядности увеличим размер шрифта:

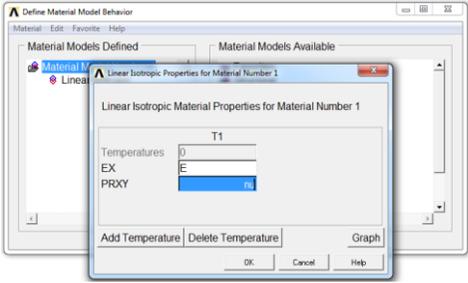
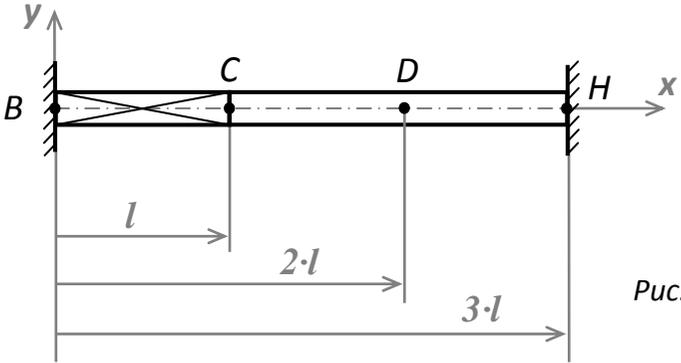
```
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Legend Font >
Установить «Размер» на «22» > OK
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Entity Font >
Установить «Размер» на «22» > OK
```

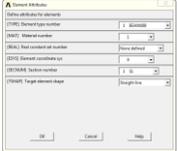
Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.

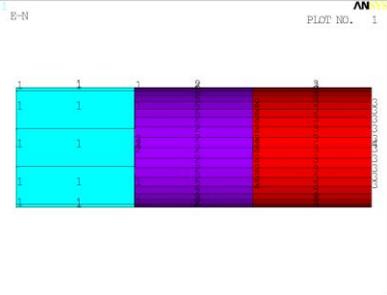
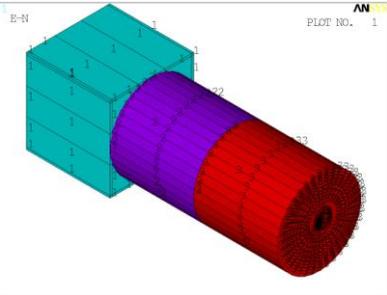
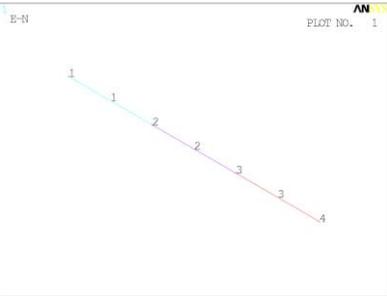
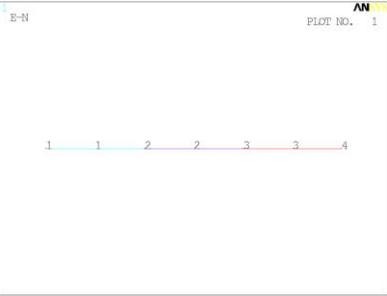
Решение задачи: Приравняв G , a , M и l , к единице, результаты получим в виде чисел, обозначенных на рис. 1. синим цветом.

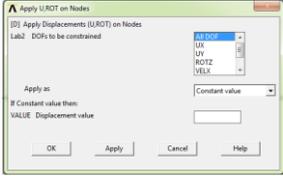
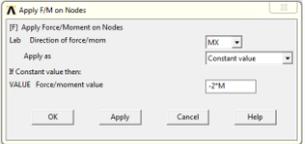
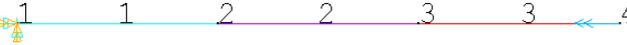
№	Действие	Результат
1	<p><i>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</i></p> <p>U_M > Parameters > Scalar Parameters > E=2.6 > Accept > nu=0.3 > Accept > a=1 > Accept > M=1 > Accept > l=1 > Accept > DeltaX=1 > Accept > > Close</p> <p>При $E=2,6$ и $\nu=0,3$ получается модуль сдвига: $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{2,6}{2,6} = 1$.</p>	
2	<p><i>Первая строка в таблице конечных элементов – трёхмерный балочный BEAM188:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Add Element reference number пишем 1 В левом окошке выбираем "Beam" В правом окошке "2 node 188" > OK ></p> <p>В окошке Element types отметить строку "1 BEAM188" > Options > КЗ установить "Quadratic Form" > OK > > Close</p>	

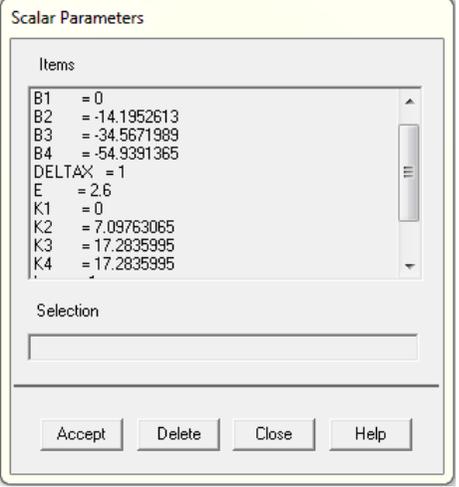
№	Действие	Результат
3	<p>Два поперечных сечения:</p> <p>Сечение S1 диаметром 2d ; сечение S2 диаметром d:</p> <p>M_M > Preprocessor > Sections > Beam > Common Sections ID пишем 1 NAME пишем имя сечения S1 Sub-Type установить изображение прямоугольника Offset To установить "Centroid" В пишем a Н пишем a Nb пишем, например, 5 (разбиение вдоль стороны В) Nh пишем, например, 5 (разбиение вдоль стороны Н) > Apply > ID пишем 2 NAME пишем имя сечения S2 Sub-Type установить изображение круга Offset To установить "Centroid" R пишем a/2 (это радиус круга) N пишем, например, 36 (секторов) T пишем, например, 10 (колец) > OK</p> <p>Прорисовываем оба сечения, смотрим геометрическую жёсткость при кручении у сечения S1:</p> <p>M_M > Preprocessor > Sections > Beam > Plot Section [Secplot] установить "1 S1" Show section mesh? установить "Yes" > Apply > [Secplot] установить "2 S2" Show section mesh? установить "Yes" > OK</p> <p>I_{K1} и I_{K2} совпадают со своими значениями, вычисленными аналитически (рис. 1а).</p>	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 20px;"> <div style="width: 45%;">  <p style="text-align: right; margin-right: 10px;">I_{K1}</p> </div> <div style="width: 50%; font-family: monospace; font-size: small;"> <p>SECTION ID 1 DATA SUMMARY</p> <p>Section Name = S1 Area = 1 Iyy = .083333 Iyz = -.367E-17 Izz = .083333 Warping Consta = .128E-03 Torsion Consta = <u>.140892</u> Centroid Y = -.786E-17 Centroid Z = -.764E-16 Shear Center Y = .508E-15</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; margin-top: 20px;"> <div style="width: 45%;">  <p style="text-align: right; margin-right: 10px;">I_{K2}</p> </div> <div style="width: 50%; font-family: monospace; font-size: small;"> <p>SECTION ID 2 DATA SUMMARY</p> <p>Section Name = S2 Area = .785397 Iyy = .049087 Iyz = -.120E-17 Izz = .049087 Warping Constant = 0 Torsion Constant = <u>.098174</u> Centroid Y = .317E-16 Centroid Z = -.673E-17 Shear Center Y = -.102E-16 Shear Center Z = .194E-17 Shear Corr. YY = .857146 Shear Corr. YZ = .146E-14 Shear Corr. ZZ</p> </div> </div>

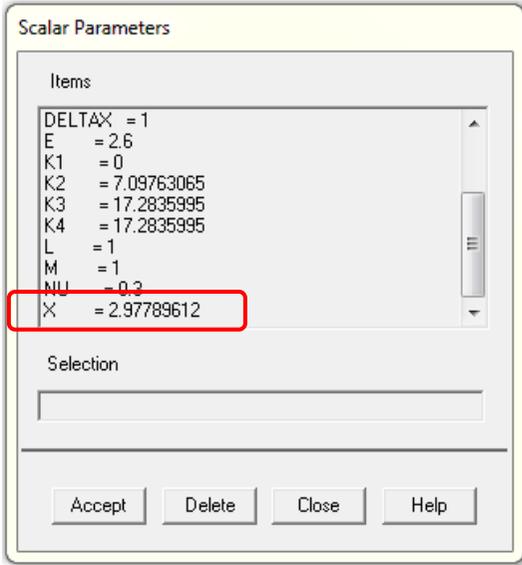
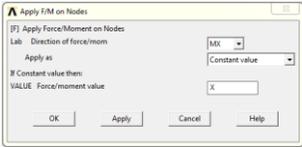
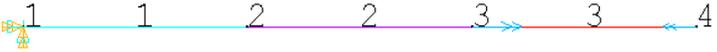
№	Действие	Результат
4	<p><i>Свойства материала стержня – модуль упругости и коэффициент Пуассона:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic > EX пишем "E", PRXY пишем "nu" > OK > Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p>	
5	<p><i>Координата x точек стержня:</i></p> <p>Определяемся с положением точек относительно глобальной декартовой системы координат. Начало отсчёта поместим, например, на левый край стержня, так привычнее.</p>	 <p style="text-align: right;">Рис. 2.</p>
Конечноэлементная модель		
6	<p><i>Узлы 1, 2, 3 и 4 в точках B, C, D и соответственно:</i></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 3*l, 0, 0 > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	

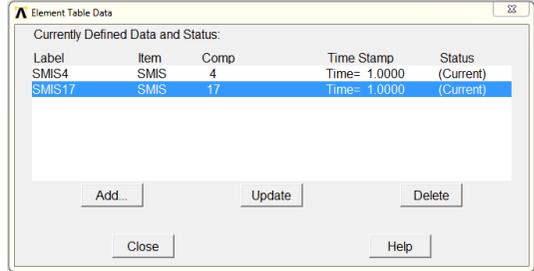
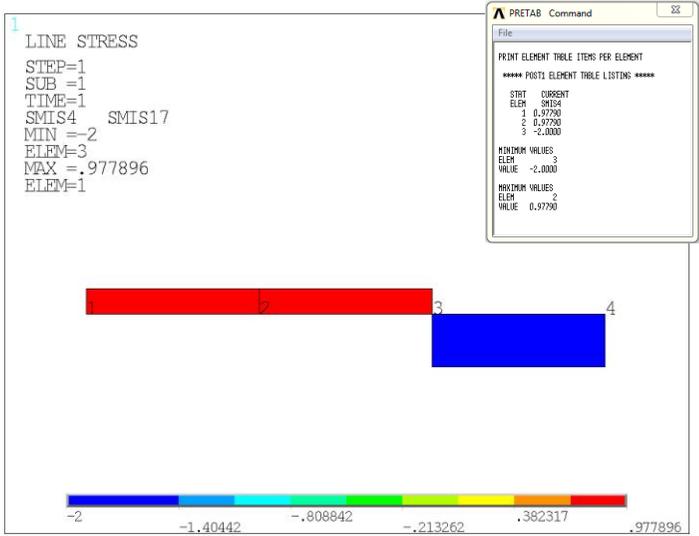
№	Действие	Результат
7	<p><i>Скрываем оси системы координат:</i></p> <pre>U_M> PlotCtrls> Window Controls> Window Options> [/Triad] установить "Not Shown" > OK</pre> 	<p>1 2 3 4</p>
8	<p><i>Конечные элементы – участки стержня:</i></p> <p>Первый элемент - участок сечением S1:</p> <pre>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Elem Attributes > [TYPE]установить "1 BEAM188" [SECNUM]установить "1 S1" > OK</pre>  <pre>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Auto Numbered > Thru Nodes Левой кнопкой мыши последовательно кликаем на узлы 1 и 2 > OK</pre> <p>Второй и третий элементы - участки сечением S2:</p> <pre>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Elem Attributes > [SECNUM]установить "2 S2" > OK</pre>  <pre>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Auto Numbered > Thru Nodes Левой кнопкой мыши последовательно кликаем на узлы 2 и 3 > Apply > 3 и 4 > OK</pre> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	

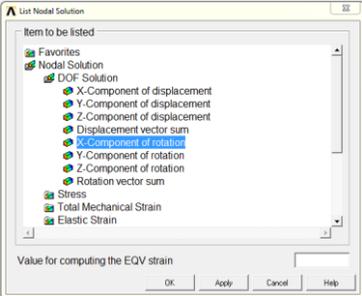
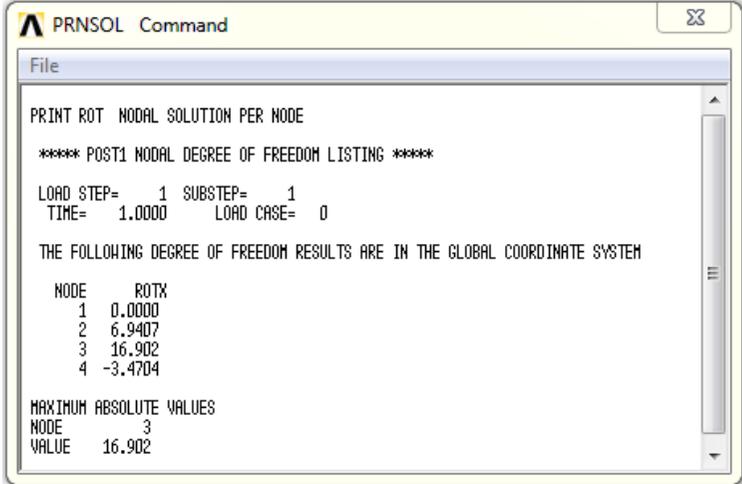
№	Действие	Результат
	<p><i>Проверяем корректно ли заданы сечения элементам:</i></p> <p>Полноразмерная отрисовка конечных элементов: U_M > PlotCtrls > Style > Size and Shape > [/ESHAPE] ставим галочку "on" > ОК</p> <p>Изометрия:  потом .</p> <p>Можете подкорректировать размер изображения кнопками  или .</p>	 
<p>9</p>	<p>Снова изображаем элементы их осями:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Size and Shape > [/ESHAPE] убираем галочку "off" > ОК</p> <p>Фронтальный вид:  - вид спереди;  - автоформат.</p> <p>По внешнему виду конечных элементов можно сделать вывод: поперечные сечения конечным элементам указаны верно.</p>	 

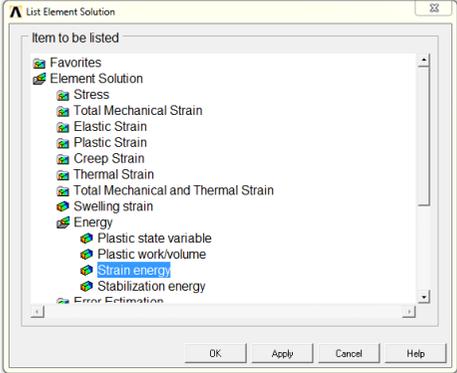
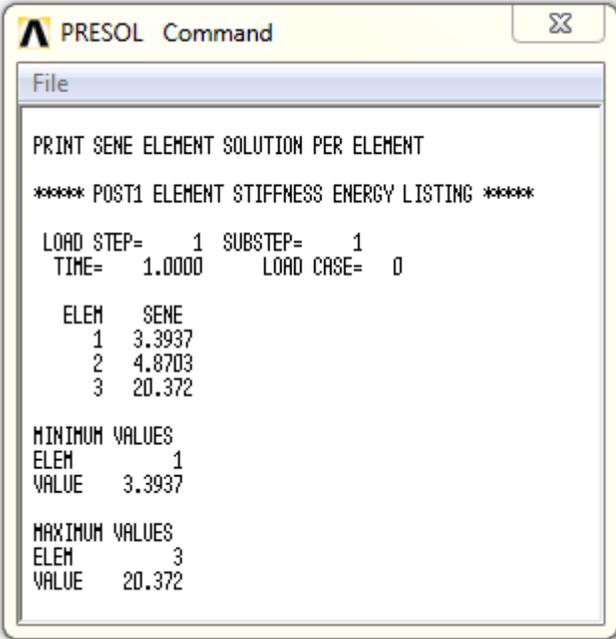
№	Действие	Результат
10	<p><i>Заделка:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes ></p> <p>Левой кнопкой мыши нажать на узел 1</p> <p>> OK ></p> <p>Lab2 установить "All DOF"</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> 	
11	<p><i>Известные внешние моменты:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On nodes ></p> <p>Левой кнопкой мыши нажимаем на узел 4</p> <p>> OK ></p> <p>Lab установить "MX"</p> <p>VALUE пишем $-2 \cdot M$</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> 	

№	Действие	Результат
12	<p><i>Зависимость поворота узлов модели от величины момента X:</i></p> <p>Сейчас момент X не применен. Расчёт: M_M > Solution > Solve > Current LS > OK > Close</p> <p>Коэффициенты: U_M > Parameters > Scalar Parameters > b1=ROTX(1) > Accept > b2=ROTX(2) > Accept > b3=ROTX(3) > Accept > b4=ROTX(4) > Accept > > Close</p> <p>Единичный момент X: M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On nodes > Левой кнопкой мыши нажимаем на узел 3 > OK > Lab установить "MX" VALUE пишем 1 > OK</p>  <p>Расчёт: M_M > Solution > Solve > Current LS > OK > Close</p> <p>Коэффициенты: U_M > Parameters > Scalar Parameters > k1=ROTX(1)-b1 > Accept > k2=ROTX(2)-b2 > Accept > k3=ROTX(3)-b3 > Accept > k4=ROTX(4)-b4 > Accept > > Close</p>	<p>Задача линейная. Значит и угол φ_i поворота i^{20} узла модели зависит от величины внешнего момента X линейно:</p> $\varphi_i = b_i + k_i \cdot X$ <p>где b_i – начальный угол поворота i^{20} узла до приложения момента X ($X=0$);</p> <p>k_i – приращение этого угла при единичном моменте X ($X=1$).</p> <p>X=0:</p>  <p>X=1:</p>  

№	Действие	Результат
13	<p>Вычисление значения внешнего момента X:</p> <p>Условие: $\varphi_C = -2 \cdot \varphi_H$</p> $\varphi_2 = -2 \cdot \varphi_4$ $b_2 + k_2 \cdot X = -2 \cdot (b_4 + k_4 \cdot X)$ $X = -\frac{b_2 + 2 \cdot b_4}{k_2 + 2 \cdot k_4}$ <p>U_M > Parameters > Scalar Parameters > X=- (b2+2*b4) / (k2+2*k4) > Accept > > Close</p> <p>Видим: $X=0,2978 \cdot M$, что в точности совпадает с результатом аналитического расчёта (рис. 1б.).</p>	
14	<p>Прикладываем к модели вычисленное значение момента X:</p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On nodes > Левой кнопкой мыши нажимаем на узел 3 > OK ></p> <p>Lab установить "MX" VALUE пишем X > OK</p>  <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	
Расчёт		
15	M_M > Solution > Solve > Current LS > OK > Close	

№	Действие	Результат
Просмотр результатов		
16	<p><i>Цветовая шкала будет состоять из десяти цветов:</i></p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours > NCONT пишем 10 > OK</p>	
17	<p><i>Составление эюры эюры 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>	
18	<p><i>Прорисовка эюры внутреннего крутящего момента $M_{кр}$:</i></p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > > Line Elem Res > LabI установить "SMIS4" LabJ установить "SMIS17" > OK</p>  <p><i>Пропечатка эюры 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>	

№	Действие	Результат
19	<p>Угловые перемещения точек стержня (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> $\varphi_1 = \varphi_0 = 0 ;$ $\varphi_2 = \varphi_A = 6,941 \cdot \frac{M \cdot l}{G \cdot d^4} ;$ $\varphi_3 = \varphi_B = 16,90 \cdot \frac{M \cdot l}{G \cdot d^4} ;$ $\varphi_4 = \varphi_C = -3,470 \cdot \frac{M \cdot l}{G \cdot d^4} .$ <p>Расхождение с результатами аналитического расчёта (рис.1г.) – сотые и тысячные доли процента.</p>	 <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 6.9407 3 16.902 4 -3.4704 MAXIMUM ABSOLUTE VALUES NODE 3 VALUE 16.902 </pre>

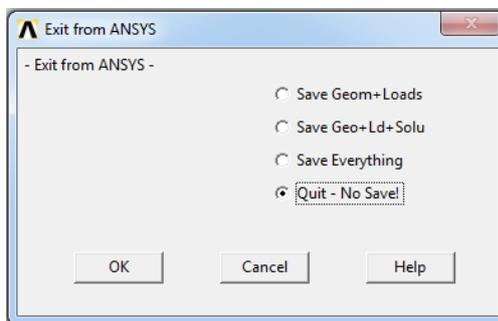
№	Действие	Результат
20	<p>Потенциальная энергия упругой деформации в конструкции (она же – работа внешней силы):</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Element Solution > Energy > Strain energy > OK</p>  <p>Получаем список «Элемент-энергия». Суммируем энергию:</p> $U = 3,3937 + 4,8703 + 20,372 = 28,6 \cdot \frac{M^2 \cdot l}{G \cdot a^4} .$ <p>Получаем тот же результат, что и на рис. 1д. (только коэффициент перед формулой, выделен синим цветом).</p>	 <pre> PRESOL Command File PRINT SENE ELEMENT SOLUTION PER ELEMENT **** POST1 ELEMENT STIFFNESS ENERGY LISTING **** LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0 ELEM SENE 1 3.3937 2 4.8703 3 20.372 MINIMUM VALUES ELEM 1 VALUE 3.3937 MAXIMUM VALUES ELEM 3 VALUE 20.372 </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.