

L-06 (ANSYS)

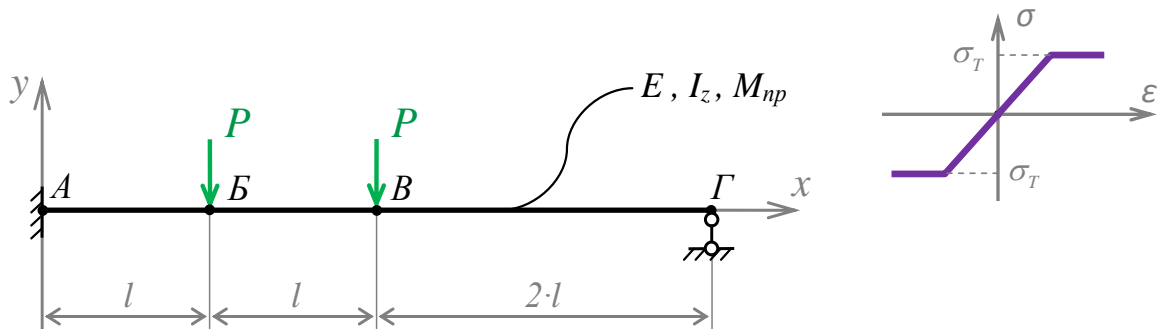
Формулировка задачи:

Дано: Статически неопределимая балка постоянной жёсткости с шарнирными опорами нагружена двумя сосредоточенными силами P .

E – модуль упругости материала;

I_z – упругий изгибный момент инерции;

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



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

Аналитический расчёт (см. [L-06](#)) показывает следующее предельное состояние:

$$P_{np} = l \cdot \frac{M_L}{l}$$

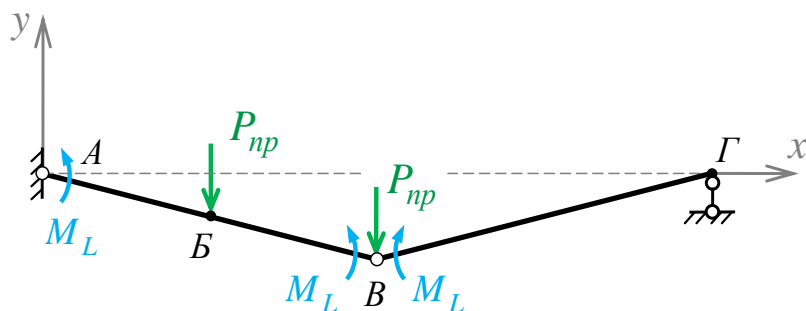
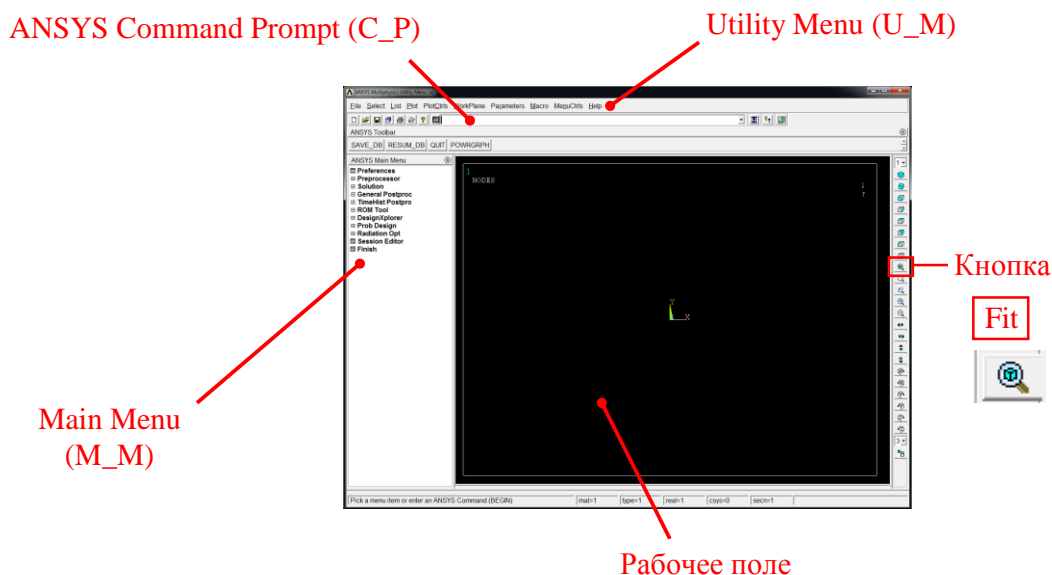


Рис. 1.

Задача данного примера: при помощи ANSYS Multyphysics получить это же значение предельной нагрузки и эту же форму потери несущей способности.

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 >
```

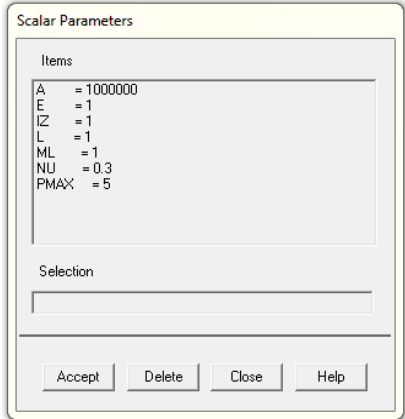
```
Установить «Размер» на «22»> OK
```

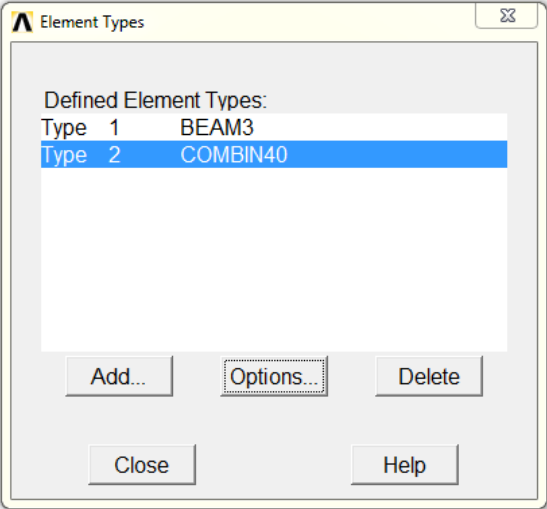
Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.

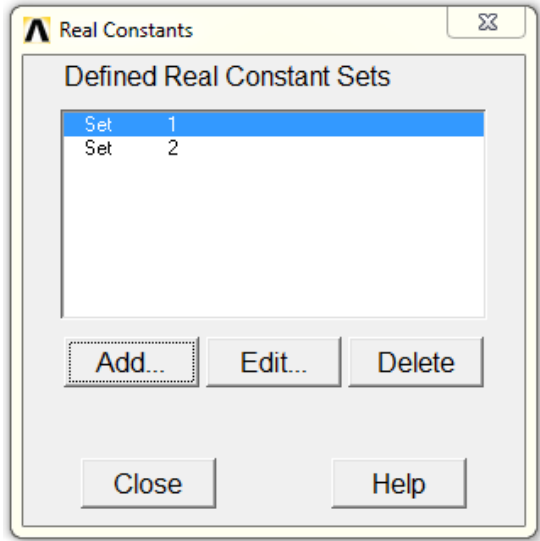
Решение задачи Приравняв M_L и l к единице, результат получим в виде числа, обозначенного на *рис. 1*. сиреневым цветом.

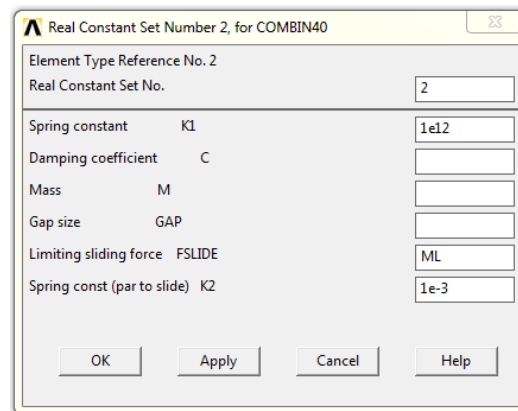
Конкретные значения модуля упругости E , площади поперечного сечения A , изгибного момента инерции сечения I_z и коэффициента Пуассона ν на результат не влияют, они должны быть ненулевыми. Но A формально зададим существенно больше I_z для того, чтобы гнулся стержень легче, чем растягивался.

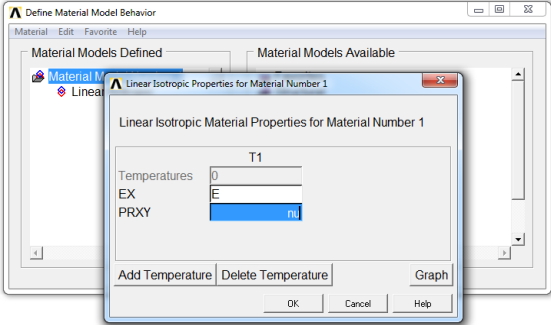

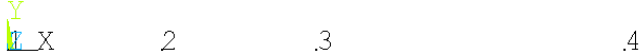
Диапазон поиска предельной нагрузки P_{np} должен заведомо содержать её значение. Ориентируемся на значение P_{np} , вычисленное аналитически: $1 \cdot \frac{M_L}{l}$. Диапазон выбираем в несколько раз больший, с верхней границей $P_{max} = 5 \cdot \frac{M_L}{l}$. Нижняя граница диапазона поиска – нуль.

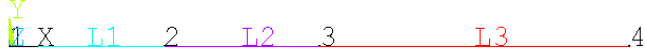
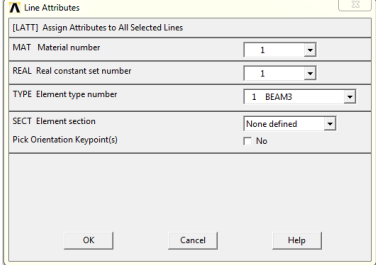
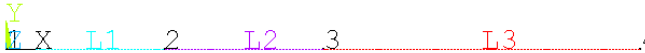
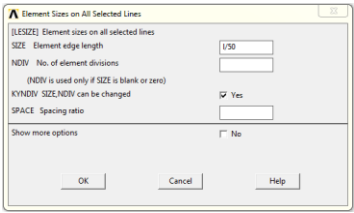
№	Действие	Результат
1	<p>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</p> <p>U_M > Parameters > Scalar Parameters ></p> <p>ML=1 > Accept ></p> <p>l=1 > Accept ></p> <p>E=1 > Accept ></p> <p>nu=0.3 > Accept ></p> <p>A=1e6 > Accept ></p> <p>Iz=1 > Accept ></p> <p>Pmax=5*ML/l > Accept ></p> <p>> Close</p>	

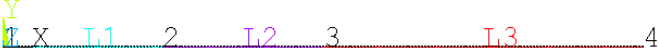
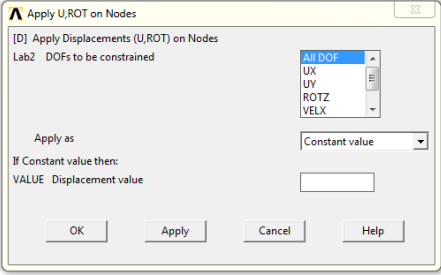
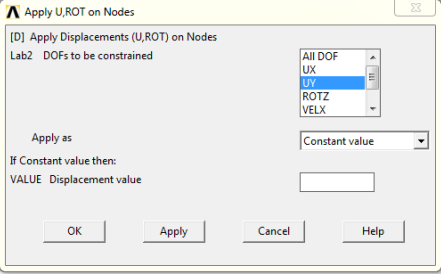
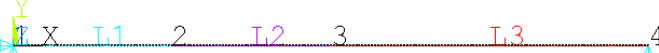
№	Действие	Результат
2	<p>Таблица конечных элементов:</p> <p>Плоский балочный BEAM3:</p> <p>M_M > Preprocessor C_P > ET,1, BEAM3 > Enter</p> <p>Пластический шарнир COMBIN40:</p> <p>M_M > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Add > В левом поле выбрать "Combination" В правом поле выбрать "Combination 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>	

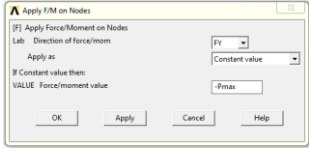
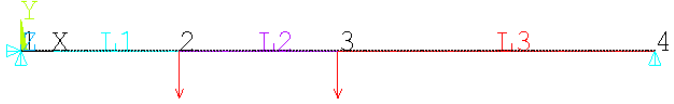
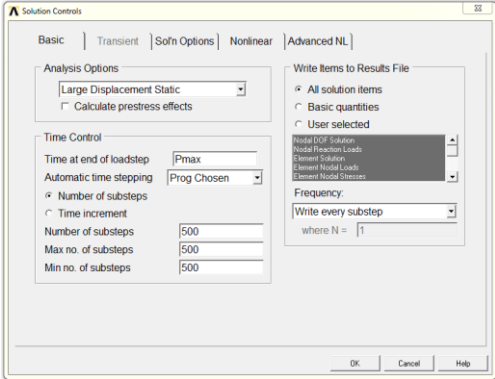
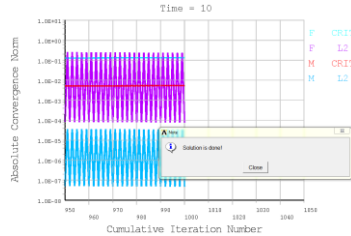
№	Действие	Результат
3	<p>Таблица реальных констант:</p> <p>Первая строчка - набор реальных констант для балочного элемента: площадь поперечного сечения A; момент инерции I_z; высота поперечного сечения $l/100$.</p> <p>$C_P > R, 1, A, I_z, L/100 > \text{Enter}$</p> <p>Вторая строчка - набор реальных 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 M_L В графе K_2 пишем $1e-3$ > OK > > Close</p>	

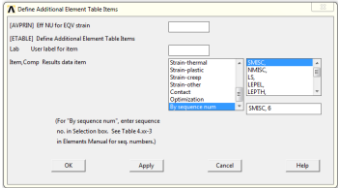
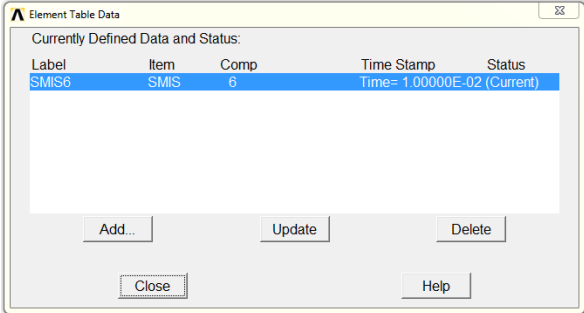
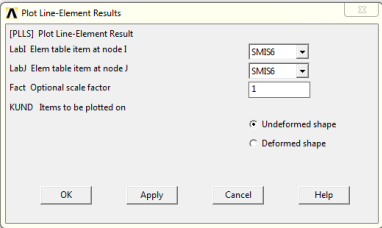
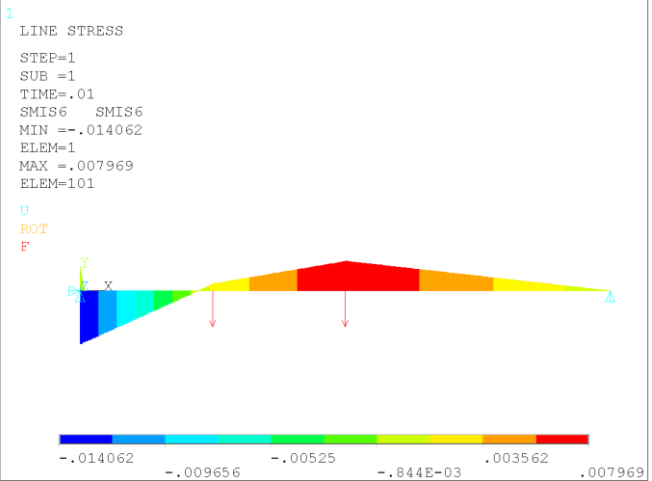



№	Действие	Результат
4	<p><i>Свойства материала стержня – модуль упругости и коэффициент Пуассона:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic ></p> <p>В окошке EX пишем "E", в окошке PRXY пишем "nu"</p> <p>> OK</p> <p>Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p>	
<h3>Твердотельное моделирование</h3>		
5	<p><i>Ключевые точки – границы участков: A → 1, B → 2, B → 3 и Г → 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 > Apply ></p> <p>NPT пишем 2</p> <p>X, Y, Z пишем l, 0, 0 > Apply ></p> <p>NPT пишем 3</p> <p>X, Y, Z пишем 2*l, 0, 0 > Apply ></p> <p>NPT пишем 4</p> <p>X, Y, Z пишем 4*l, 0, 0 > OK</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>Три участка – три 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 3 и 4 > 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:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Size Cntrls ></p> <p>> ManualSize > Lines > All Lines > ОК</p> <p>В графе SIZE пишем 1/50 > ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	 

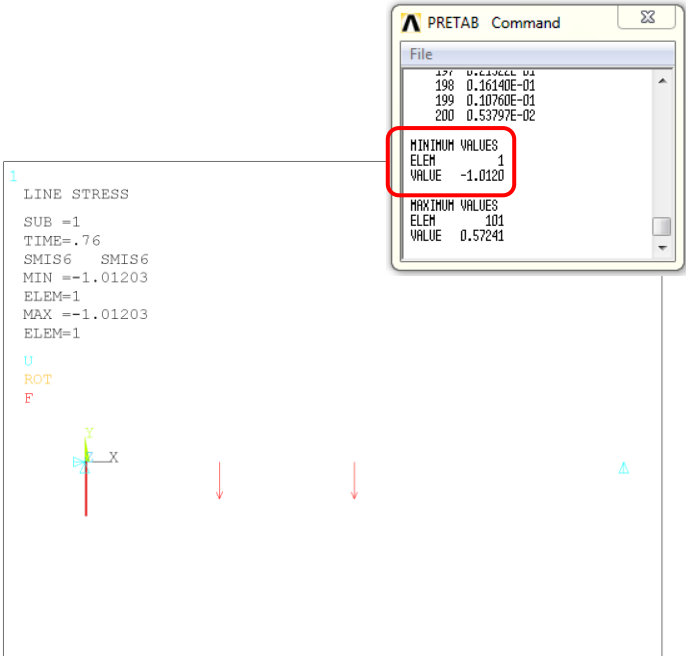
№	Действие	Результат
9	<p><i>Рабиваем линии на элементы:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines > Pick All</p> <p>Показываем обе модели, твердотельную и конечноэлементную:</p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p>	
10	<p><i>Опоры:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply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

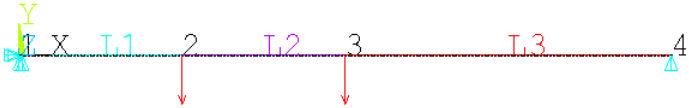
№	Действие	Результат
11	<p><i>Нагрузка – внешние сосредоточенные силы:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On Nodes > Левой кнопкой мыши нажать на узлы в ключевых точках 2 и 3 > OK > Lab установить "FY" VALUE установить "-Pmax" > OK</p> 	
12	<p><i>Цветовая шкала будет состоять из десяти цветов:</i></p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours > NCONT пишем 10 > OK</p>	
<p>Поиск первого пластического шарнира в диапазоне нагрузок $P=(0...5) \cdot M_L / l$</p>		
13	<p><i>Расчёт упругой балки при возрастающей нагрузке:</i></p> <p>Производим 500 расчётов упругой балки под нагрузкой P, которая равномерно увеличивается от 0 до P_{max}</p> <p>M_M > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls В графе Analysis Options выбираем Large Displacement Static В графе Time at end of loadstep пишем P_{max} Левый селектор ставим на Number of substeps В графах Number of substeps, Max no. of substeps и Min no. of substeps пишем 500 Правый селектор ставим на All solution items В графе Frequency выбираем Write every substep > OK</p> <p>Запускаем расчёт: M_M > Solution > Solve > Current LS > OK Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Закройте это окно.</p>	 

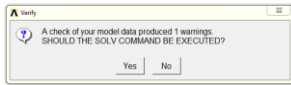
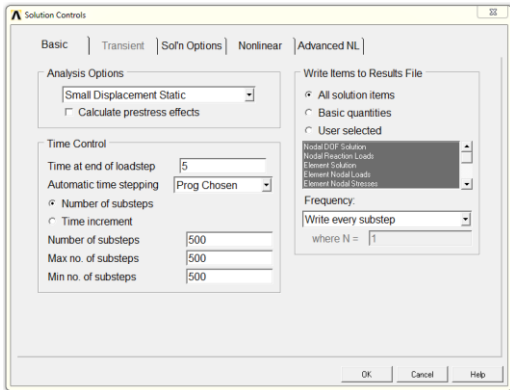
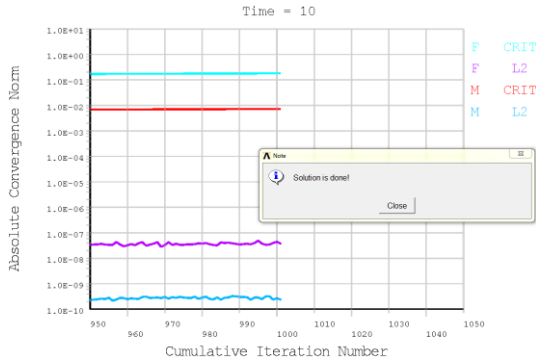
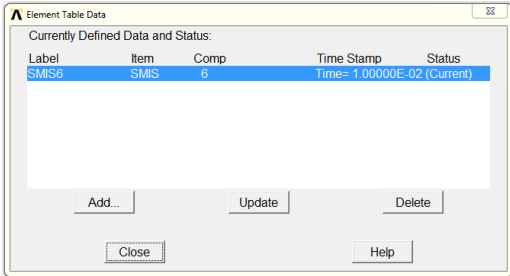
№	Действие	Результат
14	<p><i>Составление эпюры внутреннего изгибающего момента на первом шаге:</i></p> <p>M_M > General Postproc > Read Results > First Set M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Add > В левом списке выбрать "By sequence num" В правом верхнем списке выбрать "SMISC," В правой нижней графе пишем "SMISC,6" > OK > > Close</p> 	
15	<p><i>Эпюра на первом шаге:</i></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> 	

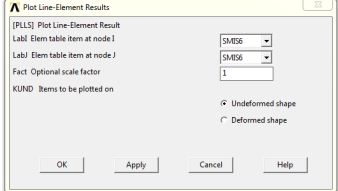
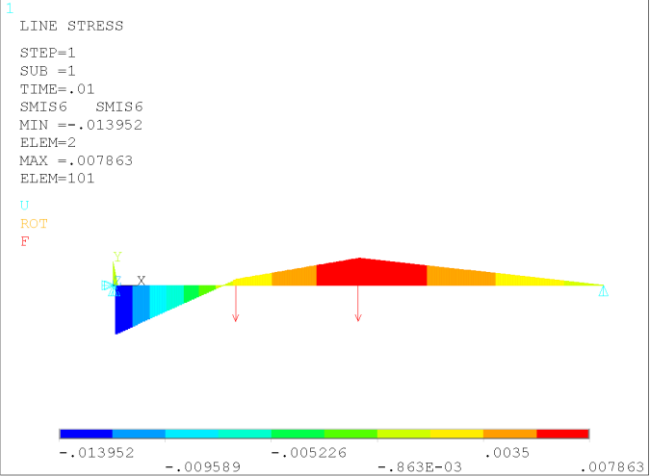
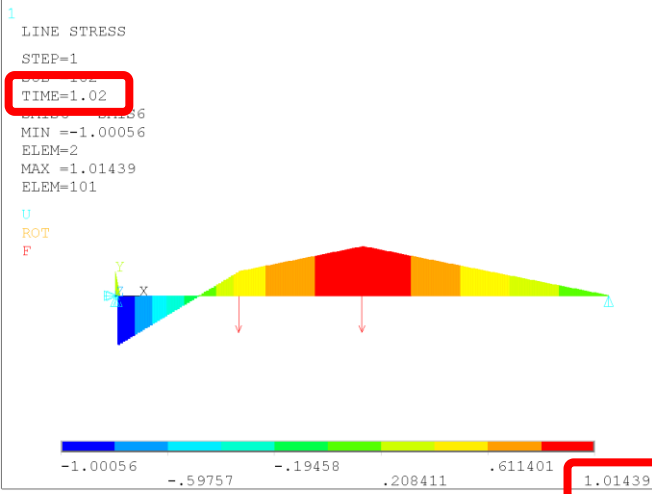
№	Действие	Результат
16	<p>Нагрузка, при которой образуется первый пластический шарнир:</p> <p><code>C_P > SET, NEXT \$ ETABLE, REFL \$ /REPLOTT > Enter</code></p> <p>Эпюра перерисовывается – сила P увеличилась (это видно по надписи Time), эпюра увеличилась тоже (это видно по цветовой шкале).</p> <p>Вводите команду «<code>SET, NEXT \$ ETABLE, REFL \$ /REPLOTT</code>» до тех пор, пока максимальное или минимальное значение внутреннего изгибающего момента на эпюре не превысит по модулю значения $ML=1$.</p> <p>Первый шарнир ($M_{изг} = -1,01203 \cdot M_L$) образуется в заделке при $P = 0,76 \cdot \frac{M_L}{l}$.</p>	

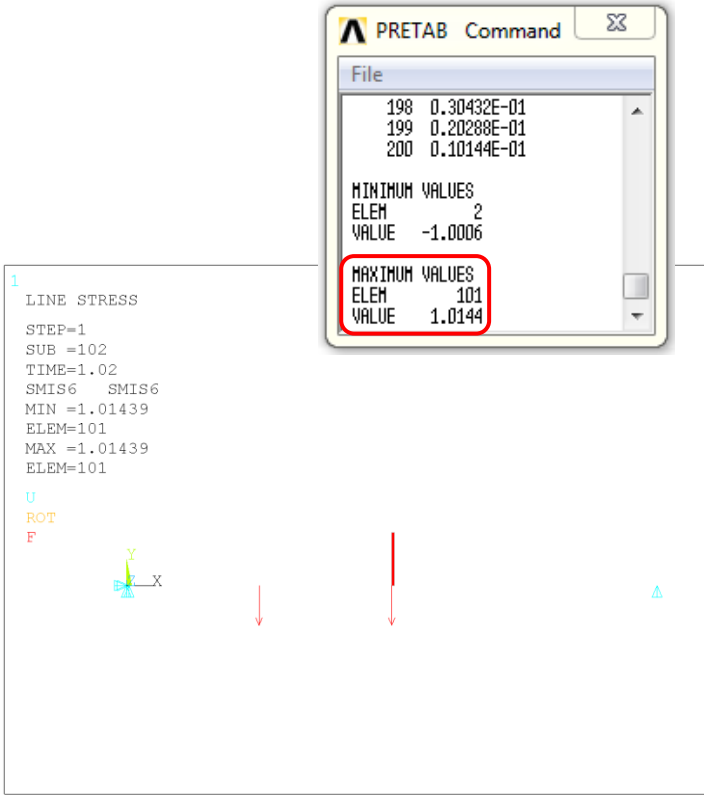
Вставка первого пластического шарнира

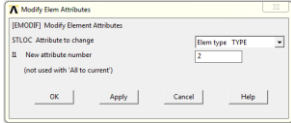
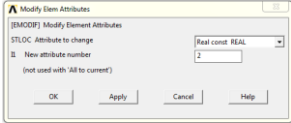
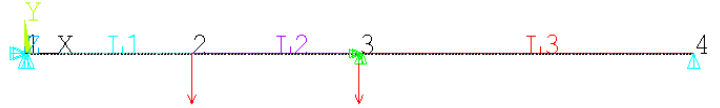
17	<p>Место образования первого пластического шарнира:</p> <p>Номер элемента с экстремальным положительным моментом:</p> <p><code>M_M > General Postproc > List Results > Elem Table Data</code></p> <p>В окне List Element Table Data отмечаем SMIS6</p> <p><code>> OK</code></p> <p>Смотрим в конец списка: момент $-1,0120$ реализуется в элементе №1.</p> <p>Выделим этот элемент:</p> <p><code>U_M > Select > Entities ></code></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><code>> OK ></code></p> <p>В графе окна Select elements пишем 1</p> <p><code>> OK</code></p> <p>Перерисовываем изображение: <code>U_M > Plot > Replot</code></p>	
----	---	--

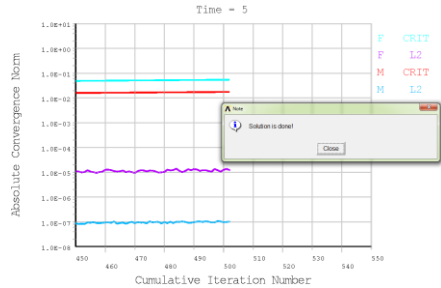
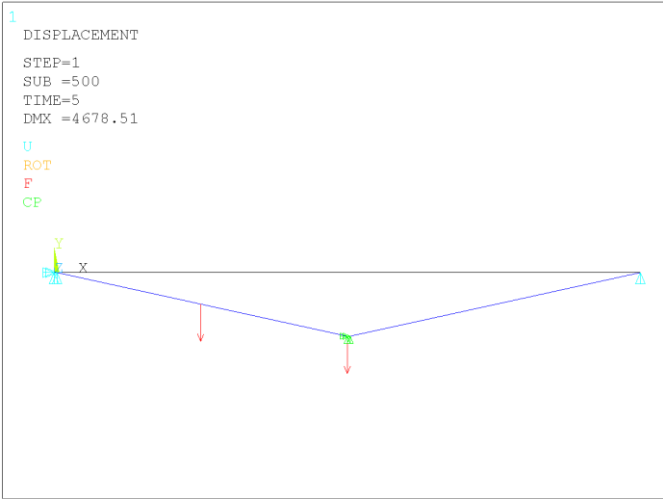
№	Действие	Результат
18	<p><i>Вставка первого пластического шарнира:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > > Elements > Modify Attrib > Pick All STLOC устанавливаем "Elem type TYPE" I1 пишем 2 > Apply > Pick All > STLOC устанавливаем "Real const REAL" I1 пишем 2 > OK</p> <p><i>Узлы выделенного элемента:</i></p> <p>U_M > Select > Everything Below > Selected Elements</p> <p>Закрепляем (а не связываем! в заделке связь работать не будет) эти два узла по вертикали и по горизонтали. По угловому перемещению узлы уже связаны пластическим шарниром – элементом COMBIN40:</p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes > Pick All Lab2 установить "UY" и "UX" > OK</p> <p><i>Выделить всё:</i></p> <p>U_M > Select > Everything</p> <p><i>Обновляем изображение:</i></p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p>	

№	Действие	Результат
Поиск второго пластического шарнира в диапазоне нагрузок $P=(0...5) \cdot M_L/l$		
19	<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 13). 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>	 
20	<p><i>Составление эпюры внутреннего изгибающего момента на первом шаге:</i></p> <p>M_M > General Postproc > Read Results > First Set M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Update > Close</p>	

№	Действие	Результат
21	<p>Этюра на первом шаге:</p> <p>Этюра внутреннего изгибающего момента в балке с одним пластическим шарниром:</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>Этюры будем смотреть на недеформированной форме:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "0.0 (off)" > OK</p>	<p>1</p> <pre> LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=.01 SMIS6 SMIS6 MIN =-.013952 ELEM=2 MAX =.007863 ELEM=101 U ROT F </pre> 
22	<p>Нагрузка, при которой образуется второй пластический шарнир:</p> <p>C_P > SET, NEXT \$ ETABLE, REFL \$ /REPLOT > Enter</p> <p>Вводите команду «SET, NEXT \$ ETABLE, REFL \$ /REPLOT» 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 ($M_{из2}=1,01439 \cdot M_L$) образуется в точке приложения правой внешней силы при значении внешней нагрузки:</p> $P_{np} = 1,02 \cdot \frac{M_L}{l}$ <p>Расхождение с результатом аналитического расчёта (см. рис. 1.) составляет $\Delta=2\%$.</p>	<p>1</p> <pre> LINE STRESS STEP=1 SUB =1 TIME=1.02 SMIS6 SMIS6 MIN =-1.00056 ELEM=2 MAX =1.01439 ELEM=101 U ROT F </pre> 

№	Действие	Результат
Вставка второго пластического шарнира		
23	<p><i>Место образования второго пластического шарнира:</i></p> <p>Номер элемента с экстремальным отрицательным моментом:</p> <pre>M_M > General Postproc > List Results > Elem Table Data</pre> <p>В окне List Element Table Data отмечаем SMIS6 > OK</p> <p>Момент 1.0144 реализуется в элементе №101.</p> <p>Выделим этот элемент:</p> <pre>U_M > Select > Entities ></pre> <p>В первой графе устанавливаем "Elements" Во второй графе устанавливаем "By Num/Pick" Селектор устанавливаем на "From Full" > OK ></p> <p>В графе окна Select elements пишем 101 > OK</p> <p>Перерисовываем изображение:</p> <pre>U_M > Plot > Replot</pre>	 <pre> PRETAB Command File 198 0.30432E-01 199 0.20288E-01 200 0.10144E-01 MINIMUM VALUES ELEM 2 VALUE -1.0006 MAXIMUM VALUES ELEM 101 VALUE 1.0144 1 LINE STRESS STEP=1 SUB =102 TIME=1.02 SMIS6 SMIS6 MIN =1.01439 ELEM=101 MAX =1.01439 ELEM=101 U ROT F </pre>

№	Действие	Результат
24	<p><i>Вставка второго пластического шарнира:</i></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><i>Узлы выделенного элемента:</i></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><i>Выделить всё:</i></p> <p>U_M > Select > Everything</p> <p><i>Обновляем изображение:</i></p> <p>U_M > Plot > Multi-Plots</p>	  

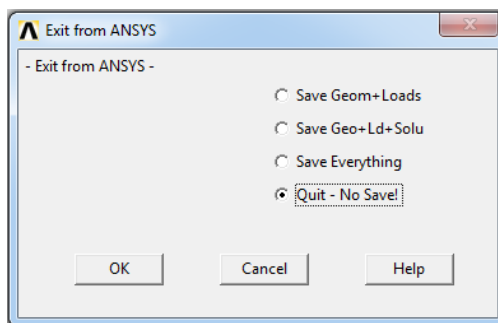
№	Действие	Результат
Форма потери несущей способности		
25	<p>Расчёт балки с двумя пластическими шарнирами при возрастающей до P_{max} нагрузке:</p> <p>M_M > Solution > Solve > Current LS > OK В окне Verify нажмите кнопку OK</p> <p>Когда он закончится, появится окно «Solution is done!». Закройте это окно.</p>	
26	<p>Форма потери несущей способности:</p> <p>Финальный шаг:</p> <p>M_M > General Postproc > Read Results > Last Set</p> <p>Масштаб перемещений выбирается автоматически:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "Auto calculated" > OK</p> <p>Прорисовывать деформированную и недеформированную формы:</p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > > Deformed Shape > KUND установить Def + undeformed > OK</p> <p>Некоторые символы пропадают. Восстановим их:</p> <p>U_M > PlotCtrls > Symbols > Boundary condition устанавливаем "All Applied BCs" > OK</p>	 <p>Полное совпадение с формой потери несущей способности, показанной на <i>рис. 1</i>.</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.