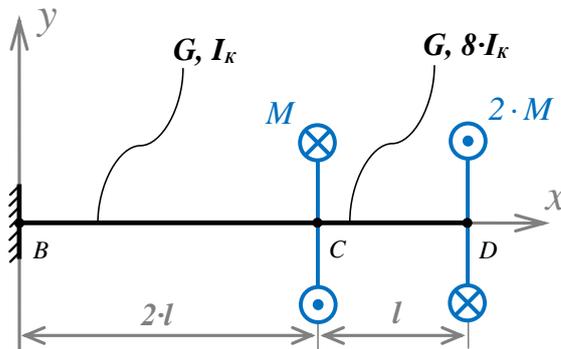


D-03 (ANSYS)

Формулировка задачи:



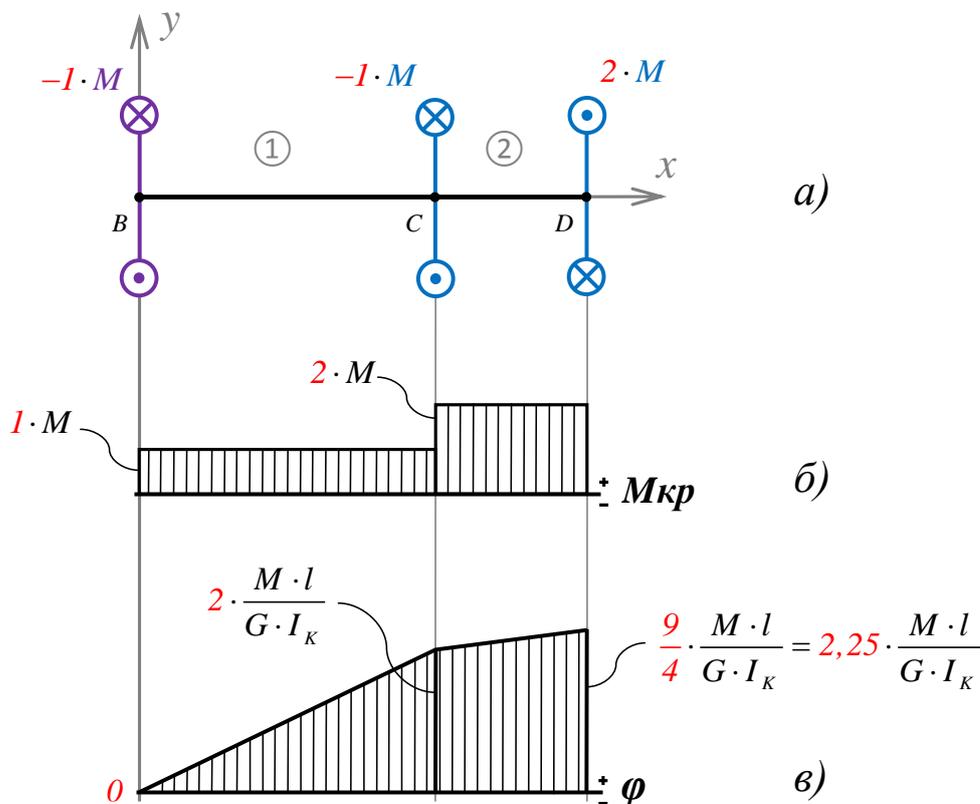
Дано: Торсион постоянной жёсткости нагружен сосредоточенными моментами на конце.
 G – модуль сдвига материала;
 I_K – геометрическая жёсткость при кручении поперечного сечения торсиона.

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

Эпюру угловых перемещений поперечных сечений φ ;

Потенциальную энергию упругого деформирования торсиона U .

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

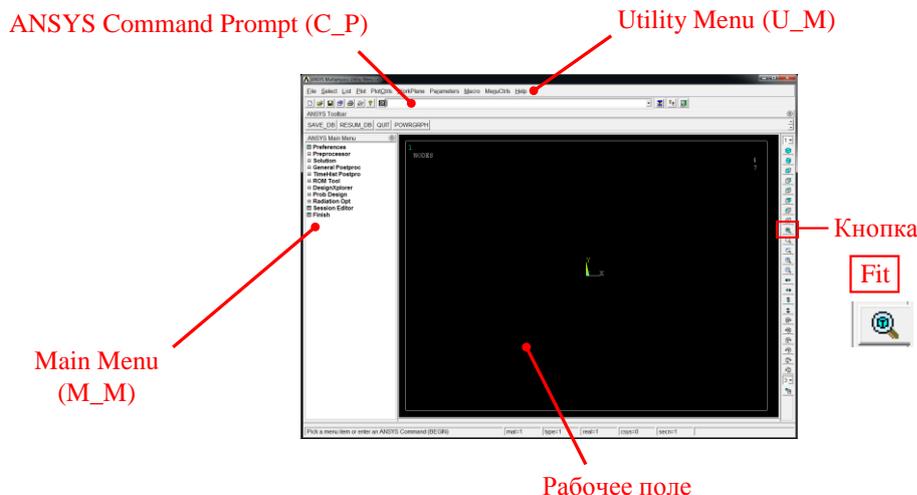


$$\begin{aligned}
 \text{в)} \quad U &= \frac{5}{4} \cdot \frac{M^2 \cdot l}{G \cdot I_K} = \\
 &= 1,25 \cdot \frac{M^2 \cdot l}{G \cdot I_K}
 \end{aligned}$$

Задача данного примера: при помощи ANSYS Multyphysics получить эти же эпюры 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 следующими действиями:

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

Оставить в меню только пункты, относящиеся к прочностным расчётам:

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

Нумеровать точки и линии твердотельной модели, а также номера 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
```

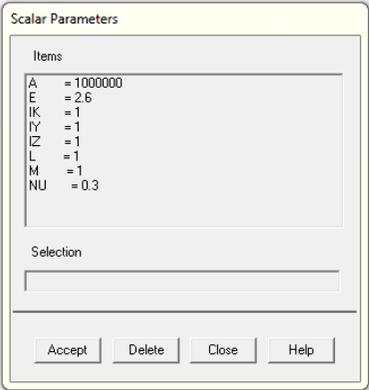
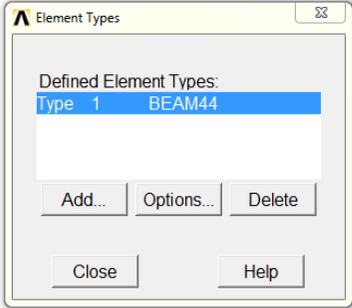
Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.

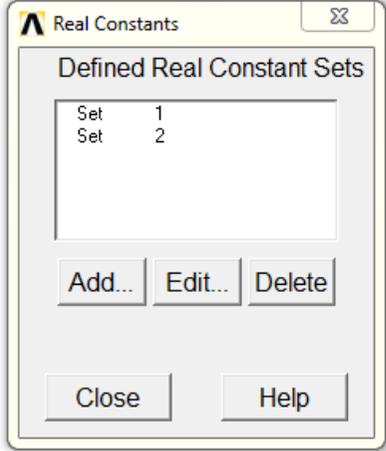
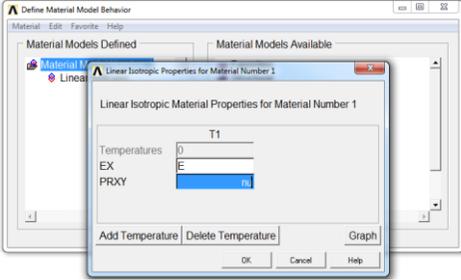
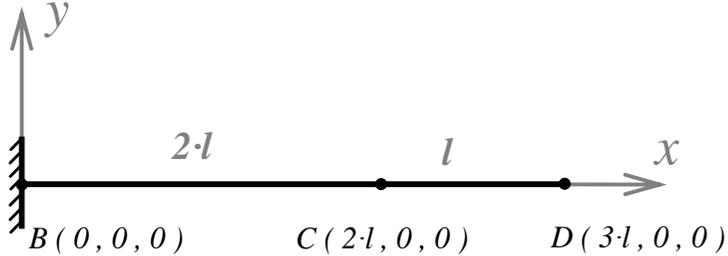
<http://www.tychina.pro/библиотека-задач-1/>

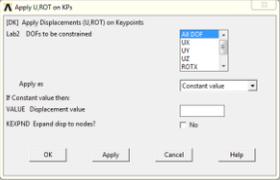
Решение задачи:

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 .

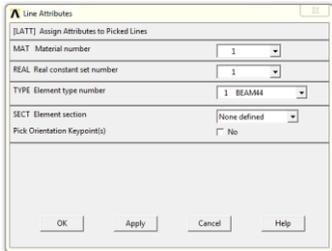
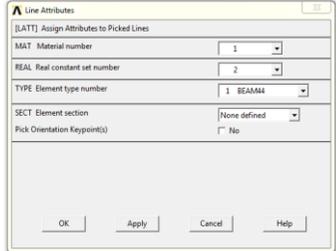
| № | Действие | Результат |
|---|---|---|
| 1 | <p><i>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</i></p> <pre> U_M > Parameters > Scalar Parameters > A=1e6 > Accept > Ik=1 > Accept > Iy=Ik > Accept > Iz=Ik > Accept > E=2.6 > Accept > nu=0.3 > Accept > M=1 > Accept > l=1 > Accept > > Close </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> |  |

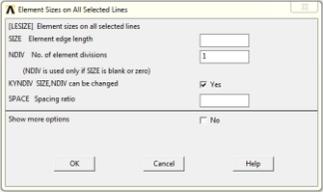
| № | Действие | Результат |
|------------------------------------|--|---|
| 3 | <p><i>Реальные константы для элемента BEAM44:</i></p> <p>Первая строчка в таблице реальных константот ображает свойства поперечного сечения участка ① торсиона:</p> <p><code>C_P > R, 1, A, Iz, Iy, L/100, L/100, Ik > Enter</code></p> <p>Вторая строчка в таблице реальных констант повторяет первую за исключением геометрической жёсткости при кручении I_k. Она предназначена для участка ② торсиона:</p> <p><code>C_P > R, 2, A, Iz, Iy, L/100, L/100, 8*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></p> <p>В окошке EX пишем "E", в окошке PRXY пишем "nu"</p> <p><code>> OK</code></p> <p>Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p> |  |
| Твердотельное моделирование | | |
| 5 | <p><i>Координаты точек – границ участков:</i></p> |  |

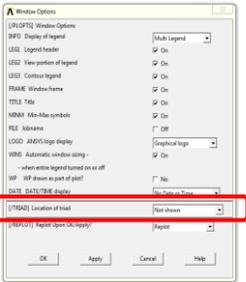
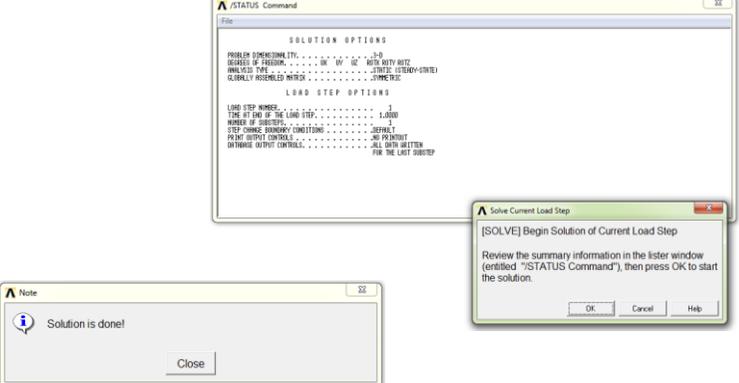
| № | Действие | Результат |
|---|---|---|
| 6 | <p><i>Ключевые точки – границы участков (B→1, C→2, D→3):</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS > NPT пишем 1 X, Y, Z пишем 0, 0, 0 > Apply > NPT пишем 2 X, Y, Z пишем 2*l, 0, 0 > Apply > NPT пишем 3 X, Y, Z пишем 3*l, 0, 0 > ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Справа от рабочего поля нажимаем кнопку Fit .</p> |  |
| 7 | <p><i>Два участка – две линии между точками:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > > Straight Line ></p> <p>Левой кнопкой мыши кликнуть последовательно на ключевые точки 1 и 2 2 и 3 > ОК</p> |  |
| 8 | <p><i>Заделка:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Keypoints ></p> <p>Левой кнопкой мыши нажать на 1 ключевую точку > ОК ></p> <p>Lab2 установить "All DOF" > ОК</p>  |  |

| № | Действие | Результат |
|---|---|---|
| 9 | <p><i>Нагрузка (моменты прорисовываются векторами – двуглавыми стрелками):</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On Keypoints > Левой кнопкой мыши кликнуть на ключевую точку 2 > OK > Lab установить "MX" VALUE установить "-M" > Apply > Левой кнопкой мыши кликнуть на ключевую точку 3 > OK > Lab установить "MX" VALUE установить "2*M" > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> |  |

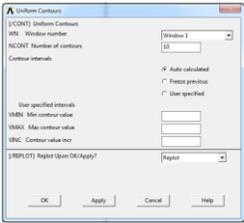
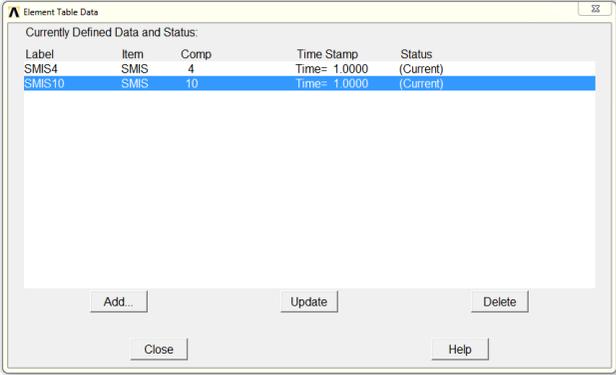
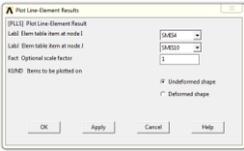
Конечноэлементная модель

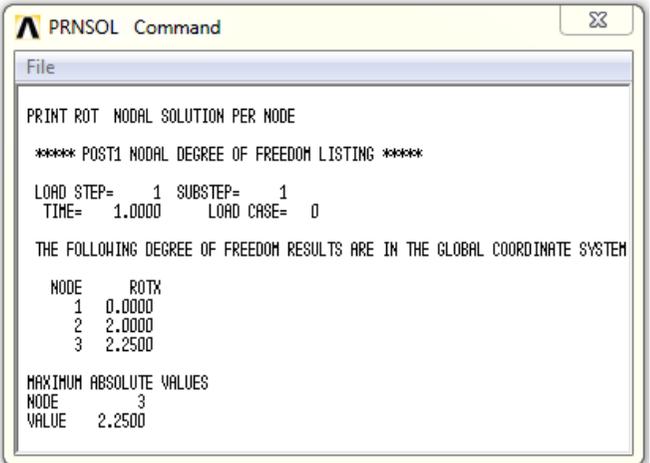
| | | |
|----|---|--|
| 10 | <p><i>Указываем материал, реальные константы и тип элементов:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Lines > Левой кнопкой мыши кликнуть на линию L1 > OK > MAT установить "1" REAL установить "1" TYPE установить "1 BEAM44" > Apply > Левой кнопкой мыши кликнуть на линию L2 > OK > REAL установить "2" > OK</p> |   |
|----|---|--|

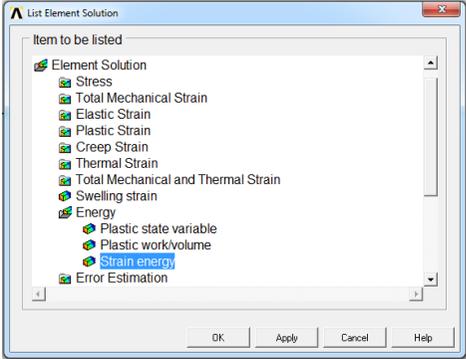
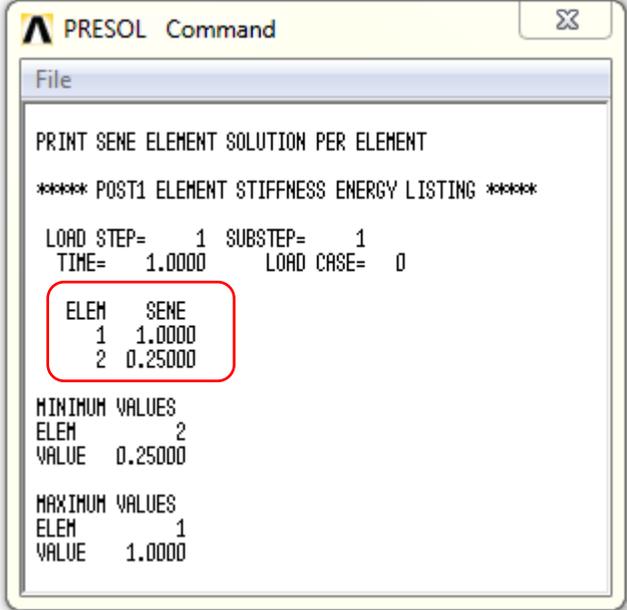
| № | Действие | Результат |
|----|---|---|
| 11 | <p><i>Участки без распределённых нагрузок можно бить одним конечным элементом:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > > Lines > All Lines ></p> <p>NDIV пишем 1</p> <p>> OK</p> <p>Обновляем изображение:</p> <p>U_M > Plot > 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:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Видим одновременно твердотельную и конечноэлементную модели.</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</p> <p>> OK ></p> <p>Появляется второе окно Multi-Plotting ></p> <p>Оставляем в нём отметки только напротив Nodes и Elements</p> <p>> OK</p> <p>Обновляем изображение:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Видим только конечноэлементную модель.</p>  |  |

| № | Действие | Результат |
|---------------|---|---|
| 14 | <p>Переносим на конечноэлементную модель нагрузки и закрепления с модели твердотельной:</p> <p>M_M > Loads > Define Loads > Operate > Transfer to FE > > All Solid Lds > OK</p> <p>Обновляем изображение:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p> |  |
| 15 | <p>Скрываем оси системы координат:</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. Расчёт пошёл. Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Закройте это окно. 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"</p> <p>Убираем галочку с "Miscellaneous"</p> <p>Surface Load Symbols устанавливаем Pressures</p> <p>Show pres and convect as устанавливаем Arrows</p> <p>> 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:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>При необходимости корректируйте масштаб кнопками  или .</p> <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1а</i>.</p> |  |

| № | Действие | Результат |
|----|---|---|
| 18 | <p>Цветовая шкала будет состоять из десяти цветов:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours > NCONT пишем 10 > OK</p> |  |
| 19 | <p>Вычисление эпюры внутреннего крутящего момента $M_{кр}$:</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> |  |
| 20 | <p>Прорисовка эпюры внутреннего крутящего момента $M_{кр}$:</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Line Elem Res > 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> |  |

| № | Действие | Результат |
|----|---|---|
| 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> $\varphi_A = \varphi_1 = ROTX_1 = 0 ;$ $\varphi_C = \varphi_2 = ROTX_2 = 2 \cdot \frac{M \cdot l}{G \cdot I_K} \cdot$ $\varphi_D = \varphi_3 = ROTX_3 = 2,25 \cdot \frac{M \cdot l}{G \cdot I_K} \cdot$ <p>Что в точности соответствует значениям линейной эпюры φ на рис. 1в.</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 2.0000 3 2.2500 MAXIMUM ABSOLUTE VALUES NODE 3 VALUE 2.2500 </pre> |

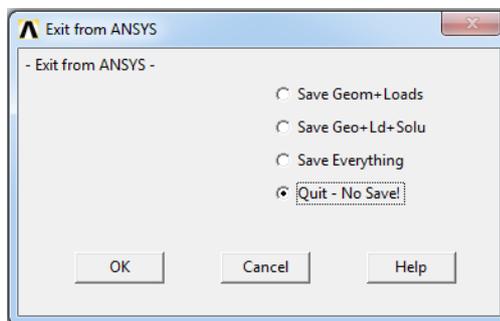
| № | Действие | Результат |
|----|--|--|
| 22 | <p>Потенциальная энергия упругой деформации U:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Element Solution > Energy > Strain energy > OK</p>  <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1г.</i>, но не весь сразу, а поэлементно. Складываем потенциальную энергию обоих конечных элементов модели, получаем:</p> $U = (1+0,25) \cdot \frac{M^2 \cdot l}{G \cdot I_K} = 1,25 \cdot \frac{M^2 \cdot l}{G \cdot I_K} \quad [\text{Дж}]$ |  <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 1.0000 2 0.25000 MINIMUM VALUES ELEM 2 VALUE 0.25000 MAXIMUM VALUES ELEM 1 VALUE 1.0000 </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.