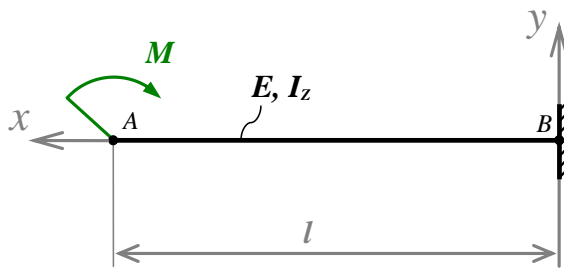


## F-02 (ANSYS)

Формулировка задачи:



*Дано:* Консольный стержень постоянной жёсткости нагружен изгибающим моментом  $M$  в точке A.

$E$  – модуль упругости материала;

$I_z$  – изгибный момент инерции.

*Построить:* Эпюру внутренней перерезывающей силы  $Q_y$ ;

Эпюру внутреннего изгибающего момента  $M_z$ .

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

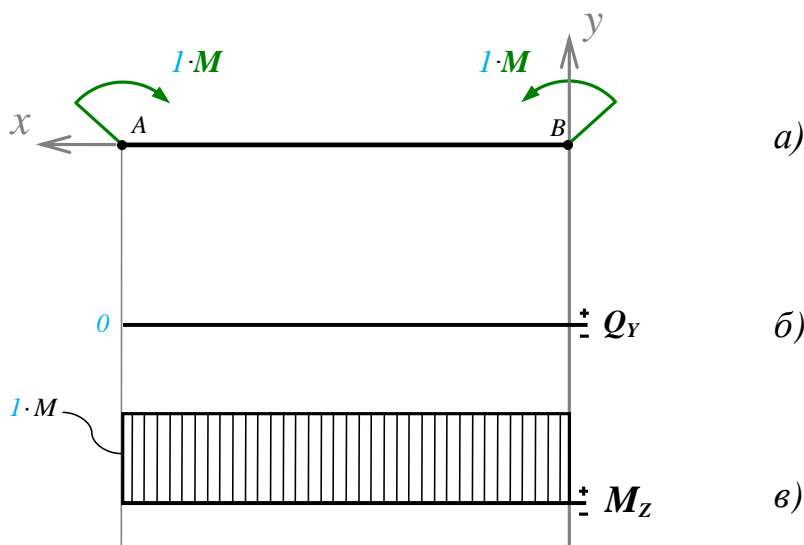


Рис. 1.

Задача данного примера: при помощи ANSYS Multyphysics получить эти же эпюры методом конечных элементов.

## Предварительные настройки:

Для решения задачи используется ANSYS Multiphysics 14.0:

ANSYS Command Prompt (C\_P)

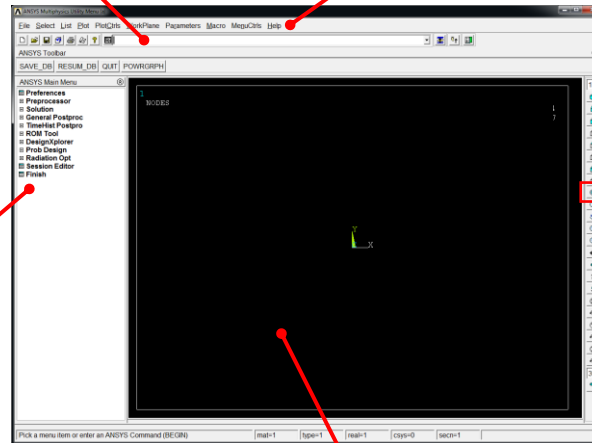
Utility Menu (U\_M)

Main Menu  
(M\_M)

Рабочее поле

Кнопка

Fit

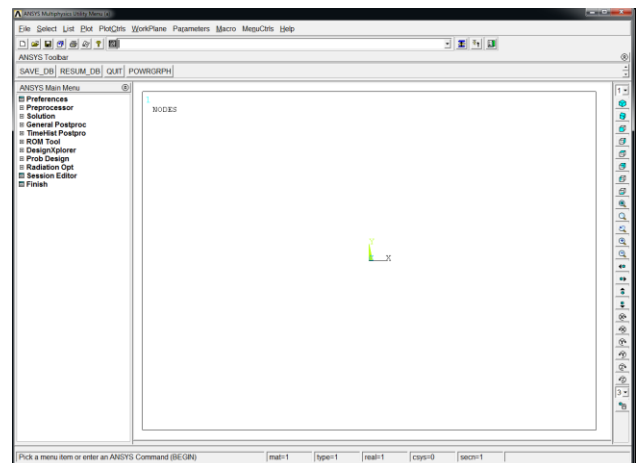


С меню M\_M и U\_M работают мышью, выбирая нужные опции.

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

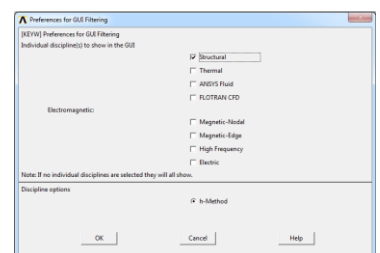
Чёрное рабочее поле не всегда приятно для глаза. Кроме того, оно неудобно для печати рисунков. Меняем чёрный цвет фона на белый следующими действиями:

U\_M > PlotCtrls > Style > Colors  
> Reverse Video



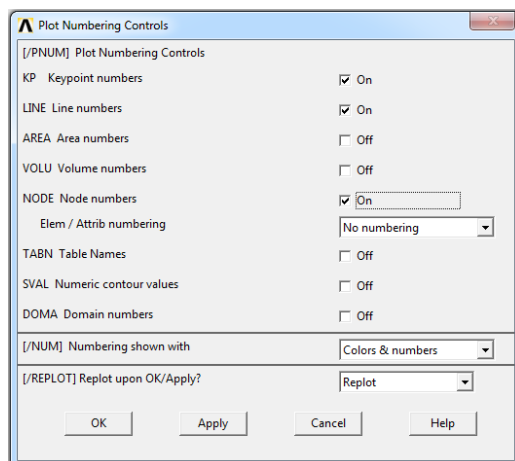
Убрать пункты меню, относящиеся к расплавам, магнитам и так далее, оставить только относящиеся к прочностным расчётам:

M\_M > Preferences > Отметить "Structural" > OK



При построениях полезно видеть номера точек и линий твердотельной модели а также номера узлов модели конечноэлементной:

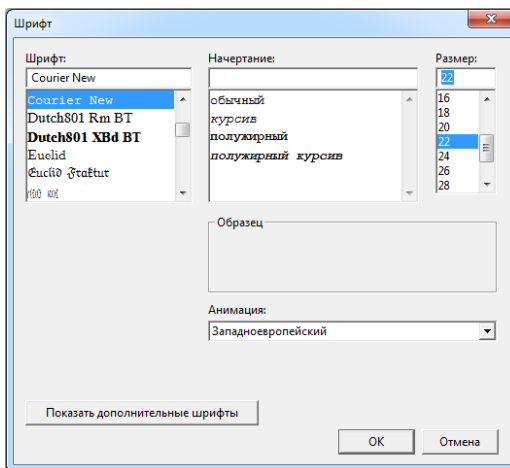
```
U_M > PlotCtrls > Numbering >
Отметить KP, LINE, NODE ;
Установить Elem на "No numbering";
Установить [/NUM] на "Colors & numbers"
> OK
```



Для большей наглядности увеличим размер шрифта:

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

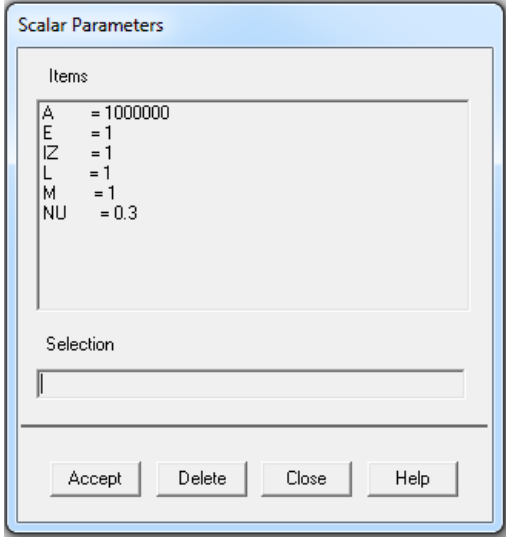
```
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Entity Font >
Установить «Размер» на «22»
> OK
```

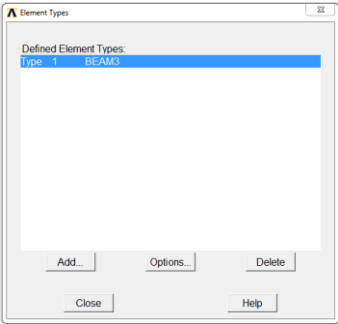
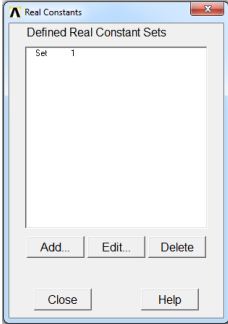
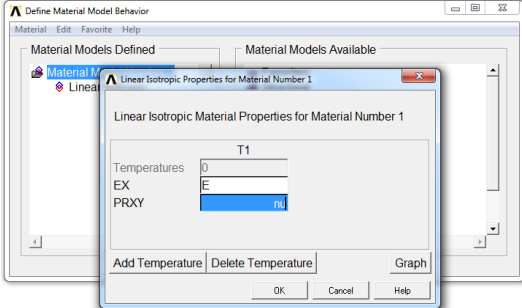



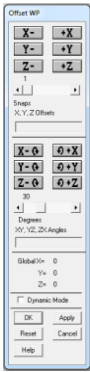

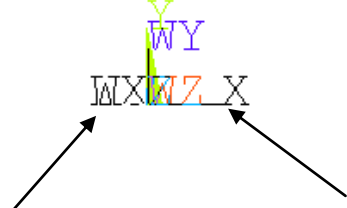
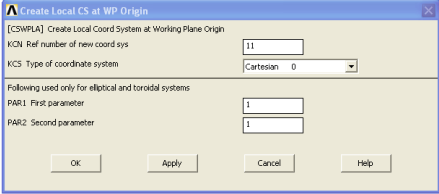
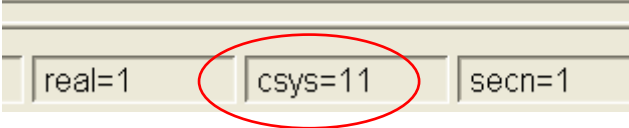
Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.

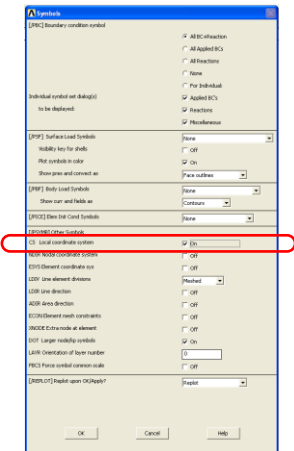

Решение задачи:


Обратите внимание: конечноэлементный метод решения задач *численный*, он принимает и выдаёт только *числа*. Задача же сформулирована *в общем виде* – в буквенных обозначениях, из которых потом складываются формулы. Выход можно найти, приравняв базовые величины задачи *E, I<sub>z</sub>, M* и *l* к единице. Тогда результаты мы получим в виде чисел, обозначенных на *рис. 1* синим цветом.

№	Действие	Результат
1	<p>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</p> <p>U_M &gt; Parameters &gt; Scalar Parameters &gt;</p> <p>В строке "Selection" последовательно набрать (всё латиницей!):</p> <p>E=1 &gt; Accept &gt;  A=1e6 &gt; Accept &gt;  Iz=1 &gt; Accept &gt;  M=1 &gt; Accept &gt;  l=1 &gt; Accept &gt;  nu=0.3 &gt; Accept &gt;</p> <p>A – площадь поперечного сечения стержня; должна быть очень большой для того, чтобы стержень гнулся, но не сжимался и не растягивался;  nu – коэффициент Пуассона для металлов.</p> <p>После нажатия клавиши Ассерт, введённый параметр добавляется в список Items.  Закреть окно ввода параметров:</p> <p>&gt; Close</p>	

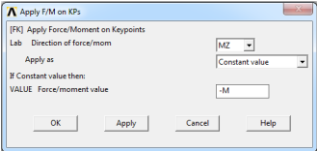
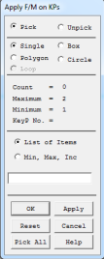



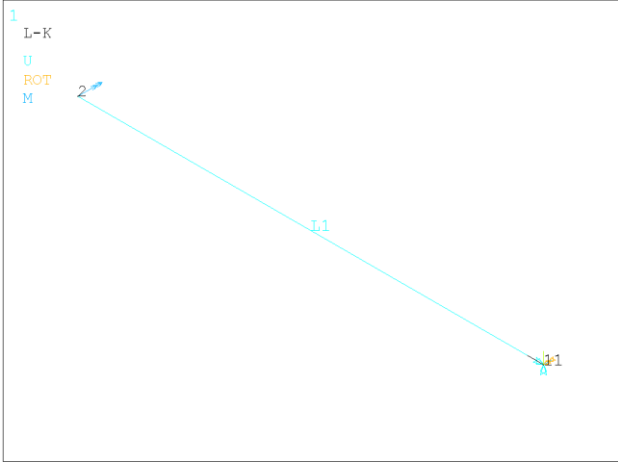
№	Действие	Результат
2	<p><i>Первая строчка в таблице конечных элементов – плоский балочный тип BEAM3:</i></p> <p>M_M &gt; Preprocessor  C_P &gt; ET,1, BEAM3 &gt; <b>Enter</b></p> <p>Посмотрим таблицу конечных элементов:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Element Type &gt; Add/Edit/Delete &gt; Close</p>	
3	<p><i>Первая строчка в таблице параметров («реальных констант») выбранного типа конечного элемента: Площадь поперечного сечения = A; момент инерции = Iz; высота = l/100 (не будем использовать, но формально надо что-то задать, например l/100).</i></p> <p>C_P &gt; R,1,A, Iz, L/100 &gt; <b>Enter</b></p> <p>Посмотрим таблицу реальных констант:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Real Constants &gt; Add/Edit/Delete &gt; Close</p>	
4	<p><i>Свойства материала стержня – модуль упругости и коэффициент Пуассона:</i></p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Material Props &gt; Material Models &gt; Structural &gt; Linear &gt; Elastic &gt; Isotropic &gt; в окошке EX пишем "E", в окошке PRXY пишем "nu" &gt; OK</p> <p>Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p>	

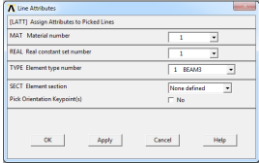
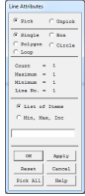
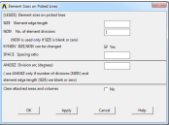
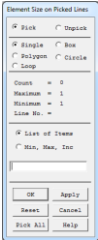
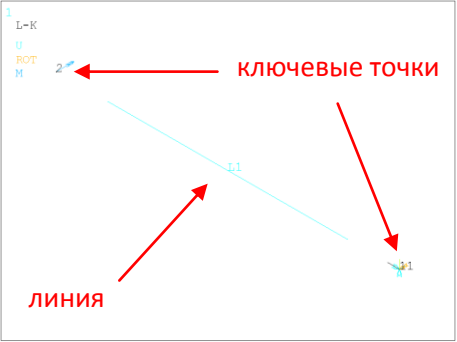

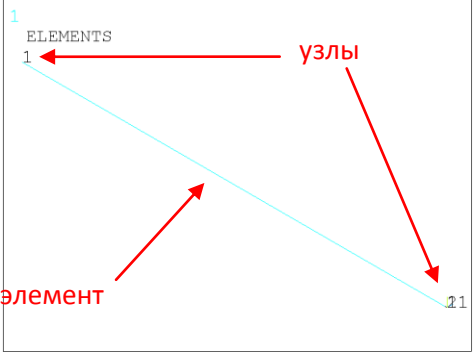
№	Действие	Результат
<b>Твердотельное моделирование</b>		
<b>5</b>	<p><i>Разворот рабочей плоскости:</i></p> <p>Прорисовываем систему координат рабочей плоскости. Сейчас она ориентирована по глобальной системе координат:</p> <p>U_M &gt; WorkPlane &gt; Display Working Plane</p>  <p>Поворачиваем рабочую плоскость на 180 градусов вокруг оси Y с тем, чтобы её ось X была направлена справа налево:</p> <p>U_M &gt; WorkPlane &gt; Offset WP by Increments &gt;</p>  <p>Шесть раз нажимаем на появившейся панельке кнопку , наблюдая, как система координат рабочей плоскости с каждым нажатием поворачивается вокруг оси Y на тридцать градусов.</p>	 <p>Ось X рабочей плоскости</p> <p>Ось X глобальной системы координат.</p>
<b>6</b>	<p><i>Рабочая система координат №11 (ось x направлена влево):</i></p> <p>U_M &gt; WorkPlane &gt; Local Coordinate Systems &gt; Create Local CS &gt; At WP Origin &gt;</p> <p>KCN пишем 11</p> <p>KCS установить Cartesian &gt; OK</p>  <p>Активная система координат автоматически меняется с глобальной (декартова система №0, ось X вправо) на установленную нами (декартова №11, ось X влево). Можете заметить, как внизу надпись «csys=0» изменилась на «csys=11». Тем не менее, оси глобальной системы координат продолжают отображаться.</p>	

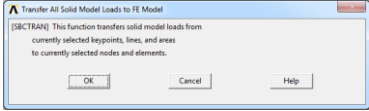
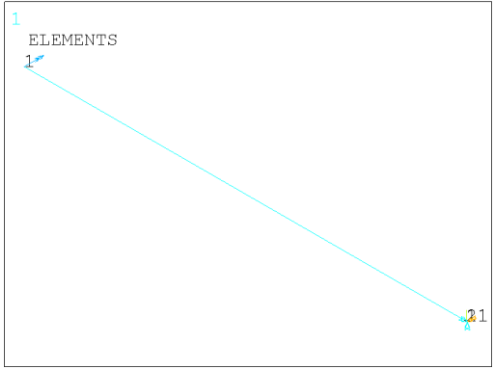
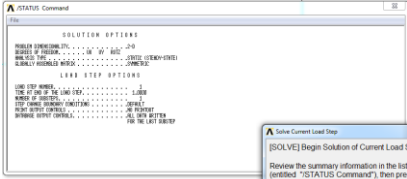
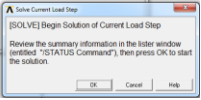
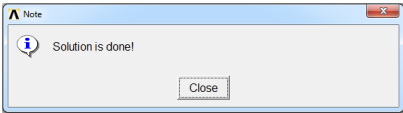
№	Действие	Результат
7	<p>Гасим в рабочем поле оси рабочей плоскости и оси глобальной системы координат, прорисовываем оси локальной рабочей системы координат №11 (ось x):</p> <pre>U_M &gt; WorkPlane &gt; Display Working Plane</pre> <pre>U_M &gt; PlotCtrls &gt; Window Controls &gt; Window Options &gt; [/Triad] установить "Not Shown"</pre> <pre>&gt; OK</pre> <pre>U_M &gt; PlotCtrls &gt; Symbols &gt; [CS] установить в положение "on"</pre> <pre>&gt; OK &gt;</pre>  <p>На рабочем поле остаётся рисунок осей рабочей системы координат и её номер «11».</p> <p>Оси локальных систем не подписываются, только по цвету можно определить их названия:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>X – чёрная ось;</li> <li>Y – зелёная ось;</li> <li>Z – синяя ось.</li> </ul> <p>Сейчас в рабочем поле мы видим оси X (влево) и Y (вверх). Ось Z направлена от нас и не видна.</p>	



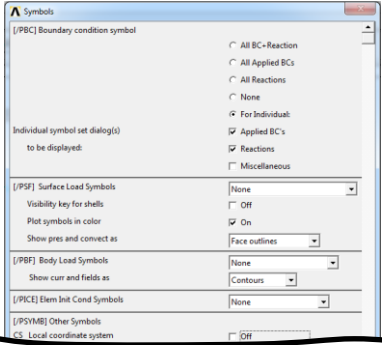
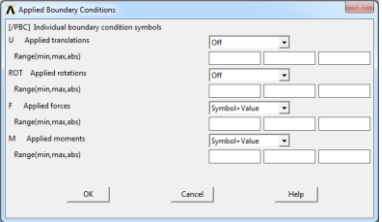
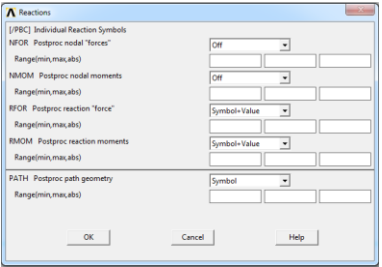
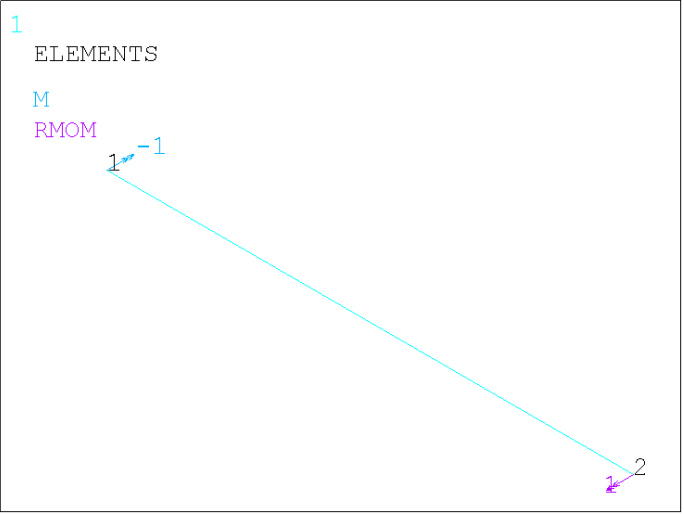
№	Действие	Результат
8	<p><i>Ключевые точки – границы участков (две точки):</i></p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Modeling &gt; Create &gt; Keypoints &gt; In Active CS &gt;</p> <p>NPT пишем 1 X, Y, Z пишем 0, 0, 0 &gt; Apply &gt;</p> <p>NPT пишем 2 X, Y, Z пишем l, 0, 0 &gt; OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M &gt; Plot &gt; Multi-Plots</p> <p>Справа от рабочего поля нажимаем кнопку Fit .</p>	<p>2 <span style="float: right;">11</span></p>
9	<p><i>Один участок – одна линия между точками:</i></p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Modeling &gt; Create &gt; Lines &gt; Lines &gt; Straight Line &gt;</p> <p>Левой кнопкой мыши нажать последовательно на ключевую точку 2, потом на ключевую точку 1. Линия должна быть протянута слева направо, тогда эпюра моментов будет начерчена корректно &gt; OK</p>	<p>2 <span style="float: right;">11</span></p>
10	<p><i>Заделка:</i></p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Loads &gt; Define Loads &gt; Apply &gt; Structural &gt; Displacement &gt; On Keypoints &gt;</p> <p>Левой кнопкой мыши нажать на ключевую точку 1 &gt; OK &gt;</p> <p>Lab2 установить "All DOF" &gt; OK</p>	<p>2 <span style="float: right;">11</span></p>

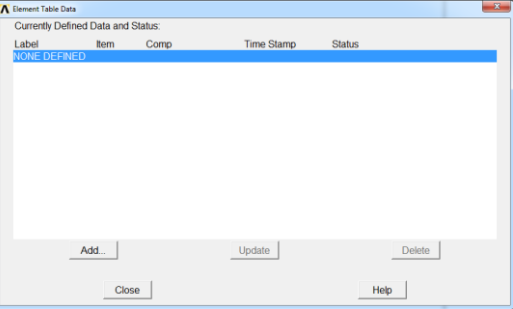
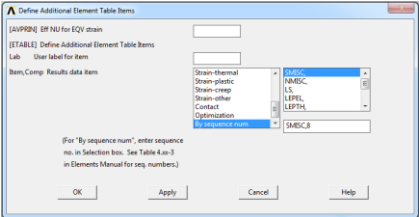
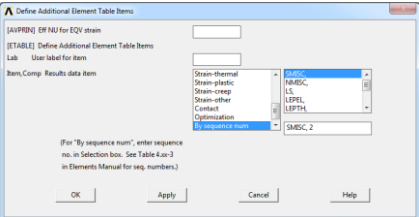
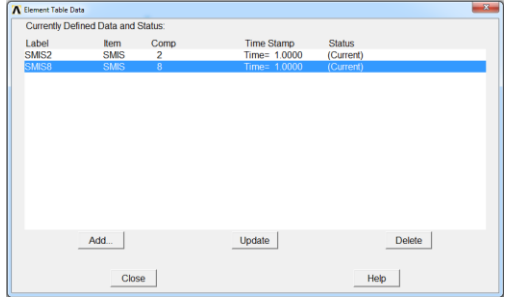


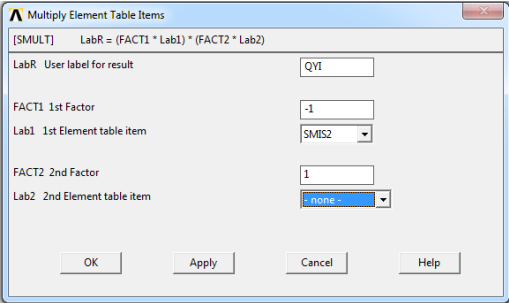
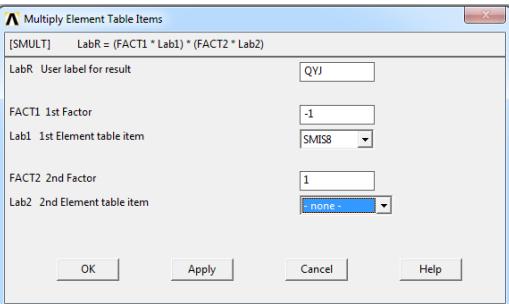
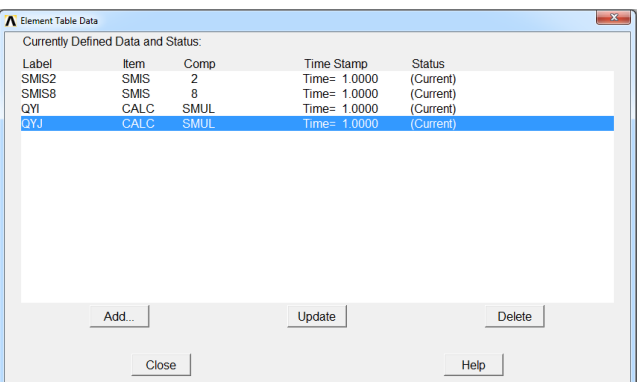
№	Действие	Результат
11	<p><i>Внешний сосредоточенный момент M:</i></p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Loads &gt; Define Loads &gt; Apply &gt; Structural &gt; Force/Moment &gt; On Keypoints &gt;</p> <p>Левой кнопкой мыши нажать на ключевую точку 2</p> <p>&gt; OK &gt;</p> <p>Lab установить "MZ"</p> <p>VALUE установить "-M"</p> <p>&gt; OK</p>   <p>Внешний момент в ANSYS-е отображается своим вектором – двуглавой стрелкой. Вектор момента в данной задаче направлен против оси Z глобальной системы координат. Поэтому момент задаём отрицательный.</p>	
12	<p><i>Изометрия:</i></p> <p>До сих пор модели мы рассматривали, используя фронтальный вид («сбоку»).</p> <p>Вектор изгибающего момента при этом виден плохо, а его направление не определяется вовсе. Меняем угол зрения: справа от рабочего поля нажимаем кнопки</p>  - изометрия;  - автоформат (размер изображения по размеру окна рабочего поля).	

№	Действие	Результат
<b>Конечноэлементная модель</b>		
13	<p>Указываем материал, реальные константы и тип элементов, на которые будут разбиты линии твердотельной модели:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Meshing &gt; Mesh Attributes &gt; Picked Lines &gt;левой кнопкой мыши нажать на линию L1 &gt; OK &gt; MAT установить "1" REAL установить "1" TYPE установить "1 BEAM3" &gt; OK</p>  	
14	<p>Участок без распределённых нагрузок можно бить одним конечным элементом:</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Meshing &gt; Size Cntrls &gt; ManualSize &gt; Lines &gt; Picked Lines &gt;левой кнопкой мыши нажать на линию L1 &gt; OK &gt; NDIV пишем 1 &gt; OK</p>   <p>Обновляем изображение: U_M &gt; Plot &gt; Multi-Plots</p>	
15	<p>Рабиваем линию на элементы (в данном случае, один элемент):</p> <p>M_M &gt; Preprocessor &gt; Meshing &gt; Mesh &gt; Lines &gt;левой кнопкой мыши нажать на линию L1 &gt; OK &gt;</p> <p>Обновляем изображение: U_M &gt; Plot &gt; Elements</p> 	

№	Действие	Результат
16	<p><i>Действие необязательное, но наглядное. Переносим на конечноэлементную модель нагрузки и закрепления с модели твердотельной:</i></p> <p>M_M &gt; Loads &gt; Define Loads &gt; Operate &gt; Transfer to FE &gt; All Solid Lds &gt; OK</p> 	
<b>Расчёт</b>		
17	<p><i>Запускаем расчёт:</i></p> <p>M_M &gt; Solution &gt; Solve &gt; Current LS</p> <p>Синхронно появляются два окна: белое информационное и серое исполнительное. Белое закрываем, на сером нажимаем ОК. Расчёт пошёл.</p> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Закройте это окно. Расчёт окончен.</p>   	

№	Действие	Результат
<b>Просмотр результатов</b>		
<b>18</b>	<p><i>Силовая схема:</i></p> <p>U_M &gt; PlotCtrls &gt; Symbols &gt; [/PBC] устанавливаем в положение "For Individual"</p> <p>Убираем галочку с "Miscellaneous"</p> <p>[CS] установить в положение "off"</p> <p>&gt; OK &gt;</p> <p>В окне "Applied Boundary Conditions"</p> <p>U установить "Off"</p> <p>Rot установить "Off"</p> <p>F установить "Symbol+Value"</p> <p>M установить "Symbol+Value"</p> <p>&gt; OK &gt;</p> <p>В окне "Reactions"</p> <p>NFOR установить "Off"</p> <p>NMOM установить "Off"</p> <p>RFOR установить "Symbol+Value"</p> <p>RMOM установить "Symbol+Value"</p> <p>&gt; OK &gt;</p> <p>Обновляем изображение:</p> <p>U_M &gt; Plot &gt; Elements</p> <p>При необходимости корректируйте масштаб кнопками  или .</p> <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1а</i>. Синим цветом указан вектор внешнего момента, фиолетовым – вектор момента реактивного.</p>	   

№	Действие	Результат
19	<p><i>Составление эюры внутренней перерезывающей силы:</i></p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Element Table &gt; Define Table &gt; Add &gt;  В левом списке выбрать "By sequence num"  потом  в правом верхнем списке выбрать "SMISC,"  потом  в правом нижнем списке к надписи "SMISC,"  приписать слева "2".  &gt; Apply &gt;  Снова: "By sequence num", "SMISC," "8"  &gt; OK  &gt; Close</p> <p>Эта операция называется «заполнение таблицы элементов». Создаётся база данных, по которым будут выводиться результаты.</p>	   

№	Действие	Результат																									
20	<p><i>Умножение эпюры внутренней перерезывающей силы на “-1”:</i></p> <p>Правила знаков у конечноэлементных программ своеобразные, не всегда совпадающие с принятыми в «Сопротивлении материалов». В данном случае это выражается в том, что вычисленная эпюра внутренней перерезывающей силы имеет знаки противоположные принятым в нашем курсе. Инвертируем эпюру в таблице результатов:</p> <p>Строчку SMISC2 умножаем на -1, получаем строчку QYI:</p> <pre>M_M &gt; General Postproc &gt; Element Table &gt; Multiply LabR пишем QYI FACT1 пишем -1 Lab1 устанавливаем SMIS2 Lab2 устанавливаем -none- &gt; Apply</pre> <p>Строчку SMISC8 умножаем на -1, получаем строчку QYJ:</p> <pre>M_M &gt; General Postproc &gt; Element Table &gt; Multiply LabR пишем QYJ FACT1 пишем -1 Lab1 устанавливаем SMIS8 Lab2 устанавливаем -none- &gt; OK</pre> <p>Смотрим таблицу результатов, видим две новые строчки - QYI и QYJ:</p> <pre>M_M &gt; General Postproc &gt; Element Table &gt; Define Table &gt; Close</pre>	   <table border="1" data-bbox="1429 932 2065 1315"> <thead> <tr> <th>Label</th> <th>Item</th> <th>Comp</th> <th>Time Stamp</th> <th>Status</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SMIS2</td> <td>SMIS</td> <td>2</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>SMIS8</td> <td>SMIS</td> <td>8</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>QYI</td> <td>CALC</td> <td>SMUL</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>QYJ</td> <td>CALC</td> <td>SMUL</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> </tbody> </table>	Label	Item	Comp	Time Stamp	Status	SMIS2	SMIS	2	Time= 1.0000	(Current)	SMIS8	SMIS	8	Time= 1.0000	(Current)	QYI	CALC	SMUL	Time= 1.0000	(Current)	QYJ	CALC	SMUL	Time= 1.0000	(Current)
Label	Item	Comp	Time Stamp	Status																							
SMIS2	SMIS	2	Time= 1.0000	(Current)																							
SMIS8	SMIS	8	Time= 1.0000	(Current)																							
QYI	CALC	SMUL	Time= 1.0000	(Current)																							
QYJ	CALC	SMUL	Time= 1.0000	(Current)																							

Прорисовка эпюры внутренней перерезывающей силы:



- фронтальный вид;



- автоформат (размер изображения по размеру окна.)

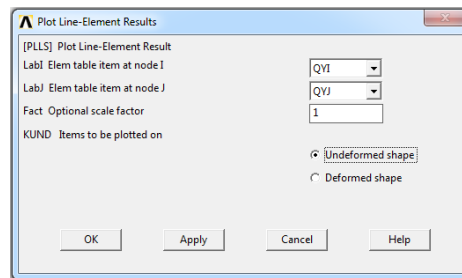
M\_M > General Postproc > Plot Results > Contour Plot  
> Line Elem Res >

Установить LabI в положение "QYI"

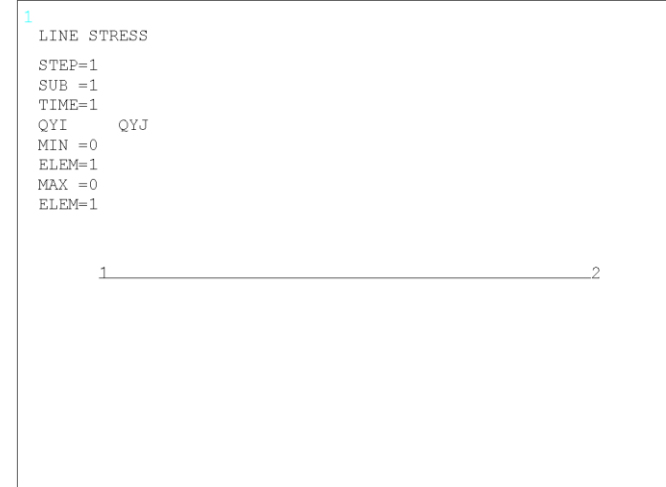
Установить LabJ в положение "QYJ"

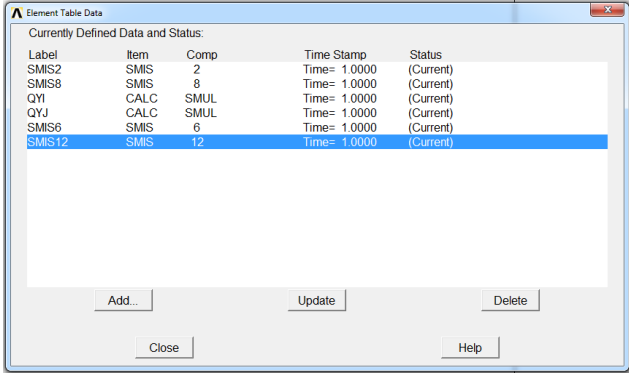

> OK

21



Получаем тот же результат, что и на *рис. 1б.* (нулевая эпюра).



№	Действие	Результат																																			
22	<p><i>Составление эпюры внутреннего изгибающего момента:</i></p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Element Table &gt; Define Table &gt; Add &gt; "By sequence num", "SMISC,", "6" &gt; Apply &gt; "By sequence num", "SMISC,", "12" &gt; OK &gt; &gt; 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>SMS2</td> <td>SMIS</td> <td>2</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>SMS8</td> <td>SMIS</td> <td>8</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>QY1</td> <td>CALC</td> <td>SMUL</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>QYJ</td> <td>CALC</td> <td>SMUL</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>SMS6</td> <td>SMIS</td> <td>6</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr style="background-color: #e6f2ff;"> <td><b>SMIS12</b></td> <td><b>SMIS</b></td> <td><b>12</b></td> <td><b>Time= 1.0000</b></td> <td><b>(Current)</b></td> </tr> </tbody> </table>	Label	Item	Comp	Time Stamp	Status	SMS2	SMIS	2	Time= 1.0000	(Current)	SMS8	SMIS	8	Time= 1.0000	(Current)	QY1	CALC	SMUL	Time= 1.0000	(Current)	QYJ	CALC	SMUL	Time= 1.0000	(Current)	SMS6	SMIS	6	Time= 1.0000	(Current)	<b>SMIS12</b>	<b>SMIS</b>	<b>12</b>	<b>Time= 1.0000</b>	<b>(Current)</b>
Label	Item	Comp	Time Stamp	Status																																	
SMS2	SMIS	2	Time= 1.0000	(Current)																																	
SMS8	SMIS	8	Time= 1.0000	(Current)																																	
QY1	CALC	SMUL	Time= 1.0000	(Current)																																	
QYJ	CALC	SMUL	Time= 1.0000	(Current)																																	
SMS6	SMIS	6	Time= 1.0000	(Current)																																	
<b>SMIS12</b>	<b>SMIS</b>	<b>12</b>	<b>Time= 1.0000</b>	<b>(Current)</b>																																	
23	<p><i>Прорисовка эпюры внутреннего изгибающего момента:</i></p> <p>M_M &gt; General Postproc &gt; Plot Results &gt; Contour Plot &gt; Line Elem Res &gt; LabI установить "SMIS6" &gt; LabJ установить " SMIS12" &gt; OK</p> <p>Получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1в.</i> (только числа, выделенные на <i>рис. 1в.</i> синим цветом). Эпюра MIN=1 , MAX=1, как и должно быть у прямоугольника.</p>	 <pre> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1 SMIS6 SMIS12 MIN =1 ELEM=1 MAX =1 ELEM=1 M RMOM </pre>																																			

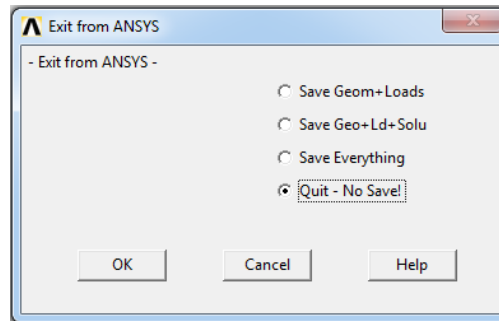


Сохраняем проделанную работу:

U\_M > File > Save as Jobname.db

Закройте ANSYS:

U\_M > File > Exit > Quit - No Save! > OK



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

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