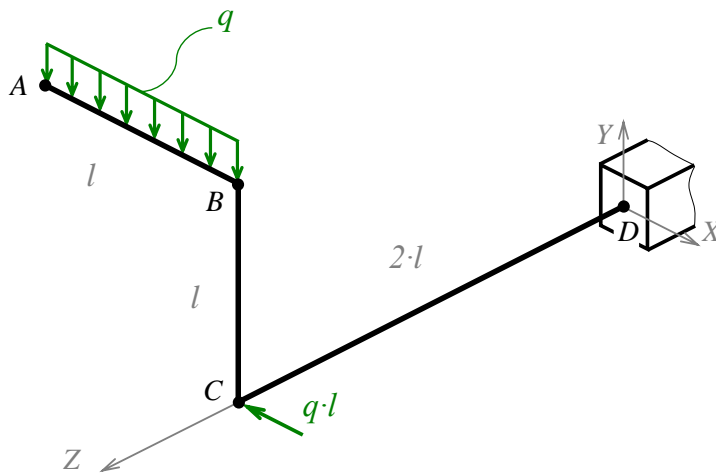


Q-03 (ANSYS)

Формулировка задачи:



Дано: l, q .

Пространственная рама выполнена из трёх прямых стержней; нагружена распределённой силой q на последнем участке.

Требуется:

Построить эпюру M внутренних изгибающих и крутящих моментов в стержнях рамы.

Аналитический расчёт (см. [Q-03](#)) даёт следующую эпюру (в предположении, что главные центральные оси y и z поперечных сечений стержней рамы ориентированы по вертикали, по горизонтали или фронтально):

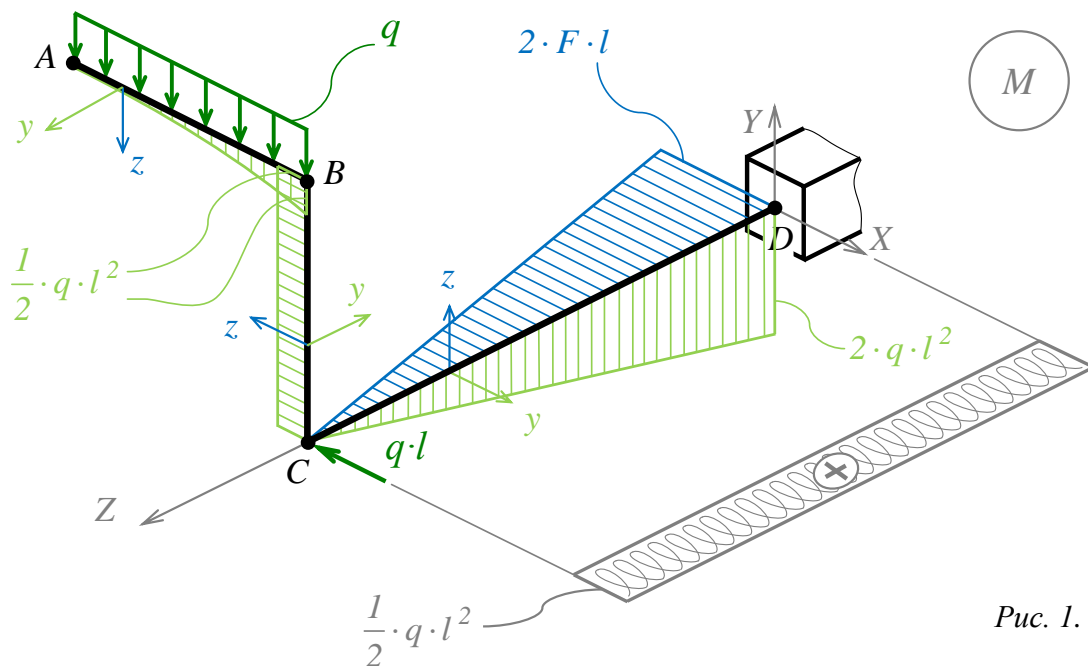
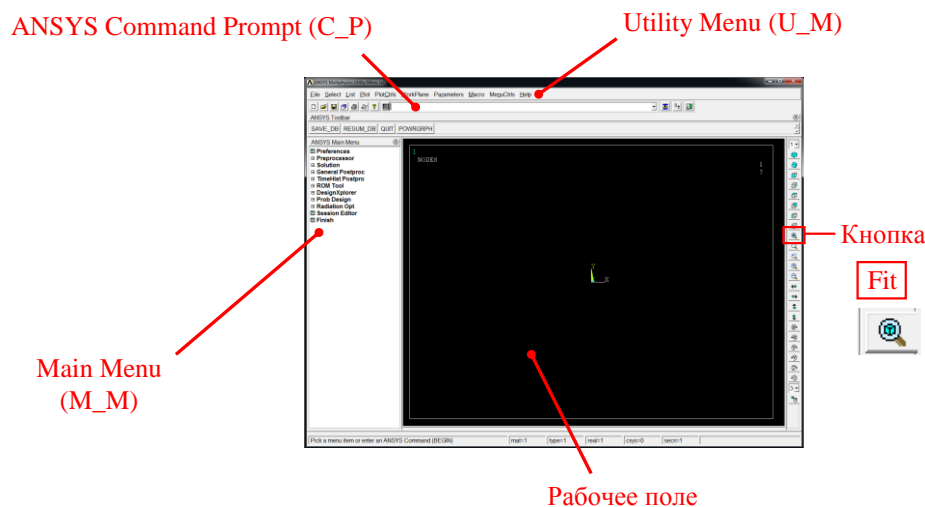


Рис. 1.

Задача данного примера: при помощи ANSYS Multyphysics получить эту же эпюру методом конечных элементов.

Предварительные настройки:

Для решения задачи используется ANSYS Multiphysics 14.0:



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

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

Меняем чёрный цвет фона на белый:

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

Убрать пункты меню, не относящиеся к прочностным расчётам:

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

Нумеровать точки и линии твердотельной модели, узлы и элементы модели конечноэлементной:

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

Отметить KP, LINE, NODE, установить Elem на "No numbering",
установить [/NUM] на "Colors & numbers" > OK

Увеличить размер шрифта:

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

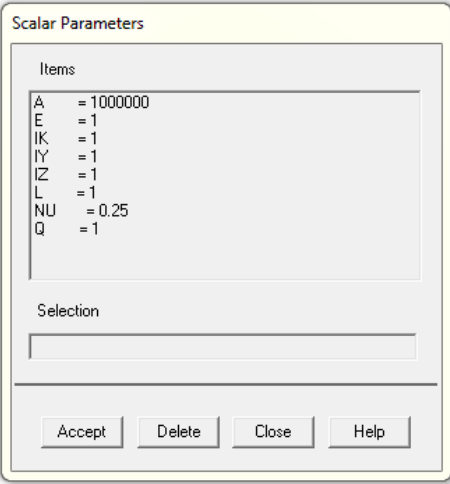
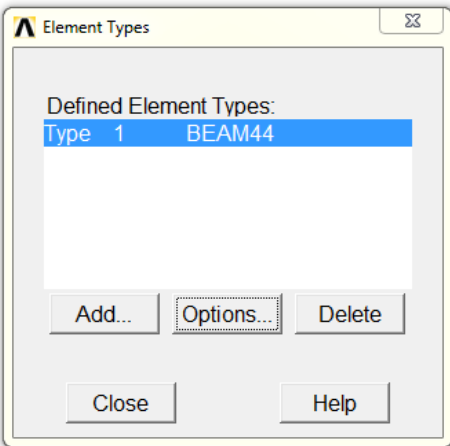
Установить «Размер» на «22» > OK

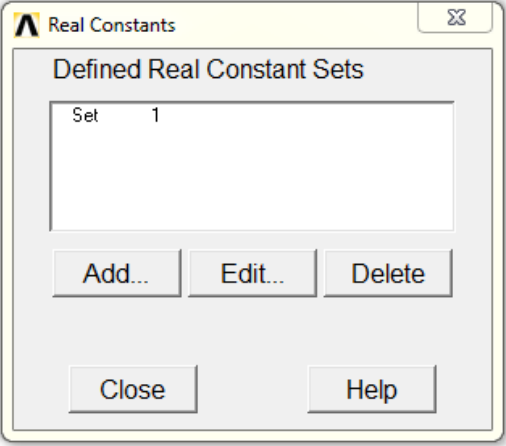
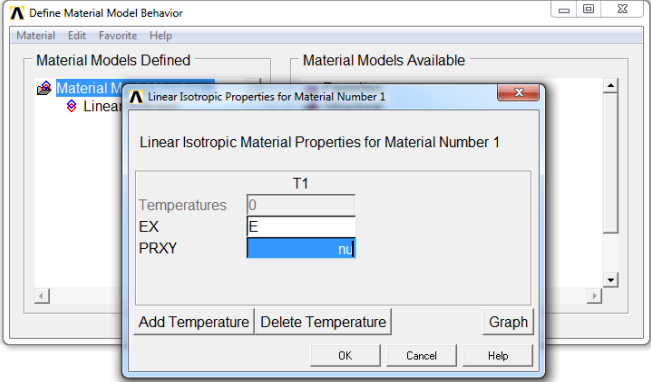
```
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Entity Font >
```

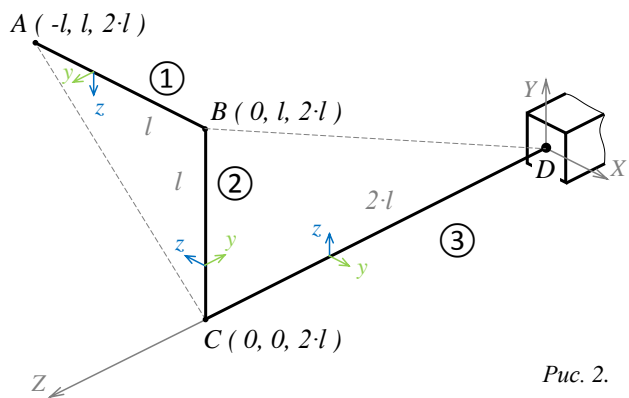


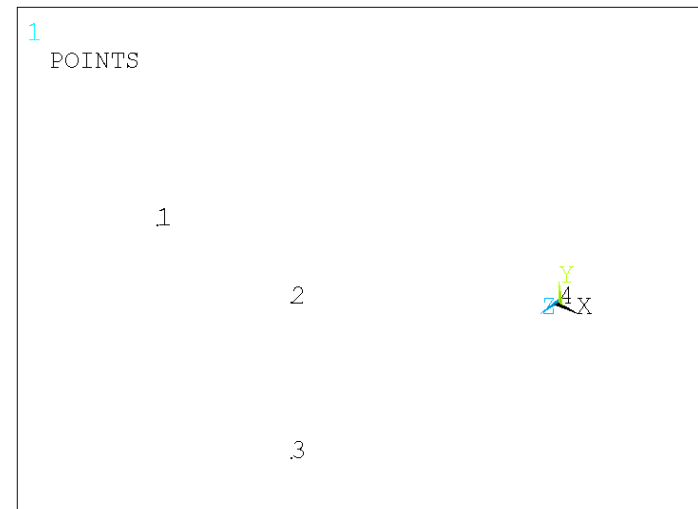
Установить «Размер» на «22» > OK

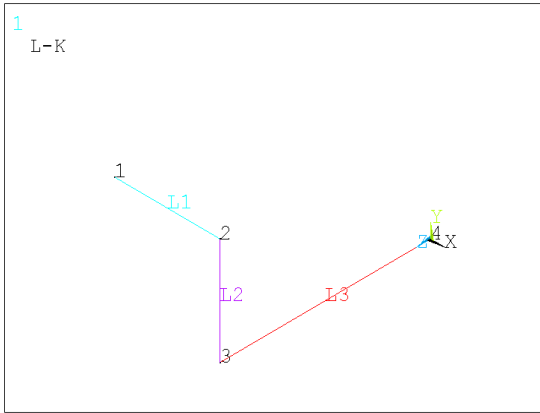
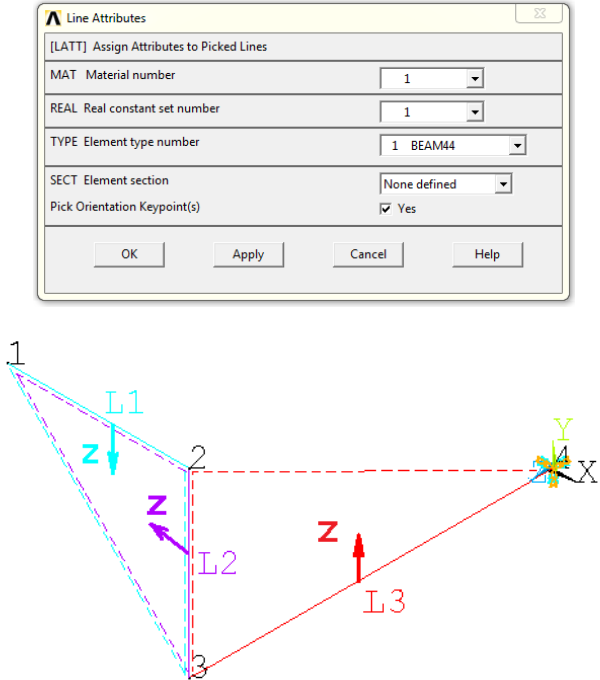
Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.

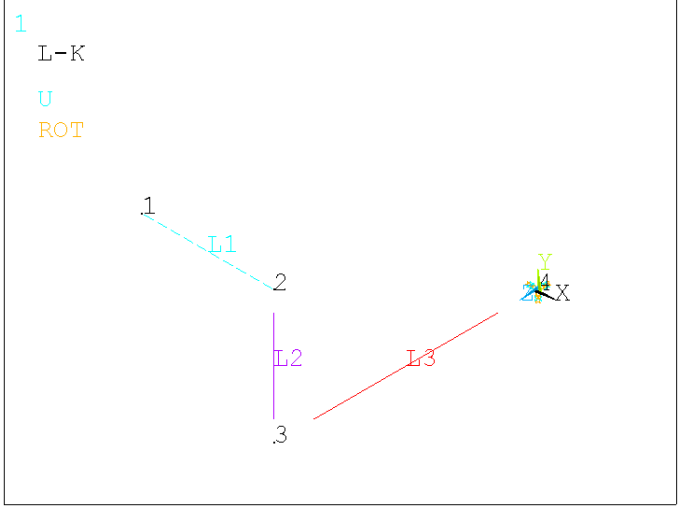

Решение задачи: Приравняв q и l к единице, результаты получим в виде коэффициентов перед формулами. Площадь A поперечного сечения задаём большой, дабы вклад в перемещения вносил только изгиб. Значения изгибных моментов инерции I_y, I_z и крутильной жёсткости I_k на эпюру не влияют.


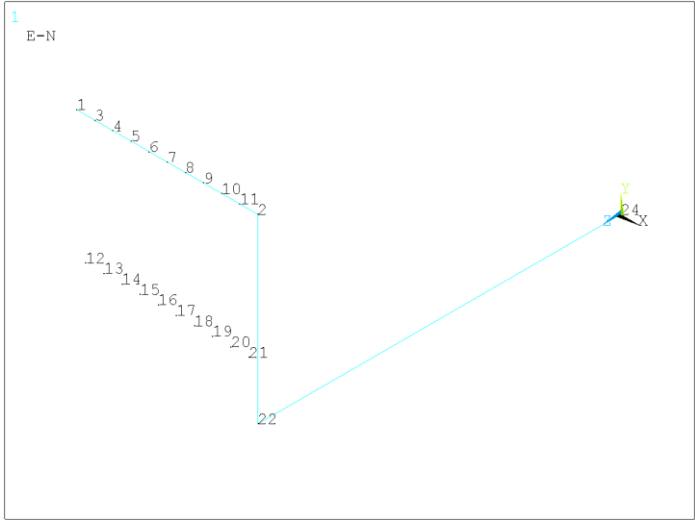
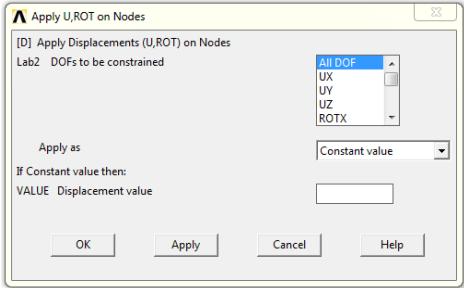
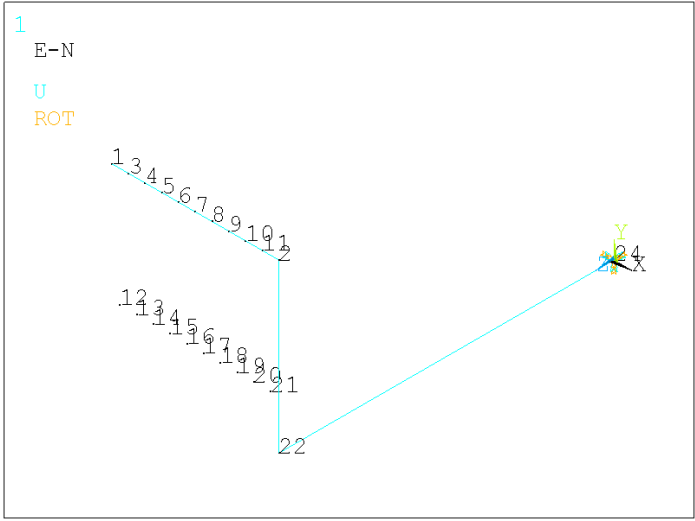
№	Действие	Результат
1	<p><i>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</i></p> <pre> U_M > Parameters > Scalar Parameters > q=1 > Accept > l=1 > Accept > A=1e6 > Accept > Iy=1 > Accept > Iz=1 > Accept > Ik=1 > Accept > E=1 > Accept > nu=0.25 > Accept > > Close </pre>	
2	<p><i>Первая и единственная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

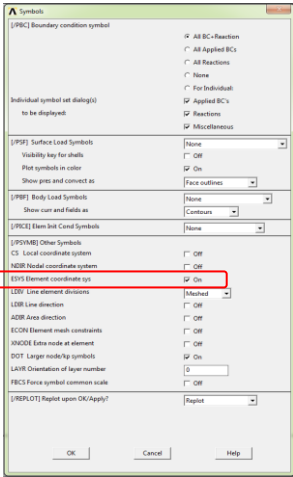
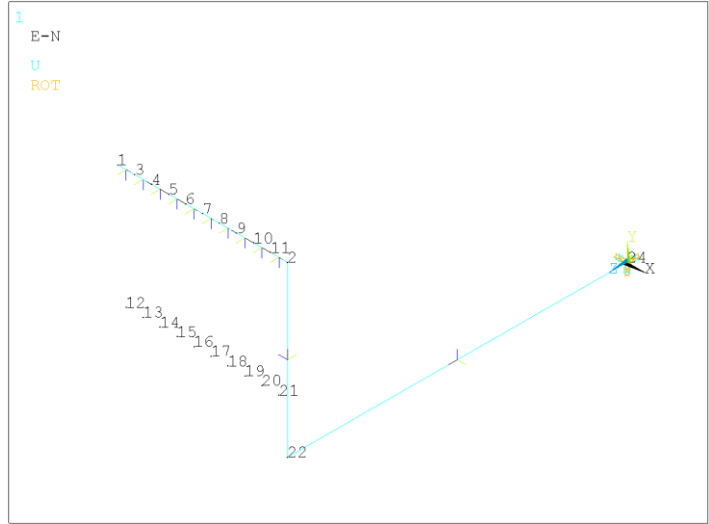
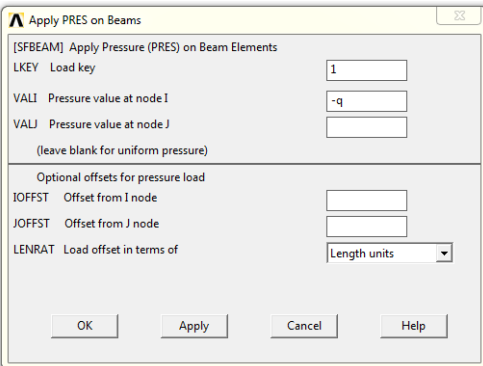
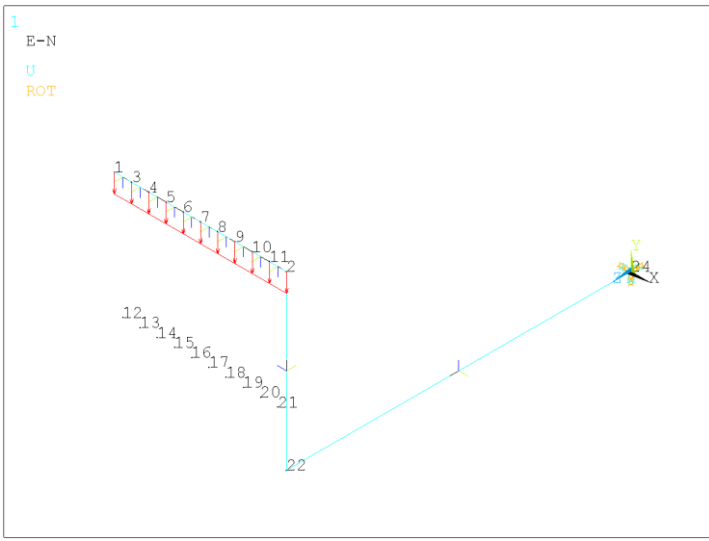
№	Действие	Результат
3	<p><i>Первая и единственная строка в таблице наборов реальных констант :площадь поперечного сечения = A; моменты инерции = I_z и I_y; высота сечения от осей изгиба = z_{max} и u_{max}; и геометрическая жёсткость при кручении = I_k:</i></p> <p>C_P > R, 1, A, I_z, I_y, 1/100, 1/100, I_k > Enter</p> <p>Посмотрим таблицу реальных констант: M_M > Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete > Close</p>	
4	<p><i>Свойства материала стержня – модуль упругости и коэффициент Пуассона:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic > EX пишем "E", PRXY пишем "nu" > OK Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p>	

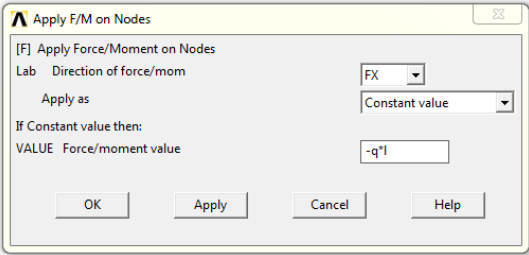
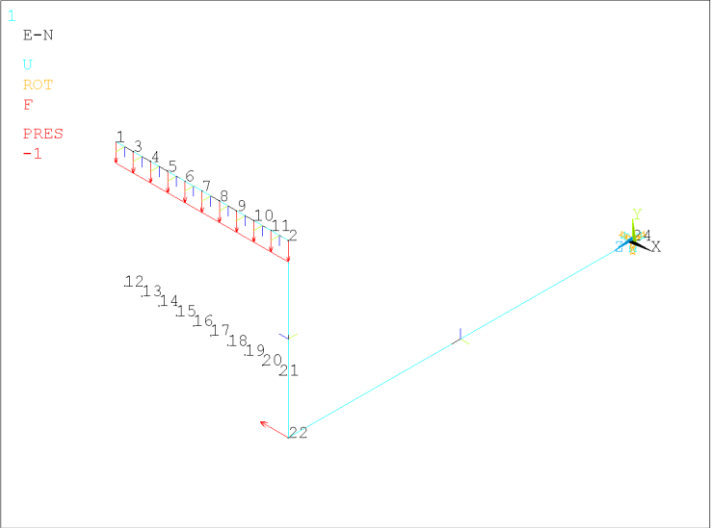
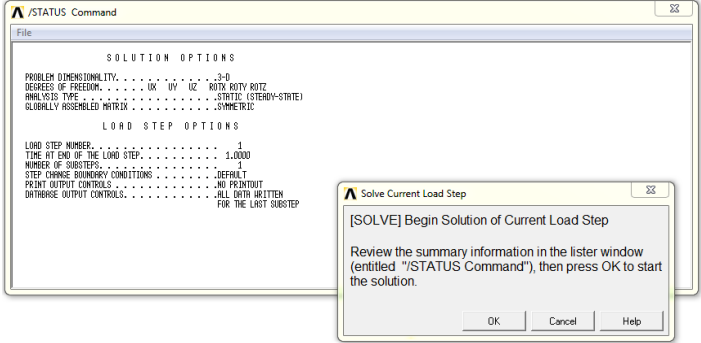
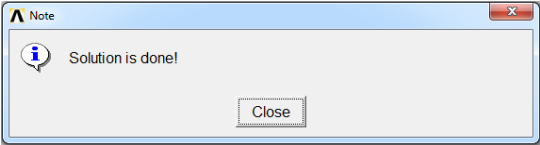
№	Действие	Результат
Твердотельная модель		
5	<p><i>Координаты ключевых точек твердотельной модели рамы:</i></p> <p>Определяемся с положением точек рамы относительно глобальной декартовой системы координат. Начало отсчёта поместим, например, в заделке рамы.</p> <p>A, B, C и D – точки конструктивные;</p> <p>B, A и C – также служат, как ориентационные для участков ①, ② и ③ соответственно. Вместе с начальной и конечной точками соответствующего участка, ориентационная точка задаёт полулюскость, в которой лежат главные центральные оси z поперечных сечений его балочных конечных элементов.</p>	 <p style="text-align: right;"><i>Рис. 2.</i></p>
6	<p><i>Проставляем точки твердотельной модели $A \rightarrow 1, B \rightarrow 2, C \rightarrow 3$ и $D \rightarrow 4$:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS > NPT пишем 1 X, Y, Z пишем $-l, l, 2 \cdot l$ > Apply > NPT пишем 2 X, Y, Z пишем $0, l, 2 \cdot l$ > Apply > NPT пишем 3 X, Y, Z пишем $0, 0, 2 \cdot l$ > Apply > NPT пишем 4 X, Y, Z пишем $0, 0, 0$ > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Изометрия:  Автоформат: </p>	

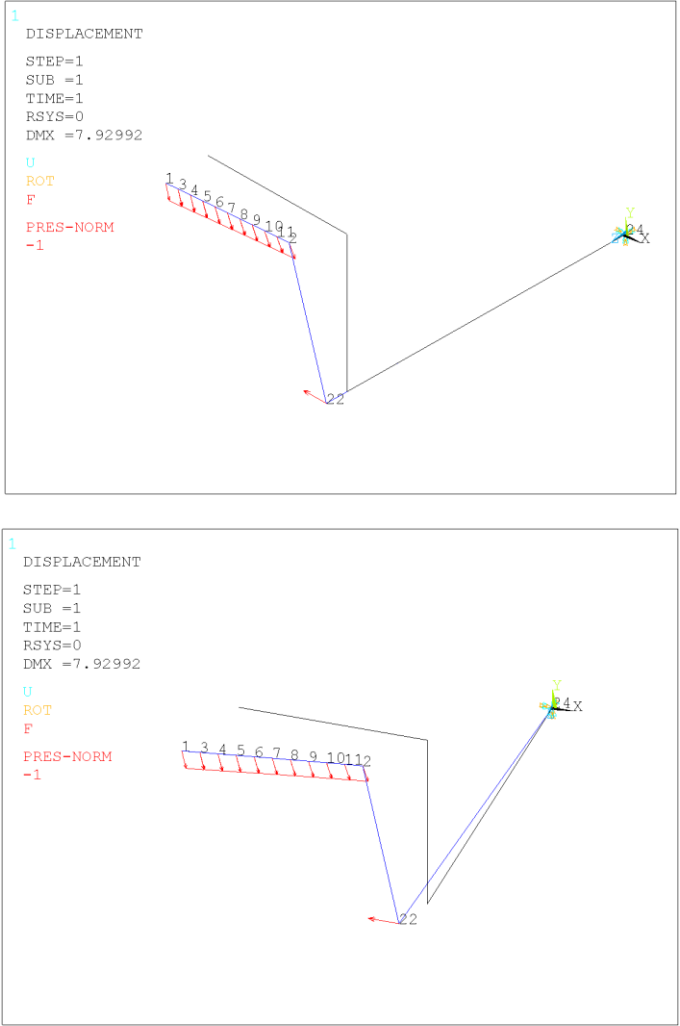
№	Действие	Результат
7	<p><i>Линии участков ①, ② и ③ протягиваем по направлениям осей X, Y и Z:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line ></p> <p>Левой кнопкой мыши последовательно кликаем на точки 1, 2 > Apply > 3, 2 > Apply > 4, 3 > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	
Конечноэлементная модель		
8	<p><i>Атрибуты разбиения:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Lines ></p> <p>Левой кнопкой мыши кликнуть на линию L1 > OK ></p> <p>MAT установить "1"</p> <p>REAL установить "1"</p> <p>TYPE установить "1 BEAM44"</p> <p>Pick Orientation Keypoint(s) ставим галочку "Yes" > OK ></p> <p>Кликнуть на точку 3 - ориентационную для линии L1 > Apply ></p> <p>Кликнуть на линию L2 > OK > OK ></p> <p>Кликнуть на точку 1 - ориентационную для линии L2 > Apply ></p> <p>Кликнуть на линию L3 > OK > OK ></p> <p>Кликнуть на точку 2 - ориентационную для линии L3 > OK</p>	

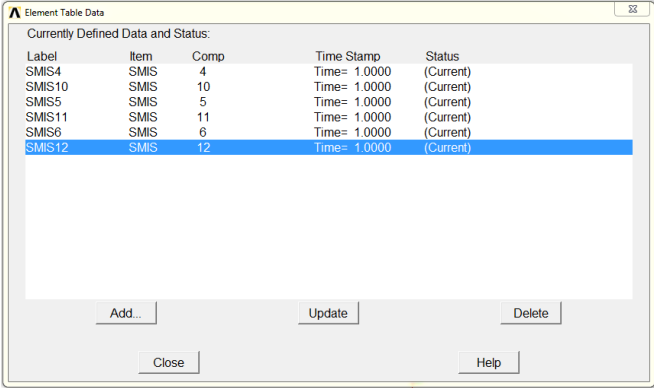
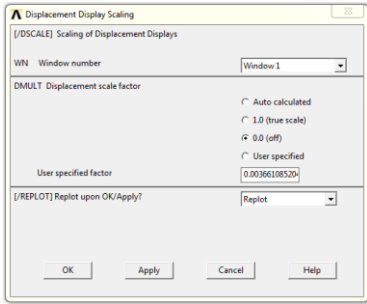
№	Действие	Результат
9	<p>Участок с распределённой нагрузкой нужно бить несколькими балочными конечными элементами, для участков без распределённой нагрузки хватит одного элемента:</p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > ManualSize > > Lines > Picked Lines ></p> <p>Левой кнопкой мыши кликаем на линию L1 > OK ></p> <p>NDIV пишем 10 > Apply ></p> <p>Левой кнопкой мыши кликаем на линии L2 и L3 > OK ></p> <p>NDIV пишем 1 > OK ></p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	
10	<p>Рабиваем линию на элементы:</p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines > Pick All > > OK ></p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Видим сразу две модели – твердотельную и построенную по ней конечноэлементную. Рисунок неудобочитаем.</p>	

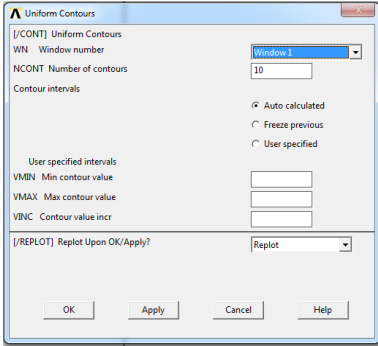
№	Действие	Результат
11	<p>Указываем, что именно нужно теперь прорисовывать по команде Multi-Plots:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Multi-Plot Controls... > Появляется первое окно Multi-Plotting > ОК ></p> <p>Появляется второе окно Multi-Plotting, оставляем в нём отметки только напротив Nodes и Elements > ОК</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Читабельность рисунка улучшилась, однако ориентационный узел для участка ② и ориентационный узел для участка ③ “портят” масштаб. Масштаб подстраиваем кнопками вспомогательной панели справа .</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Replot</p>	
12	<p><i>Закрепления:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes ></p> <p>Левой кнопкой мыши нажать на узел 24 в начале координат > ОК ></p> <p>Lab2 установить “All DOF” > ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> 	

№	Действие	Результат
13	<p><i>Проверяем ориентацию поперечного сечения на стержнях рамы:</i></p> <p>Прорисовка осей систем координат балочных конечных элементов:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Symbols > ESYS ставим галочку On > OK</p> <p>Оси z (синяя чёрточка) и y (зелёная чёрточка) расположены так, как нужно, в соответствии с <i>рис.1</i>.</p> 	
14	<p><i>Поперечная распределённая нагрузка q:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Beams ></p> <p>Левой кнопкой мыши отмечаем десять элементов первого участка > Apply ></p> <p>LKEY пишем 1</p> <p>VAL1 пишем -q</p> <p>> OK</p> <p>Обновляем изображение:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p> 	

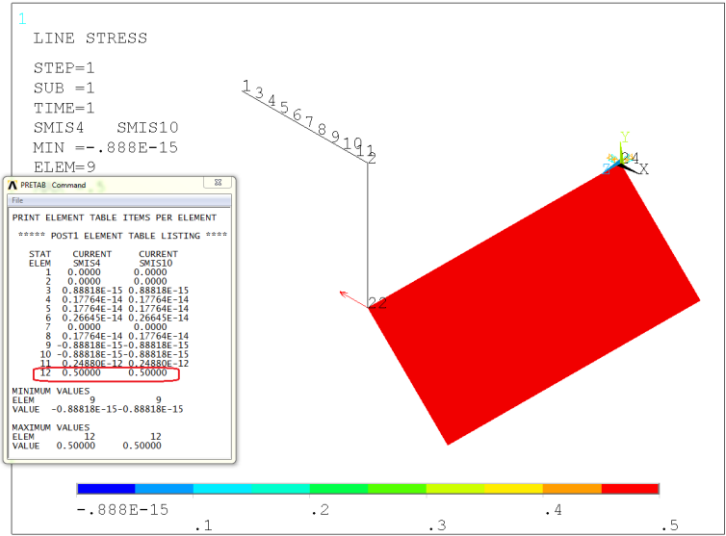
№	Действие	Результат
15	<p><i>Сосредоточенная сила:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On Nodes > Левой кнопкой мыши кликнуть на узел 22 > OK > Lab установить "FX" VALUE установить "-q*1" > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> 	
Расчёт		
16	<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. Расчёт пошёл. Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Закройте это окно. Расчёт окончен.</p>	 

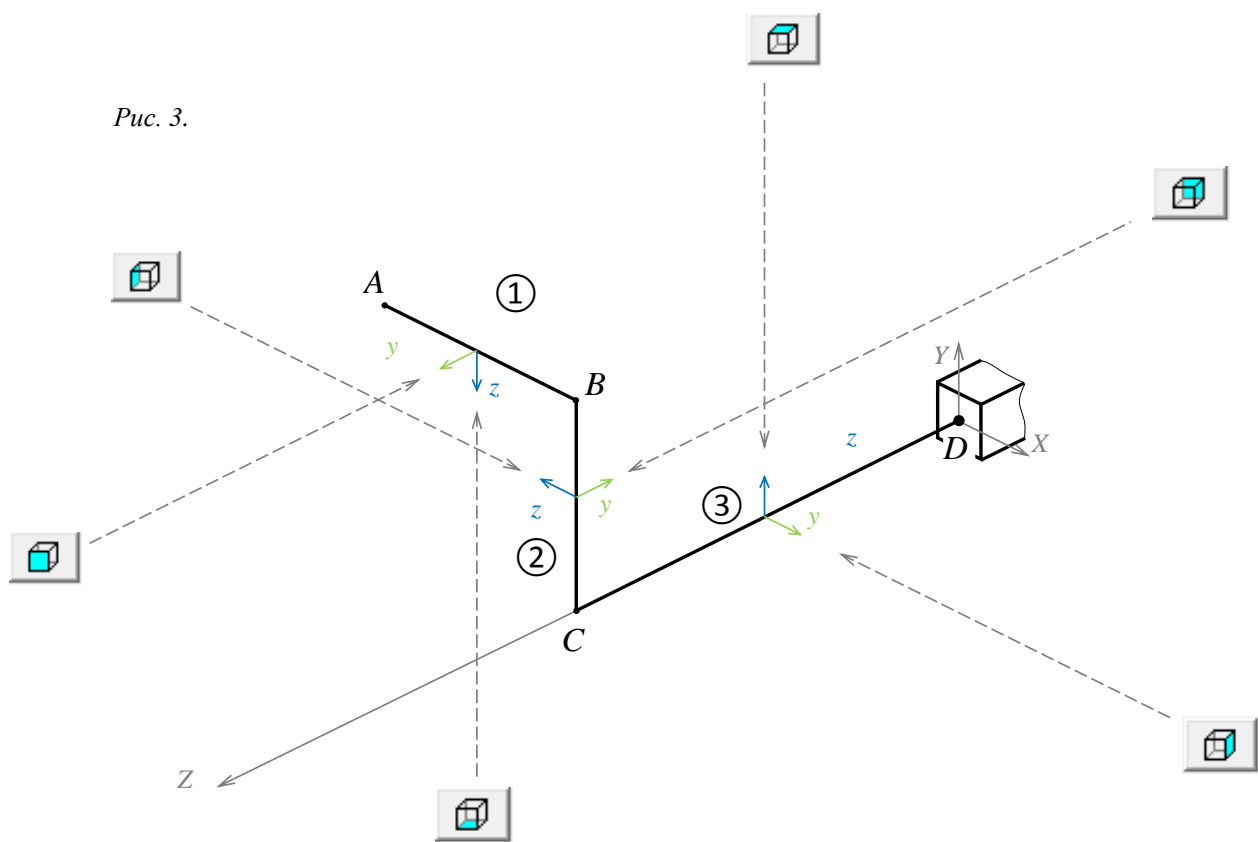
№	Действие	Результат
Просмотр результатов:		
17	<p><i>Форма упругой оси нагруженной рамы:</i></p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape > KUND установить Def + undeformed > OK</p> <p>Некоторые символы пропадают. Восстановим их: U_M > PlotCtrls > Symbols > Boundary condition устанавливаем "All Applied BCs" [/PSF] устанавливаем "Pressures" > OK</p> <p>Форма стержня до нагружения (недеформированная) изображена сеткой чёрным цветом, форма после нагружения (деформированная) изображена синей линией. Чем большим количеством конечных элементов разбит участок, тем точнее прорисовывается форма его изогнутой оси. Участок ③ разбит одним элементом, поэтому кажется, будто в заделке он повернулся.</p> <p>В целом, деформированная форма упругой оси именно такая, какая и должна быть, исходя из жизненных наблюдений.</p>	



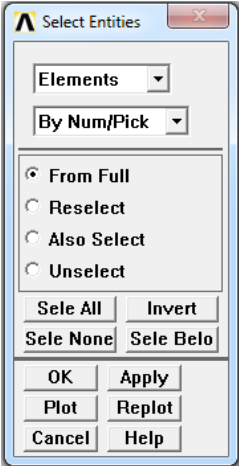
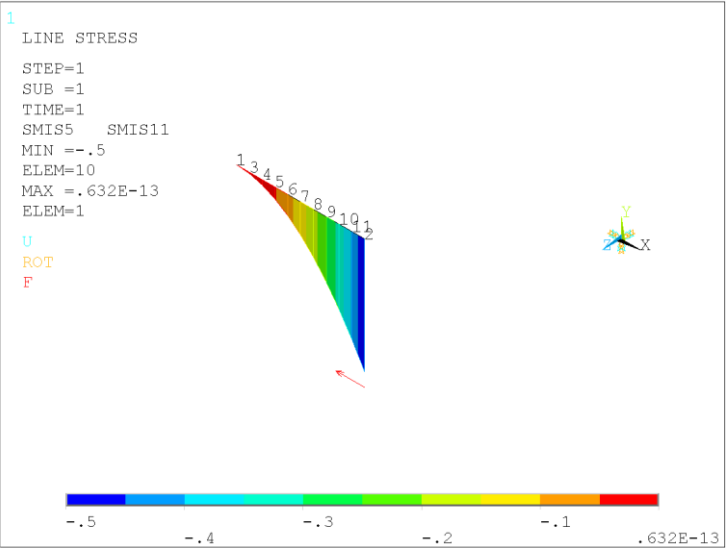
№	Действие	Результат																																			
18	<p><i>Расчёт эпюр внутренних моментов:</i></p> <p>Внутренний крутящий момент $M_{кр}$:</p> <p>M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Add > "By sequence num", "SMISC,", "4" > Apply > "By sequence num", "SMISC,", "10" > OK</p> <p>Внутренний изгибающий момент M_y:</p> <p>M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Add > "By sequence num", "SMISC,", "5" > Apply > "By sequence num", "SMISC,", "11" > Apply ></p> <p>Внутренний изгибающий момент M_z:</p> <p>M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Add > "By sequence num", "SMISC,", "6" > Apply > "By sequence num", "SMISC,", "12" > OK > > Close</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Label</th> <th>Item</th> <th>Comp</th> <th>Time Stamp</th> <th>Status</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SMIS4</td> <td>SMIS</td> <td>4</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>SMIS10</td> <td>SMIS</td> <td>10</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>SMIS5</td> <td>SMIS</td> <td>5</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>SMIS11</td> <td>SMIS</td> <td>11</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>SMIS6</td> <td>SMIS</td> <td>6</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr style="background-color: #e0f0ff;"> <td>SMIS12</td> <td>SMIS</td> <td>12</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> </tbody> </table>	Label	Item	Comp	Time Stamp	Status	SMIS4	SMIS	4	Time= 1.0000	(Current)	SMIS10	SMIS	10	Time= 1.0000	(Current)	SMIS5	SMIS	5	Time= 1.0000	(Current)	SMIS11	SMIS	11	Time= 1.0000	(Current)	SMIS6	SMIS	6	Time= 1.0000	(Current)	SMIS12	SMIS	12	Time= 1.0000	(Current)
Label	Item	Comp	Time Stamp	Status																																	
SMIS4	SMIS	4	Time= 1.0000	(Current)																																	
SMIS10	SMIS	10	Time= 1.0000	(Current)																																	
SMIS5	SMIS	5	Time= 1.0000	(Current)																																	
SMIS11	SMIS	11	Time= 1.0000	(Current)																																	
SMIS6	SMIS	6	Time= 1.0000	(Current)																																	
SMIS12	SMIS	12	Time= 1.0000	(Current)																																	
19	<p>Эпюры будем смотреть на недеформированной форме:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "0.0 (off)" > OK</p>																																				



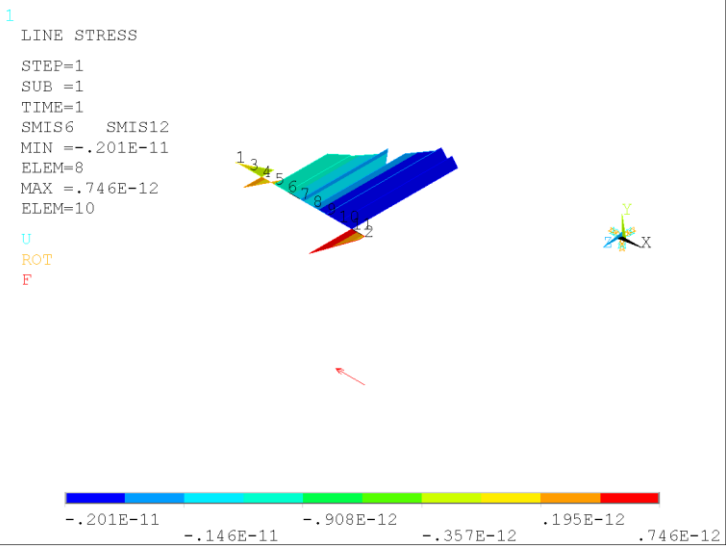
№	Действие	Результат
20	<p>Цветовая шкала будет состоять из десяти цветов:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours > NCONT пишем 10 > ОК</p>	



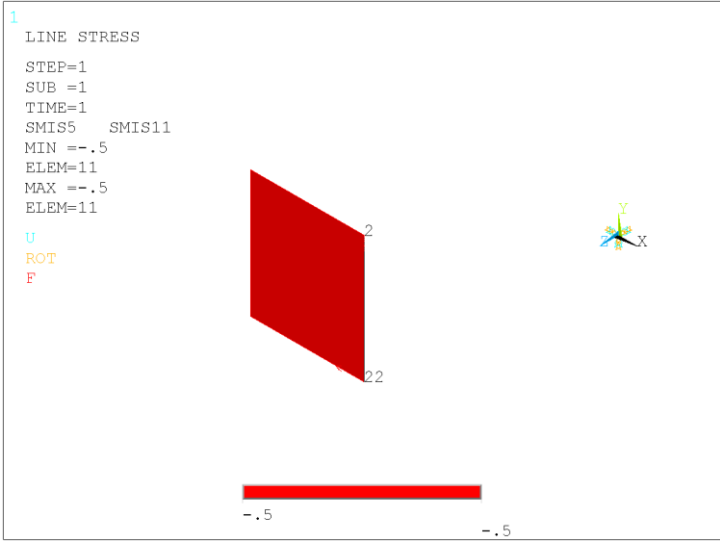
Эпюру внутреннего крутящего момента на всей раме:



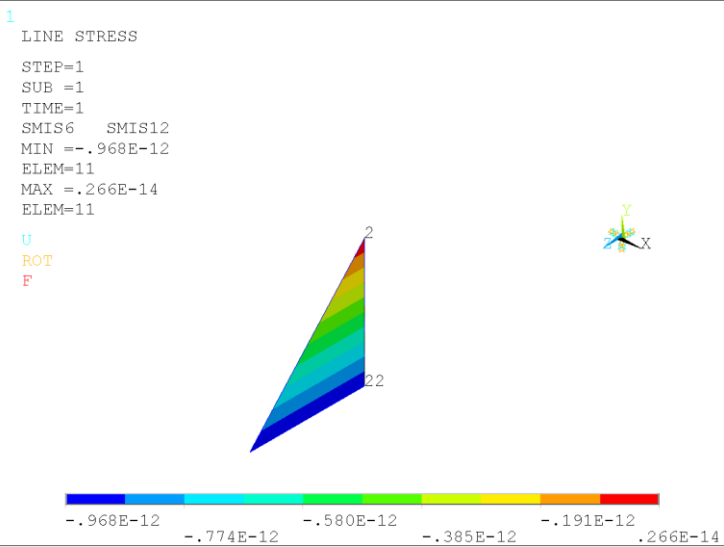
21	<p>Эпюра внутреннего крутящего момента <i>Мкр</i> сразу на всей раме:</p> <p>Прорисовка эпюры <i>Мкр</i>: M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > > Line Elem Res > LabI установить "SMIS4" LabJ установить "SMIS10" Fact пишем 1 > ОК</p> <p>Распечатка эпюры <i>Мкр</i>: M_M > General Postproc > List Results > > Elem Table Data > Line Elem Res > В списке отмечаем "SMIS4" и "SMIS10" > ОК</p> <p>На всех элементах кроме последнего (соответствующего участку ③) внутренний крутящий момент практически равен нулю. На последнем элементе внутренний крутящий момент равен +0,5, как и должно быть в соответствии с рис. 1.</p>	 <pre> LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS4 SMIS10 MIN =-.888E-15 ELEM=9 **** POST1 ELEMENT TABLE LISTING **** ***** STAT CURRENT CURRENT ELEM SMIS4 SMIS10 1 0.0000 0.0000 2 0.0000 0.0000 3 0.88818E-15 0.88818E-15 4 0.17764E-14 0.17764E-14 5 0.17764E-14 0.17764E-14 6 0.26645E-14 0.26645E-14 7 0.0000 0.0000 8 0.17764E-14 0.17764E-14 9 0.88818E-15 0.88818E-15 10 0.88818E-15 0.88818E-15 11 0.24880E-12 0.24880E-12 12 0.50000 0.50000 ***** MINIMUM VALUES ELEM 9 VALUE -0.88818E-15-0.88818E-15 MAXIMUM VALUES ELEM 12 VALUE 0.50000 </pre>
----	---	---



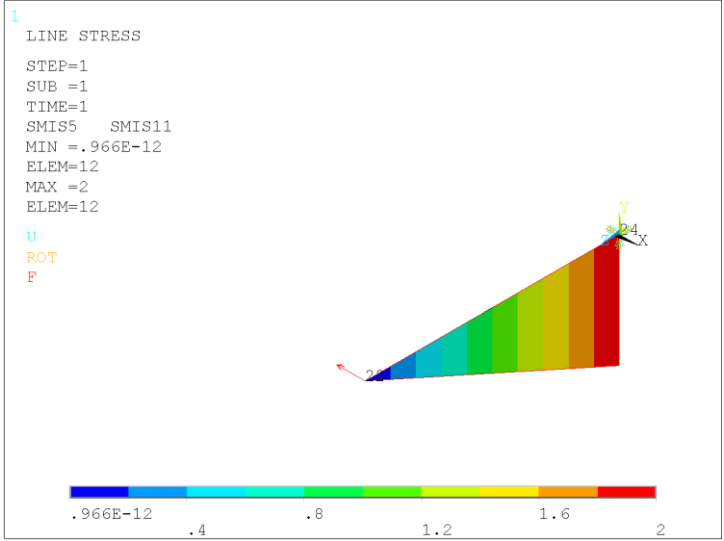
№	Действие	Результат
Эпюры внутренних изгибающих моментов рисуем поэлементно:		
22	<p>К сожалению, эпюры изгибающих моментов ANSYS показывает не в плоскости действия момента, а в плоскости, перпендикулярной взгляду наблюдателя.</p> <p>Для того, чтобы корректно просматривать эпюру внутреннего изгибающего элемента, нужно на сам элемент смотреть с острия оси изгиба. Определимся с ракурсами просмотра эпюр:</p>	<p>Рис. 3.</p>  <p>The diagram shows a frame structure with three elements labeled 1, 2, and 3. Element 1 is a diagonal member from point A to point B. Element 2 is a vertical member from point B to point C. Element 3 is a diagonal member from point C to point D. A 3D coordinate system is shown at point D with axes X, Y, and Z. The Z-axis is vertical, the Y-axis is horizontal to the right, and the X-axis is diagonal. Viewing directions are indicated by dashed lines with small cube icons: 1) looking along the Z-axis from above, 2) looking along the Y-axis from the right, and 3) looking along the X-axis from the front. Local coordinate systems (y, z) are also shown for each element, with y being the axis of bending and z being the axis of observation.</p>



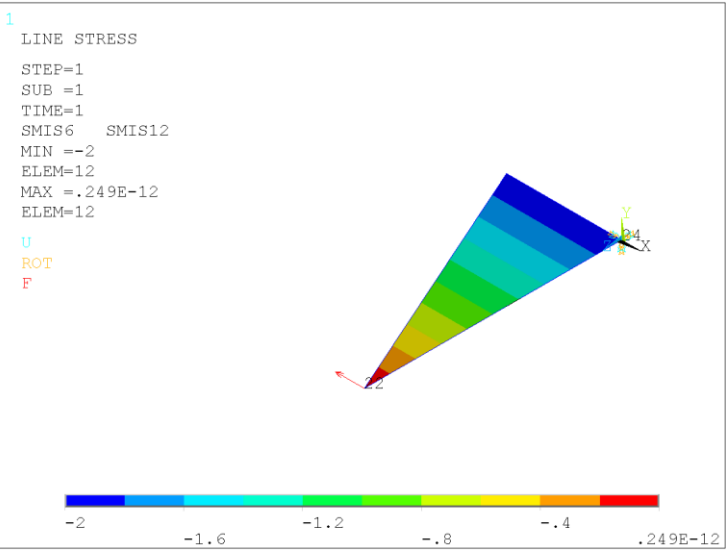
№	Действие	Результат
23	<p>Эпюра внутреннего изгибающего момента M_y на участке ①:</p> <p>Выделяем балочные конечные элементы участка (10 штук):</p> <p>U_P > Select > Entites Устанавливаем "Elements" и "By Num/Pick" Селектор на "From Full" > ОК</p> <p>Последовательно кликаем левой кнопкой мыши на каждый из десяти элементов участка > ОК</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Фронтальный вид : </p> <p>Прорисовка эпюры M_y:</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > > Line Elem Res > LabI установить "SMIS5" LabJ установить "SMIS11" > ОК</p> <p>Изометрия: </p> <p>Видим параболический треугольник, направленный вниз, высотой 0,5. Это соответствует эпюре M_y на участке ① (рис.1.).</p>	<p>Результат</p>   <pre> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS5 SMIS11 MIN =-.5 ELEM=10 MAX =.632E-13 ELEM=1 U ROT F </pre>

№	Действие	Результат
24	<p>Эпюра внутреннего изгибающего момента M_z на том же элементе ①:</p> <p>Вид снизу: </p> <p>Прорисовка эпюры M_z:</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > > Line Elem Res > LabI установить "SMIS6" LabJ установить "SMIS12" > ОК</p> <p>Изометрия: </p> <p>То, что мы видим – ошибки округления. В этом легко убедиться, посмотрев на цветовую шкалу: все значения ничтожно малы. <i>Рис.1.</i> так и показывает – M_z равен нулю по всей длине участка ①.</p>	 <pre> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS6 SMIS12 MIN =-.201E-11 ELEM=8 MAX =.746E-12 ELEM=10 U ROT F </pre> <p>-.201E-11 -.146E-11 -.908E-12 -.357E-12 .195E-12 .746E-12</p>

№	Действие	Результат
25	<p>Эпюра внутреннего изгибающего момента M_y на участке ②:</p> <p>Выделяем и прорисовываем все элементы: U_P > Select > Everything U_P > Plot > Elements</p> <p>Выделяем балочный конечный элемент участка: U_P > Select > Entites Устанавливаем "Elements" и "By Num/Pick" Селектор на "From Full" > ОК</p> <p>Кликаем левой кнопкой мыши на вертикальный элемент > ОК</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Вид сзади: </p> <p>Прорисовка эпюры M_y: M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > > Line Elem Res > LabI установить "SMIS5" LabJ установить "SMIS11" > ОК</p> <p>Изометрия: </p> <p>Прямоугольник влево, высотой 0,5. Так и должно быть в соответствии с <i>рис.1</i>.</p>	<p>1</p> <pre> LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS5 SMIS11 MIN =-.5 ELEM=11 MAX =-.5 ELEM=11 U ROT F </pre> 

№	Действие	Результат
26	<p>Эпюра внутреннего изгибающего момента M_z на том же элементе ②:</p> <p>Вид слева: </p> <p>Прорисовка эпюры M_z:</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > > Line Elem Res ></p> <p>LabI установить "SMIS6" LabJ установить "SMIS12" > ОК</p> <p>Изометрия: </p> <p>Вроде бы треугольник, но взгляните в его размеры – фактически и это тоже нуль. <i>Рис.1.</i> показывает то же самое.</p>	<pre> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS6 SMIS12 MIN =-.968E-12 ELEM=11 MAX =.266E-14 ELEM=11 U ROT F </pre> 

№	Действие	Результат
27	<p>Эпюра внутреннего изгибающего момента M_y на элементе ③:</p> <p>Выделяем и прорисовываем все элементы: U_P > Select > Everything U_P > Plot > Elements</p> <p>Выделяем балочный конечный элемент участка: U_P > Select > Entites Устанавливаем "Elements" и "By Num/Pick" Селектор на "From Full" > ОК</p> <p>Кликаем левой кнопкой мыши на длинный элемент > ОК</p> <p>Вид справа: </p> <p>Прорисовка эпюры M_y: M_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > > Line Elem Res > LabI установить "SMIS5" LabJ установить "SMIS11" > ОК</p> <p>Изометрия: </p> <p>Треугольник вниз высотой 2. На <i>рис.1.</i> то же самое.</p>	 <pre> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS5 SMIS11 MIN =.966E-12 ELEM=12 MAX =2 ELEM=12 U ROT F </pre>

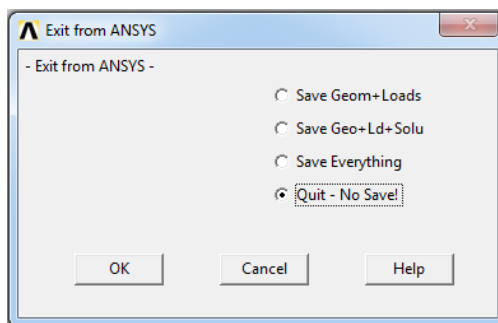
№	Действие	Результат
28	<p>Эпюра внутреннего изгибающего момента M_z на элементе ③:</p> <p>Вид сверху: </p> <p>Прорисовка эпюры M_z:</p> <p>М_М > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > > Line Elem Res > LabI установить "SMIS6" LabJ установить "SMIS12" > ОК</p> <p>Изометрия: </p>	<pre> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS6 SMIS12 MIN =-2 ELEM=12 MAX =.249E-12 ELEM=12 U ROT F </pre> 

Сохраняем проделанную работу:

U_M > File > Save as Jobname.db

Закройте ANSYS:

U_M > File > Exit > Quit - No Save! > OK



После выполнения указанных действий в рабочем каталоге остаются файлы с расширениями “.BCS”, “.db”, “.emat”, “.err”, “.esav”, “.full”, “.log”, “.mntr”, “.rst”, “.stat” и “.SECT”.

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