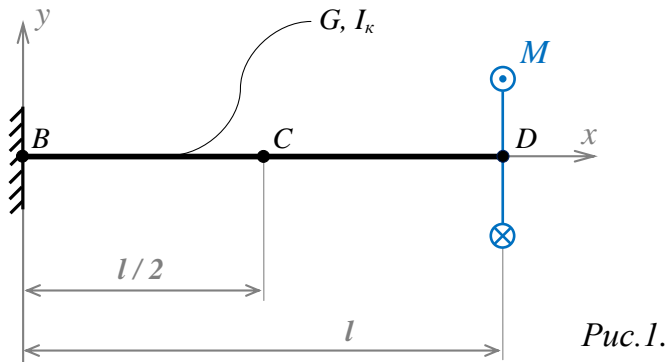


D-05 (ANSYS)

Формулировка задачи:

Моделируем торсион (рис.1.) последовательно каждого из вышеперечисленных в Таблице 1. профилей.



$$l = 80 \text{ см};$$

$$d = 10 \text{ см};$$

$$G = 8 \cdot 10^4 \text{ МПа};$$

$$M = 1 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Рис.1.

Внутренний крутящий момент в поперечных сечениях торсиона $M_{кр} = M$. Угол поворота φ_c сечения С торсиона (рис.1.) и значение максимального касательного напряжения τ_{max} в нём для различных вариантов профиля, вычисленные по аналитическим формулам из [лекций](#), приведены в Таблице 1. Там же для прямоугольного профиля приведено значение второго по величине напряжения в сечении $\tau'_{max} = \eta \cdot \tau_{max} = 0,859 \cdot \tau_{max}$.

Депланации в лекциях проиллюстрированы для прямоугольного и кольцевого разомкнутого поперечных сечений:

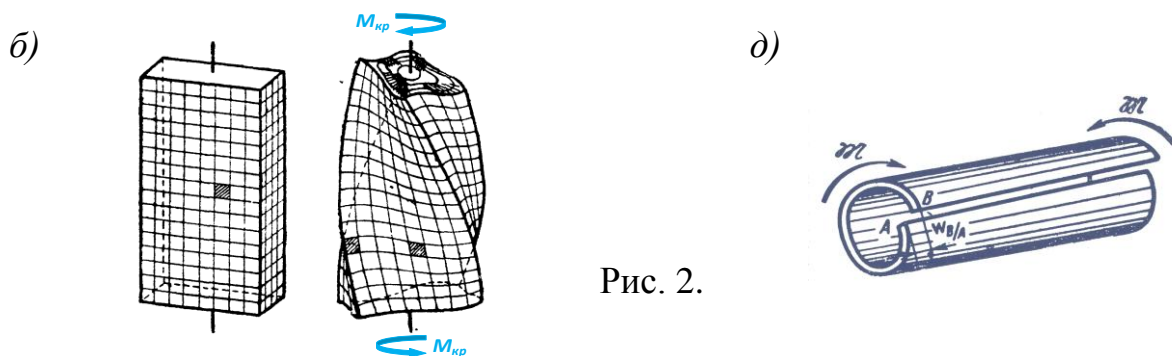
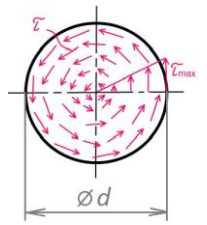
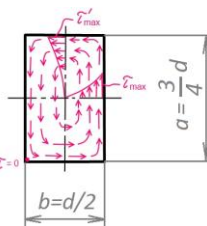
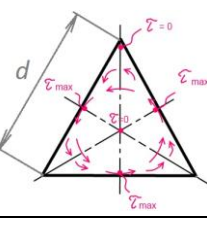
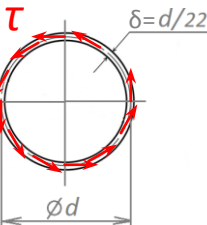
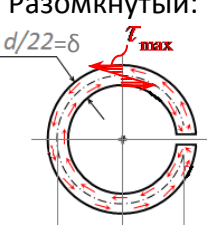
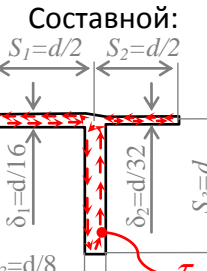


Рис. 2.

В ANSYS-е модель торсиона соберём из линейных объёмных конечных элементов SOLID73 и численно проверим:

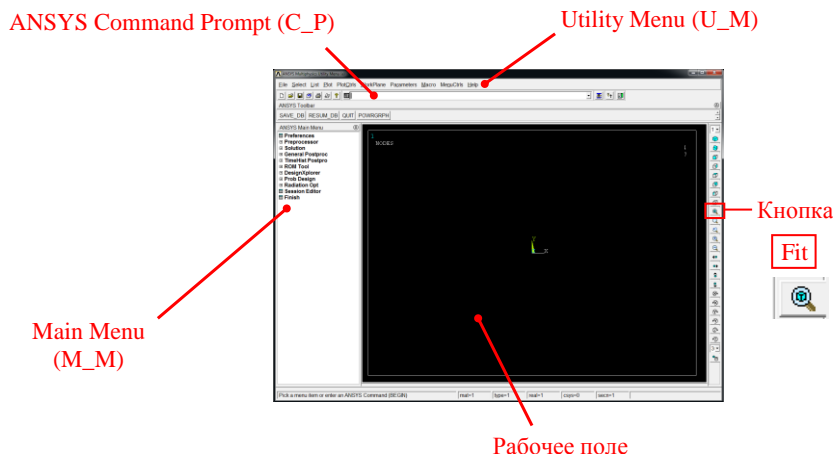
- картину депланаций;
- угол поворота φ_c ;
- картину распределения касательных напряжений по сечению С;
- значение максимального касательного напряжения τ_{max} в этом сечении.

Таблица 1.
 Поперечное сечение С торсиона:

	Профиль поперечного сечения:	I_K	$\varphi_c = \frac{M \cdot l/2}{G \cdot I_K}$	W_K	$\tau_{max} = \frac{M}{W_K}$
а)	Круглый: 	$\frac{\pi \cdot d^4}{32} =$ $= 981,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$	$0,0005093 \text{ рад} =$ $= 0,02918^\circ$	$\frac{\pi \cdot d^3}{16} =$ $= 196,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$	5,093 МПа
б)	Прямоугольный: 	$0,196 \cdot a \cdot b^3 =$ $= 183,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$	$0,00272 \text{ рад} =$ $= 0,1559^\circ$	$0,231 \cdot a \cdot b^2 =$ $= 43,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$	23,09 МПа $\tau'_{max} =$ = 19,83 МПа
в)	Треугольный: 	—	—	—	—
г)	Кольцевой: 	$\frac{\pi \cdot d_{cp}^3 \cdot \delta}{4} =$ $= 356,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$	$0,001401 \text{ рад} =$ $= 0,08025^\circ$	$\frac{\pi \cdot d_{cp}^2 \cdot \delta}{2} =$ $= 71,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$	14 МПа
д)	Разомкнутый: 	$\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot d \cdot \delta^3 =$ $= 0,9835 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$	$0,5084 \text{ рад} =$ $= 29,13^\circ$	$\frac{1}{3} \cdot \pi \cdot d \cdot \delta^2 =$ $= 2,163 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$	462 МПа
е)	Составной: 	$\sum_{i=1}^3 \frac{1}{3} \cdot S_i \cdot \delta_i^3 =$ $= 6,968 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$	$0,07175 \text{ рад} =$ $= 4,111^\circ$	$\frac{I_K}{\delta_{max}} = \frac{I_K}{\delta_3} =$ $= 5,574 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$	179,4 МПа

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, потом **Enter**.

Меняем чёрный цвет фона на белый следующими действиями:

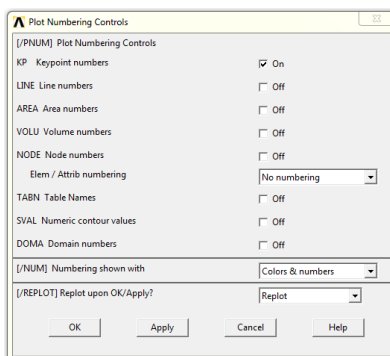
```
U_M > PlotCtrls > Style > Colors > Reverse Video
```

Оставить в меню пункты, относящиеся только к прочностным расчётам:

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

Нумеровать ключевые точки, линии, поверхности твердотельной модели:

```
U_M > PlotCtrls > Numbering >
Отметить KP
> OK
```



Для большей наглядности увеличим размер шрифта:

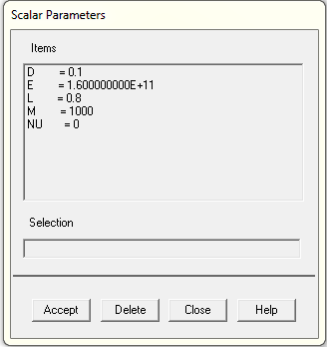
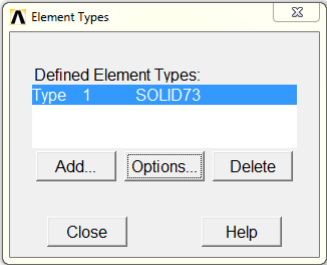
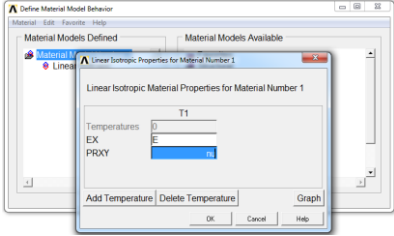
```
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Legend Font >
«Размер» на «22» > OK
```

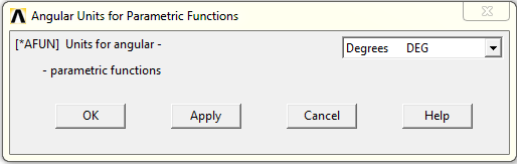
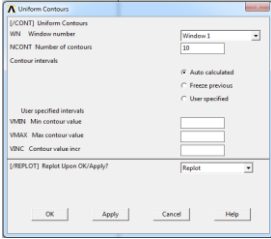


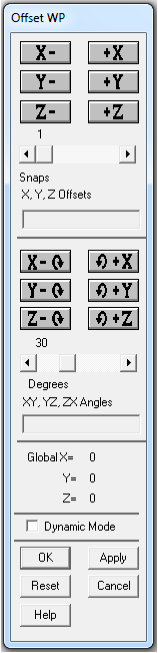

```
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Entity Font >
«Размер» на «22» > OK
```


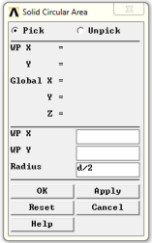
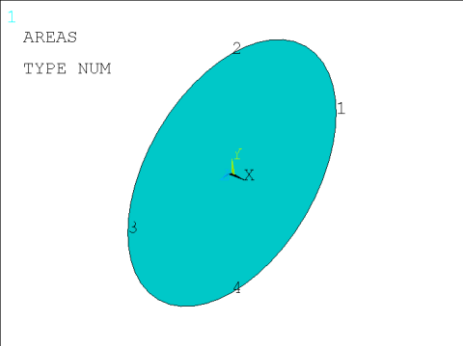
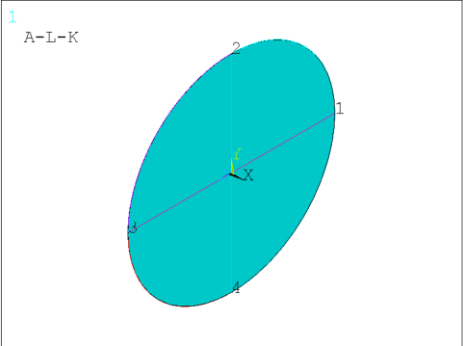
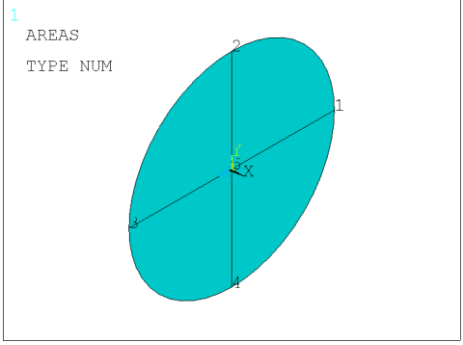
Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.


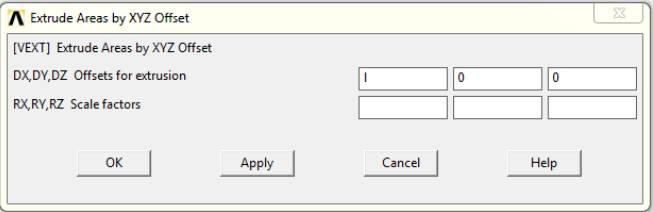
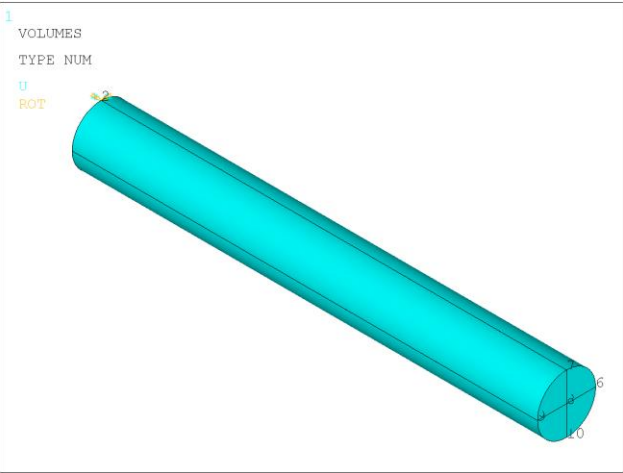
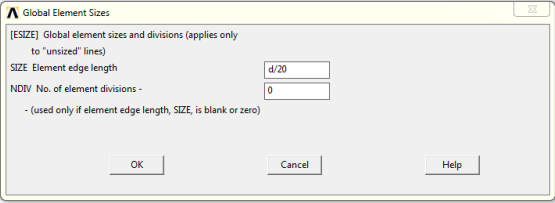
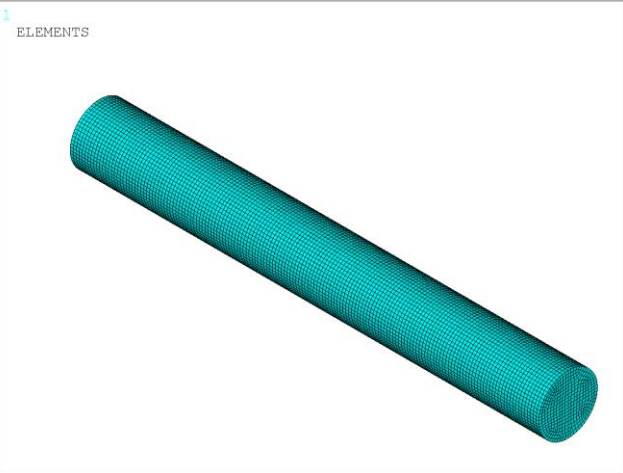
Решение задачи:



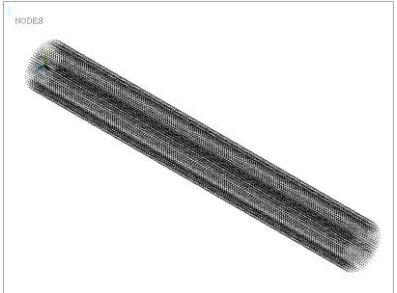
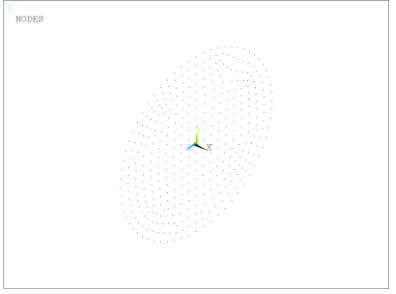
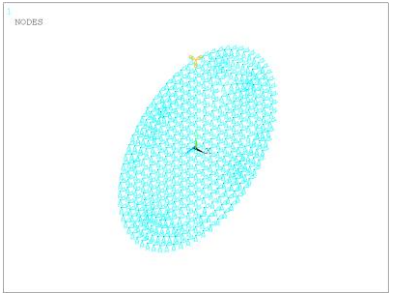
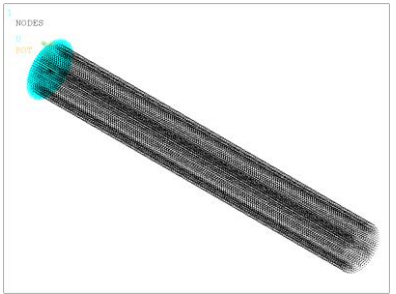
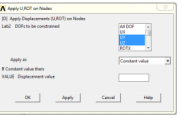
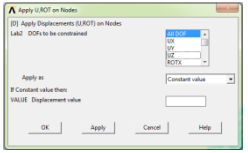
Коэффициент Пуассона ν для уменьшения краевых эффектов приравняем к нулю (как у пробки). По известной формуле, связывающей G , E и ν изотропного материала для того, чтобы получить $G=8 \cdot 10^{10}$ Па при $\nu=0$ требуется задать $E=16 \cdot 10^{10}$ Па.




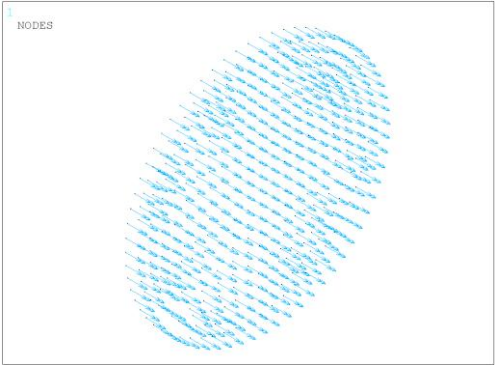
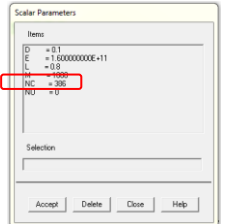
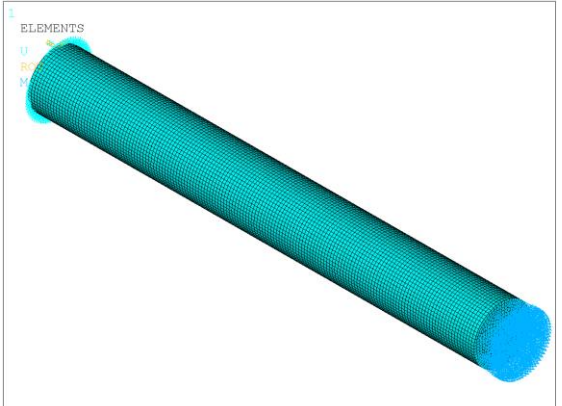
№	Действие	Результат
1	<p><i>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</i></p> <p>U_M > Parameters > Scalar Parameters > M=1000 > Accept > E=16e10 > Accept > nu=0 > Accept > d=0.1 > Accept > l=0.8 > Accept > > Close</p>	
2	<p><i>Таблица конечных элементов:</i></p> <p>Единственная строка — Solid73 – линейный с шестью степенями свободы в узлах:</p> <p>M_M > Preprocessor > C_P > ET, 1, SOLID73 > Enter</p> <p>Посмотрим таблицу конечных элементов:</p> <p>M_M > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Close</p>	
3	<p><i>Свойства материала стержня – модуль упругости и коэффициент Пуассона:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic > В окошке EX пишем "E", в окошке PRXY пишем "nu" > OK</p> <p>Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p>	

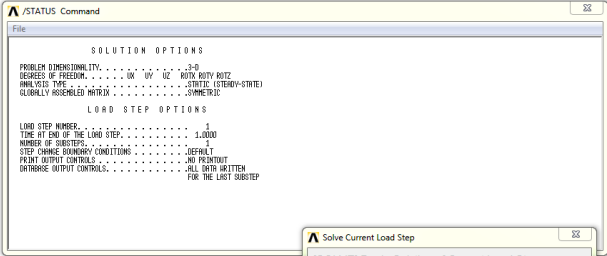
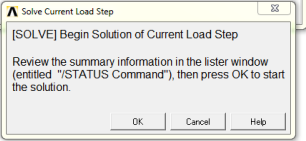
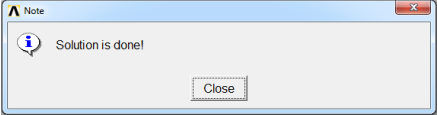
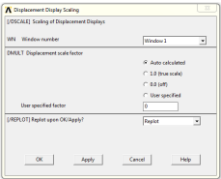
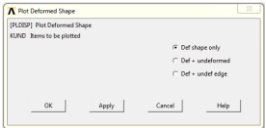
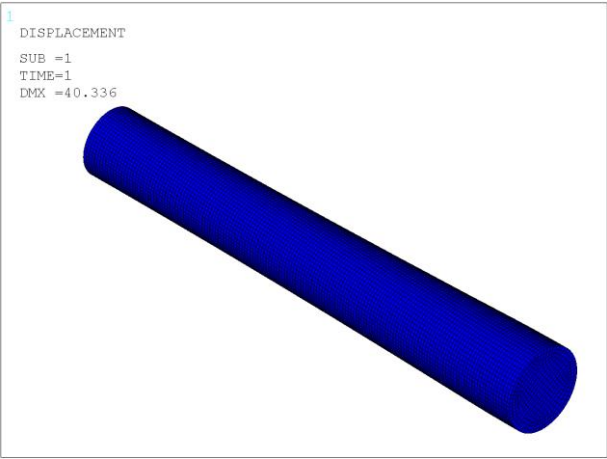
№	Действие	Результат
4	<p><i>Тригонометрические функции будут работать с градусами:</i></p> <p>U_M > Parameters > Angular Units [*AFUN] устанавливаем "Degrees DEG" > OK</p>	
5	<p><i>Цветовая шкала будет состоять из десяти цветов:</i></p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours > NCONT пишем 10 > OK</p>	
6	<p><i>Разворот рабочей плоскости:</i></p> <p> - изометрия;</p> <p>Прорисовываем систему координат рабочей плоскости. Сейчас она ориентирована по глобальной системе координат:</p> <p>U_M > WorkPlane > Display Working Plane</p> <p>Поворачиваем рабочую плоскость на 90 градусов вокруг оси Y с тем, чтобы её ось WZ совпала с осью X глобальной декартовой системы координат:</p> <p>U_M > WorkPlane > Offset WP by Increments ></p> <p>Три раза нажимаем на появившейся панельке кнопку , наблюдая, как система координат рабочей плоскости с каждым нажатием поворачивается вокруг оси Y на тридцать градусов.</p> <p>> OK</p> <p>Скрываем оси рабочей плоскости:</p> <p>U_M > WorkPlane > Display Working Plane</p>	 


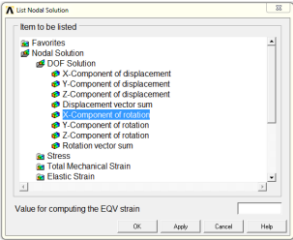

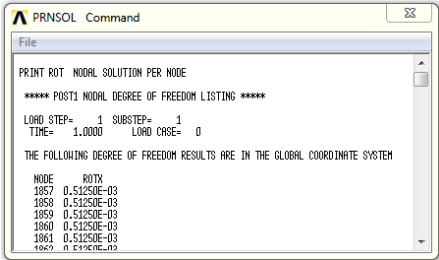

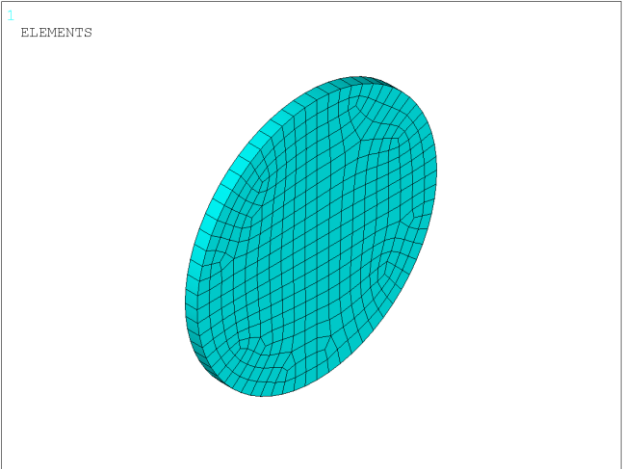
№	Действие	Результат
а) Торсион круглого профиля		
7	<p><i>Профиль:</i></p> <p>Круг: M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > > Circle > Solid Circle > В окошке <i>Radius</i> пишем $d/2$ > ОК</p>  - автоформат (меню справа). <p>Диаметральные линии: M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > > Lines > Straight Line > Кликаем мышкой последовательно на ключевые точки 3 и 1 2 и 4 > ОК</p> <p>Разделяем круг линиями: M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > > Area by Line > Pick All > Pick All</p> <p>Прорисовываем поверхности: U_M > Plot > Areas</p>	   


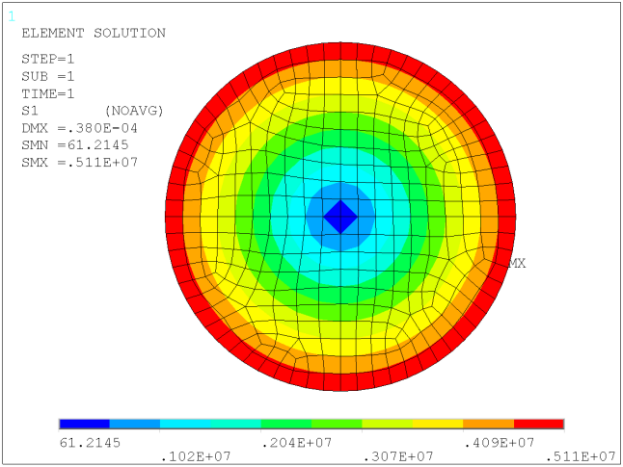
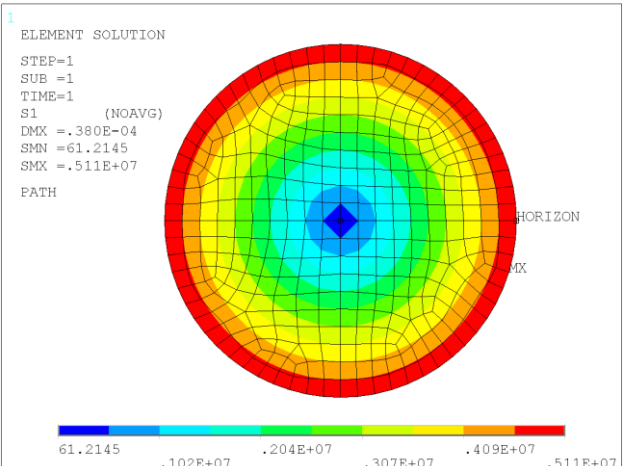
№	Действие	Результат
8	<p><i>Выдавливание объёмов:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > > By XYZ Offset > Pick All ></p> <p>Значение DX указать <i>l</i> > OK</p> <p><i>Прорисовываем объёмы:</i></p> <p>U_M > Plot > Volumes</p> <p> - автоформат (меню справа).</p>	 
9	<p><i>Размер стороны конечного элемента для разбиения:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > ManualSize > Global > Size</p> <p>Size пишем, например $d/20$ > OK</p>	
10	<p><i>Разбиваем объём на конечные элементы:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > Sweep > > Pick All</p>	

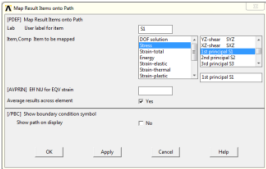
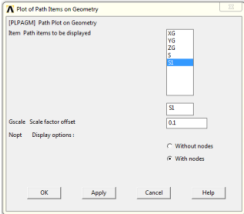
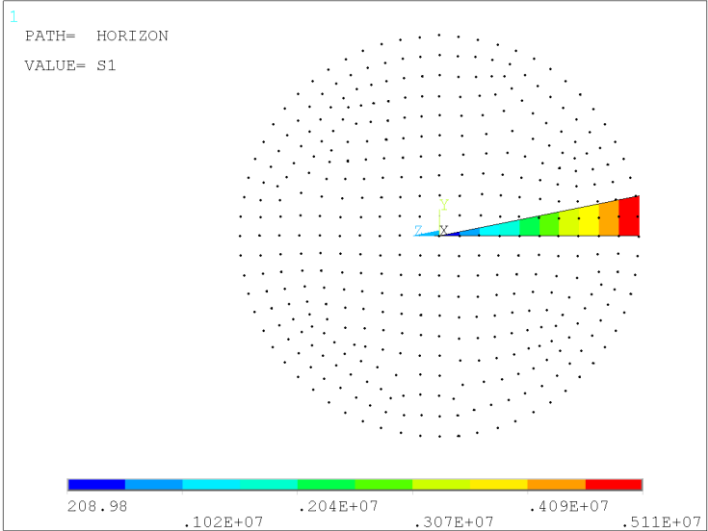


№	Действие	Результат
11	<p>Заделка:</p> <p>Прорисовываем узлы: U_M > Plot > Nodes</p> <p>Выделяем узлы сечения <i>B</i> торсiona (рис.1.):</p> <p>U_M > Select > Entites</p> <p>Устанавливаем "Nodes" и "By location"</p> <p>Верхний селектор устанавливаем на "X coordinates"</p> <p>В поле "Min,Max" пишем 0,0</p> <p>Нижний селектор устанавливаем на "From Full"</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем выделенные узлы: U_M > Plot > Replot</p> <p> - автоформат</p> <p>Узлы корневого сечения, будут закреплены в его плоскости (ZY):</p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes > Pick All > Lab2 установить "UY" и "UZ"</p> <p>> OK</p> <p>Один из узлов будет закреплён в осевом направлении (вдоль оси X):</p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes ></p> <p>Кликаем на любой узел, например верхний</p> <p>> OK ></p> <p>Lab2 установить "All DOF"</p> <p>> OK</p> <p>Выделить всё: U_M > Select > Everything</p> <p>Прорисовываем узлы: U_M > Plot > Nodes</p>	      



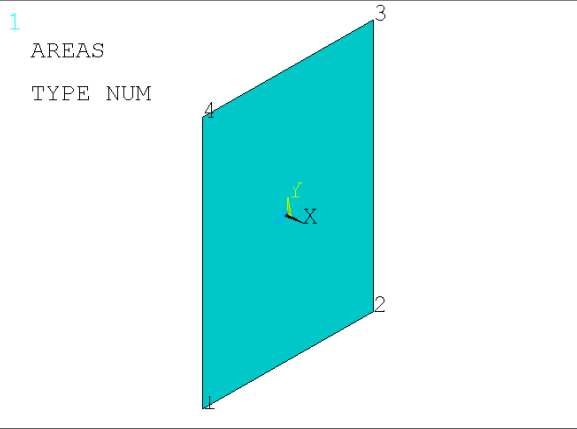
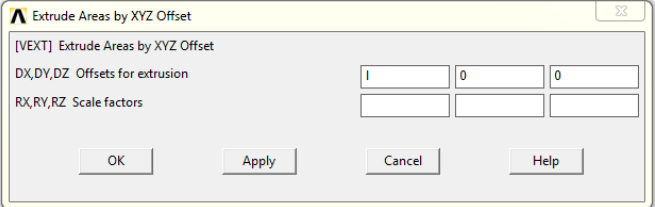

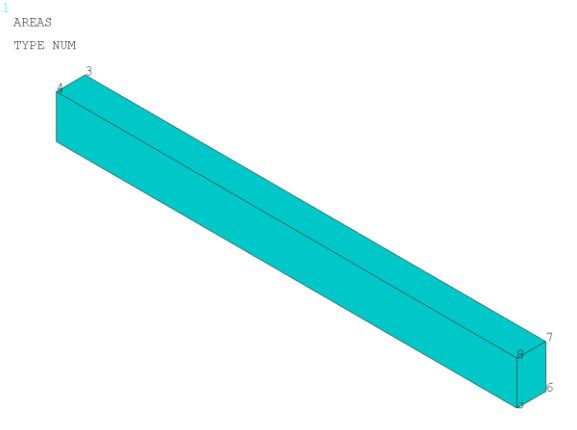
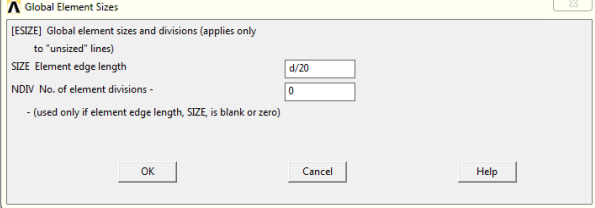
№	Действие	Результат
12	<p><i>Внешний момент, распределён по узлам сечения D (рис.1.):</i></p> <p>Выделяем торцевые узлы: U_M > Select > Entites Устанавливаем "Nodes" и "By location" Верхний селектор устанавливаем на "X coordinates" В поле "Min,Max" пишем <i>l, l</i> Нижний селектор устанавливаем на "From Full" > OK</p> <p>Прорисовываем выделенные узлы: U_M > Plot > Nodes</p>  - автоформат <p>Подсчитываем количество выделенных узлов, запоминаем его в параметре NC: C_P > *GET, NC, NODE, 0, COUNT > Enter</p> <p>Можно посмотреть, сколько узлов насчитано: U_M > Parameters > Scalar Parameters > Close</p> <p>Прикладываем внешний крутящий момент M, распределённый по NC узлам: M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On Nodes > Pick All Lab установить "MX" VALUE установить "M/NC" > OK</p> <p>Выделить всё: U_M > Select > Everything</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Elements</p>	    

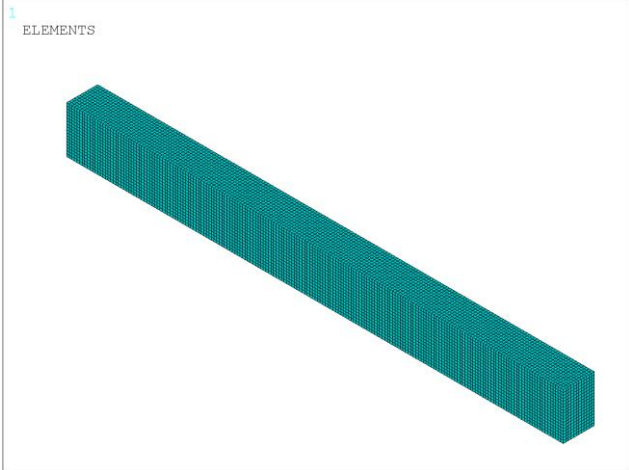
№	Действие	Результат
13	<p><i>Запускаем расчёт:</i></p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS</p> <p>Синхронно появляются два окна: белое информационное и серое исполнительное. Белое закрываем, на сером нажимаем ОК.</p> <p>Расчёт пошёл.</p> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Расчёт окончен.</p>	  
14	<p><i>Деформированная форма торсиона:</i></p> <p>Масштаб перемещений выбирать автоматически:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "Auto calculated" > ОК</p> <p>Деформированная форма:</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape > KUND установить Def shape only > ОК</p> <p>Ближняя часть закрученного стержня крупнее дальней, это издержки линейного расчёта. Кроме того, торец деформирован крутящим моментом, деформации наблюдайте не там, а в заделке.</p> <p>Искажений не видно – круглые поперечные сечения не деформируются.</p>	  

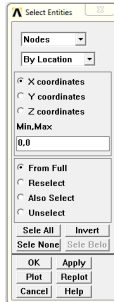
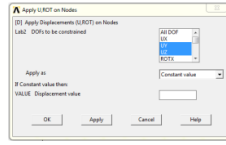

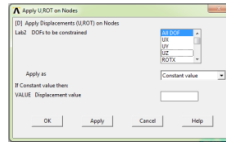
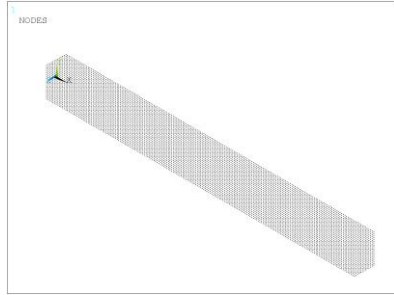
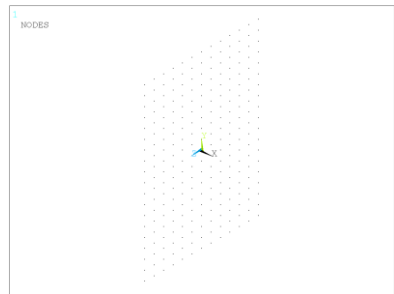
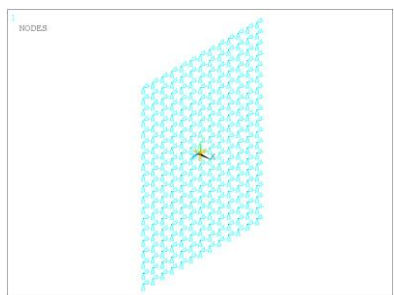
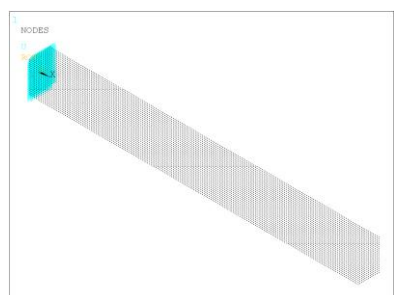
№	Действие	Результат
15	<p>Угол поворота сечения C:</p> <p>Узлы:</p> <p>U_M > Select > Entites "Nodes", "By location", "X coordinates", "From Full" В поле "Min,Max" пишем 1/2, 1/2 > ОК</p> <p>Прорисовываем выделенные узлы:</p> <p>U_M > Plot > Nodes</p> <p>Улы поворота узлов:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Nodal Solution > > Nodal Solution> DOF Solution > X-Component of rotation > ОК</p> <p>Видим - угол поворота каждого узла сечения C торсиона составляет:</p> $\varphi_C = ROTX = 0,0005125 \text{ рад}$ <p>что на 0,6% отличается от результата аналитического расчёта (Табл. 1а.).</p>	   
16	<p>Слой конечных элементов слева от сечения C:</p> <p>C_P > ESEL, S, CENT, X, 1/2-d/20, 1/2 > Enter</p> <p>Прорисовываем выделенные элементы:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p>  - автоформат	


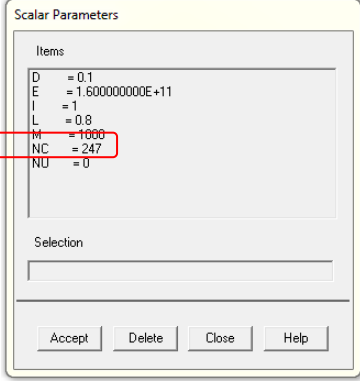
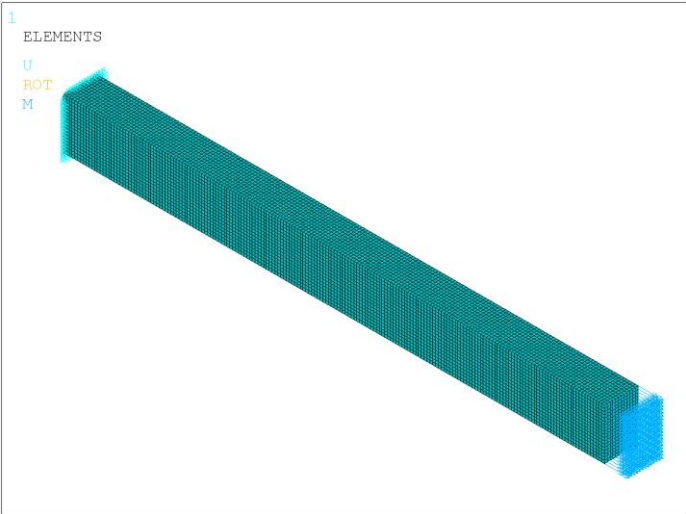
№	Действие	Результат
17	<p><i>τ при чистом сдвиге по модулю равны первому главному напряжению:</i></p> <p> - вид справа</p> <p>Напряжения будем смотреть на недеформированной форме:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "0.0" > ОК</p> <p>Прорисовываем первое главное напряжение</p> <p>M_M> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> > Element Solu > Element Solution > Stress > > 1st Principal stress > ОК</p> <p>Видим – напряжения равномерно распределяются по сечению от почти нуля в центре до максимума по краям:</p> <p>$\tau_{max} = 5,11 \text{ МПа}$</p> <p>что на 0,3% отличается от результата аналитического расчёта (Табл. 1а.).</p>	<p>1 ELEMENT SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 S1 (NOAVG) DMX =.380E-04 SMN =61.2145 SMX =.511E+07</p> 
18	<p><i>Создаём путь (нулевую отметку) эпюры напряжений, такую же, как в Табл. 1а. – горизонталь от центра сечения к правой крайней точке:</i></p> <p>M_M> General Postproc> Path Operations> Define Path> By Nodes> Кликаем мышкой на центральный и на правый узлы сечения > ОК ></p> <p>В графе Name пишем Horizon > ОК</p> <p>Прорисовываем путь:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > Plot Path</p>	<p>1 ELEMENT SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 S1 (NOAVG) DMX =.380E-04 SMN =61.2145 SMX =.511E+07 PATH</p> 



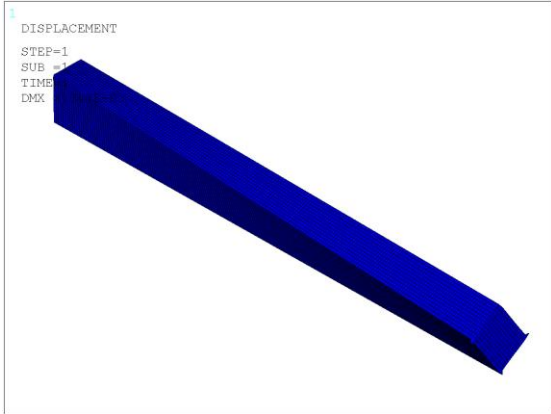
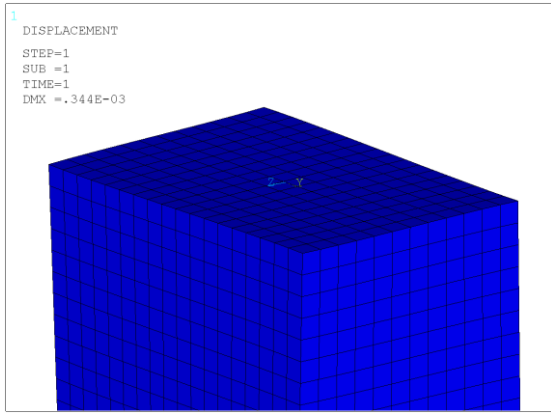
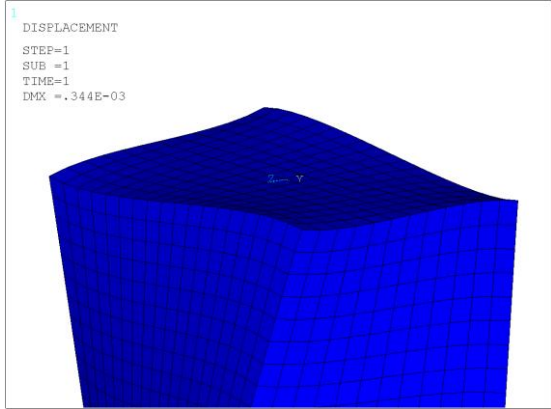
№	Действие	Результат
19	<p><i>Этюра:</i></p> <p>Чертить будем этюру первого главного напряжения: M_M > General Postproc > Path Operations > Map onto Path > В графе Lab пишем название, например S1 В левом окошке выбираем "Stress" В правом окошке выбираем "1st principal S1" > ОК</p>  <p>Чертим этюру: M_M > General Postproc > Path Operations > Plot Path Item > > On Geometry Из списка мышкой выбрать S1 Селектор поставить на "With nodes" Уменьшаем масштаб этюры - Gscale пишем 0.1 > ОК</p>  <p>Видим линейное распределение напряжений от нуля в центре сечения до максимума τ_{max} на его краю (Табл. 1а.).</p>	
20	<p><i>Удаляем торсион круглого поперечного сечения:</i></p> <p>Выделить всё: U_M > Select > Everything Прорисовываем все элементы: U_M > Plot > Elements</p>  - изометрия;  - автоформат	<p>Очищаем объёмы от конечных элементов: M_M > Preprocessor > Clear > Volumes > Pick All</p> <p>Удаляем объёмы: M_M > Preprocessor > Modeling > Delete > Volume and Below > > Pick All</p> <p>Модель удалена. Можно приступать к дальнейшим построениям.</p>

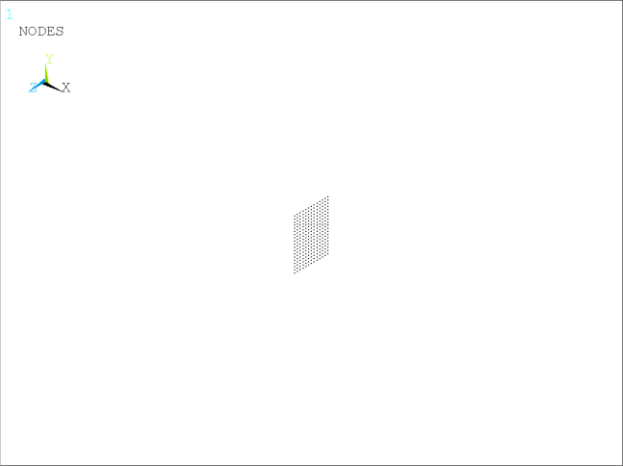
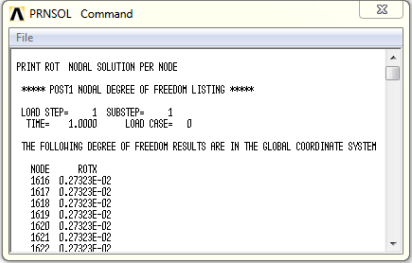

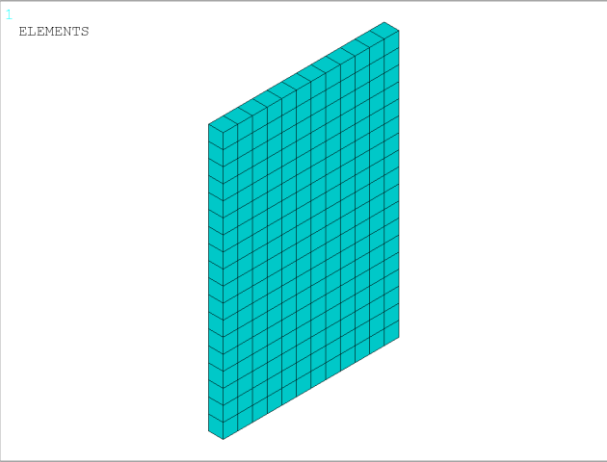
№	Действие	Результат
б) Тorsiон прямоугольного профиля		
21	<p><i>Профиль:</i></p> <p>Прямоугольник:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > > Rectangle > By Centr & Cornr ></p> <p>В окошке <i>Width</i> пишем $d/2$</p> <p>В окошке <i>Height</i> пишем $3/4*d$</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем поверхности: U_M > Plot > Areas</p>  <p> - автоформат (меню справа).</p>	
22	<p><i>Выдавливание объёмов:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > > By XYZ Offset > Pick All ></p> <p>Значение DX указать l</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем объёмы:</p> <p>U_M > Plot > Volumes</p>  <p> - автоформат (меню справа).</p>	
23	<p><i>Размер стороны конечного элемента для разбиения:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > ManualSize > Global > Size</p> <p>Size пишем, например $d/24$</p> <p>> OK</p>	


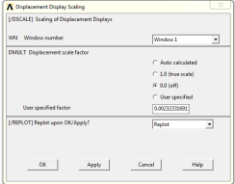
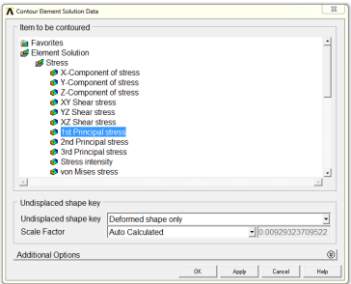
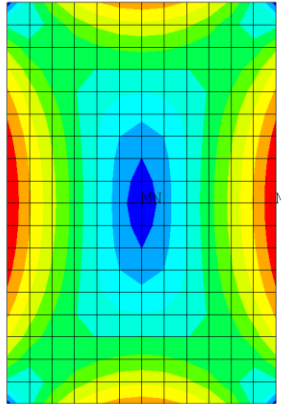
№	Действие	Результат
24	<p data-bbox="165 395 734 424"><i>Разбиваем объём на конечные элементы:</i></p> <p data-bbox="165 443 1312 517">M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > Sweep > > Pick All</p>	 <p data-bbox="1435 252 1525 284">ELEMENTS</p> <p>The image shows a 3D perspective view of a rectangular prism that has been discretized into a dense mesh of small, teal-colored rectangular elements. The mesh is uniform in appearance, covering the entire volume of the object. The object is oriented diagonally, showing its top, front, and right-side faces. The background is white, and the word 'ELEMENTS' is printed in the top-left corner of the image area.</p>

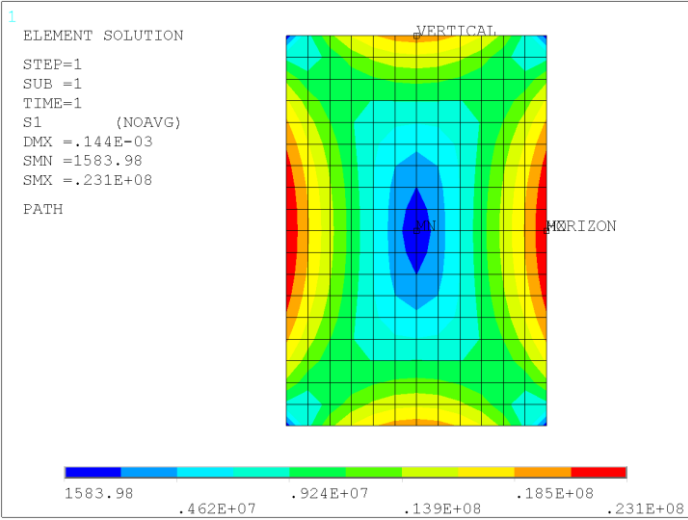
№	Действие	Результат
25	<p>Заделка:</p> <p>Выделяем узлы сечения <i>B</i> торсиона (рис.1.):</p> <pre>U_M > Select > Entites "Nodes", "By location", "X coordinates" В поле "Min,Max" пишем 0,0 > ОК</pre> <p>Прорисовываем выделенные узлы: U_M > Plot > Nodes</p>   <p> - автоформат</p> <p>Узлы корневого сечения, будут закреплены в его плоскости (ZY):</p> <pre>M_M> Preprocessor> Loads > Define Loads > Apply > > Structural> Displacement > On Nodes > Pick All > Lab2 установить "UY" и "UZ" > ОК</pre> <p>Один из узлов будет закреплён в осевом направлении (вдоль оси X):</p> <pre>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes > Кликаем на любой узел, например центральный > ОК > Lab2 установить "All DOF" > ОК</pre>  <p>Выделить всё:</p> <pre>U_M > Select > Everything</pre> <p>Прорисовываем узлы:</p> <pre>U_M > Plot > Nodes</pre>	   

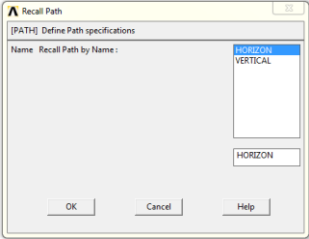
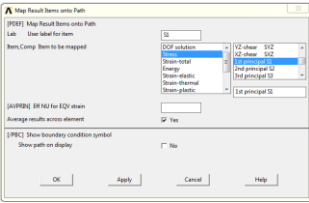
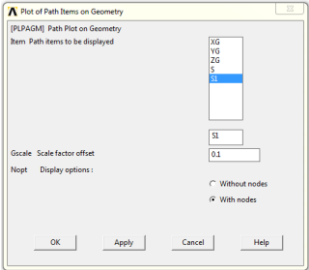
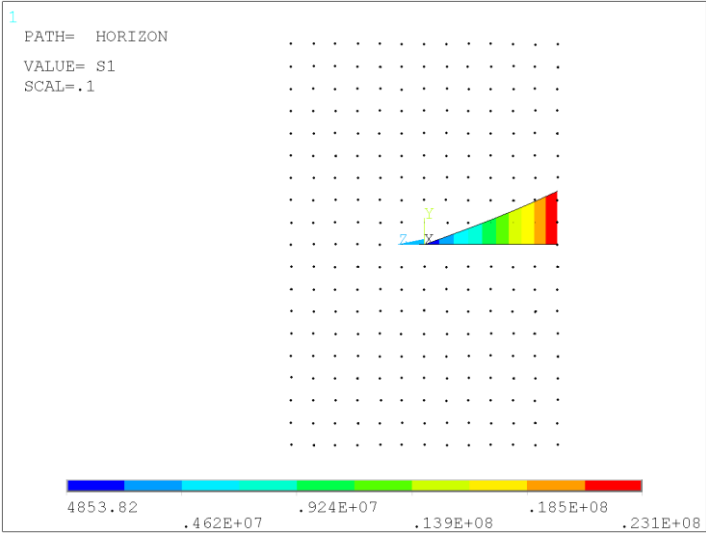
№	Действие	Результат
26	<p><i>Внешний момент, распределённый по узлам сечения D (рис.1.):</i></p> <p>Выделяем торцевые узлы:</p> <pre>U_M > Select > Entites</pre> <p>"Nodes", "By location", "X coordinates</p> <p>В поле "Min,Max" пишем l, l</p> <p>> OK</p> <p>Количество выделенных узлов, запоминаем в параметре NC:</p> <pre>C_P > *GET, NC, NODE, 0, COUNT > Enter</pre> <p>Можно посмотреть, сколько узлов насчитано:</p> <pre>U_M > Parameters > Scalar Parameters > Close</pre> <p>Прикладываем внешний крутящий момент M, распределённый по NC узлам:</p> <pre>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On Nodes > Pick All</pre> <p>Lab установить "MX"</p> <p>VALUE установить "M/NC"</p> <p>> OK</p> <p>Выделить всё:</p> <pre>U_M > Select > Everything</pre> <p>Прорисовываем всё, что есть:</p> <pre>U_M > Plot > Elements</pre>	  
27	<p><i>Запускаем расчёт:</i></p> <pre>M_M > Solution > Solve > Current LS</pre> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Расчёт окончен.</p>	

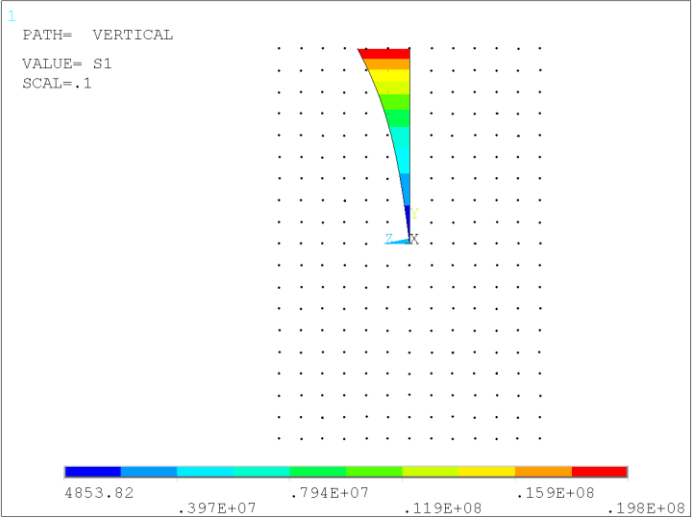
№	Действие	Результат
28	<p><i>Деформированная форма торсиона:</i></p> <p>Масштаб перемещений выбирать автоматически: U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "Auto calculated" > OK</p> <p>Деформированная форма: M_M > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape > KUND установить Def shape only > OK</p> <p>Удерживая левой рукой клавишу «Ctrl» на клавиатуре, левой и правой кнопками мыши вращайте и перемещайте модель в рабочем поле. Колёсико мыши меняйте масштаб. Посмотрите на заделанный торец торсиона, деформации там видны лучше всего. Да, по сравнению с вращательными перемещениями, перемещения осевые невелики. Увеличьте масштаб для того, чтобы увеличить их:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "User specified" User specified factor увеличиваем, например, до 1000 > OK</p> <p>Теперь деформации видны гораздо лучше. Сравните полученное изображение с <i>рис.2б</i>.</p> <p>Возвращаемся к недеформированной модели: U_M > Plot > Elements</p> <p> - изометрия;  - автоформат</p>	  



№	Действие	Результат
29	<p>Угол поворота сечения C:</p> <p>Узлы:</p> <p>U_M > Select > Entites "Nodes", "By location", "X coordinates", "From Full" В поле "Min,Max" пишем 1/2, 1/2 > ОК</p> <p>Прорисовываем выделенные узлы:</p> <p>U_M > Plot > Nodes</p> <p>Улы поворота узлов:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Nodal Solution > > Nodal Solution> DOF Solution > X-Component of rotation > ОК</p> <p>Видим - угол поворота каждого узла сечения C торсиона составляет:</p> $\varphi_C = ROTX = 0,002732 \text{ рад}$ <p>что на 0,4% отличается от результата аналитического расчёта (Табл. 1б.).</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 1616 0.2732E-02 1617 0.2732E-02 1618 0.2732E-02 1619 0.2732E-02 1620 0.2732E-02 1621 0.2732E-02 1622 0.2732E-02 </pre>
30	<p>Слой конечных элементов слева от сечения C:</p> <p>C_P > ESEL, S, CENT, X, 1/2-d/24, 1/2 > Enter</p> <p>Прорисовываем выделенные элементы:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p>  - автоформат	


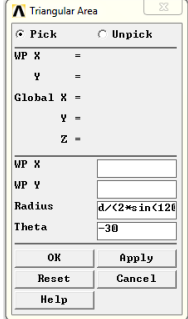
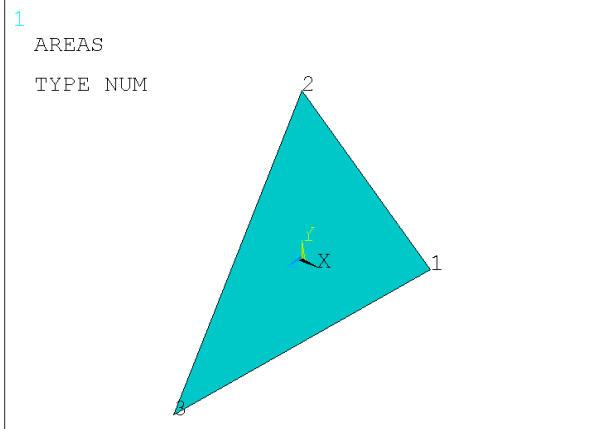

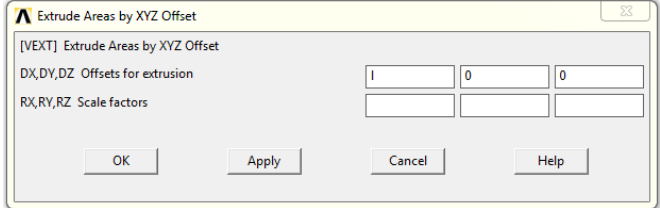
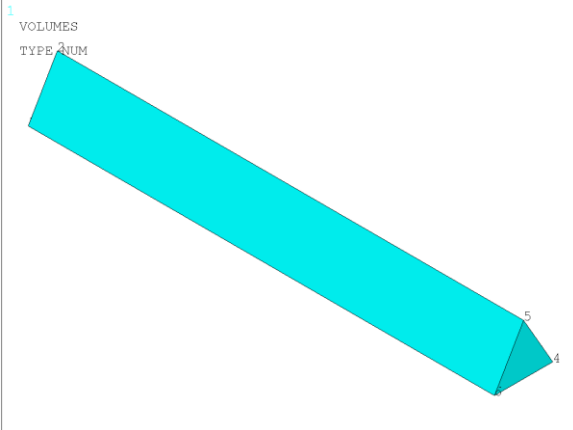
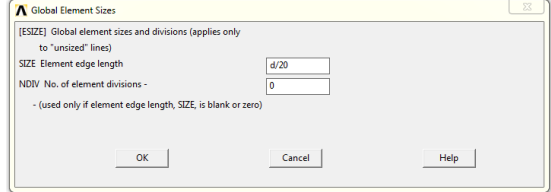
№	Действие	Результат
31	<p>τ при чистом сдвиге по модулю равны первому главному напряжению:</p> <p> - вид справа</p> <p>Напряжения будем смотреть на недеформированной форме:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "0.0"</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем первое главное напряжение:</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > > Contour Plot > Element Solu > > Element Solution > Stress > > 1st Principal stress > OK</p> <p>Видим – напряжения распределяются по сечению от нуля в центре до максимума в середине длинных сторон:</p> <p>$\tau_{max} = 23,1 \text{ МПа}$</p> <p>что на 0,04% отличается от результата аналитического расчёта (Табл.1б.). Так же видим нулевые значения напряжений $\tau = 0$ в углах сечения.</p> <p>Предвижу вопрос: «разве 1584 Па похоже на нуль?». Поясняю: значения напряжений подсчитываются не в узлах, а в так называемых «гауссовых точках» внутри элементов и лишь потом экстраполируются на узлы. Таким образом, значение касательного напряжения 1584 Па подсчитано не в центре сечения, а в его окрестности. Это значение в окрестности центра в 14583 раза меньше относительно максимума ($23,1 \cdot 10^6 \text{ Па}$). С уменьшением размера стороны элементов значение напряжений в центре и в углах асимптотически будет стремиться к нулю.</p>	<p>Результат</p> <p></p> <p></p> <pre> 1 ELEMENT SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 S1 (NOAVG) DMX =.144E-03 SMN =1583.98 SMX =.231E+08 </pre> <p></p> <p>1583.98 .462E+07 .924E+07 .139E+08 .185E+08 .231E+08</p>

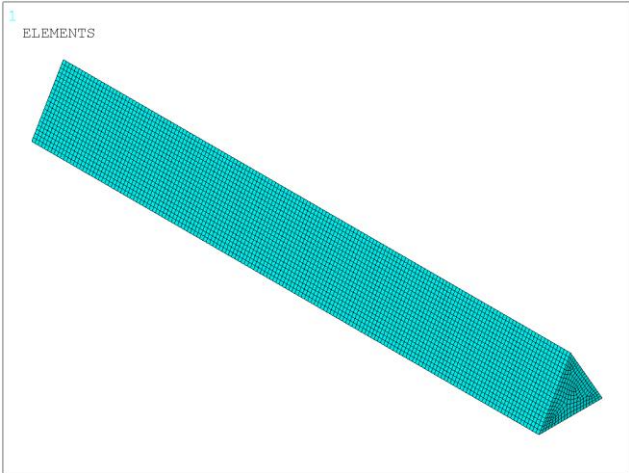
№	Действие	Результат
32	<p>Создаём пути (нулевые отметки) эпюр напряжений, такие же, как в табл.1б. – горизонталь и вертикаль от центра сечения крайним точкам:</p> <p>Горизонтальная нулевая отметка (Horizon):</p> <p>М_М> General Postproc> Path Operations> Define Path> By Nodes> Кликаем мышкой на центральный и на правый узлы > ОК > В графе Name пишем Horizon > ОК ></p> <p>Вертикальная нулевая отметка (Vertical):</p> <p>М_М> General Postproc> Path Operations> Define Path> By Nodes> Кликаем мышкой на центральный и верхний узлы > ОК > В графе Name пишем Vertical > ОК ></p> <p>Прорисовываем оба пути:</p> <p>М_М > General Postproc > Path Operations > Plot Path</p>	<p>Результат</p>  <pre> 1 ELEMENT SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 S1 (NOAVG) DMX =.144E-03 SMN =1583.98 SMX =.231E+08 PATH </pre>



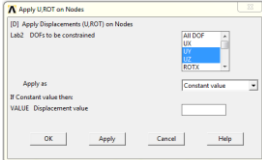
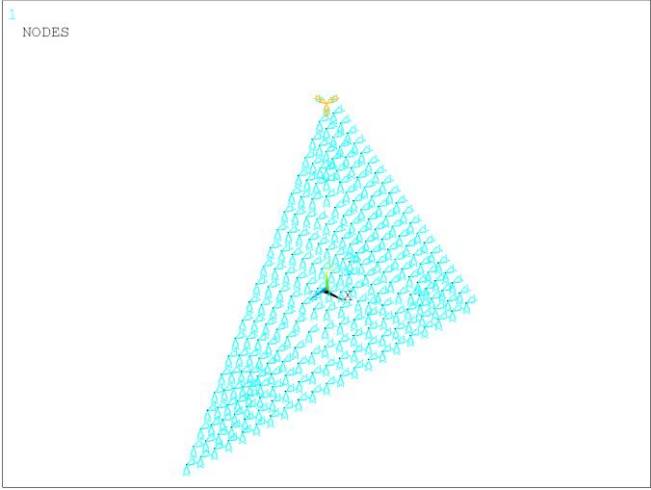
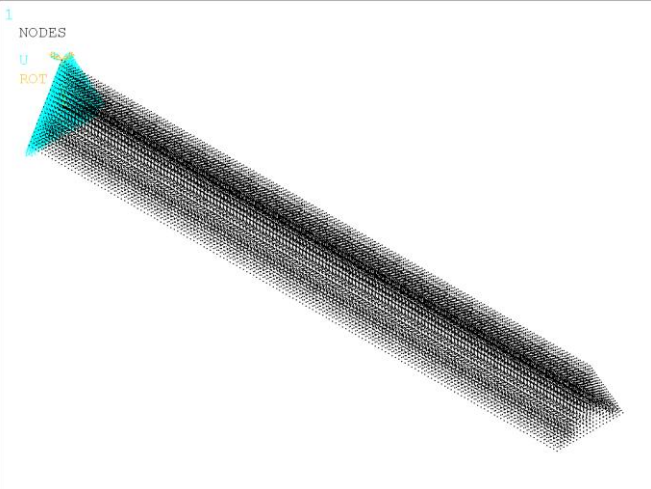
№	Действие	Результат
33	<p><i>Горизонтальная эпюра:</i></p> <p>Активируем путь Horizon:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > > Recall Path</p> <p>Из списка выбираем вариант "HORIZON"</p> <p>> ОК</p> <p>Чертить будем эпюру первого главного напряжения:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > Map onto Path ></p> <p>В графе Lab пишем название, например S1</p> <p>В левом окошке выбираем "Stress"</p> <p>В правом окошке выбираем "1st principal S1"</p> <p>> ОК</p> <p>Чертим эпюру:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > Plot Path Item > > On Geometry</p> <p>Из списка мышкой выбрать S1</p> <p>Селектор поставить на "With nodes"</p> <p>Уменьшаем масштаб эпюры - Gscale пишем 0.1</p> <p>> ОК</p> <p>Видим распределение напряжений от нуля в центре сечения до максимума τ_{max} на его краю (Табл. 1б.) по зависимости со слабой нелинейностью.</p>	   <p>1 PATH= HORIZON VALUE= S1 SCAL=.1</p> 


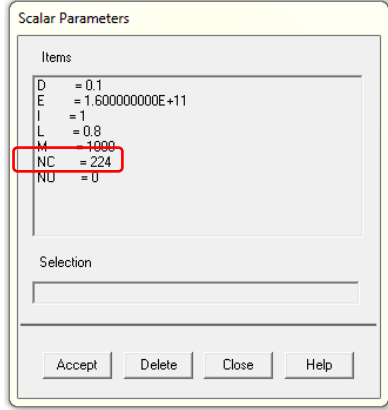
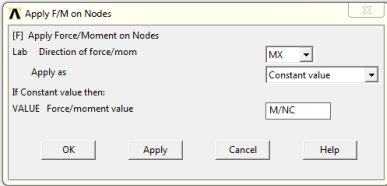
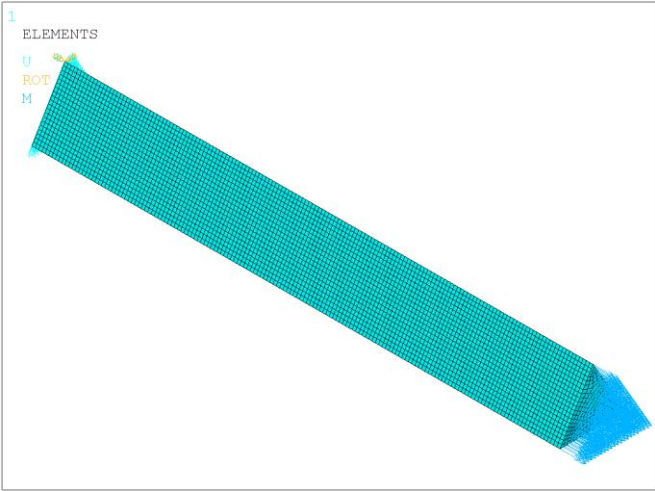
№	Действие	Результат
34	<p><i>Вертикальная эпюра:</i></p> <p>Активируем путь Vertical:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > > Recall Path</p> <p>Из списка выбираем вариант "VERTICAL"</p> <p>> ОК</p> <p>Чертить будем эпюру первого главного напряжения:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > Map onto Path ></p> <p>В графе Lab пишем название, например S1</p> <p>В левом окошке выбираем "Stress"</p> <p>В правом окошке выбираем "1st principal S1"</p> <p>> ОК</p> <p>Чертим эпюру:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > Plot Path Item > > On Geometry</p> <p>Из списка мышкой выбрать S1</p> <p>Селектор поставить на "With nodes"</p> <p>Уменьшаем масштаб эпюры - Gscale пишем 0.1</p> <p>> ОК</p> <p>Здесь нелинейность выражена куда лучше. Напряжение на краю профиля видим</p> $\tau'_{max} = 198 \text{ МПа}$ <p>что практически повторяет результат аналитического расчёта (Табл. 1б.).</p>	



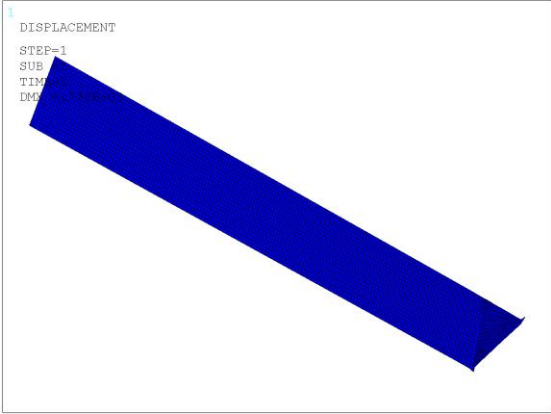
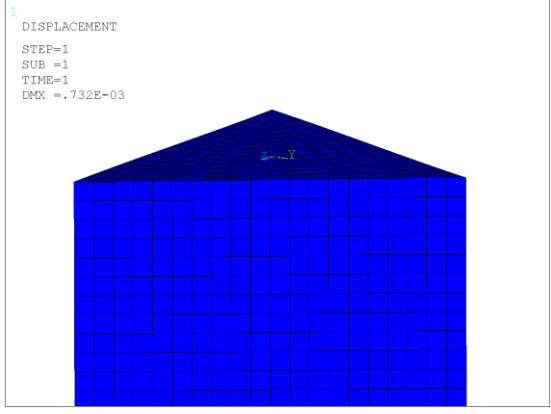
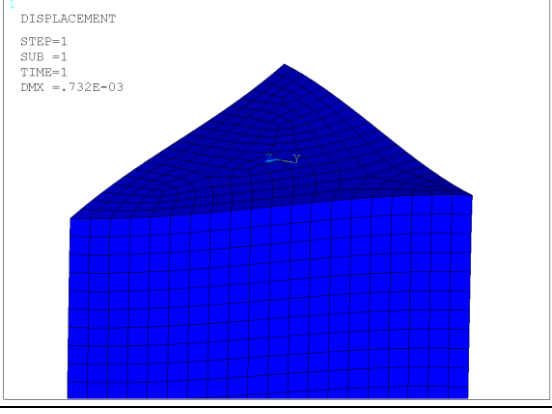
№	Действие	Результат
35	<p><i>Удаляем торсион прямоугольного поперечного сечения:</i></p> <p>Выделить всё: U_M > Select > Everything</p> <p>Прорисовываем все элементы: U_M > Plot > Elements</p> <p> - изометрия;</p> <p> - автоформат</p> <p>Очищаем объёмы от конечных элементов: M_M > Preprocessor > Clear > Volumes > Pick All</p> <p>Удаляем объёмы: M_M > Preprocessor > Modeling > Delete > Volume and Below > > Pick All</p> <p>Модель удалена. Можно приступить к дальнейшим построениям.</p>	


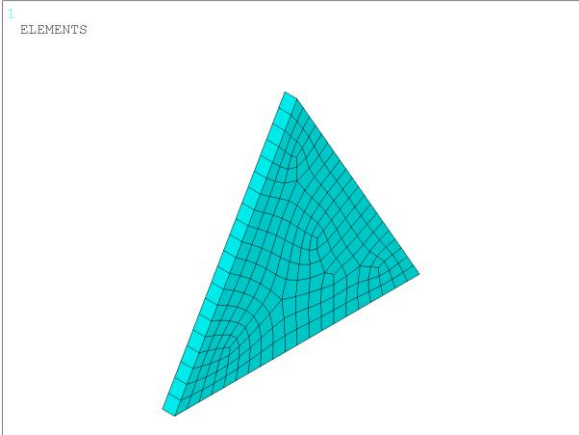

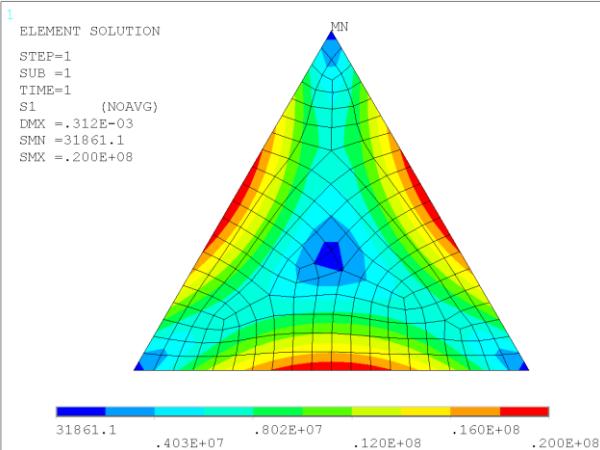
№	Действие	Результат
в) Торсион треугольного профиля		
36	<p><i>Профиль:</i></p> <p>Равносторонний треугольник, длина стороны d:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > > Polygon > Triangle ></p> <p>В окошке <i>Radius</i> пишем $d/(2*\sin(120/2))$</p> <p>В окошке <i>Theta</i> пишем -30</p> <p>> OK</p>  - автоформат (меню справа).	 
37	<p><i>Выдавливание объёмов:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > > By XYZ Offset > Pick All ></p> <p>Значение DX указать l</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем объёмы:</p> <p>U_M > Plot > Volumes</p>  - автоформат (меню справа).	 
38	<p><i>Размер стороны конечного элемента для разбиения:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Global > Size</p> <p>Size пишем, например $d/20$</p> <p>> OK</p>	



№	Действие	Результат
39	<p><i>Разбиваем объём на конечные элементы:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > Sweep > Pick All</p>	

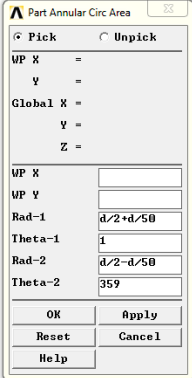

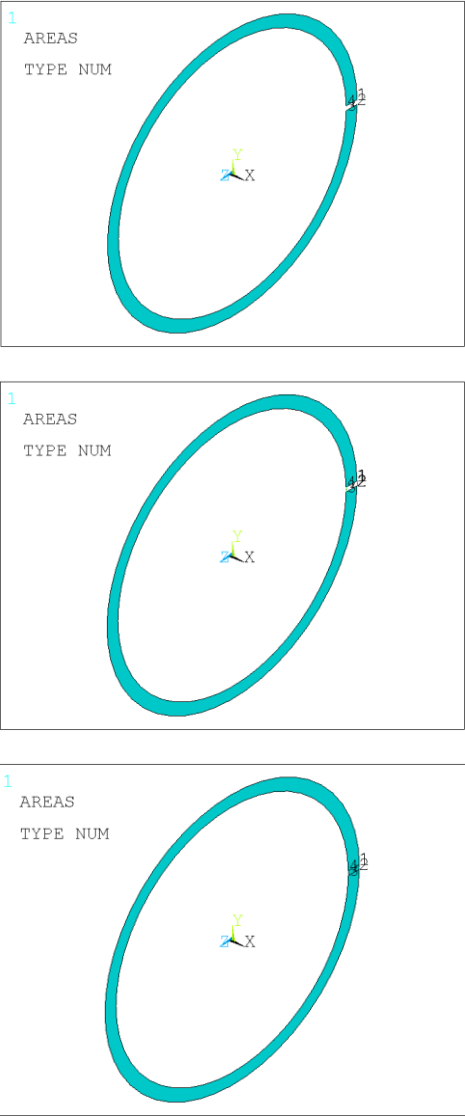
№	Действие	Результат
40	<p>Заделка:</p> <p>Выделяем узлы сечения <i>B</i> торсиона (рис.2.):</p> <pre>U_M > Select > Entites "Nodes", "By location", "X coordinates" В поле "Min,Max" пишем 0,0 > OK</pre> <p>Прорисовываем выделенные узлы:</p> <pre>U_M > Plot > Nodes</pre>  <p> - автоформат</p> <p>Узлы корневого сечения, будут закреплены в его плоскости (ZY):</p> <pre>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes > Pick All > Lab2 установить "UY" и "UZ" > OK</pre> <p>Один из узлов будет закреплён в осевом направлении (вдоль оси X):</p> <pre>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes > Кликаем на любой узел, например верхний > OK > Lab2 установить "All DOF" > OK</pre>  <p>Выделить всё:</p> <pre>U_M > Select > Everything</pre> <p>Прорисовываем узлы:</p> <pre>U_M > Plot > Nodes</pre>	 

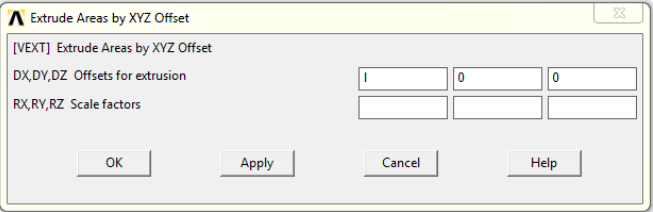

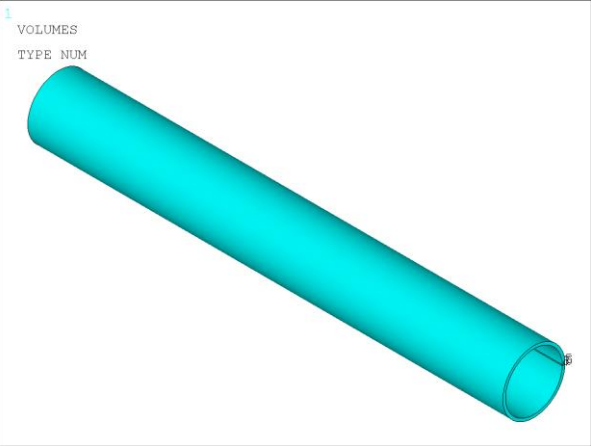
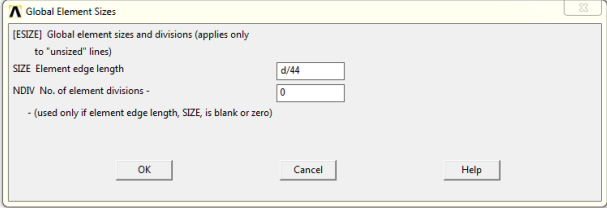
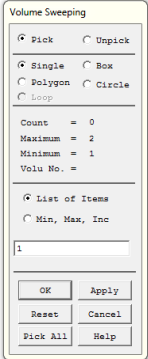
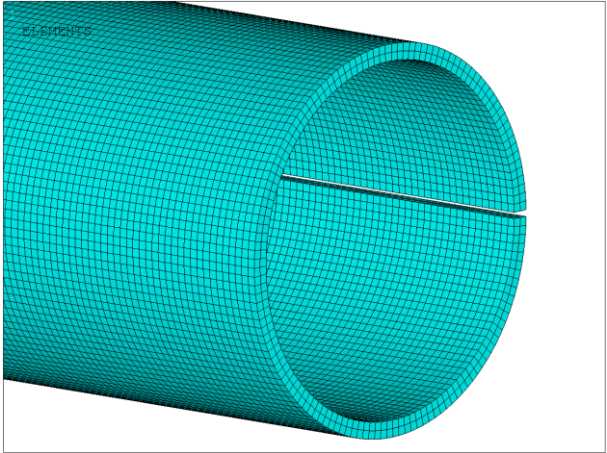
№	Действие	Результат
41	<p><i>Внешний момент, распределён по узлам сечения D (рис.1.):</i></p> <p>Выделяем торцевые узлы сечения D:</p> <pre>U_M > Select > Entites</pre> <p>"Nodes", "By location", "X coordinates"</p> <p>В поле "Min,Max" пишем l, l</p> <p>> ОК</p> <p>Подсчитываем количество выделенных узлов, запоминаем его в параметре NC:</p> <pre>C_P > *GET, NC, NODE, 0, COUNT > Enter</pre> <p>Можно посмотреть, сколько узлов насчитано:</p> <pre>U_M > Parameters > Scalar Parameters > Close</pre> <p>Прикладываем внешний крутящий момент M, распределённый по NC узлам:</p> <pre>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply ></pre> <p>> Structural > Force/Moment > On Nodes > Pick All</p> <p>Lab установить "MX"</p> <p>VALUE установить "M/NC"</p> <p>> ОК</p> <p>Выделить всё: <code>U_M > Select > Everything</code></p> <p>Прорисовываем всё, что есть: <code>U_M > Plot > Nodes</code></p>	   
42	<p><i>Запускаем расчёт:</i></p> <pre>M_M > Solution > Solve > Current LS</pre> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Расчёт окончен.</p>	



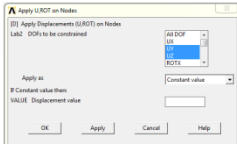
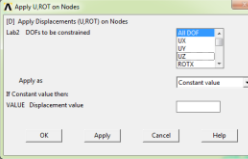
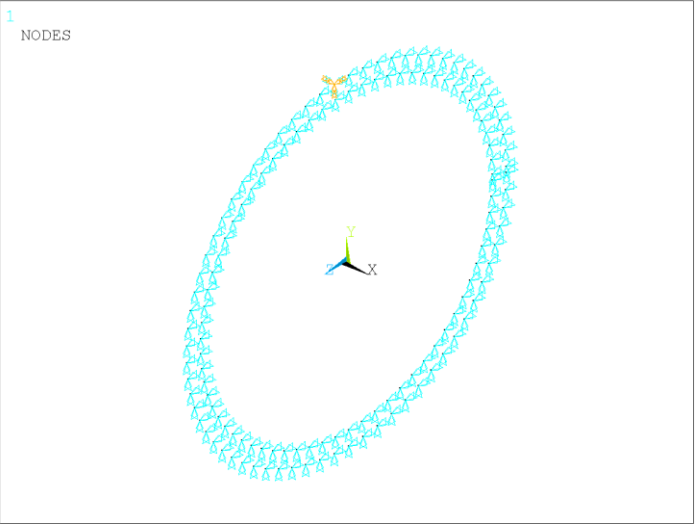
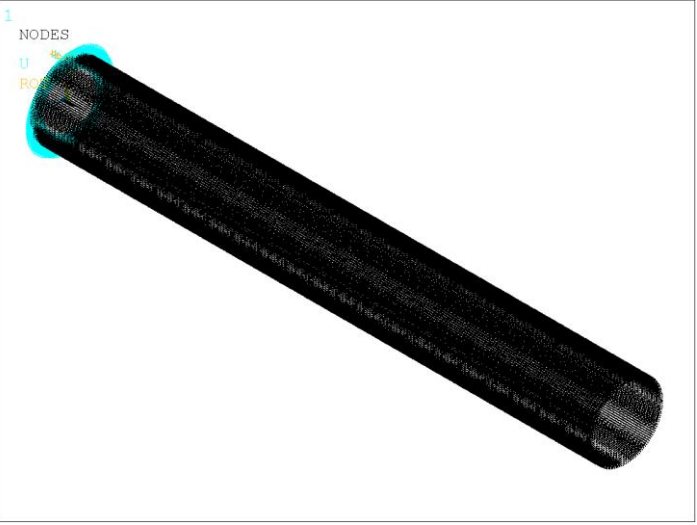
№	Действие	Результат
43	<p><i>Деформированная форма торсиона:</i></p> <p>Масштаб перемещений выбирать автоматически: U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "Auto calculated" > OK</p> <p>Деформированная форма – синие элементы, недеформированная – чёрная сетка M_M > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape > KUND установить Def shape only > OK</p> <p>Удерживая левой рукой клавишу «Ctrl» на клавиатуре, левой и правой кнопками мыши вращайте и перемещайте модель в рабочем поле. Колёсико мыши меняйте масштаб. Посмотрите на заделанный торец торсиона, деформации там видны лучше всего. Да, по сравнению с вращательными перемещениями, перемещения осевые невелики. Увеличьте масштаб для того, чтобы увеличить их:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "User specified" User specified factor увеличиваем, например, до 1000 > OK</p> <p>Теперь деформации видны гораздо лучше.</p> <p>Возвращаемся к недеформированной модели: U_M > Plot > Elements</p> <p> - изометрия;  - автоформат</p>	  

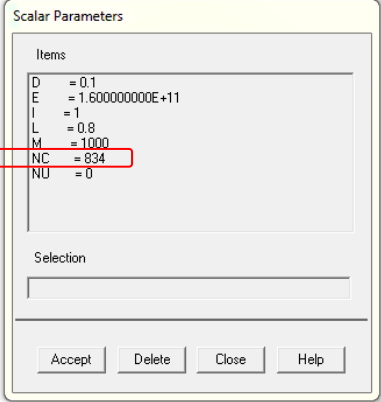
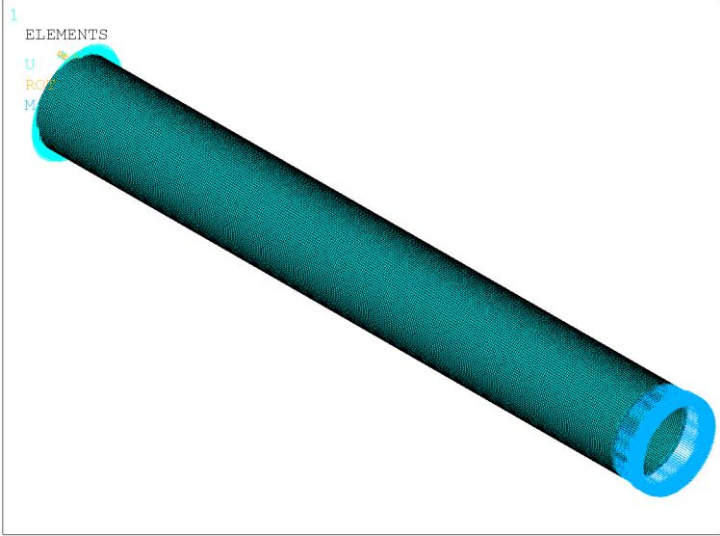
№	Действие	Результат
44	<p>Слой конечных элементов слева от сечения C:</p> <pre>C_P > ESEL, S, CENT, X, 1/2-d/20, 1/2 > Enter</pre> <p>Прорисовываем выделенные элементы:</p> <pre>U_M > Plot > Elements</pre> <p> - автоформат</p>	
45	<p>Касательные напряжения при чистом сдвиге по модулю равны первому главному напряжению:</p> <p> - вид справа</p> <p>Напряжения будем смотреть на недеформированной форме:</p> <pre>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "0.0" > OK</pre> <p>Прорисовываем первое главное напряжение</p> <pre>M_M > General Postproc > Plot Results > > Contour Plot > Element Solu > > Element Solution > Stress > > 1st Principal stress > OK</pre> <p>Видим – напряжения распределяются по сечению нуля в центре до максимума по серединам сторон (Табл. 1в.). Так же видим нулевые значения напряжений $\tau = 0$ в центре сечения и в его углах.</p>	 <p>ELEMENT SOLUTION</p> <pre>STEP=1 SUB =1 TIME=1 S1 (NOAVG) DMX = .312E-03 SMN = 31861.1 SMX = .200E+08</pre>



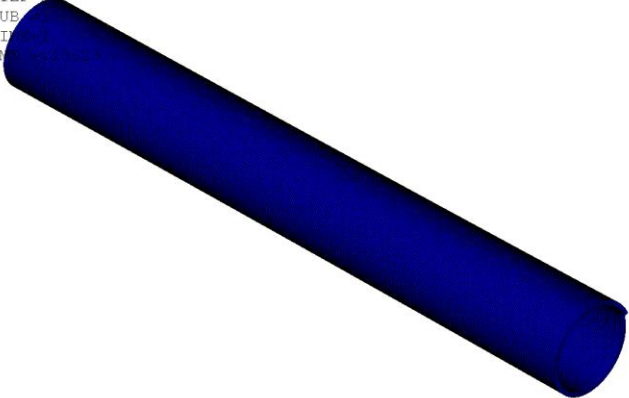
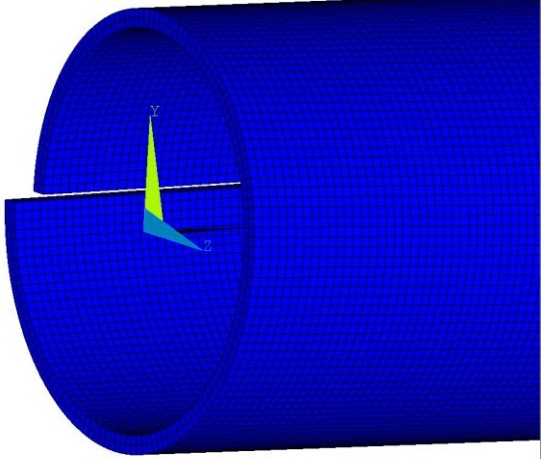
№	Действие	Результат
46	<p><i>Удаляем торсион треугольного поперечного сечения:</i></p> <p>Выделить всё: U_M > Select > Everything</p> <p>Прорисовываем все элементы: U_M > Plot > Elements</p> <p> - изометрия;  - автоформат</p> <p>Очищаем объёмы от конечных элементов:</p> <p>M_M > Preprocessor > Clear > Volumes > Pick All</p> <p>Удаляем объёмы:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Delete > Volume and Below > Pick All</p>	<p>Модель удалена.</p> <p>Можно приступать к дальнейшим построениям.</p>


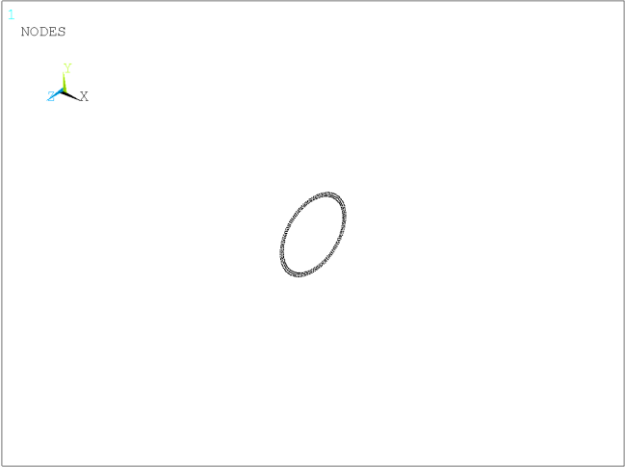
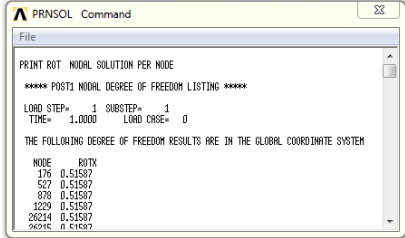

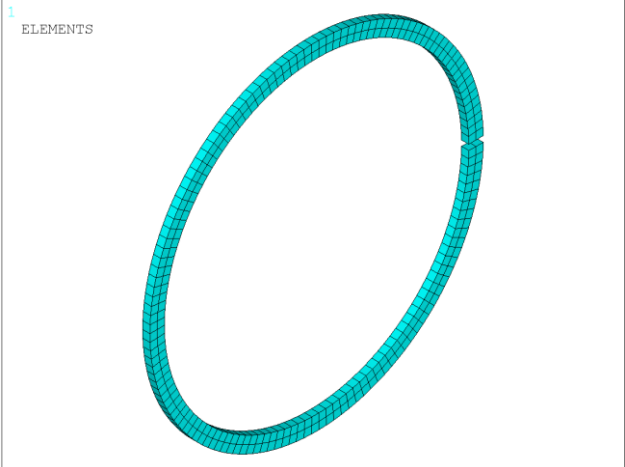
№	Действие	Результат
д) Торсион разомкнутого кольцевого профиля		
47	<p><i>Профиль:</i></p> <p>Разомкнутое кольцо:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > > Circle > Partial Annulus ></p> <p>В окошке Rad-1 пишем $d/2+d/44$</p> <p>В окошке Theta-1 пишем 1</p> <p>В окошке Rad-2 пишем $d/2-d/44$</p> <p>В окошке Theta-2 пишем 359</p> <p>> ОК</p>  <p> - автоформат (меню справа).</p> <p>Образовалось одна поверхность - разомкнутое кольцо с зазором справа. Заделываем зазор ещё одной поверхностью. Сначала соединяем края линиями:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Straight Line</p> <p>Кликаем мышкой на ключевые точки</p> <p>1 и 2</p> <p>4 и 3</p> <p>> ОК</p> <p>Теперь вырез ограничен четырьмя прямыми линиями. Строим по ним поверхность:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > > Arbitrary > By Lines ></p> <p>Кликаем мышкой последовательно на каждую из четырёх линий в зазоре</p> <p>> ОК</p> <p>Прорисовываем поверхности:</p> <p>U M > Plot > Areas</p>	


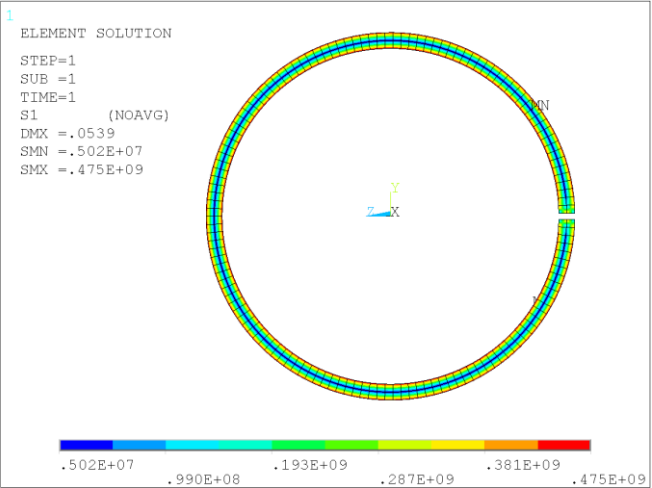
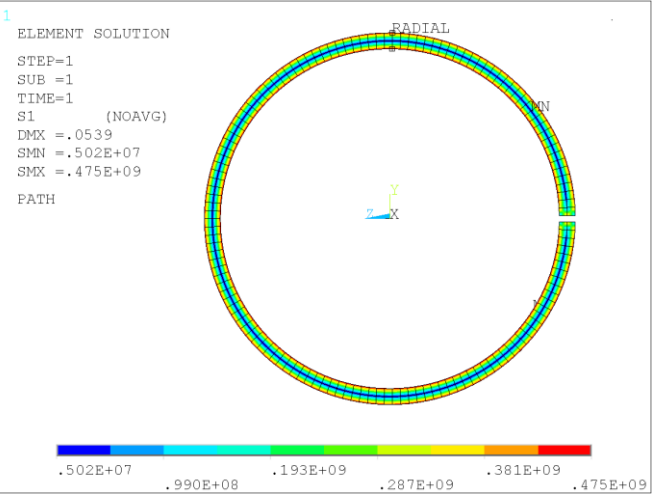
№	Действие	Результат
48	<p><i>Выдавливание объёмов:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > > By XYZ Offset > Pick All ></p> <p>Значение DX указать <i>l</i> > ОК</p> <p>Прорисовываем объёмы:</p> <p>U_M > Plot > Volumes</p>  <p> - автоформат (меню справа).</p>	
49	<p><i>Размер стороны конечного элемента для разбиения:</i></p> <p>Размер стороны элемента в плоскости сечения:</p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > > Global > Size</p> <p>Size пишем, например $d/44$ > ОК</p>	
50	<p><i>Разбиваем бОльший объём (разомкнутое кольцо) на конечные элементы:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > > Sweep ></p> <p>В окошке пишем 1 > ОК</p> <p>Прорисовываем:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p> 	

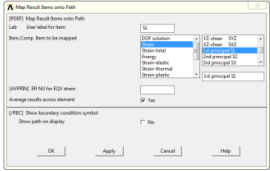
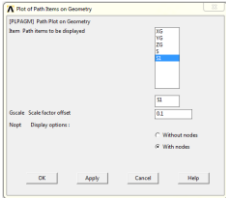
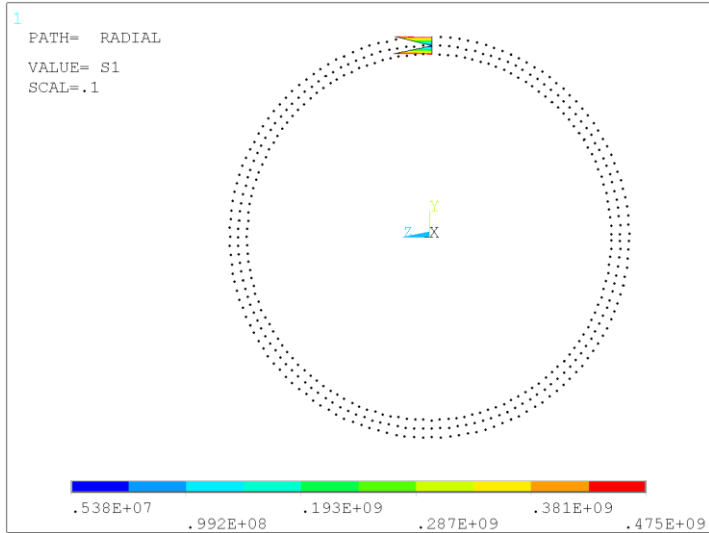
№	Действие	Результат
51	<p>Заделка:</p> <p>Выделяем узлы сечения <i>B</i> торсиона (рис. 1.):</p> <p>U_M > Select > Entites "Nodes", "By location", "X coordinates В поле "Min,Max" пишем 0,0 > ОК</p> <p>Прорисовываем выделенные узлы:</p> <p>U_M > Plot > Nodes</p>  - автоформат <p>Узлы корневого сечения, будут закреплены в его плоскости (ZY):</p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes > Pick All > Lab2 установить "UY" и "UZ" > ОК</p> <p>Один из узлов будет закреплён в осевом направлении (вдоль оси X):</p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes > Кликаем на любой узел, например верхний > ОК > Lab2 установить "All DOF" > ОК</p> <p>Выделить всё:</p> <p>U_M > Select > Everything</p> <p>Прорисовываем узлы:</p> <p>U_M > Plot > Nodes</p>	<p>Результат</p>     



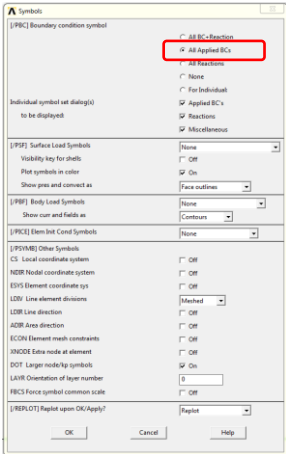
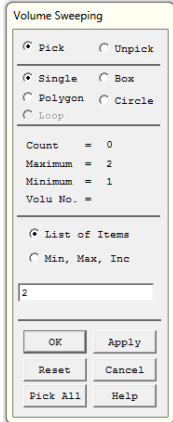
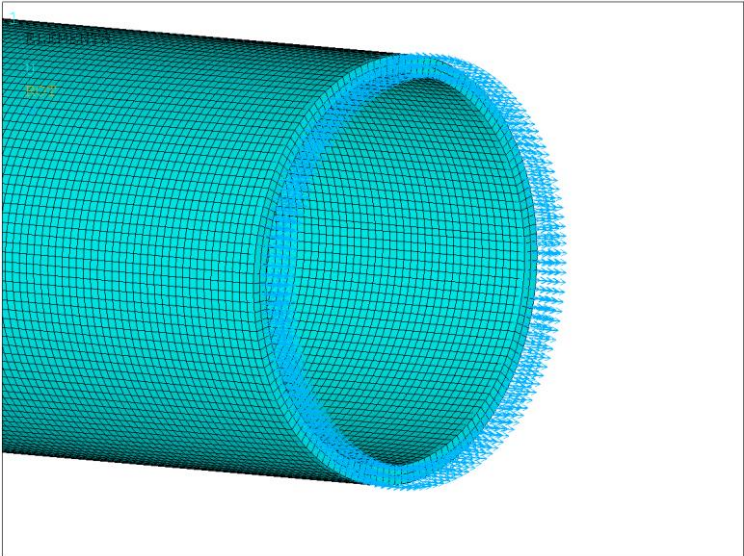
№	Действие	Результат
52	<p><i>Внешний момент распределён по узлам сечения D (рис.1.):</i></p> <p>Выделяем торцевые узлы точки D:</p> <p>U_M > Select > Entites "Nodes", "By location", "X coordinates" В поле "Min,Max" пишем l,l > ОК</p> <p>Подсчитываем количество выделенных узлов, запоминаем его в параметре NC:</p> <p>C_P > *GET, NC, NODE, 0, COUNT > Enter</p> <p>Прикладываем внешний крутящий момент M, распределённый по NC узлам:</p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On Nodes > Pick All Lab установить "MX" VALUE установить "M/NC" > ОК</p> <p>Выделить всё:</p> <p>U_M > Select > Everything</p> <p>Прорисовываем всё, что есть:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p>	 <p>Scalar Parameters</p> <p>Items</p> <p>D = 0.1 E = 1.600000000E+11 I = 1 L = 0.8 M = 1000 NC = 834 NU = 0</p> <p>Selection</p> <p>Accept Delete Close Help</p>  <p>ELEMENTS</p>
53	<p><i>Запускаем расчёт:</i></p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS</p> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Расчёт окончен.</p>	

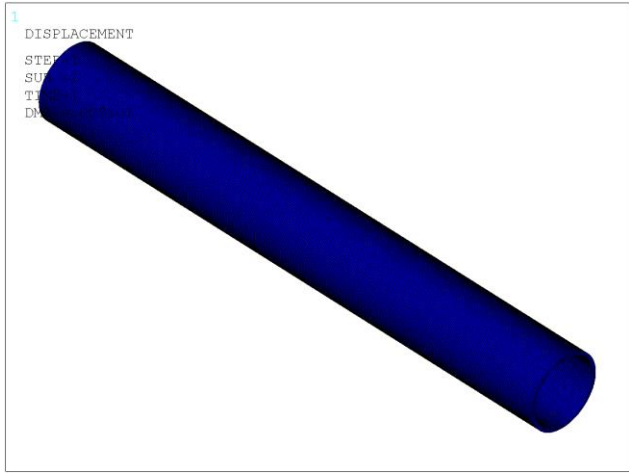
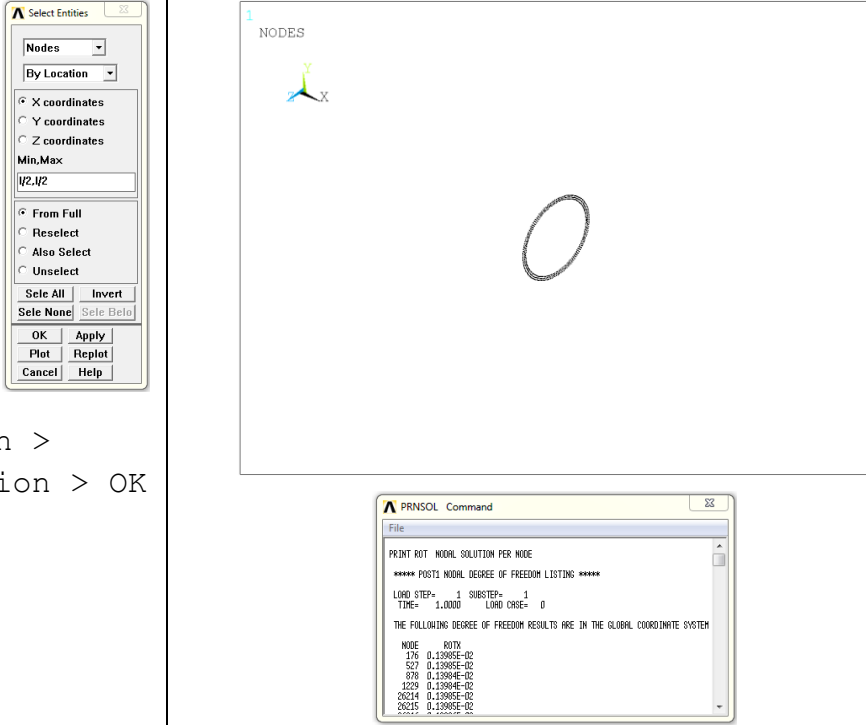
№	Действие	Результат
54	<p><i>Деформированная форма торсиона:</i></p> <p>Масштаб перемещений выбрать автоматически: U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "Auto calculated" > OK</p> <p>Деформированная форма – синие элементы, недеформированная – чёрная сетка</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape > KUND установить Def shape only > OK</p> <p>Вполне отчётливо видны деформации. Сравните полученное изображение с <i>рис.2д</i>. Возвращаемся к недеформированной модели:.</p> <p>U_M > Plot > Elements</p> <p> - изометрия;</p> <p> - автоформат</p>	<div data-bbox="1397 264 2092 788"> <p>1 DISPLACEMENT STEP=1 SUB =1 TIME=1 DMX =.10623</p>  </div> <div data-bbox="1397 826 2092 1350"> <p>1 DISPLACEMENT STEP=1 SUB =1 TIME=1 DMX =.10623</p>  </div>


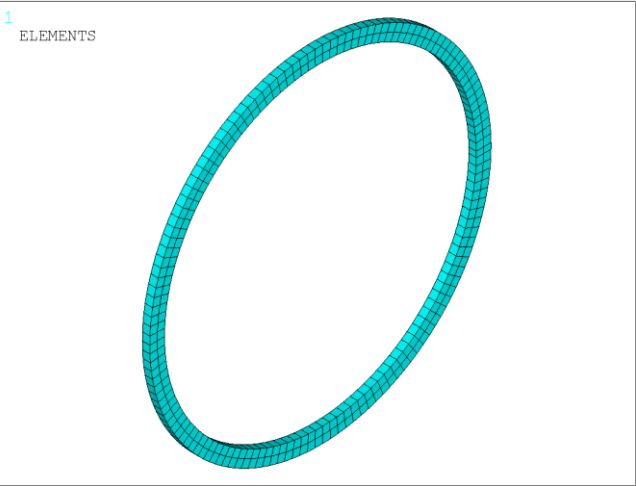

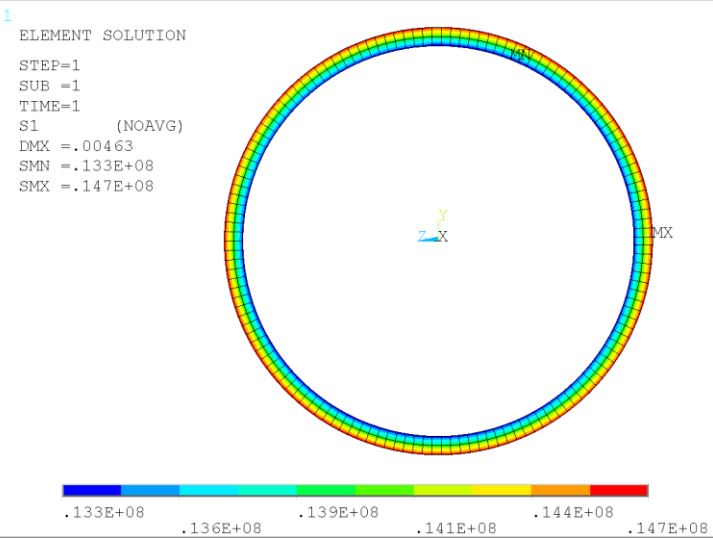
№	Действие	Результат
55	<p>Угол поворота сечения C:</p> <p>Узлы:</p> <p>U_M > Select > Entites "Nodes", "By location", "X coordinates" В поле "Min,Max" пишем 1/2, 1/2 > ОК</p> <p>Прорисовываем выделенные узлы:</p> <p>U_M > Plot > Nodes</p> <p>Улы поворота узлов:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Nodal Solution > > Nodal Solution> DOF Solution > X-Component of rotation > ОК</p> <p>Видим - угол поворота каждого узла сечения C торсиона составляет:</p> $\varphi_C = ROTX = 0,51579...0,51589 \approx 0,5158 \text{ рад}$ <p>что на 1,5% меньше результата аналитического расчёта (Табл.1д.).</p>	  
56	<p>Слой конечных элементов слева от сечения C:</p> <p>C_P > ESEL, S, CENT, X, 1/2-d/44, 1/2 > Enter</p> <p>Прорисовываем выделенные элементы:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p>  - автоформат	

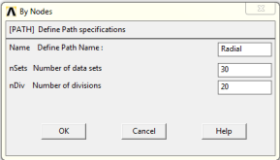
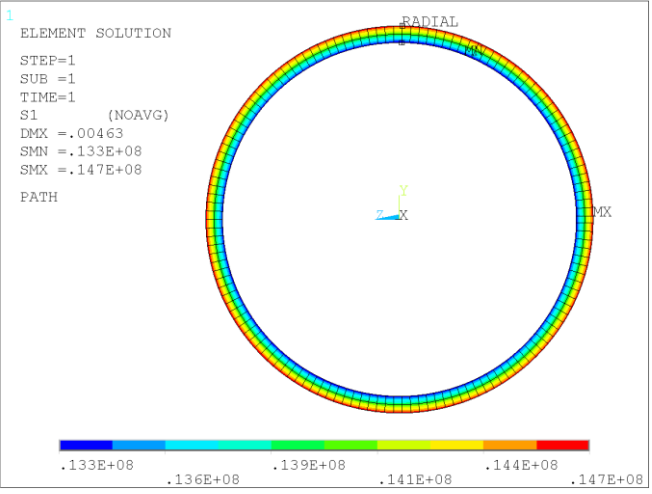
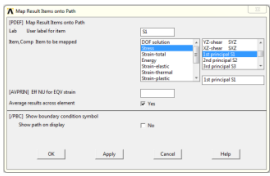
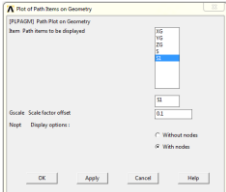
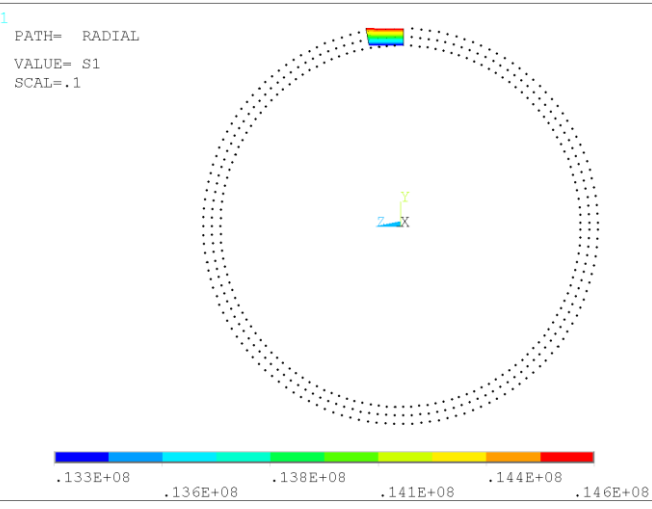
№	Действие	Результат
57	<p>τ при чистом сдвиге по модулю равны первому главному напряжению:</p> <p> - вид справа</p> <p>Напряжения будем смотреть на недеформированной форме:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "0.0"</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем первое главное напряжение</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > > Element Solu > Element Solution > Stress > > 1st Principal stress > OK</p> <p>Видим: напряжения минимальны на центральной линии сечения, а на поверхностях</p> <p>$\tau_{max} = 475 \text{ МПа}$</p> <p>что на 2,87% больше результата аналитического расчёта (Табл. 1д).</p>	
58	<p>Создаём путь (нулевую отметку) эпюры напряжений, такую же, как в Табл..1д. – вертикальный луч из центра сечения:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > Define Path > By Nodes > Кликаем на центральные верхние внутренний и наружный узлы > OK ></p> <p>В графе Name пишем Radial > OK ></p> <p>Прорисовываем путь:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > Plot Path</p>	



№	Действие	Результат
59	<p><i>Этюра:</i></p> <p>Чертить будем этюру первого главного напряжения:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > Map onto Path > В графе Lab пишем название, например S1 В левом окошке выбираем "Stress" В правом окошке выбираем "1st principal S1" > OK</p> <p>Чертим этюру:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > Plot Path Item > > On Geometry</p> <p>Из списка мышкой выбрать S1 Селектор поставить на "With nodes" Уменьшаем масштаб этюры - Gscale пишем 0.1 > OK</p> <p>Видим линейное распределение напряжений от нуля в центре сечения до максимума τ_{max} на его краю (<i>Табл.1д</i>). Первое главное напряжение при чистом сдвиге положительное, напряжению τ оно равно только по модулю, поэтому отрицательная часть этюры как бы повернута в положительную сторону.</p> <p>Ещё раз о том, почему в центре не нуль, а просто относительно небольшое число: напряжения в элементах вычисляются не в узлах, а в гауссовых точках на удалении от них, на узлы напряжения потом экстраполируются и в нуль попадают не всегда.</p>	  





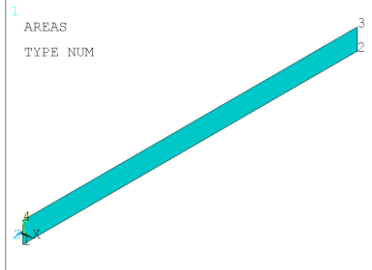
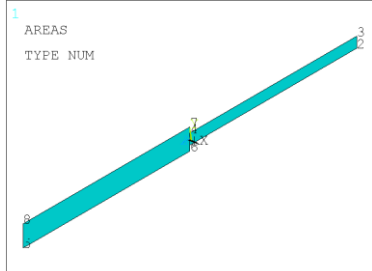
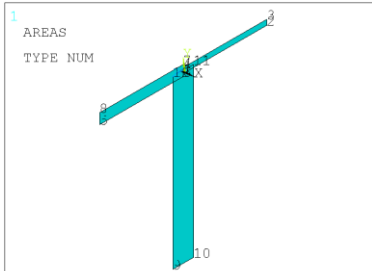
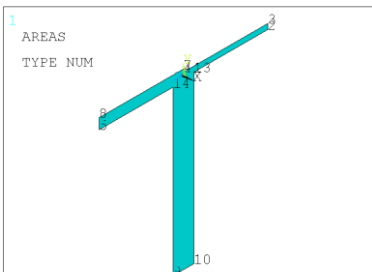
№	Действие	Результат
г) Тorsiон кольцевого профиля		
60	<p><i>Разбиваем меньший объём (разомкнутое кольцо) на конечные элементы:</i></p> <p>Выделить всё: U_M > Select > Everything</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Elements</p> <p> - изометрия;  - автоформат</p> <p>Отобразить граничные условия (закрепления и нагрузки): U_M > PlotCtrls > Symbols > Селектор [/PBC] ставим на "All Applied BCs" > ОК</p> <p>Задельываем вырез конечными элементами: M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > > Volume Sweep > Sweep > В окошке пишем 2 > ОК</p> <p>Прорисовываем: U_M > Plot > Elements</p>	  
61	<p><i>Запускаем расчёт:</i></p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS</p> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Расчёт окончен.</p>	

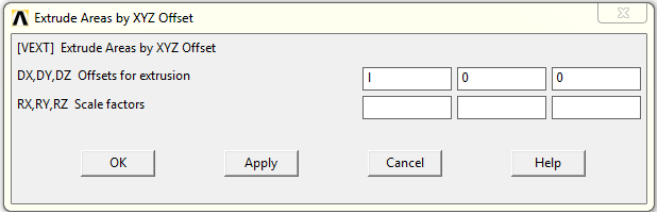

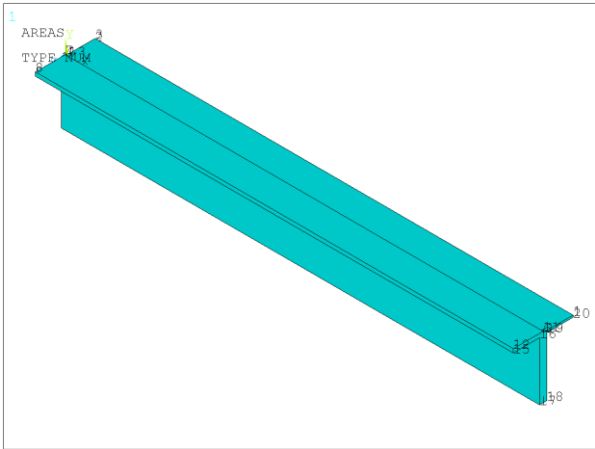
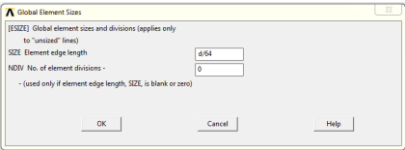
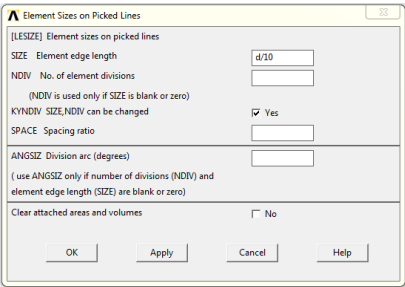
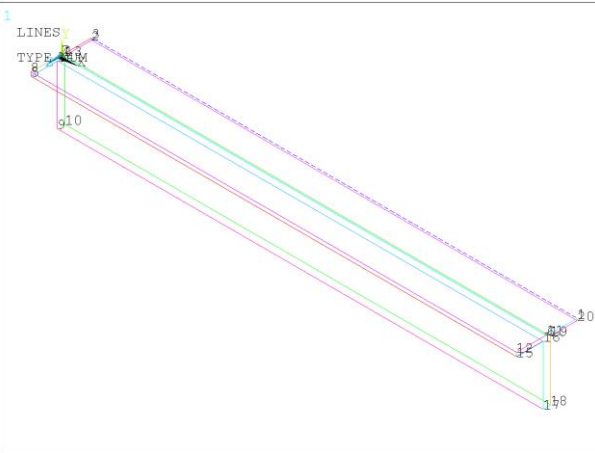
№	Действие	Результат
62	<p><i>Деформированная форма торсиона:</i></p> <p>Масштаб перемещений выбрать автоматически:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "Auto calculated"</p> <p>> OK</p> <p>Деформированная форма – синие элементы, недеформированная – чёрная сетка</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape > KUND установить Def shape only</p> <p>> OK</p> <p>Депланаций не видно. В круглых и кольцевых профилях их и не должно быть.</p>	
63	<p><i>Угол поворота сечения C:</i></p> <p>Узлы:</p> <p>U_M > Select > Entities</p> <p>"Nodes", "By location", "X coordinates"</p> <p>В поле "Min, Max" пишем 1/2, 1/2</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем выделенные узлы: U_M > Plot > Nodes</p> <p>Улы поворота узлов:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Nodal Solution > > Nodal Solution > DOF Solution > X-Component of rotation > OK</p> <p>Видим - угол поворота каждого узла сечения C торсиона составляет:</p> $\varphi_C = ROTX = 0,0013985...0,0014034 \approx 0,0014 \text{ рад}$ <p>что на 0,1% меньше результата аналитического расчёта (Табл.1г.).</p>	 <pre> PRNSOL Command File PRINT ROT NODAL SOLUTION PER NODE ***** POSTS 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 176 0.13985E-02 537 0.13984E-02 878 0.13984E-02 1229 0.13984E-02 26214 0.13985E-02 26215 0.13985E-02 26217 0.13985E-02 </pre>

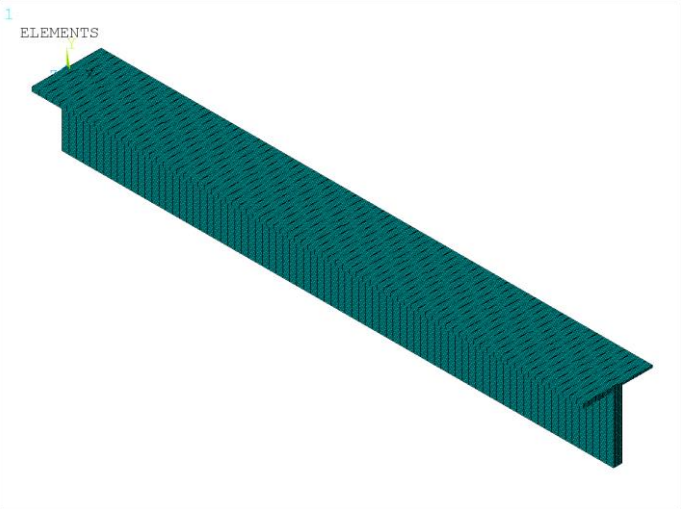
№	Действие	Результат
64	<p>Слой конечных элементов слева от сечения C:</p> <p>C_P > ESEL, S, CENT, X, l/2-d/44, l/2 > Enter</p> <p>Прорисовываем выделенные элементы:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p> <p> - автоформат</p>	 <p>1 ELEMENTS</p>
65	<p>τ при чистом сдвиге по модулю равны первому главному напряжению:</p> <p> - вид справа</p> <p>Напряжения будем смотреть на недеформированной форме:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "0.0"</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем первое главное напряжение</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Element Solu > Element Solution > Stress > 1st Principal stress > OK</p> <p>Видим: напряжения минимальны на центральной линии сечения, а на поверхностях</p> $\left. \begin{array}{l} \tau_{min} = 13,3 \text{ МПа} \\ \tau_{max} = 14,7 \text{ МПа} \end{array} \right\} \tau_{mid} = 14 \text{ МПа}$ <p>что в точности совпадает с результатом аналитического расчёта (Табл. 1з).</p>	 <p>1 ELEMENT SOLUTION</p> <p>STEP=1 SUB =1 TIME=1 S1 (NOAVG) DMX = .00463 SMN = .133E+08 SMX = .147E+08</p> <p>.133E+08 .136E+08 .139E+08 .141E+08 .144E+08 .147E+08</p>

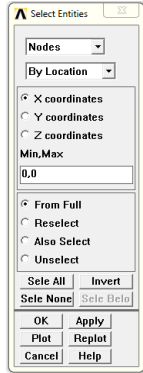
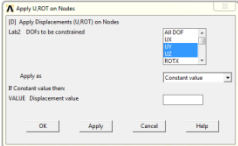

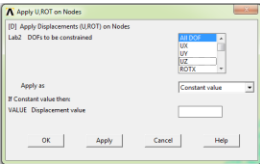
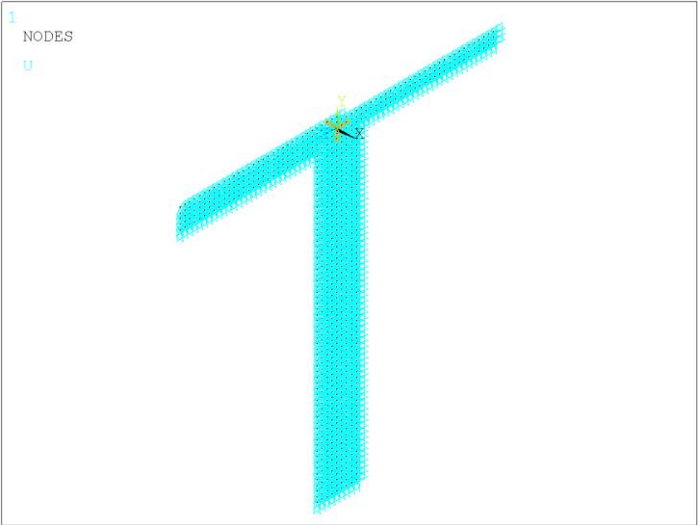
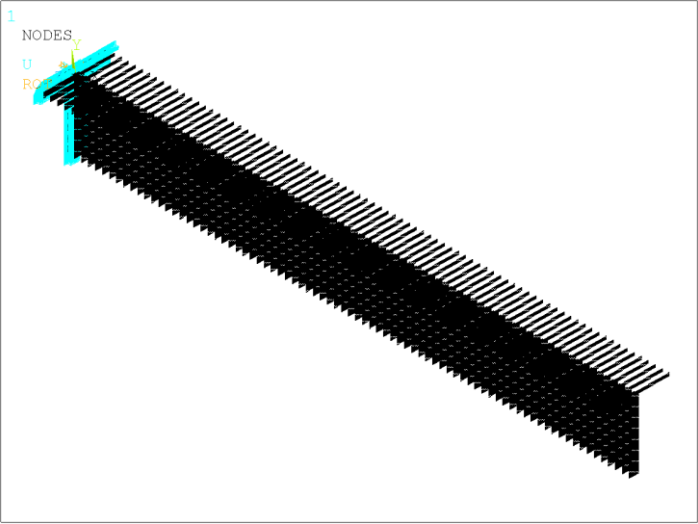
№	Действие	Результат
66	<p>Создаём путь (нулевую отметку) эюры напряжений, такую же, как в Табл.1г. – вертикальный луч из центра сечения:</p> <p>M_M> General Postproc> Path Operations> Define Path> By Nodes> Кликаем на центральные верхние внутренний и наружный узлы > OK ></p> <p>В графе Name пишем Radial > OK ></p> <p>Прорисовываем путь: M_M > General Postproc > Path Operations > Plot Path</p> 	
67	<p>Эюры:</p> <p>Чертить будем эюру первого главного напряжения:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > Map onto Path > В графе Lab пишем название, например S1 В левом окошке выбираем "Stress" В правом окошке выбираем "1st principal S1" > OK</p> <p>Чертим эюру:</p> <p>M_M > General Postproc > Path Operations > Plot Path Item > > On Geometry</p> <p>Из списка мышкой выбрать S1 Селектор поставить на "With nodes" Уменьшаем масштаб эюры – Gscale пишем 0.1 > OK</p> <p>Видим слабое изменение интенсивности напряжений по высоте стенки поперечного сечения по линейному закону (Табл.1г.).</p>  	

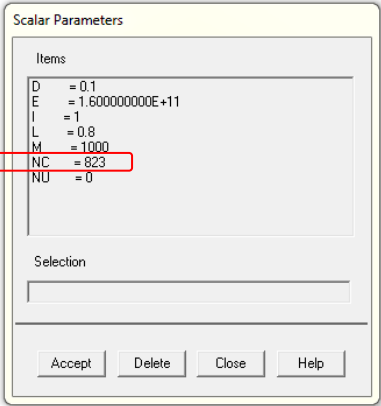
№	Действие	Результат
68	<p><i>Удаляем торсион кольцевого поперечного сечения:</i></p> <p>Выделить всё: U_M > Select > Everything</p> <p>Прорисовываем все элементы: U_M > Plot > Elements</p> <p> - изометрия;  - автоформат</p> <p>Очищаем объёмы от конечных элементов: M_M > Preprocessor > Clear > Volumes > Pick All</p> <p>Удаляем объёмы: M_M > Preprocessor > Modeling > Delete > Volume and Below > > Pick All</p>	



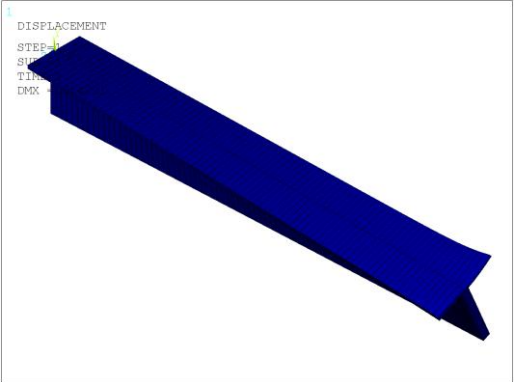
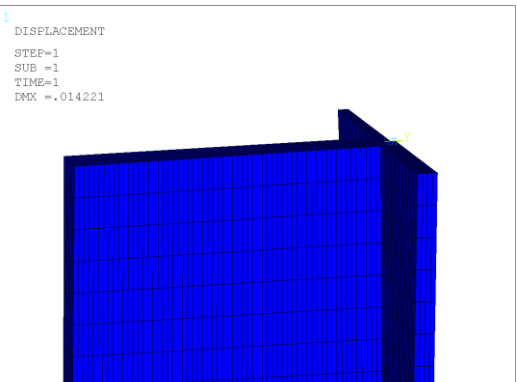
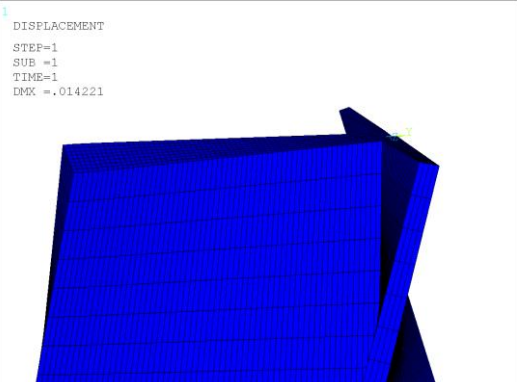
№	Действие	Результат
г) Торсион составного профиля		
69	<p><i>Поперечное сечение, составленное из трёх прямоугольников:</i></p> <p>Прямоугольники – правый, левый, нижний:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > > Rectangle > By Centr & Cornr ></p> <p>В окошке X пишем d/4 В окошке Width пишем d/2 В окошке Height пишем d/32 > Apply ></p> <p>В окошке X пишем -d/4 В окошке Width пишем d/2 В окошке Height пишем d/16 > Apply ></p> <p>В окошке Y пишем -d/2 В окошке Width пишем d/8 В окошке Height пишем d > OK</p> <p>Сливаем прямоугольники в одну поверхность:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > > Add > Areas > Pick All</p> <p>Прорисовываем поверхности:</p> <p>U_M > Plot > Areas</p>  - автоформат (меню справа).	      


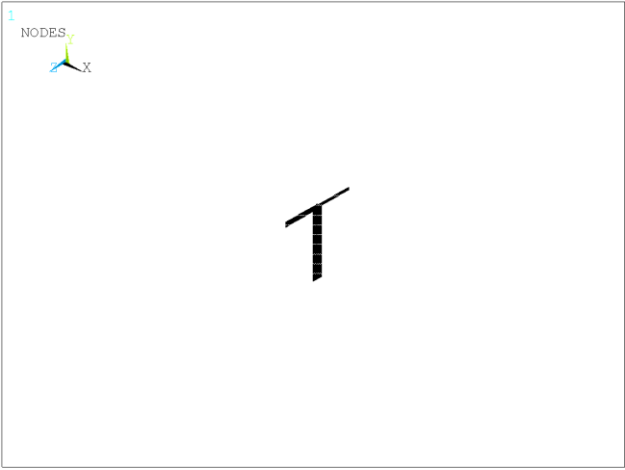
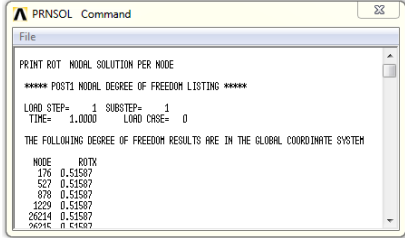

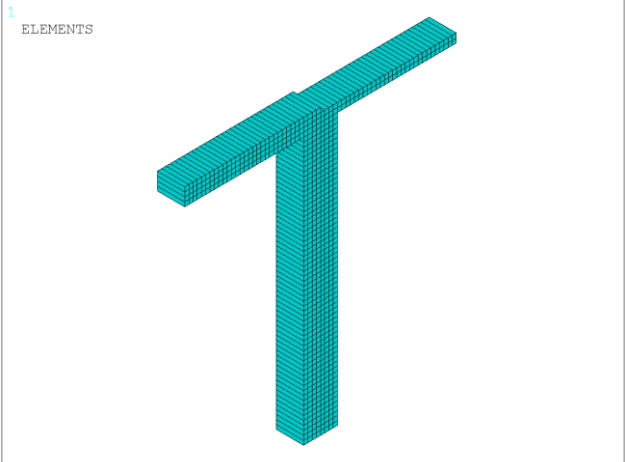
№	Действие	Результат
70	<p><i>Выдавливание объёмов:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > > By XYZ Offset > Pick All ></p> <p>Значение DX указать <i>l</i> > OK</p> <p>Прорисовываем объёмы:</p> <p>U_M > Plot > Volumes</p>  <p> - автоформат (меню справа).</p>	
71	<p><i>Размер стороны конечного элемента для разбиения:</i></p> <p>Размер стороны элемента в плоскости сечения:</p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > > Global > Size</p> <p>Size пишем, например $d/64$ > OK</p> <p>Размер стороны элемента в осевом направлении:</p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > > Lines > Picked Lines</p> <p>Кликаем мышкой на любую продольную линию > OK ></p> <p>В поле Size пишем, например $d/10$ > OK</p> <p>Прорисовываем линии, смотрим разметку:</p> <p>U_M > Plot > Lines</p>  	


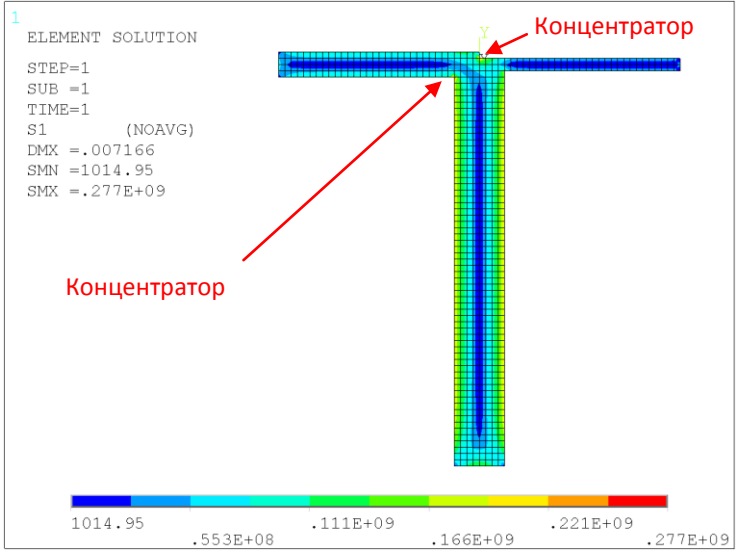
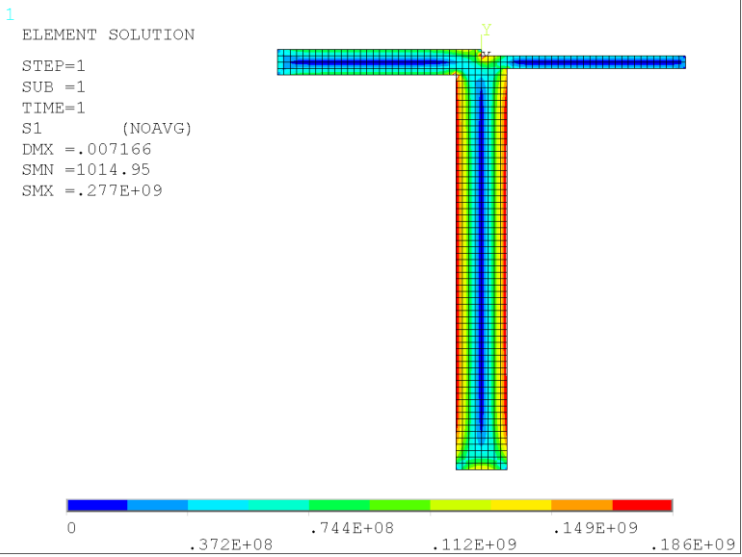
№	Действие	Результат
72	<p><i>Разбиваем объём на конечные элементы:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Volume Sweep > Sweep > > Pick All</p> <p>Прорисовываем:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p>	

№	Действие	Результат
73	<p>Заделка:</p> <p>Выделяем узлы сечения <i>B</i> торсиона (рис. 1.):</p> <pre>U_M > Select > Entites</pre> <p>"Nodes", "By location", "X coordinates</p> <p>В поле "Min,Max" пишем 0,0</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем выделенные узлы:</p> <pre>U_M > Plot > Nodes</pre>   <p> - автоформат</p> <p>Узлы корневого сечения, будут закреплены в его плоскости (ZY):</p> <pre>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply ></pre> <p>> Structural > Displacement > On Nodes > Pick All ></p> <p>Lab2 установить "UY" и "UZ"</p> <p>> OK</p> <p>Один из узлов будет закреплён в осевом направлении (вдоль оси X):</p> <pre>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply ></pre> <p>> Structural > Displacement > On Nodes ></p> <p>Кликаем на любой узел, например в начале глобальной декартовой системы координат</p> <p>> OK ></p> <p>Lab2 установить "All DOF"</p> <p>> OK</p> <p>Выделить всё:</p> <pre>U_M > Select > Everything</pre> <p>Прорисовываем узлы:</p> <pre>U_M > Plot > Nodes</pre> 	 

№	Действие	Результат														
74	<p><i>Внешний момент распределён по узлам сечения D (рис.1.):</i></p> <p>Выделяем торцевые узлы точки D:</p> <p>U_M > Select > Entites "Nodes", "By location", "X coordinates В поле "Min,Max" пишем l,l > OK</p> <p>Подсчитываем количество выделенных узлов, запоминаем его в параметре NC:</p> <p>C_P > *GET,NC,NODE,0,COUNT > Enter</p> <p>Прикладываем внешний крутящий момент M, распределённый по NC узлам:</p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On Nodes > Pick All Lab установить "MX" VALUE установить "M/NC" > OK</p> <p>Выделить всё:</p> <p>U_M > Select > Everything</p> <p>Прорисовываем всё, что есть:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p>	<p>Результат</p>  <p>The 'Scalar Parameters' dialog box shows the following values:</p> <table border="1"> <tr><td>D</td><td>= 0.1</td></tr> <tr><td>E</td><td>= 1.600000000E+11</td></tr> <tr><td>I</td><td>= 1</td></tr> <tr><td>L</td><td>= 0.8</td></tr> <tr><td>M</td><td>= 1000</td></tr> <tr><td>NC</td><td>= 823</td></tr> <tr><td>NU</td><td>= 0</td></tr> </table> <p>Below the dialog box is a 3D visualization of the beam element mesh. The beam is shown in a perspective view, with a coordinate system (U, V, W) at the top left. The mesh consists of many small rectangular elements along the length of the beam. The beam is supported at the bottom right end.</p>	D	= 0.1	E	= 1.600000000E+11	I	= 1	L	= 0.8	M	= 1000	NC	= 823	NU	= 0
D	= 0.1															
E	= 1.600000000E+11															
I	= 1															
L	= 0.8															
M	= 1000															
NC	= 823															
NU	= 0															
75	<p><i>Запускаем расчёт:</i></p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS</p> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Расчёт окончен.</p>															

№	Действие	Результат
76	<p><i>Деформированная форма торсиона:</i></p> <p>Масштаб перемещений выбрать автоматически:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "Auto calculated"</p> <p>> OK</p> <p>Деформированная форма – синие элементы, недеформированная – чёрная сетка</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape > KUND установить Def shape only</p> <p>> OK</p> <p>Удерживая левой рукой клавишу «Ctrl» на клавиатуре, левой и правой кнопками мыши вращайте и перемещайте модель в рабочем поле. Колёсико мыши меняйте масштаб. Посмотрите на заделанный торец торсиона, деформации там видны лучше всего. Да, по сравнению с вращательными перемещениями, перемещения осевые невелики. Увеличьте масштаб для того, чтобы увеличить их:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "User specified"</p> <p>User specified factor увеличиваем, например, до 30</p> <p>> OK</p> <p>Теперь деформации видны гораздо лучше. Сравните полученное изображение с <i>рис.2е</i>.</p> <p>Возвращаемся к недеформированной модели.:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p> <p> - изометрия;</p> <p> - автоформат</p>	  

№	Действие	Результат
77	<p>Угол поворота сечения C:</p> <p>Узлы:</p> <p>U_M > Select > Entites "Nodes", "By location", "X coordinates" В поле "Min,Max" пишем 1/2, 1/2 > ОК</p> <p>Прорисовываем выделенные узлы:</p> <p>U_M > Plot > Nodes</p> <p>Улы поворота узлов:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Nodal Solution > > Nodal Solution> DOF Solution > X-Component of rotation > ОК</p> <p>Видим - угол поворота каждого узла сечения C торсиона составляет:</p> $\varphi_C = ROTX = 0,076 \text{ рад}$ <p>что на 6% больше результата аналитического расчёта (Табл. 1е.).</p>	  
78	<p>Слой конечных элементов слева от сечения C:</p> <p>C_P > ESEL, S, CENT, X, 1/2-d/10, 1/2 > Enter</p> <p>Прорисовываем выделенные элементы:</p> <p>U_M > Plot > Elements</p>  - автоформат	

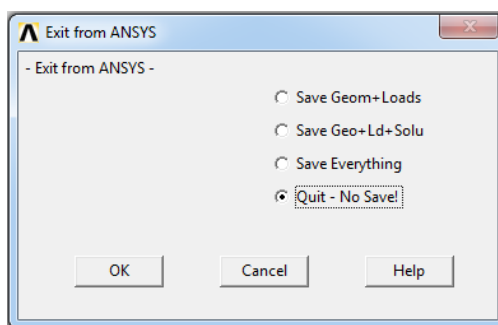
№	Действие	Результат
79	<p>τ при чистом сдвиге по модулю равны первому главному напряжению:</p> <p> - вид справа</p> <p>Напряжения будем смотреть на недеформированной форме:</p> <pre>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "0.0" > OK</pre> <p>Прорисовываем первое главное напряжение</p> <pre>M_M> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> > Element Solu > Element Solution > Stress > > 1st Principal stress > OK</pre> <p>Видим: цветовую шкалу сбивают концентрации напряжений в районах резкого изменения геометрии профиля. Настроим цветовую шкалу вручную, установив верхнюю планку цветовой шкалы таким образом, чтобы серый цвет (напряжения выше максимума на цветовой шкале) только-только начал появляться в обширных зонах поперечного сечения, а не только в двух его точках-концентраторах:</p> <pre>U_M > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours > Селектор устанавливаем на "User specified"</pre> <p>В поле VMIN пишем 0 В поле VMAX пишем 186e6 > OK</p> <p>Итак, распределение напряжений в каждом из прямоугольников такое же, как для прямоугольника одиночного, в центре – нуль, на краях – максимум (Табл. 1е). Максимальное напряжение реализуется в стенке наибольшей толщины:</p> $\tau_{max} = 186 \text{ МПа}$ <p>что на 3,7% больше результата аналитического расчёта (Табл. 1е).</p>	<p>Результат</p> <p>1 ELEMENT SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 S1 (NOAVG) DMX =.007166 SMN =1014.95 SMX =.277E+09</p>  <p>1 ELEMENT SOLUTION STEP=1 SUB =1 TIME=1 S1 (NOAVG) DMX =.007166 SMN =1014.95 SMX =.277E+09</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.