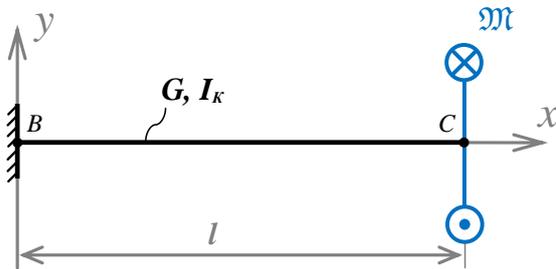


D-02 (ANSYS)

Формулировка задачи:



Дано: Торсион постоянной жёсткости

нагружен сосредоточенным моментом \mathfrak{M} на конце (в точке C).

G – модуль сдвига материала;

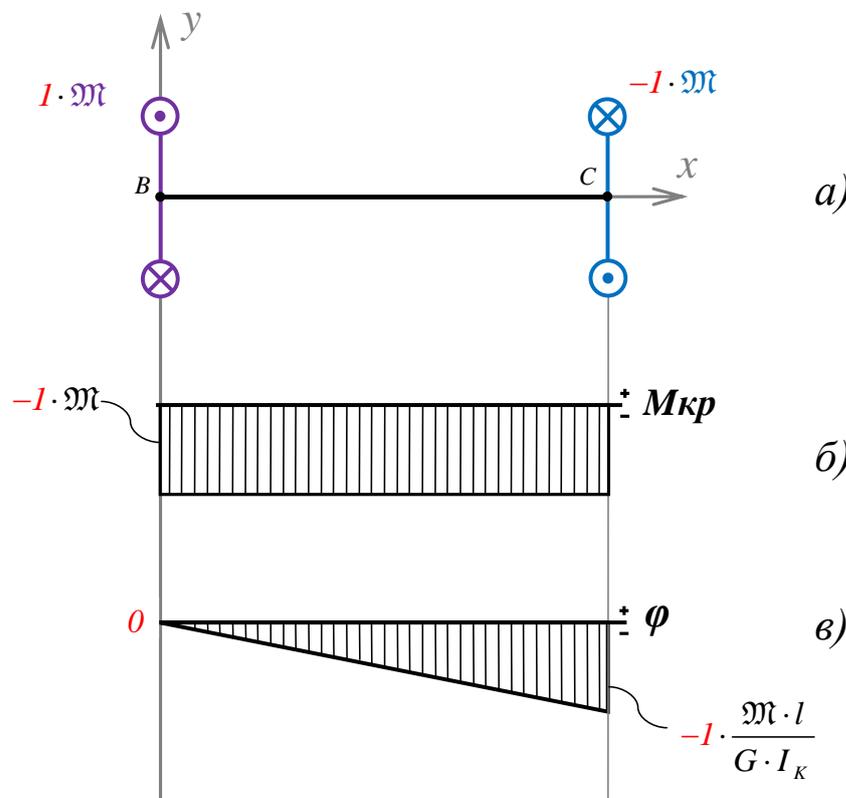
I_k – геометрическая жёсткость при кручении поперечного сечения торсиона.

Вычислить: Эпюру внутреннего крутящего момента $M_{кр}$;

Эпюру угловых перемещений поперечных сечений φ ;

Потенциальную энергию упругого деформирования торсиона U .

Аналитический расчёт (см. [D-02](#)) даёт следующие решения:



$$U = 0,5 \cdot \frac{\mathfrak{M}^2 \cdot l}{G \cdot I_k} \quad \text{г)}$$

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:

ANSYS Command Prompt (C_P)

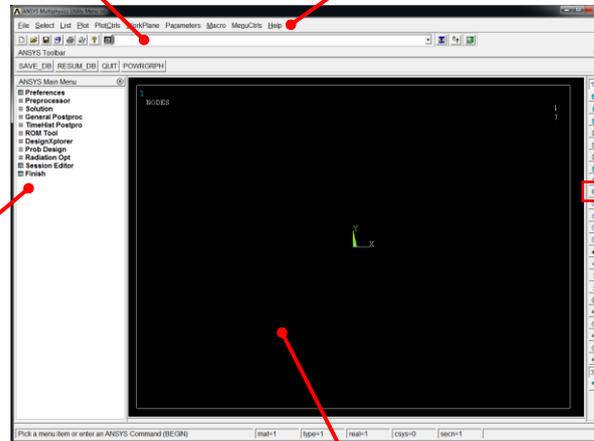
Utility Menu (U_M)

Main Menu (M_M)

Рабочее поле

Кнопка

Fit

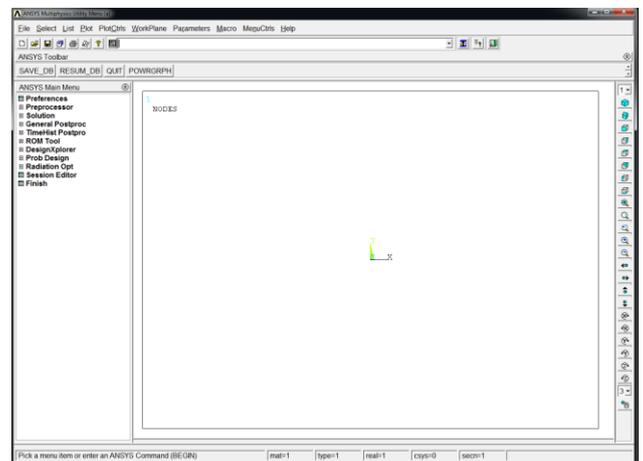


С меню M_M и U_M работают мышью, выбирая нужные опции.

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

Чёрное рабочее поле не всегда приятно для глаза. Кроме того, оно неудобно для печати рисунков. Меняем чёрный цвет фона на белый следующими действиями:

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



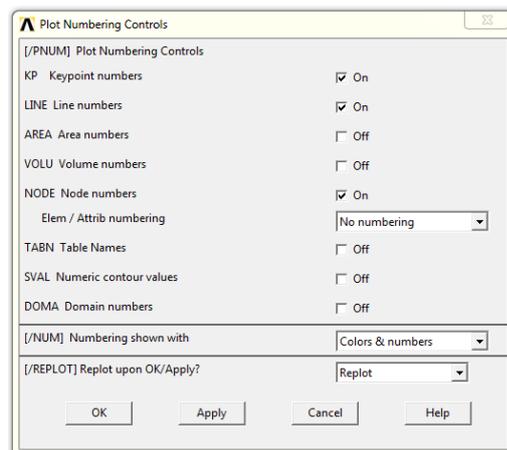
В меню оставить только пункты, относящиеся к прочностным расчётам:

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



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

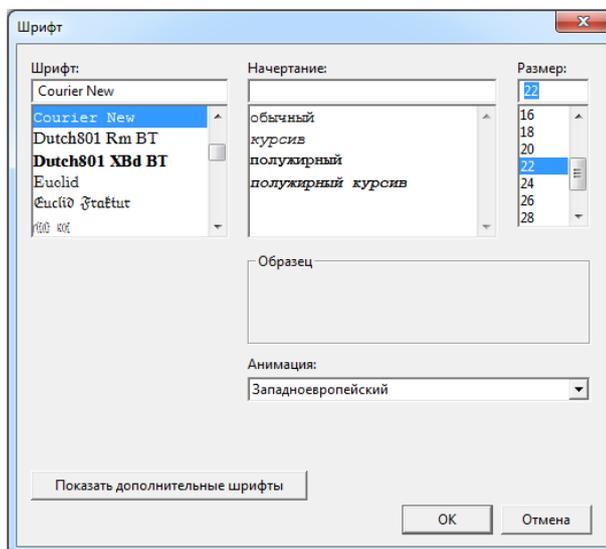
```
U_M > PlotCtrls > Numbering >
Отметить KP, LINE, NODE ;
Установить Elem на "No numbering";
Установить [/NUM] на "Colors&numbers"
> ОК
```



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
```

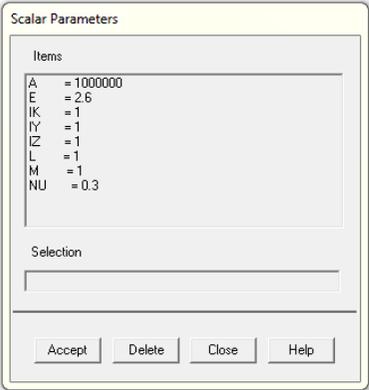
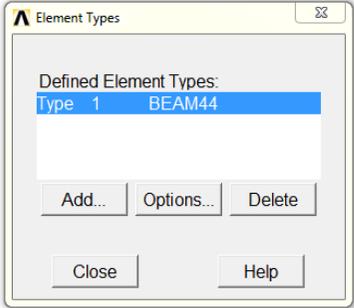


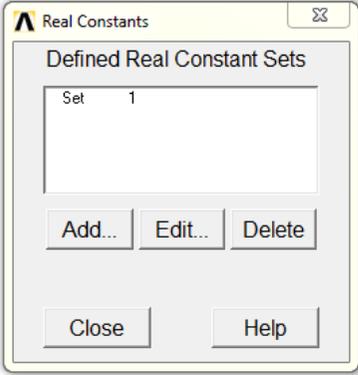
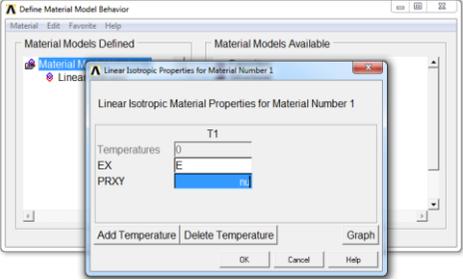
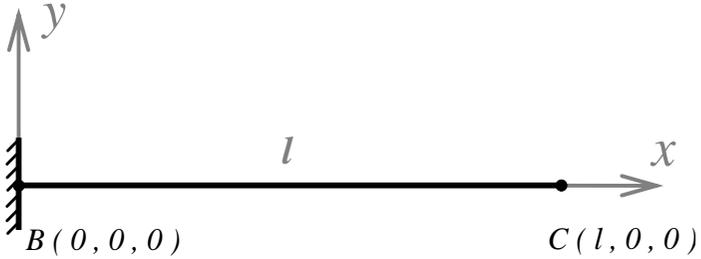
Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.

Решение задачи:

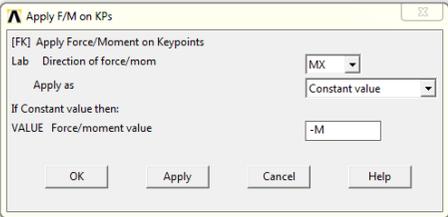
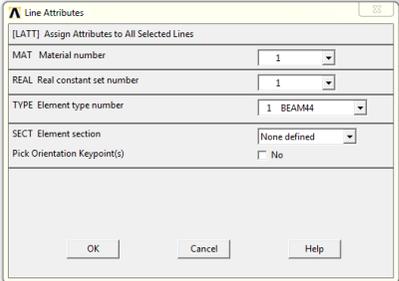
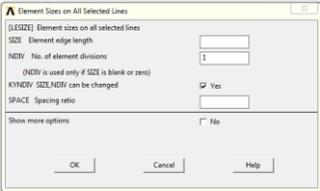
Приравняв G , I_K , M и l к единице, результаты получим в виде коэффициентов перед формулами, обозначенных на *рис. 1*. красным цветом. Модуль упругости второго рода (модуль сдвига) G в свойствах материала явно не задаётся. По известной формуле, связывающей G , E и ν изотропного материала для того, чтобы получить $G=1$ при $\nu=0,3$ требуется задать $E=2,6$.

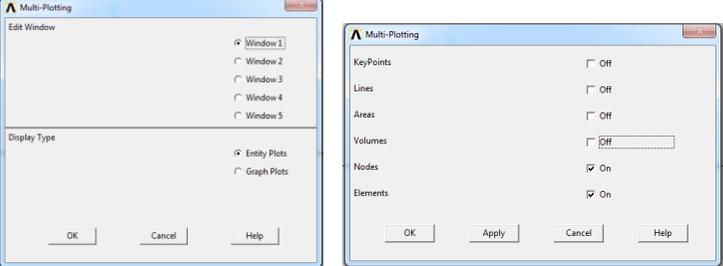
Площади поперечных сечений торсиона A зададим большими, дабы не присутствовало в результатах растяжение/сжатие, а их изгибные моменты инерции I_Y и I_Z для определённости приравняем к I_K .

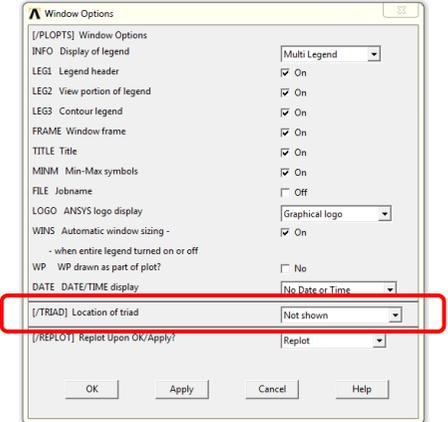
№	Действие	Результат
1	<p><i>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</i></p> <p>U_M > Parameters > Scalar Parameters > A=1e6 > Accept > Ik=1 > Accept > Iy=Ik > Accept > Iz=Ik > Accept > E=2.6 > Accept > nu=0.3 > Accept > M=1 > Accept > l=1 > Accept > > Close</p>	
2	<p><i>Первая строчка в таблице конечных элементов – балочный тип BEAM44:</i></p> <p>M_M > Preprocessor C_P > ET, 1, BEAM44 > Enter Посмотрим таблицу конечных элементов: M_M > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Close</p>	

№	Действие	Результат
3	<p><i>Реальные константы для элемента BEAM44:</i></p> <p><i>Первая строчка в таблице параметров («реальных констант») выбранного типа конечного элемента: Площадь поперечного сечения = A; изгибные моменты инерции = I_y и I_z ; высота сечения вдоль осей y и $z = l/100$ (не будем использовать, но формально надо что-то задать), геометрическая жёсткость при кручении = I_k.</i></p> <p><code>C_P > R, 1, A, I_z, I_y, L/100, L/100, I_k > Enter</code></p> <p>Посмотрим таблицу реальных констант:</p> <p><code>M_M > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete > Close</code></p>	
4	<p><i>Свойства материала стержня – модуль упругости и коэффициент Пуассона:</i></p> <p><code>M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic ></code> В окошке EX пишем "E", в окошке PRXY пишем "nu" > OK</p> <p>Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p>	
Твердотельное моделирование		
5	<p><i>Координаты точек – границ участков:</i></p>	

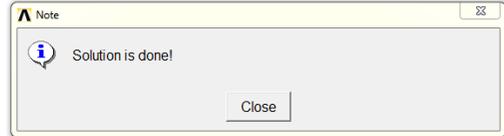
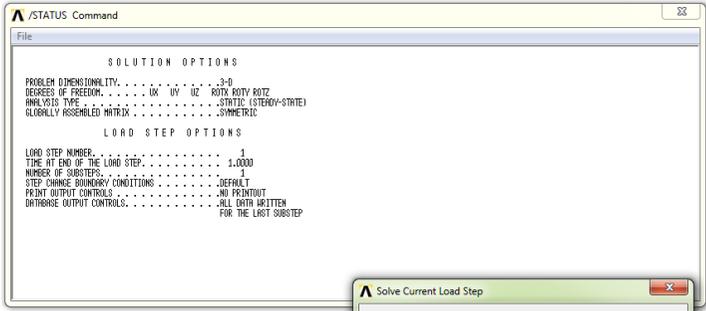
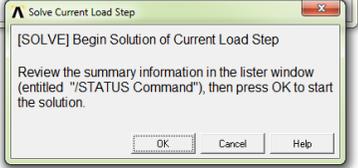
№	Действие	Результат					
6	<p><i>Ключевые точки – границы участков (B→1, C→2):</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS > NPT пишем 1 X, Y, Z пишем 0, 0, 0 > Apply > NPT пишем 2 X, Y, Z пишем 1, 0, 0 > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Справа от рабочего поля нажимаем кнопку Fit .</p>	 <p style="text-align: right;">2</p>					
7	<p><i>Один участок – одна линия между точками:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > > Straight Line > Левой кнопкой мыши нажать на ключевую точку 1, потом на 2 > OK</p>	 <p style="text-align: right;">2</p>					
8	<p><i>Заделка:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Keypoints > Левой кнопкой мыши нажать на 1 ключевую точку > OK > Lab2 установить "All DOF" > OK</p> <div data-bbox="741 1161 1205 1458" style="border: 1px solid gray; padding: 5px; margin: 10px auto; width: fit-content;"> <p>Apply U,ROT on KPs</p> <p>[DK] Apply Displacements (U,ROT) on Keypoints</p> <p>Lab2 DOFs to be constrained</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px;">All DOF</td></tr> <tr><td style="padding: 2px;">UX</td></tr> <tr><td style="padding: 2px;">UY</td></tr> <tr><td style="padding: 2px;">UZ</td></tr> <tr><td style="padding: 2px;">ROTX</td></tr> </table> <p>Apply as: Constant value</p> <p>If Constant value then:</p> <p>VALUE Displacement value: <input style="width: 50px;" type="text"/></p> <p>KEXPND Expand disp to nodes? <input type="checkbox"/> No</p> <p style="text-align: center;"> <input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Apply"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/> </p> </div>	All DOF	UX	UY	UZ	ROTX	 <p style="text-align: right;">2</p>
All DOF							
UX							
UY							
UZ							
ROTX							

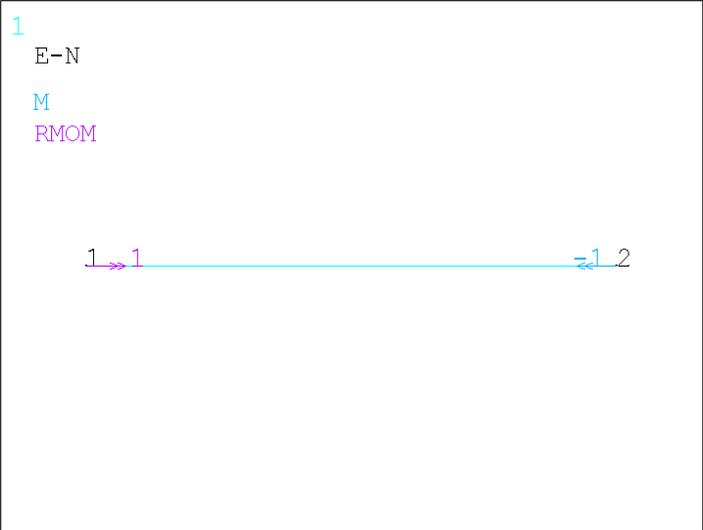
№	Действие	Результат
9	<p><i>Внешний момент:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On Keypoints > Левой кнопкой мыши нажать на ключевую точку 2 > OK > Lab установить "MX" VALUE установить "-M" > OK</p> 	
Конечноэлементная модель		
10	<p><i>Указываем материал, реальные константы и тип элементов:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Lines > MAT установить "1" REAL установить "1" TYPE установить "1 BEAM44" > OK</p>	
11	<p><i>Участок без распределённых нагрузок можно бить одним конечным элементом:</i></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> 	

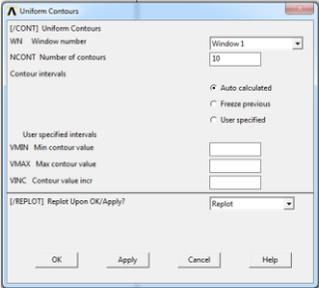
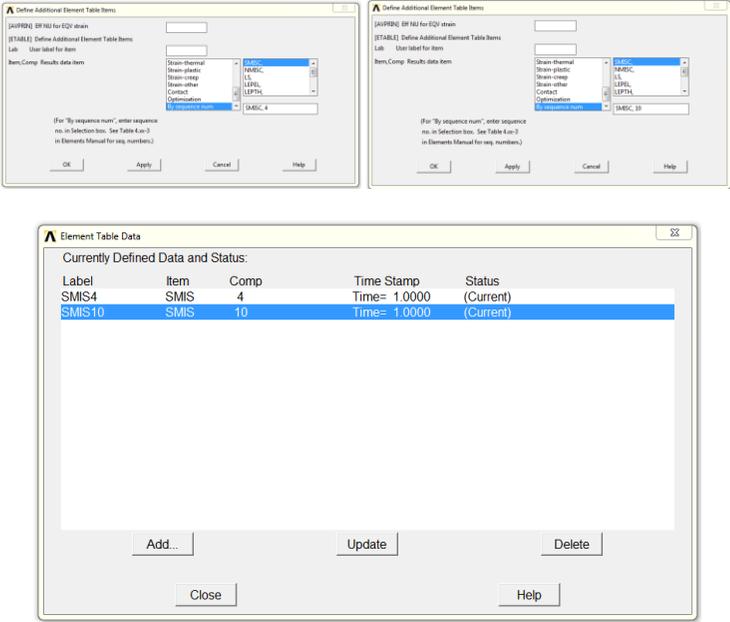
№	Действие	Результат
12	<p><i>Рабиваем линию на элементы (в данном случае, один элемент):</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines > Pick All</p> <p>Обновляем изображение:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Видим одновременно твердотельную и конечноэлементную модели. Номера узлов совпадают с номерами ключевых точек, цвет конечного элемента тот же, что и линии L1 – бирюзовый – поэтому в данном случае совмещение незаметно.</p>	
13	<p><i>Указываем, что именно нужно теперь прорисовывать по команде Multi-Plots:</i></p> <p>U_M > PlotCtrls > Multi-Plot Controls... ></p> <p>Появляется первое окно Multi-Plotting > OK ></p> <p>Появляется второе окно Multi-Plotting ></p> <p>Оставляем в нём отметки только напротив Nodes и Elements > OK</p> <p>Обновляем изображение:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Видим только конечноэлементную модель.</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 ></p> <p>> All Solid Lds > OK</p> <p>Обновляем изображение:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p>	

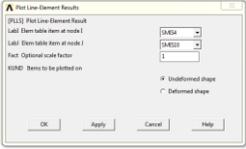
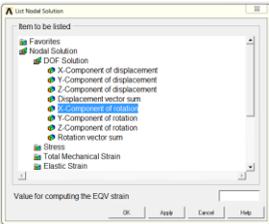
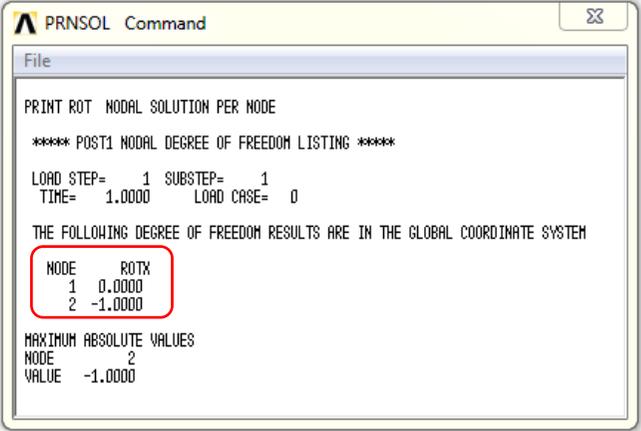
№	Действие	Результат
15	<p>Скрываем оси системы координт:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Window Controls > Window Options > [/Triad] установить "Not Shown" > OK</p> 	

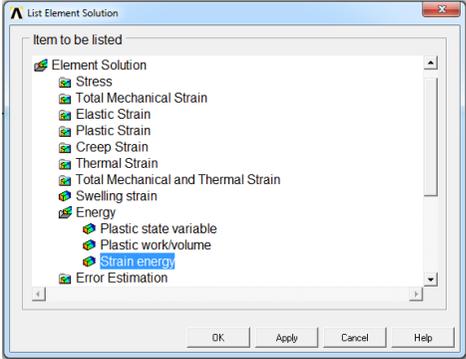
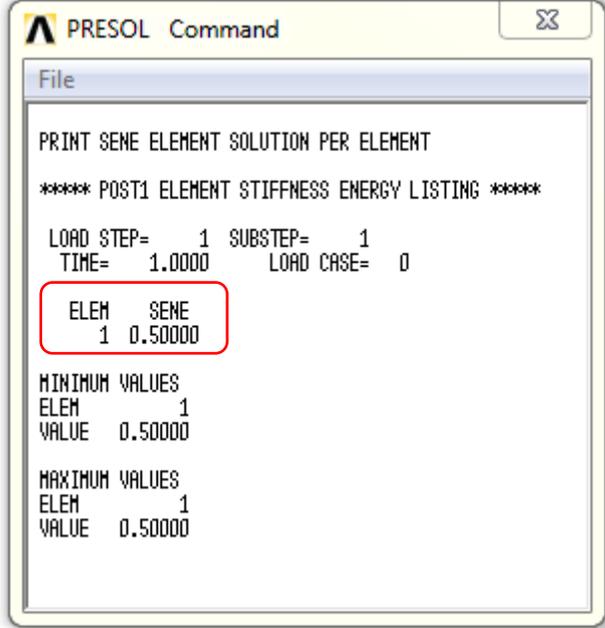
Расчёт

16	<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>Расчёт пошёл.</p> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Закройте это окно.</p> <p>Расчёт окончен.</p> 	 
----	---	---

№	Действие	Результат
Просмотр результатов		
17	<p><i>Силовая схема:</i></p> <p>U_M > PlotCtrls > Symbols > [/PBC] устанавливаем в положение "For Individual" 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" 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>Обновляем изображение:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p> <p>При необходимости корректируйте масштаб кнопками  или .</p> <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1а</i>. (моменты прорисовываются своими векторами – двуглавыми стрелками).</p>	

№	Действие	Результат															
18	<p><i>Цветовая шкала будет состоять из десяти цветов:</i></p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours > NCONT пишем 10 > OK</p>																
19	<p><i>Вычисление 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,", "10" > OK > > Close</p>	 <table border="1" data-bbox="1413 815 2074 1209"> <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>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	SMIS4	SMIS	4	Time= 1.0000	(Current)	SMIS10	SMIS	10	Time= 1.0000	(Current)
Label	Item	Comp	Time Stamp	Status													
SMIS4	SMIS	4	Time= 1.0000	(Current)													
SMIS10	SMIS	10	Time= 1.0000	(Current)													

№	Действие	Результат
20	<p>Прорисовка эпюры внутреннего крутящего момента $M_{кр}$:</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Line Elem Res ></p> <p>LabI установить "SMIS4" LabJ установить "SMIS10" > OK</p>  <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1б.</i> (только числа, выделенные на <i>рис. 1б.</i> красным цветом). Значения показывают надписи слева MAX=-1 и MIN=-1, то есть эпюра прямоугольная – во всех точках имеет одно и то же значение «-1».</p>	 <pre> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS4 SMIS10 MIN =-1 ELEM=1 MAX =-1 ELEM=1 </pre>
21	<p>Угловые перемещения поперечных сечений торсиона (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 поворот относительно глобальной оси X ("+" – против часовой стрелки, "-" – по). Видим :</p> <p>– поворот левого (заделанного) узла №1:</p> $\varphi_1 = ROTX_1 = 0 ;$ <p>– поворот правого узла №2 (к нему приложен внешний момент \mathfrak{M}):</p> $\varphi_2 = ROTX_2 = -1 \cdot \frac{\mathfrak{M} \cdot l}{G \cdot I_K} .$ <p>Что в точности соответствует значениям линейной эпюры φ на <i>рис. 1в.</i></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 -1.0000 MAXIMUM ABSOLUTE VALUES NODE 2 VALUE -1.0000 </pre>

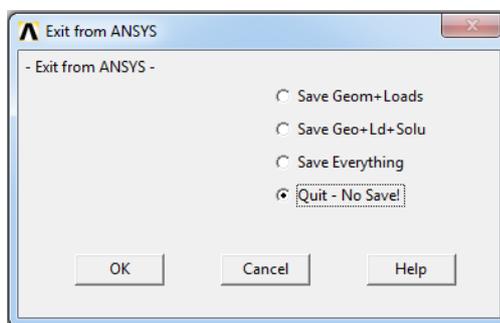
№	Действие	Результат
22	<p>Потенциальная энергия упругой деформации U:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Element Solution > Energy > Strain energy > OK</p>  <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1г.</i> (только коэффициент перед формулой, выделенный на <i>рис. 1г.</i> красным цветом):</p> $U = 0,5 \cdot \frac{\mathcal{M}^2 \cdot l}{G \cdot I_k} \quad [\text{Дж}]$	 <pre> PRESOL Command File PRINT SEANE ELEMENT SOLUTION PER ELEMENT **** POST1 ELEMENT STIFFNESS ENERGY LISTING **** LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0 ELEM SEANE 1 0.50000 MINIMUM VALUES ELEM 1 VALUE 0.50000 MAXIMUM VALUES ELEM 1 VALUE 0.50000 </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.