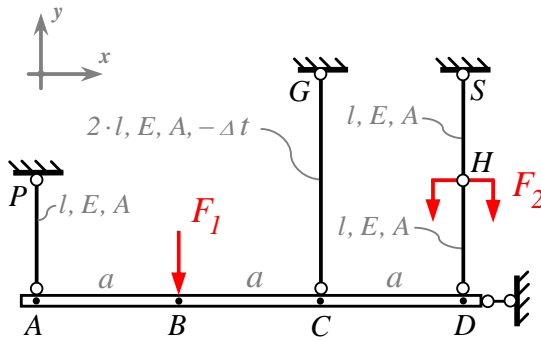


B-16 (ANSYS)

Формулировка задачи:

Дано: Ферма с жёстким брусом; нагрузка силовая (точки B и E) и термическая (стержень GC охлаждается на Δt).



$$\begin{aligned}
 A &= 80 \quad \text{мм}^2; \\
 E &= 2 \cdot 10^5 \quad \text{МПа}; \\
 l &= 400 \quad \text{мм}; \\
 F_1 &= 20 \quad \text{кН}; \\
 F_2 &= 1 \quad \text{кН}; \\
 \Delta t &= 80 \quad \text{°C}; \\
 \alpha &= 11 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{°C}}; \\
 \sigma_T &= 210 \quad \text{МПа}.
 \end{aligned}$$

Найти: N_i , σ_i , n_T , v_A , v_B , v_C , v_D .

Аналитический расчёт (см. [B-16](#)) даёт следующие решения:

$$N_1 = \frac{2}{27} \cdot [8 \cdot F_1 - F_2 - 3 \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot E \cdot A] = 8649 \text{ H}; \quad \sigma_1 = 108,1 \text{ МПа};$$

$$N_2 = \frac{2}{9} \cdot [F_1 + F_2 + 3 \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot E \cdot A] = 14053 \text{ H}; \quad \sigma_2 = 175,7 \text{ МПа};$$

$$N_3 = \frac{1}{27} \cdot [5 \cdot F_1 + 23 \cdot F_2 - 12 \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot E \cdot A] = -1702 \text{ H}; \quad \sigma_3 = -21,28 \text{ МПа};$$

$$N_4 = \frac{1}{27} \cdot [5 \cdot F_1 - 4 \cdot F_2 - 12 \cdot \alpha \cdot \Delta t \cdot E \cdot A] = -2702 \text{ H}; \quad \sigma_4 = -33,78 \text{ МПа};$$

$$v_A = -0,2162 \quad \text{мм};$$

$$v_B = -0,1101 \quad \text{мм};$$

$$v_C = 0,001407 \quad \text{мм};$$

$$v_D = 0,1101 \quad \text{мм};$$

$$n_T = 1,19 \approx 1,2 \quad .$$

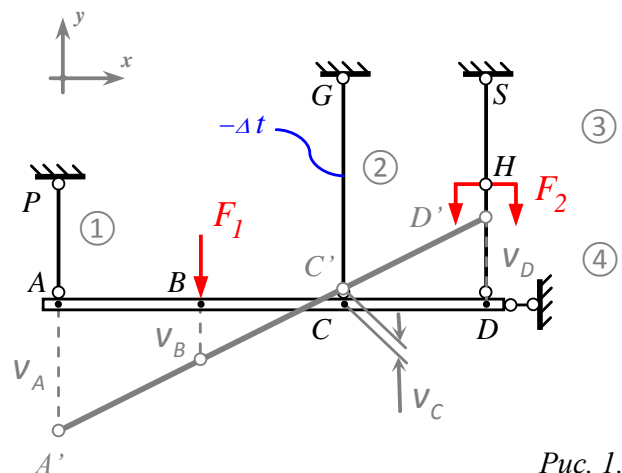
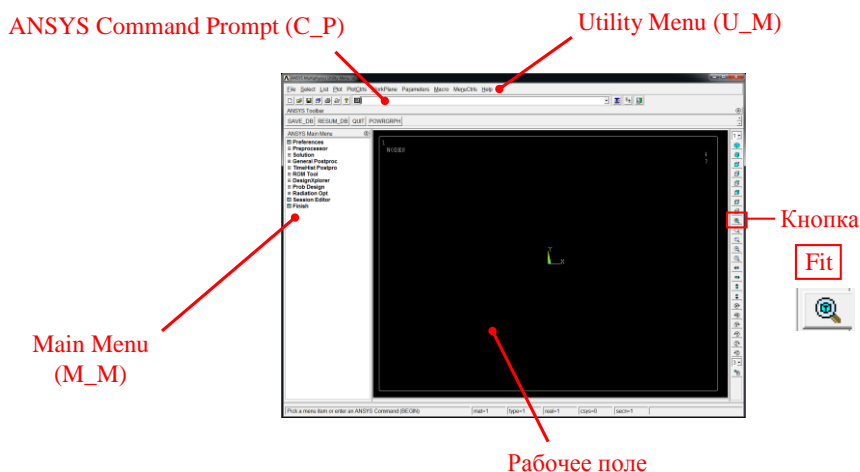


Рис. 1.

Задача данного примера: при помощи ANSYS Multyphysics получить эти же решения 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 окне 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
```

Скрываем пункты меню, не относящиеся к прочностным расчётам:

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

При построениях полезно видеть номера узлов и номера конечных элементов (один участок – один конечный элемент):

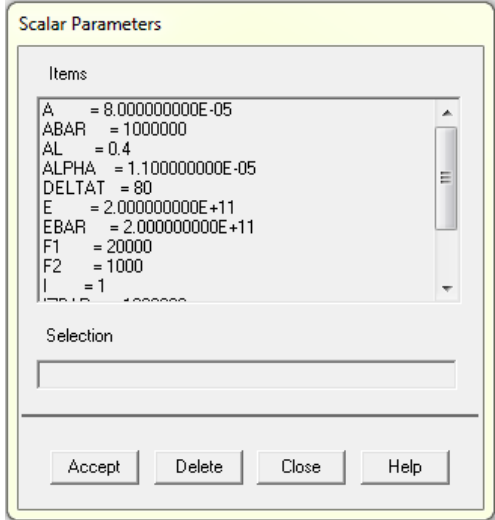
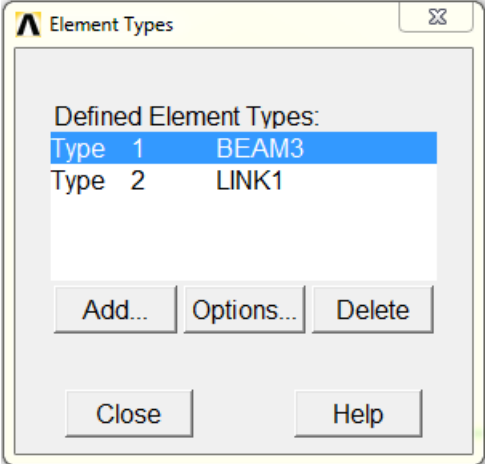
```
U_M > PlotCtrls > Numbering >
Отметить NODE ;
Установить Elem на "Element numbers";
Установить [/NUM] на "Colors&numbers"
> OK
```

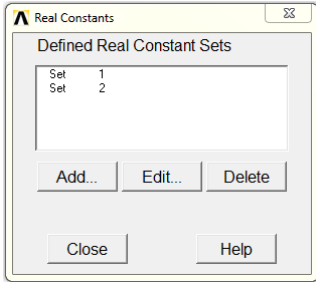
Для большей наглядности увеличим размер шрифта:

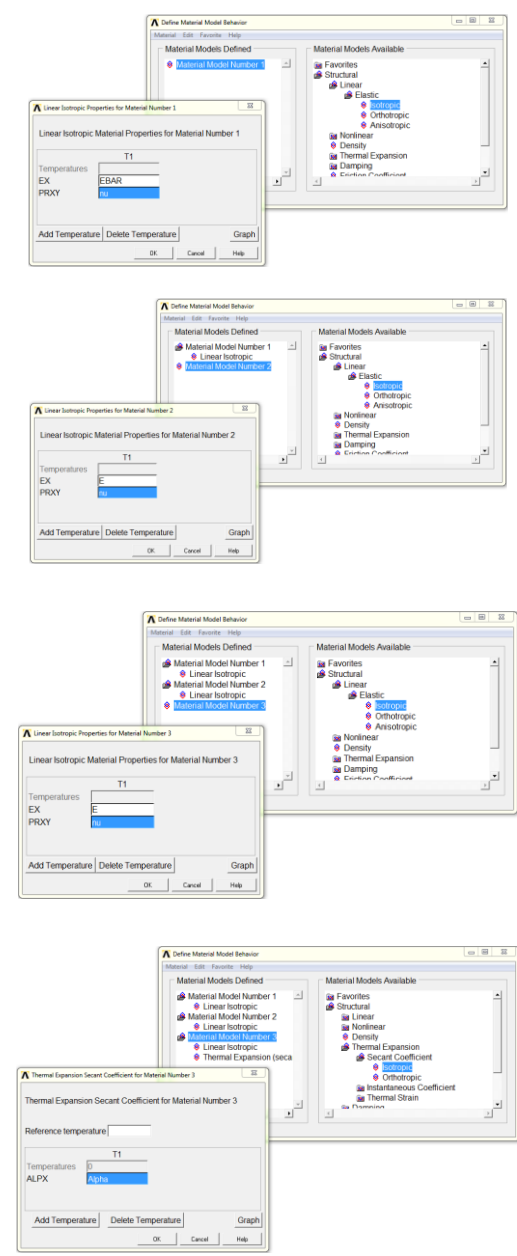
```
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Legend Font >
Установить «Размер» на «22» > OK
U_M > PlotCtrls > Font Controls > Entity Font >
Установить «Размер» на «22» > OK
```

Предварительные настройки выполнены, можно приступать к решению задачи.


Решение задачи:

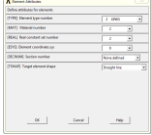
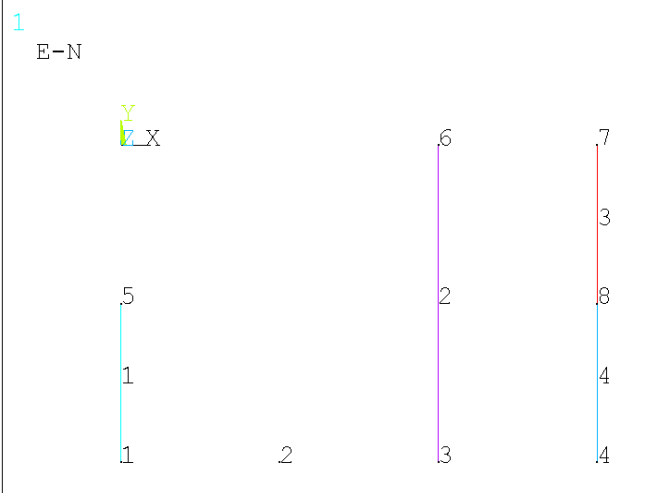
№	Действие	Результат
1	<p><i>Задаём параметры расчёта – базовые величины задачи:</i></p> <p>U_M > Parameters > Scalar Parameters ></p> <p>A=80e-6 > Accept ></p> <p>E=2e11 > Accept ></p> <p>l=0.4 > Accept ></p> <p>al=l > Accept ></p> <p>E_{BAR}=E > Accept ></p> <p>A_{BAR}=1e6 > Accept ></p> <p>I_{ZBAR}=1e6 > Accept ></p> <p>F1=20e3 > Accept ></p> <p>F2=1e3 > Accept ></p> <p>DeltaT=80 > Accept ></p> <p>Alpha=11e-6 > Accept ></p> <p>nu=0.3 > Accept > Close</p>	
2	<p><i>Первая строчка в таблице конечных элементов – плоский балочный BEAM3, вторая строчка – плоский фермовый LINK1:</i></p> <p>M_M > Preprocessor</p> <p>C_P > ET, 1, BEAM3 > Enter</p> <p>C_P > ET, 2, LINK1 > Enter</p> <p>Посмотрим таблицу конечных элементов:</p> <p>M_M > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Close</p>	

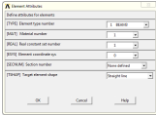
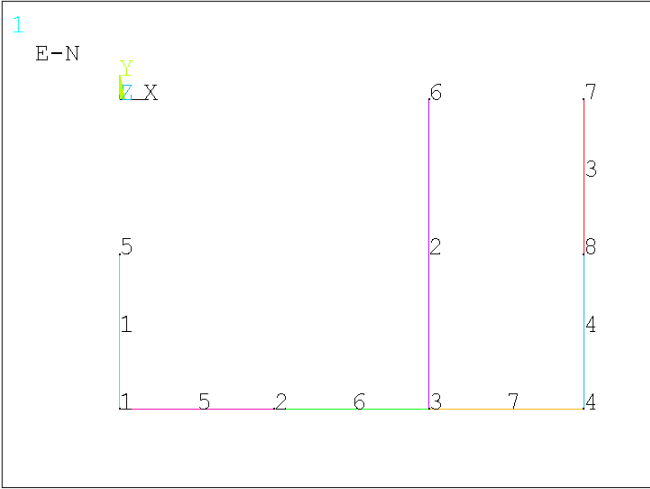
№	Действие	Результат
3	<p><i>Таблица реальных констант:</i></p> <p>Площадь поперечного сечения, изгибный момент инерции поперечного сечения и высота поперечного сечения жёсткого бруса:</p> <p>C_P > R, 1, A_{BAR}, I_{ZBAR}, l/20 > Enter</p> <p>Площадь поперечного сечения остальных стержней:</p> <p>C_P > R, 2, A > Enter</p> <p>Посмотрим таблицу реальных констант:</p> <p>M_M> Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete > Close</p>	

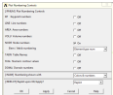
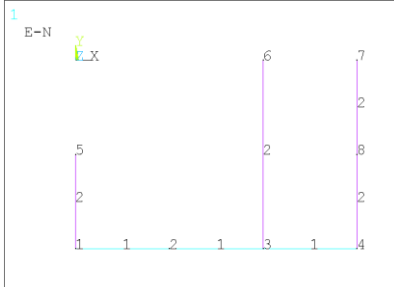
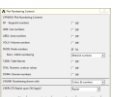
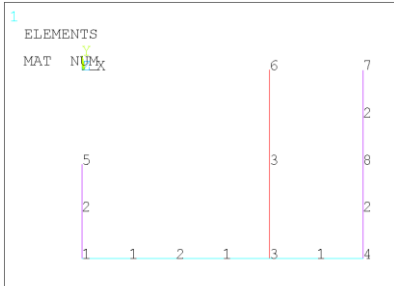
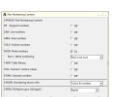
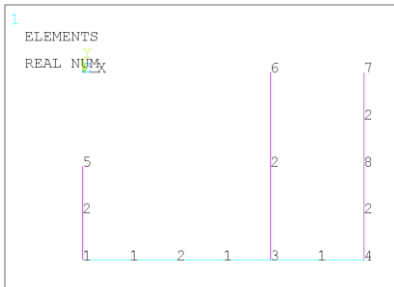
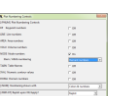
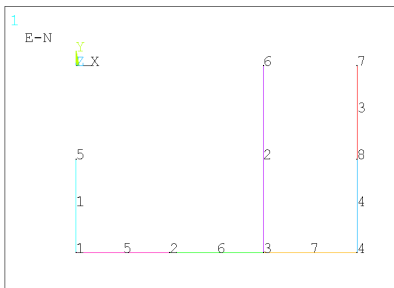
№	Действие	Результат
4	<p><i>Таблица материалов:</i></p> <p>Материал №1 – жёсткий, не расширяющийся при нагреве: M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic > EX пишем EBAR PRXY пишем nu > OK</p> <p>Материал №2 – упругий, не расширяющийся при нагреве: M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models > > Material > New Model... Define Material ID пишем 2 > OK > Structural > Linear > Elastic > Isotropic > EX пишем E PRXY пишем nu > OK</p> <p>Материал №2 – упругий, расширяющийся при нагреве: M_M > Preprocessor > Material Props > Material Models > > Material > New Model... Define Material ID пишем 3 > OK > Structural > Linear > Elastic > Isotropic > EX пишем E PRXY пишем nu > OK > > Structural > Thermal Expansion > Secant Coefficient > Isotropic > ALPX пишем Alpha > OK Закрываем окно «Define Material Model Behavior».</p>	 <p>The result column contains four screenshots from the ANSYS software interface. The first screenshot shows the 'Define Material Model Behavior' dialog for Material Model Number 1, where 'Linear Isotropic' is selected in the 'Material Models Defined' list. The second screenshot shows the 'Linear Isotropic Properties for Material Number 2' dialog with 'E' and 'nu' entered. The third screenshot shows the 'Linear Isotropic Properties for Material Number 3' dialog with 'E' and 'nu' entered. The fourth screenshot shows the 'Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 3' dialog with 'Alpha' entered. The background of the screenshots shows the 'Material Models Available' tree with 'Linear Isotropic' and 'Thermal Expansion' expanded.</p>

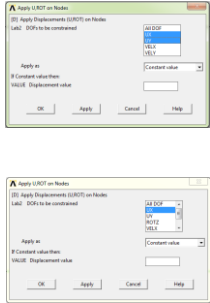
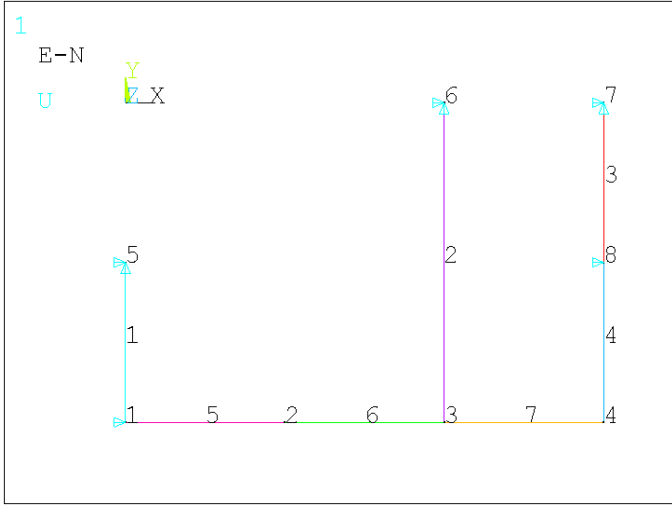
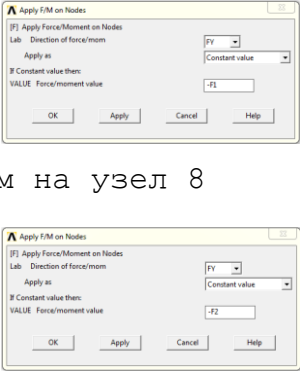
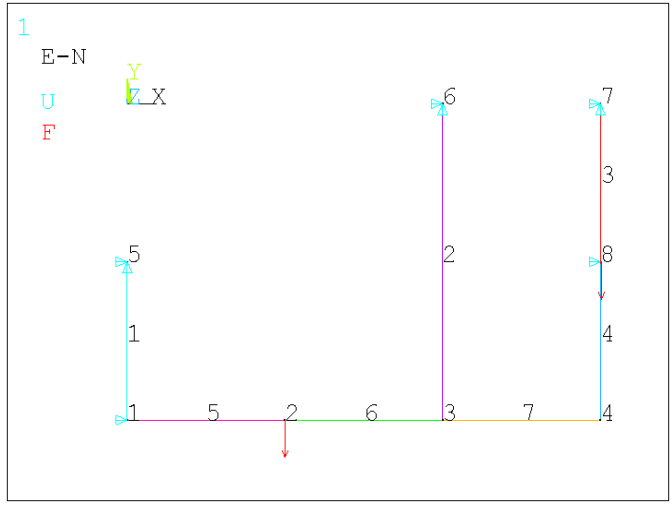
№	Действие	Результат
5	<p>Координаты точек конструкции: Определяемся с координатами точек (узлов фермы).</p>	<p>Diagram illustrating the construction of a truss structure. The structure is defined by nodes $A(0, -2 \cdot l, 0)$, $B(a, -2 \cdot l, 0)$, $C(2 \cdot a, -2 \cdot l, 0)$, $D(3 \cdot a, -2 \cdot l, 0)$, $P(0, -l, 0)$, $S(2 \cdot a, 0, 0)$, $G(3 \cdot a, 0, 0)$, and $H(3 \cdot a, -l, 0)$. The structure is supported at node A and node S. The horizontal distance between nodes A and B is a, between B and C is a, and between C and D is a. The vertical distance between nodes A and P is l, between B and S is $2 \cdot l$, between C and G is l, and between D and H is l.</p>

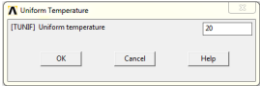
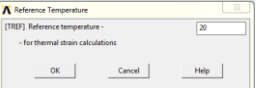
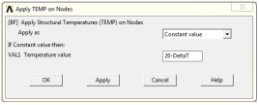
№	Действие	Результат																
Конечноэлементная модель																		
6	<p>Узлы 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 в точках A, B, C, D, P, S, G и H соответственно:</p> <pre> M_M> Preprocessor> Modeling> Create> Nodes> In Active CS > NODE пишем 1 X,Y,Z пишем 0,-2*l,0 > Apply > NODE пишем 2 X,Y,Z пишем a1,-2*l,0 > Apply > NODE пишем 3 X,Y,Z пишем 2*a1,-2*l,0 > Apply > NODE пишем 4 X,Y,Z пишем 3*a1,-2*l,0 > Apply > NODE пишем 5 X,Y,Z пишем 0,-l,0 > Apply > NODE пишем 6 X,Y,Z пишем 2*a1,0,0 > Apply > NODE пишем 7 X,Y,Z пишем 3*a1,0,0 > Apply > NODE пишем 8 X,Y,Z пишем 3*a1,-l,0 > ОК Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots Справа от рабочего поля нажимаем кнопку Fit . </pre>	<div data-bbox="1391 608 2096 1142" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>1</p> <p>NODES</p> <table border="1" data-bbox="1424 703 2063 1118"> <thead> <tr> <th>NODE</th> <th>NUM</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td>.6</td> <td>.7</td> </tr> <tr> <td></td> <td>.5</td> <td></td> <td>.8</td> </tr> <tr> <td>.1</td> <td>2</td> <td>.3</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table> </div>	NODE	NUM					.6	.7		.5		.8	.1	2	.3	4
NODE	NUM																	
		.6	.7															
	.5		.8															
.1	2	.3	4															

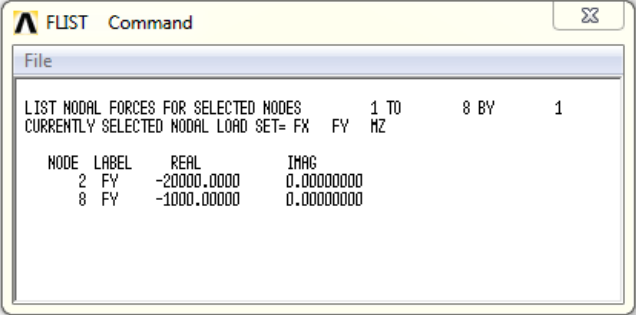
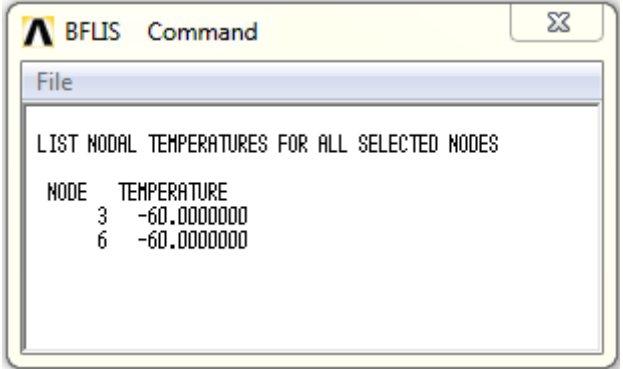
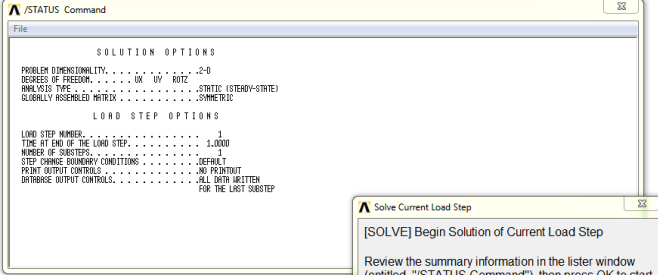
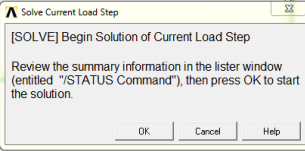
№	Действие	Результат
7	<p><i>Конечные элементы – упругие стержни фермы:</i></p> <p>M_M> Preprocessor> Modeling> Create> Elements> Elem Attributes [TYPE]установить "2 LINK1" [MAT]установить "2" [REAL]установить "2" > ОК</p>  <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Auto Numbered > Thru Nodes Левой кнопкой мыши последовательно кликаем узлы 5 и 1 > ОК</p> <p>M_M> Preprocessor> Modeling> Create> Elements> Elem Attributes [MAT]установить "3" > ОК</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Auto Numbered > Thru Nodes Левой кнопкой мыши последовательно кликаем узлы 6 и 3 > ОК</p> <p>M_M> Preprocessor> Modeling> Create> Elements> Elem Attributes [MAT]установить "2" > ОК</p> <p>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Auto Numbered > Thru Nodes Левой кнопкой мыши последовательно кликаем узлы 7 и 8 > Apply > 8 и 4 > ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	 <p>Сравниваем номера конечных элементов с номерами участков на <i>рис. 1</i>. Они должны совпадать.</p>

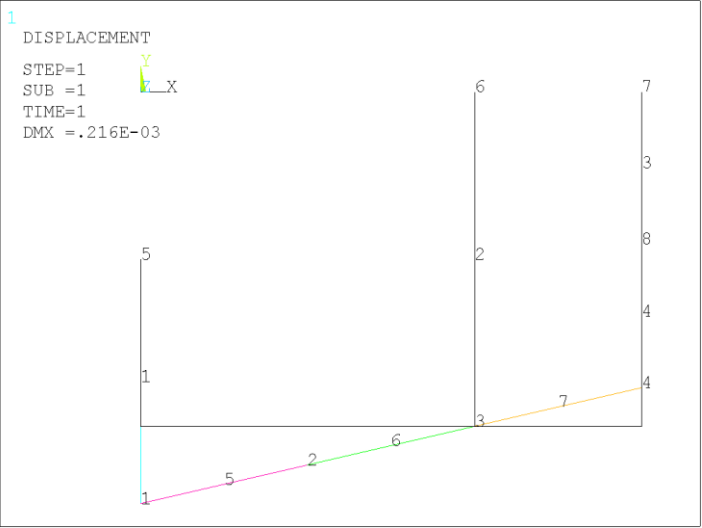
№	Действие	Результат
8	<p><i>Конечные элементы – отрезки жёсткого бруса:</i></p> <pre>M_M> Preprocessor> Modeling> Create> Elements> Elem Attributes</pre> <p>[TYPE]установить "1 BEAM3" [MAT]установить "1" [REAL]установить "1" > ОК</p>  <pre>M_M > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > > Auto Numbered > Thru Nodes</pre> <p>Левой кнопкой мыши последовательно кликаем узлы 1 и 2 > Apply > 2 и 3 > Apply > 3 и 4 > ОК</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p>	

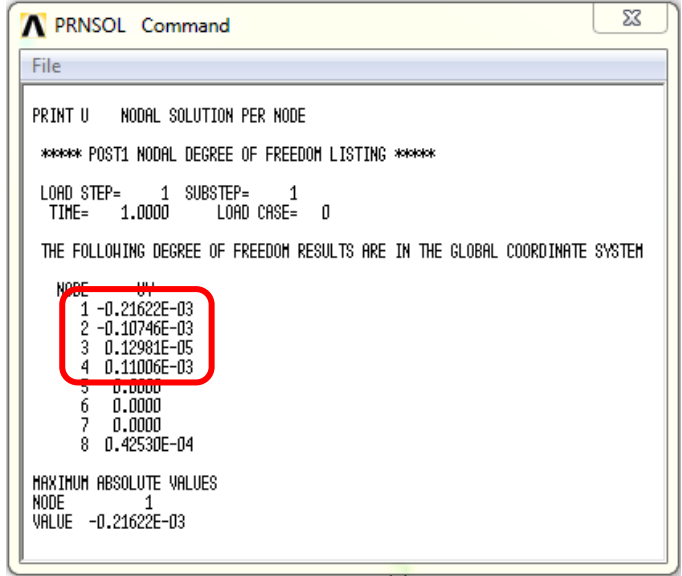
№	Действие	Результат
9	<p><i>Проверяем правильность формирования модели:</i></p> <p>Нумеруем элементы по их типу:</p> <pre>U_M > PlotCtrls > Numbering > Установить Elem на "Element type num"; > ОК</pre> 	
	<p>Нумеруем элементы по номеру их материала:</p> <pre>U_M > PlotCtrls > Numbering > Установить Elem на "Material numbers"; > ОК</pre> 	
	<p>Нумеруем элементы по номеру набора реальных констант:</p> <pre>U_M > PlotCtrls > Numbering > Установить Elem на "Real const num"; > ОК</pre> 	
	<p>Возвращаемся к порядковой нумерации элементов:</p> <pre>U_M > PlotCtrls > Numbering > Установить Elem на "Element numbers"; > ОК</pre> 	


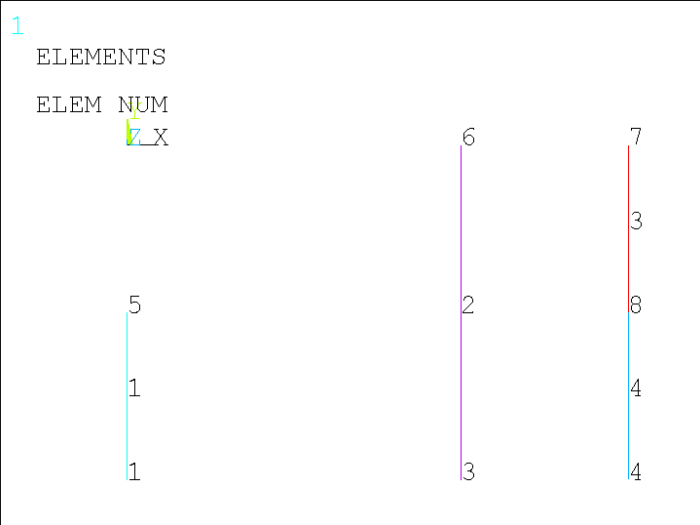
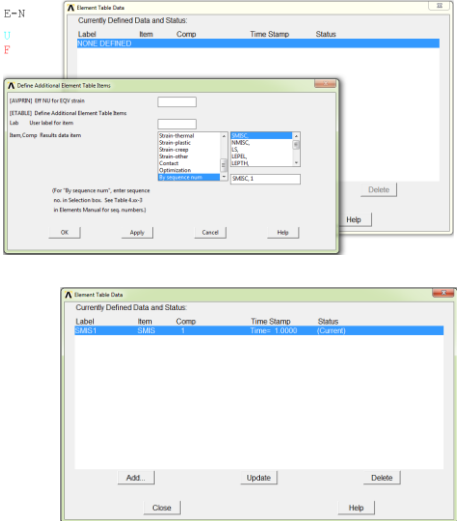
№	Действие	Результат
10	<p><i>Заделки:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Displacement > On Nodes > Левой кнопкой мыши нажать на узлы 5, 6 и 7 > OK > Lab2 установить "UX" и "UY" > Apply > Левой кнопкой мыши нажать на узлы 1 и 8 > OK > Lab2 установить "UX" > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> 	
11	<p><i>Внешняя сила:</i></p> <p>M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Force/Moment > On nodes > Левой кнопкой мыши нажимаем на узел 2 > OK > Lab устанавливаем "FY" VALUE пишем -F1 > Apply > Левой кнопкой мыши нажимаем на узел 8 > OK > Lab устанавливаем "FY" VALUE пишем -F2 > OK</p> <p>Прорисовываем всё, что есть: U_M > Plot > Multi-Plots</p> 	

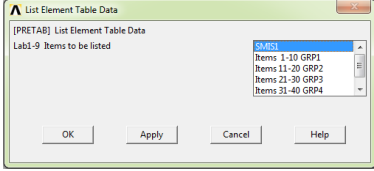
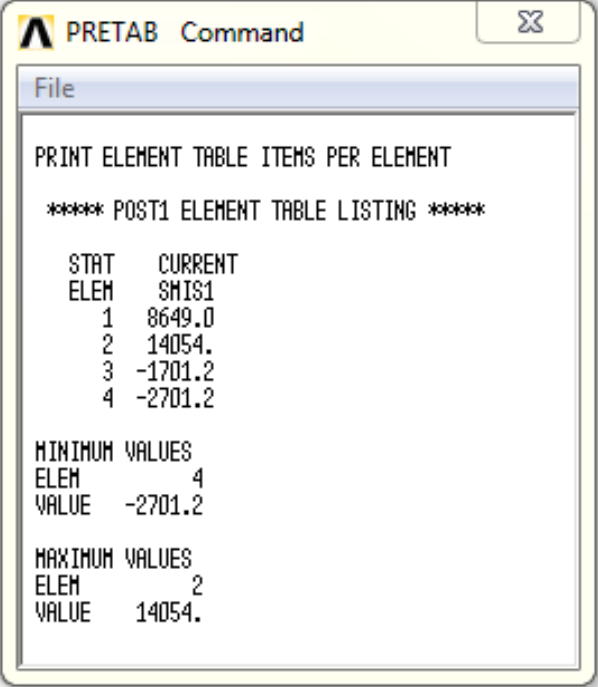
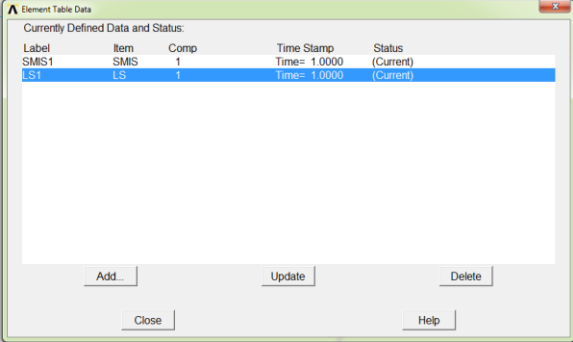
№	Действие	Результат
12	<p><i>Температуру (а не нагрев!) прикладываем к узлам:</i></p> <p>20° = температура, при которой собиралась конструкция: M_M> Preprocessor> Loads> Define Loads> Settings> > Uniform Temp> [TUINF] пишем 20 > OK</p>  <p>20° = температура, от которой отсчитывается начало температурных деформаций: M_M> Preprocessor> Loads> Define Loads> Settings> > Reference Temp> [TREF] пишем 20 > OK</p>  <p>$20^{\circ}-\Delta t^{\circ}$ = температура узлов фермы в финале нагружения: M_M > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > > Structural > Temperature > On Nodes > Pick All > [BF] устанавливаем "Constant value" VAL1 пишем 20-DeltaT > OK</p> 	

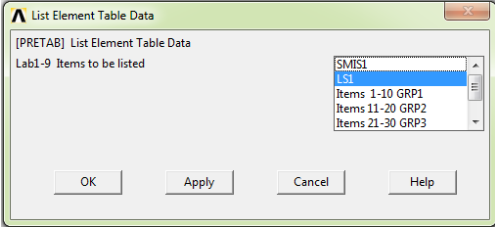
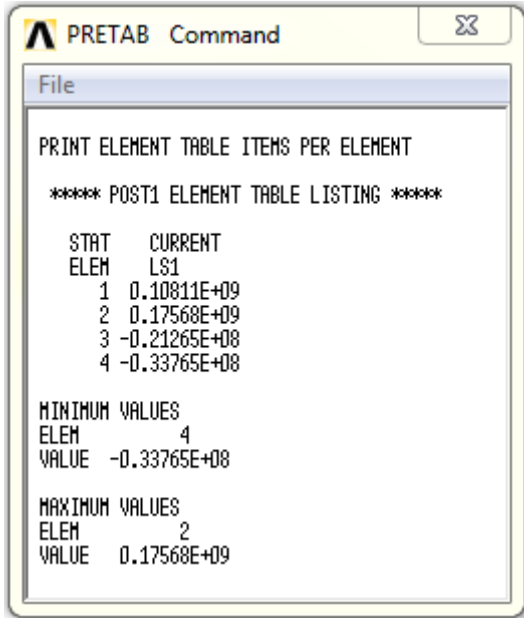
№	Действие	Результат
13	<p><i>Проверка нагрузок::</i></p> <p>Силовой: UM > List > Loads > Forces > On All Nodes</p> <p>Термической: UM > List > Loads > Body > On All Nodes</p>	 <pre> FLIST Command File LIST MODAL FORCES FOR SELECTED NODES 1 TO 8 BY 1 CURRENTLY SELECTED MODAL LOAD SET= FX FY MZ NODE LABEL REAL IMAG 2 FY -2000.0000 0.00000000 8 FY -1000.0000 0.00000000 </pre>  <pre> BFLIS Command File LIST MODAL TEMPERATURES FOR ALL SELECTED NODES NODE TEMPERATURE 3 -60.00000000 6 -60.00000000 </pre>
Расчёт		
14	<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.</p> <p>Расчёт окончен.</p>	 <pre> /STATUS Command File SOLUTION OPTIONS PROBLEM DIMENSIONALITY 2-D DEGREES OF FREEDOM ON 101 DOFS ANALYSIS TYPE STATIC (STEADY-STATE) GLOBALLY ASSEMBLED MATRIX SYMMETRIC LOAD STEP OPTIONS LOAD STEP NUMBER 1 TIME AT END OF THE LOAD STEP 1.0000 NUMBER OF SUBSTEPS 1 STEP CHANGE BOUNDARY CONDITIONS DEFAULT PRINT OUTPUT CONTROLS NO PRINTOUT DATABASE OUTPUT CONTROLS ALL DATA WRITTEN FOR THE LAST SUBSTEP </pre>  <pre> [SOLVE] Begin Solution of Current Load Step Review the summary information in the lister window (entitled "/STATUS Command"), then press OK to start the solution. OK Cancel Help </pre>

№	Действие	Результат
Просмотр результатов		
15	<p><i>Деформированная форма конструкции:</i></p> <p>M_M > General Postproc > Plot Results > > Deformed Shape > KUND установить Def + undeformed > OK</p> <p>U_M > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling > DMULT устанавливаем "User specified" User specified factor увеличиваем в три раза с 277 до 850 > OK</p> <p>Чёрным цветом начерчена недеформированная форма фермы, цветными линиями – ферма после нагружения (масштаб перемещений выбирается автоматически).</p> <p>Деформированная форма похожа на ту, которая была нарисована по результатам аналитического расчёта (рис.1).</p>	

№	Действие	Результат
16	<p><i>Вертикальные перемещения точек жёсткого бруса:</i></p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Nodal Solution > > Nodal Solution > Y-Component of displacement > OK</p> <p>Вертикальное перемещение точки A (узла №1)</p> <p>$UY = -0,2162 \text{ мм}$ (отрицательное, то есть вниз); точное совпадение с <i>рис.1.</i> ;</p> <p>вертикальное перемещение точки B (узла №2)</p> <p>$UY = -0,1075 \text{ мм}$ (отрицательное, то есть вниз) ; погрешность $\Delta = 2,4 \%$;</p> <p>вертикальное перемещение точки C (узла №3)</p> <p>$UY = 0,001298 \text{ мм}$ (положительное, то есть вверх) ; погрешность $\Delta = 7,7 \%$;</p> <p>и вертикальное перемещение точки D (узла №4)</p> <p>$UY = 0,1101 \text{ мм}$ (положительное, то есть вверх) точное совпадение с <i>рис.1.</i></p> <p>Чем больше перемещение точки, тем с меньшей относительной погрешностью оно определено.</p>	 <pre> PRNSOL Command File PRINT U NODAL SOLUTION PER NODE **** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING **** LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0 THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM NODE UY 1 -0.21622E-03 2 -0.10746E-03 3 0.12981E-05 4 0.11006E-03 5 0.0000 6 0.0000 7 0.0000 8 0.42530E-04 MAXIMUM ABSOLUTE VALUES NODE 1 VALUE -0.21622E-03 </pre>

№	Действие	Результат
17	<p><i>Из всех конечных элементов конструкции выделяем только фермовые:</i></p> <p>Прорисовываем все конечные элементы элементы: U_M > Plot > Elements</p> <p>Выделяем нужные: U_M > Select > Entities > Устанавливаем "Elements" и "By Num/Pick" Селектор на "From Full" > ОК</p> <p>Кликаем левой кнопкой мыши на упругие стержни – элементы 1, 2, 3 и 4 > ОК</p> <p>Прорисовываем: U_M > Plot > Replot</p> 	
18	<p><i>Расчёт внутренних осевых растягивающих сил в фермовых элементах:</i></p> <p>M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Add > "By sequence num", "SMISC," , "1" > ОК > > Close</p>	

№	Действие	Результат															
19	<p>Распечатка значений внутренних осевых растягивающих сил N_i в конечных элементах:</p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Elem Table Data > Отметить мышью строчку SMIS1 > OK</p>  <p>С точностью до сотых долей процента получаем тот же результат, что и на рис. 1:</p> $N_1 = 8649 \text{ H} ;$ $N_2 = 14054 \text{ H} ;$ $N_3 = -1701 \text{ H} ;$ $N_4 = -2701 \text{ H} .$	 <pre> PRETAB Command File PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT ***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING ***** STAT CURRENT ELEM SMIS1 1 8649.0 2 14054. 3 -1701.2 4 -2701.2 MINIMUM VALUES ELEM 4 VALUE -2701.2 MAXIMUM VALUES ELEM 2 VALUE 14054. </pre>															
20	<p>Расчёт осевых напряжений в фермовых элементах:</p> <p>M_M > General Postproc > Element Table > Define Table > Add > "By sequence num", "LS,", "1" > 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>SMIS1</td> <td>SMS</td> <td>1</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> <tr> <td>LS1</td> <td>LS</td> <td>1</td> <td>Time= 1.0000</td> <td>(Current)</td> </tr> </tbody> </table>	Label	Item	Comp	Time Stamp	Status	SMIS1	SMS	1	Time= 1.0000	(Current)	LS1	LS	1	Time= 1.0000	(Current)
Label	Item	Comp	Time Stamp	Status													
SMIS1	SMS	1	Time= 1.0000	(Current)													
LS1	LS	1	Time= 1.0000	(Current)													

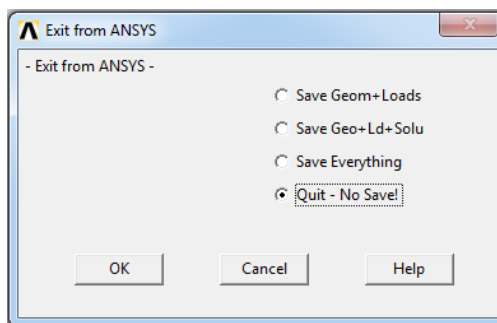
№	Действие	Результат
21	<p><i>Распечатка значений осевых напряжений σ_i в конечных элементах:</i></p> <p>M_M > General Postproc > List Results > Elem Table Data > Отметить мышью строчку LS1 > OK</p>  <p>С точностью до сотых долей процента получаем тот же результат, что и на <i>рис. 1</i>:</p> $\sigma_1 = 108,1 \text{ МПа} ;$ $\sigma_2 = 175,7 \text{ МПа} ;$ $\sigma_3 = -21,27 \text{ МПа} ;$ $\sigma_4 = -33,77 \text{ МПа} .$	 <pre> PRETAB Command File PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT **** POST1 ELEMENT TABLE LISTING **** STAT CURRENT ELEM LS1 1 0.10811E+09 2 0.17568E+09 3 -0.21265E+08 4 -0.33765E+08 MINIMUM VALUES ELEM 4 VALUE -0.33765E+08 MAXIMUM VALUES ELEM 2 VALUE 0.17568E+09 </pre>
22	<p><i>Коэффициент запаса прочности по текучести:</i></p> $\sigma_{max} = \max(\sigma_1 , \sigma_2 , \sigma_3) = \sigma_2 = 175,7 \text{ МПа} ;$ $n_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{max}} = \frac{210}{175,7} = 1,19 .$	

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.