

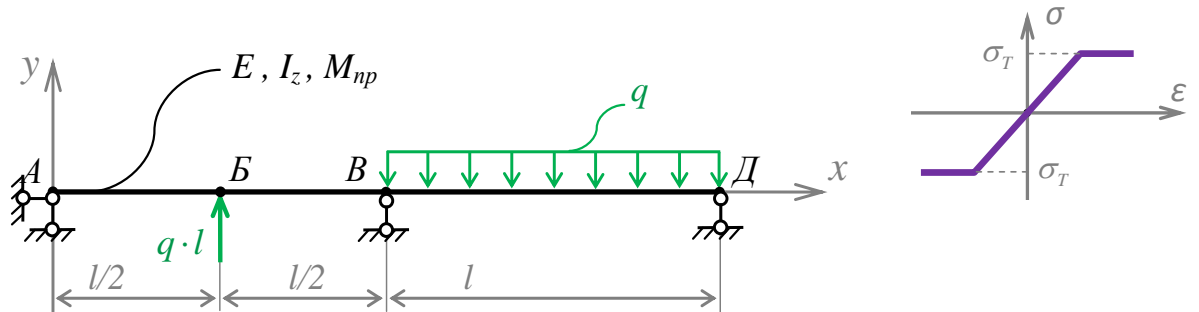
L-08 (ANSYS)

Формулировка задачи:

Дано: Статически неопределимая балка постоянной жёсткости с шарнирными опорами и комбинированной нагрузкой q и $q \cdot l$.

E – модуль упругости материала; I_z – изгибный момент инерции;

$M_{np} = M_L$ – предельный внутренний изгибающий момент.



Требуется: Определить предельное значение параметра нагрузки q_{np} и форму потери балкой несущей способности.

Аналитический расчёт (см. [L-08](#)) показывает следующие варианты форм потери несущей способности:

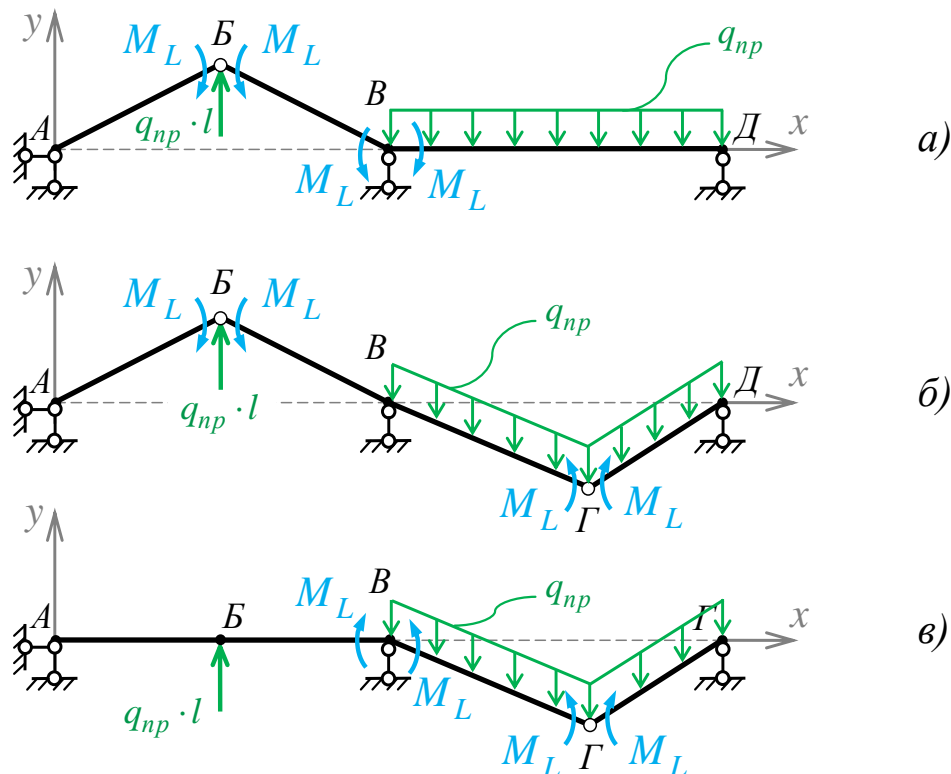
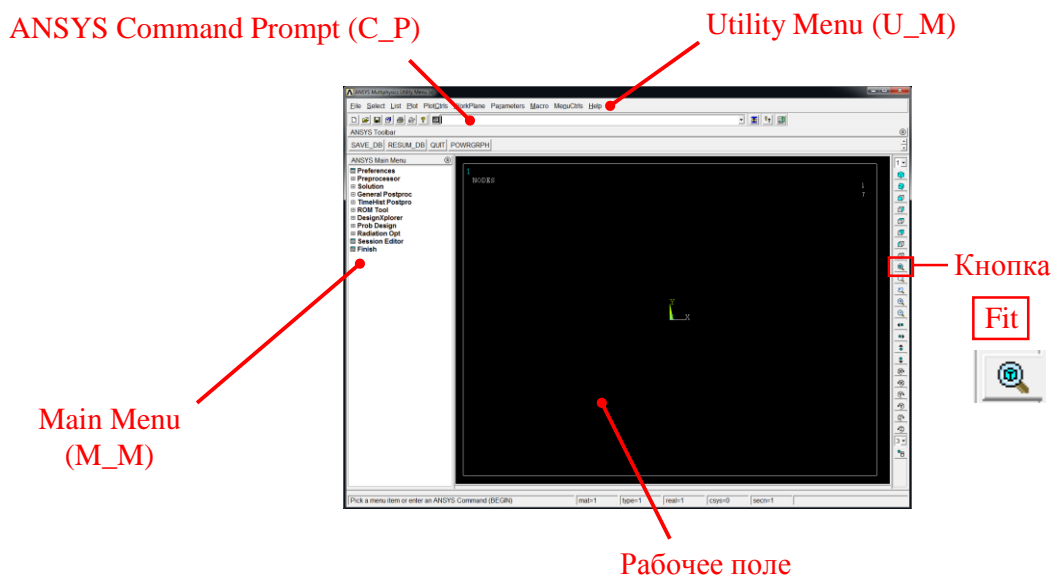


Рис. 1.

Задача данного примера: при помощи ANSYS Multiphysics выяснить методом конечных элементов, какая из возможных форм реализуется на самом деле.

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 следующими действиями:

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

В меню оставить только пункты, относящиеся к прочностным расчётам:

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

При построениях полезно видеть номера точек и линий твердотельной модели:

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

```
Отметить KP, LINE ;
```

```
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 >
```

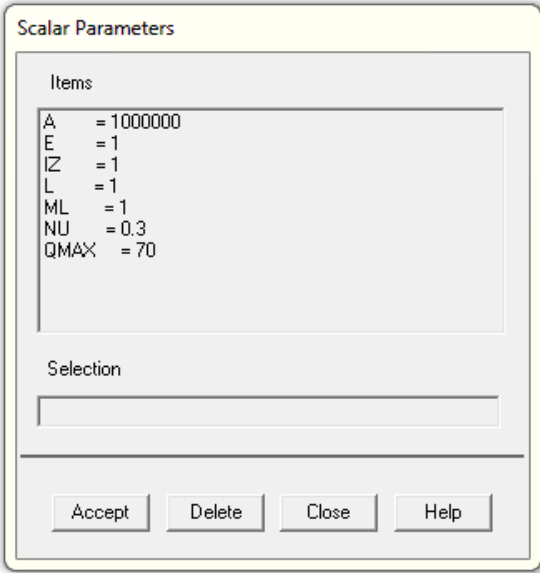
```
Установить «Размер» на «22»> OK
```

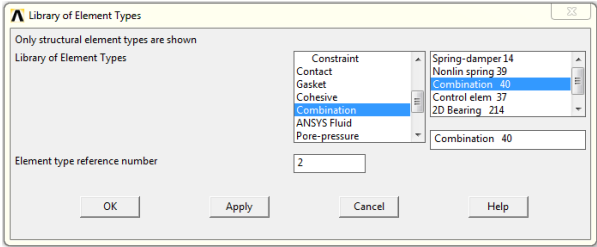
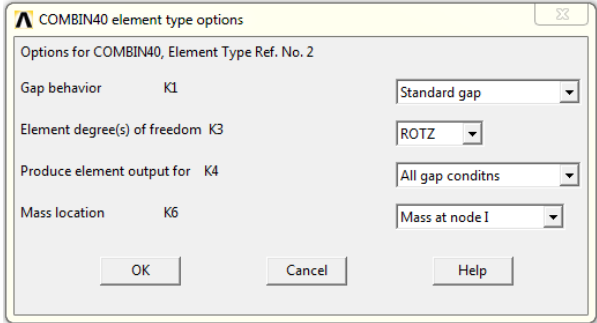
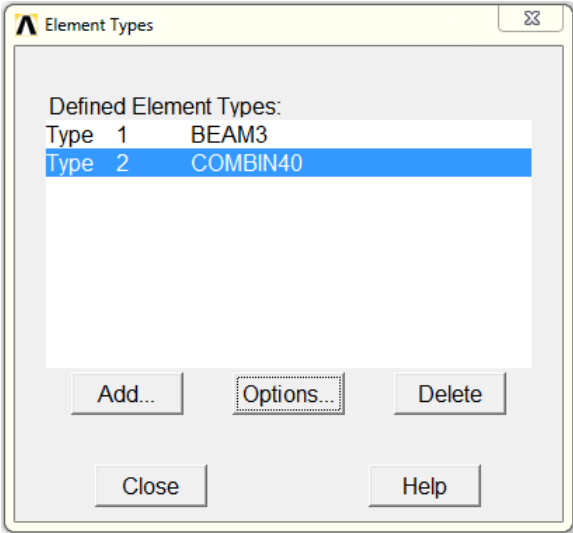
Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.

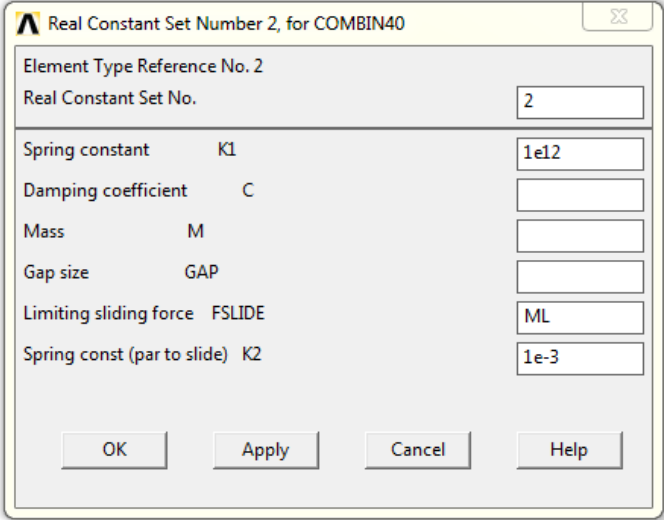
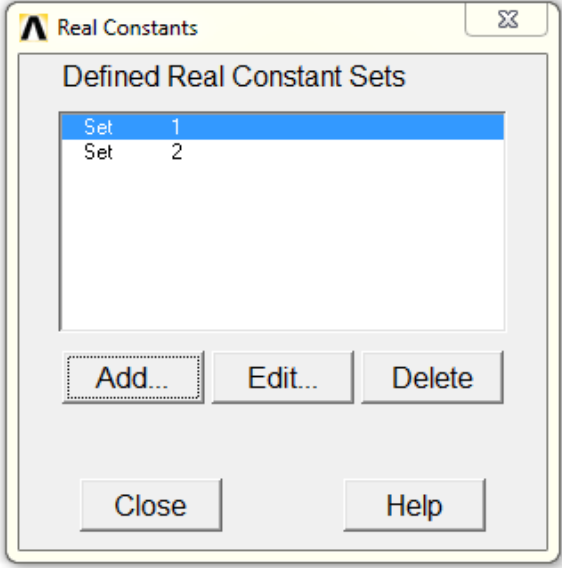
Решение задачи:

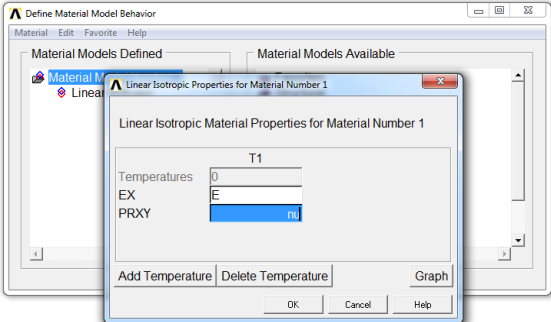


Параметры задачи должны иметь положительные ненулевые значения. Лучше, в районе единицы, это уменьшает вклад в результаты расчёта ошибок округления. Но A (площадь поперечного сечения) формально зададим существенно больше I_z (момент инерции поперечного сечения относительно оси упругого изгиба) для того, чтобы гнулся стержень легче, чем растягивался.

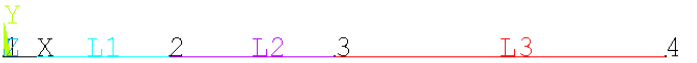
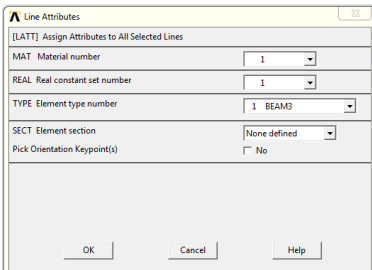
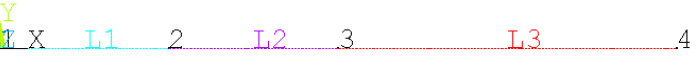
Диапазон поиска предельной нагрузки q_{np} должен заведомо содержать её значение. Аналитически эта задача на семинарах не решалась. Ориентируемся на значение верхней границы интервала поиска предельной распределённой нагрузки из задачи [L-07](#): $q_{max} = 70 \cdot \frac{M_L}{l^2}$. Нижняя граница диапазона поиска – нуль.

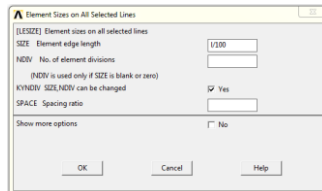
№	Действие	Результат
1	<p><i>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</i></p> <pre> U_M > Parameters > Scalar Parameters > ML=1 > Accept > l=1 > Accept > E=1 > Accept > nu=0.3 > Accept > A=1e6 > Accept > Iz=1 > Accept > qmax=70*ML/l**2 > Accept > > Close </pre>	

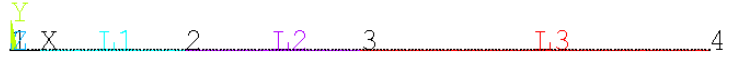
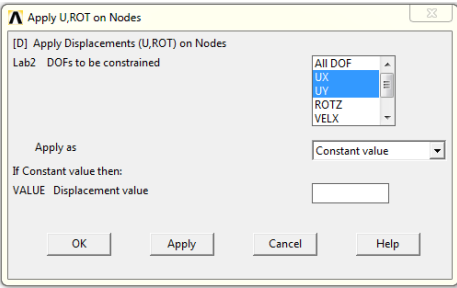
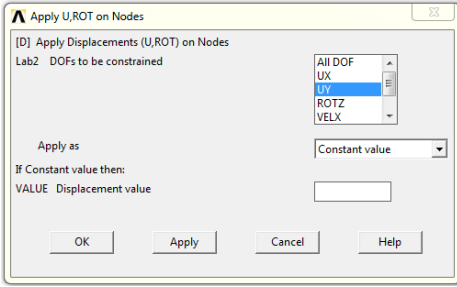
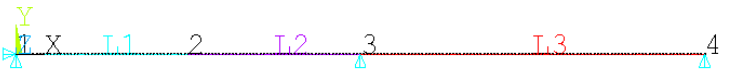
№	Действие	Результат
2	<p>Таблица конечных элементов:</p> <p>Плоский балочный BEAM3:</p> <p>M_M > Preprocessor C_P > ET,1, BEAM3 > Enter</p> <p>Пластический шарнир COMBIN40:</p> <p>M_M > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Add > В левом поле выбрать "Combination" В правом поле выбрать "Combination 40" Element type reference number пишем 2 > OK ></p>  <p>Мышью в окне Element Types выбираем строчку COMBIN40 > Options... > В графе K3 выбираем "ROTZ" > OK > > Close</p> 	

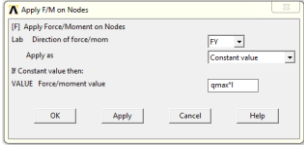
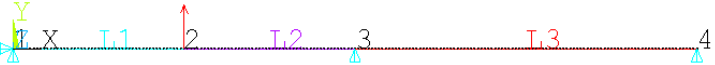
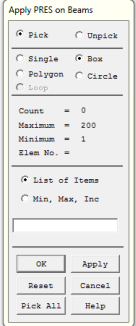
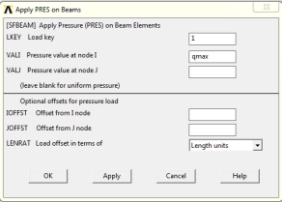
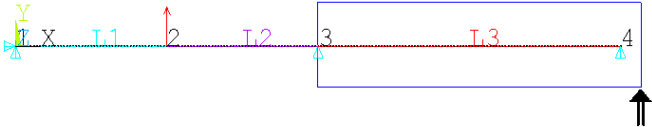
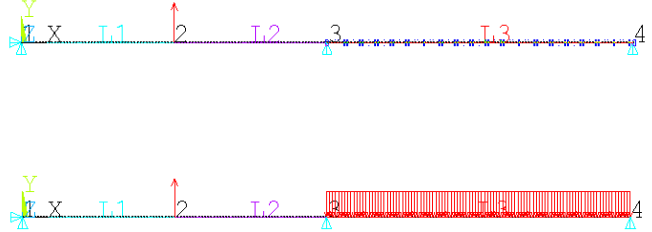
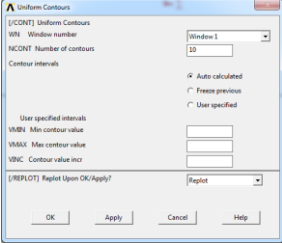
№	Действие	Результат
3	<p><i>Таблица реальных констант:</i></p> <p>Первая строчка - набор реальных констант для балочного элемента: площадь поперечного сечения A; момент инерции I_z; высота поперечного сечения $l/100$.</p> <p>$C_P > R, 1, A, I_z, L/100 >$ <input type="text" value="Enter"/></p> <p>Вторая строчка - набор реальных констант для пластического шарнира: высокая жёсткость K_1 [$H \cdot m / \text{радиан}$] до достижения предельного момента и предельный момент M_L в качестве «трения скольжения»; для формального исключения появления механизма после образования второго пластического шарнира устанавливаем дополнительную маленькую угловую жёсткость K_2 [$H \cdot m / \text{радиан}$]:</p> <p>$M_M > \text{Preprocessor} > \text{Real Constants} > \text{Add/Edit/Delete} > \text{Add}$ Выбрать строчку COMBIN40 > OK > В графе K_1 пишем $1e12$ В графе FSLIDE пишем ML В графе K_2 пишем $1e-3$ > OK > > Close</p> 	

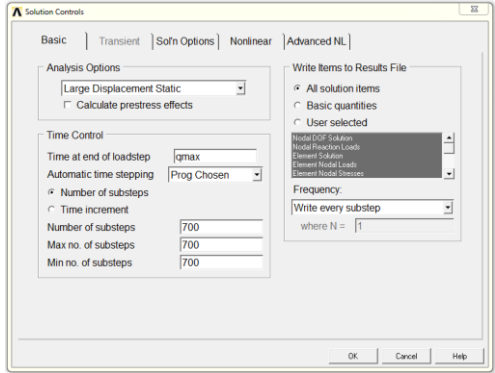
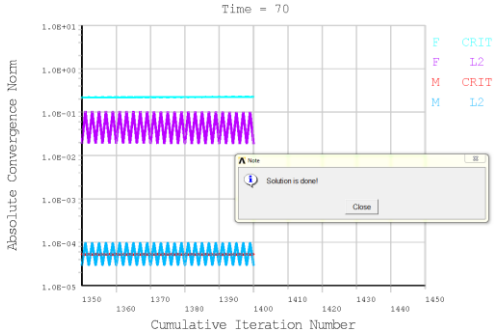
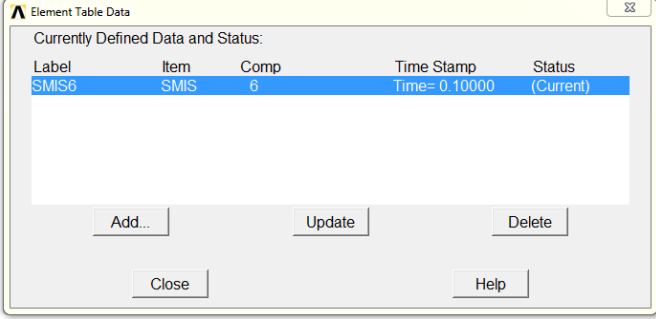
№	Действие	Результат
4	<p><i>Свойства материала стержня – модуль упругости и коэффициент Пуассона:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic ></p> <p>В окошке EX пишем "E", в окошке PRXY пишем "nu"</p> <p>> ОК</p> <p>Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p>	
Твердотельная модель		
5	<p><i>Ключевые точки – границы участков: А → 1, В → 2, С → 3 и D → 4</i></p> <p>M_M> Preprocessor> Modeling> Create> Keypoints> In Active CS></p> <p>NPT пишем 1</p> <p>X, Y, Z пишем 0, 0, 0</p> <p>> Apply ></p> <p>NPT пишем 2</p> <p>X, Y, Z пишем l/2, 0, 0</p> <p>> Apply ></p> <p>NPT пишем 3</p> <p>X, Y, Z пишем l, 0, 0</p> <p>> Apply ></p> <p>NPT пишем 4</p> <p>X, Y, Z пишем 2*l, 0, 0</p> <p>> ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Справа от рабочего поля нажимаем кнопку Fit .</p>	

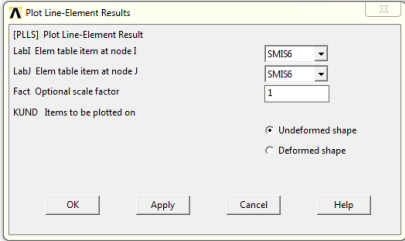
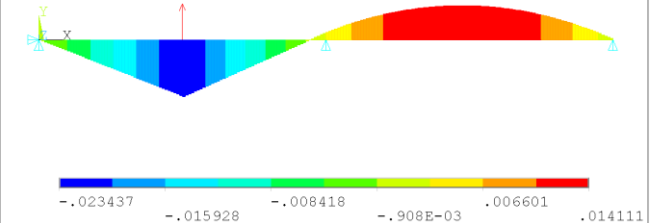
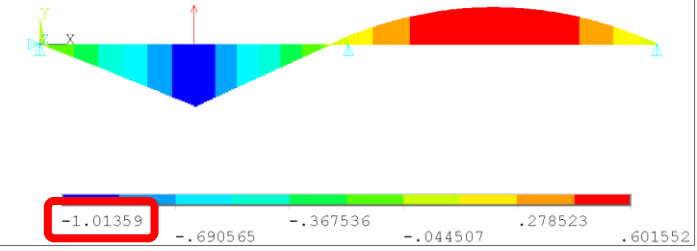
№	Действие	Результат
6	<p><i>Два участка – две линии:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line ></p> <p>Левой кнопкой мыши последовательно нажать на ключевые точки: 1 и 2 2 и 3 > ОК</p>	
Конечноэлементная модель		
7	<p><i>Атрибуты разбиения линиям - материал, реальные константы и тип элементов:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > All Lines ></p> <p>MAT установить "1" REAL установить "1" TYPE установить "1 BEAM3" > ОК</p>	
8	<p><i>Участки без распределённых нагрузок можно бить одним конечным элементом: Но нам понадобятся короткие балочные конечные элементы, каждый из которых можно превратить в пластический шарнир, поэтому размер элемента устанавливаем небольшим:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls ></p> <p>> ManualSize > Lines > All Lines > ОК</p> <p>В графе SIZE пишем 1/100 > ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	

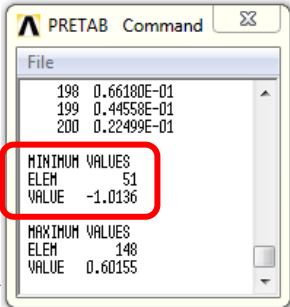
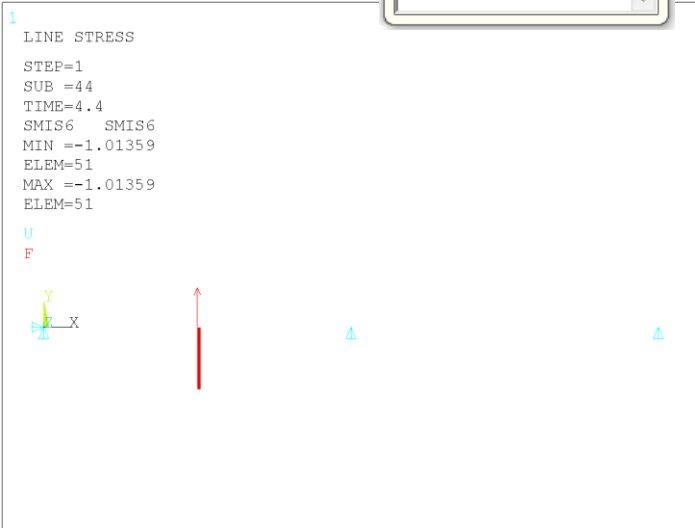


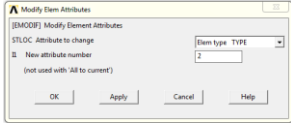
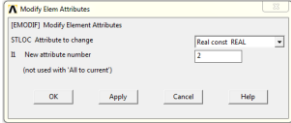
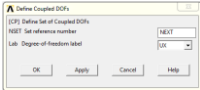
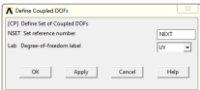
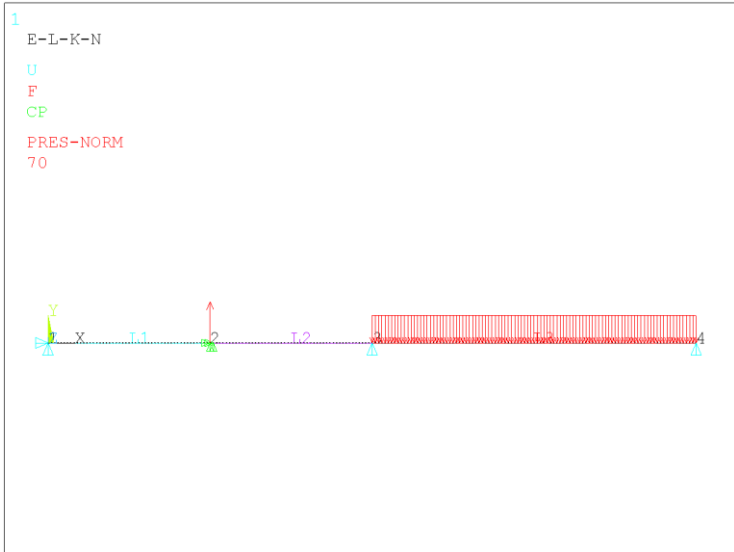
№	Действие	Результат
9	<p><i>Рабиваем линии на элементы:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines > Pick All</p> <p>Показываем обе модели, твердотельную и конечноэлементную:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p>	
10	<p><i>Опоры:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes ></p> <p>Левой кнопкой мыши нажать на узел в ключевой точке 1 > OK ></p> <p>Lab2 установить "UX"</p> <p>Lab2 установить "UY"</p> <p>> Apply ></p>  <p>Левой кнопкой мыши нажать на узлы в ключевых точках 3 и 4 > OK ></p> <p>Lab2 установить "UY"</p> <p>> OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p> 	

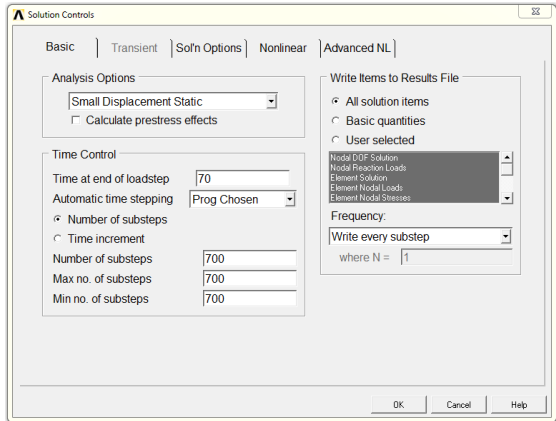
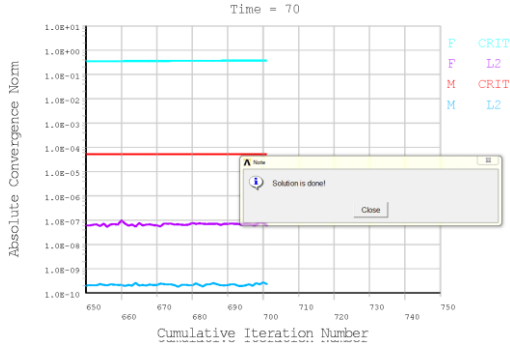
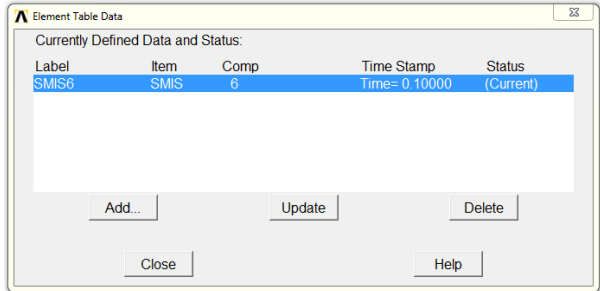
№	Действие	Результат
11	<p><i>Сосредоточенная нагрузка:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On Nodes > Левой кнопкой мыши нажать на узел в ключевой точке 2 > OK > Lab установить "FY" VALUE установить " qmax*l " > OK</p> 	
12	<p><i>Распределённая нагрузка:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Pressure > On Beams > Селектор появившегося окошка Apply PRES on Beams устанавливаем в положение "Box" Левой кнопкой мыши растянуть прямоугольник, в который попадают все конечные элементы линии L3 > OK > VALI qmax > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>  	 
13	<p><i>Цветовая шкала будет состоять из десяти цветов:</i></p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours > NCONT пишем 10 > OK</p>	

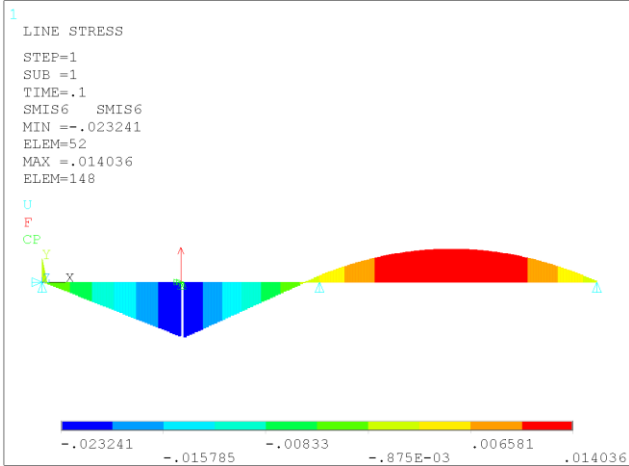
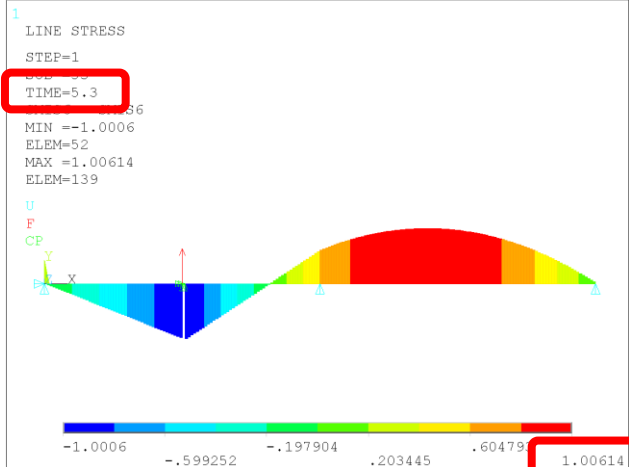
№	Действие	Результат
Определение положения первого пластического шарнира		
14	<p><i>Расчёт упругой балки при возрастающей нагрузке:</i></p> <p>Производим 700 расчётов упругой балки под нагрузкой q, которая равномерно увеличивается от 0 до q_{max}</p> <p>M_M > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls</p> <p>В графе Analysis Options выбираем Large Displacement Static</p> <p>В графе Time at end of loadstep пишем q_{max}</p> <p>Левый селектор ставим на Number of substeps</p> <p>В графе Number of substeps пишем 700</p> <p>В графе Max no. of substeps пишем 700</p> <p>В графе Min no. of substeps пишем 700</p> <p>Правый селектор ставим на All solution items</p> <p>В графе Frequency выбираем Write every substep</p> <p>> OK</p> <p>Запускаем расчёт:</p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS > OK</p> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Закройте это окно.</p>	 
15	<p><i>Составление эпюры внутреннего изгибающего момента $M_{изг}$ на первом шаге по нагрузке:</i></p> <p>M_M > General Postproc > Read Results > First Set</p> <p>M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Add ></p> <p>В левом списке выбрать "By sequence num"</p> <p>В правом верхнем списке выбрать "SMISC,"</p> <p>В правой нижней графе пишем "SMISC,6"</p> <p>> OK ></p> <p>> Close</p>	

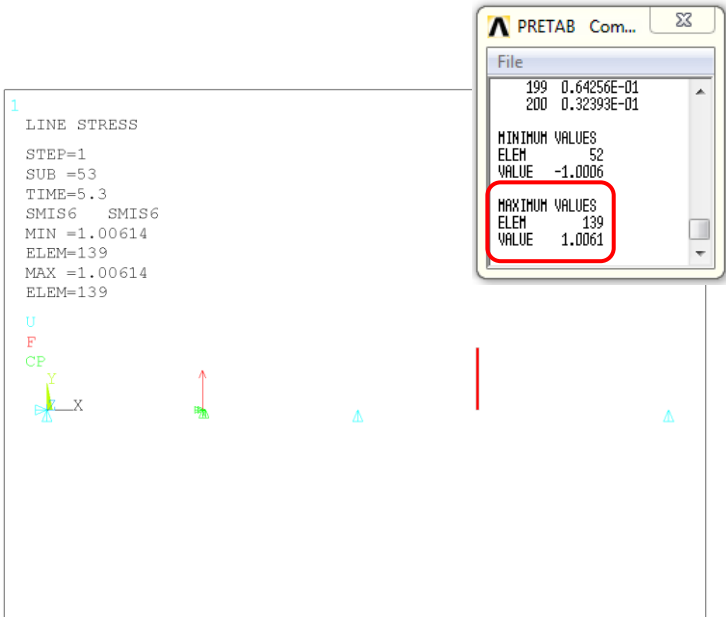
№	Действие	Результат
16	<p>Эпюра M_{u32} на первом шаге:</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > > Contour Plot > Line Elem Res > LabI установить "SMIS6" LabJ установить "SMIS6" > OK</p> <p>Некоторые символы пропадают. Восстановим их:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Symbols > Boundary condition устанавливаем "All Applied BCs" > OK</p> <p>Эпюры будем смотреть на недеформированной форме:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "0.0 (off)" > OK</p>	 <pre data-bbox="1422 331 2072 810"> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=.1 SMIS6 SMIS6 MIN =-.023437 ELEM=51 MAX =.014111 ELEM=148 U F </pre> 
17	<p>Нагрузка, соответствующая образованию первого пластического шарнира:</p> <p>C_P > SET, NEXT \$ ETABLE, REFL \$ /REPLOT > Enter</p> <p>Эпюра перерисовывается – сила q увеличилась (это видно по надписи Time), эпюра увеличилась тоже (это видно по цветовой шкале).</p> <p>Вводите команду «SET, NEXT \$ ETABLE, REFL \$ /REPLOT» до тех пор, пока максимальное или минимальное значение внутреннего изгибающего момента на эпюре не превысит по модулю значения $M_L=1$.</p> <p>Видим: первый пластический шарнир ($M_{u32}=-1,01359 \cdot M_L$) образуется в вершине под сосредоточенной силой при значении внешней нагрузки:</p> $q = 4,4 \cdot \frac{M_L}{l^2} \cdot$	<pre data-bbox="1400 933 2094 1460"> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =44 TIME=4.4 SMIS6 SMIS6 MIN =-1.01359 ELEM=51 MAX =.601552 ELEM=148 U F </pre> 

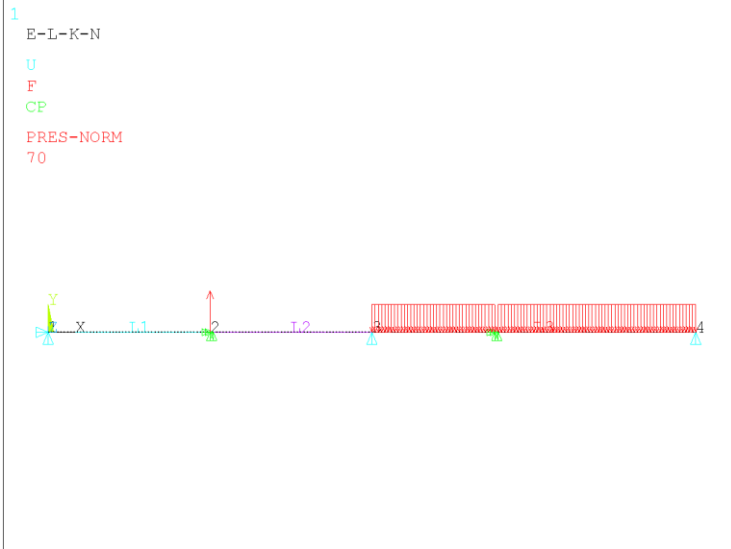
№	Действие	Результат
Вставка первого пластического шарнира		
18	<p><i>Место образования первого пластического шарнира:</i></p> <p>Номер элемента с экстремальным положительным моментом:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Elem Table Data</p> <p>В окне List Element Table Data отмечаем SMIS6 > OK</p> <p>Смотрим в конец списка: момент $-1,0136$ реализуется в элементе №51.</p> <p>Выделим этот элемент:</p> <p>U_M > Select > Entities ></p> <p>В первой графе устанавливаем "Elements"</p> <p>Во второй графе устанавливаем "By Num/Pick"</p> <p>Селектор устанавливаем на "From Full"</p> <p>> OK ></p> <p>В графе окна Select elements пишем 51</p> <p>> OK</p> <p>Перерисовываем изображение: U_M > Plot > Replot</p>	 <pre> PRETAB Command File 198 0.66180E-01 199 0.44558E-01 200 0.22499E-01 MINIMUM VALUES ELEM 51 VALUE -1.0136 MAXIMUM VALUES ELEM 148 VALUE 0.60155 </pre>  <pre> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =44 TIME=4.4 SMIS6 SMIS6 MIN =-1.01359 ELEM=51 MAX =-1.01359 ELEM=51 U F </pre>

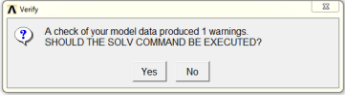
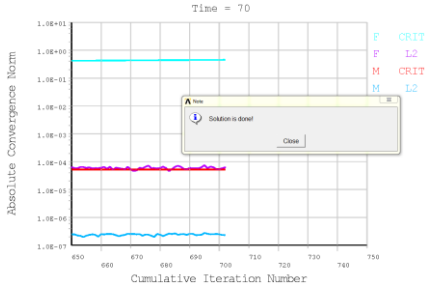
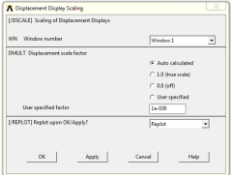

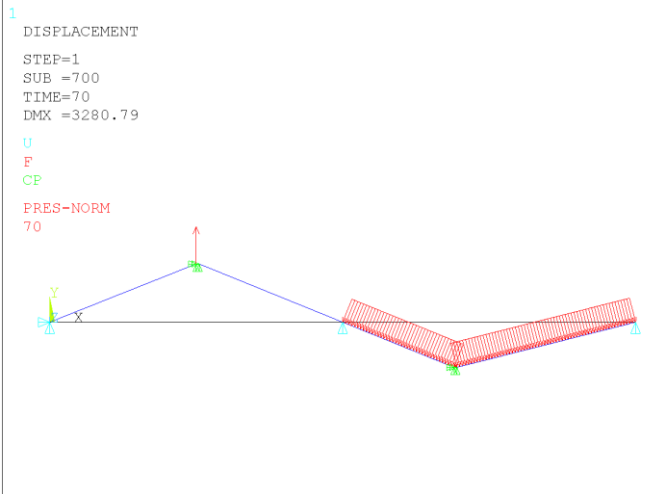
№	Действие	Результат
19	<p><i>Вместо выделенного балочного элемента устанавливаем пластический шарнир:</i></p> <pre>M_M > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > > Elements > Modify Attrib > Pick All STLOC устанавливаем "Elem type TYPE" И1 пишем 2 > Apply > Pick All > STLOC устанавливаем "Real const REAL" И1 пишем 2 > ОК</pre> <p>Узлы выделенного элемента:</p> <pre>U_M > Select > Everything Below > Selected Elements</pre> <p>Связываем эти два узла по вертикали и по горизонтали. По угловому перемещению узлы уже связаны пластическим шарниром – элементом COMBIN40:</p> <pre>M_M > Preprocessor > Coupling/Ceqn > Couple DOFs > Pick All > NSET пишем NEXT Lab выбираем UX > Apply > Pick All > NSET пишем NEXT Lab выбираем UY > ОК</pre> <p>Выделить всё: <pre>U_M > Select > Everything</pre></p> <p>Обновляем изображение: <pre>U_M > Plot > Multi-Plots</pre></p> <p>Изображение распределённой нагрузки пропадает. Восстановим его:</p> <pre>U_M > PlotCtrls > Symbols > [/PSF] устанавливаем "Pressures" > ОК</pre>	    

№	Действие	Результат
Поиск второго пластического шарнира		
20	<p><i>Расчёт балки с одним пластическим шарниром при возрастающей нагрузке:</i></p> <p>Множество расчётов ANSYS позволяет только в нелинейной задаче, поэтому в упругую балку мы привнесли геометрическую нелинейность учётом больших перемещений (опция Large Displacement Static, действие 14). Теперь нелинейность в задачу итак вносит пластический шарнир. Отказываемся от учёта больших перемещений для лучшего совпадения с результатами аналитического расчёта:</p> <p>M_M > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls В графе Analysis Options выбираем Small Displacement Static > OK</p> <p>Запускаем расчёт:</p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS > OK В окне Verify нажмите кнопку OK</p> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Закройте это окно.</p>	 
21	<p><i>Составление эпюры внутреннего изгибающего момента на первом шаге по нагрузке:</i></p> <p>M_M > General Postproc > Read Results > First Set M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Update > Close</p>	

№	Действие	Результат
22	<p><i>Этюра на первом шаге:</i></p> <p>Этюра внутреннего изгибающего момента в балке с одним пластическим шарниром: M_M > General Postproc > Plot Results > > Contour Plot > Line Elem Res > LabI установить "SMIS6" LabJ установить "SMIS6" > OK</p> <p>Некоторые символы пропадают. Восстановим их: U_M > PlotCtrls > Symbols > Boundary condition устанавливаем "All Applied BCs" > OK</p> <p>Этюры будем смотреть на недеформированной форме: U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "0.0 (off)" > OK</p>	
23	<p><i>Нагрузка образования второго пластического шарнира:</i></p> <p>C_P > SET, NEXT \$ ETABLE, REFL \$ /REPLOTT > <input type="button" value="Enter"/></p> <p>Вводите команду «SET, NEXT \$ ETABLE, REFL \$ /REPLOTT» до тех пор, пока максимальное или минимальное значение внутреннего изгибающего момента вне первого пластического шарнира не превысит по модулю значения $M_L=1$.</p> <p>Видим: второй пластический шарнир ($M_{уз2}=-1,00614 \cdot M_L$) образуется в срединной опоре при значении внешней нагрузки:</p> $q_{np} = 5,3 \cdot \frac{M_L}{l^2}$	

№	Действие	Результат																				
Вставка второго пластического шарнира																						
24	<p><i>Место образования второго пластического шарнира:</i></p> <p>Номер элемента с экстремальным отрицательным моментом:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Elem Table Data</p> <p>В окне List Element Table Data отмечаем SMIS6 > OK</p> <p>Момент 1.0061 реализуется в элементе №139.</p> <p>Выделим этот элемент:</p> <p>U_M > Select > Entities ></p> <p>В первой графе устанавливаем "Elements"</p> <p>Во второй графе устанавливаем "By Num/Pick"</p> <p>> OK ></p> <p>В графе окна Select elements пишем 139 > OK</p> <p>Перерисовываем изображение: U_M > Plot > Replot</p>	 <pre> 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =53 TIME=5.3 SMIS6 SMIS6 MIN =1.00614 ELEM=139 MAX =1.00614 ELEM=139 U F CP </pre> <table border="1" data-bbox="1861 336 2114 612"> <thead> <tr> <th colspan="2">PRETAB Com...</th> </tr> <tr> <th colspan="2">File</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>199</td> <td>0.64256E-01</td> </tr> <tr> <td>200</td> <td>0.32393E-01</td> </tr> <tr> <td colspan="2">MINIMUM VALUES</td> </tr> <tr> <td>ELEM</td> <td>52</td> </tr> <tr> <td>VALUE</td> <td>-1.0006</td> </tr> <tr> <td colspan="2">MAXIMUM VALUES</td> </tr> <tr> <td>ELEM</td> <td>139</td> </tr> <tr> <td>VALUE</td> <td>1.0061</td> </tr> </tbody> </table>	PRETAB Com...		File		199	0.64256E-01	200	0.32393E-01	MINIMUM VALUES		ELEM	52	VALUE	-1.0006	MAXIMUM VALUES		ELEM	139	VALUE	1.0061
PRETAB Com...																						
File																						
199	0.64256E-01																					
200	0.32393E-01																					
MINIMUM VALUES																						
ELEM	52																					
VALUE	-1.0006																					
MAXIMUM VALUES																						
ELEM	139																					
VALUE	1.0061																					

№	Действие	Результат
25	<p>Вместо выделенного элемента устанавливаем второй пластический шарнир:</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > > Elements > Modify Attrib > Pick All STLOC устанавливаем "Elem type TYPE" I1 пишем 2 > Apply > Pick All > STLOC устанавливаем "Real const REAL" I1 пишем 2 > OK</p> <p>Узлы выделенного элемента:</p> <p>U_M > Select > Everything Below > Selected Elements</p> <p>Связываем эти два узла по вертикали и по горизонтали. По угловому перемещению узлы уже связаны пластическим шарниром – элементом COMBIN40:</p> <p>M_M > Preprocessor > Coupling/Ceqn > Couple DOFs > Pick All > NSET пишем NEXT Lab выбираем UX > Apply > Pick All > NSET пишем NEXT Lab выбираем UY > OK</p> <p>Выделить всё: U_M > Select > Everything</p> <p>Обновляем изображение: U_M > Plot > Multi-Plots</p> <p>Изображение распределённой нагрузки пропадает. Восстановим его: U_M > PlotCtrls > Symbols > [/PSF] устанавливаем "Pressures" > OK</p>	

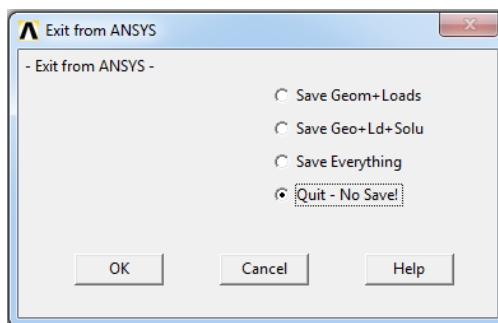
№	Действие	Результат
Форма потери несущей способности		
26	<p>Расчёт балки с двумя пластическими шарнирами при возрастающей до q_{max} нагрузке:</p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS > OK В окне Verify нажмите кнопку OK</p>  <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Закройте это окно.</p>	
27	<p>Форма оси нагруженной балки на последнем шаге нагружения:</p> <p>Результаты расчёта на инальном шаге по нагрузке: M_M > General Postproc > Read Results > Last Set</p> <p>Масштаб перемещений выбирается автоматически: U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "Auto calculated" > OK</p> <p>Прорисовывать деформированную и недеформированную формы: 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>Налицо совпадение с формой потери несущей способности, показанной на рис. 1б.</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” и “.stat”.

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