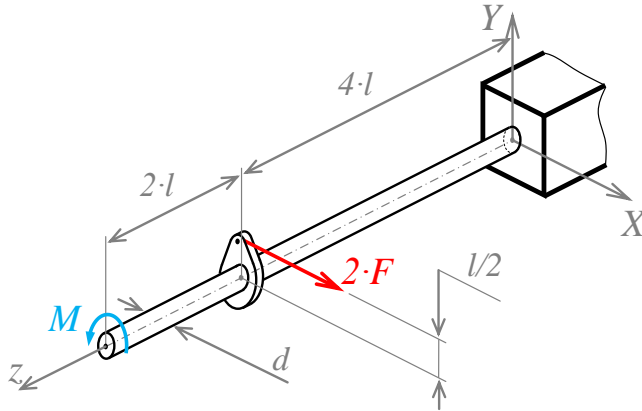


## Q-01 (ANSYS)

Формулировка задачи:

Дано: Консольный круглый стержень с фланцем нагружен внешним крутящим моментом  $M$  на конце и поперечной силой  $F$  на фланце.



$$l = 200 \text{ мм} \quad ;$$

$$F = 1 \text{ кН} \quad ;$$

$$M = \frac{F \cdot l}{2} \quad ;$$

$$\sigma_T = 350 \text{ МПа} \quad \left. \vphantom{\sigma_T} \right\}$$

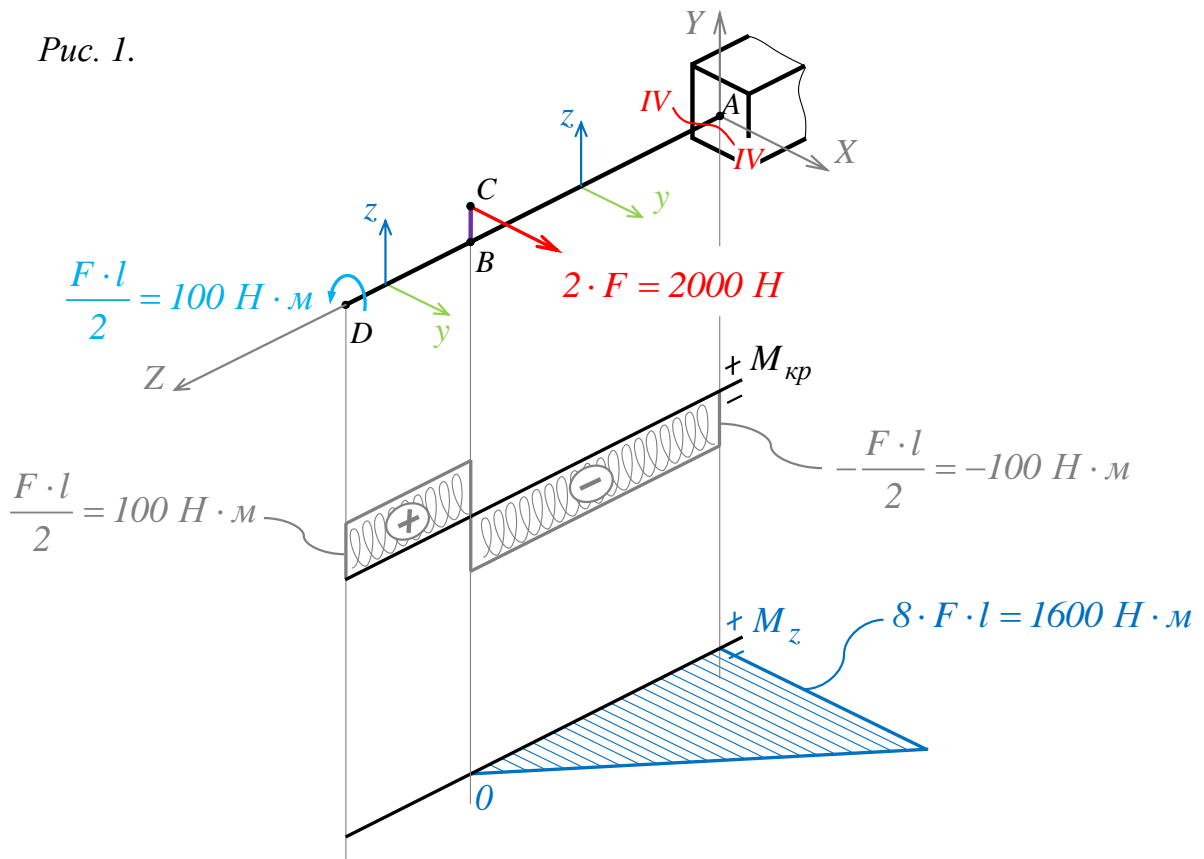
$$[n_T] = 1,5 \quad \left. \vphantom{[n_T]} \right\} [\sigma] = 233,3 \text{ МПа} .$$

Найти: 1) Эпюры  $M_{кр}$  и  $M_{изг}$ ;

2) Диаметр стержня  $d$  из условия прочности  $\sigma_{экв}^{max} = [\sigma]$ .

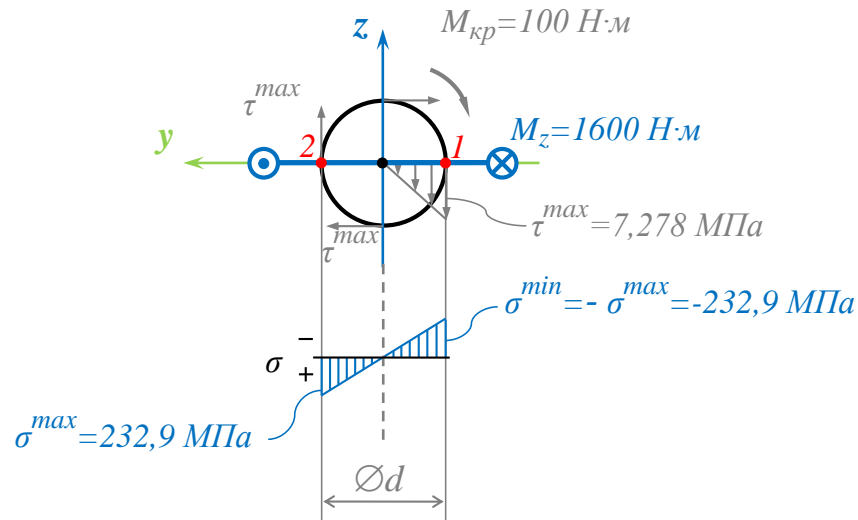
Аналитический расчёт (см. [Q-01](#)) даёт следующие решения:

Рис. 1.



Максимальное эквивалентное напряжение реализуется в сечении IV-IV :

Рис. 2.



$$d = 0,04121 \text{ м};$$

$$I_z = I_{uz2} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot 0,04121^4}{64} = 14,16 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4 ;$$

$$W_z = W_{uz2} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 0,04121^3}{32} = 6,871 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4 ;$$

$$\sigma^{max} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{1600}{6,871 \cdot 10^{-6}} = 232,9 \cdot 10^6 \text{ Па} ;$$

$$I_\kappa = I_p = \frac{\pi \cdot d^4}{32} = \frac{\pi \cdot 0,04121^4}{32} = 28,31 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4 ;$$

$$W_\kappa = W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi \cdot 0,04121^3}{16} = 13,74 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4 ;$$

$$\tau^{max} = \frac{M_{кр}}{W_p} = \frac{100}{13,74 \cdot 10^{-6}} = 7,278 \cdot 10^6 \text{ Па} ;$$

$$\sigma_{\text{экв}}^{max} = \sigma_{\text{экв}1} = \sigma_{\text{экв}2} = \sqrt{(\sigma^{max})^2 + 4 \cdot (\tau^{max})^2} = 256,5 \cdot \frac{F \cdot l}{\pi \cdot d^3} = 233,3 \cdot 10^6 \text{ Па} = [\sigma].$$

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)

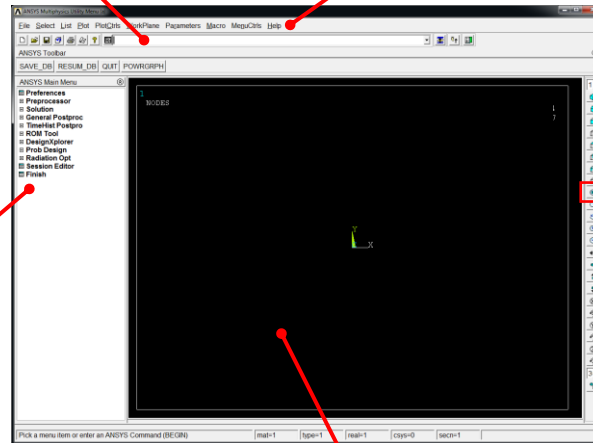
Utility Menu (U\_M)

Main Menu (M\_M)

Рабочее поле

Кнопка

Fit

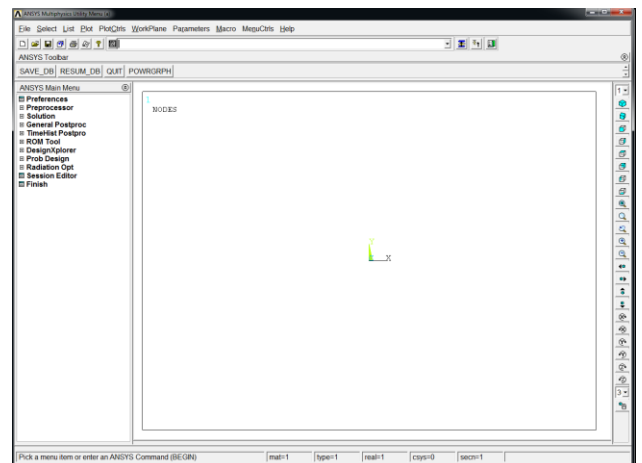


С меню M\_M и U\_M работают мышью, выбирая нужные опции.

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

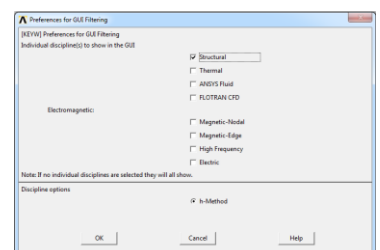
Чёрное рабочее поле не всегда приятно для глаза. Кроме того, оно неудобно для печати рисунков. Меняем чёрный цвет фона на белый следующими действиями:

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



Убрать пункты меню, относящиеся к расплавам, магнитам и так далее, оставить только 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):

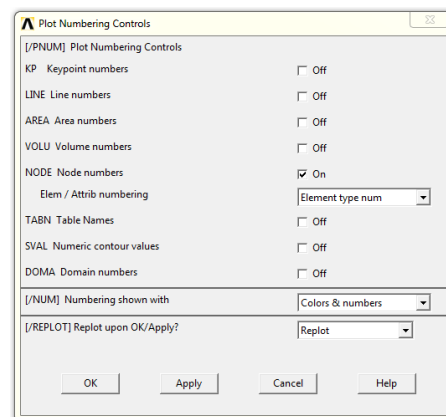
```
U_M > PlotCtrls > Numbering >
```

Отметить NODE ;

Установить Elem на "Element type num";

Установить [/NUM] на "Colors&numbers"

> OK



Для большей наглядности увеличим размер шрифта:

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

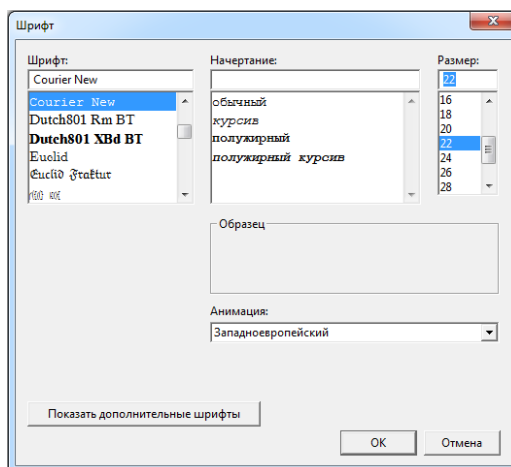
Установить «Размер» на «22»

> OK

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

Установить «Размер» на «22»

> OK

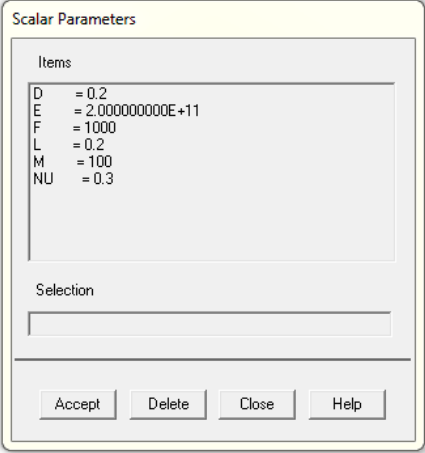


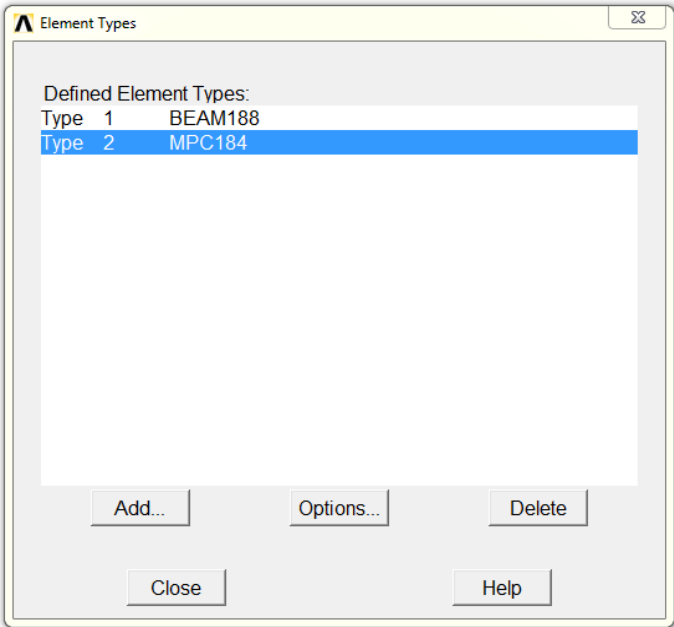
Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.

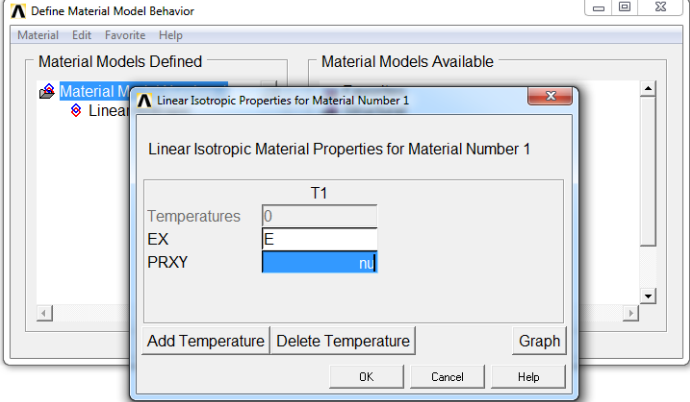
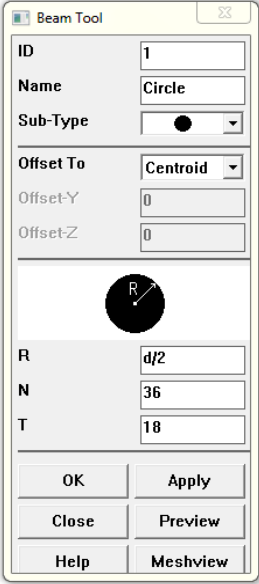
Решение задачи:

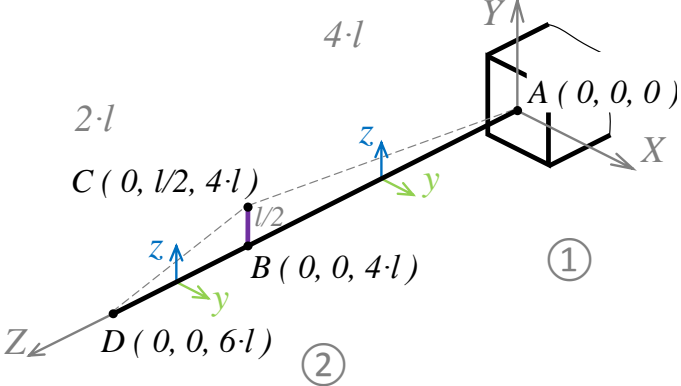


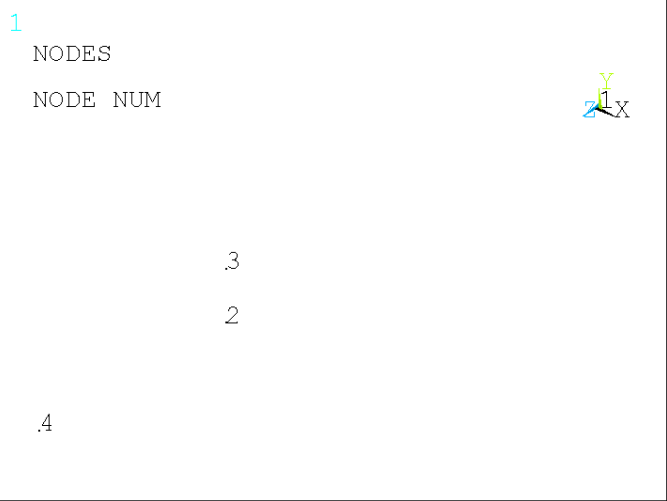
Размер  $d$  будем подбирать итерационно. В качестве первого приближения зададим ему, например, значение  $l$ .

Модуль упругости первого рода материала и коэффициент Пуассона в статически определимых задачах ни на эпюру ни на напряжения не влияют. Зададим их равными среднестатистическим свойствам стали:  $E=2 \cdot 10^{11}$  Па и  $\nu=0,3$ .

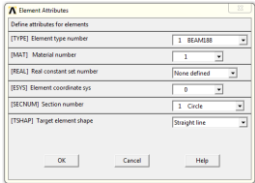
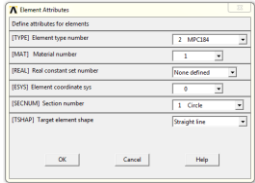
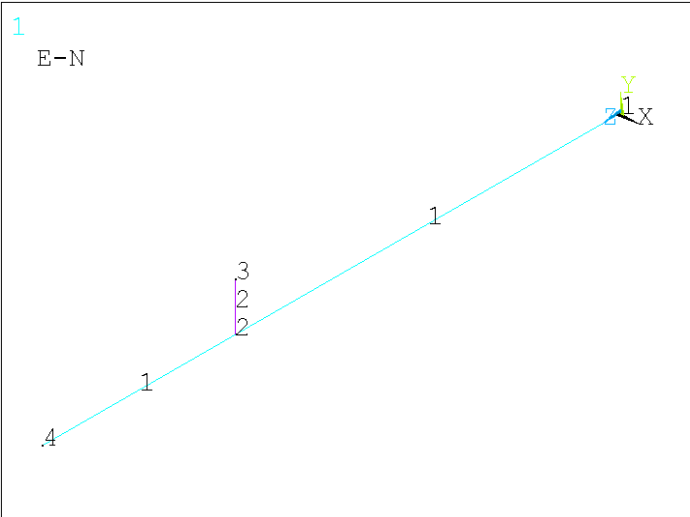
№	Действие	Результат
1	<p><i>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</i></p> <pre> U_M &gt; Parameters &gt; Scalar Parameters &gt; l=0.2    &gt; Accept &gt; F=1e3    &gt; Accept &gt; M=F*l/2  &gt; Accept &gt; d=1      &gt; Accept &gt; E=2e11   &gt; Accept &gt; nu=0.3   &gt; Accept &gt; &gt; Close</pre>	

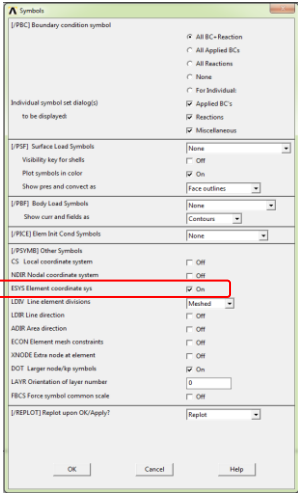
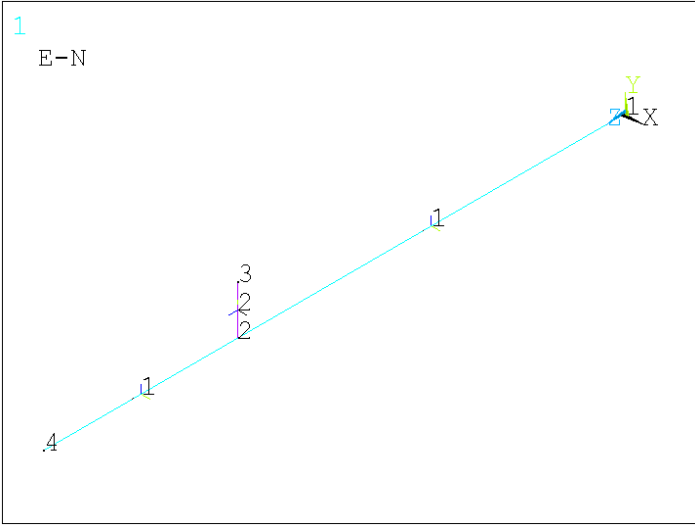
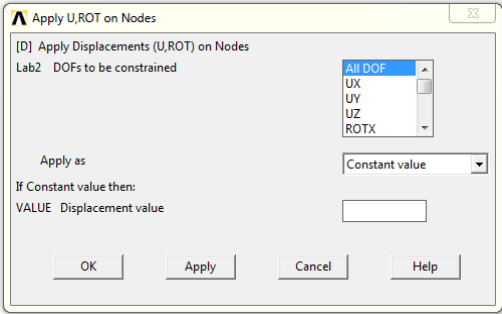
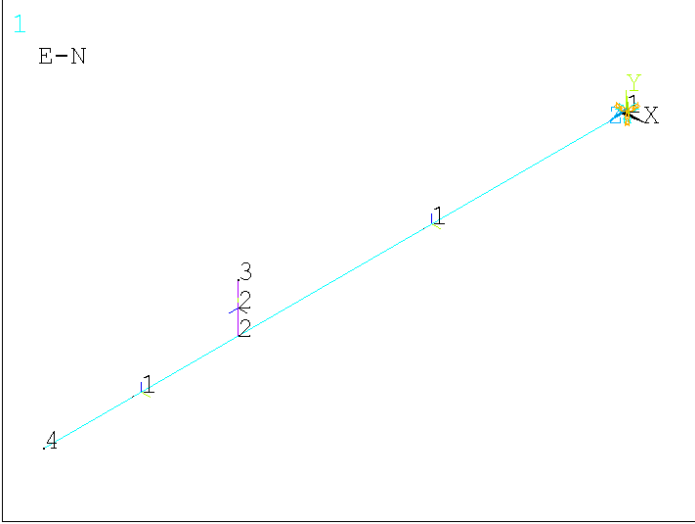
№	Действие	Результат
2	<p>Первая строка в таблице конечных элементов – трёхмерный балочный BEAM188, вторая строка – трёхмерный балочный абсолютно жёсткий BEAM188:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Element Type &gt; Add/Edit/Delete &gt; Add</p> <p>Element reference number пишем 1</p> <p>В левом окошке выбираем "Beam"</p> <p>В правом окошке "2 node 188"</p> <p>&gt; OK &gt;</p> <p>В окошке Element types отметить строчку "1 BEAM188"</p> <p>&gt; Options &gt;</p> <p>K3 установить "Quadratic Form"</p> <p>&gt; OK &gt;</p> <p>&gt; Add &gt;</p> <p>Element reference number пишем 2</p> <p>В левом окошке выбираем "Constraint"</p> <p>В правом окошке "Nonlinear MPC184"</p> <p>&gt; OK &gt;</p> <p>В окошке Element types отметить строчку "2 MPC184"</p> <p>&gt; Options &gt;</p> <p>K1 установить "Rigid Beam"</p> <p>&gt; OK &gt;</p> <p>K2 установить "Direct Elimination"</p> <p>&gt; OK &gt;</p> <p>&gt; Close</p>	 <p>The screenshot shows the 'Element Types' dialog box with a list of defined element types. Type 1 is BEAM188 and Type 2 is MPC184. The dialog has buttons for 'Add...', 'Options...', 'Delete', 'Close', and 'Help'.</p>

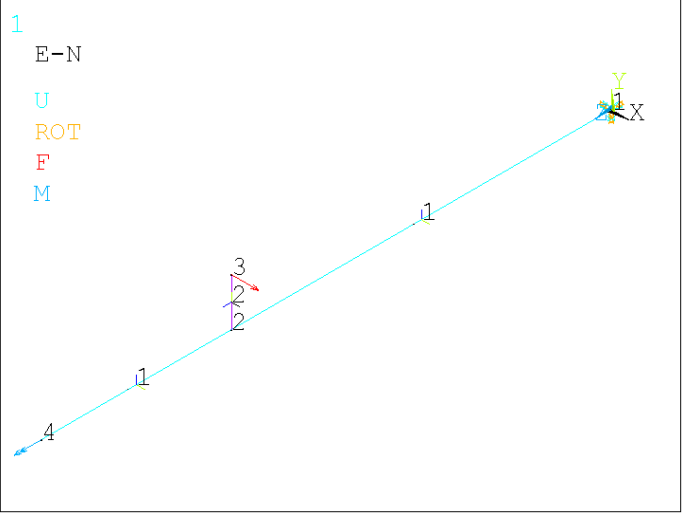
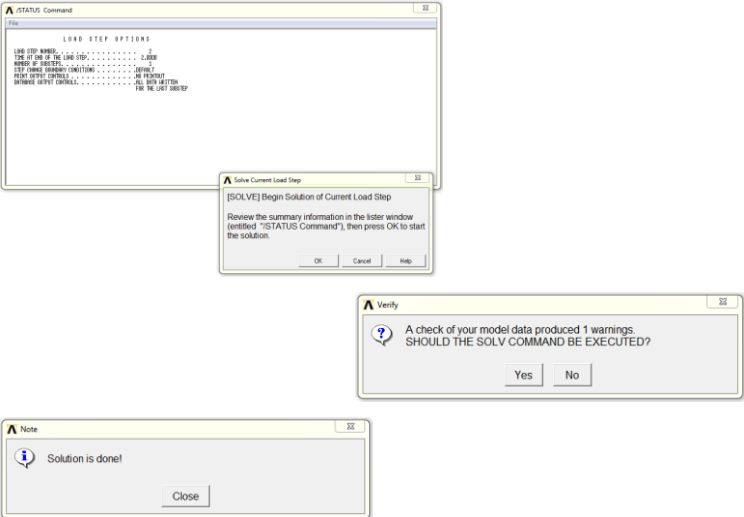
№	Действие	Результат
3	<p><i>Свойства материала стержня – модуль упругости и коэффициент Пуассона:</i></p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Material Props &gt; Material Models &gt; Structural &gt; Linear &gt; Elastic &gt; Isotropic &gt; EX пишем "E", PRXY пишем "nu" &gt; ОК</p> <p>Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p>	
<b>Поперечное сечение</b>		
4	<p><i>Круглое поперечное сечение диаметром d:</i></p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Sections &gt; Beam &gt; Common Sections ID пишем 1 NAME пишем, например, Circle Sub-Type установить изображение круга R пишем d/2 (это радиус круга) N пишем, например, 36 (секторов) T пишем, например, 18 (колец) &gt; ОК</p>	

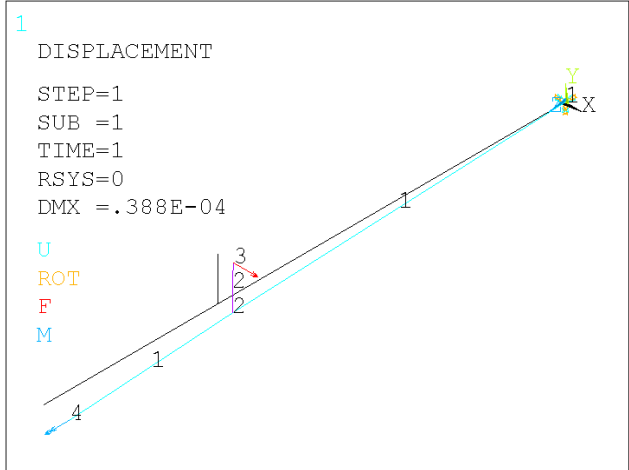
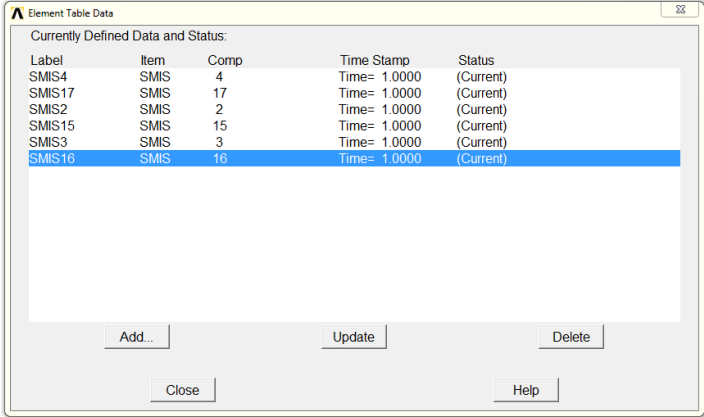
№	Действие	Результат
5	<p>Координаты узлов стержня и узлов фланца:</p> <p>Определяемся с положением точек относительно глобальной декартовой системы координат. Начало отсчёта поместим, например, в заделанный край стержня.</p>	
<b>Конечноэлементная модель</b>		
6	<p>Проставляем узлы модели <math>A \rightarrow 1</math>, <math>B \rightarrow 2</math>, <math>C \rightarrow 3</math> и <math>D \rightarrow 4</math>:</p> <p>M_M&gt; Preprocessor &gt; Modeling &gt; Create&gt; Nodes &gt; In Active CS &gt;  NPT пишем 1  X,Y,Z пишем 0,0,0 &gt; Apply &gt;  NPT пишем 2  X,Y,Z пишем 0,0,4·l &gt; Apply &gt;  NPT пишем 3  X,Y,Z пишем 0,l/2,4·l &gt; Apply &gt;  NPT пишем 4  X,Y,Z пишем 0,0,6·l &gt; ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть:  U_M &gt; Plot &gt; Multi-Plots</p> <p>Изометрия:  Автоформат: </p>	

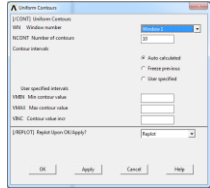
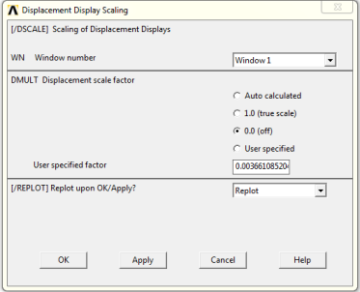
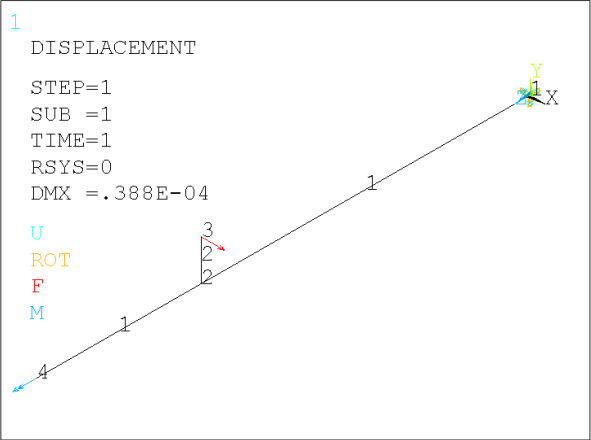
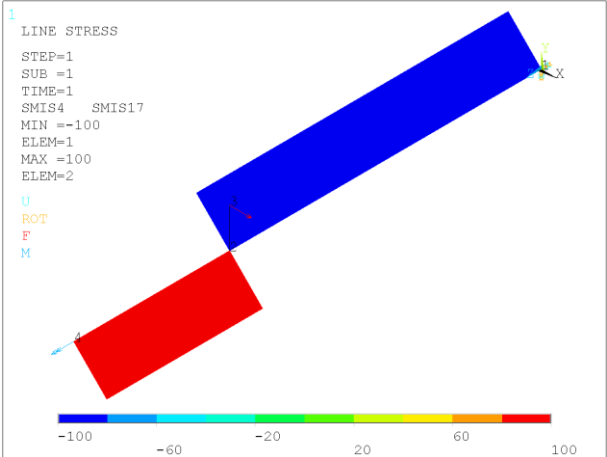


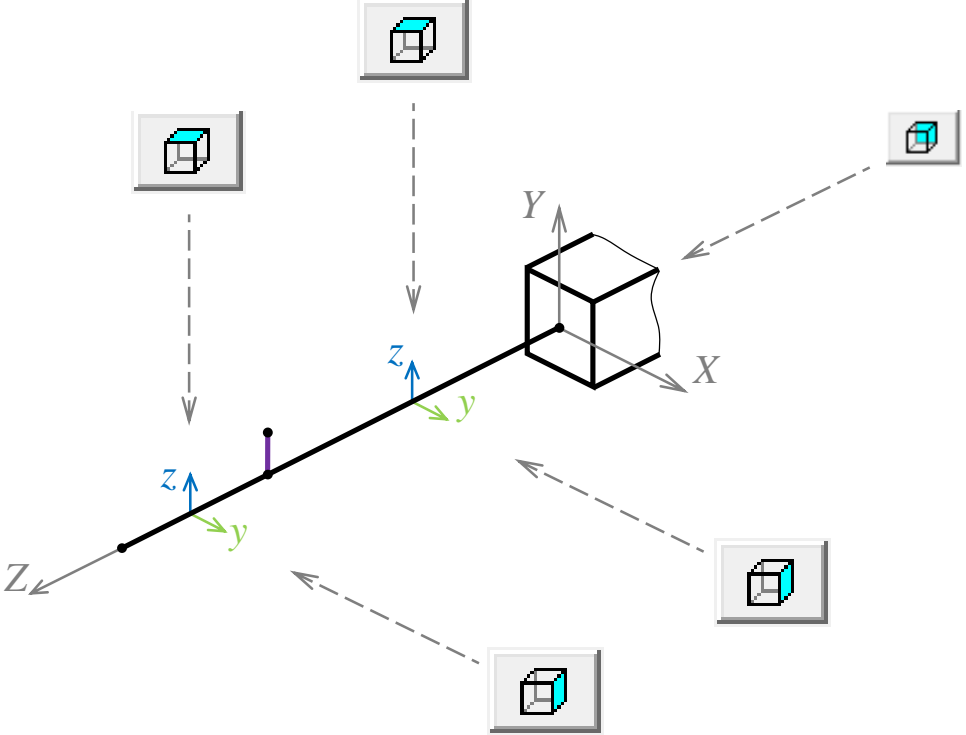
№	Действие	Результат
7	<p>Один участок – один конечный элемент. Протягиваем элементы по направлениям глобальных декартовых осей координат X, Y и Z:</p> <p>Устанавливаем свойства податливых элементов стержня:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Modeling &gt; Create &gt; Elements &gt;            &gt; Elem Attributes &gt;            [TYPE] установить "1 BEAM188"            [MAT ] установить "1"            [SECNUM] установить "1 Circle"            &gt; OK</p>  <p>Протягиваем элементы стержня:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Modeling &gt; Create &gt; Elements &gt;            &gt; Auto Numbered &gt; Thru Nodes &gt;            Левой кнопкой мыши последовательно кликаем на узлы            1, 2, 3 &gt; Apply &gt;            2, 4, 3 &gt; OK</p> <p>Устанавливаем свойства жёстких элементов фланца:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Modeling &gt; Create &gt; Elements &gt;            &gt; Elem Attributes &gt;            [TYPE] установить "2 MPC184"            &gt; OK</p>  <p>Протягиваем элемент фланца:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Modeling &gt; Create &gt; Elements &gt;            &gt; Auto Numbered &gt; Thru Nodes &gt;            Левой кнопкой мыши последовательно кликаем на узлы            2, 3 &gt; OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M &gt; Plot &gt; Multi-Plots</p>	



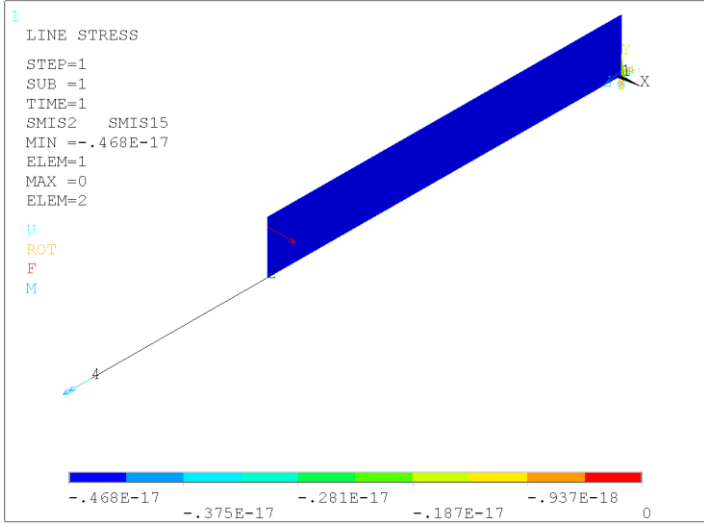


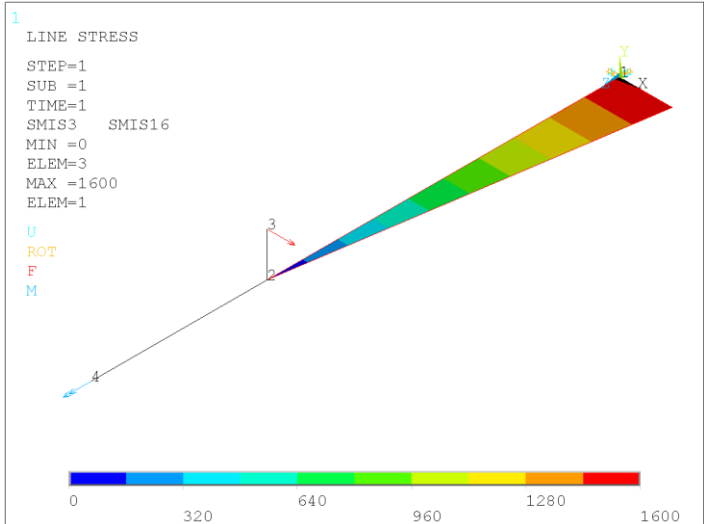
№	Действие	Результат
8	<p>Проверяем ориентацию поперечного сечения на стержнях рамы:</p> <p>Прорисовка осей систем координат балочных конечных элементов:</p> <p>U_M &gt; PlotCtrls &gt; Symbols &gt; ESYS ставим галочку On &gt; OK</p> <p>Смотрим только на голубые элементы стержня: оси z (синяя чёрточка) и y (зелёная чёрточка) расположены так, как нужно, в соответствии с <i>рис.1</i>.</p> 	
9	<p>Закрепления:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Loads &gt; Define Loads &gt; Apply &gt; Structural &gt; Displacement &gt; On Nodes &gt;левой кнопкой мыши нажать на узел 1 &gt; OK &gt;</p> <p>Lab2 установить "All DOF" &gt; OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть:</p> <p>U_M &gt; Plot &gt; Multi-Plots</p> 	

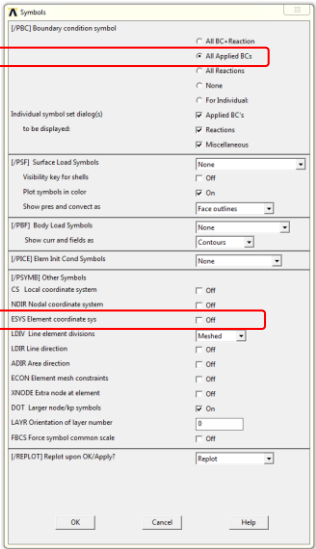
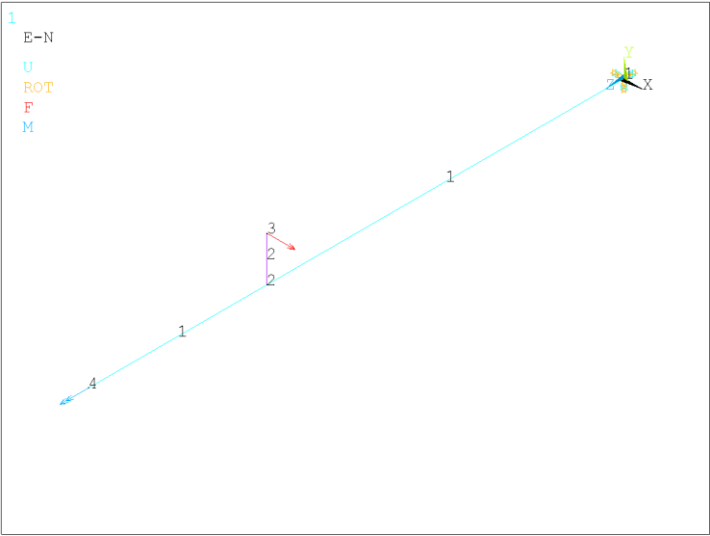
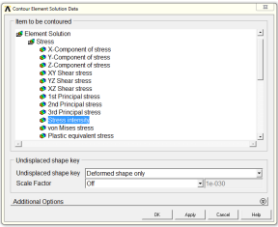
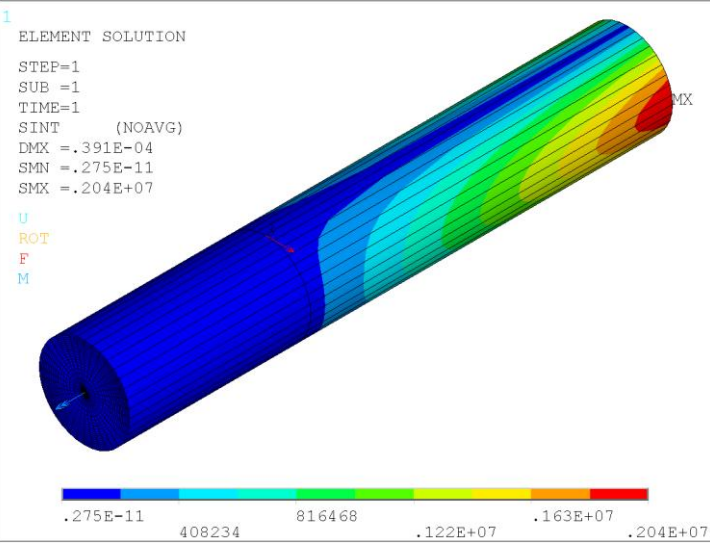
№	Действие	Результат
10	<p><i>Нагрузка:</i></p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Loads &gt; Define Loads &gt; Apply &gt; Structural &gt; Force/Moment &gt; On Keypoints &gt;</p> <p>Левой кнопкой мыши кликнуть на узел 3 &gt; OK &gt;</p> <p>Lab установить "FX" VALUE установить "2*F"</p> <p>&gt; Apply &gt;</p> <p>Левой кнопкой мыши кликнуть на узел 4 &gt; OK &gt;</p> <p>Lab установить "MZ" VALUE установить "M"</p> <p>&gt; OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M &gt; Plot &gt; Multi-Plots</p>	
<b>Расчёт</b>		
11	<p><i>Запускаем расчёт:</i></p> <p>M_M &gt; Solution &gt; Solve &gt; Current LS</p> <p>Синхронно появляются два окна: белое информационное и серое исполнительное.</p> <p>Белое закрываем, на сером нажимаем ОК.</p> <p>Если появляется окно предупреждения Verify. На нём нажимаем YES.</p> <p>Расчёт пошёл.</p> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Закройте это окно. Расчёт окончен.</p>	

№	Действие	Результат
<b>Просмотр результатов</b>		
<b>12</b>	<p><i>Форма упругой оси нагруженной рамы:</i></p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Plot Results &gt; Deformed Shape &gt; KUND установить Def + undeformed &gt; OK</p> <p>Некоторые символы пропадают. Восстановим их:</p> <p>U_M &gt; PlotCtrls &gt; Symbols &gt; Boundary condition устанавливаем "All Applied BCs" &gt; OK</p> <p>Форма стержня до нагружения (недеформированная) изображена сеткой чёрным цветом, форма после нагружения (деформированная) изображена цветными осями балочных конечных элементов.</p>	
<b>13</b>	<p><i>Расчёт эпюр внутренних моментов:</i></p> <p><b>Внутренний крутящий момент <math>M_{кр}</math>:</b></p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Element Table &gt; Define Table &gt; Add &gt; "By sequence num", "SMISC,", "4" &gt; Apply &gt; "By sequence num", "SMISC,", "17" &gt; OK</p> <p><b>Внутренний изгибающий момент <math>M_y</math>:</b></p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Element Table &gt; Define Table &gt; Add &gt; "By sequence num", "SMISC,", "2" &gt; Apply &gt; "By sequence num", "SMISC,", "15" &gt; Apply &gt;</p> <p><b>Внутренний изгибающий момент <math>M_z</math>:</b></p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Element Table &gt; Define Table &gt; Add &gt; "By sequence num", "SMISC,", "3" &gt; Apply &gt; "By sequence num", "SMISC,", "16" &gt; OK &gt;</p> <p>&gt; Close</p>	

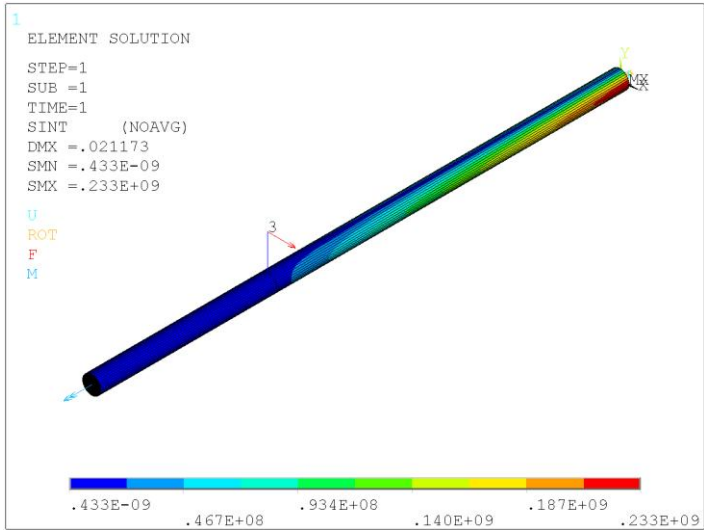
№	Действие	Результат
14	<p>Цветовая шкала будет состоять из десяти цветов:</p> <p>U_M &gt; PlotCtrls &gt; Style &gt; Contours &gt;            &gt; Uniform Contours &gt;            NCONT пишем 10            &gt; ОК</p>	
15	<p>Эпюры будем смотреть на недеформированной форме:</p> <p>U_M &gt; PlotCtrls &gt; Style &gt; Displacement Scaling &gt;            DMULT устанавливаем "0.0 (off)"            &gt; ОК</p>	 
16	<p>Эпюра внутреннего крутящего момента <i>Мкр</i>:</p> <p>Прорисовка эпюры <i>Мкр</i>:</p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Plot Results &gt; Contour Plot &gt;            &gt; Line Elem Res &gt;            LabI установить "SMIS4"            LabJ установить "SMIS17"            &gt; ОК</p> <p>Знаки и модули крутящих моментов на всех трёх стержнях совпадают с результатом аналитического расчёта (рис. 1.). Расположение частей эпюры необычно – отрицательная часть направлена вверх, положительная – вниз.</p>	

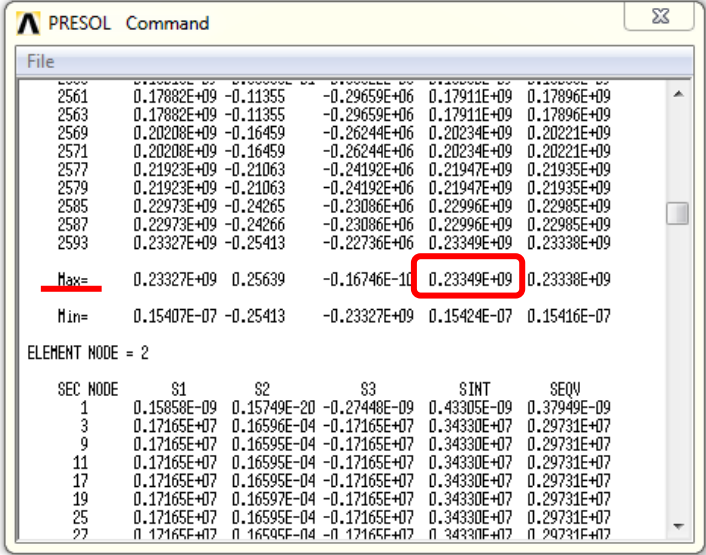
№	Действие	Результат
17	<p>К сожалению, эпюры изгибающих моментов ANSYS показывает не в плоскости действия момента, а в плоскости, перпендикулярной взгляду наблюдателя.</p> <p>Для того, чтобы корректно просматривать эпюру внутреннего изгибающего элемента, нужно на сам элемент смотреть с острия оси изгиба. Определимся с ракурсами просмотра эпюр:</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Рис.3.</i></p>

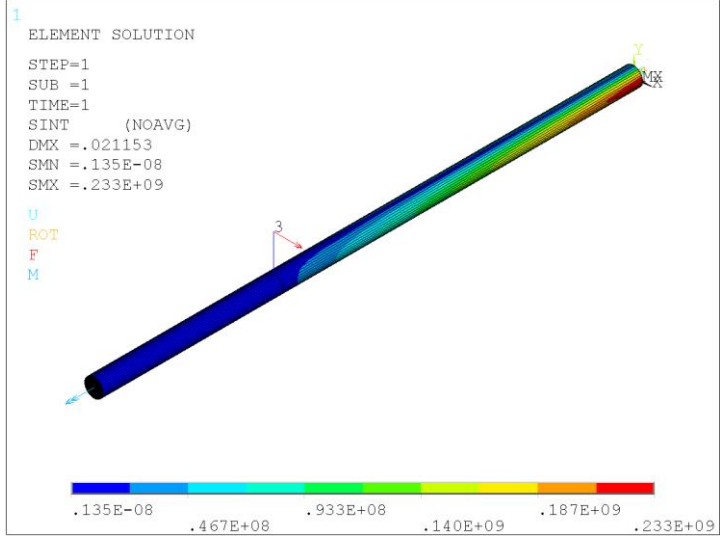
№	Действие	Результат
18	<p>Эпюра внутреннего изгибающего момента <math>M_y</math>:</p> <p>Вид справа: </p> <p>Прорисовка эпюры <math>M_y</math>:</p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Plot Results &gt; Contour Plot &gt; &gt; Line Elem Res &gt; LabI установить "SMIS2" LabJ установить "SMIS15" &gt; ОК</p> <p>Изометрия: </p> <p>Кажется, что эпюра имеет вид прямоугольника. На самом деле, взгляните в цветовую шкалу, значения на эпюре практически нулевые, ошибки округлений, не более того. Эпюра <math>M_y</math> и должна быть нулевой, на <i>рис. 1</i>. она даже не показана.</p>	 <pre> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS2 SMIS15 MIN =-.468E-17 ELEM=1 MAX =0 ELEM=2 U ROT F M </pre>
19	<p>Эпюра внутреннего изгибающего момента <math>M_z</math>:</p> <p>Вид сверху: </p> <p>Прорисовка эпюры <math>M_z</math>:</p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Plot Results &gt; Contour Plot &gt; &gt; Line Elem Res &gt; LabI установить "SMIS3" LabJ установить "SMIS16" &gt; ОК</p> <p>Изометрия: </p> <p>Результат полностью совпадает с аналитической эпюрой на <i>рис. 1</i>.</p>	 <pre> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS3 SMIS16 MIN =0 ELEM=3 MAX =1600 ELEM=1 U ROT F M </pre>

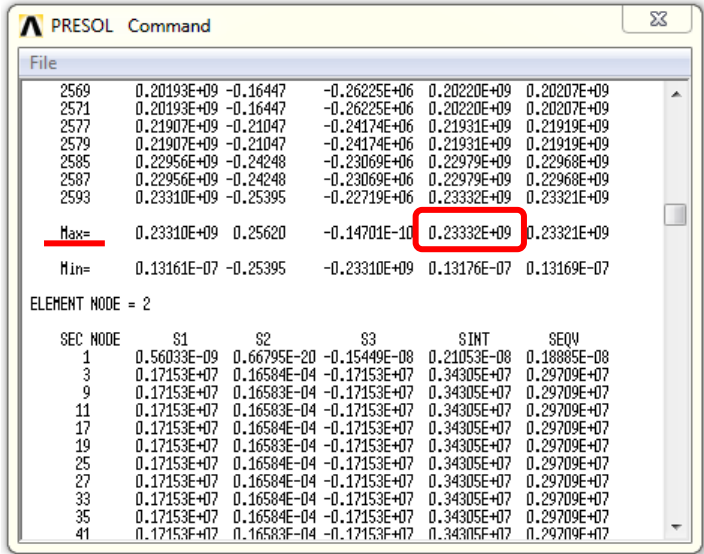
№	Действие	Результат
20	<p>Отмена прорисовки осей систем координат элементов:</p> <p>Прорисовываем элементы: U_M &gt; Plot &gt; Elements</p> <p>Отмена прорисовки осей: U_M &gt; PlotCtrls &gt; Symbols &gt; [/PBC] устанавливаем на All Applied BCs ESYS убираем галочку Off &gt; OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M &gt; Plot &gt; Multi-Plots</p> 	
21	<p>Эквивалентные напряжения (теория максимального касательного напряжения Треска – Сен-Венана):</p> <p>Прорисовываем элементы полноразмерно: U_M &gt; PlotCtrls &gt; Style &gt; Size and Shape &gt; [/ESHAPE] установить галочку "On" &gt; OK</p> <p>Эквивалентные напряжения: M_M &gt; General Postproc &gt; Plot Results &gt; &gt; Contour Plot &gt; Element Solu &gt; &gt; Element Solution &gt; Stress &gt; Stress intensity &gt; OK</p> <p>Видим: при <math>d=l=0,2</math> м напряжение <math>\sigma_{ЭКВ}^{max} = 2,04</math> МПа .</p> 	

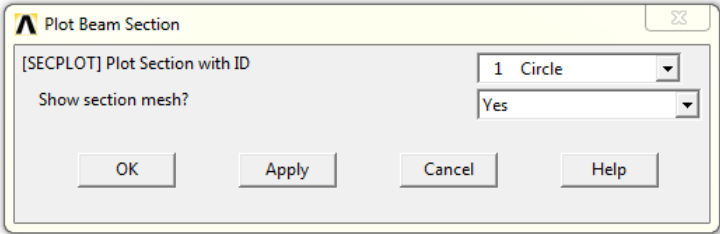
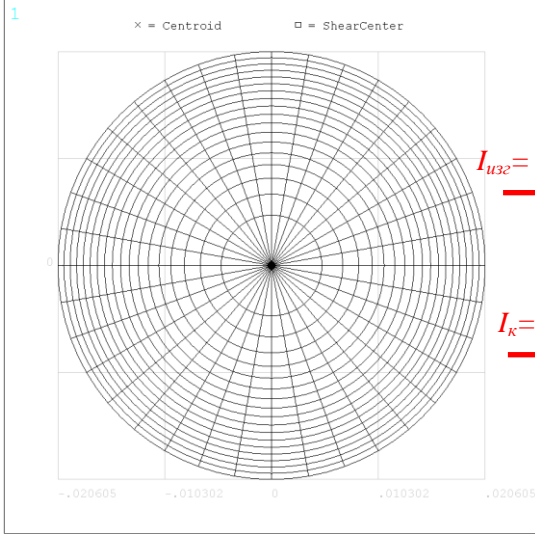




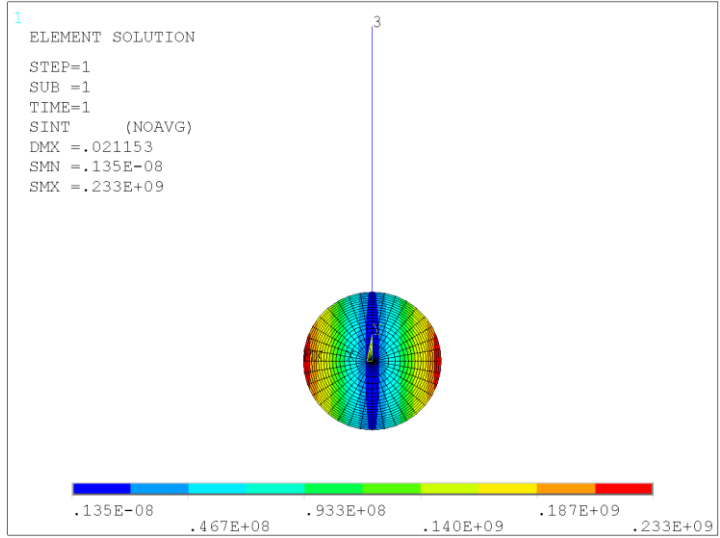
№	Действие	Результат
22	<p>Первая итерация (подбираем значение <math>d</math>):</p> <p>Во сколько раз полученное максимальное напряжение меньше желаемого?</p> $\Delta = \frac{\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}}{[\sigma]} = \frac{2,04 \cdot 10^6}{233,3 \cdot 10^6} = 87,44 \cdot 10^{-4} .$ <p>Новое значение <math>d</math>:</p> $d_{\text{новое}} = d_{\text{старое}} \cdot \sqrt[3]{\Delta} = 0,2 \cdot \sqrt[3]{87,44 \cdot 10^{-4}} = 0,2 \cdot 0,206 = 0,04120 \text{ м} .$ <p>Меняем значение параметра <math>d</math>:</p> <p>U_M &gt; Parameters &gt; Scalar Parameters &gt;  d=0.0412 &gt; Accept &gt;  &gt; Close</p> <p>Новый размер сечения в соответствии с новым <math>d</math>:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Sections &gt; Beam &gt; Common Sections  R пишем <math>d/2</math>  &gt; ОК</p> <p>Запускаем расчёт:</p> <p>M_M &gt; Solution &gt; Solve &gt; Current LS &gt; ОК &gt; YES &gt; Close</p> <p>Эквивалентные напряжения:</p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Plot Results &gt; Contour Plot &gt; Element Solu &gt;  &gt; Element Solution &gt; Stress &gt; Stress intensity  &gt; ОК</p> <p>Видим: при <math>d=l=0,0412</math> м, максимальное значение эквивалентного напряжения на цветовой шкале отображено до трёх значащих цифр <math>\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}} = 233 \cdot 10^6 \text{ Па}</math>. Трёх значащих цифр нам мало. Нужный результат 233,3 задан четырьмя.</p>	<p>Результат</p> 

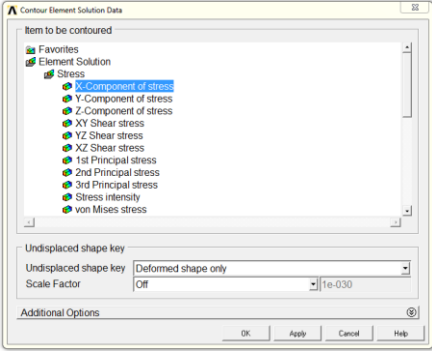
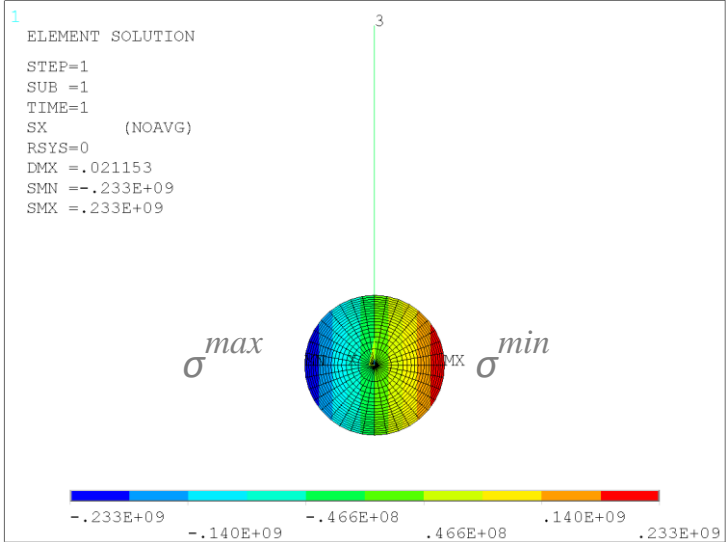
№	Действие	Результат																																																																																																																														
23	<p>Уточнение значения максимального эквивалентного напряжения:</p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; List Results &gt; Element Solution &gt; &gt; Element Solution &gt; Stress&gt; Stress intensity &gt; &gt; OK</p> <p>Среди напряжений в поперечном сечении первого конечного элемента в узле №1 (ELEMENT =1 ELEMENT NODE = 1) видим значение максимального эквивалентного напряжения с точностью до пяти значащих цифр. Округляем до четырёх – с такой точностью мы ведём расчёт в курсе «Сопротивление материалов»:</p> $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}} = 233,5 \cdot 10^6 \text{ Па.}$	 <p>The screenshot shows the following data in the PRE SOL Command window:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>S1</th> <th>S2</th> <th>S3</th> <th>SINT</th> <th>SEQV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2561</td> <td>0.17882E+09</td> <td>-0.11355</td> <td>-0.29659E+06</td> <td>0.17911E+09</td> <td>0.17896E+09</td> </tr> <tr> <td>2563</td> <td>0.17882E+09</td> <td>-0.11355</td> <td>-0.29659E+06</td> <td>0.17911E+09</td> <td>0.17896E+09</td> </tr> <tr> <td>2569</td> <td>0.20208E+09</td> <td>-0.16459</td> <td>-0.26244E+06</td> <td>0.20234E+09</td> <td>0.20221E+09</td> </tr> <tr> <td>2571</td> <td>0.20208E+09</td> <td>-0.16459</td> <td>-0.26244E+06</td> <td>0.20234E+09</td> <td>0.20221E+09</td> </tr> <tr> <td>2577</td> <td>0.21923E+09</td> <td>-0.21063</td> <td>-0.24192E+06</td> <td>0.21947E+09</td> <td>0.21935E+09</td> </tr> <tr> <td>2579</td> <td>0.21923E+09</td> <td>-0.21063</td> <td>-0.24192E+06</td> <td>0.21947E+09</td> <td>0.21935E+09</td> </tr> <tr> <td>2585</td> <td>0.22973E+09</td> <td>-0.24266</td> <td>-0.23086E+06</td> <td>0.22996E+09</td> <td>0.22985E+09</td> </tr> <tr> <td>2587</td> <td>0.22973E+09</td> <td>-0.24266</td> <td>-0.23086E+06</td> <td>0.22996E+09</td> <td>0.22985E+09</td> </tr> <tr> <td>2593</td> <td>0.23327E+09</td> <td>-0.25413</td> <td>-0.22736E+06</td> <td>0.23349E+09</td> <td>0.23338E+09</td> </tr> <tr> <td>Max=</td> <td>0.23327E+09</td> <td>0.25639</td> <td>-0.16746E+06</td> <td>0.23349E+09</td> <td>0.23338E+09</td> </tr> <tr> <td>Min=</td> <td>0.15407E-07</td> <td>-0.25413</td> <td>-0.23327E+09</td> <td>0.15424E-07</td> <td>0.15416E-07</td> </tr> </tbody> </table> <p>ELEMENT NODE = 2</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SEC NODE</th> <th>S1</th> <th>S2</th> <th>S3</th> <th>SINT</th> <th>SEQV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.15858E-09</td> <td>0.15749E-20</td> <td>-0.27448E-09</td> <td>0.43305E-09</td> <td>0.37949E-09</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.17165E+07</td> <td>0.16596E-04</td> <td>-0.17165E+07</td> <td>0.34330E+07</td> <td>0.29731E+07</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>0.17165E+07</td> <td>0.16595E-04</td> <td>-0.17165E+07</td> <td>0.34330E+07</td> <td>0.29731E+07</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>0.17165E+07</td> <td>0.16595E-04</td> <td>-0.17165E+07</td> <td>0.34330E+07</td> <td>0.29731E+07</td> </tr> <tr> <td>17</td> <td>0.17165E+07</td> <td>0.16595E-04</td> <td>-0.17165E+07</td> <td>0.34330E+07</td> <td>0.29731E+07</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td>0.17165E+07</td> <td>0.16597E-04</td> <td>-0.17165E+07</td> <td>0.34330E+07</td> <td>0.29731E+07</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>0.17165E+07</td> <td>0.16595E-04</td> <td>-0.17165E+07</td> <td>0.34330E+07</td> <td>0.29731E+07</td> </tr> <tr> <td>27</td> <td>0.17165E+07</td> <td>0.16595E-04</td> <td>-0.17165E+07</td> <td>0.34330E+07</td> <td>0.29731E+07</td> </tr> </tbody> </table>	Element	S1	S2	S3	SINT	SEQV	2561	0.17882E+09	-0.11355	-0.29659E+06	0.17911E+09	0.17896E+09	2563	0.17882E+09	-0.11355	-0.29659E+06	0.17911E+09	0.17896E+09	2569	0.20208E+09	-0.16459	-0.26244E+06	0.20234E+09	0.20221E+09	2571	0.20208E+09	-0.16459	-0.26244E+06	0.20234E+09	0.20221E+09	2577	0.21923E+09	-0.21063	-0.24192E+06	0.21947E+09	0.21935E+09	2579	0.21923E+09	-0.21063	-0.24192E+06	0.21947E+09	0.21935E+09	2585	0.22973E+09	-0.24266	-0.23086E+06	0.22996E+09	0.22985E+09	2587	0.22973E+09	-0.24266	-0.23086E+06	0.22996E+09	0.22985E+09	2593	0.23327E+09	-0.25413	-0.22736E+06	0.23349E+09	0.23338E+09	Max=	0.23327E+09	0.25639	-0.16746E+06	0.23349E+09	0.23338E+09	Min=	0.15407E-07	-0.25413	-0.23327E+09	0.15424E-07	0.15416E-07	SEC NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV	1	0.15858E-09	0.15749E-20	-0.27448E-09	0.43305E-09	0.37949E-09	3	0.17165E+07	0.16596E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07	9	0.17165E+07	0.16595E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07	11	0.17165E+07	0.16595E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07	17	0.17165E+07	0.16595E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07	19	0.17165E+07	0.16597E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07	25	0.17165E+07	0.16595E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07	27	0.17165E+07	0.16595E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07
Element	S1	S2	S3	SINT	SEQV																																																																																																																											
2561	0.17882E+09	-0.11355	-0.29659E+06	0.17911E+09	0.17896E+09																																																																																																																											
2563	0.17882E+09	-0.11355	-0.29659E+06	0.17911E+09	0.17896E+09																																																																																																																											
2569	0.20208E+09	-0.16459	-0.26244E+06	0.20234E+09	0.20221E+09																																																																																																																											
2571	0.20208E+09	-0.16459	-0.26244E+06	0.20234E+09	0.20221E+09																																																																																																																											
2577	0.21923E+09	-0.21063	-0.24192E+06	0.21947E+09	0.21935E+09																																																																																																																											
2579	0.21923E+09	-0.21063	-0.24192E+06	0.21947E+09	0.21935E+09																																																																																																																											
2585	0.22973E+09	-0.24266	-0.23086E+06	0.22996E+09	0.22985E+09																																																																																																																											
2587	0.22973E+09	-0.24266	-0.23086E+06	0.22996E+09	0.22985E+09																																																																																																																											
2593	0.23327E+09	-0.25413	-0.22736E+06	0.23349E+09	0.23338E+09																																																																																																																											
Max=	0.23327E+09	0.25639	-0.16746E+06	0.23349E+09	0.23338E+09																																																																																																																											
Min=	0.15407E-07	-0.25413	-0.23327E+09	0.15424E-07	0.15416E-07																																																																																																																											
SEC NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV																																																																																																																											
1	0.15858E-09	0.15749E-20	-0.27448E-09	0.43305E-09	0.37949E-09																																																																																																																											
3	0.17165E+07	0.16596E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07																																																																																																																											
9	0.17165E+07	0.16595E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07																																																																																																																											
11	0.17165E+07	0.16595E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07																																																																																																																											
17	0.17165E+07	0.16595E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07																																																																																																																											
19	0.17165E+07	0.16597E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07																																																																																																																											
25	0.17165E+07	0.16595E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07																																																																																																																											
27	0.17165E+07	0.16595E-04	-0.17165E+07	0.34330E+07	0.29731E+07																																																																																																																											

№	Действие	Результат
24	<p>Вторая итерация (подбираем значение <math>d</math>):</p> $\Delta = \frac{\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}}}{[\sigma]} = \frac{233,5 \cdot 10^6}{233,3 \cdot 10^6} = 1,001;$ $d_{\text{новое}} = d_{\text{старое}} \cdot \sqrt[3]{\Delta} = 0,0412 \cdot \sqrt[3]{1,001} = 0,04121 \text{ м.}$ <p>Меняем значение параметра <math>d</math>:</p> <p>U_M &gt; Parameters &gt; Scalar Parameters &gt;  d=0.04121 &gt; Accept  &gt; Close</p> <p>Новый размер сечения в соответствии с новым <math>d</math>:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Sections &gt; Beam &gt; Common Sections  R пишем <math>d/2</math>  &gt; OK</p> <p>Запускаем расчёт:</p> <p>M_M &gt; Solution &gt; Solve &gt; Current LS &gt; OK &gt; YES &gt; Close</p> <p>Эквивалентные напряжения:</p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Plot Results &gt; Contour Plot &gt;  &gt; Element Solu &gt; Element Solution &gt; Stress &gt; Stress intensity  &gt; OK</p>	 <p>1  ELEMENT SOLUTION  STEP=1  SUB =1  TIME=1  SINT (NOAVG)  DMX =.021153  SMN =.135E-08  SMX =.233E+09</p> <p>U  ROT  F  M</p> <p>.135E-08 .467E+08 .933E+08 .140E+09 .187E+09 .233E+09</p>

№	Действие	Результат																																																																																				
25	<p>Уточнение значения максимального эквивалентного напряжения:</p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; List Results &gt; Element Solution &gt; &gt; Element Solution &gt; Stress&gt; Stress intensity &gt; &gt; ОК</p> <p>Среди напряжений в поперечном сечении первого конечного элемента в узле №1 (ELEMENT =1 ELEMENT NODE = 1) видим значение максимального эквивалентного напряжения с точностью до пяти значащих цифр. Округляем до четырёх:</p> $\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}} = 233,3 \cdot 10^6 \text{ Па.}$ <p>Поскольку желаемый результат достигнут (<math>\sigma_{\text{экв}}^{\text{max}} = [\sigma]</math>) уточнять значение параметра d далее не будем, принимаем</p> $d=0,04121 \text{ м}$ <p>что в точности совпадает с результатом аналитического расчёта (рис.1.).</p> <p>Следует обратить внимание на то, что реализуется максимальное эквивалентное напряжение в узле №1 модели – в прикорневом поперечном сечении стержня. Это также соответствует результату аналитического расчёта (сечение IV-IV, рис.1., рис.2.).</p>	 <p>The screenshot shows the following data for Element Node = 2:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SEC</th> <th>NODE</th> <th>S1</th> <th>S2</th> <th>S3</th> <th>SINT</th> <th>SEQV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0.56033E-09</td><td>0.66795E-20</td><td>-0.15449E-08</td><td>0.21053E-08</td><td>0.18885E-08</td></tr> <tr><td>3</td><td>1</td><td>0.17153E+07</td><td>0.16584E-04</td><td>-0.17153E+07</td><td>0.34305E+07</td><td>0.29709E+07</td></tr> <tr><td>9</td><td>1</td><td>0.17153E+07</td><td>0.16583E-04</td><td>-0.17153E+07</td><td>0.34305E+07</td><td>0.29709E+07</td></tr> <tr><td>11</td><td>1</td><td>0.17153E+07</td><td>0.16583E-04</td><td>-0.17153E+07</td><td>0.34305E+07</td><td>0.29709E+07</td></tr> <tr><td>17</td><td>1</td><td>0.17153E+07</td><td>0.16584E-04</td><td>-0.17153E+07</td><td>0.34305E+07</td><td>0.29709E+07</td></tr> <tr><td>19</td><td>1</td><td>0.17153E+07</td><td>0.16583E-04</td><td>-0.17153E+07</td><td>0.34305E+07</td><td>0.29709E+07</td></tr> <tr><td>25</td><td>1</td><td>0.17153E+07</td><td>0.16584E-04</td><td>-0.17153E+07</td><td>0.34305E+07</td><td>0.29709E+07</td></tr> <tr><td>27</td><td>1</td><td>0.17153E+07</td><td>0.16584E-04</td><td>-0.17153E+07</td><td>0.34305E+07</td><td>0.29709E+07</td></tr> <tr><td>33</td><td>1</td><td>0.17153E+07</td><td>0.16584E-04</td><td>-0.17153E+07</td><td>0.34305E+07</td><td>0.29709E+07</td></tr> <tr><td>35</td><td>1</td><td>0.17153E+07</td><td>0.16584E-04</td><td>-0.17153E+07</td><td>0.34305E+07</td><td>0.29709E+07</td></tr> <tr><td>41</td><td>1</td><td>0.17153E+07</td><td>0.16583E-04</td><td>-0.17153E+07</td><td>0.34305E+07</td><td>0.29709E+07</td></tr> </tbody> </table> <p>Summary values from the screenshot:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Max = 0.23332E+09</li> <li>Min = 0.13161E-07</li> </ul>	SEC	NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV	1	1	0.56033E-09	0.66795E-20	-0.15449E-08	0.21053E-08	0.18885E-08	3	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07	9	1	0.17153E+07	0.16583E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07	11	1	0.17153E+07	0.16583E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07	17	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07	19	1	0.17153E+07	0.16583E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07	25	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07	27	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07	33	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07	35	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07	41	1	0.17153E+07	0.16583E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07
SEC	NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV																																																																																
1	1	0.56033E-09	0.66795E-20	-0.15449E-08	0.21053E-08	0.18885E-08																																																																																
3	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07																																																																																
9	1	0.17153E+07	0.16583E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07																																																																																
11	1	0.17153E+07	0.16583E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07																																																																																
17	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07																																																																																
19	1	0.17153E+07	0.16583E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07																																																																																
25	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07																																																																																
27	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07																																																																																
33	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07																																																																																
35	1	0.17153E+07	0.16584E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07																																																																																
41	1	0.17153E+07	0.16583E-04	-0.17153E+07	0.34305E+07	0.29709E+07																																																																																

№	Действие	Результат
26	<p>Геометрические характеристики круглого профиля при найденном значении диаметра <math>d</math>:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Sections &gt; Beam &gt; Plot Section            [Secplot] установить "1 Circle"            Show section mesh? установить "Yes"            &gt; OK</p>  <p>Видим:</p> $I_y = 14,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4 ;$ $I_k = 28,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4 ;$ <p>Эти численные значения с точностью до трёх значащих цифр практически не отличаются от своих аналитических аналогов (рис. 2.).</p>	 <pre>SECTION ID 1 DATA SUMMARY Section Name = Circle Area = .001334 Iyy = .142E-06 Izz = .142E-06 Iyz = 0 Warping Constant = 0 Torsion Constant = .283E-06 Centroid Y = .128E-17 Centroid Z = .347E-19 Shear Center Y = .309E-18 Shear Center Z = -.255E-18</pre> <p><math>I_{Iyz} =</math></p> <p><math>I_k =</math></p>

№	Действие	Результат
27	<p>Сечение IV-IV, эквивалентные напряжения <math>\sigma_{\text{ЭКВ}}</math>:</p> <p>Прорисовываем элементы:  U_M &gt; Plot &gt; Elements</p> <p>Вид сзади:  (рис.3.) Автоформат: </p> <p>Эквивалентные напряжения:</p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Plot Results &gt;  &gt; Contour Plot &gt; Element Solu&gt;  &gt; Element Solution&gt; Stress&gt; Stress intensity  &gt; ОК</p> <p>Видим, что максимальные значения эквивалентного напряжения реализуются в точках 1 и 2 поперечного сечения (рис. 2.), так же, как и при аналитическом расчёте.</p> <p><math>\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}} = 233,3 \cdot 10^6 \text{ Па} = [\sigma]</math>.</p>	 <pre data-bbox="1391 344 1579 539"> 1 ELEMENT SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 SINT (NOAVG) DMX =.021153 SMN =.135E-08 SMX =.233E+09 </pre>

№	Действие	Результат
28	<p>Сечение IV-IV, осевые нормальные напряжения <math>\sigma</math>:</p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Plot Results &gt; Contour Plot &gt;            &gt; Element Solu &gt; Element Solution &gt; Stress &gt;            &gt; X-Component of stress            &gt; OK</p>  <p>Равенство цветных полос по высоте (можете померить линейкой прямо на экране) говорит о линейном изменении осевых напряжений по высоте сечения. То же самое показывает <i>рис.2</i>.</p> <p>Минимальное MN и максимальное MX напряжения – экстремальные значения суммы осевых напряжений от изгиба и растяжения (или сжатия). Стержень не растягивается и не сжимается, значит перед нами – изгибные напряжения в чистом виде:</p> $\sigma^{min} = MN = -233 \cdot 10^6 \text{ Па} ;$ $\sigma^{max} = MX = 233 \cdot 10^6 \text{ Па} .$ <p>С точностью до трёх значащих цифр, изгибные напряжения практически такие же, как в аналитическом расчёте (<i>рис.2</i>).</p>	<p>На сечение смотрим против оси x элемента («сзади»), поэтому видим инверсные цвета.</p>  <p>ELEMENT SOLUTION  STEP=1  SUB =1  TIME=1  SX (NOAVG)  RSYS=0  DMX =.021153  SMN =-.233E+09  SMX =.233E+09</p> <p><math>\sigma^{max}</math> <math>\sigma^{min}</math></p> <p>-.233E+09 -.140E+09 -.466E+08 .466E+08 .140E+09 .233E+09</p>

Сечение IV-IV, касательные напряжения от кручения  $\tau$ :

К сожалению, посмотреть целиком цветовую диаграмму касательных напряжений от кручения в сечении элемента BEAM188 невозможно, только диаграммы проекций векторов этих касательных напряжений на ось  $y$  и ось  $z$  элемента (рис.2.) соответственно.

Прорисуем эти проекции и сравним значения напряжений в тех точках, где проекция вектора касательного напряжения на соответствующую ось составляет 100% от его длины.

Проекция векторов касательных напряжений на ось  $y$  элемента:

M\_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot >  
> Element Solu > Element Solution > Stress > XY Shear stress  
> ОК

Полностью параллельны оси  $y$  вектора напряжений в верхней и нижней точках сечения (рис.2.).

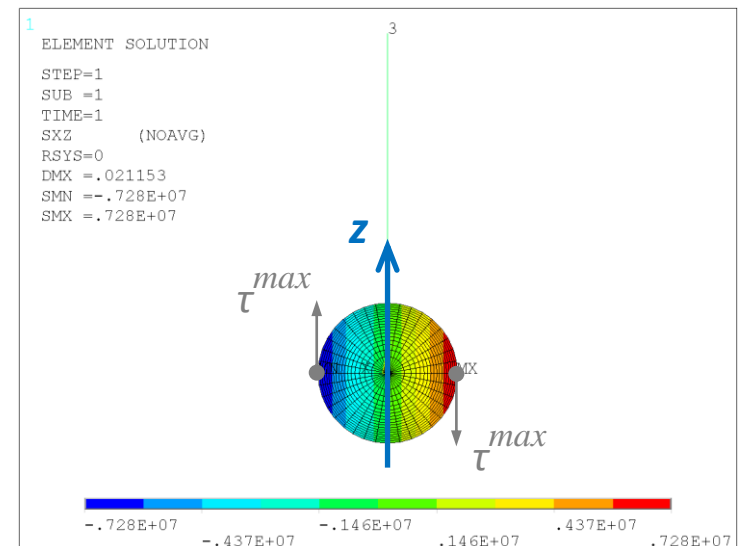
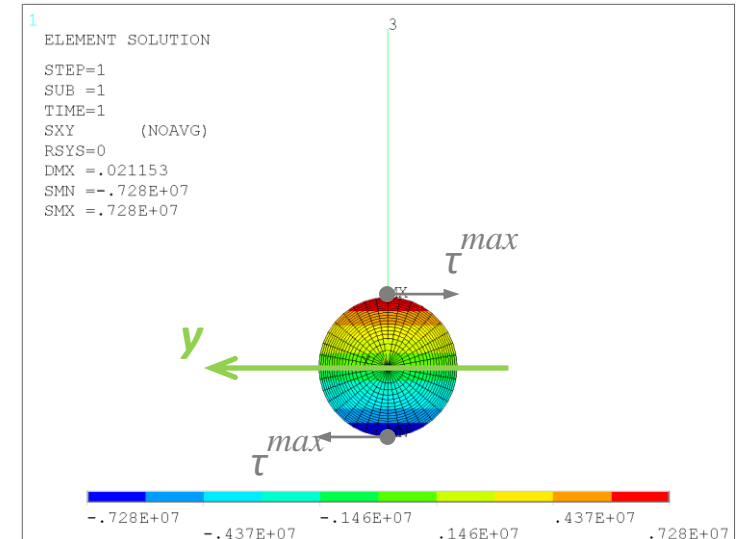
Проекция векторов касательных напряжений на ось  $z$  элемента:

M\_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot >  
> Element Solu > Element Solution > Stress > XZ Shear stress  
> ОК

Полностью параллельны оси  $z$  вектора напряжений в точках 1 и 2 сечения (рис.2.).

Все четыре упомянутые точки лежат на внешнем контуре круглого поперечного сечения и касательное напряжение в них различно по направлению, но одинаково по модулю – аналитический расчёт показывает  $\tau^{max}=7,278 \text{ МПа}$  (рис.2.). ANSYS нам во всех четырёх точках показывает численное значение  $\tau^{max}=7,28 \text{ МПа}$  – то же самое с точностью до трёх значащих цифр.

На сечение смотрим против оси  $x$  элемента («сзади»), поэтому видим инверсные цвета.



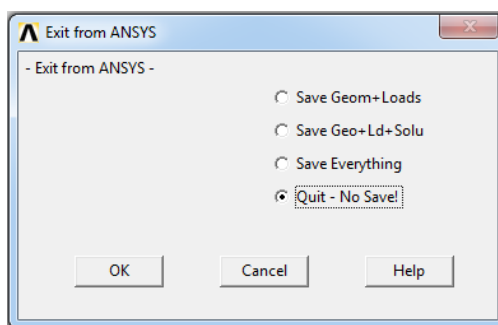


Сохраняем проделанную работу:

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.