

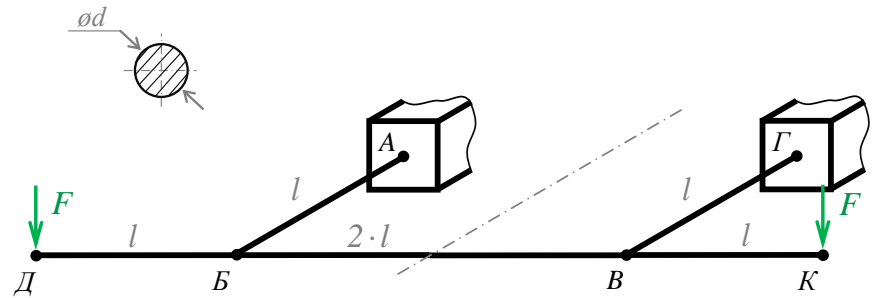
0-03 (ANSYS)

Формулировка задачи:

Дано:

$$E, \nu=0,25,$$

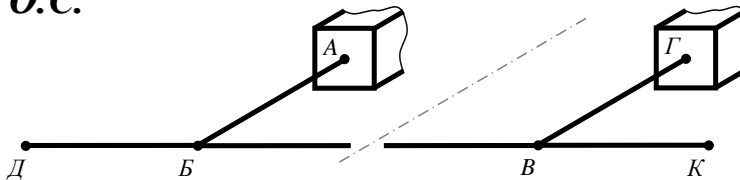
$$F, l, d.$$



- Найти: 1) Коэффициенты канонического уравнения метода сил;
 2) Эпюры внутренних моментов (изгибающих и крутящих);
 2) Вертикальное перемещение точки K: δ_K ;

Аналитический расчёт (см. [0-03](#)) даёт следующие решения:

О.С.

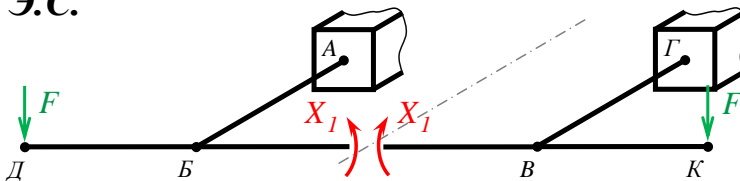


$$X_1 \cdot \delta_{11} + \delta_{1F} = 0$$

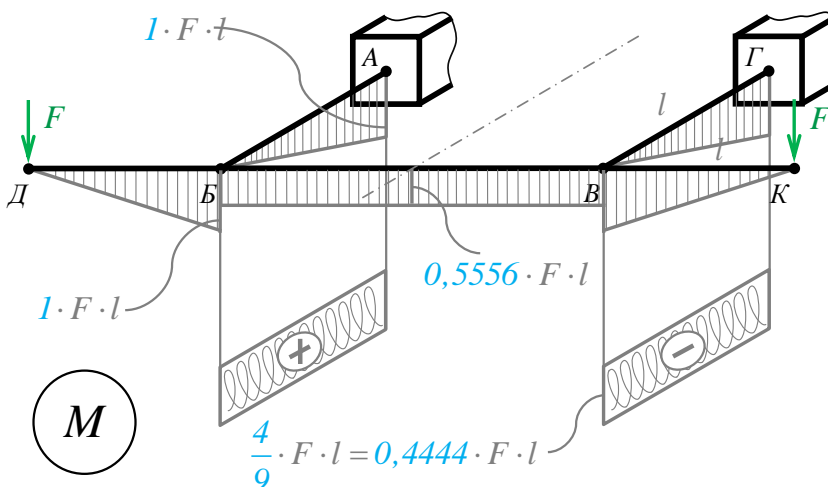
$$\delta_{11} = \frac{9}{2} \cdot \frac{l}{E \cdot I_z} = 4,5 \cdot \frac{l}{E \cdot I_z};$$

$$\delta_{1F} = \frac{5}{2} \cdot \frac{F \cdot l^2}{E \cdot I_z} = 2,5 \cdot \frac{F \cdot l^2}{E \cdot I_z}.$$

Э.С.



$$X_1 = -\frac{\delta_{1F}}{\delta_{11}} = \frac{5}{9} \cdot F \cdot l = 0,5556 \cdot F \cdot l.$$



$$d = 65 \text{ мм} = 0,13 \cdot l.$$

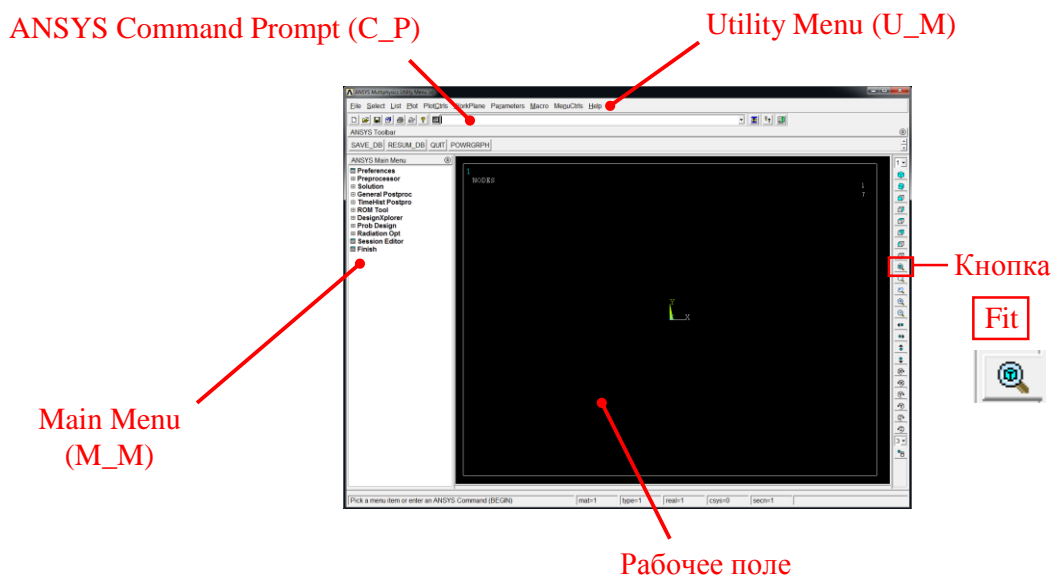
$$\delta_K = \frac{11}{9} \cdot \frac{F \cdot l^3}{E \cdot I_z} = 1,222 \cdot \frac{F \cdot l^3}{E \cdot I_z} - \text{à l'èç.}$$

Рис. 1.

Задача данного примера: при помощи ANSYS Multyphysics получить эти же результаты 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 окно C_P вручную вводят текстовые команды, после чего следует нажать на клавиатуре **Enter**.

Меняем чёрный цвет фона на белый следующими действиями:

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

В меню оставить только пункты, относящиеся к прочностным расчётам:

```
M_M > Preferences > Отметить "Structural" > OK
```

При построениях полезно видеть номера точек и линий твердотельной модели, узлов модели конечноэлементной:

```
U_M > PlotCtrls > Numbering >
```

```
Отметить KP, LINE, NODE ;
```

```
Установить Elem на "No numbering";
```

```
Установить [/NUM] на "Colors & numbers"> OK
```

Для большей наглядности увеличим размер шрифта:

```
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Legend Font >
```

```
Установить «Размер» на «22»> OK
```

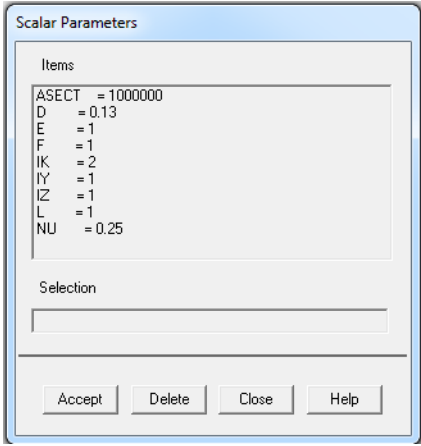
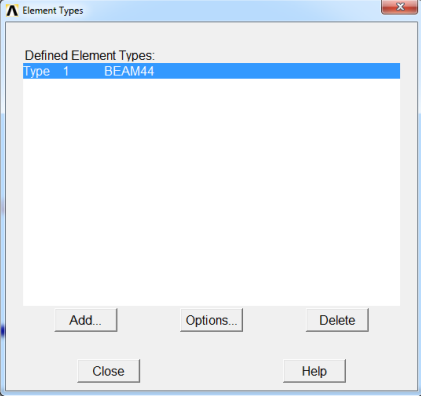
```
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Entity Font >
```

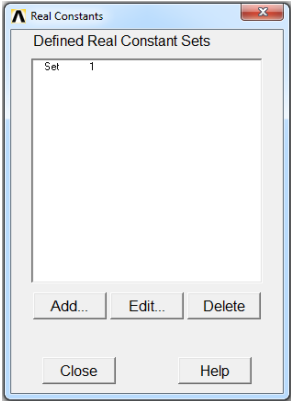
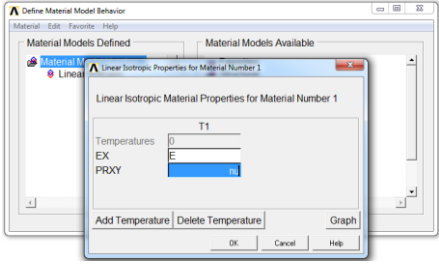
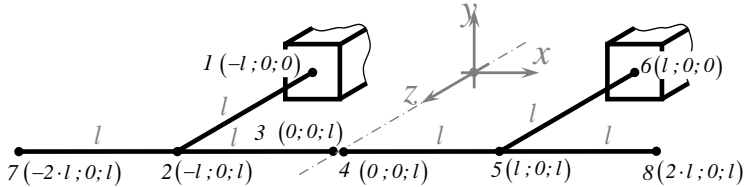
```
Установить «Размер» на «22»> OK
```

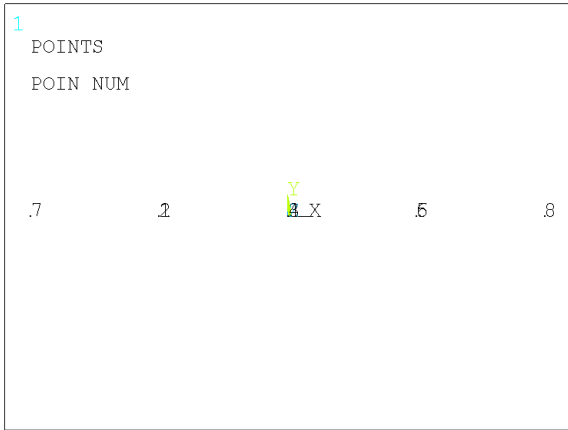


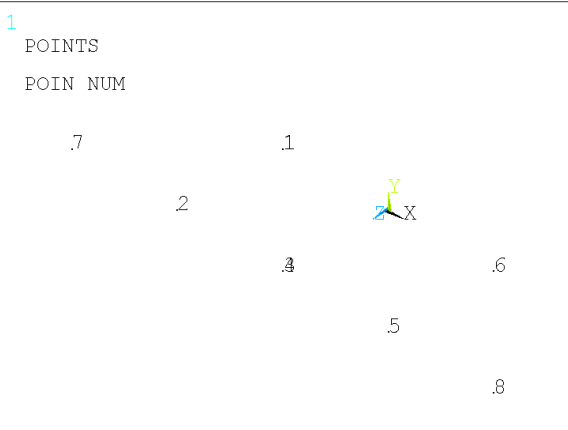
Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.

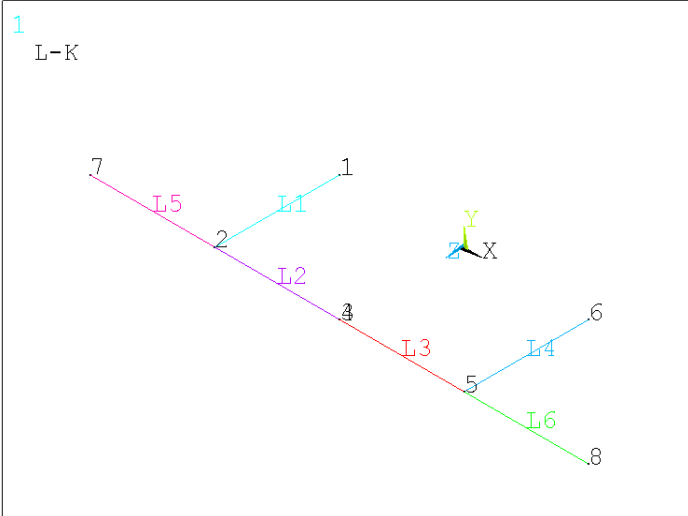
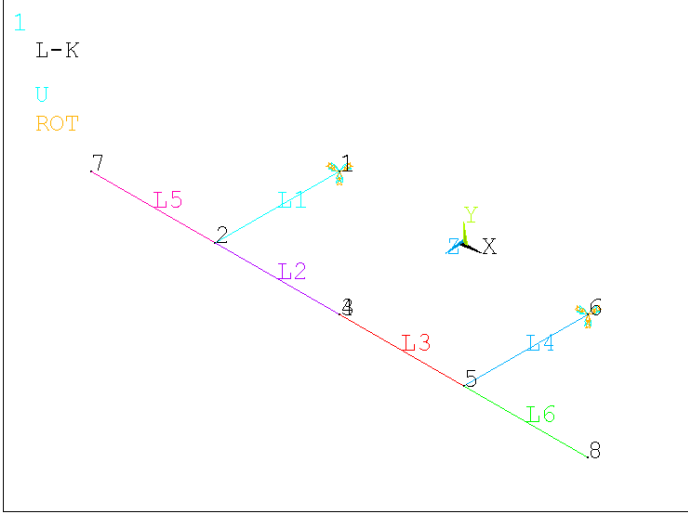
Решение задачи:

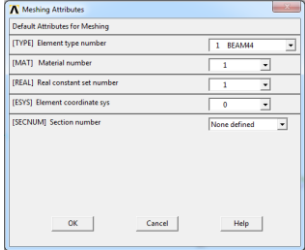
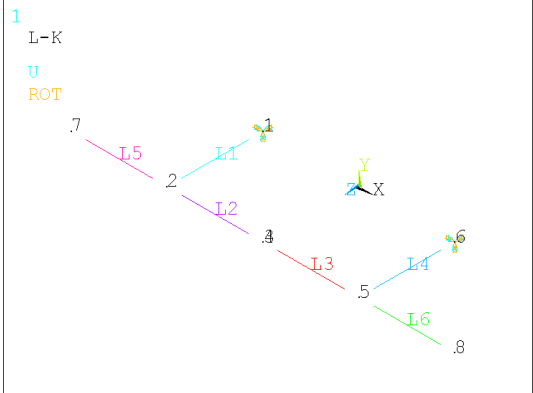
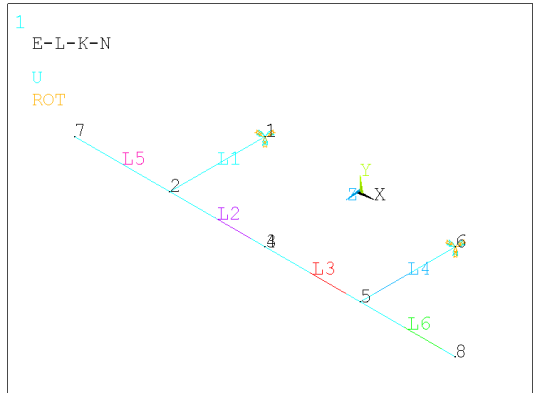
Параметрам задачи, входящим в формулы (E , F , l , E , I_z) присваиваем значение 1 . Тогда результатами расчёта будут коэффициенты перед формулами. Геометрическая жёсткость при кручении для круглых и кольцевых поперечных сечений ровно вдвое больше изгибного момента инерции.

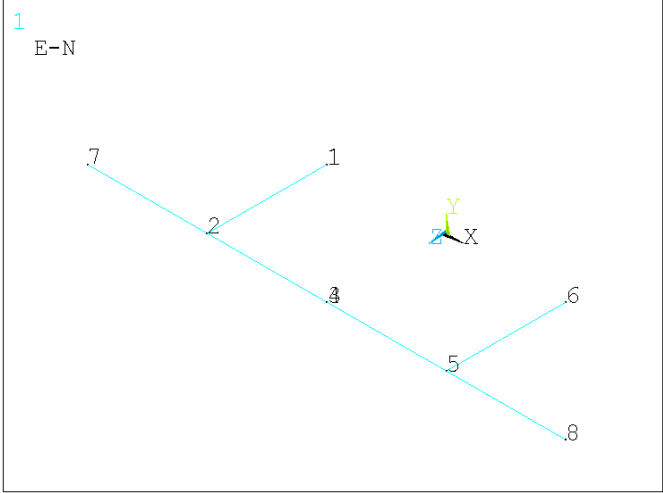
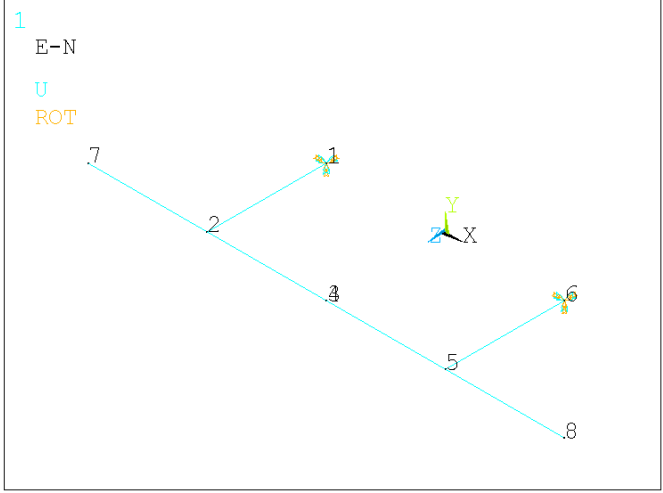
№	Действие	Результат
1	<p><i>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</i></p> <pre> U_M > Parameters > Scalar Parameters > E=1 > Accept > F=1 > Accept > l=1 > Accept > d=0.13*1 > Accept > Iz=1 > Accept > Iy=Iz > Accept > Ik=2*Iz > Accept > ASect=1e6 > Accept > nu=0.25 > Accept > > Close </pre>	
2	<p><i>Первая строчка в таблице конечных элементов – балочный тип BEAM44:</i></p> <pre> M_M > Preprocessor C_P > ET, 1, BEAM44 > Enter </pre> <p>Посмотрим таблицу конечных элементов:</p> <pre> M_M > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Close </pre>	

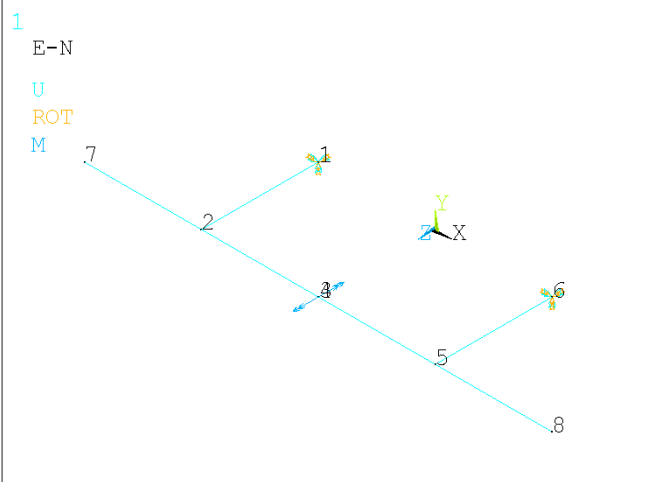
№	Действие	Результат
3	<p><i>Реальные константы для элемента BEAM44:</i></p> <p>C_P > R,1,ASect,Iz,Iy,d,d,Ik > Enter</p> <p>Посмотрим таблицу реальных констант:</p> <p>M_M > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete > Close</p>	
4	<p><i>Свойства материала стержня – модуль упругости и коэффициент Пуассона:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic ></p> <p>В окошке EX пишем "E", в окошке PRXY пишем "nu"</p> <p>> ОК</p> <p>Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p>	
Основная система. Трёхмерное моделирование:		
5	<p><i>Координаты узлов рамы A→1, B→2, C→5, D→6, E→7, F→8:</i></p> <p>Создаём трёхмерную модель основной системы (О.С.).</p> <p>Определяемся с положением рамы относительно глобальной декартовой системы координат.</p>	

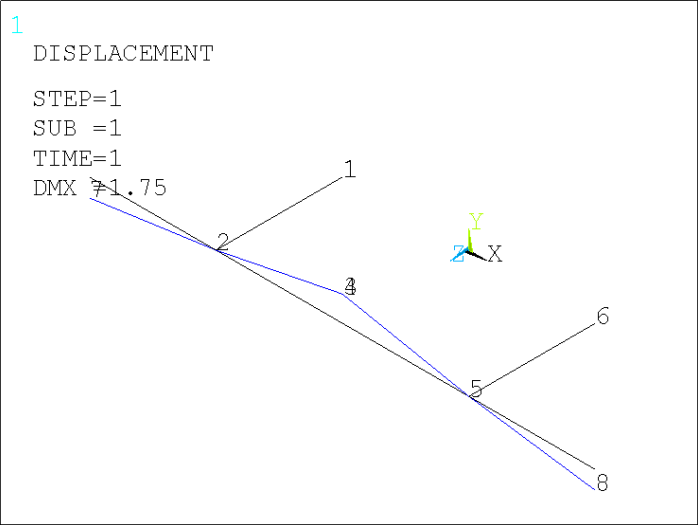
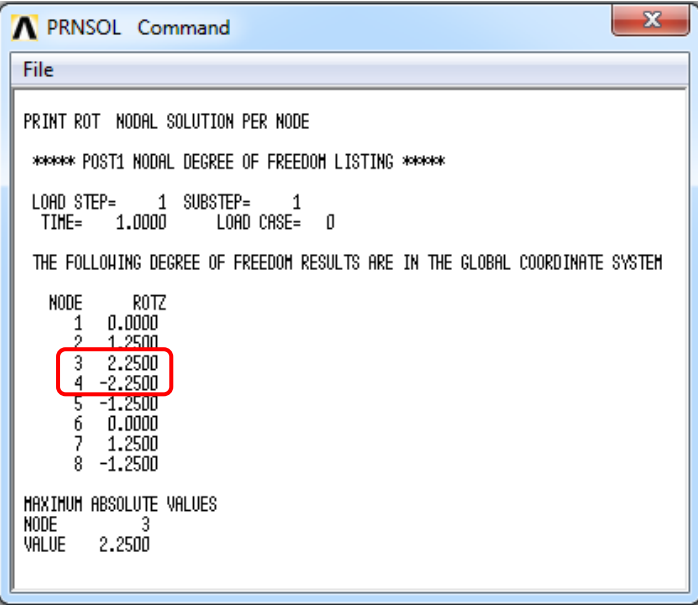
№	Действие	Результат
6	<p><i>Ключевые точки :</i></p> <p>M_M> Preprocessor> Modeling> Create> Keypoints> In Active CS></p> <p>NPT пишем 1 X, Y, Z пишем $-1, 0, 0$ > Apply > NPT пишем 2 X, Y, Z пишем $-1, 0, 1$ > Apply > NPT пишем 3 X, Y, Z пишем $0, 0, 1$ > Apply > NPT пишем 4 X, Y, Z пишем $0, 0, 1$ > Apply > NPT пишем 5 X, Y, Z пишем $1, 0, 1$ > Apply > NPT пишем 6 X, Y, Z пишем $1, 0, 0$ > Apply > NPT пишем 7 X, Y, Z пишем $-2*1, 0, 1$ > Apply > NPT пишем 8 X, Y, Z пишем $2*1, 0, 1$ > OK</p>	
7	<p><i>Изометрия:</i></p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p> - изометрия;</p> <p> - автоформат (размер изображения по размеру окна рабочего поля).</p>	

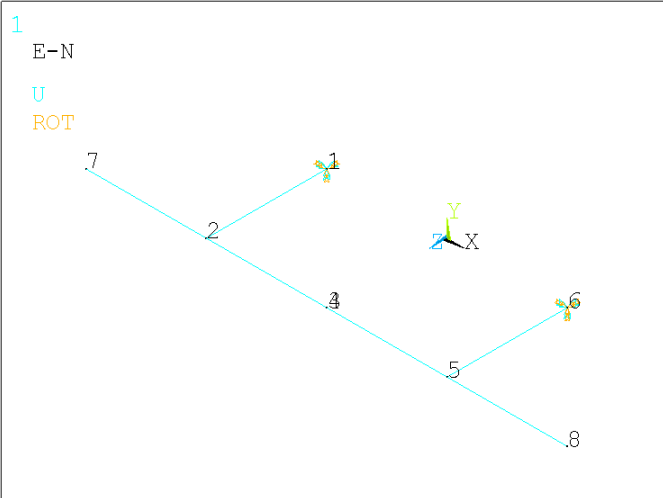
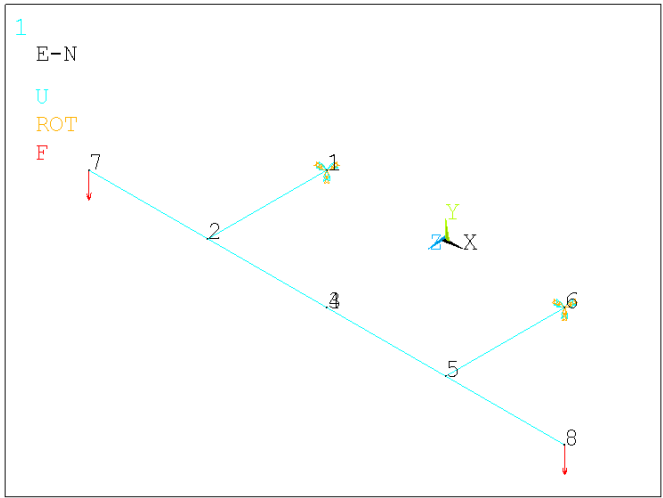
№	Действие	Результат
8	<p><i>Оси стержней рамы:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line ></p> <p>Левой кнопкой мыши последовательно нажать на ключевые точки: 1 и 2 2 и 3 (будет окошко выбора точек 3 или 4; выбрать 3 >OK>Apply) 4 (будет окошко выбора точек 3 или 4; выбрать 4 >OK) и 5 6 и 5 7 и 2 5 и 8 > ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	
9	<p><i>Заделки:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Keypoints ></p> <p>Левой кнопкой мыши нажать на 1 и 6 ключевые точки > ОК ></p> <p>Lab2 установить "All DOF" > ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	

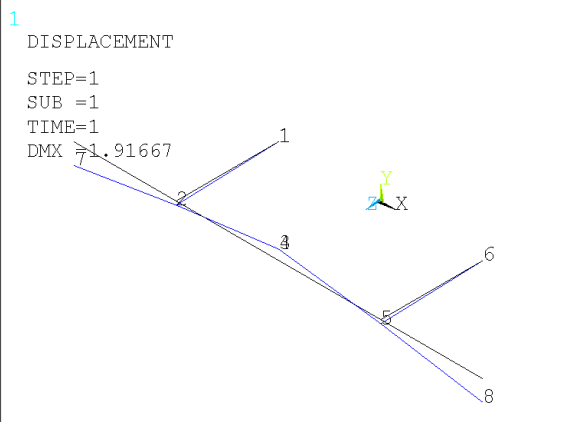
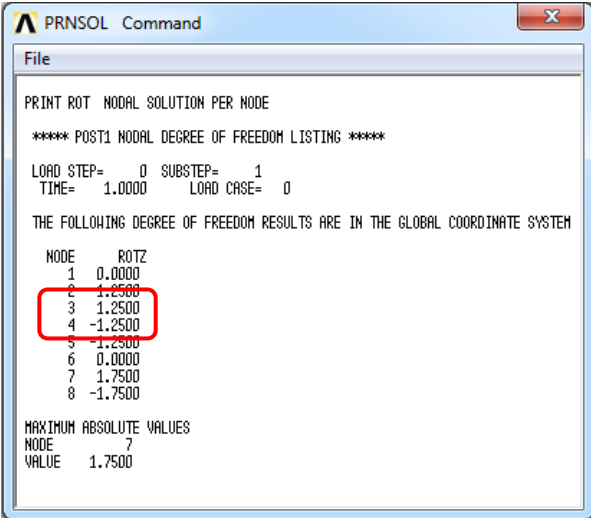
№	Действие	Результат
Конечноэлементная модель основной системы.		
10	<p><i>Указываем материал, тип элементов и номер поперечного сечения:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Lines > [TYPE] установить "1 BEAM44" [MAT] установить "1" [REAL] установить "1" > OK</p>	
11	<p><i>Размер элементов:</i></p> <p>Участки без распределённых нагрузок можно бить одним конечным элементом:</p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > ManualSize > Lines > All Lines > NDIV пишем 1 > OK</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	
12	<p><i>Рабиваем линии на элементы:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines > Pick All</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Видим сразу две модели - твердотельную и конечноэлементную.</p>	

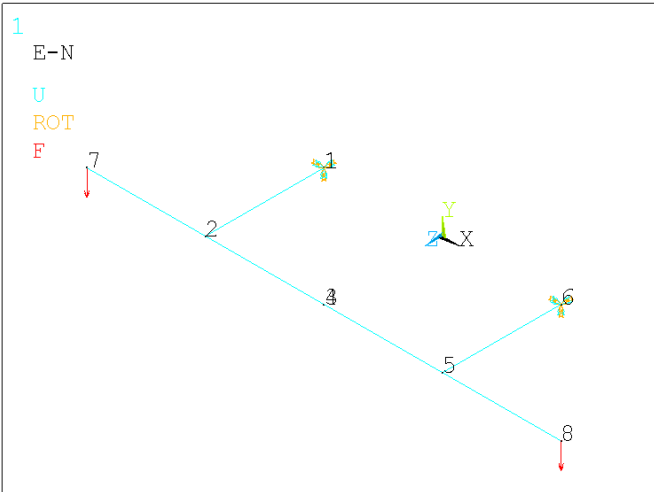
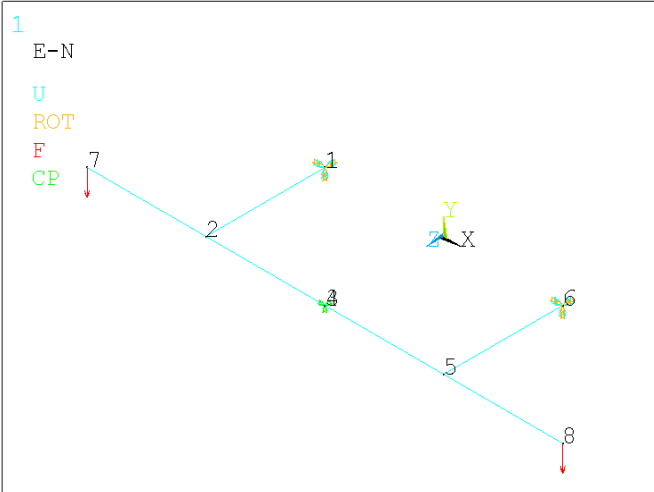
№	Действие	Результат
13	<p><i>Указываем, что именно нужно теперь прорисовывать по команде Multi-Plots:</i></p> <p>U_M > PlotCtrls > Multi-Plot Controls > Появляется первое окно Multi-Plotting > OK > Появляется второе окно Multi-Plotting > Оставляем в нём отметки только напротив Nodes и Elements > OK</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots Теперь видим только конечноэлементную модель.</p>	 <p>The screenshot shows a 2D finite element model of a structure with 8 nodes. The nodes are numbered 1 through 8. Node 1 is at the top left, node 7 is at the top right, node 2 is in the middle left, node 4 is in the middle right, node 5 is at the bottom right, node 6 is at the bottom left, and node 8 is at the bottom right. A coordinate system (X, Y, Z) is shown in the center. The plot is titled 'E-N'.</p>
14	<p><i>Переносим на конечноэлементную модель нагрузки и закрепления с модели твердотельной:</i></p> <p>M_M > Loads > Define Loads > Operate > Transfer to FE > All Solid Lds > OK</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	 <p>The screenshot shows the same finite element model as in step 13. In addition to the structure and coordinate system, there are labels 'U' and 'ROT' indicating applied loads and constraints. Node 1 has a 'U' label, node 6 has a 'ROT' label, and node 7 has a 'U' label. The plot is titled 'E-N'.</p>

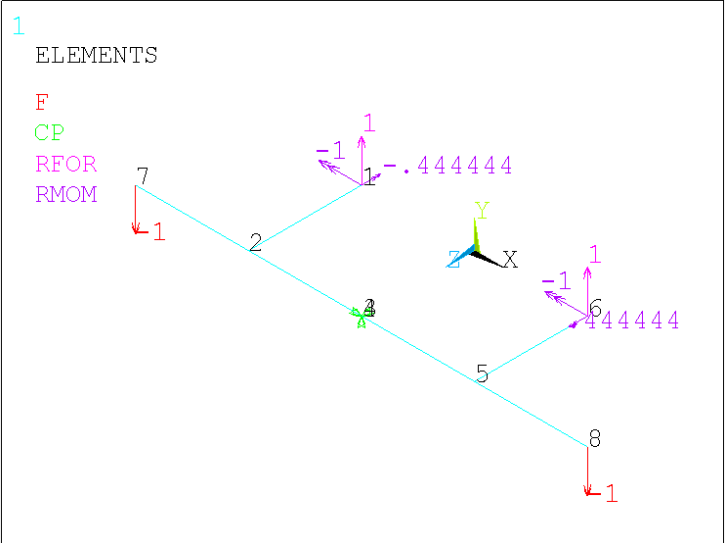
№	Действие	Результат
Вычисление податливости δ_{II}:		
15	<p><i>Единичные моменты по направлениям X_1:</i></p> <p>Номера узлов здесь совпадают с номерами ключевых точек, потому, что одна линия – один элемент и линии проводились от ранних точек к поздним.</p> <p>Значит слева от разреза – узел №3, справа – узел №4:</p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes ></p> <p>Левой кнопкой мыши отмечаем узел 3 (будет окошко выбора >OK) > OK ></p> <p>Lab установить "MZ"</p> <p>VALU пишем 1 > Apply ></p> <p>Левой кнопкой мыши отмечаем узел 4 (будет окошко выбора >OK) > OK ></p> <p>Lab установить "MZ"</p> <p>VALU пишем -1 > OK</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	
16	<p><i>Запускаем расчёт:</i></p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS > OK > OK</p>	



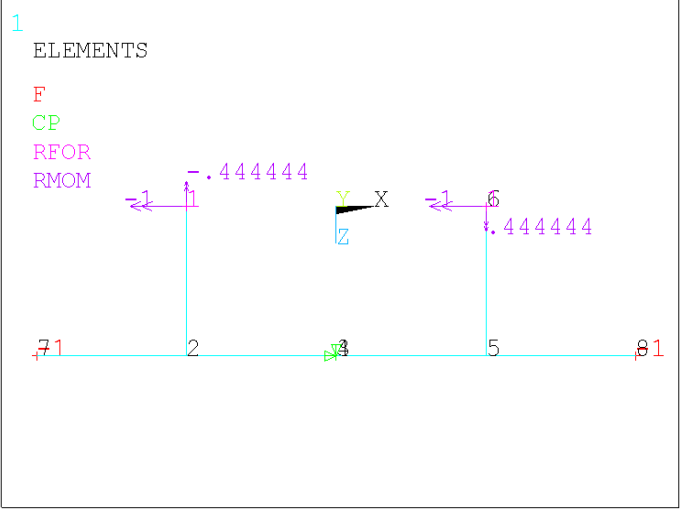
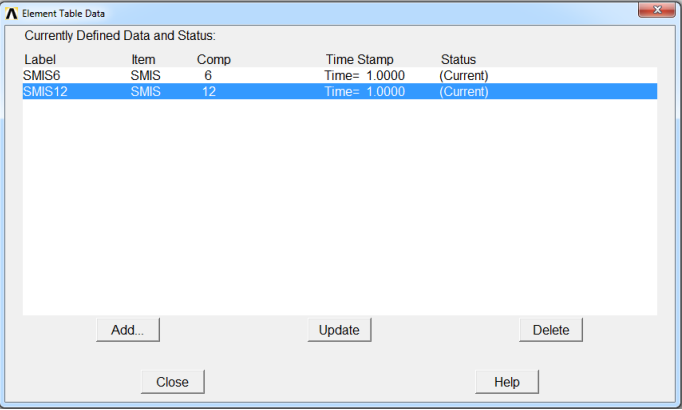
№	Действие	Результат
17	<p>Форма деформированной упругой оси рамы:</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > > Deformed Shape > KUND установить Def + undeformed > OK</p>	
18	<p>Перемещение узлов 3 и 4 по направлению X_1 от единичной силы, приложенной к основной системе по этому же направлению:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Nodal Solution > Nodal Solution > DOF Solution > Z-Component of rotation > OK</p> <p>Пропечаталась величина угла поворота левого узла (№3) в радианах:</p> $ROTZ_3 = 2,25 \cdot \frac{l}{E \cdot I_z} - \text{в } X_1, \text{ в } \text{направление};$ <p>Пропечаталась величина угла поворота правого узла (№4) в радианах:</p> $ROTZ_4 = 2,25 \cdot \frac{l}{E \cdot I_z} - \text{в } X_1, \text{ в } \text{направление};$ <p>Угол взаимного разворота узлов 3 и 4:</p> $\delta_{11} = ROTZ_3 + ROTZ_4 = 4,5 \cdot \frac{l}{E \cdot I_z} ;$ <p>Что в точности совпадает с результатом аналитического расчёта (см. рис. 1.).</p>	

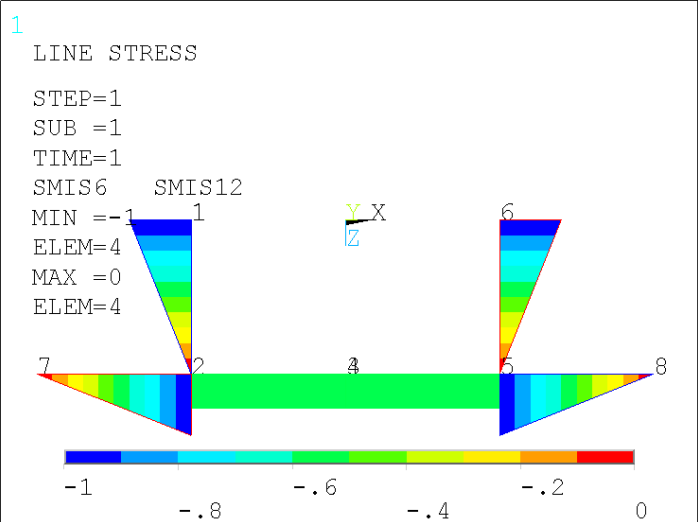
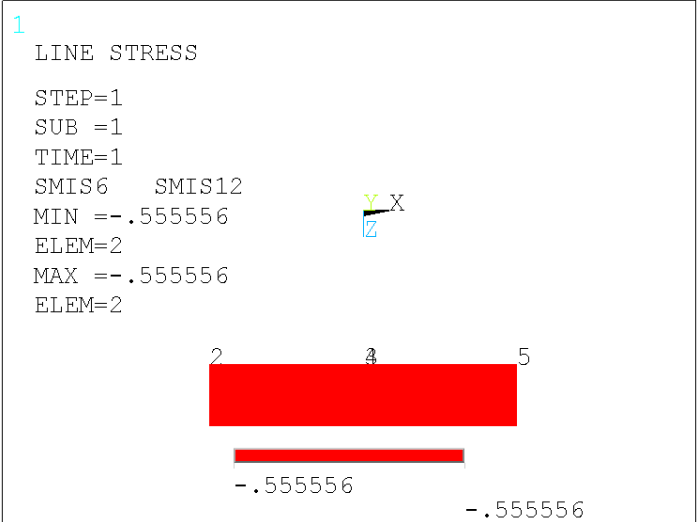
№	Действие	Результат
Вычисление податливости δ_{IF}:		
19	<p><i>Очистка модели от сосредоточенных сил:</i></p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Силы и закрепления не пропали. Просто при расчёте меняются настройки видимости. Включаем изображение всех нагрузок и закреплений: U_M > PlotCtrls > Symbols > Селектор [/PBC] устанавливаем на “All Applied BCs” > ОК</p> <p>Удаление внешних сосредоточенных сил и моментов: M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Delete > Structural > Force/Moment > On Nodes > Pick All > Lab установить “All” > ОК</p>	
20	<p><i>Внешняя нагрузка, приложенная к основной системе:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes > Левой кнопкой мыши отмечаем узлы 7 и 8 > ОК > Lab выбираем “FY” VALUE пишем -F > ОК</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	

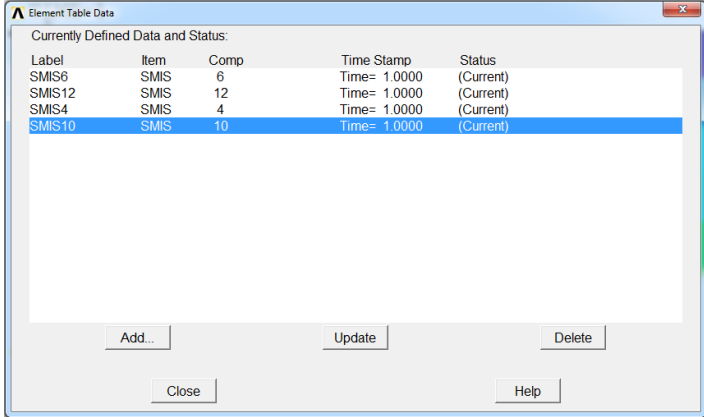
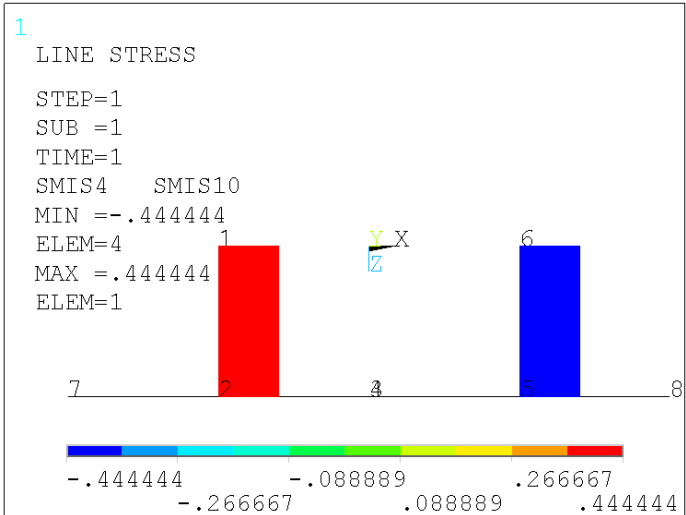
№	Действие	Результат
21	<p>Запускаем расчёт:</p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS > OK > OK</p>	
22	<p>Форма деформированной упругой оси рамы:</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape > KUND установить Def + undeformed > OK</p>	
23	<p>Перемещение узлов 3 и 4 по направлению X_1 от внешней нагрузки, приложенной к основной системе:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Nodal Solution > Nodal Solution > DOF Solution > Z-Component of rotation > OK</p> <p>Пропечаталась величина угла поворота левого узла (№3) в радианах:</p> $ROTZ_3 = 1,25 \cdot \frac{F \cdot l^2}{E \cdot I_z} - \text{в } X_1, \text{ в } \text{рад};$ <p>Пропечаталась величина угла поворота правого узла (№4) в радианах:</p> $ROTZ_4 = 1,25 \cdot \frac{F \cdot l^2}{E \cdot I_z} - \text{в } X_1, \text{ в } \text{рад};$ <p>Угол взаимного разворота узлов 3 и 4:</p> $\delta_{IF} = ROTZ_3 + ROTZ_4 = 2,5 \cdot \frac{F \cdot l^2}{E \cdot I_z} ;$ <p>Что в точности совпадает с результатом аналитического расчёта (см. рис. 1).</p>	

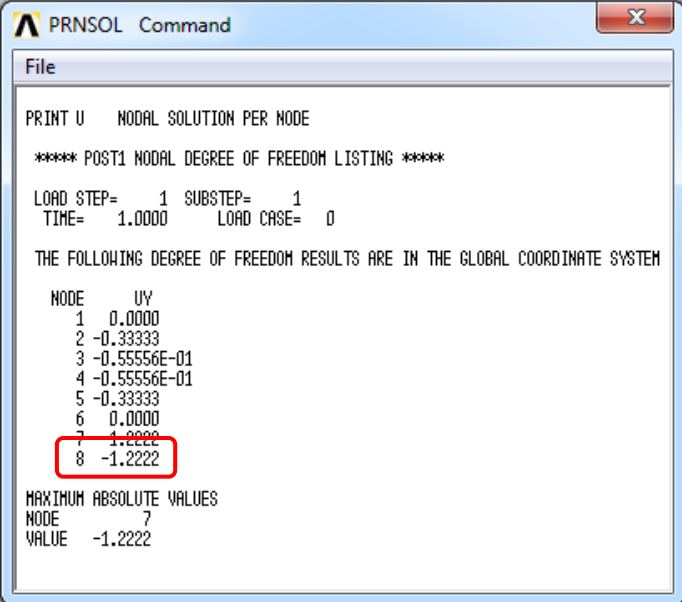
№	Действие	Результат
24	<p><i>Обновляем изображение:</i></p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>U_M > PlotCtrls > Symbols ></p> <p>Селектор [/PBC] устанавливаем на “All Applied BCs”</p> <p>[/PSF] Surface Load Symbols устанавливаем “Pressures”</p> <p>> ОК</p>	
Расчётная схема рамы:		
25	<p><i>Связываем узлы 3 и 4 по всем степеням свободы:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Coupling/Seqn > Coincident Nodes ></p> <p>Lab установить “All appropriate”</p> <p>TOLER оставить 0.0001</p> <p>> ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p>	
26	<p><i>Запускаем расчёт:</i></p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS > ОК > ОК</p>	

№	Действие	Результат
27	<p><i>Силовая схема:</i></p> <p>U_M > PlotCtrls > Symbols > [/PBC] устанавливаем в положение "For Individual" 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" Rot установить "Off" F установить "Symbol+Value" M установить "Symbol+Value" > OK ></p> <p>В окне "Reactions"</p> <p>NFOR установить "Off" NMOM установить "Off" RFOR установить "Symbol+Value" RMOM установить "Symbol+Value" > OK</p> <p>В окне "Miscellaneous" поставить галочку на единственной позиции CP.</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1</i>.</p> <p>В рабочем поле видим следующее:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Красным цветом начерчены внешние силы; - Малиновым цветом - реактивные силы; - Фиолетовым - векторы реактивных моментов: изгибаемого (поперёк оси стержня) и крутильного (вдоль его оси). 	

№	Действие	Результат
28	<p>Вид сверху:</p>  - вид сверху;  - автоформат (размер изображения по размеру окна рабочего поля).	
29	<p>Цветовая шкала будет состоять из десяти цветов:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours > NCONT пишем 10 > OK</p>	
30	<p>Составление эпюры внутреннего изгибающего момента Мизг:</p> <p>M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Add > "By sequence num", "SMISC,", "6" > Apply > "By sequence num", "SMISC,", "12" > OK > > Close</p> <p>Смотрим таблицу результатов: M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Close</p>	

№	Действие	Результат
31	<p><i>Прорисовка эпюры Мизг:</i></p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Line Elem Res > LabI установить "SMIS6" LabJ установить "SMIS12" Fact пишем 1 > ОК</p> <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1</i>. (только числа, выделенные синим цветом). Значения показывает цветовая шкала.</p> <p>Цвет эпюры на центральной перекладине показывает значение в пятом слева интервале (0,5...0,6). Можно его уточнить (см. следующее действие).</p>	
32	<p><i>Конечные элементы поперечины (между узлами 2 и 5):</i></p> <p>Выделяем нужные конечные элементы:</p> <p>U_M > Select > Entities > Устанавливаем "Elements", "By Num/Pick" и "From Full" > ОК</p> <p>Кликаем мышкой на элемент между узлами 2 и 3 Кликаем мышкой на элемент между узлами 4 и 5 > ОК</p> <p>Прорисовываем: U_M > Plot > Replot</p> <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1</i>. на участке Б-В (только числа, выделенные синим цветом). Значения показывает цветовая шкала.</p> <p>Выделяем всё, что есть: U_M > Select > Everything Прорисовываем: U_M > Plot > Replot</p>	

№	Действие	Результат																									
33	<p><i>Составление эпюры внутреннего крутящего момента Мкр:</i></p> <pre>M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Add > "By sequence num", "SMISC,", "4" > Apply > "By sequence num", "SMISC,", "10" > OK > > Close</pre> <p>Смотрим таблицу результатов:</p> <pre>M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Close</pre>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Label</th> <th>Item</th> <th>Comp</th> <th>Time Stamp</th> <th>Status</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SMIS6</td> <td>SMIS</td> <td>6</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>SMIS12</td> <td>SMIS</td> <td>12</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>SMIS4</td> <td>SMIS</td> <td>4</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr style="background-color: #e6f2ff;"> <td>SMIS10</td> <td>SMIS</td> <td>10</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> </tbody> </table>	Label	Item	Comp	Time Stamp	Status	SMIS6	SMIS	6	Time= 1.0000	(Current)	SMIS12	SMIS	12	Time= 1.0000	(Current)	SMIS4	SMIS	4	Time= 1.0000	(Current)	SMIS10	SMIS	10	Time= 1.0000	(Current)
Label	Item	Comp	Time Stamp	Status																							
SMIS6	SMIS	6	Time= 1.0000	(Current)																							
SMIS12	SMIS	12	Time= 1.0000	(Current)																							
SMIS4	SMIS	4	Time= 1.0000	(Current)																							
SMIS10	SMIS	10	Time= 1.0000	(Current)																							
34	<p><i>Прорисовка эпюры Мкр:</i></p> <pre>M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Line Elem Res > LabI установить "SMIS4" LabJ установить "SMIS10" Fact пишем 1 > OK</pre> <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1.</i> (только числа, выделенные синим цветом). Значения показывает цветовая шкала.</p>	 <p>1 LINE STRESS</p> <pre>STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS4 SMIS10 MIN =-.444444 ELEM=4 MAX =.444444 ELEM=1</pre> <p>7 2 4 5 6 8</p> <p>-.444444 -.088889 .266667 -.266667 .088889 .444444</p>																									

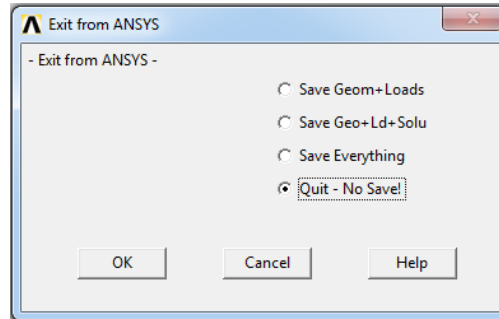
№	Действие	Результат
35	<p><i>Вертикальное перемещение узла №8 (точка K)</i></p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Nodal Solution > Nodal Solution > DOF Solution > Y-Component of displacement > OK</p> <p>Получаем методом конечных элементов:</p> $UY_8 = \delta_8 = \delta_{\hat{E}} = 1,222 \cdot \frac{F \cdot l^3}{E \cdot I_z} \quad \text{áí èç (î ò ð è ö à ò ä è ü í ù é);}$ <p>что в точности совпадает с результатом аналитического расчёта (рис. 1.).</p>	 <p>The screenshot shows the PRNSOL Command window with the following text:</p> <pre> PRNSOL Command File PRINT U 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 UY 1 0.0000 2 -0.33333 3 -0.55556E-01 4 -0.55556E-01 5 -0.33333 6 0.0000 7 1.2222 8 -1.2222 MAXIMUM ABSOLUTE VALUES NODE 7 VALUE -1.2222 </pre> <p>The value for node 8, -1.2222, is highlighted with a red box in the original image.</p>

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”, “.stat” и “.SECT”.

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