

Оглавление

Практическая работа №1	2
Практическая работа №2	31
Практическая работа №3	68
Практическая работа №4	103
Практическая работа №5	123
Практическая работа №6	152
Практическая работа №7	180

Практическая работа №1

Упруго-пластический изгиб балки

Методические указания к выполнению практической работы 1

Для создания расчётной модели будем использовать препроцессор Ansys Mechanical APDL.

После запуска APDL появится окно:

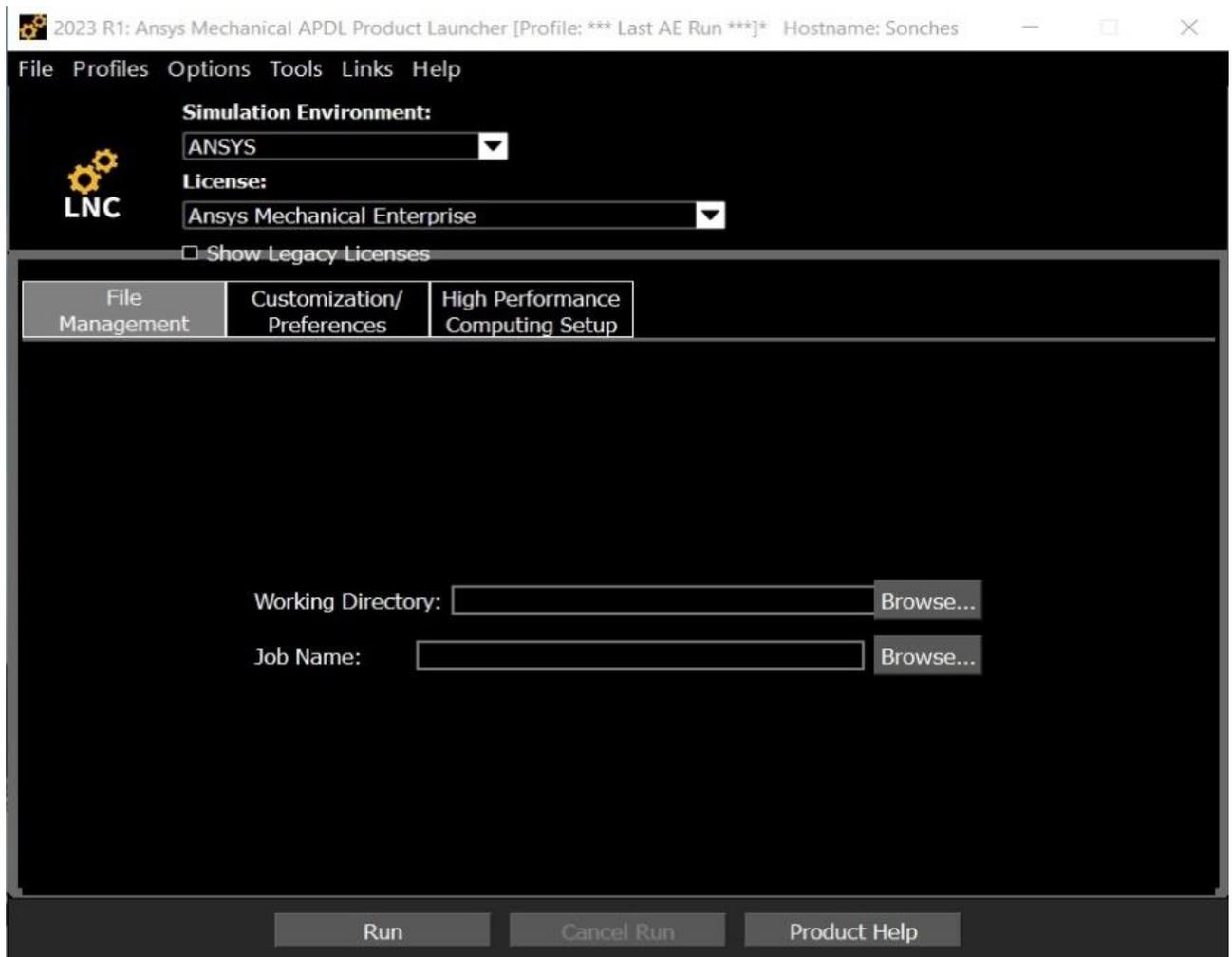


Рис.1. Окно запуска программного комплекса ANSYS Mechanical

Рядом с окном *Working Directory* нажать кнопку «*Browse...*» и выбрать свою рабочую директорию. В этой директории ANSYS будет сохранять все файлы. Директория должна быть создана заранее. В именах директории и пути к директории допускаются только латинские буквы. Рядом с окном *Job Name* задаем имя файла.

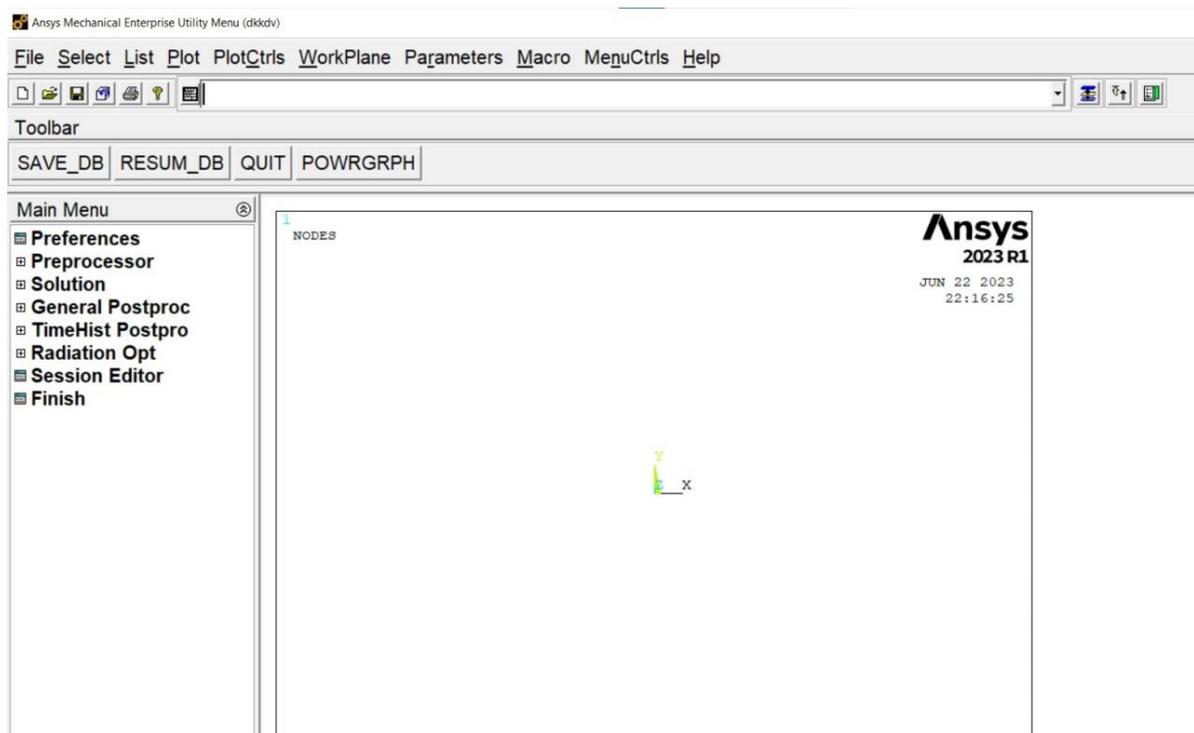


Рис.2. Рабочее окно программного комплекса ANSYS Mechanical

Выполним расчёт однопролётной шарнирно опёртой балки прямоугольного сечения длиной l , на верхнюю поверхность которой действует равномерно распределённая нагрузка интенсивностью q . Расчётная схема балки имеет следующий вид:

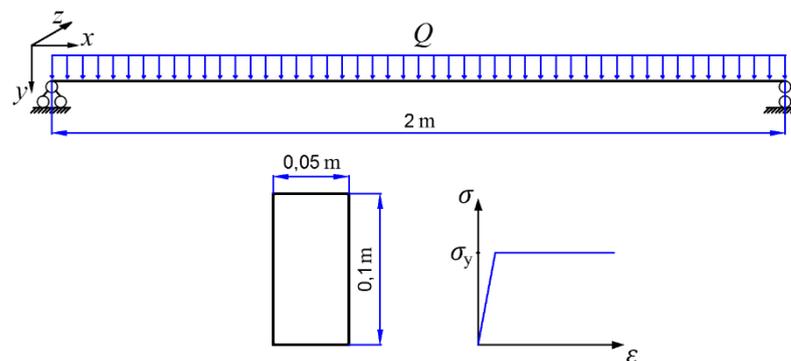


Рис.3. Схема балки

Исходные данные:

- длина балки $l = 2$ м;
- поперечное сечение – прямоугольное (высота $h = 0.1$ м, ширина $b = 0.05$ м);
- характеристики материал балки: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, предел пластичности $\sigma_T = 300 \cdot 10^6$ Па;
- погонная равномерно распределённая нагрузка Q .

Аналитическое решение

Отношение $\beta = \frac{M_{\text{разр}}}{M_{\text{T}}}$ характеризует запас прочности балок по отношению к состоянию, при котором в балке возникают первые пластические деформации, где

$$M_{\text{T}} = \frac{2\sigma_{\text{T}}J}{h} = \frac{\sigma_{\text{T}}bh^2}{6}, \text{ так как для круга } J = \frac{bh^3}{12},$$

$$M_{\text{разр}} = 2\sigma_{\text{T}}S^{\frac{1}{2}} = \frac{\sigma_{\text{T}}bh^2}{4}, \text{ так как для круга } S^{\frac{1}{2}} = \frac{bh^2}{8}.$$

Следовательно,

$$\beta = \frac{M_{\text{разр}}}{M_{\text{T}}} = \frac{\frac{\sigma_{\text{T}}bh^2}{4}}{\frac{\sigma_{\text{T}}bh^2}{6}} = 1.5.$$

Решение с помощью Ansys Mechanical APDL

Создание таблицы нагрузок.

Нагрузку будем задавать на основе диаграммы Прандтля:

Utility menu > Parameters > Array parameters > Define/Edit.

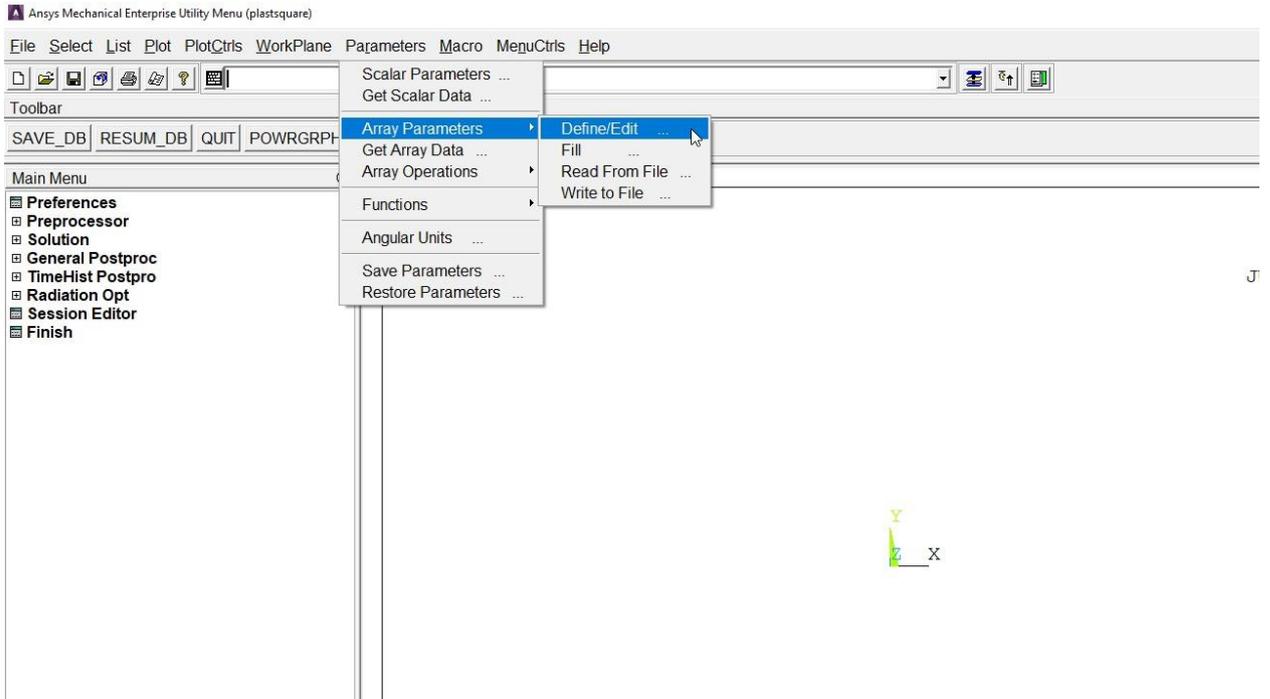


Рис.4. Создание таблицы нагрузок

В открывшемся окне *Array Parameters* нажимаем кнопку *Add*.

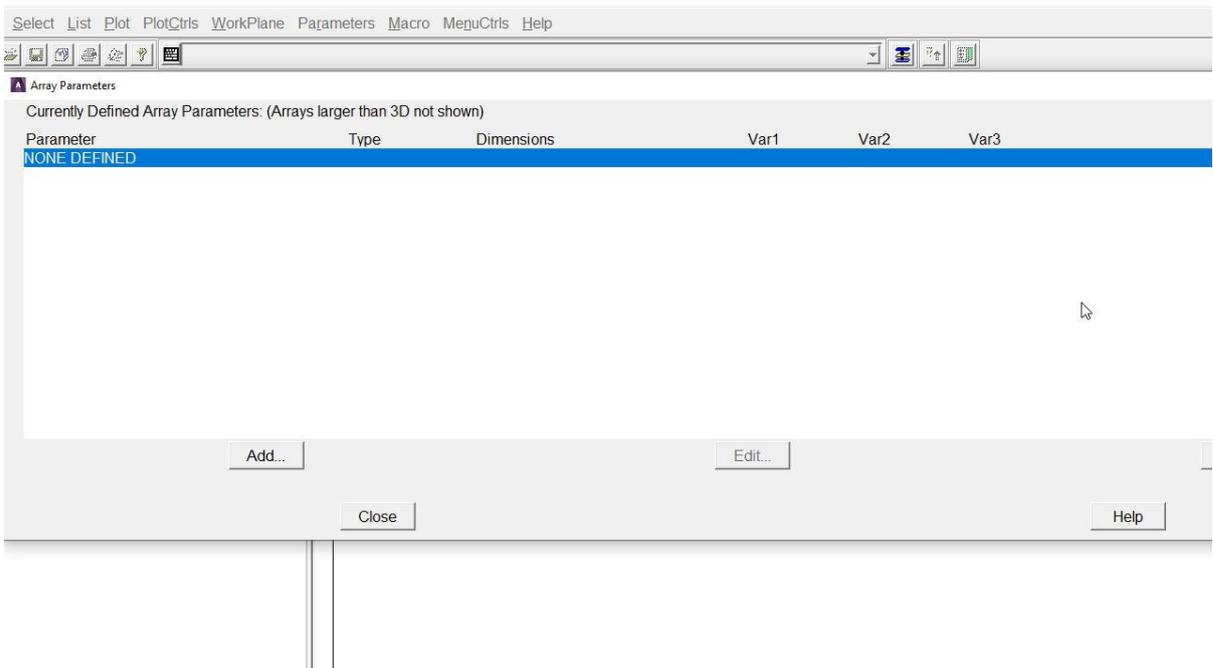


Рис.5. Окно *Array Parameters*

В открывшемся окне указываем:

- Название таблицы (*Parameter Name*) – Load_Q
- Тип таблицы (*Parameter Type*) – Table
- Количество строк, столбцов, рядов (*No. of rows, cols, planes*) – 3,1,1
- Строковая переменная (*Var1 Row variable*) – Time

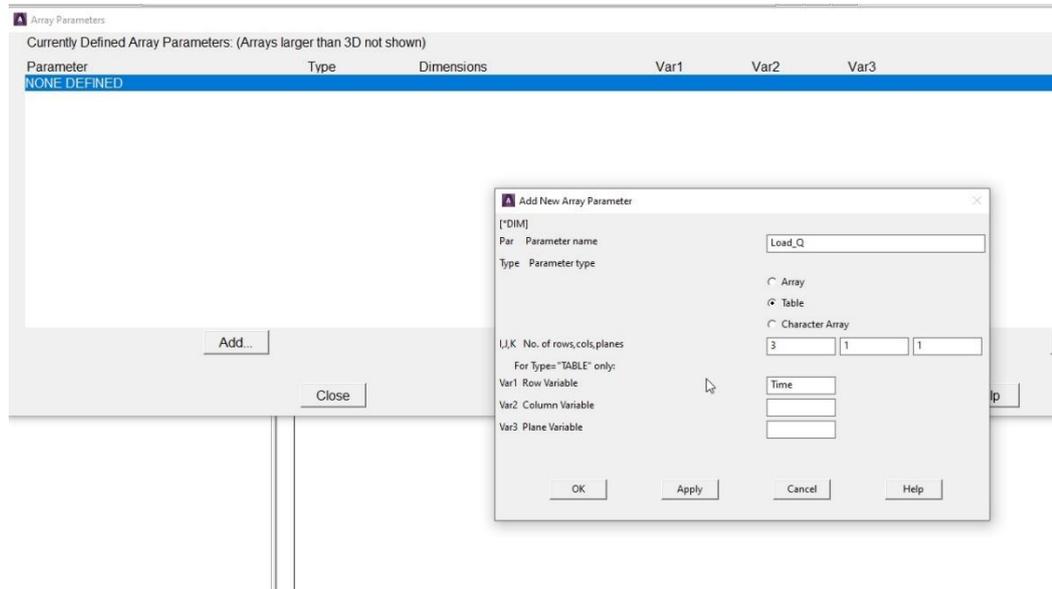


Рис.6. Окно *Add New Array Parameter*

Во вкладке *Array Parameters* нажимаем кнопку *Edit*. В открывшемся окне заполняем данные таблицы (изменение нагрузки со временем):

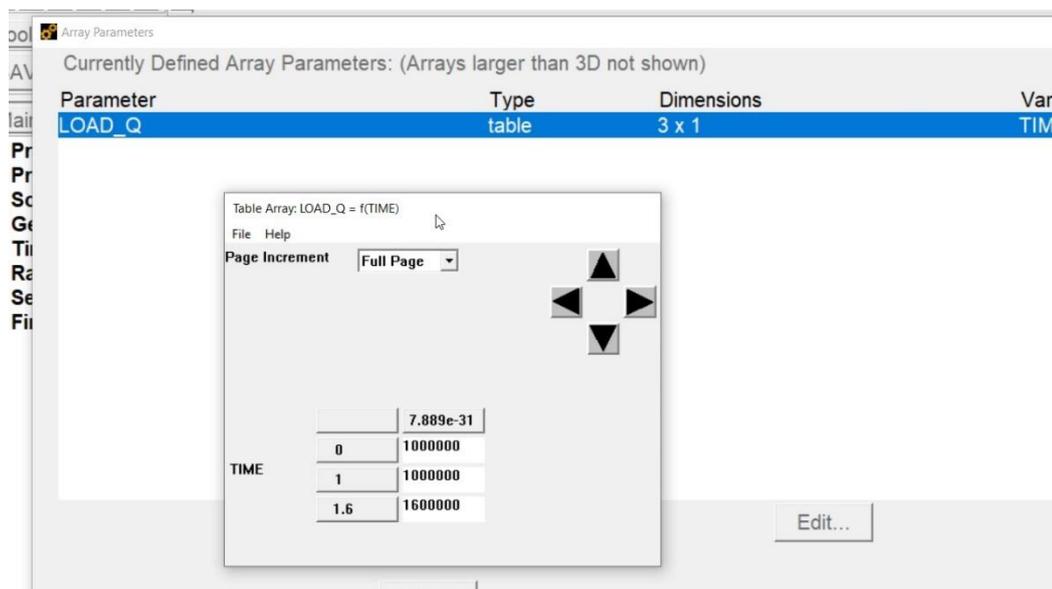


Рис.7. Окно *Table Array*

Затем нажимаем *File > Apply/Quit* и закрываем окно *Array Parameters*.

Задание элементов и их параметров

В *Main Menu* переходим в *Preprocessor* > *Element Type* > *Add/Edit/Delete*
в открывшемся окне (*Element type*) нажимаем кнопку *Add*:

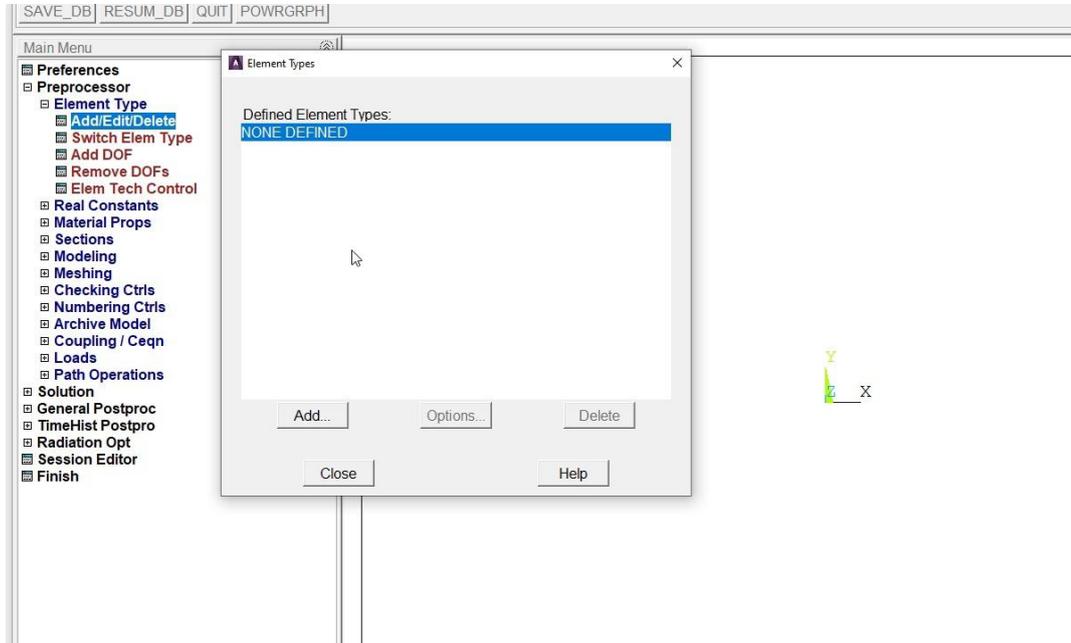


Рис.8. Окно *Element type*

В открывшемся окне в библиотеке элементов (*Library of element types*)
выбираем *Solid – 20 node 186*.

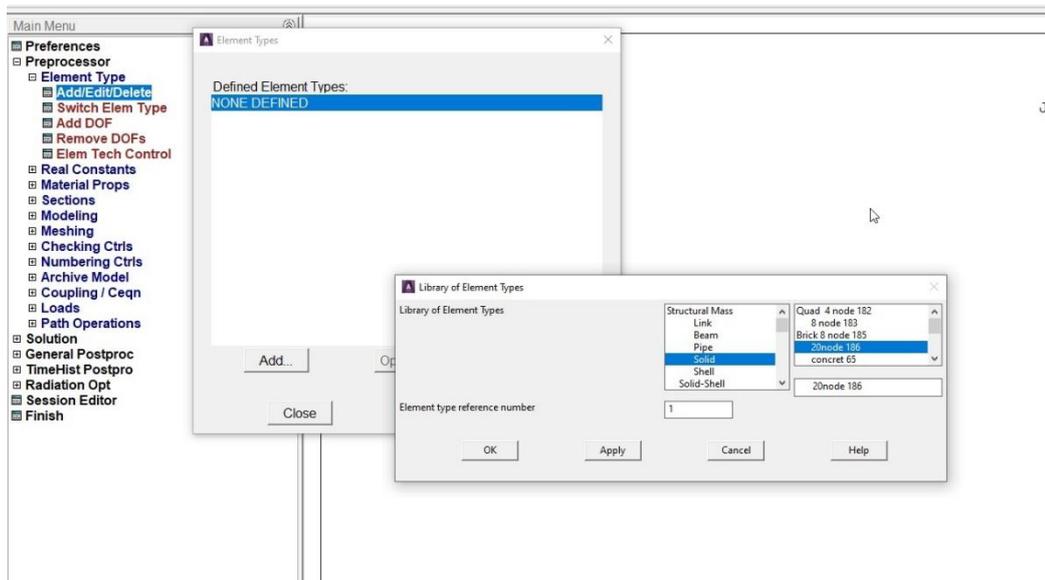


Рис.9. Окно *Library of Element type*

Номер типа элемента (*element type reference number*) – 1, нажимаем *OK*.

Закрываем окно *Element type*.

В препроцессоре переходим в *Material Props > Material models*. В открывшемся окне выбираем: *Structural > Nonlinear > Inelastic > Rate independent > Isotropic Hardening Plasticity > Mises Plasticity > Bilinear*.

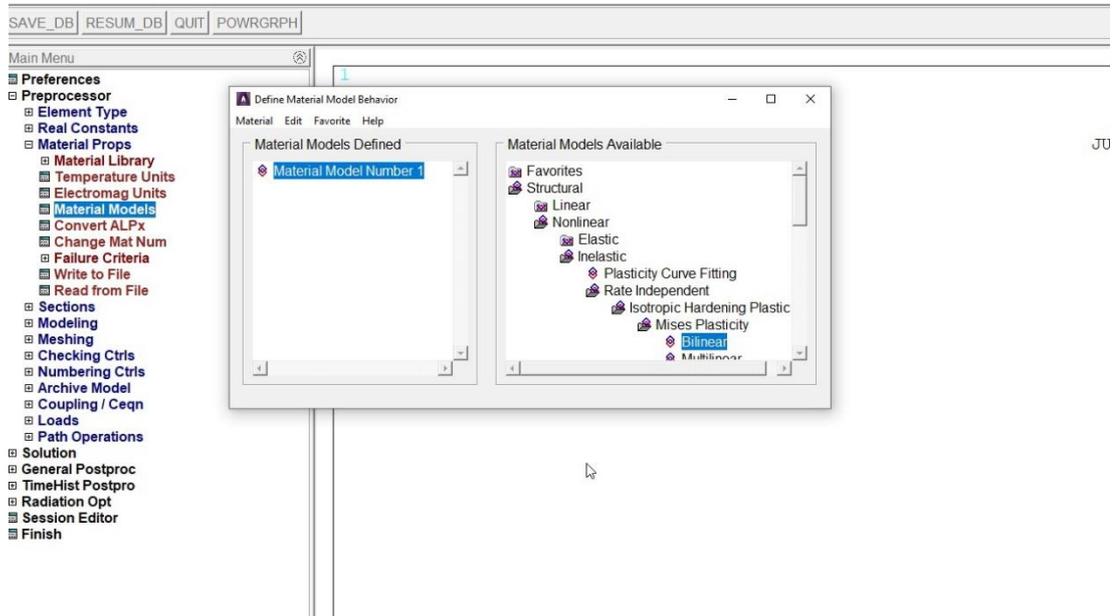


Рис.10. Задание материала. Шаг 1

В открывшемся предупреждении нажимаем ОК, далее в открывшемся окне задаем модуль упругости ($EX=2e11$) и коэффициент Пуассона ($PRXY=0.3$). Нажимаем ОК.

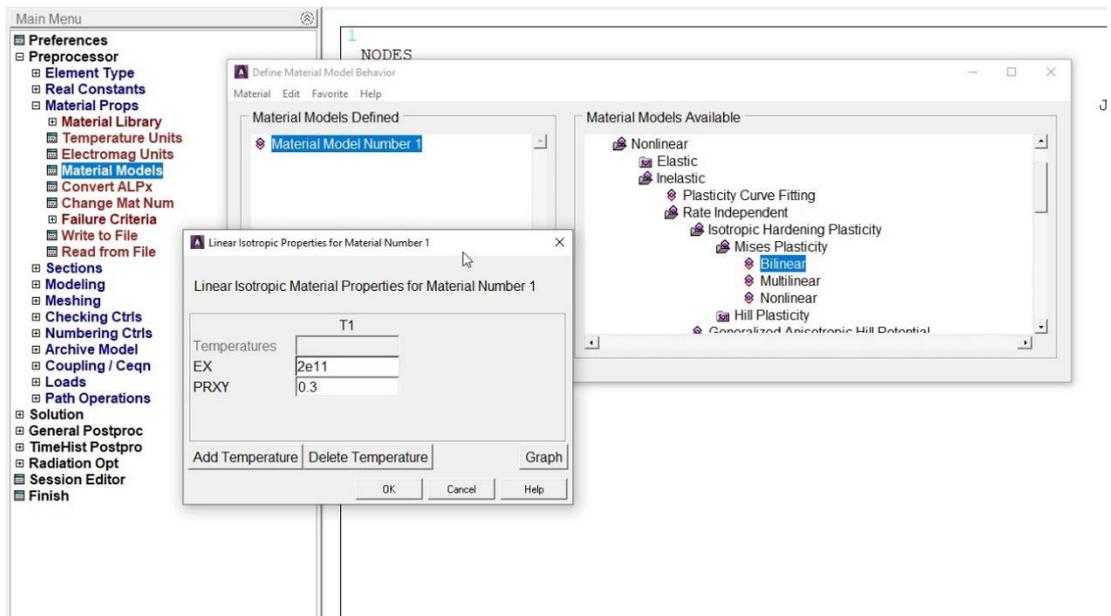


Рис.11. Задание материала. Шаг 2

Далее в открывшемся окне задаем предел пластичности по Мизесу ($Yield\ Stss=300e6$) и тангенциальный модуль ($Tang\ Mode=0$). Нажимаем ОК.

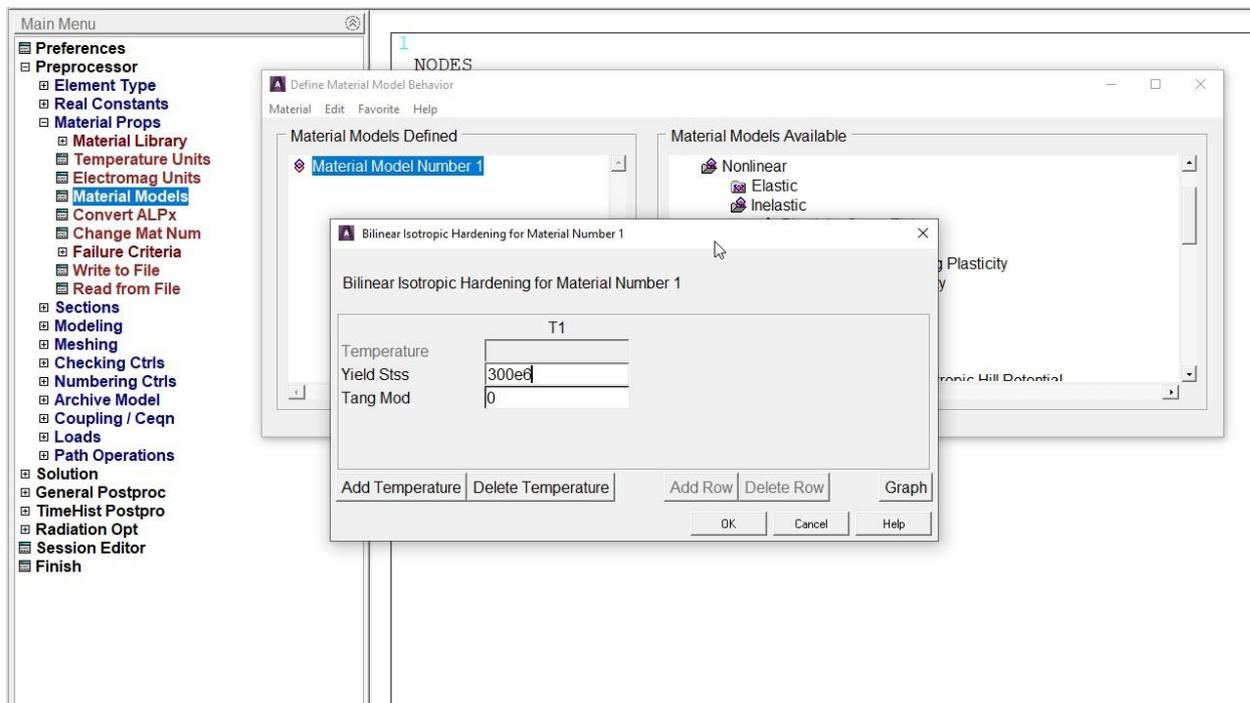


Рис.12. Задание материала. Шаг 3

Задание геометрии

Создаем прямоугольный параллелепипед. Для этого переходим в *Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By dimensions*. В открывшемся окне прописываем параметры:

- $X1 - 0$
- $X2 - 2$
- $Y1 - 0$
- $Y2 - 0.1$
- $Z1 - 0$
- $Z2 - 0.05$

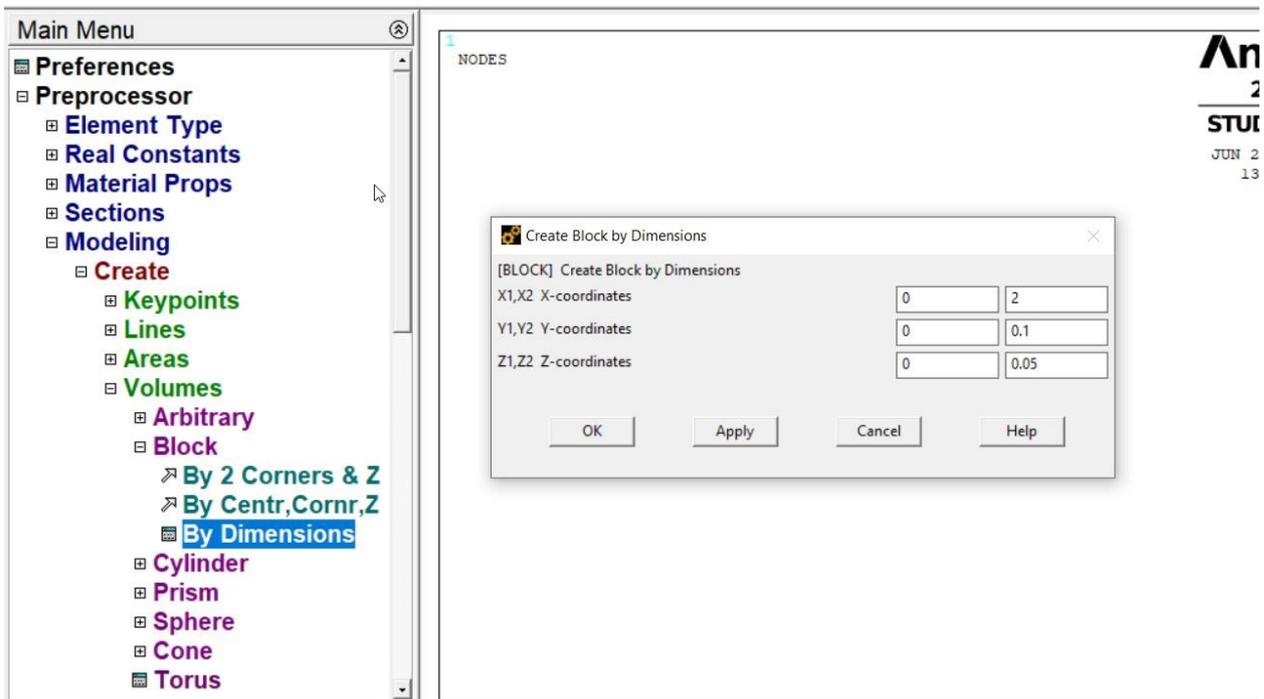


Рис.13. Создание прямоугольного параллелепипеда по параметрам

Разбивка сетки

На первом шаге разбиваем сетку объемными элементами, для этого переходим в *Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs*. Далее, в открывшемся окне, в строке *Type*, выбираем 1 тип элемента (*Solid 186*). Нажимаем ОК.

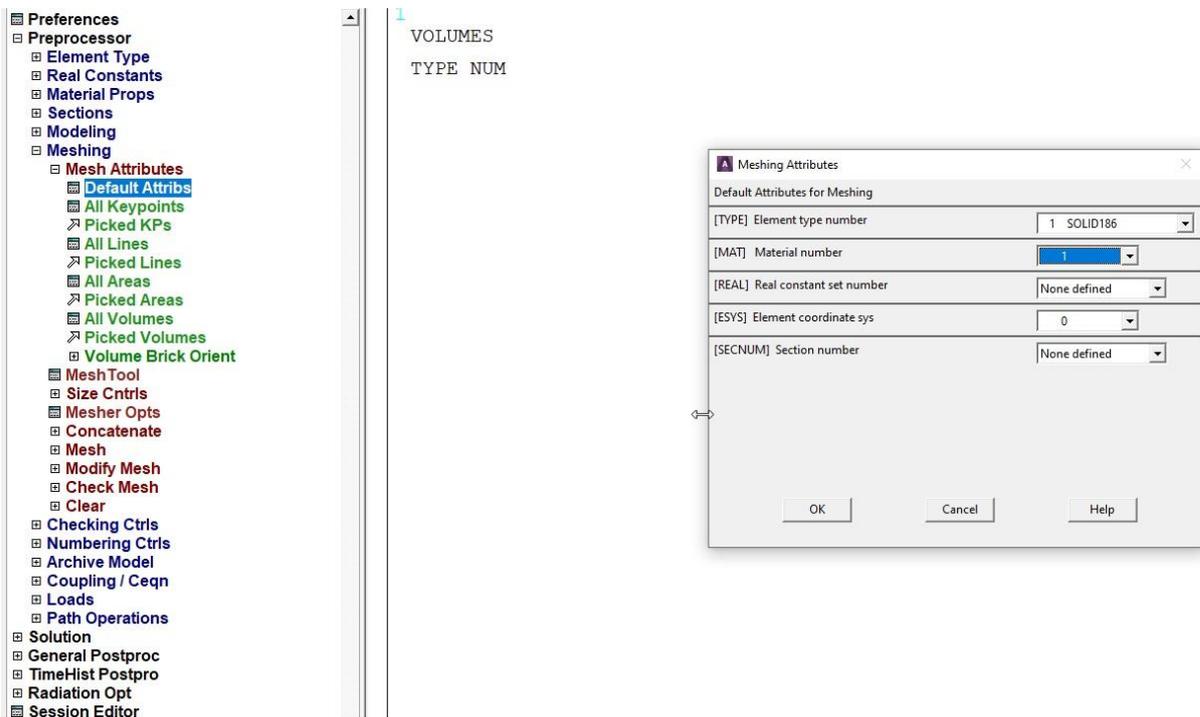


Рис.14. Присвоение атрибутов

На следующем шаге задаем размер элементов. Для этого переходим в *Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manualsize > Areas > All Areas*, в открывшемся окне в строке *Size* пишем 0.0125. Нажимаем ОК.

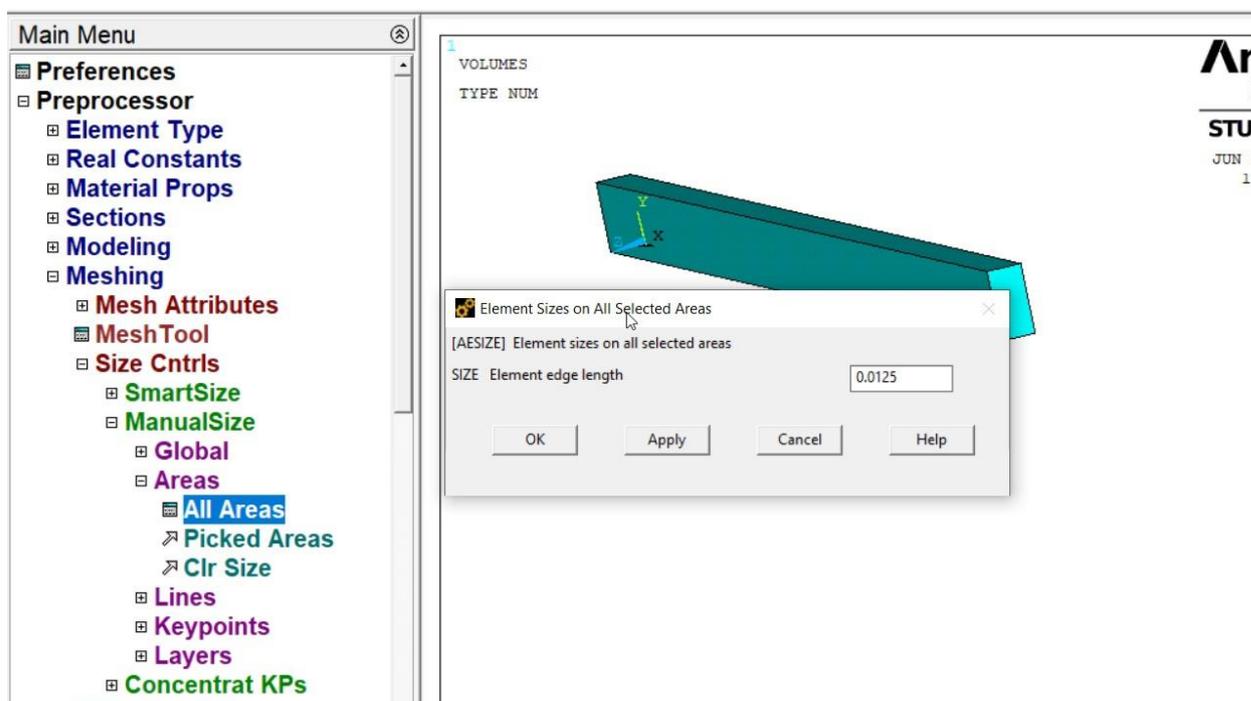


Рис.15. Задание размера элементов

Разбиваем объем заданными элементами. Для этого переходим в *Preprocessor > Meshing > Mesh > Volumes > Mapped > 4 to 6 sided*, в открывшемся окне нажимаем *Pick all*.

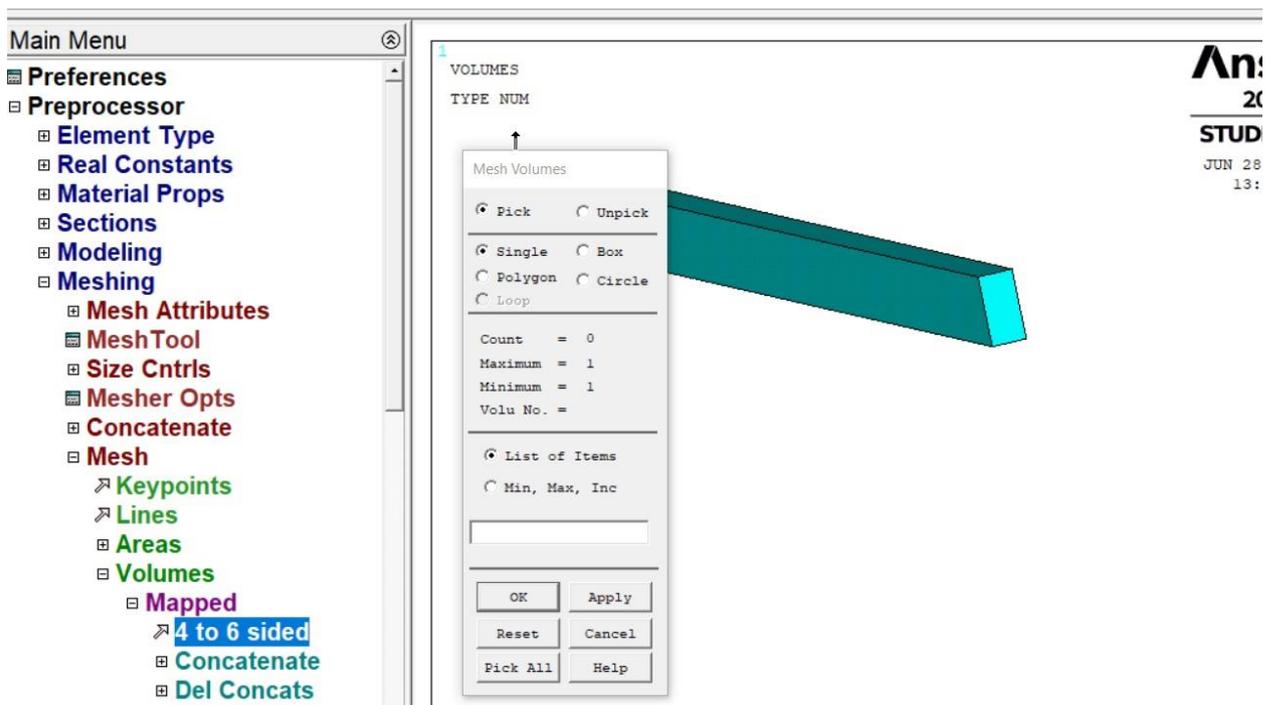


Рис.16. Разбиение геометрии на конечные элементы

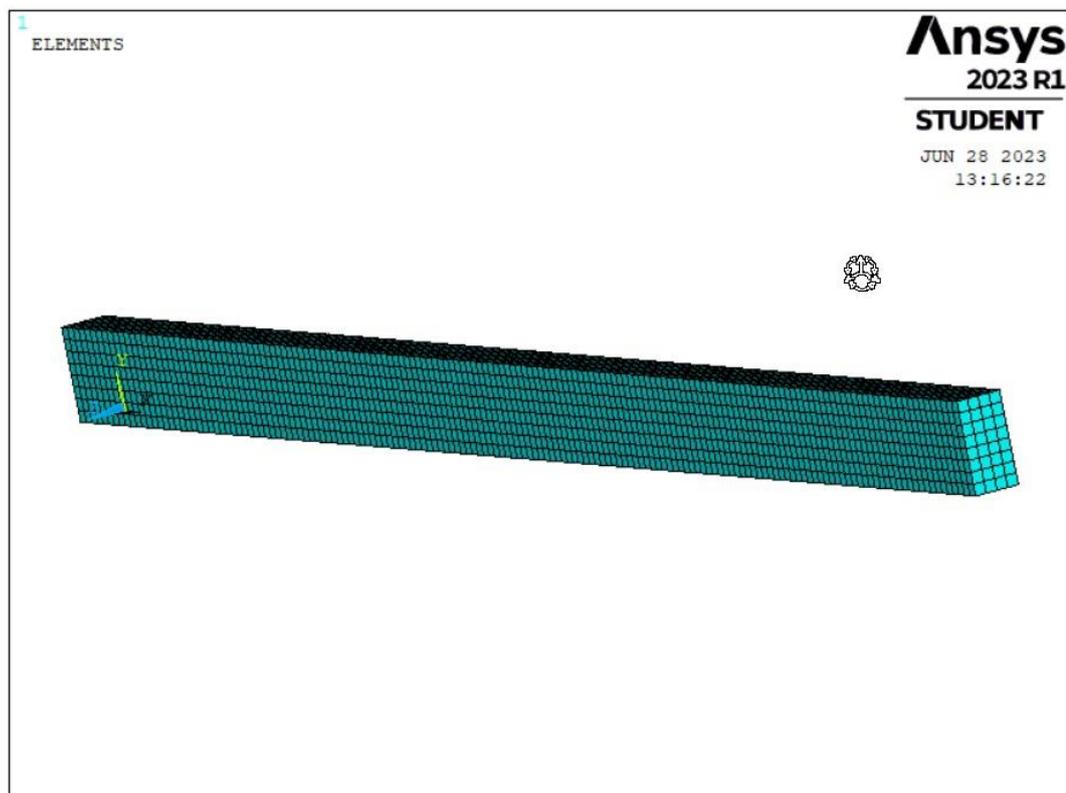


Рис.17. КЭ-модель балки

Создание закреплений

Для создания закреплений выбираем необходимые поверхности, для этого быстрее всего написать следующие команды в командной строке:

ASEL,S,LOC,X,0

ASEL,A,LOC,X,L

Далее задаем закрепления этим поверхностям. Для этого переходим в *Preprocessor > Loads > Define loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas*, в открывшемся окне нажимаем *Pick All*.



Рис.18. Выбор закрепляемых поверхностей

В следующем окне выбираем UY и нажимаем OK .

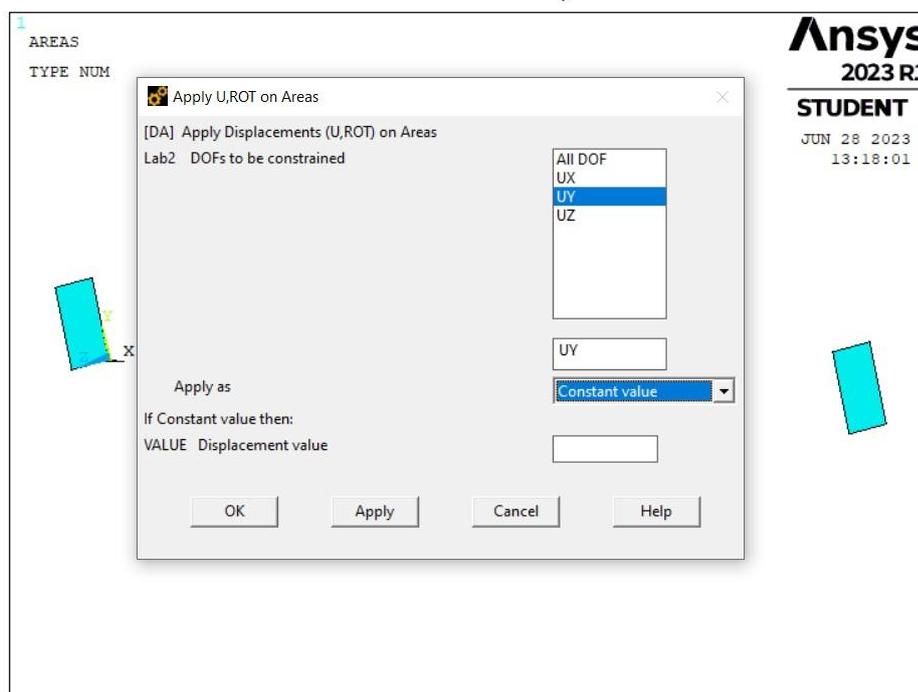


Рис.19. Закрепление степеней свободы. Шаг 1

Далее необходимо задать дополнительные закрепления на узлы из условия симметрии задачи. Для этого выбираем узлы срединной плоскости следующей командой:

$NSEL,S,LOC,Z,B/2$

Закрепляем эти узлы по Z (команда закрепления узлов аналогична закреплению поверхностей, рассмотренная выше).

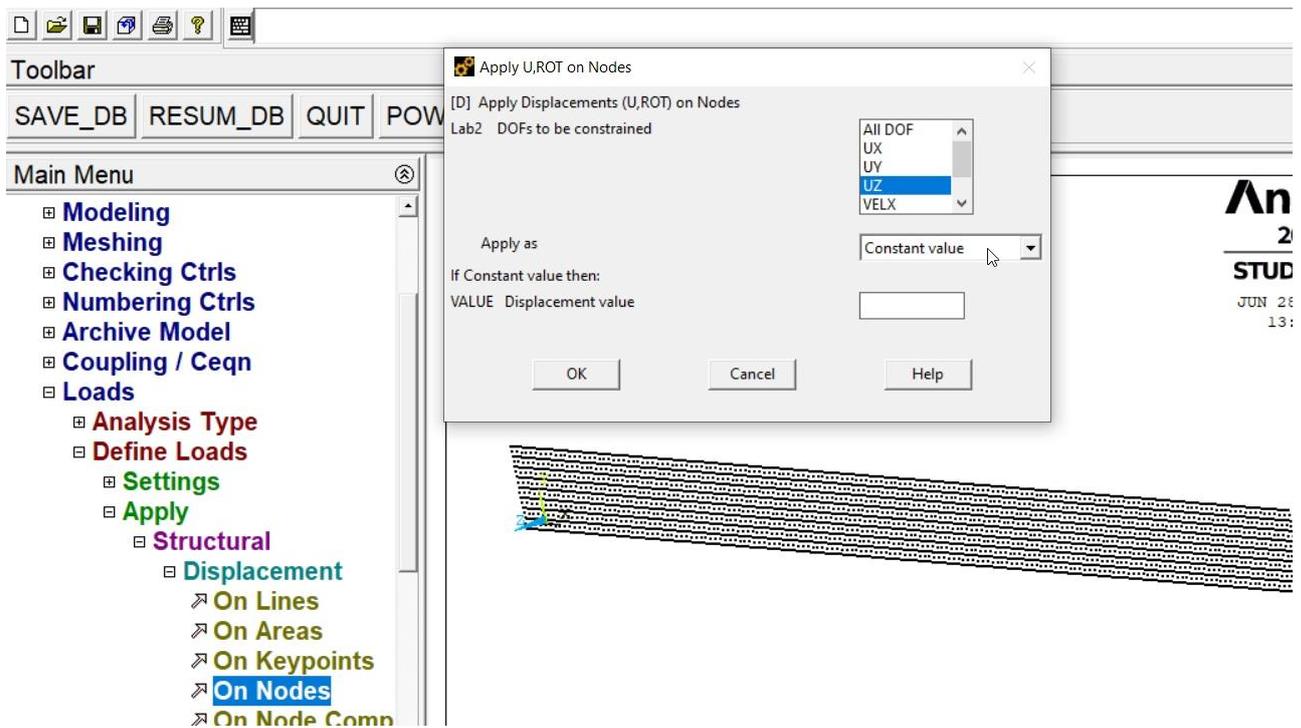


Рис.20. Закрепление степеней свободы. Шаг 2

Далее выбираем другую срединную поверхность командой:

`NSEL,S,LOC,X,L/2`

Закрепляем узлы по X

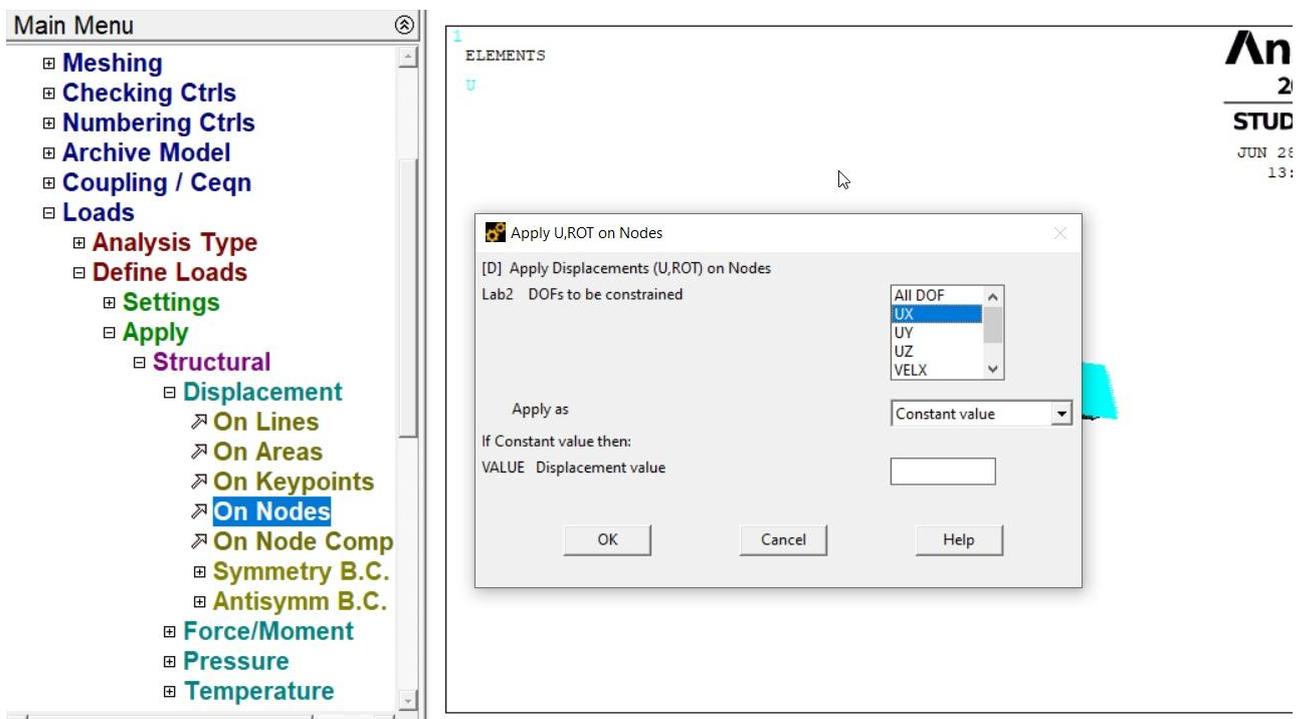


Рис.21. Закрепление степеней свободы. Шаг 3

Создание загрузений

Задаем нагрузку в виде созданной в начале таблицы. Для этого сначала необходимо выбрать необходимую поверхность командой: *ASEL,S,LOC,Y,H*

Далее переходим в *Preprocessor > Loads > Define loads > Apply > Structural > Pressure > On AREAS*, в открывшемся окне нажимаем *Pick All*.

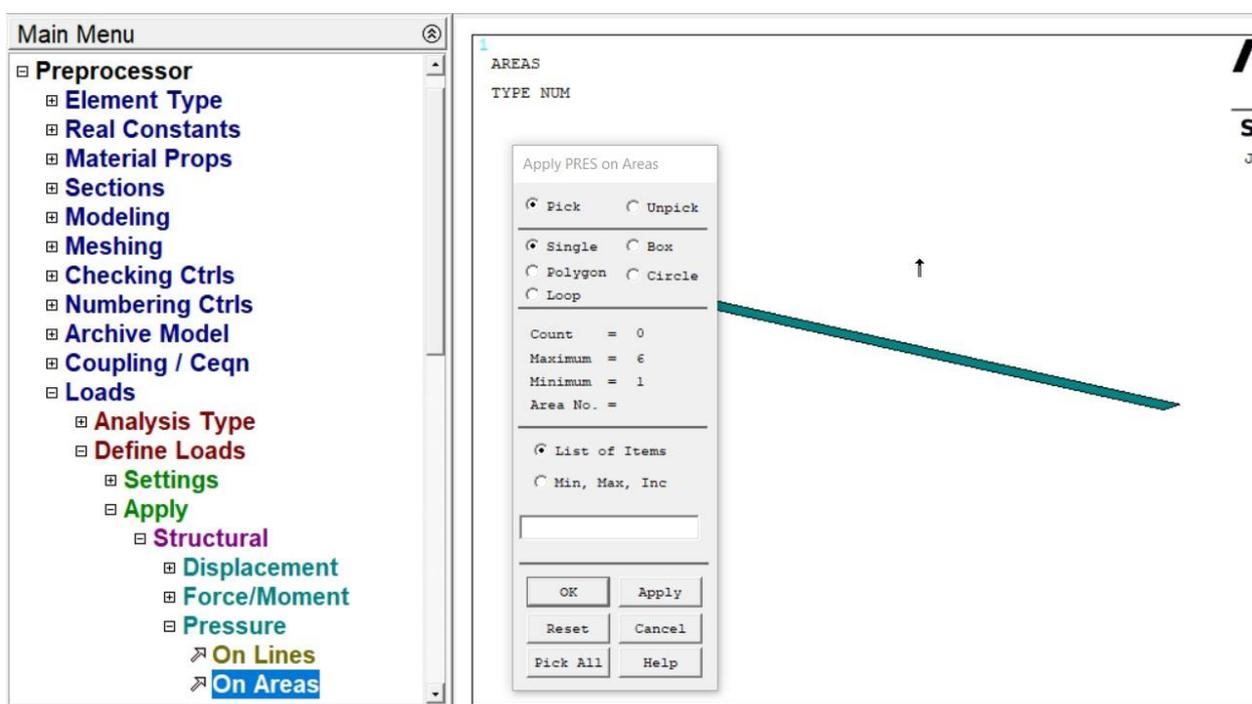


Рис.22. Выбор поверхности для задания нагрузки

В следующем окне в строке *SFA* выбираем *Existing table*, в строке *LKEY* указываем *1*, нажимаем ОК.

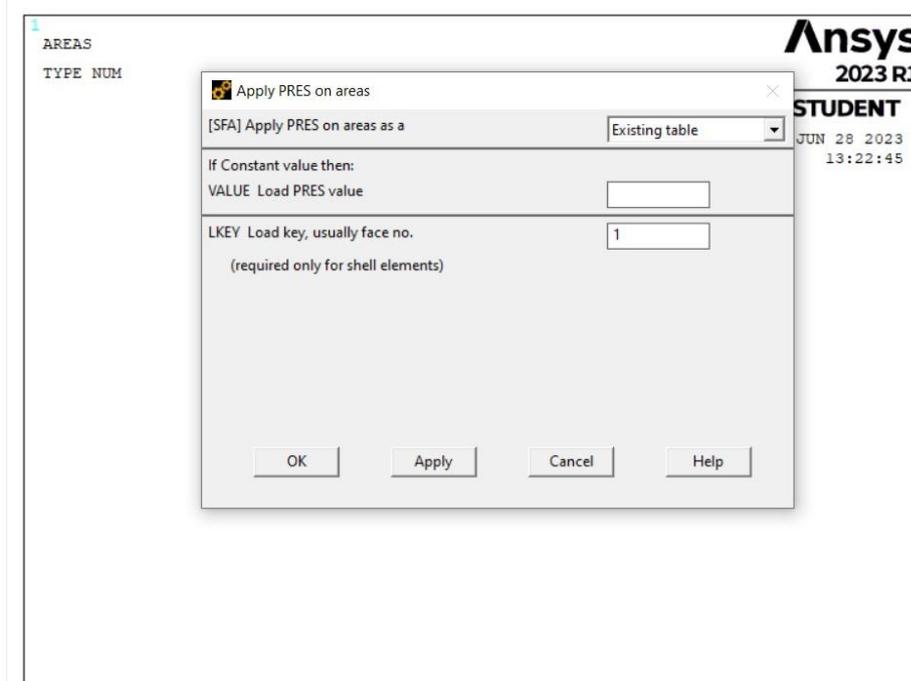


Рис.23. Задание нагрузки. Шаг 1

В следующем окне выбираем созданную таблицу. Нажимаем ОК.

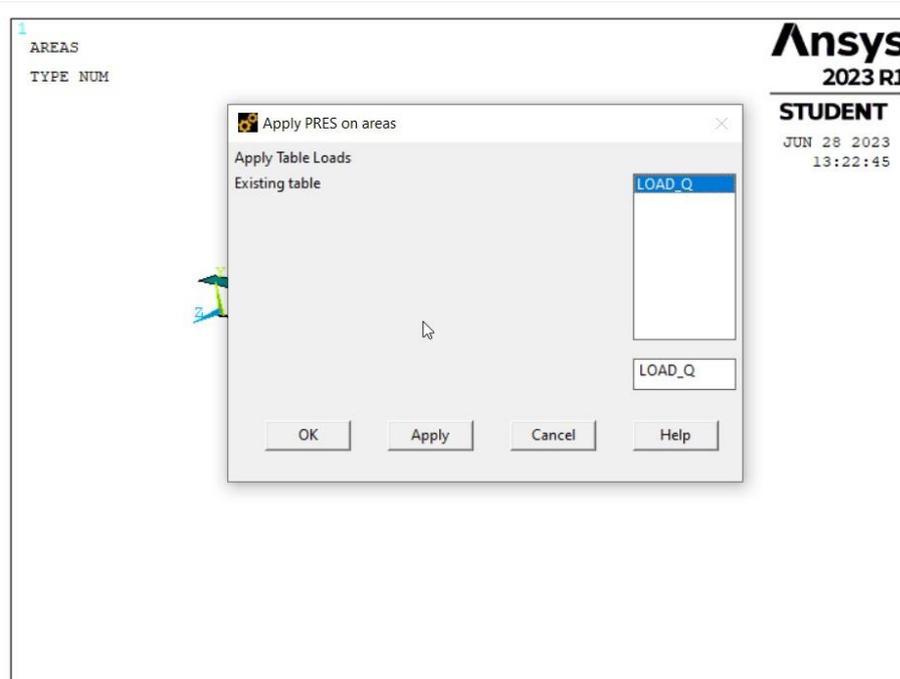


Рис.24. Задание нагрузки. Шаг 2

Решение

Переходим в *Solution > Analysis Type > Sol'n Controls*, в открывшемся окне выбираем следующие параметры расчета:

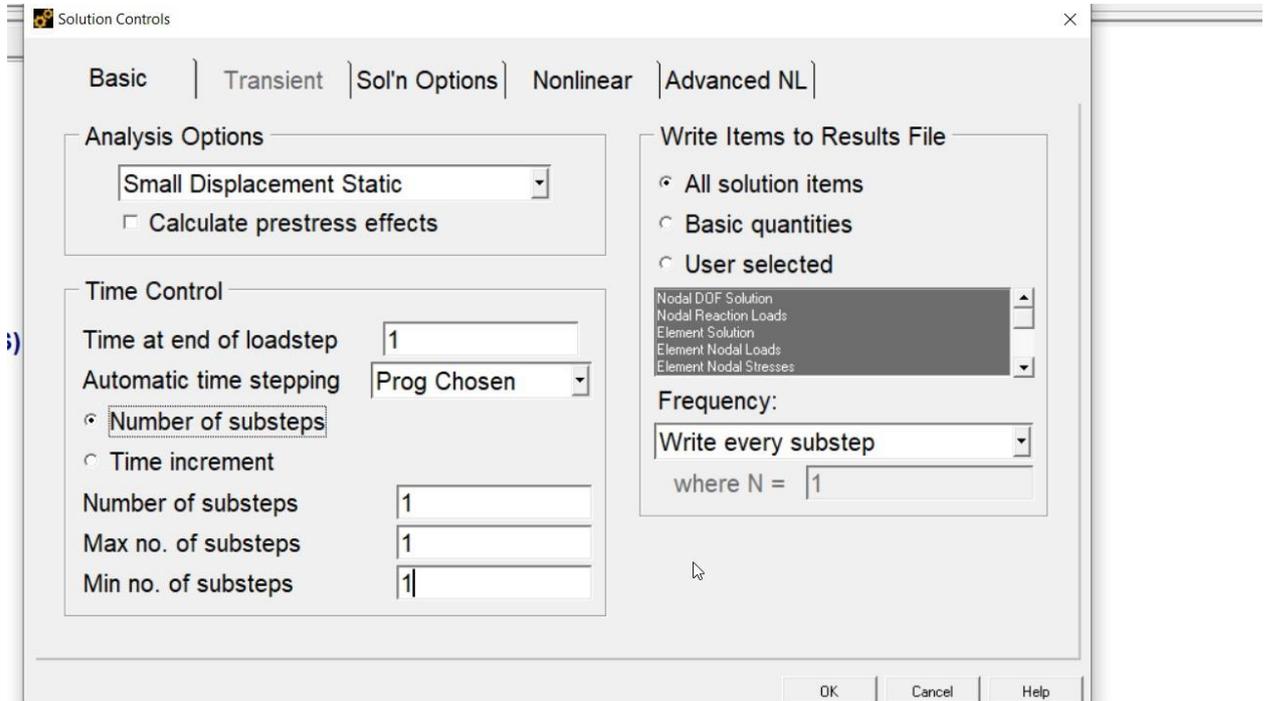


Рис.25. Настройка решателя для первого расчета

Нажимаем ОК. Запускаем расчет. Переходим в *Solution > Solve > Current LS*, в открывшемся окне нажимаем ОК.

После окончания первого расчета, в том же окне, выбираем параметры для второго расчета, и запускаем его как описано выше:

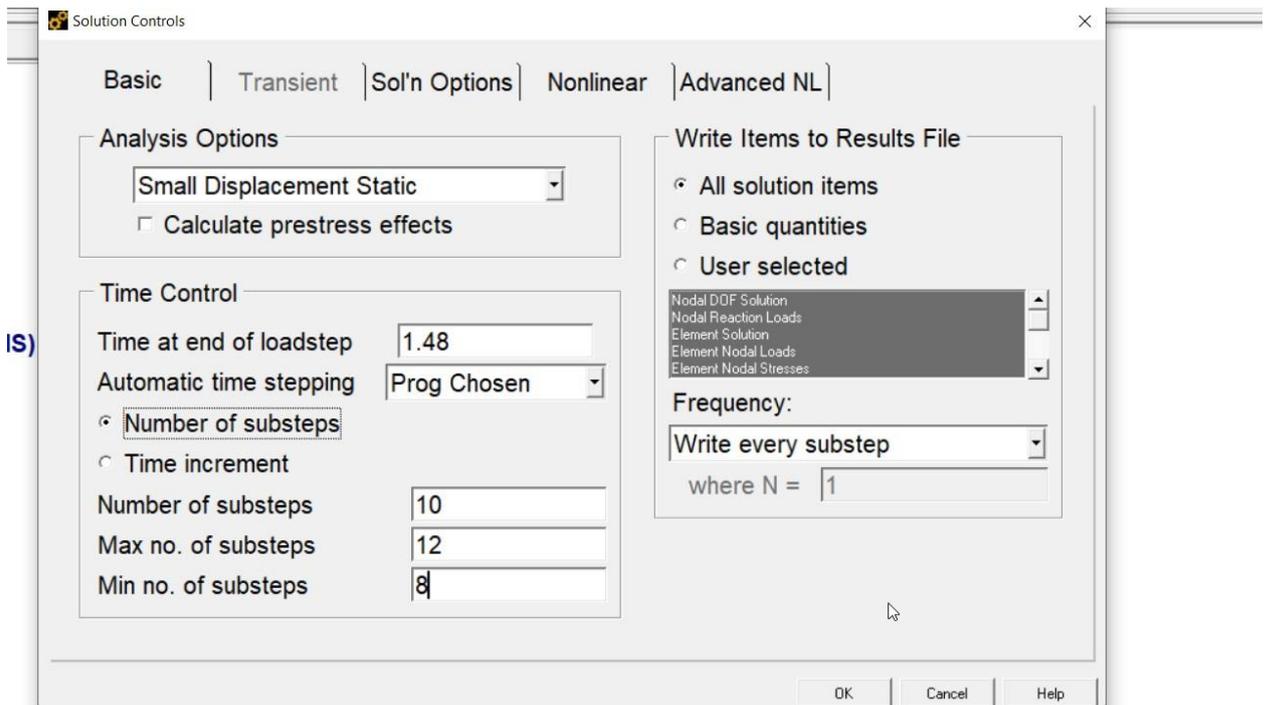


Рис.26. Настройка решателя для второго расчета

Далее выставляем параметры для третьего расчета и запускаем его:

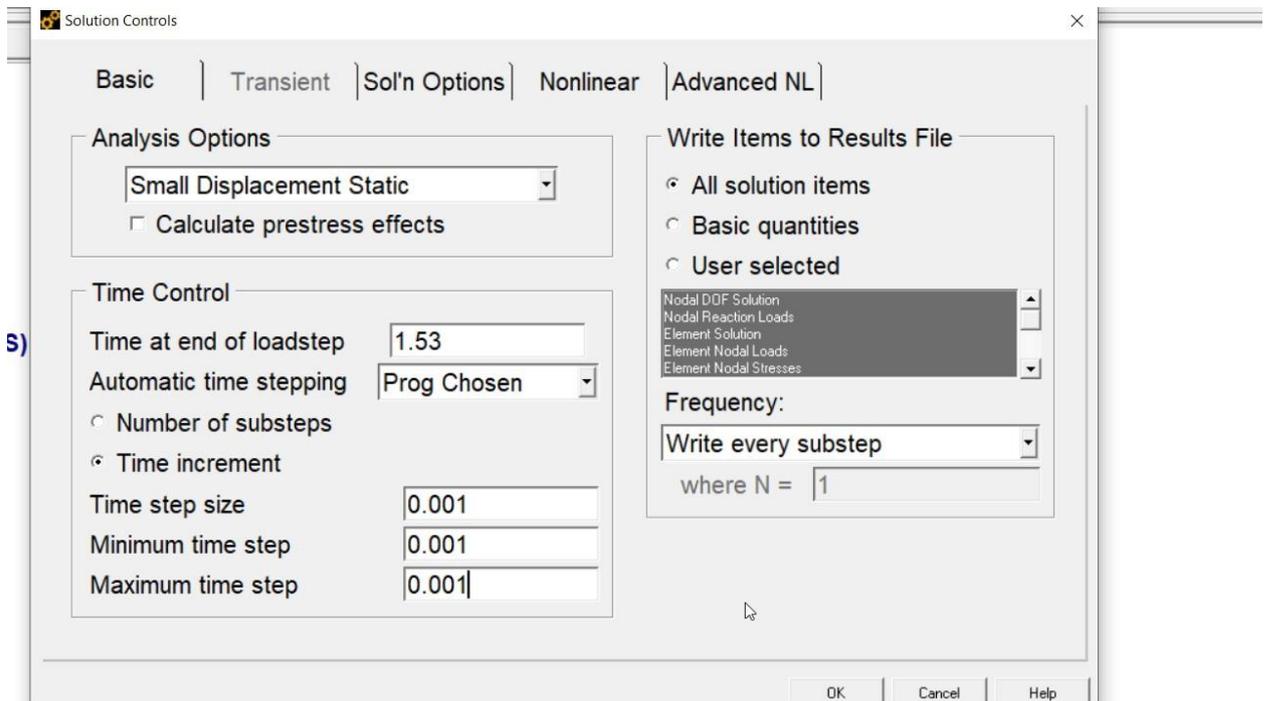
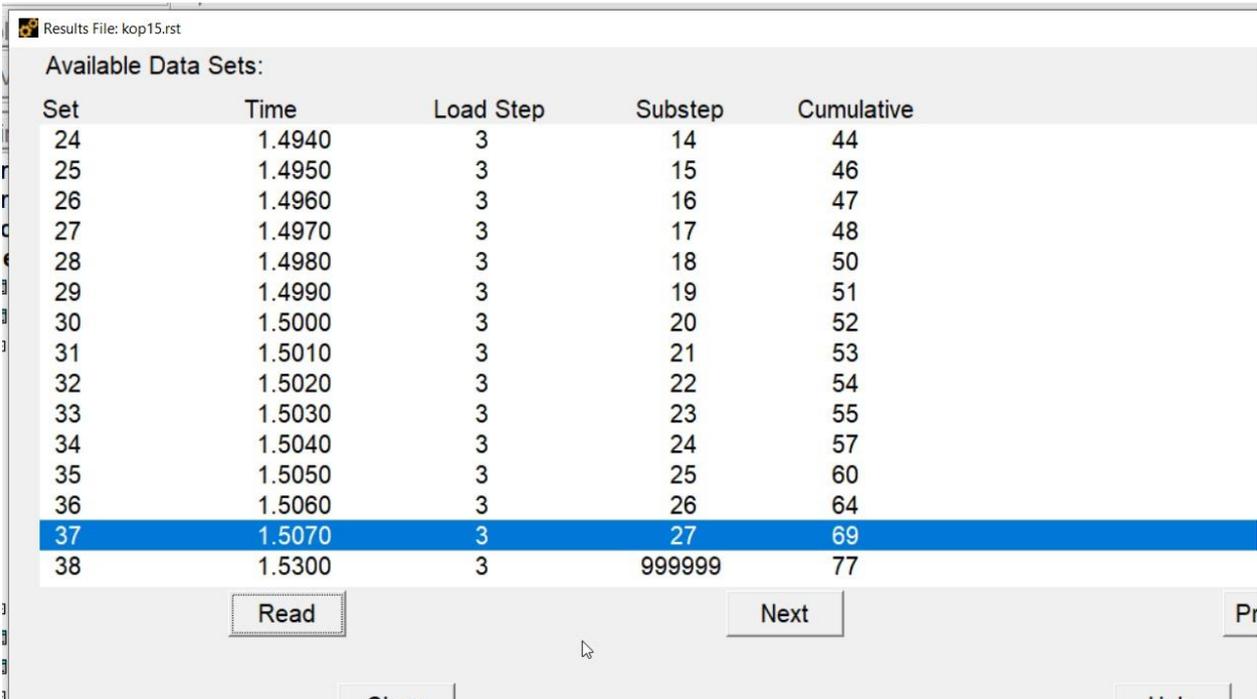


Рис.27. Настройка решателя для третьего расчета

Вывод результатов

Для вывода результатов необходимо выбрать результат в момент перед разрушением. Для этого переходим в *General Postproc > Read Results > By pick*, затем выбираем предпоследний набор и нажимаем *Read*.



Set	Time	Load Step	Substep	Cumulative
24	1.4940	3	14	44
25	1.4950	3	15	46
26	1.4960	3	16	47
27	1.4970	3	17	48
28	1.4980	3	18	50
29	1.4990	3	19	51
30	1.5000	3	20	52
31	1.5010	3	21	53
32	1.5020	3	22	54
33	1.5030	3	23	55
34	1.5040	3	24	57
35	1.5050	3	25	60
36	1.5060	3	26	64
37	1.5070	3	27	69
38	1.5300	3	999999	77

Рис.28. Выбор момента для просмотра результата

Далее переходим в *General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu*, в открывшемся окне выбираем *Stress > von Mises stress* и нажимаем *APPLY*.

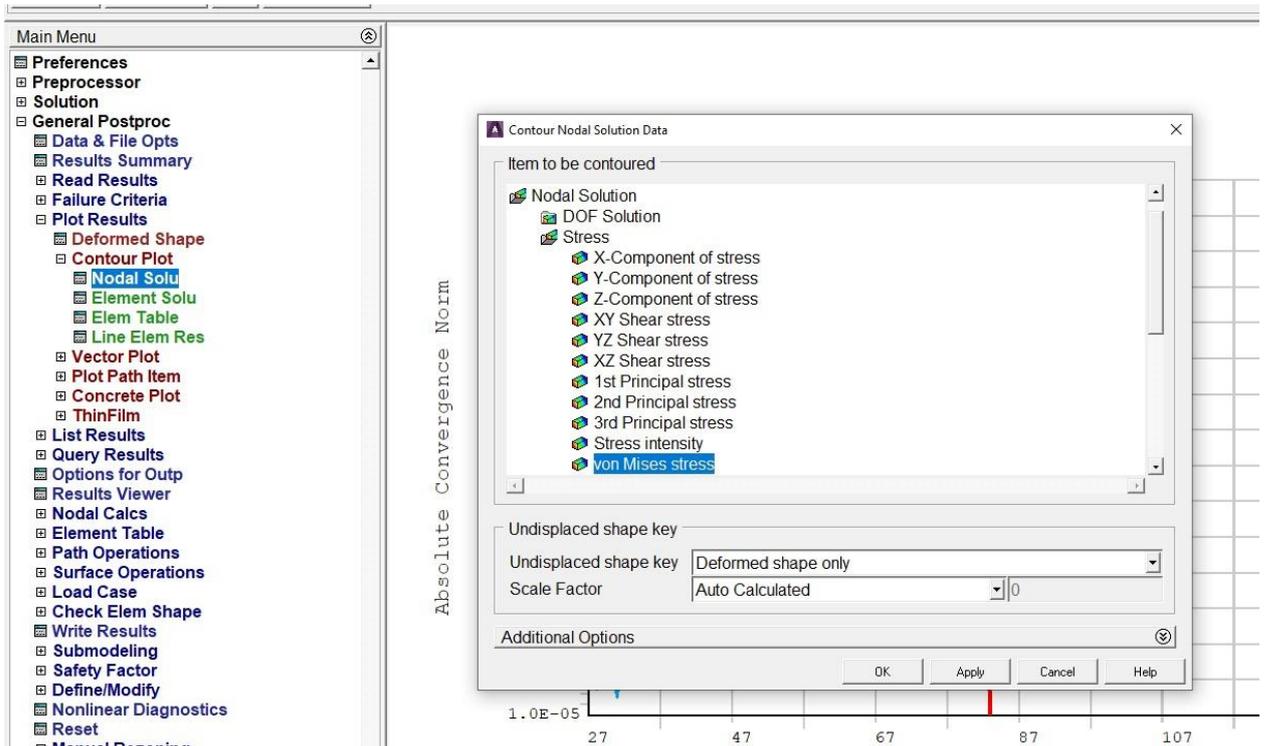


Рис.29. Вывод эквивалентных напряжений по Мизесу

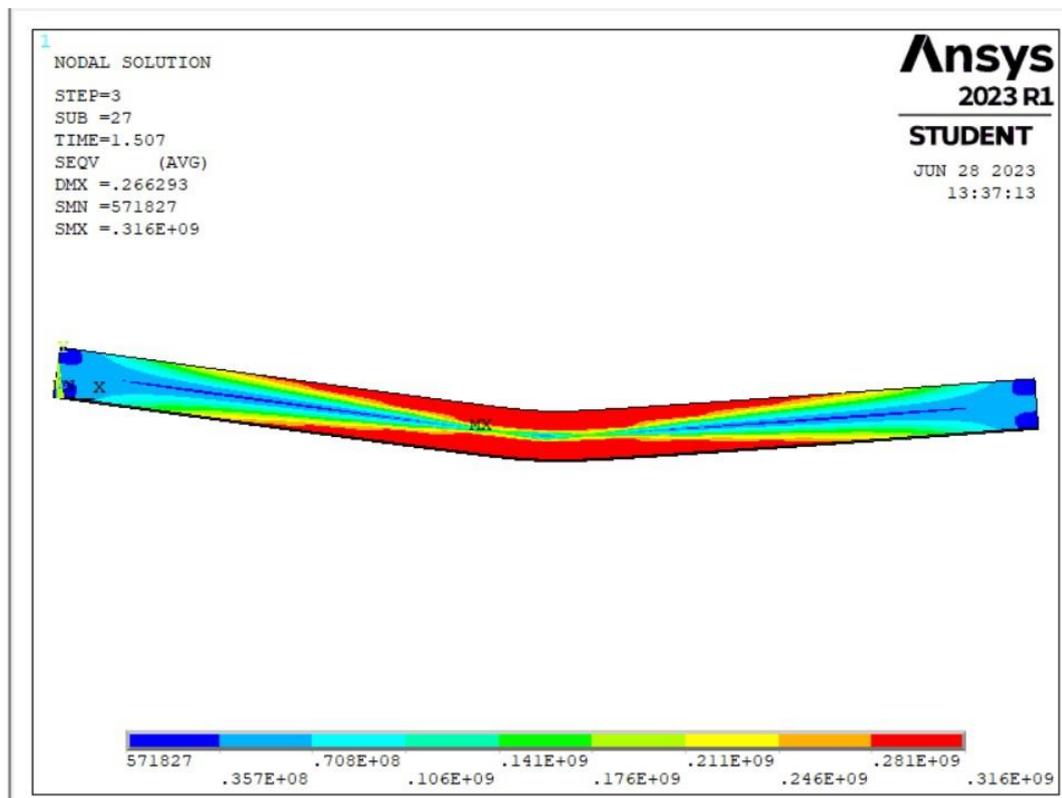


Рис.30. Изополя эквивалентных напряжений по Мизесу

Далее, в том же окне *Contour Nodal Solution Data* выбираем *Plastic Strain*
 > *von Mises plastic strain* и нажимаем *APPLY*.

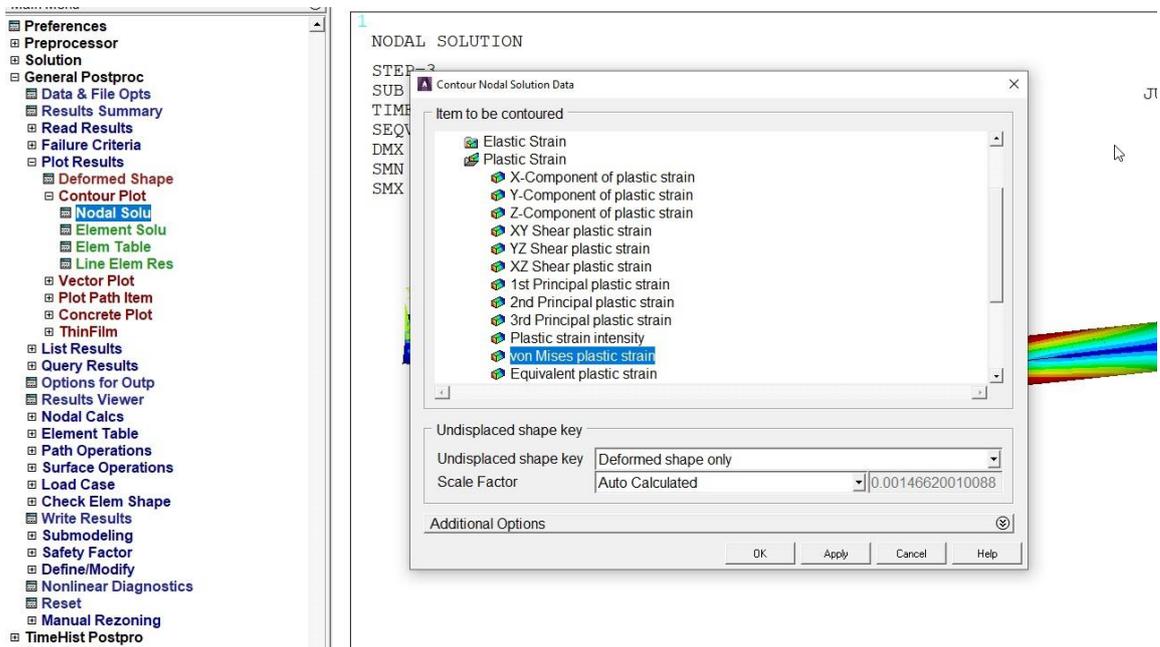


Рис.31. Вывод эквивалентных деформаций по Мизесу

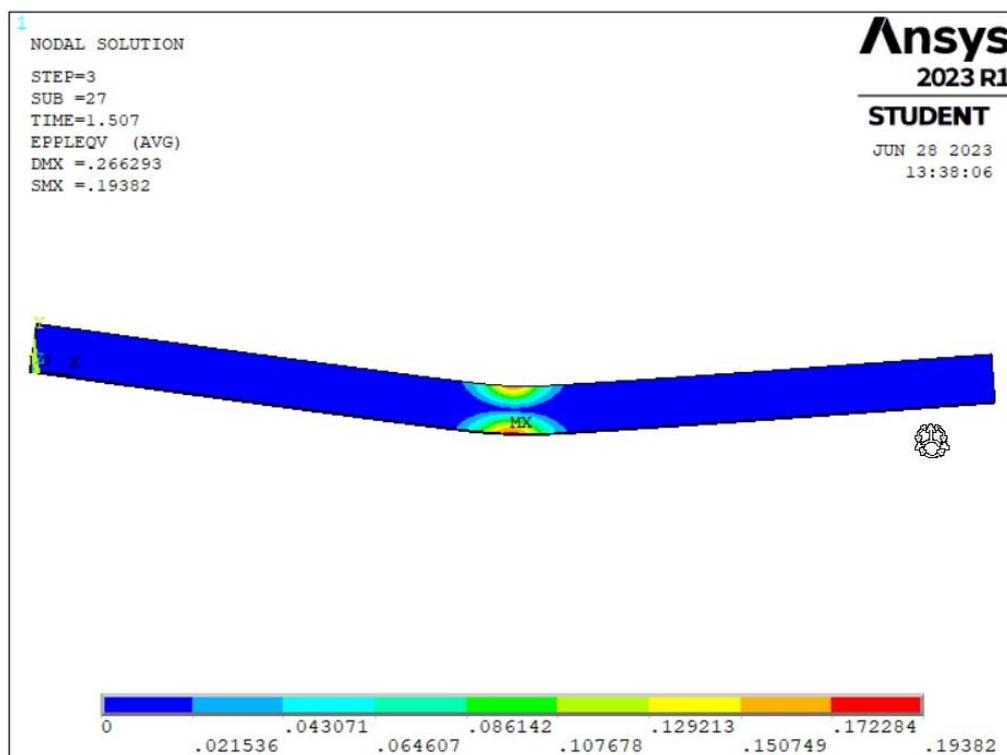


Рис.32. Изополя эквивалентных деформаций по Мизесу

Теперь отобразим график перемещений узла по середине пролета. Для удобства выберем этот узел командами:

```
NSSEL,S,LOC,X,L/2
```

```
NSSEL,R,LOC,Y,0
```

```
NSSEL,R,LOC,Z,0
```

Затем переходим в *TimeHist Postpro*, в открывшемся окне нажимаем на значок “+” в левом верхнем углу (*add data*). В следующем окне выбираем *DOF Solution > Y component of displacement*, нажимаем ОК, далее выделяем выбранную точку и нажимаем ОК.

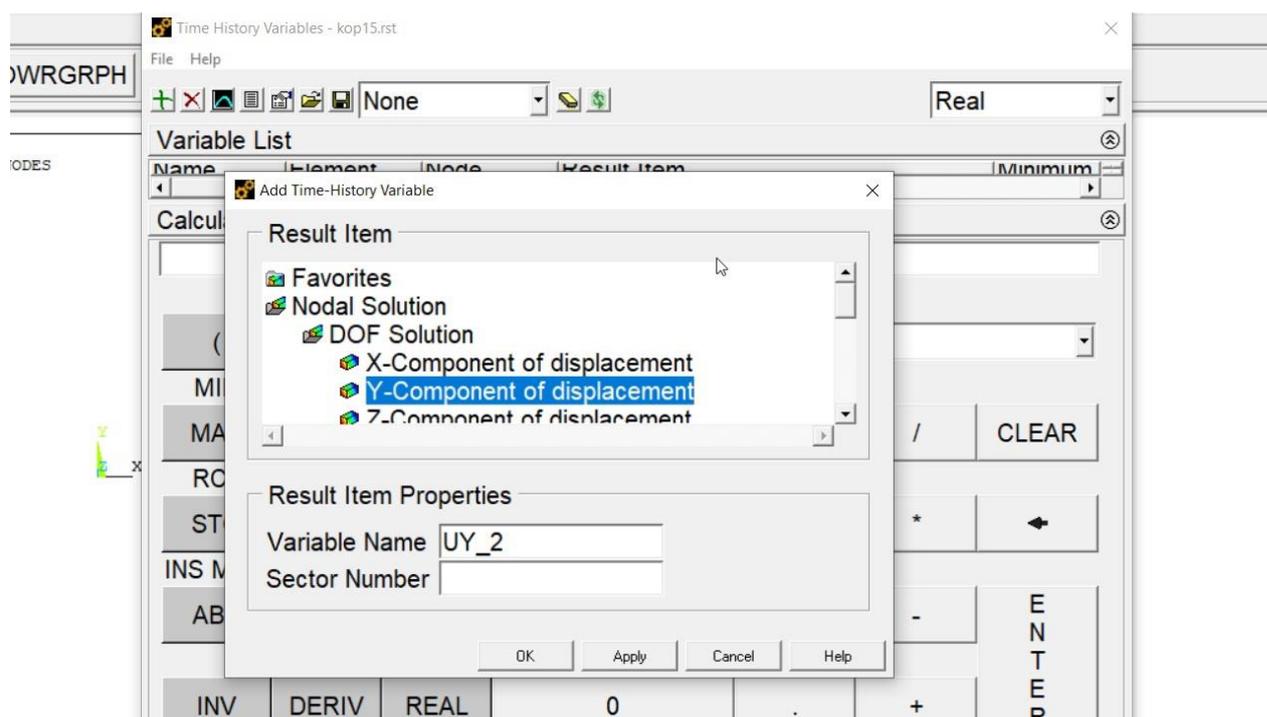


Рис.33. Окно Add Time-History Variable

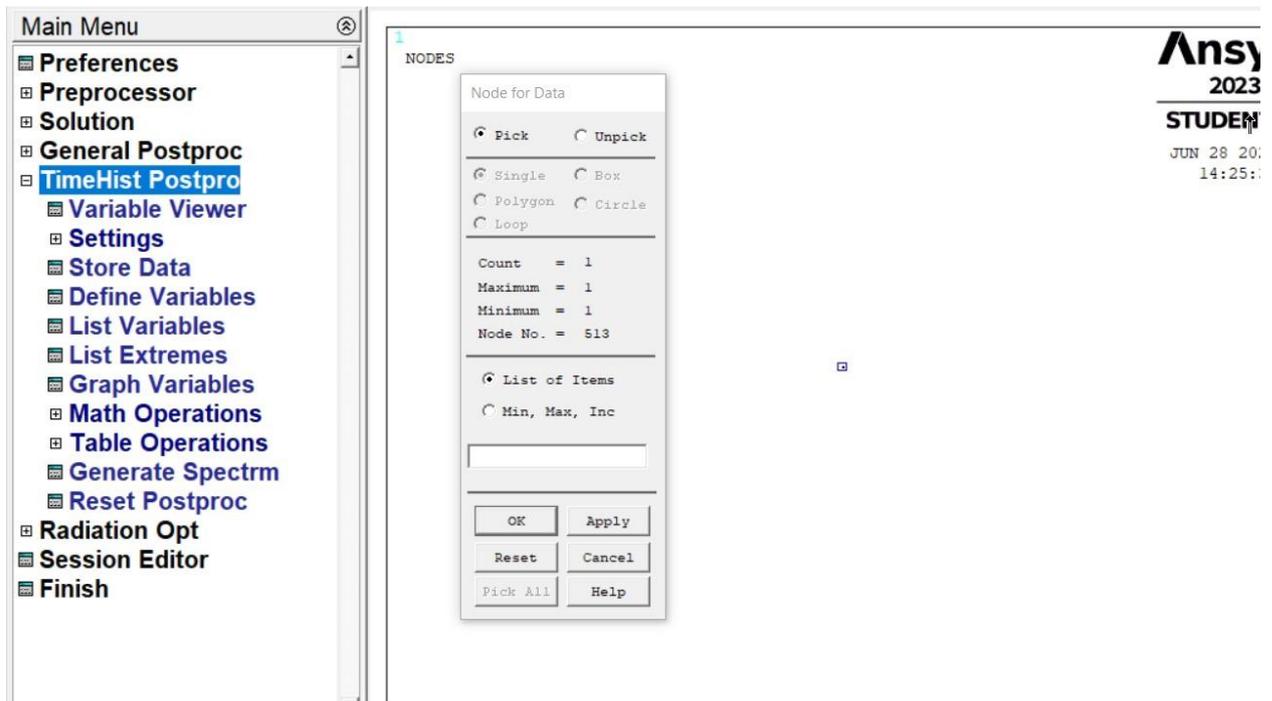


Рис.34. Выбор точки для построения графика

Затем нажимаем *Data properties* (5 иконка в левом верхнем углу), в открывшемся окне переходим во вкладку *X-Axis* и назначаем следующие параметры:

- *Range of Values – Specified*
- *Min – 1*
- *Max – 1.5*

Нажимаем ОК.

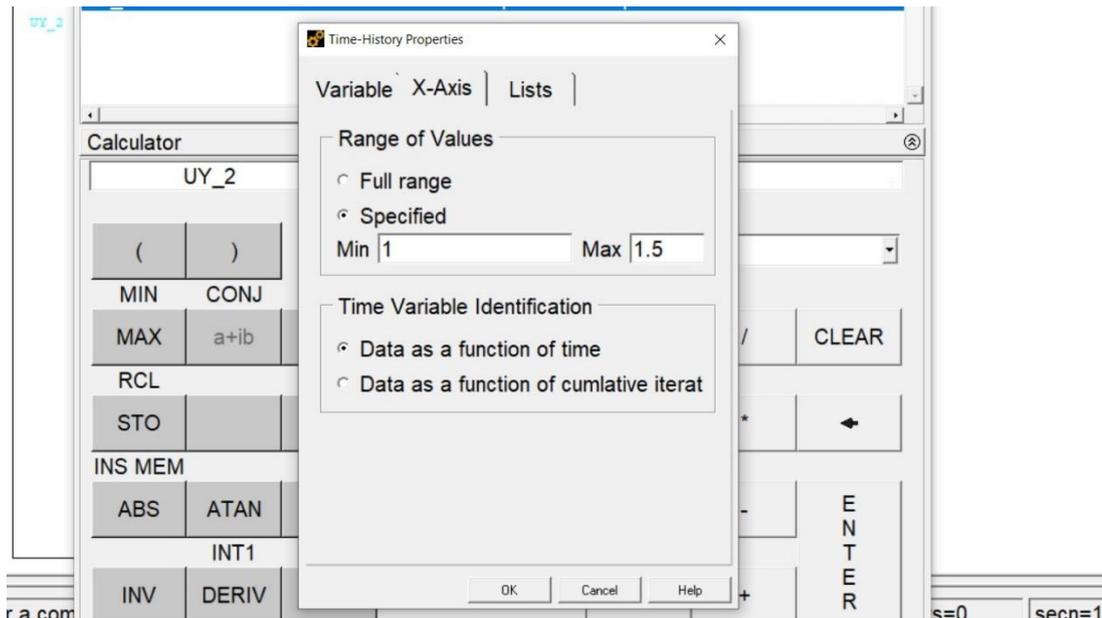


Рис.35. Настройки для вывода графика

Для отображения графика нажимаем *Graph Data* (иконка с графиком слева вверху).

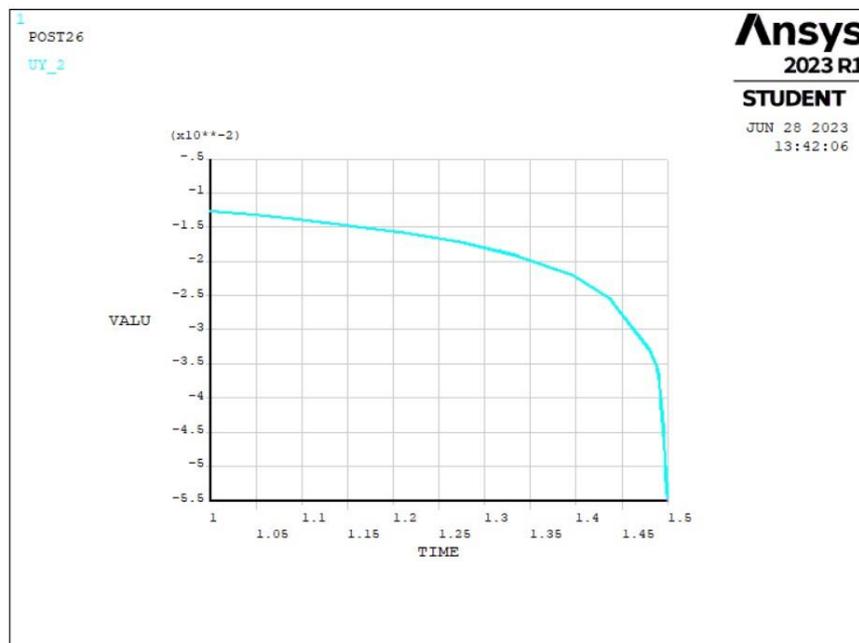


Рис.36. График перемещения точки вдоль оси Y

Заключение

В работе был проведен расчёт коэффициента запаса прочности балки при упруго-пластическом изгибе двумя способами: аналитическим и численным. В случае аналитического решения значение коэффициента равно 1.5, при численном моделировании в ПК Ansys Mechanical — 1.507.

Погрешность численного решения составляет: $\frac{|1.5-1.507|}{1.5} \cdot 100\% = 0.47\%$.

Код программы

FINISH

/CLEAR,ALL

/PREP7

! вход в препроцессор

! задание исходных данных

EPS = 1E-5

H = 0.1

B = 0.05

L = 2

ST = 300e6

! предел пластичности

K = 1.6

! параметр "времени"

QL = (4*ST*B*H**2)/(3*L**2)

! линейная нагрузка

Q=QL/B

! поверхностная нагрузка

! создание таблицы нагрузок

*DIM,LOAD_Q,TABLE,3,1,1,TIME

LOAD_Q(1,0)=0.0,1,K

LOAD_Q(1,1)=Q,Q,K*Q

! задание параметров материала

ET,1,186

MP,EX,1,2E11

! Модуль упругости

MP,PRXY,1,0.3

! Коэффициент Пуассона

TB,BISO,1

! билинейный изотропный

TBDATA,,ST,0 ! Предел пластичности и тангенциальный модуль

! создание геометрии

BLOCK,0,L,0,H,0,B

! разбивка сетки

AESIZE,ALL,0.0125

VMESH,ALL

! создание закреплений

ASEL,S,LOC,X,0

ASEL,A,LOC,X,L

DA,ALL,UY

NSEL,S,LOC,Z,B/2-EPS,B/2+EPS

D,ALL,UZ

NSEL,S,LOC,X,L/2-EPS,L/2+EPS

D,ALL,UX

! задание нагрузки в виде таблицы

ASEL,S,LOC,Y,H

SFA,ALL,1,PRES,%LOAD_Q%

ALLSEL

! решение

/SOLU

ANTYPE,0

TIME,1

! время

NSUBST,1,1,1

! количество итераций,

!среднее/максимальное/минимальное

OUTRES,ERASE

! вывод результатов

OUTRES,ALL,1

SOLVE

TIME,1.48

NSUBST,10,12,8

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,1

SOLVE

TIME,1.53

DELTIM,0.001,0.001,0.001

! шаг по времени

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,1

SOLVE

Практическая работа №2

Упруго-пластическое кручение бруса

Методические указания к выполнению практической работы 2

Для создания расчётной модели будем использовать препроцессор Ansys Mechanical APDL.

После запуска APDL появится окно:

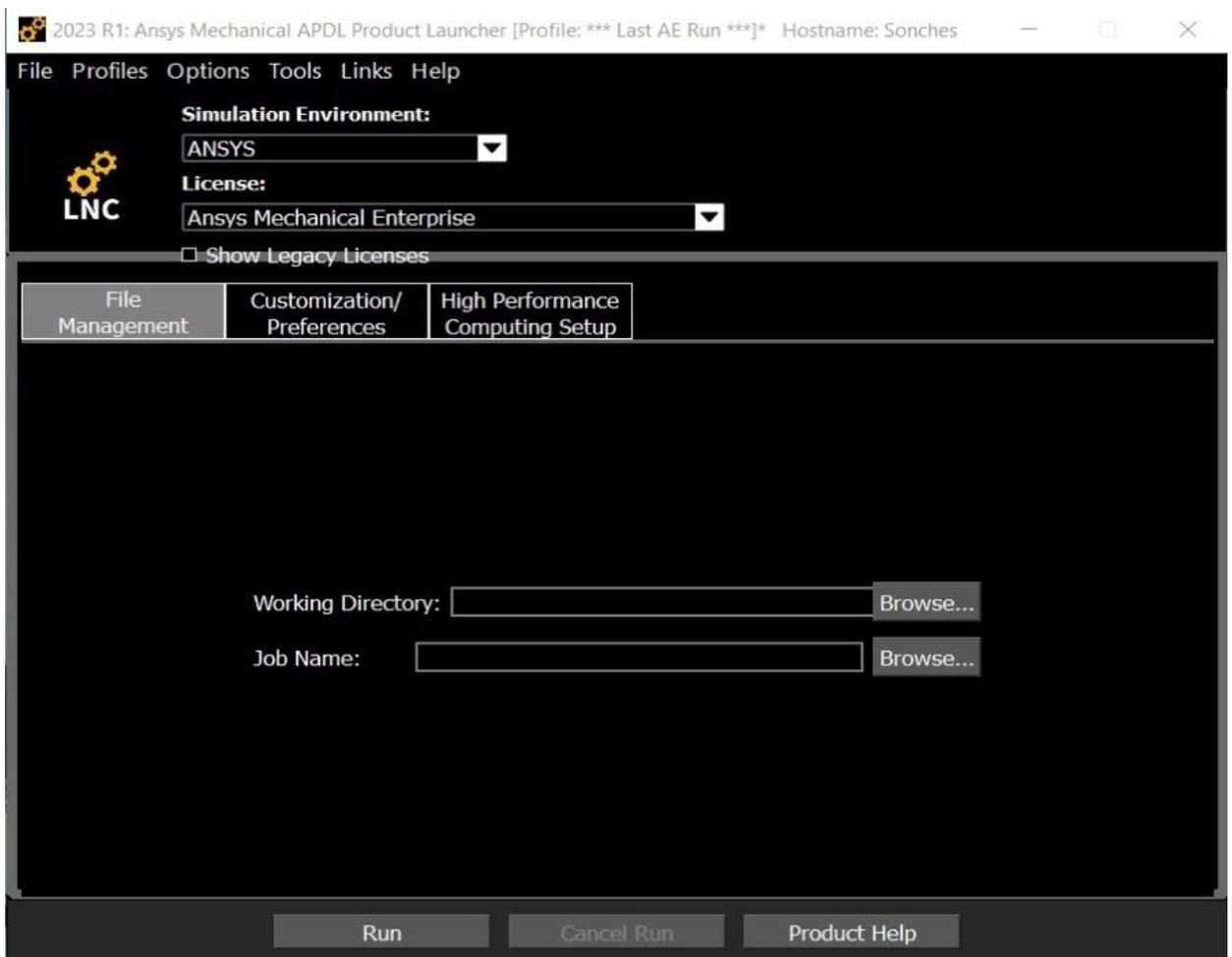


Рис.1. Окно запуска программного комплекса ANSYS Mechanical

Рядом с окном *Working Directory* нажать кнопку «*Browse...*» и выбрать свою рабочую директорию. В этой директории ANSYS будет сохранять все файлы. Директория должна быть создана заранее. В именах директории и пути к директории допускаются только латинские буквы. Рядом с окном *Job Name* задаем имя файла.

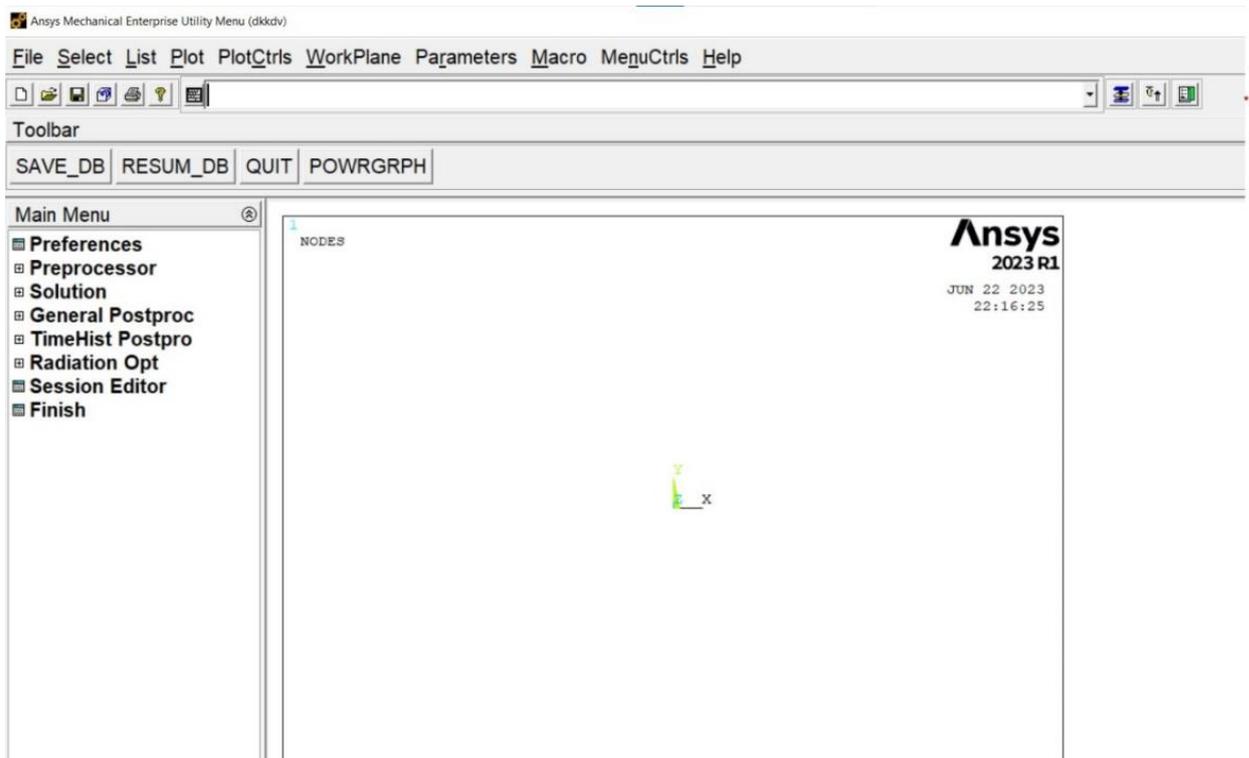


Рис.2. Рабочее окно программного комплекса ANSYS Mechanical

Выполним расчёт жёстко закреплённого стержня круглого сечения с радиусом R и длиной l , на свободном конце которого приложен сосредоточенный момент. Расчётная схема имеет следующий вид:

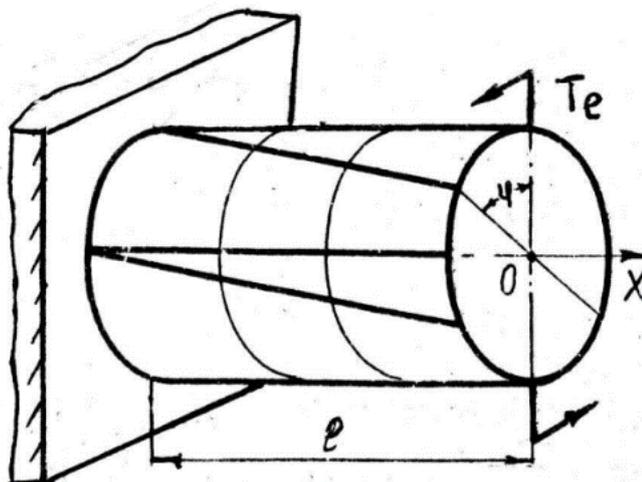


Рис.3. Схема жёстко закреплённого стержня круглого сечения

Исходные данные:

- длина стержня $l = 6$ м;
- интенсивность погонной равномерно распределённой нагрузки будем задавать в виде таблицы;
- поперечное сечение стержня – круглое (радиус $R = 1$ м);
- характеристики материала: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, предел пластичности $\sigma_T = 300 \cdot 10^6$ Па (предел пластичности по касательным напряжениям может быть пересчитан как: $\tau_T = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} = 173 \cdot 10^6$);
- поперечное сечение стержня – круглое (радиус $R = 1$ м);
- погонная равномерно распределённая крутильная нагрузка.

Аналитическое решение

Отношение $\beta = \frac{M_{\text{разр}}}{M_T}$ характеризует запас прочности балок по отношению к состоянию, при котором в балке возникают первые пластические деформации, где

$$M_T = \frac{\tau_T J}{R} = \tau_T \frac{\pi R^3}{2}, \text{ так как для круга } J = \frac{\pi R^4}{2},$$

$$M_{\text{разр}} = \iint_F \tau_T = \frac{2}{3} \pi R^3 \tau_T,$$

Следовательно,

$$\beta = \frac{M_{\text{разр}}}{M_T} = \frac{\frac{2}{3} \pi R^3 \tau_T}{\tau_T \frac{\pi R^3}{2}} = \frac{4}{3}.$$

Решение с помощью Ansys Mechanical APDL

Создание таблицы нагрузок.

Нагрузку будем задавать на основе диаграммы Прандтля:

Utility menu > Parameters > Array parameters > Define/Edit

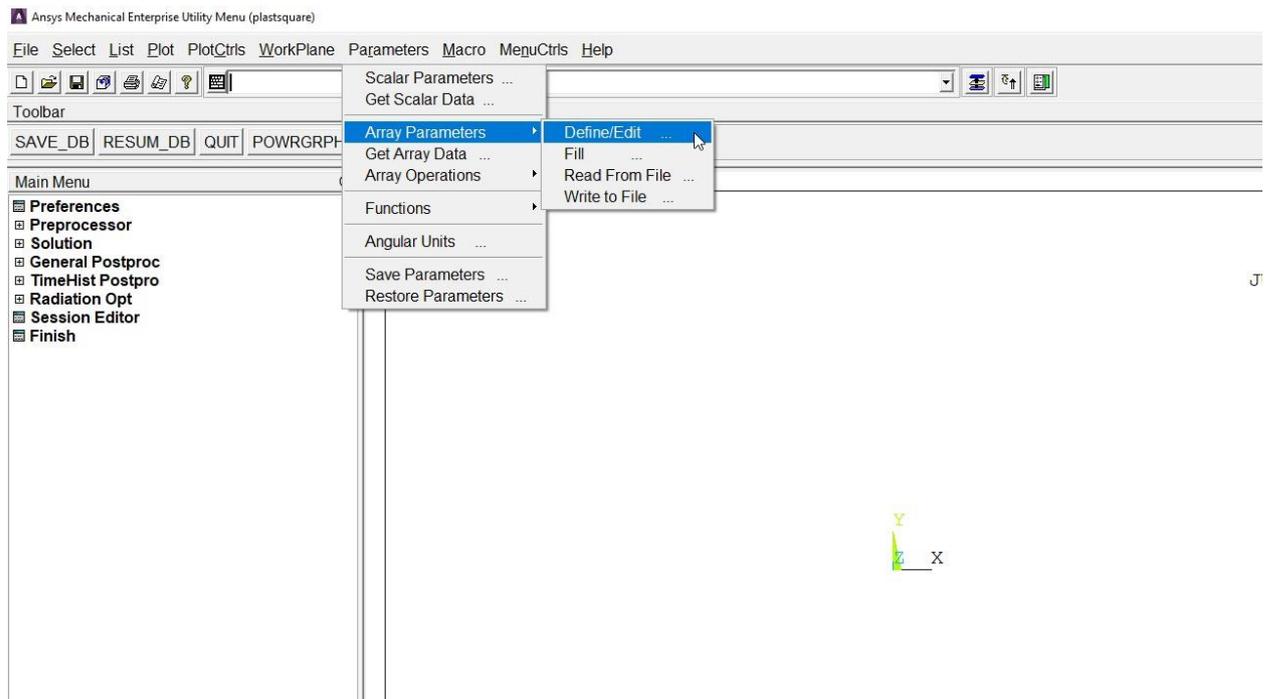


Рис.4. Создание таблицы нагрузок

В открывшемся окне *Array Parameters* нажимаем кнопку *Add*

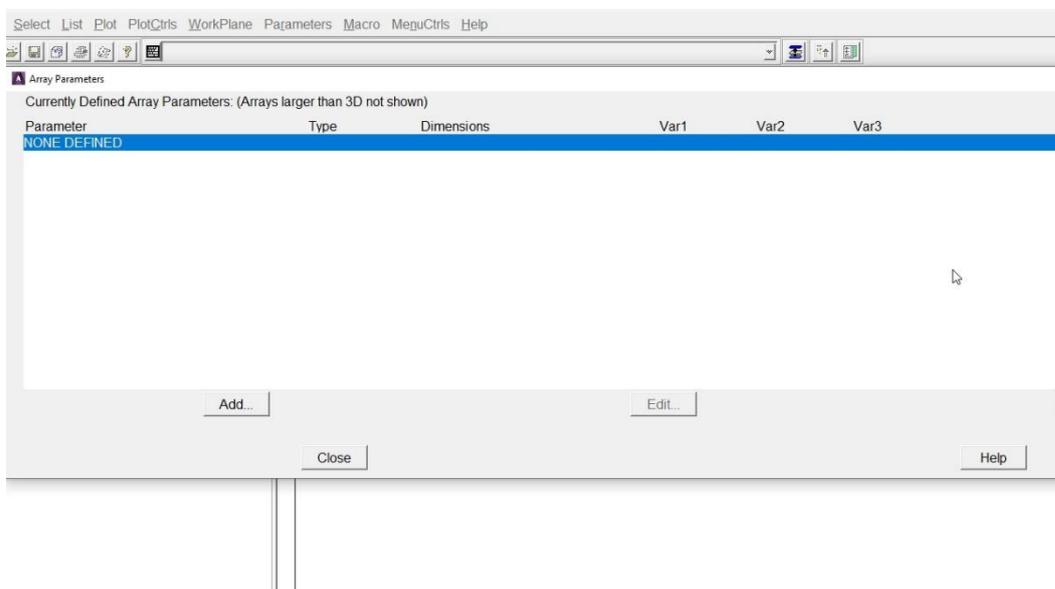


Рис.5. Окно *Array*

В открывшемся окне указываем:

- Название таблицы (*Parameter Name*) – *Load_Q*
- Тип таблицы (*Parameter Type*) – *Table*
- Количество строк, столбцов, рядов (*No. of rows, cols, planes*) – *3,1,1*
- Строковая переменная (*Var1 Row variable*) – *Time*

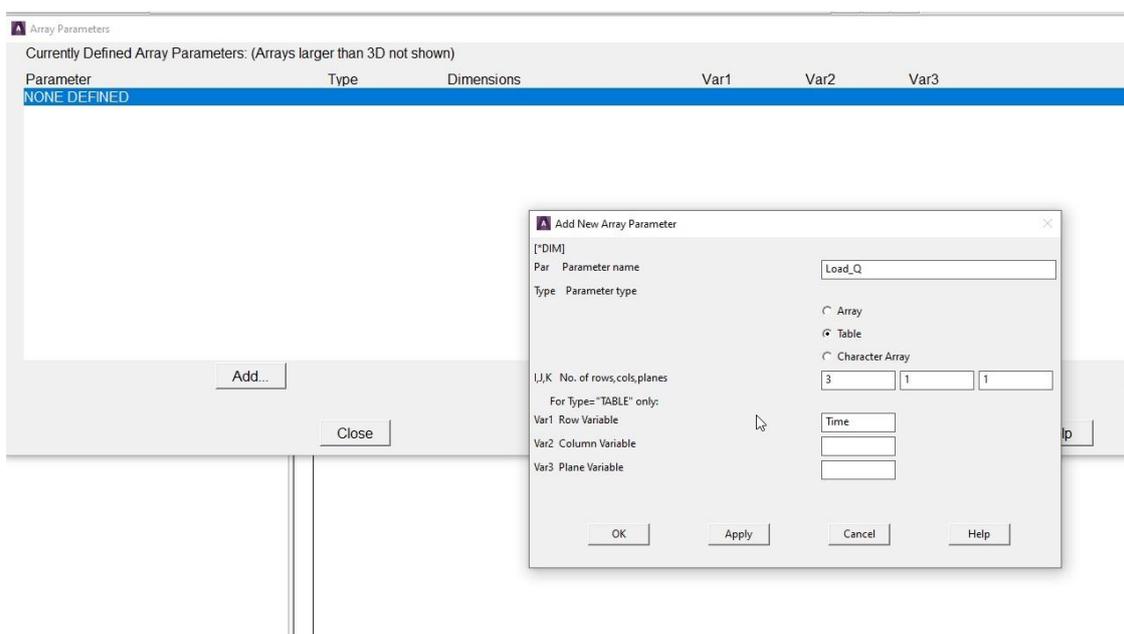


Рис.6. Окно *Add New Array Parameter*

Во вкладке *Array Parameters* нажимаем кнопку *Edit*. В открывшемся окне заполняем данные таблицы (изменение нагрузки со временем):

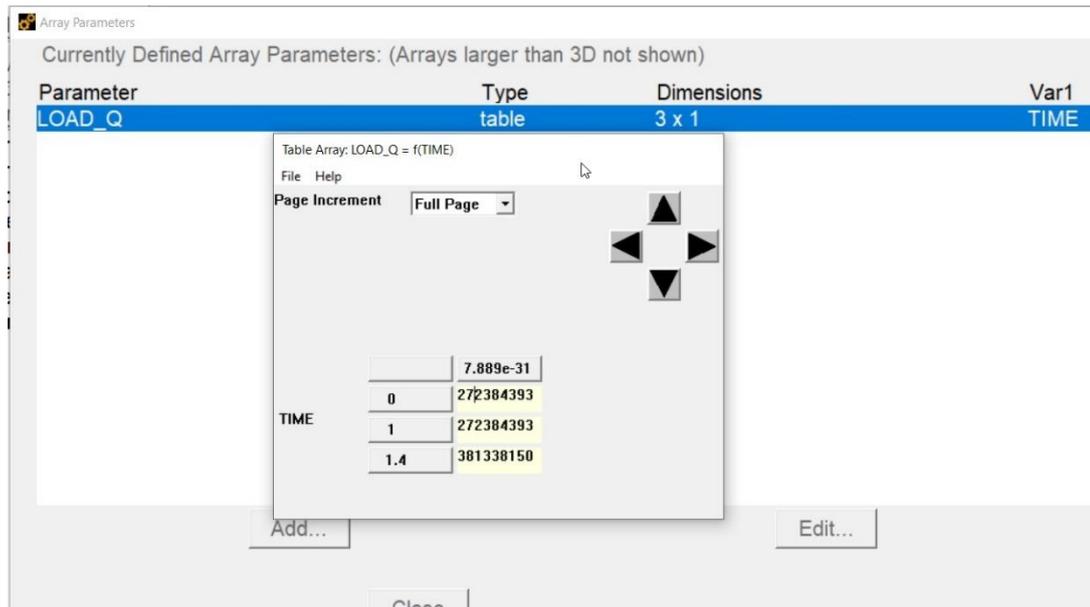


Рис.7. Окно *Table Array*

Затем нажимаем *File > Apply/Quit* и закрываем окно *Array Parameters*.

Задание элементов и их параметров

В *Main Menu* переходим в *Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete* в открывшемся окне (*Element type*) нажимаем кнопку *Add*:

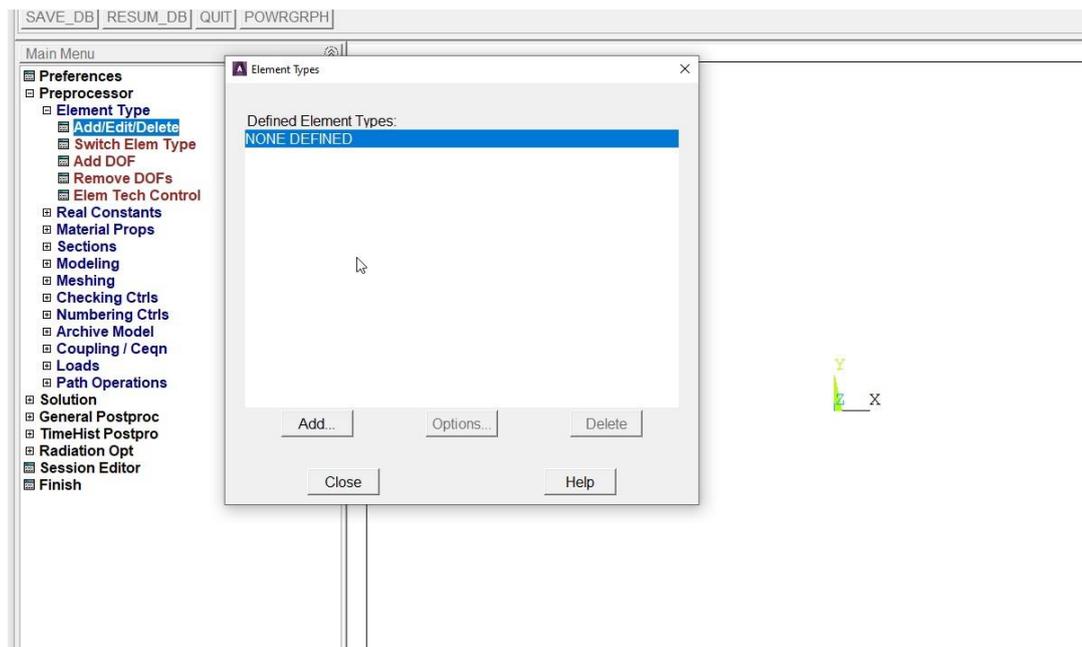


Рис.8. Окно *Element type*

В открывшемся окне в библиотеке элементов (*Library of element types*) выбираем *Solid – 20 node 186*.

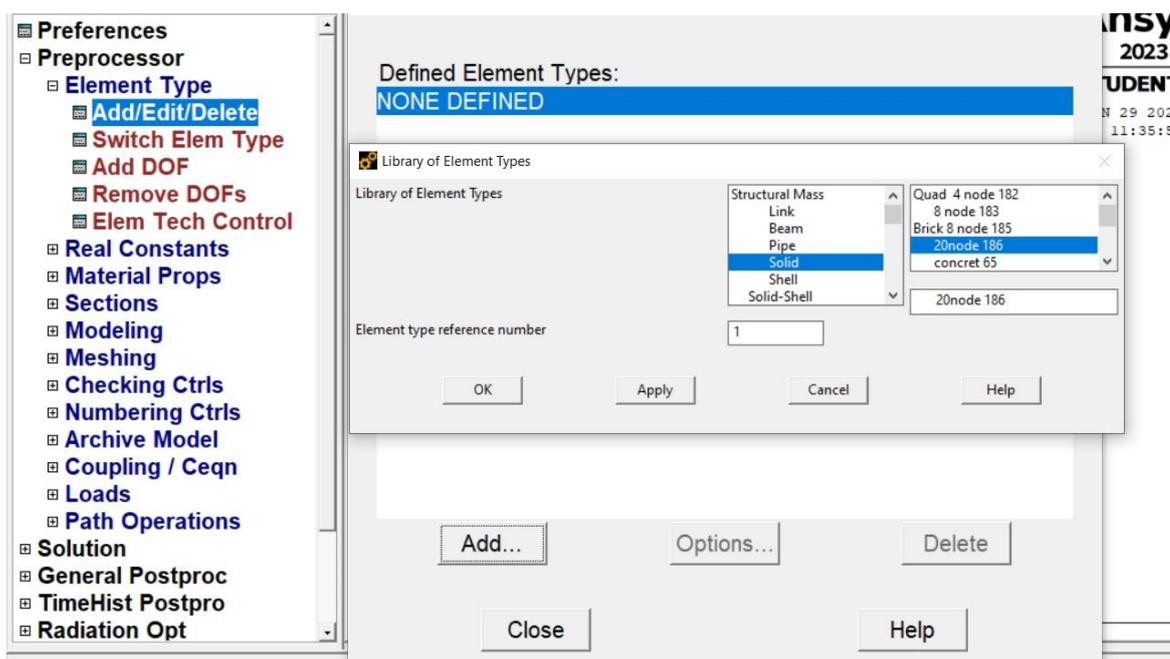


Рис.9. Окно *Library of Element type*. Конечный элемент типа *SOLID186*

Номер типа элемента (*element type reference number*) – 1, нажимаем ОК. Аналогично добавляем элемент *Constraint – Nonlinear MPC 184*, номер типа элемента (*element type reference number*) – 2.

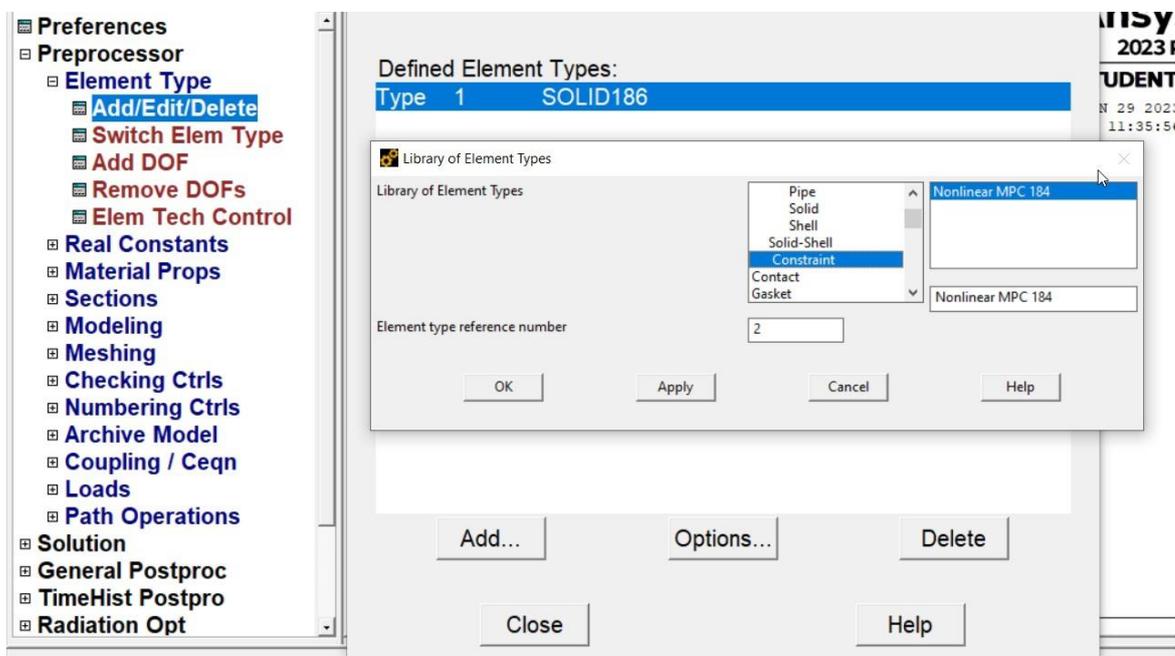


Рис.10. Окно *Library of Element type*. Конечный элемент типа *MPC184*

Далее в окне *Element type* выбираем *MPC184* и нажимаем кнопку *Options*. В открывшемся окне, в строке *Element behavior (K1)*, выбираем *Rigid Beam*. Нажимаем ОК.

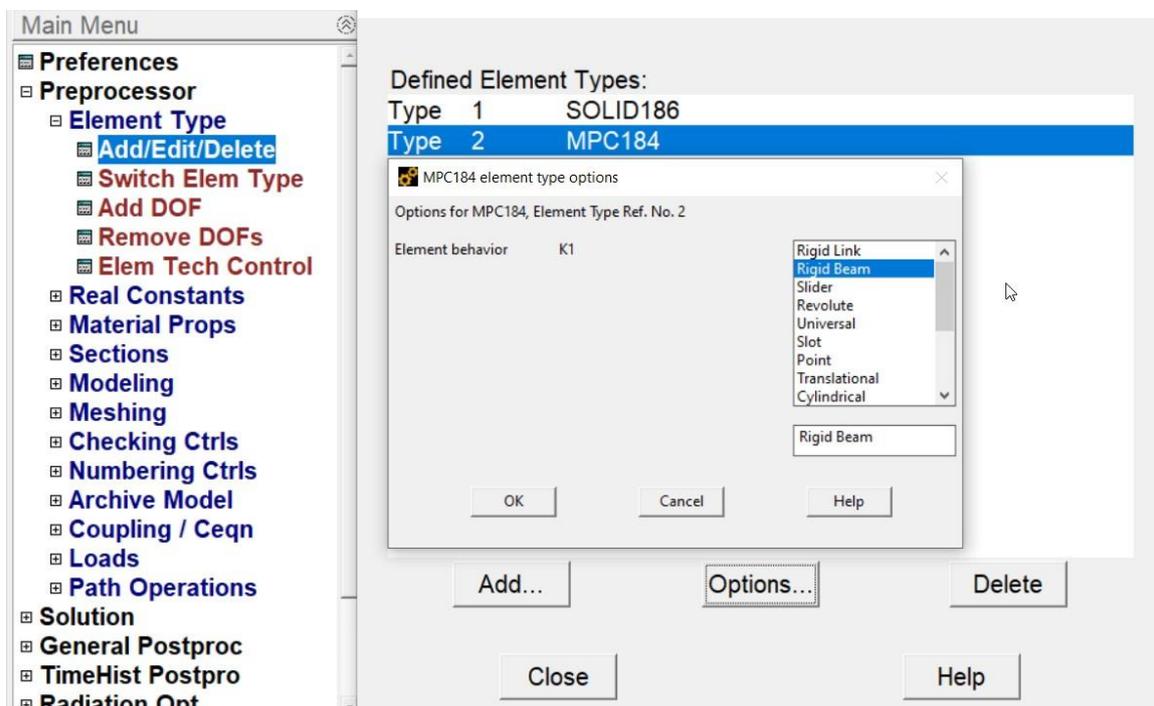


Рис.11. Настройка опций для КЭ типа MPC184. Шаг 1

В следующем окне оставляем *K2* без изменений.

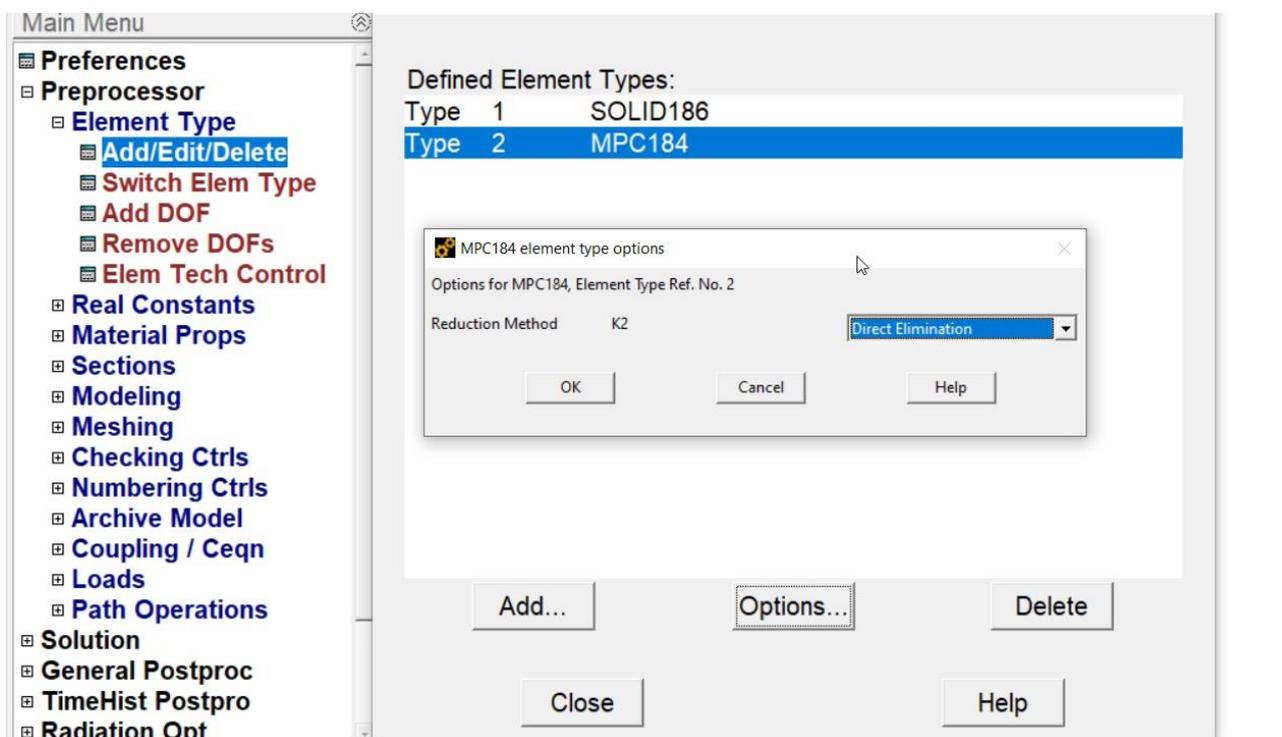


Рис.12. Настройка опций для КЭ типа MPC184. Шаг 2

Закрываем окно *Element type*.

В препроцессоре переходим в *Material Props > Material models*. В открывшемся окне выбираем: *Structural > Nonlinear > Inelastic > Rate independent > Isotropic Hardening Plasticity > Mises Plasticity > Bilinear*.

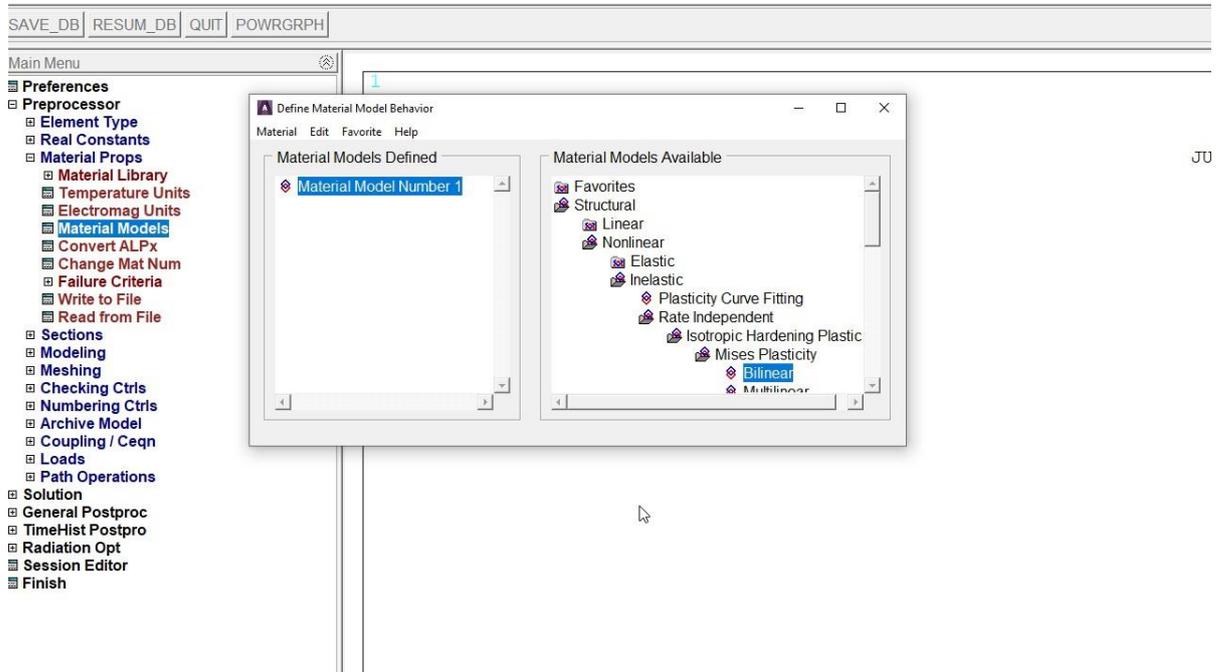


Рис.13. Задание характеристик материала. Шаг 1

В открывшемся предупреждении нажимаем ОК, далее в открывшемся окне задаем модуль упругости ($EX=2e11$) и коэффициент Пуассона ($PRXY=0.3$). Нажимаем ОК.

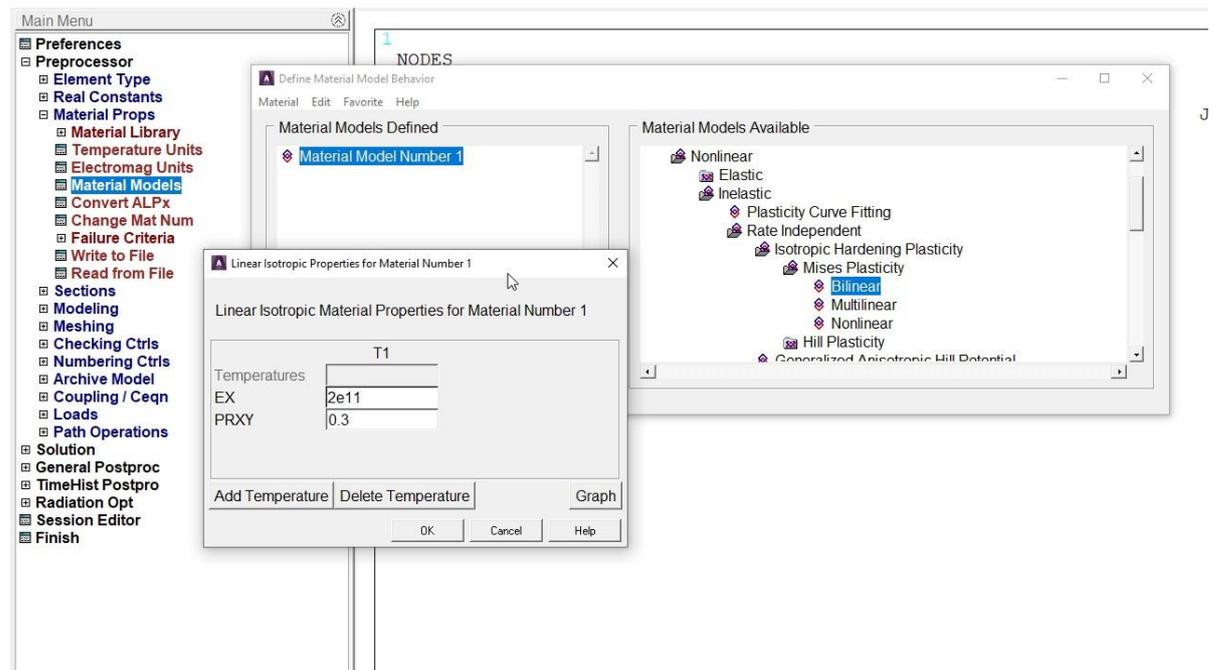


Рис.14. Задание характеристик материала. Шаг 2

Далее в открывшемся окне задаем предел пластичности по Мизесу ($Yield\ Stss=300e6$) и тангенциальный модуль ($Tang\ Mode=0$). Нажимаем ОК.

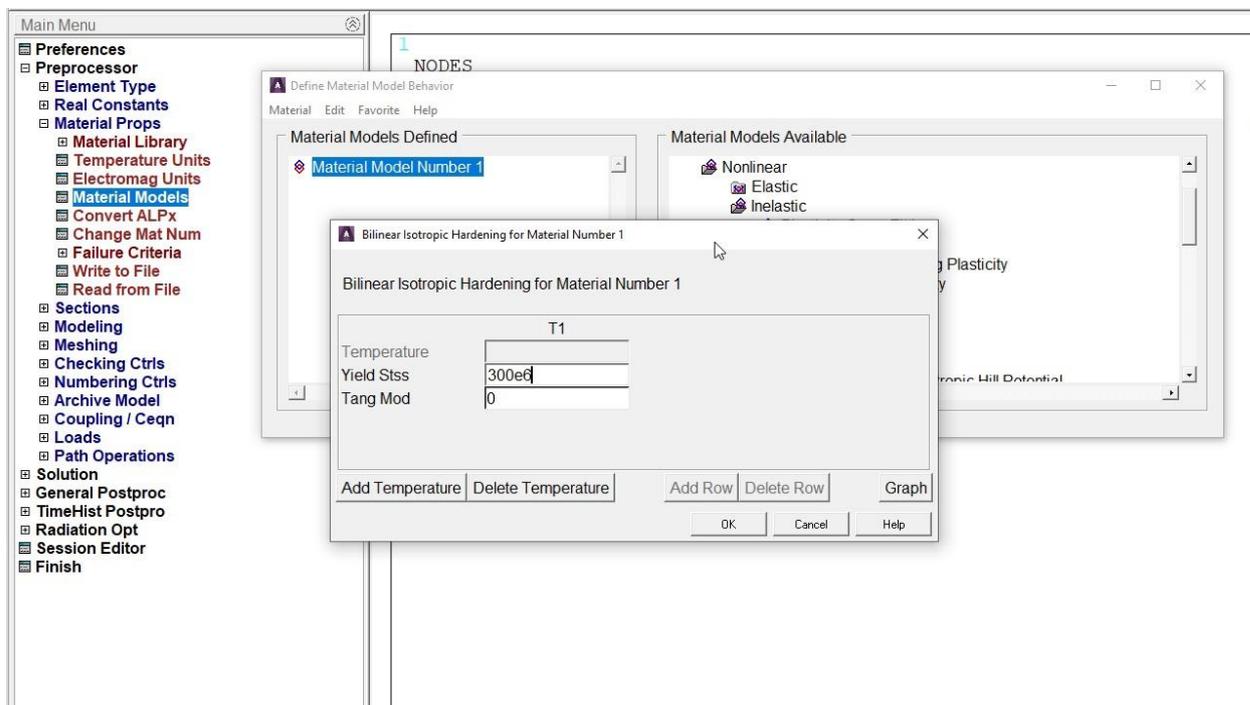


Рис.15. Задание характеристик материала. Шаг 3

Задание геометрии

Создаем четверть цилиндра (удобнее для разбивки сетки). Для этого переходим в *Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > By dimensions*. В открывшемся окне прописываем параметры:

- $RAD1 - 1$
- $RAD2 - 0$
- $Z1, Z2 - 0, 6$
- $Theta1 - 0$
- $Theta2 - 90$

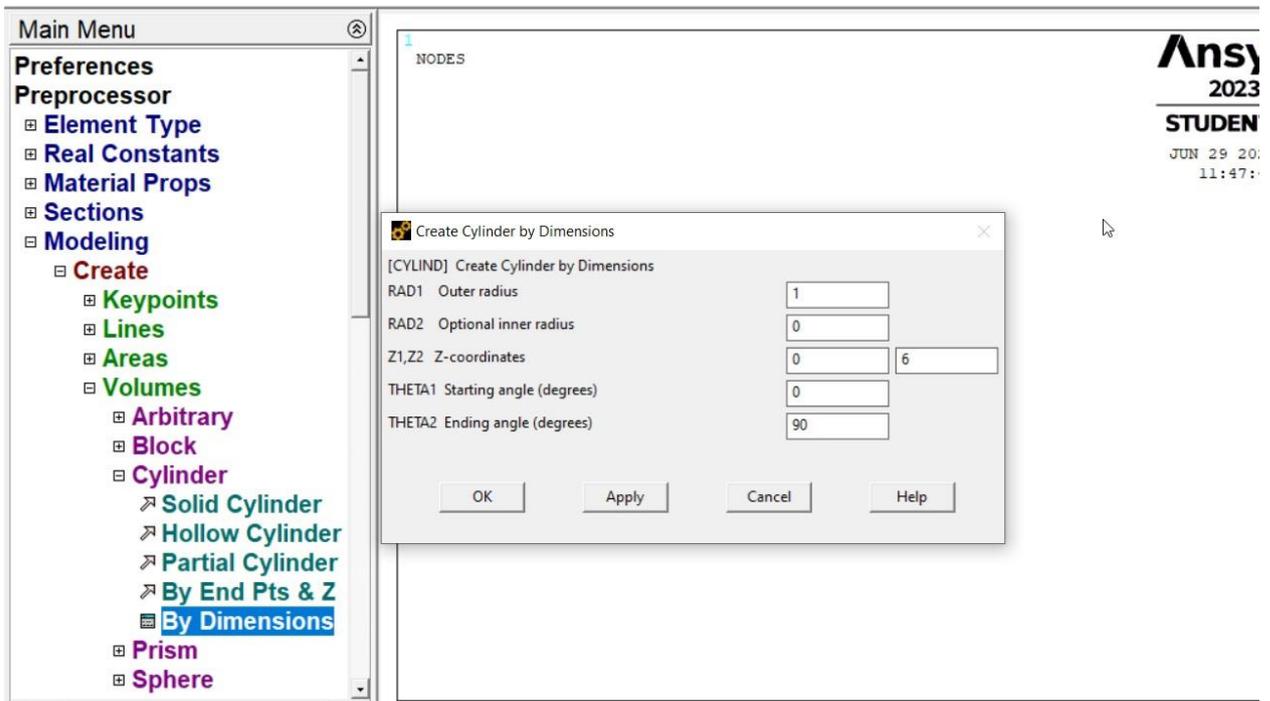


Рис.16. Создание геометрической модели.

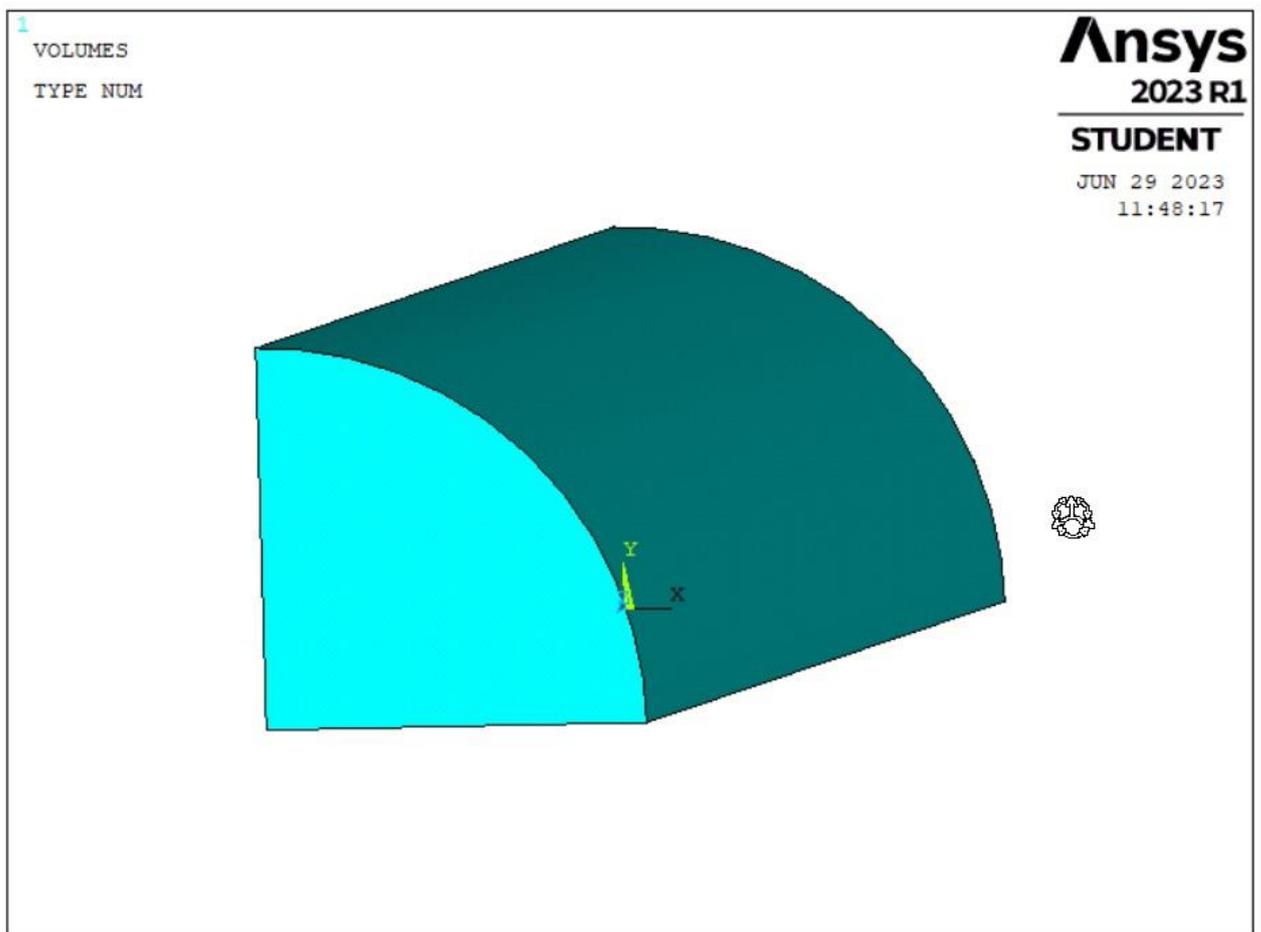


Рис.17. Геометрическая модель (1/4).

Разбивка сетки

На первом шаге разбиваем сетку объемными элементами, для этого переходим в *Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs*. Далее, в открывшемся окне, в строке *Type*, выбираем 1 тип элемента (*Solid 186*). Нажимаем ОК.

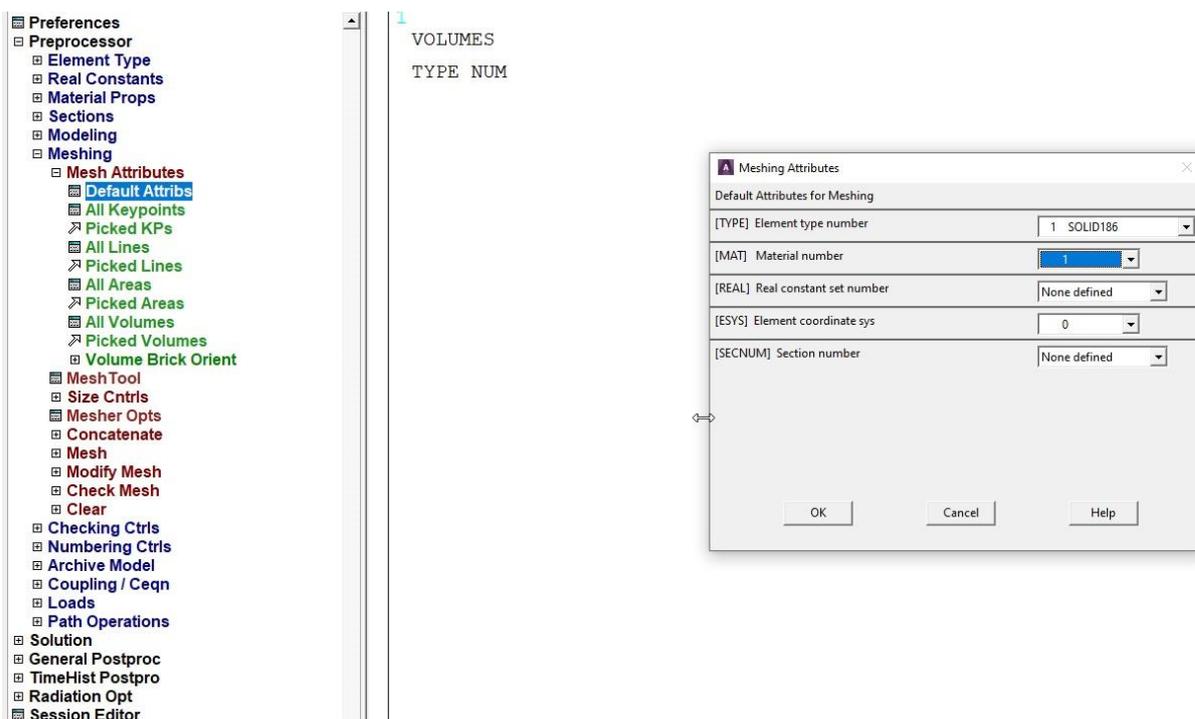


Рис.18. Назначение атрибутов.

На следующем шаге задаем размер элементов. Для этого переходим в *Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manualsize > Global > Size*, в открывшемся окне в строке *Size* пишем 0.25. Нажимаем ОК.

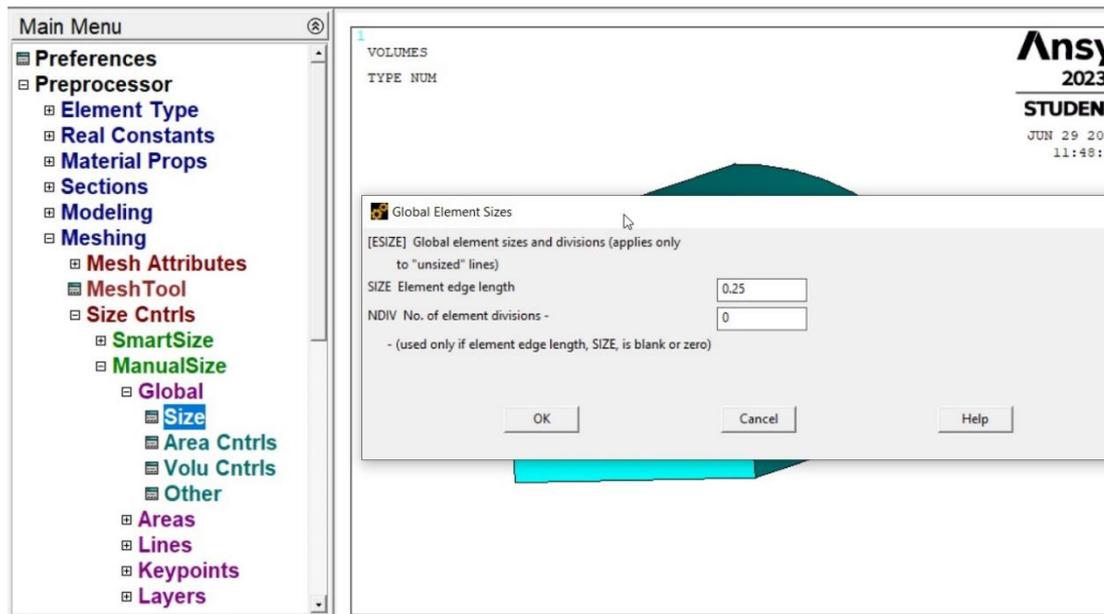


Рис.19. Назначение размера конечных элементов.

Далее выбираем необходимые линии по длине, для этого прописываем команду: `LSEL,S,LOC,Z,H/2`

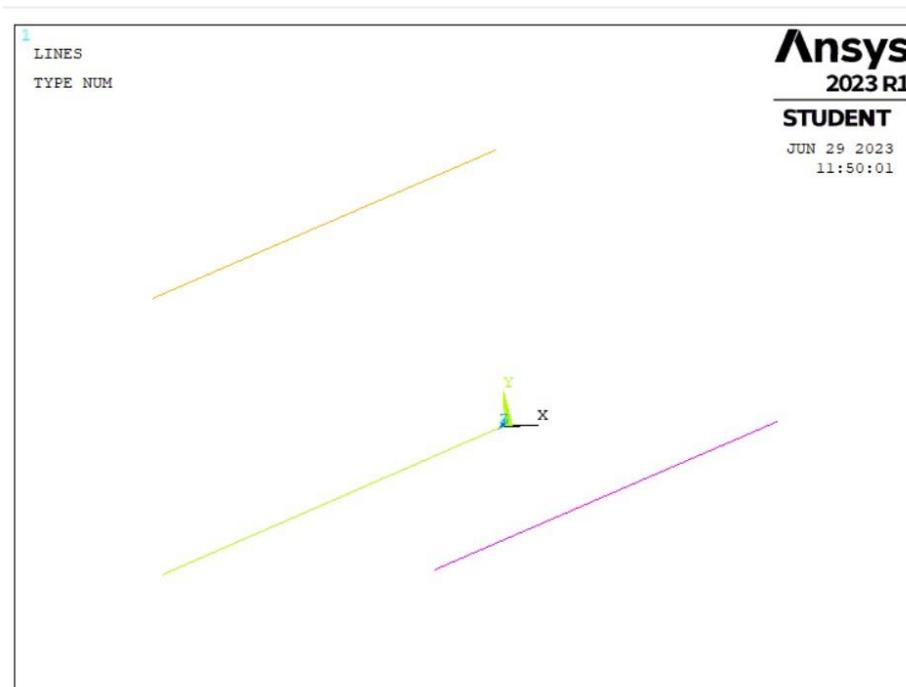


Рис.20. Выбор линий для назначения размер КЭ.

Далее задаем количество элементов по выбранным линиям, для этого переходим в *Preprocessor* > *Meshing* > *Size Cntrls* > *Manualsize* > *Lines* > *All lines*, в открывшемся окне в строке *Ndiv* пишем 20. Нажимаем ОК.

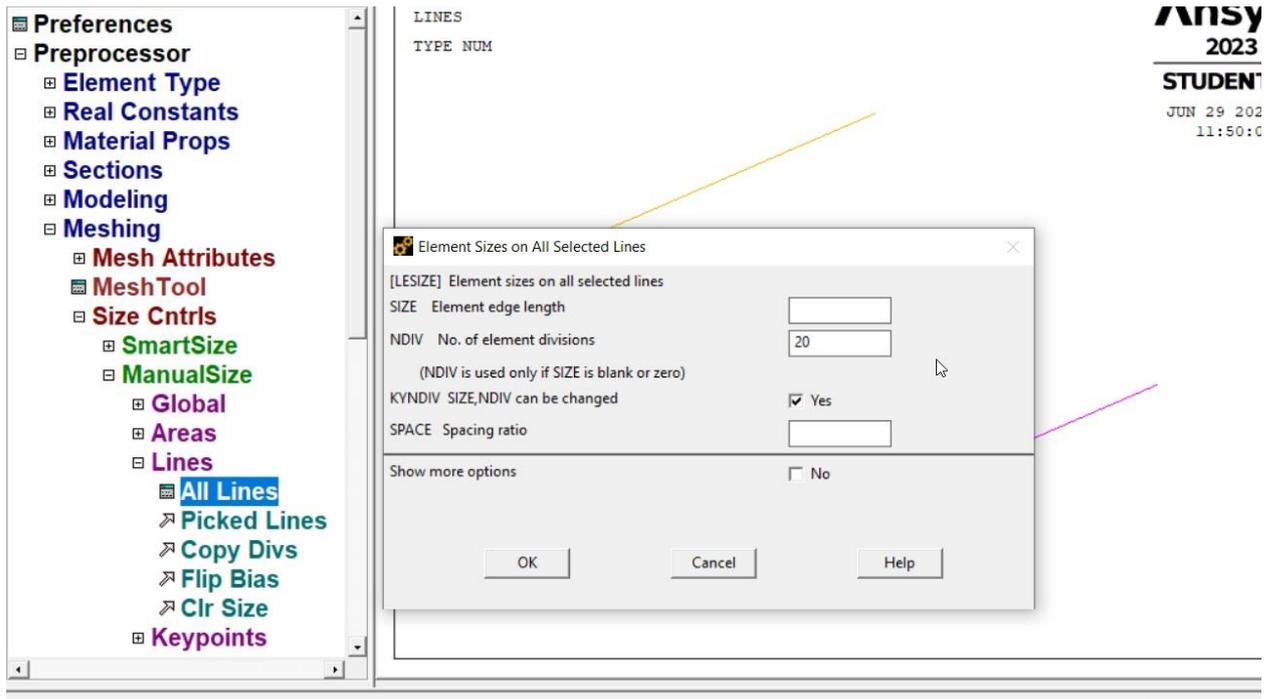


Рис.21. Назначение количества конечных элементов по линии.

Разбиваем объем заданными элементами. Для этого переходим в *Preprocessor > Meshing > Mesh > Volumes > Mapped > 4 to 6 sided*, в открывшемся окне нажимаем *Pick all*.

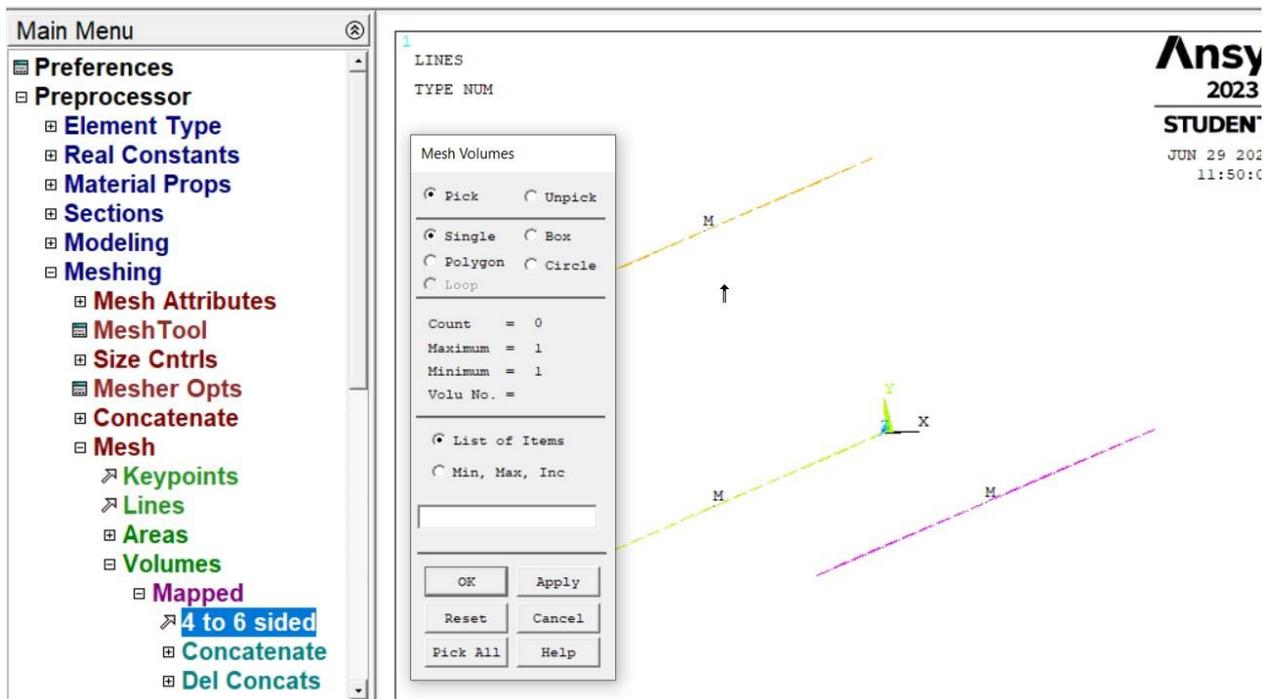


Рис.22. Отображение разметки будущей КЭ-сетки.

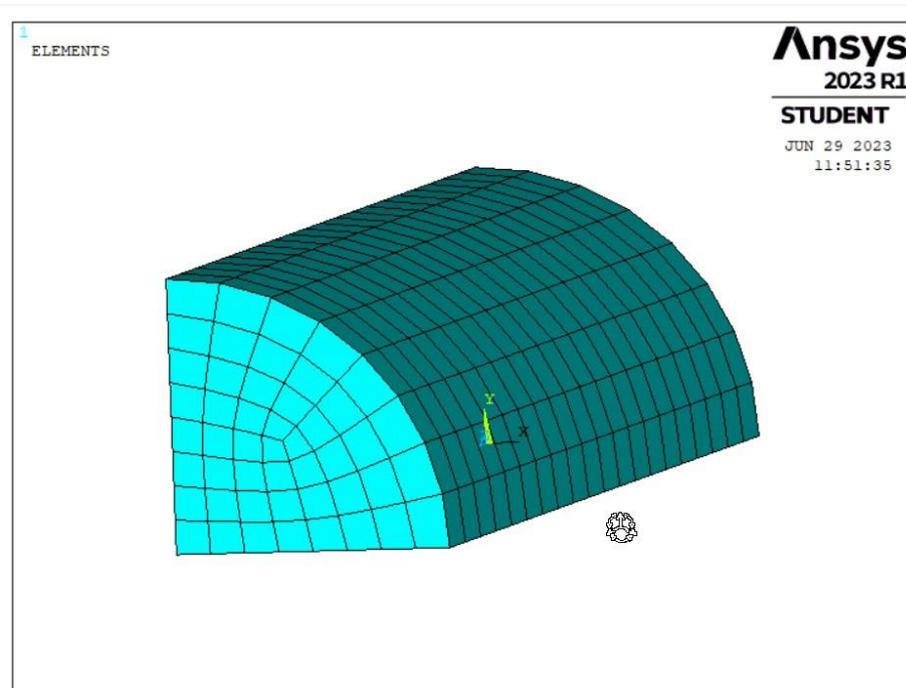


Рис.23. КЭ-модель.

Далее необходимо симметрично копировать нашу модель по X и Y. Для этого переходим в *Preprocessor > Modeling > Reflect > Volumes*, в открывшемся окне нажимаем *Pick all*. В следующем окне выбираем *Y-Z plane (X)* и нажимаем ОК. Аналогично копируем по *X-Z plane (Y)*.

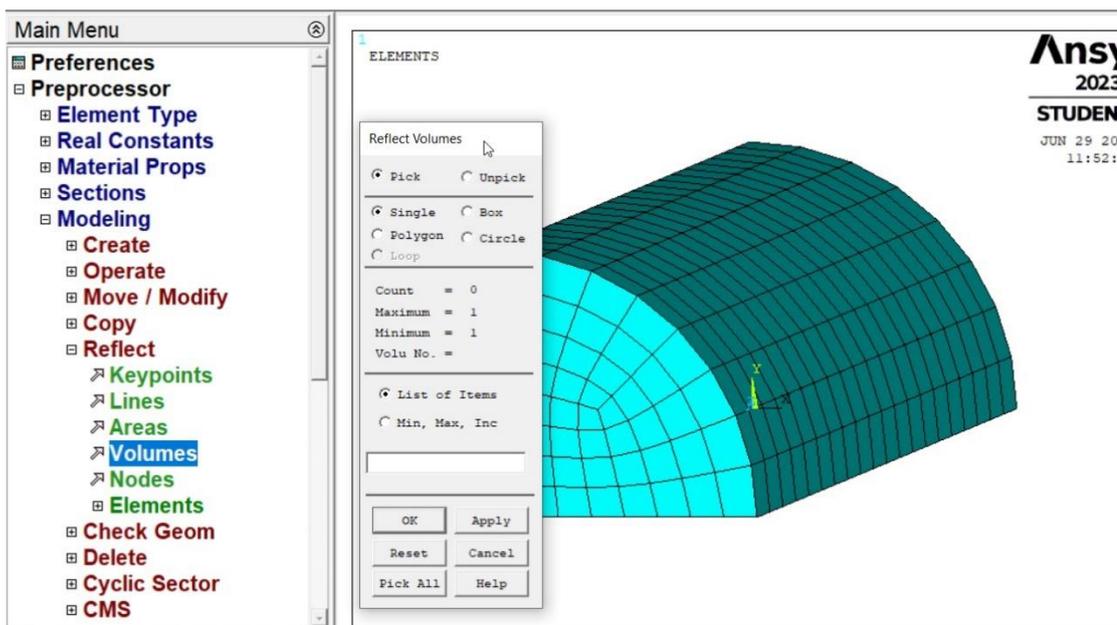


Рис.24. Выбор объема для «отзеркаливания»

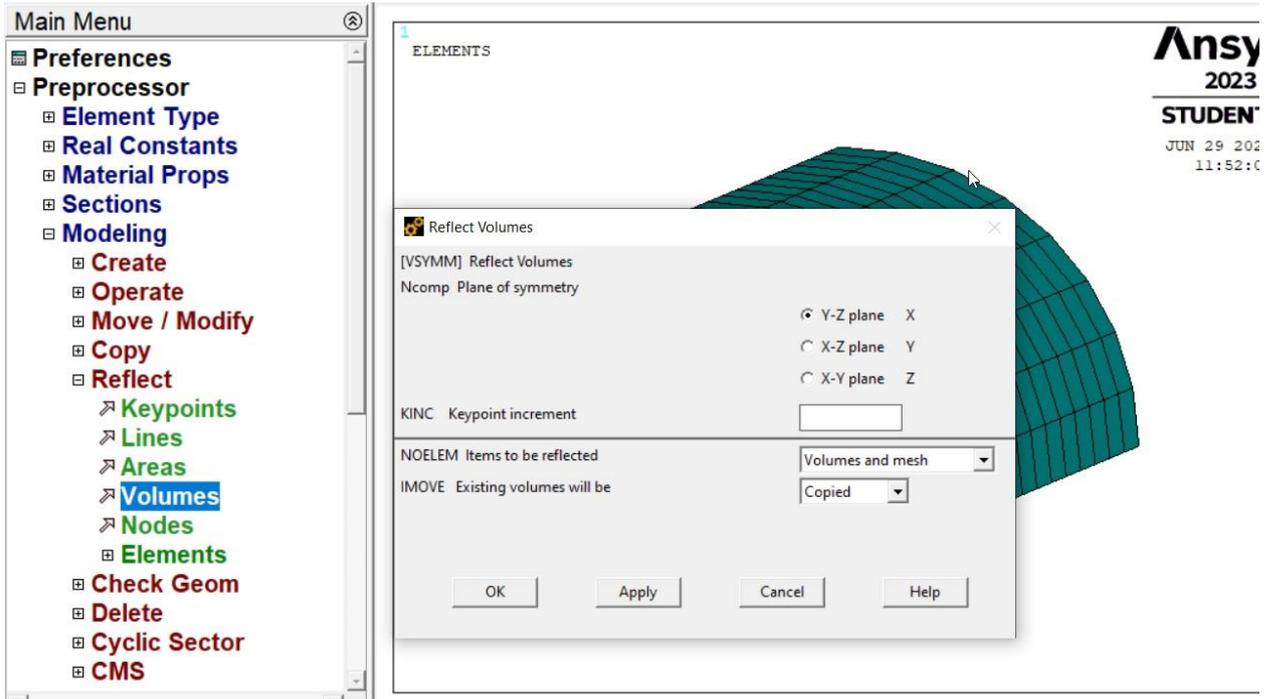


Рис.25. Настройки параметров для «отзеркаливания». Шаг 1

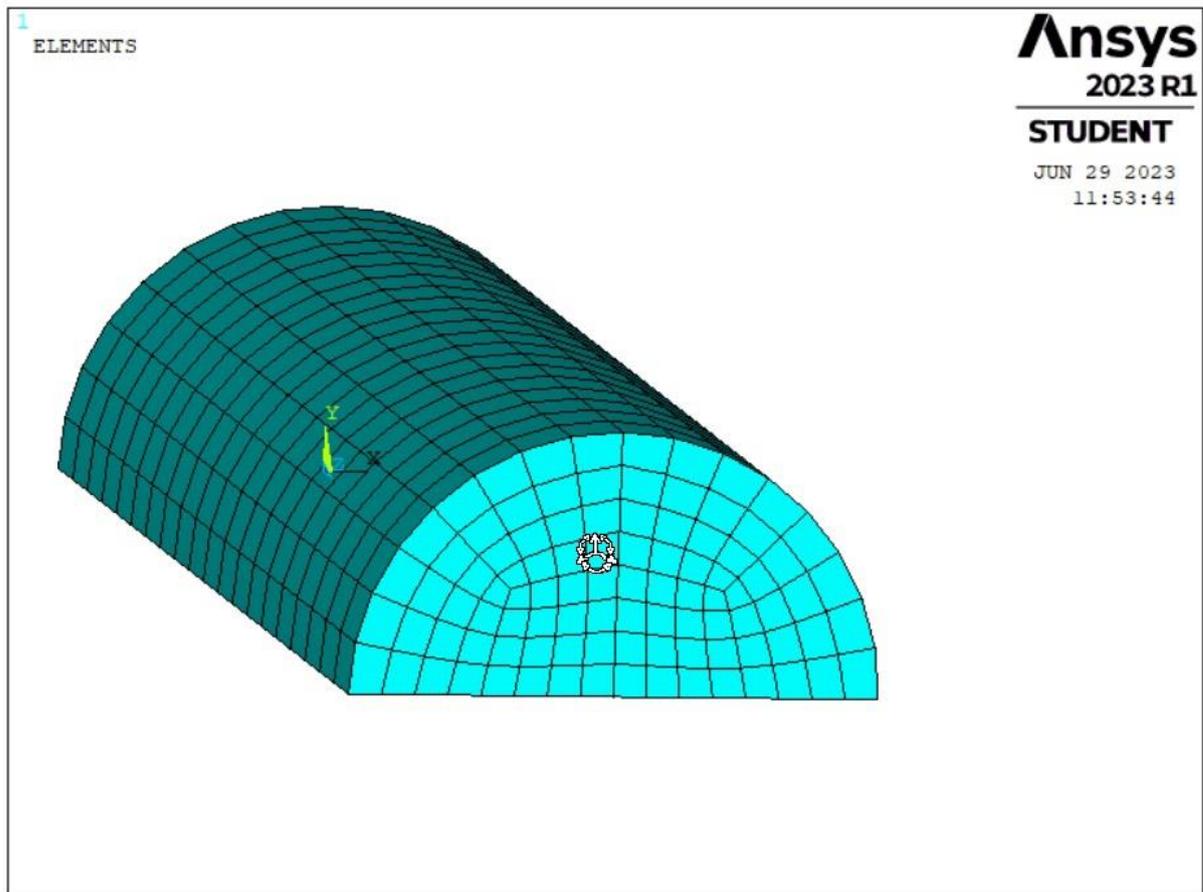


Рис.26. Результат операции «отзеркаливания». Шаг 1.

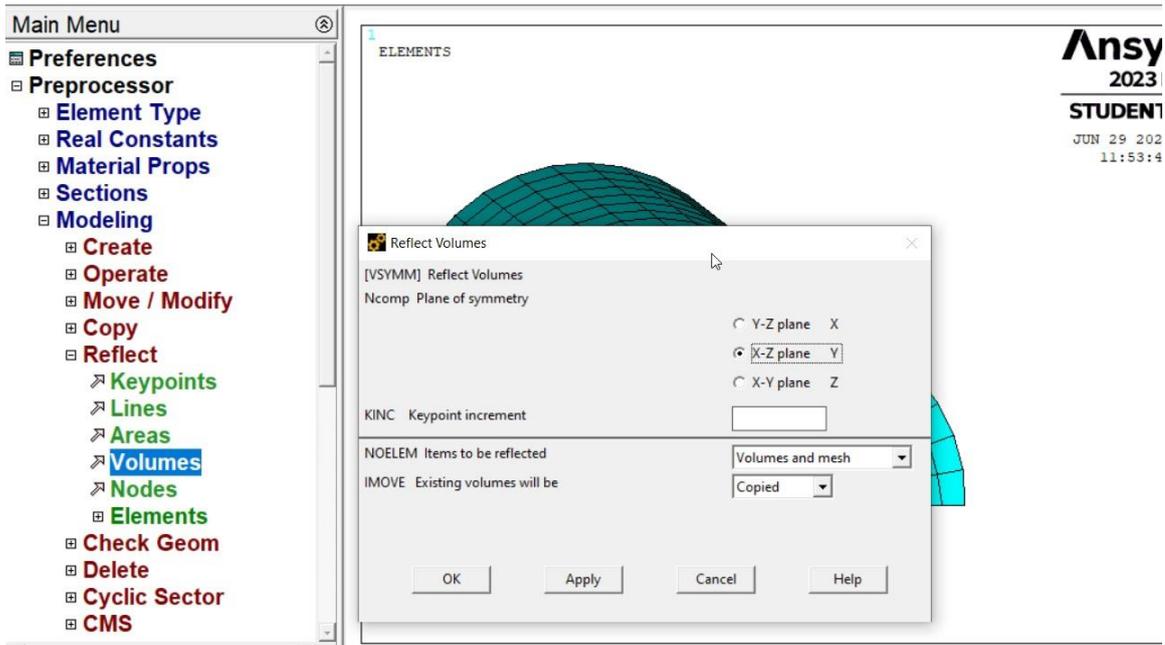


Рис.27. Настройки параметров для «отзеркаливания». Шаг 2.

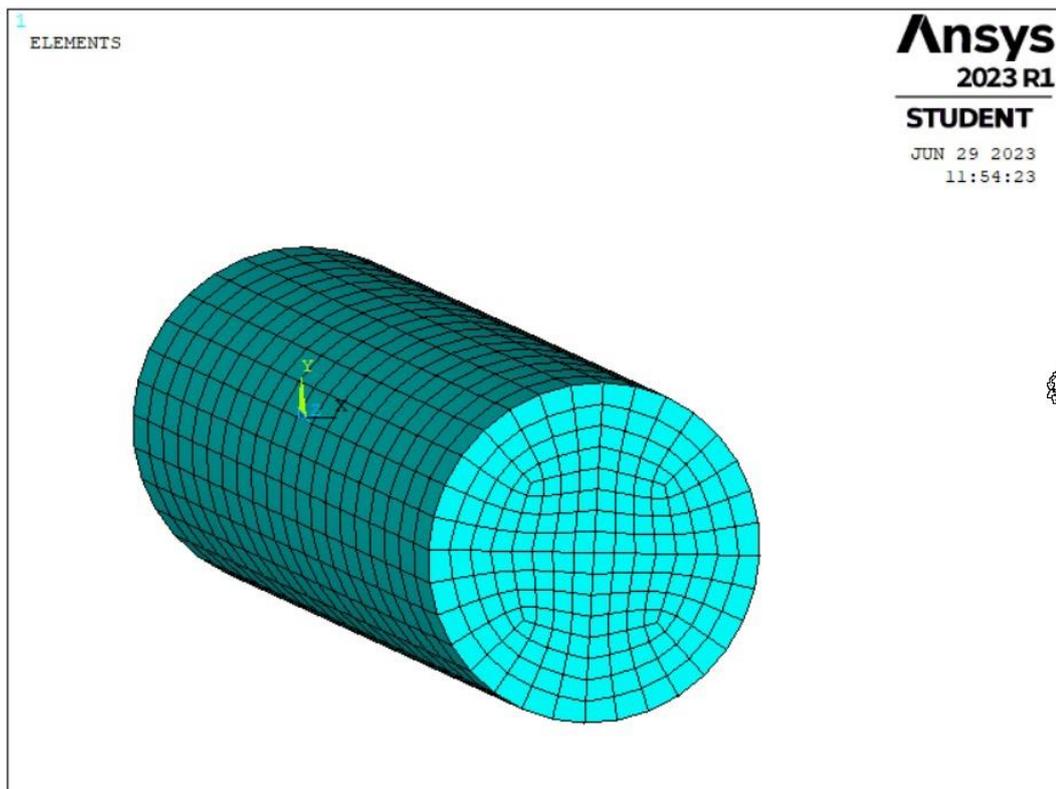


Рис.28. Итоговая КЭ-модель.

Теперь необходимо объединить модель в единое целое. Для этого переходим в *Preprocessor* > *Numbering Ctrl*s > *Merge items*, в открывшемся окне в строке *Label* выбираем *All* и нажимаем ОК.

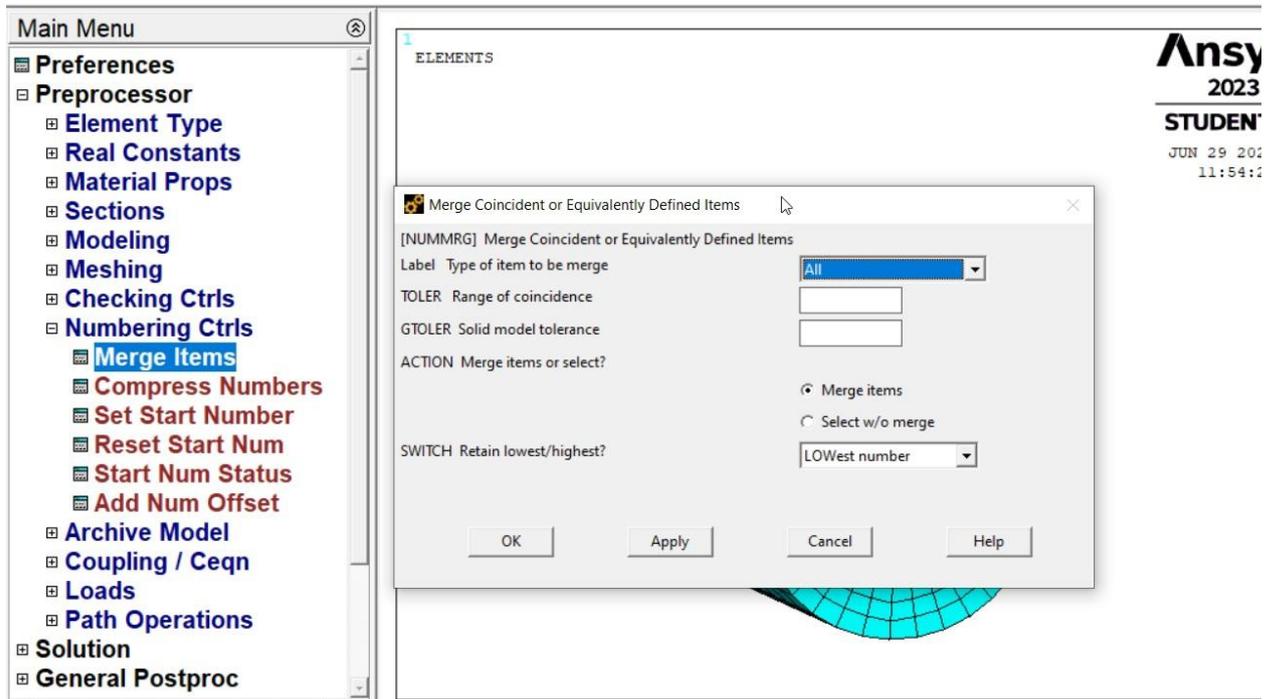


Рис.29. Настройки параметров «склейки» модели.

Далее необходимо задать связи между узлами крайнего сечения с помощью *MPC184*. Для этого сначала выберем эти узлы с помощью команды:

`NSEL,S,LOC,Z,H`

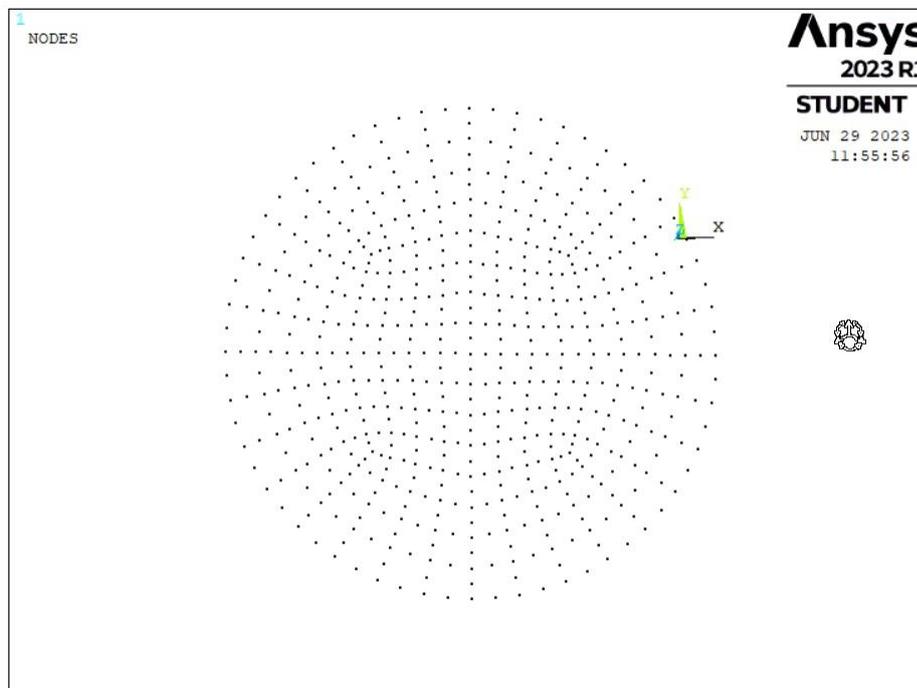


Рис.30. Выбор узлов в торцевом сечении.

Для создания элемента *MPC184* необходимо осуществить это с помощью цикла (ввиду большого количества точек), для чего понадобится получить некоторые величины с помощью серии команд **GET*.

Нам понадобится:

- NALL – количество точек в сечении
- NMIN – минимальный номер точки в сечении
- LAST – наибольший номер в сечении (пригодится для создания точки в которую прикладывается момент, затем с ней свяжем все остальные)

Команда находится по следующему пути: Utility Menu > Parameters > Get scalar data.

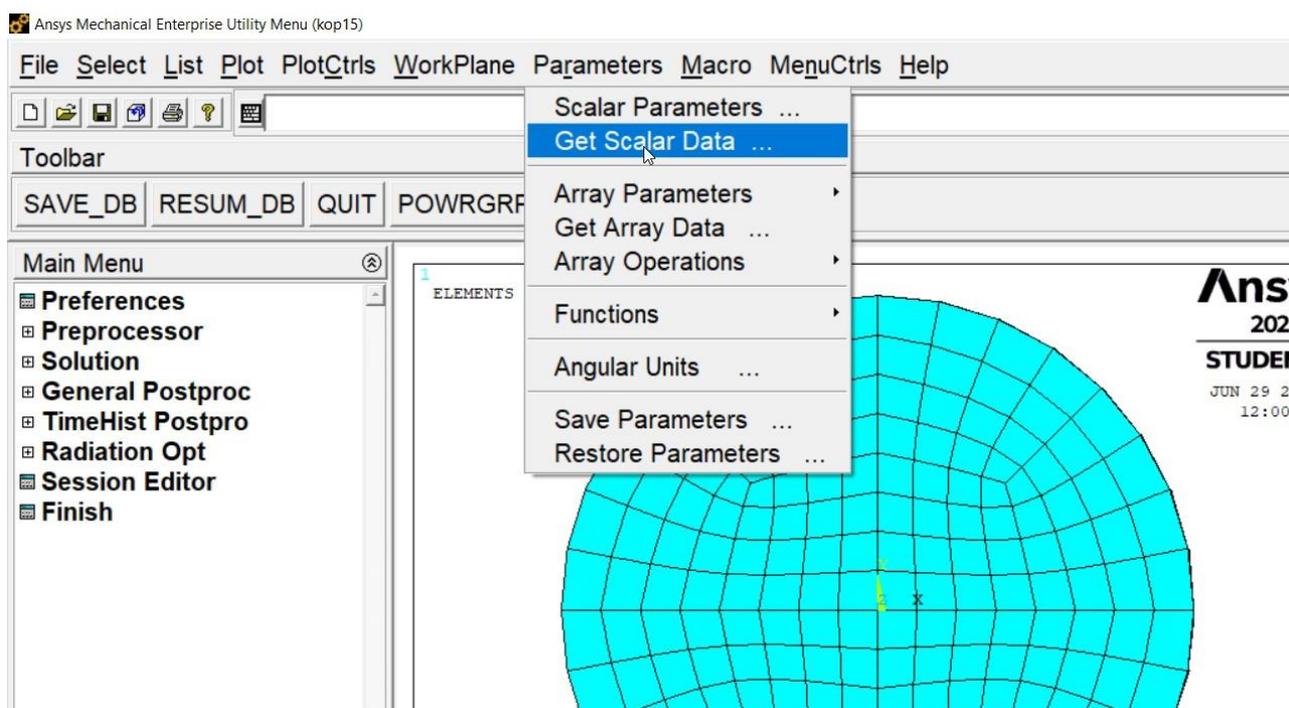


Рис.31. Команда для запроса значения скалярного параметра.

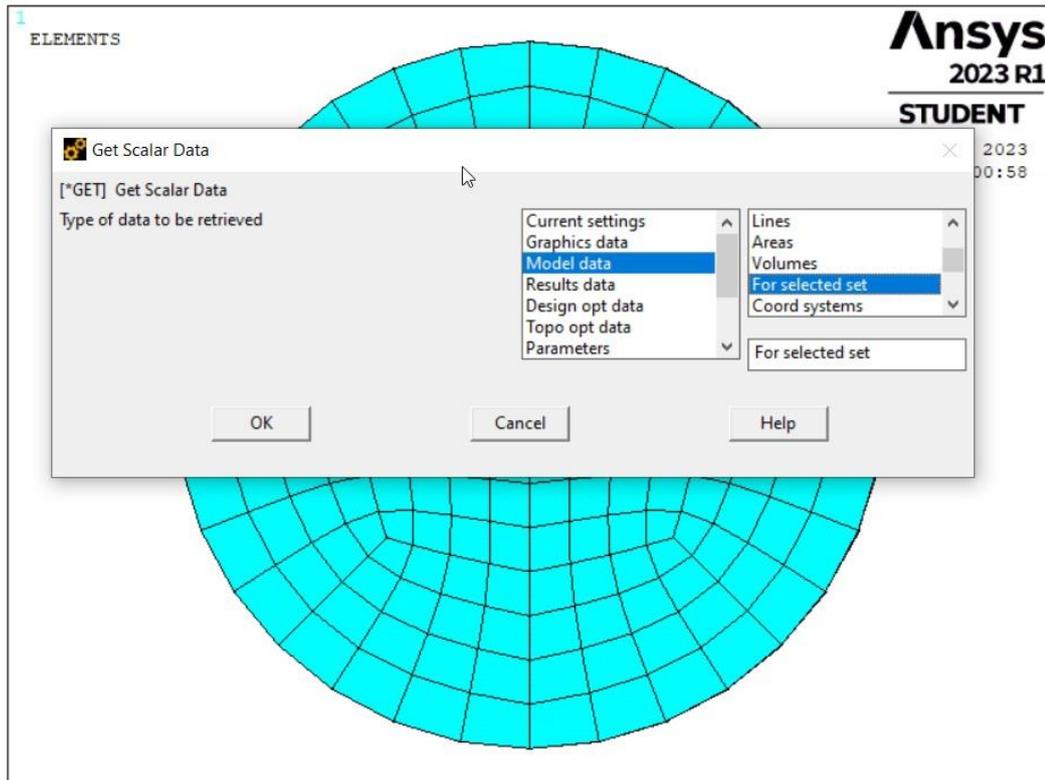


Рис.32. Выбор запрашиваемого параметра.

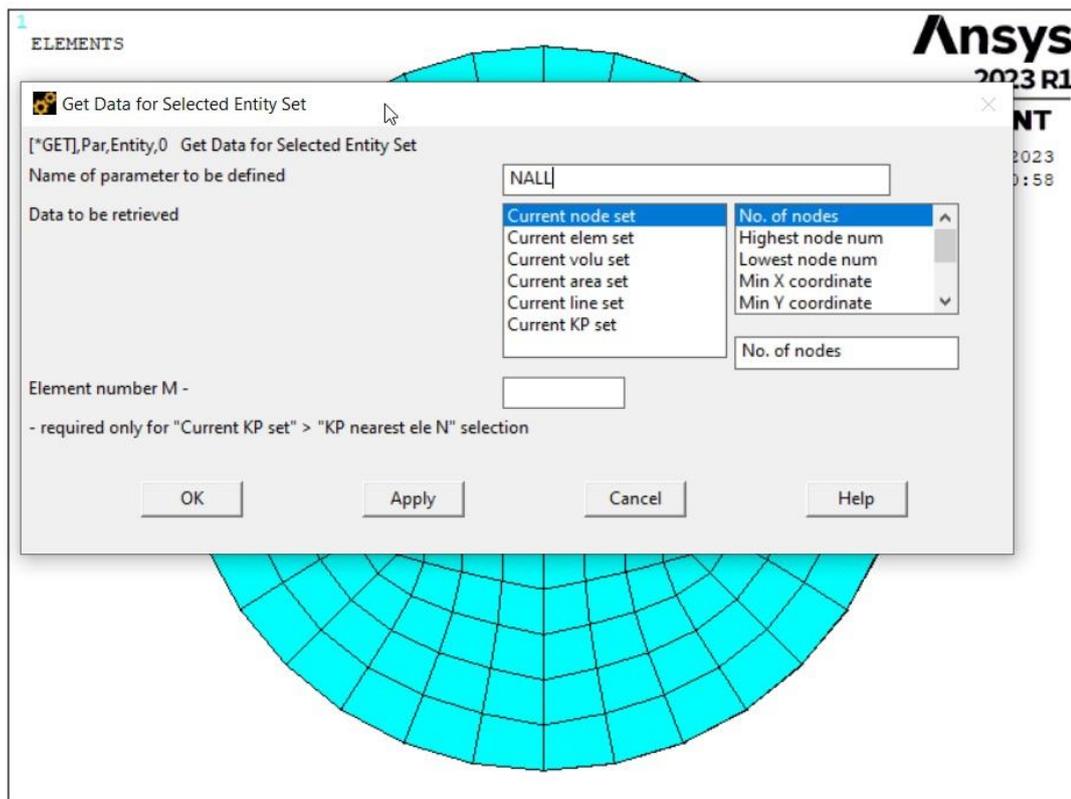


Рис.33. Задание наименования переменной для записи значения.

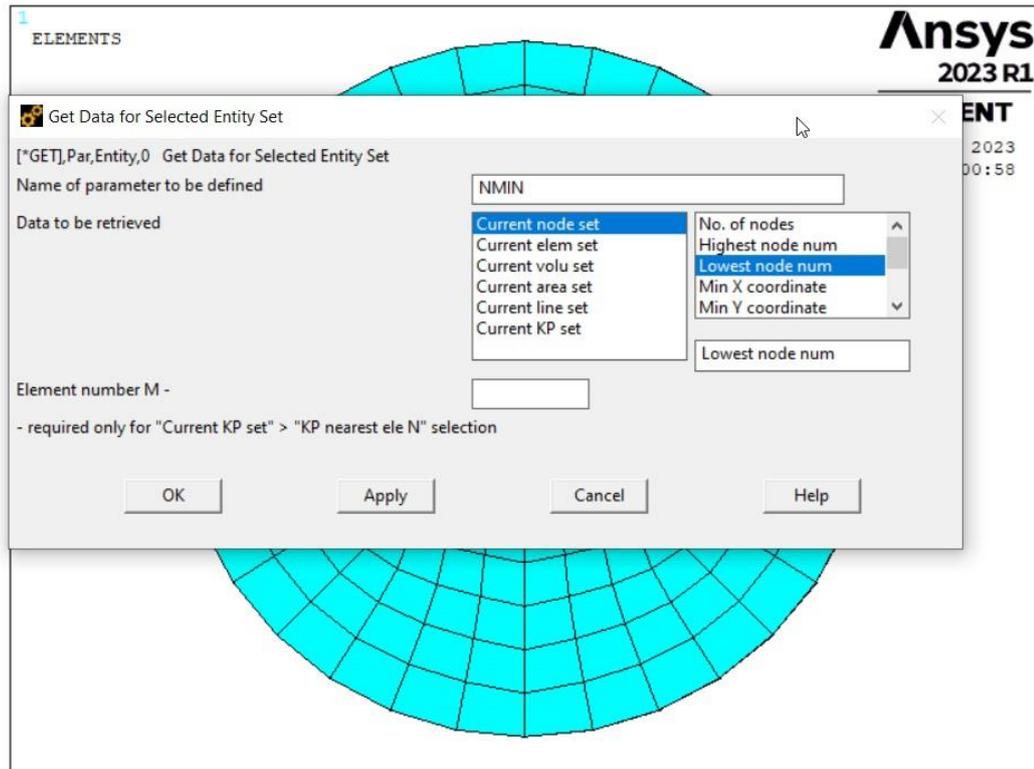


Рис.34. Выбор запрашиваемого параметра.

Перед выбором переменной LAST необходимо прописать команду ALLSEL.

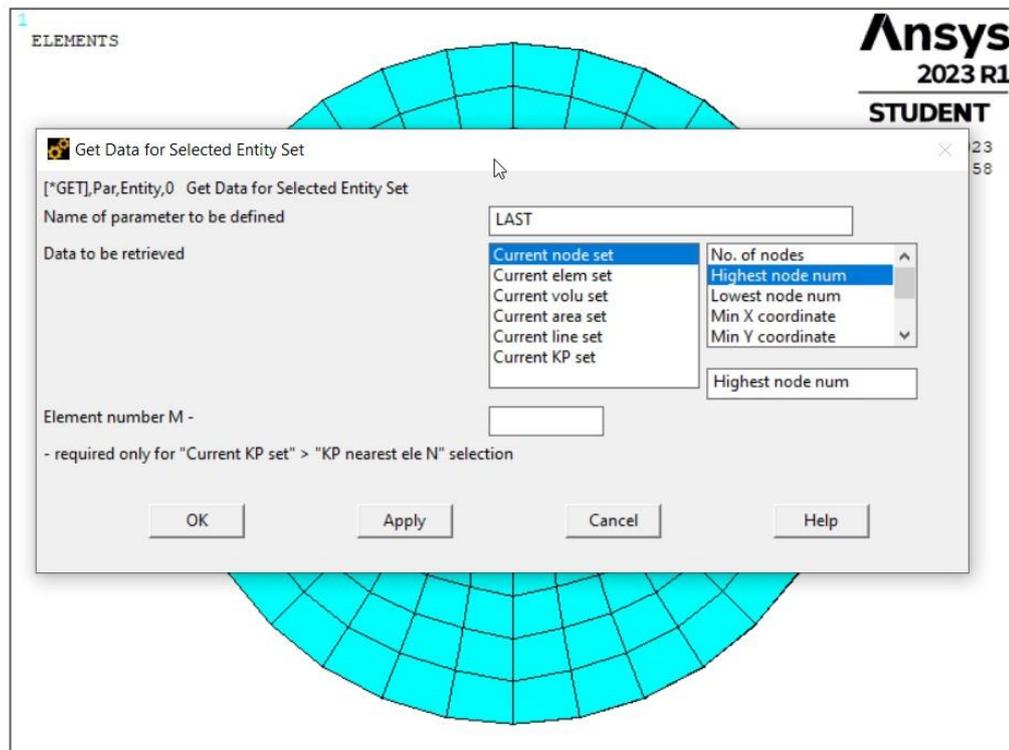


Рис.35. Задание наименования переменной для записи значения..

Далее создаем узел с номером следующим после максимального для приложения к нему момента: Preprocessor > Modeling > Create > Nodes > In Active CS. В поле Node Number пишем LAST+1, и задаем координаты 0, 0, 6.

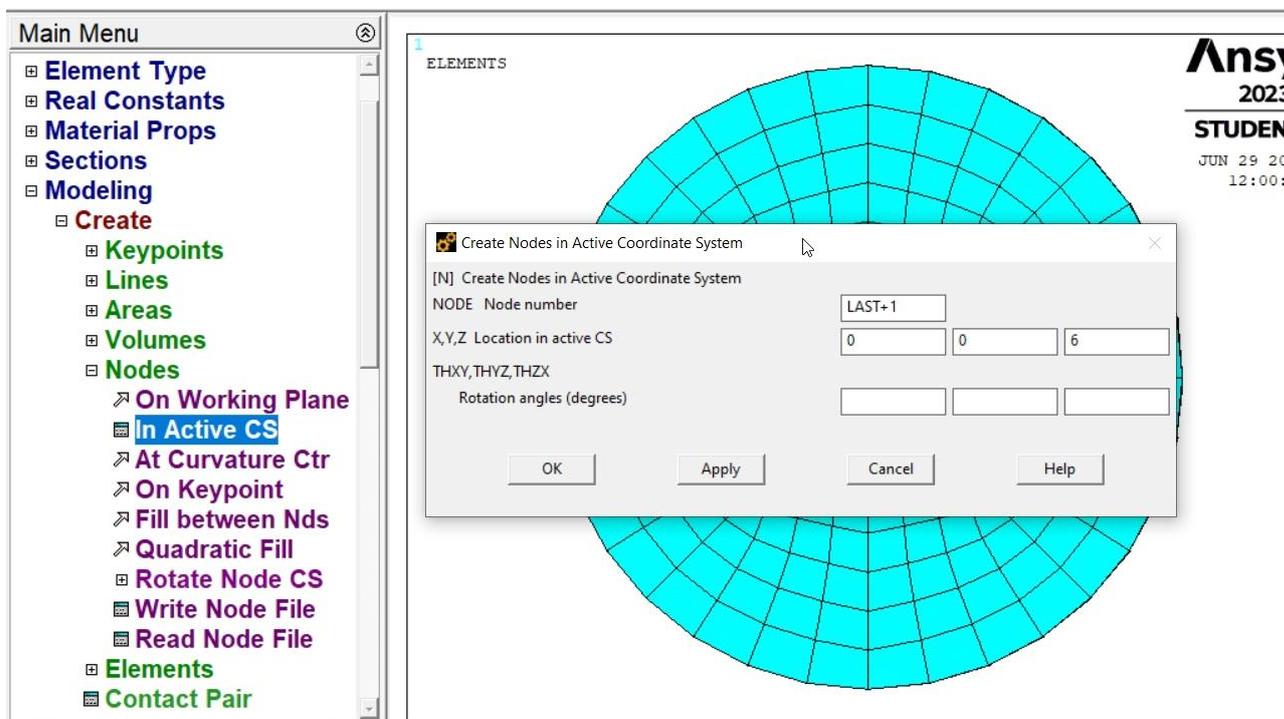


Рис.36. Задание узла.

После этого необходимо еще раз обновить переменную LAST, воспользовавшись командой *GET как описано выше.

Для контроля правильности выполнения команд можно перейти на вкладку Utility menu > Parameters > Scalar parameters

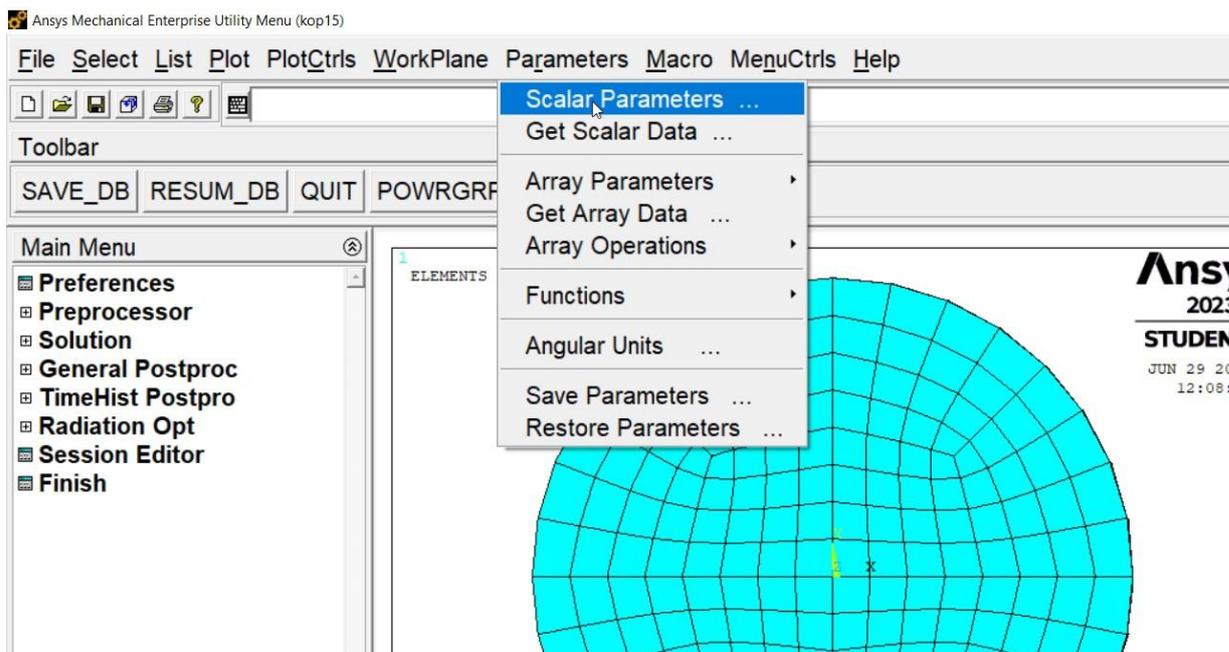


Рис.37. Контроль правильности задания параметров. Шаг 1

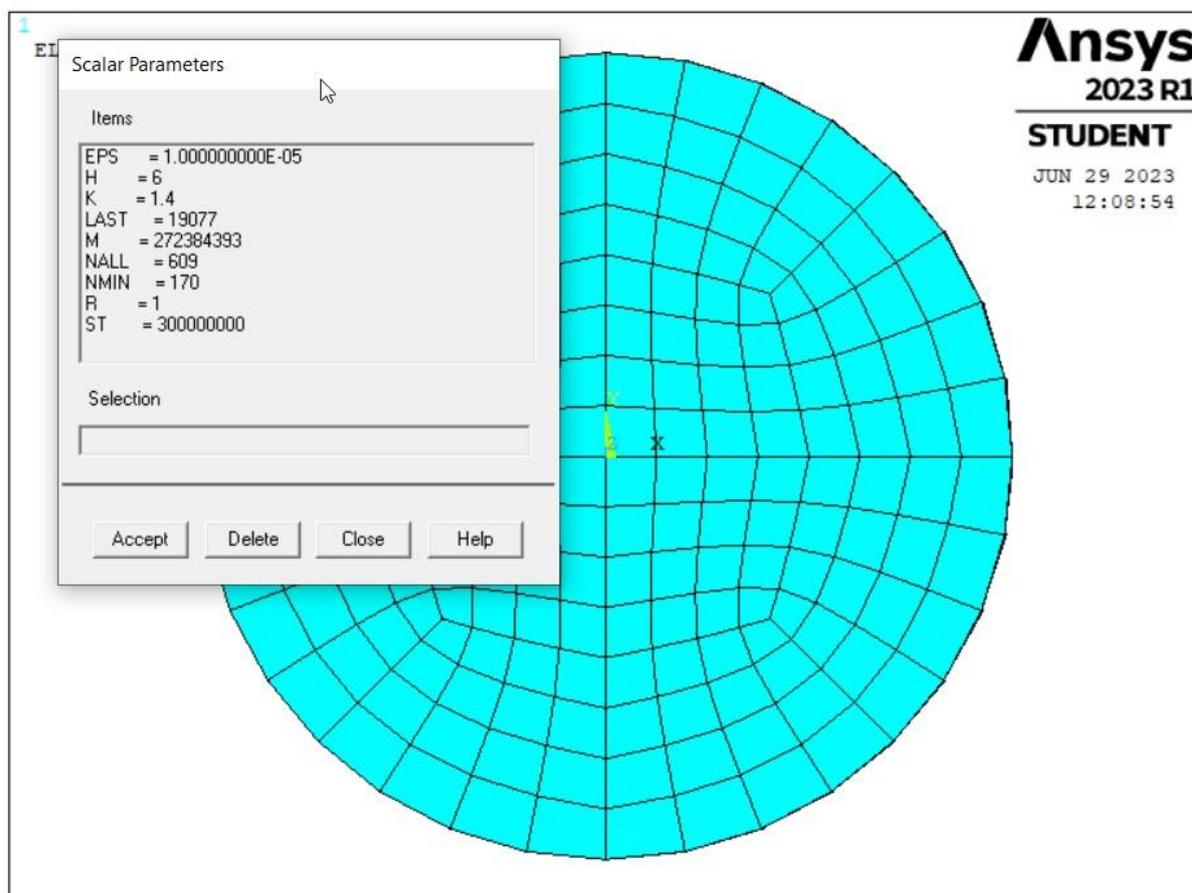


Рис.38. Контроль правильности задания параметров. Шаг 2

Далее выбираем второй тип элемента *MPC184*: Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attrs

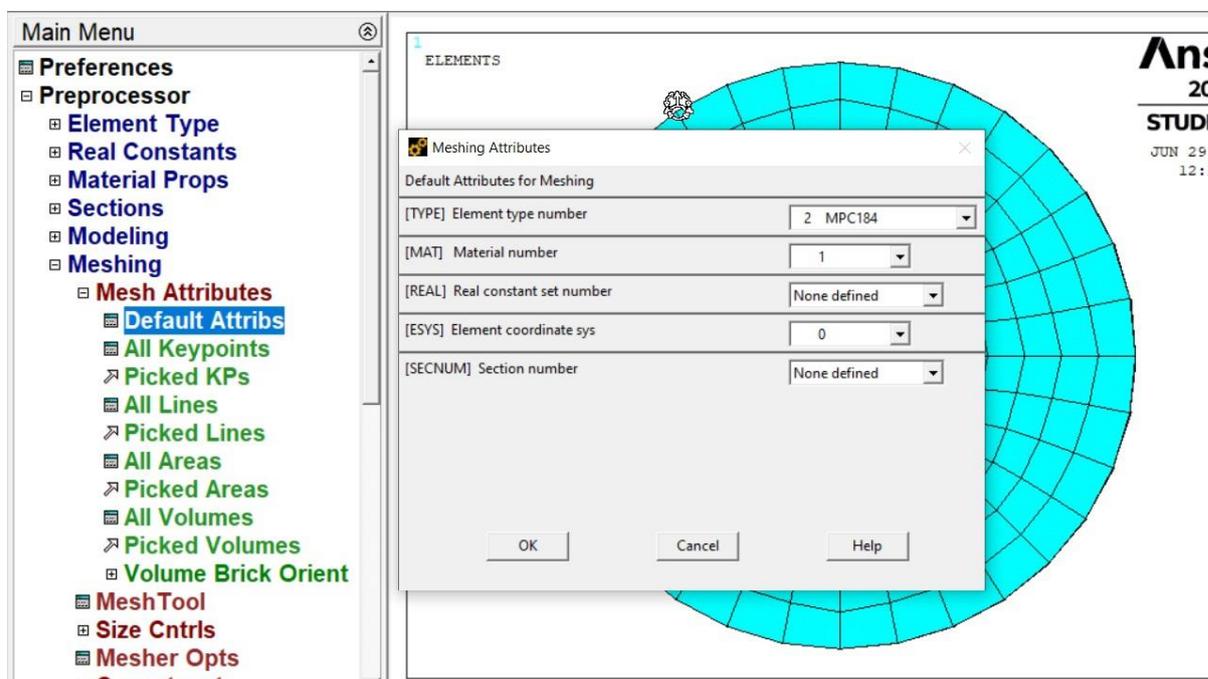


Рис.39. Задание атрибутов.

Снова выбираем точки сечения командой:

```
NSEL,S,LOC,Z,H
```

Далее соединяем последнюю точку с минимальной командой:

```
E,LAST,NMIN
```

И создаем вспомогательную переменную для цикла:

```
NEXT=NMIN
```

Далее с помощью приведенного ниже цикла назначаем все узлам *MPC184*:

```
*DO,I,0,(NALL-2)
```

```
*GET,NEXT,NODE,NEXT,NXTH
```

```
E,LAST,NEXT
```

```
*ENDDO
```

После цикла необходимо написать команду *ALLSEL*

Создание закреплений

Выбираем сечение для закрепления: NSEL,S,LOC,Z,0

Затем закрепляем все узлы по всем степеням свободы. Для этого переходим в *Preprocessor > Loads > Define loads > Apply > Structural > Displacement > On nodes*, в открывшемся окне нажимаем *PICK ALL*, в поле *LAB2* выбираем *ALL DOF*.

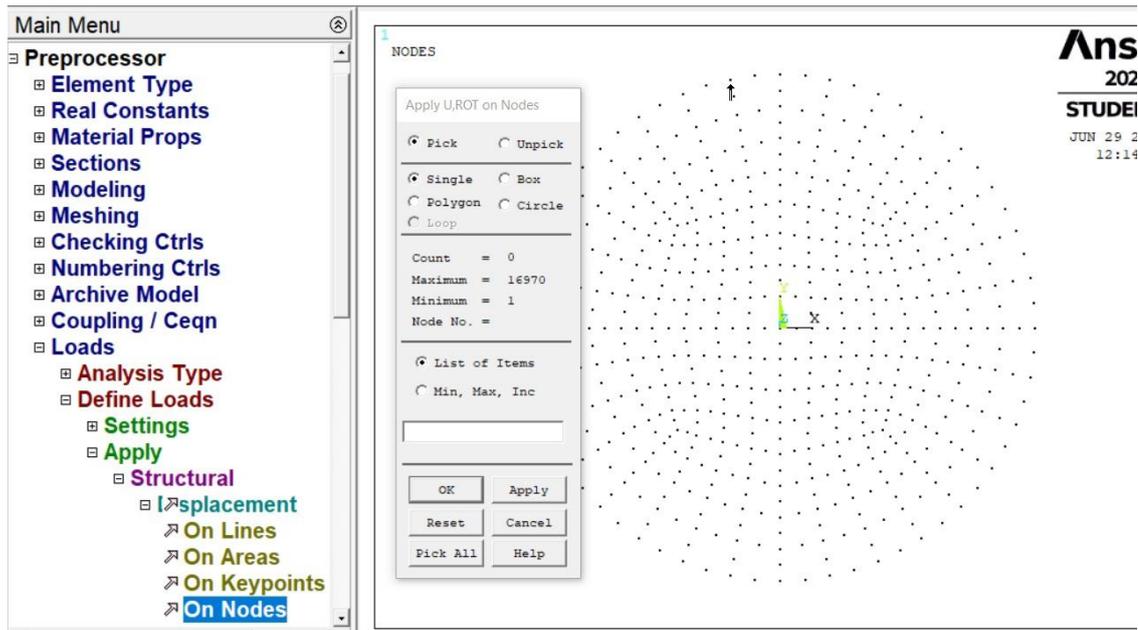


Рис.40. Выбор узлов для задания граничных условий

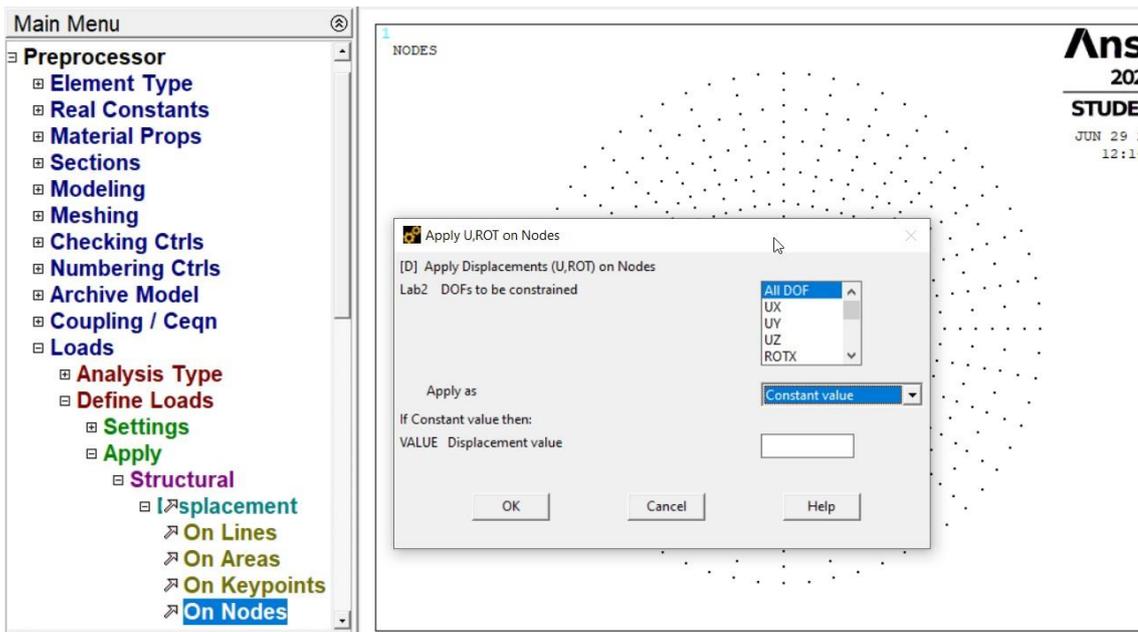


Рис.41. Задание граничных условий

Создание загрузений

Задаем сосредоточенный момент в виде созданной в начале таблицы. Переходим в *Preprocessor* > *Loads* > *Define loads* > *Apply* > *Structural* > *Force/Moment* > *On Nodes*, в открывшемся окне ставим маркер Min, Max, Inc, и в поле пишем Last. Нажимаем ОК.

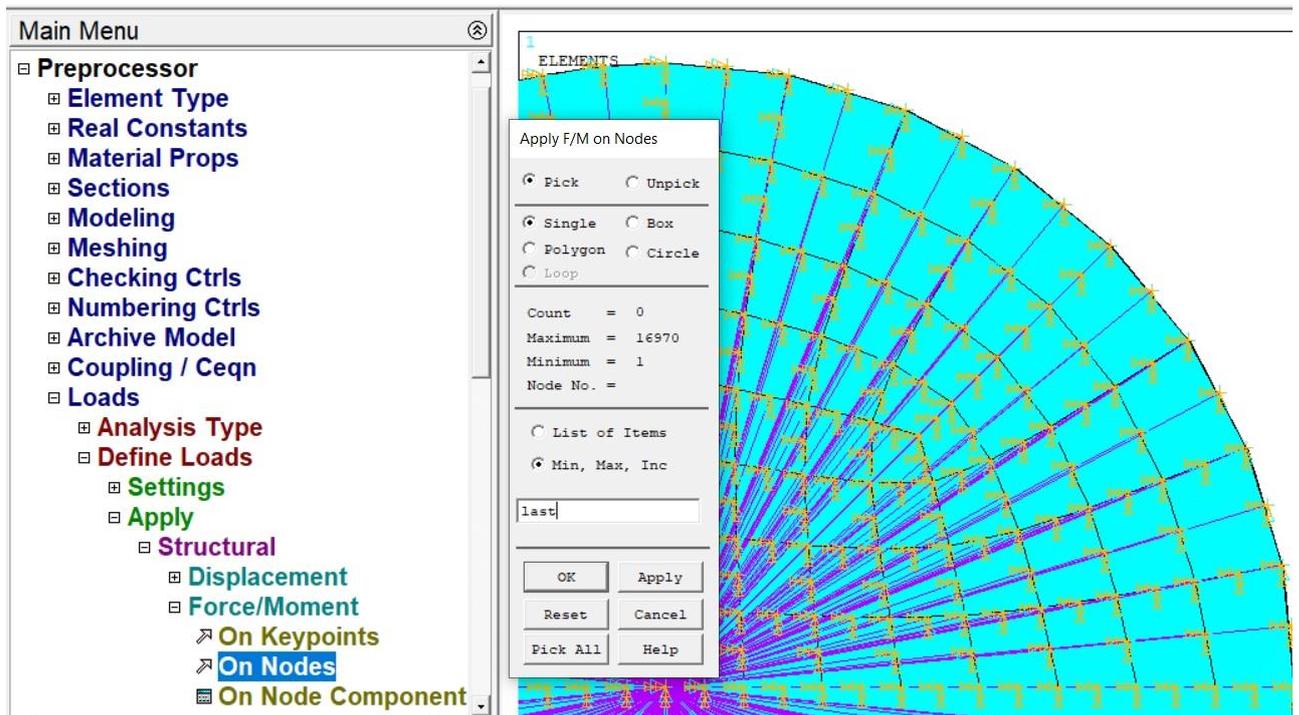


Рис.42. Выбор узлов для приложения нагрузки

В следующем окне в строке *LAB* выбираем *MZ*, в строке *Apply as* выбираем *Existing table*, нажимаем ОК.

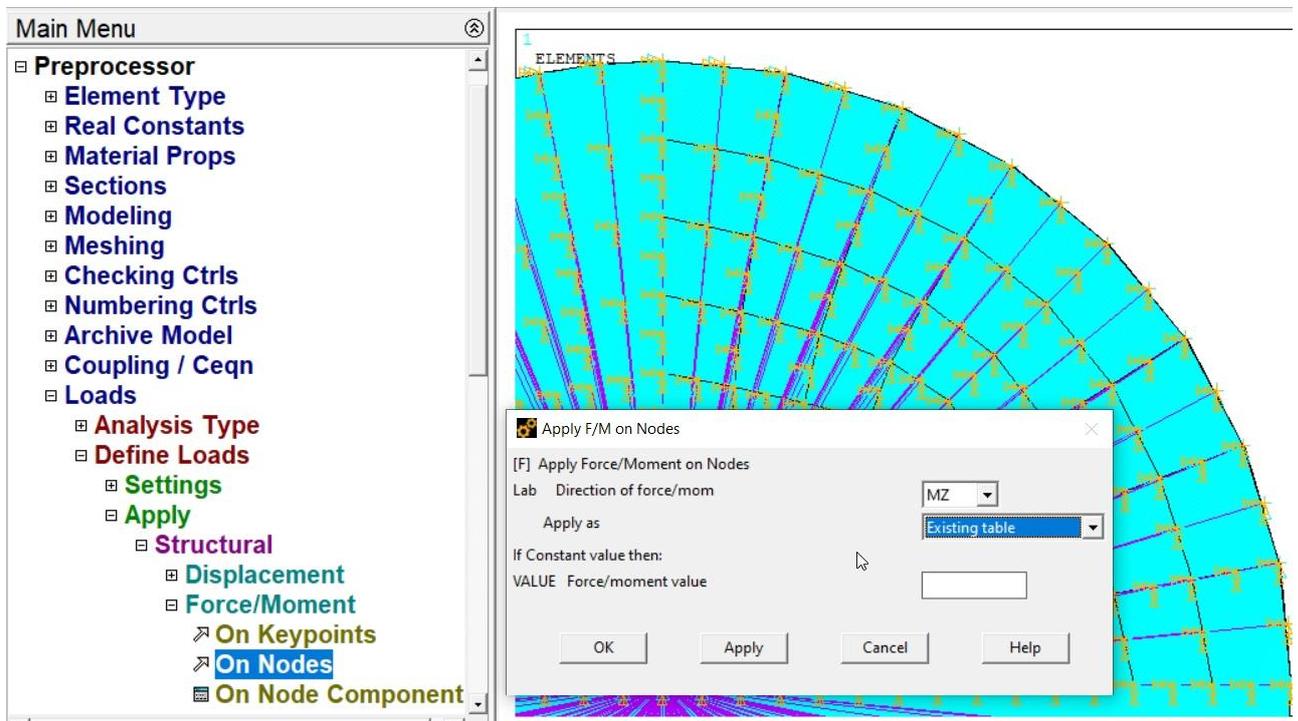


Рис.43. Меню задания нагрузки.

В следующем окне выбираем созданную таблицу. Нажимаем ОК.

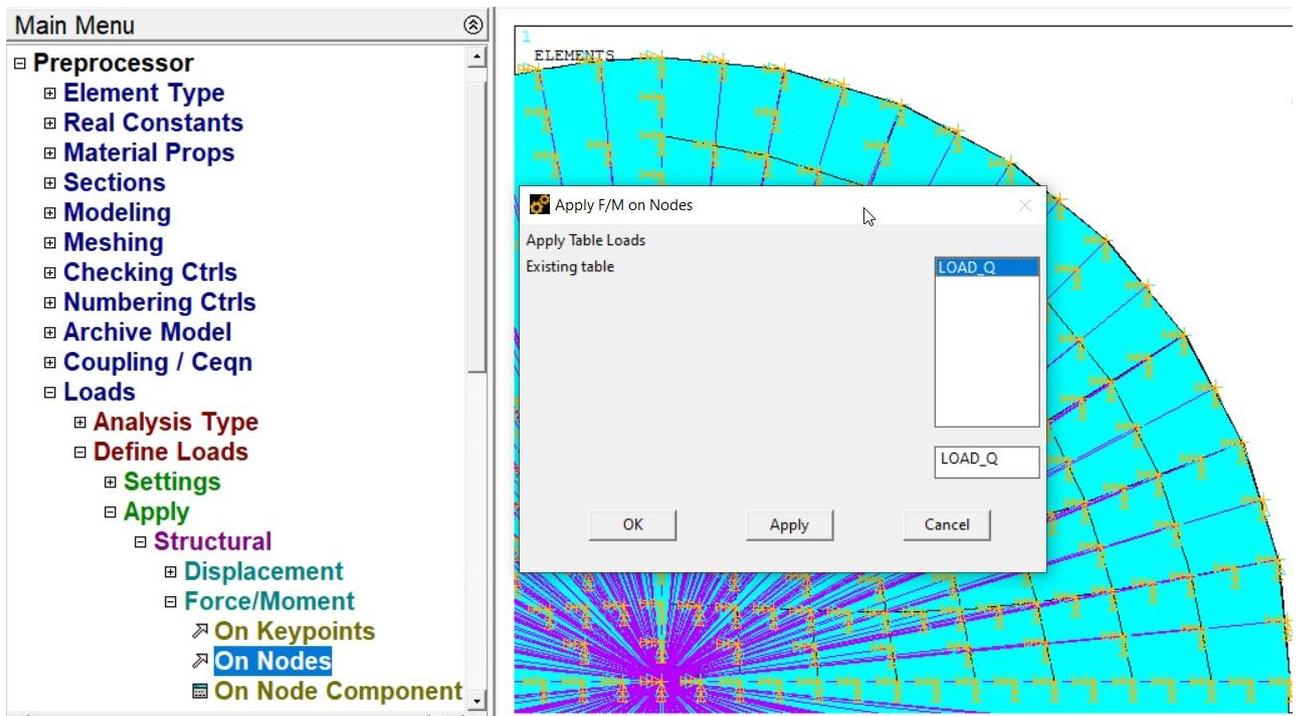


Рис.44. Выбор таблицы для задания нагрузки

Решение

Переходим в *Solution > Analysis Type > Sol'n Controls*, в открывшемся окне выбираем следующие параметры расчета:

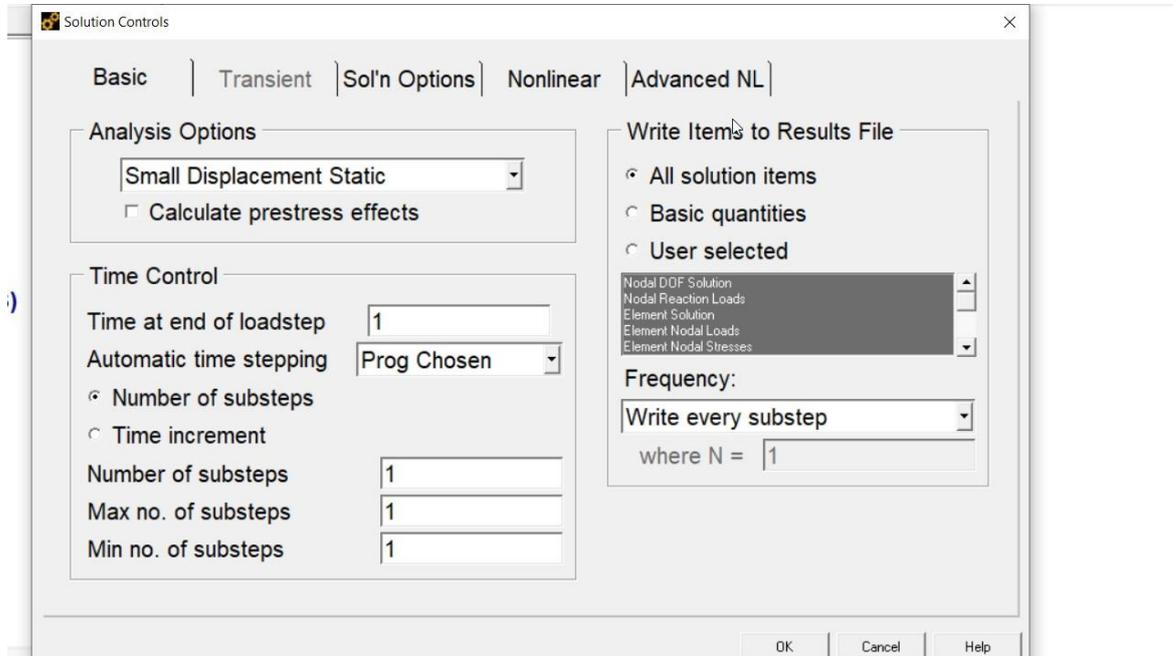


Рис.45. Настройки решателя.

Нажимаем ОК. Запускаем расчет. Переходим в *Solution > Solve > Current LS*, в открывшемся окне нажимаем ОК.

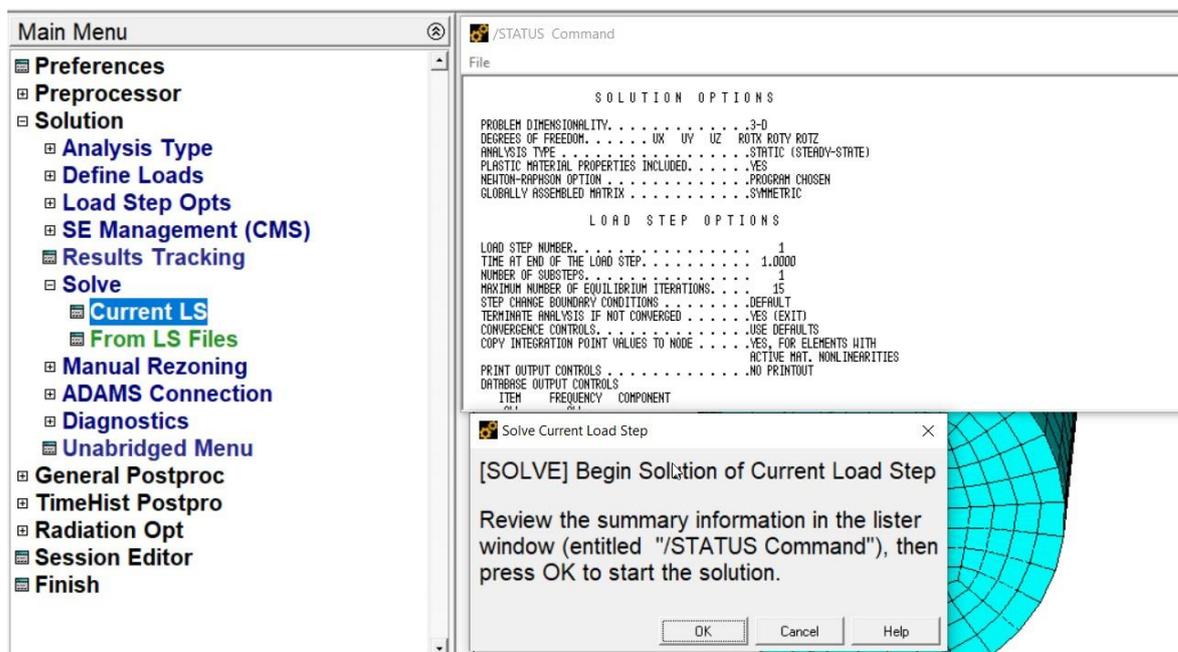


Рис.46. Запуск на расчет.

После окончания первого расчета, в том же окне, выбираем параметры для второго расчета, и запускаем его как описано выше:

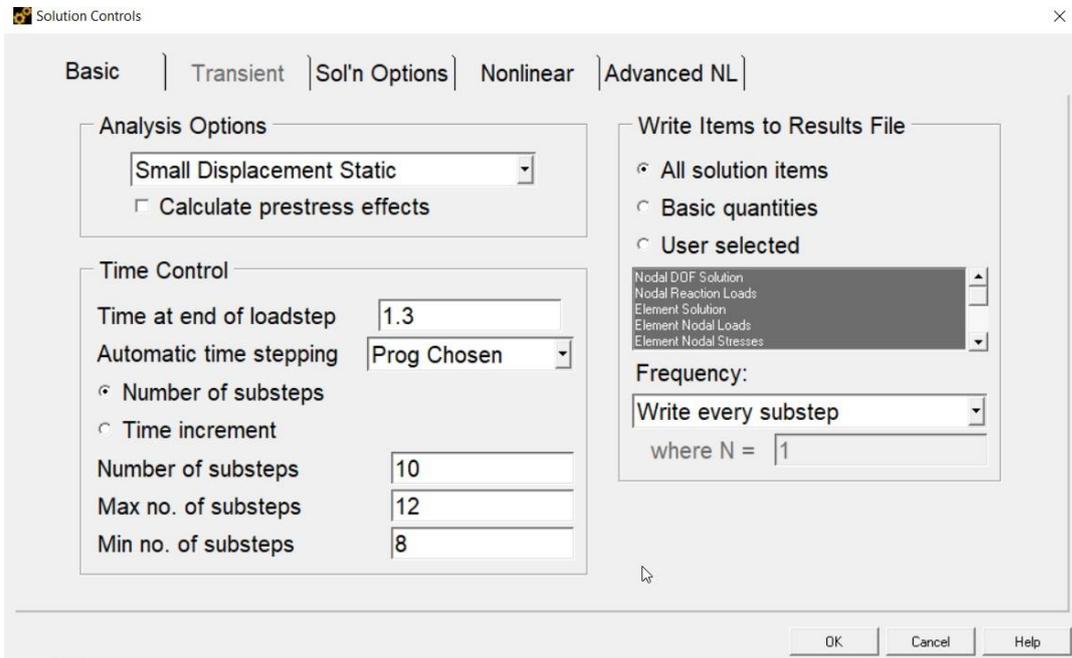


Рис.47. Настройки решателя для второго расчета

Далее выставляем параметры для третьего расчета и запускаем его:

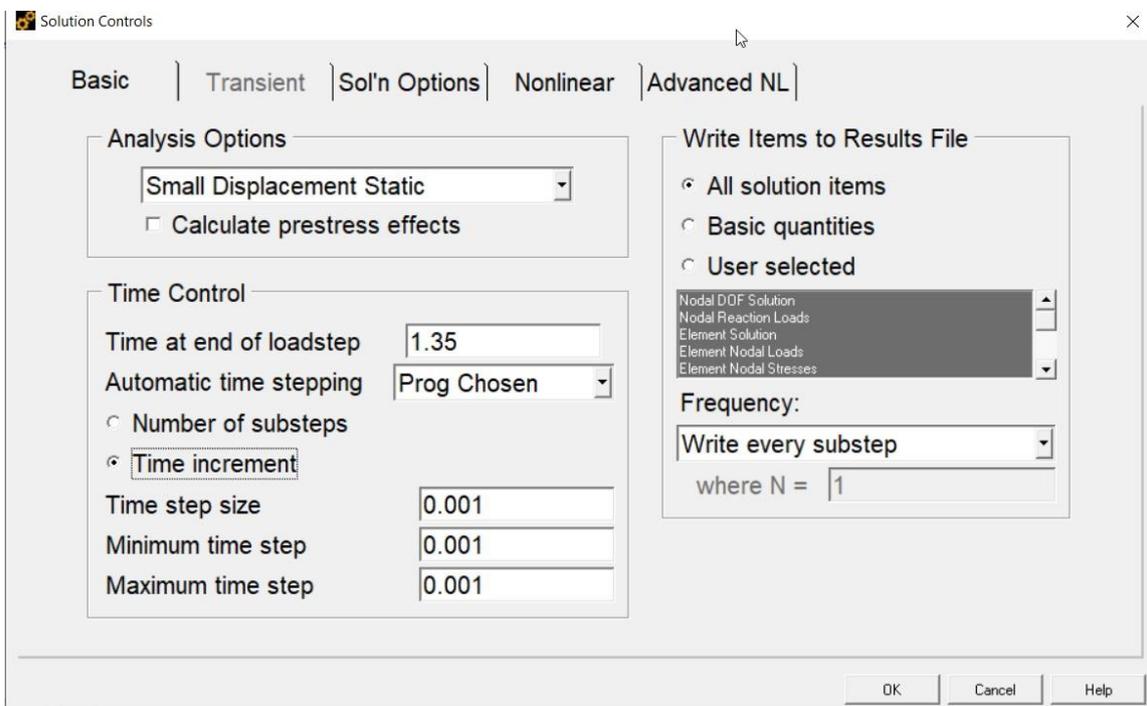
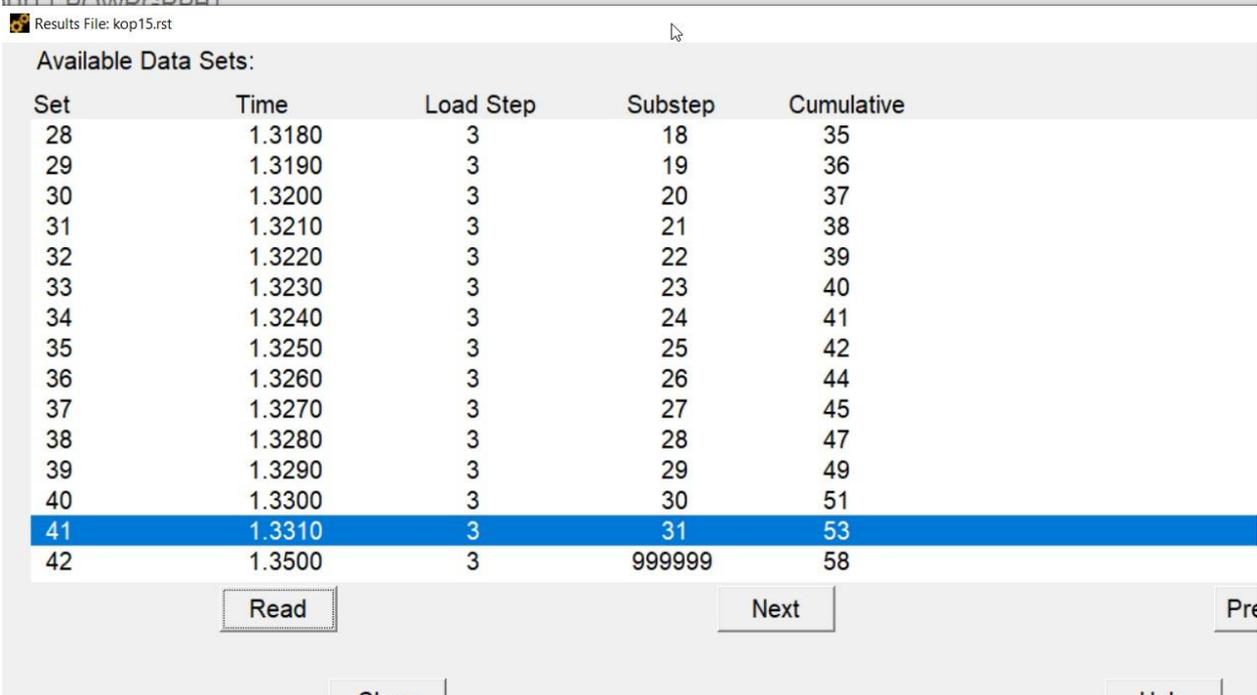


Рис.48. Настройки решателя для третьего расчета

Вывод результатов

Для вывода результатов необходимо выбрать результат в момент перед разрушением. Для этого переходим в *General Postproc > Read Results > By pick*, затем выбираем предпоследний набор и нажимаем *Read*.



Results File: kop15.rst

Available Data Sets:

Set	Time	Load Step	Substep	Cumulative
28	1.3180	3	18	35
29	1.3190	3	19	36
30	1.3200	3	20	37
31	1.3210	3	21	38
32	1.3220	3	22	39
33	1.3230	3	23	40
34	1.3240	3	24	41
35	1.3250	3	25	42
36	1.3260	3	26	44
37	1.3270	3	27	45
38	1.3280	3	28	47
39	1.3290	3	29	49
40	1.3300	3	30	51
41	1.3310	3	31	53
42	1.3500	3	999999	58

Buttons: Read, Next, Pre, Close, Help

Рис.49. Выбор момента перед разрушением для вывода результатов

Также необходимо прописать команду *RSYS,1* для перехода в цилиндрическую систему координат в результатах.

Далее переходим в *General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu*, в открывшемся окне выбираем *Stress > YZ Shear stress* и нажимаем *APPLY*.

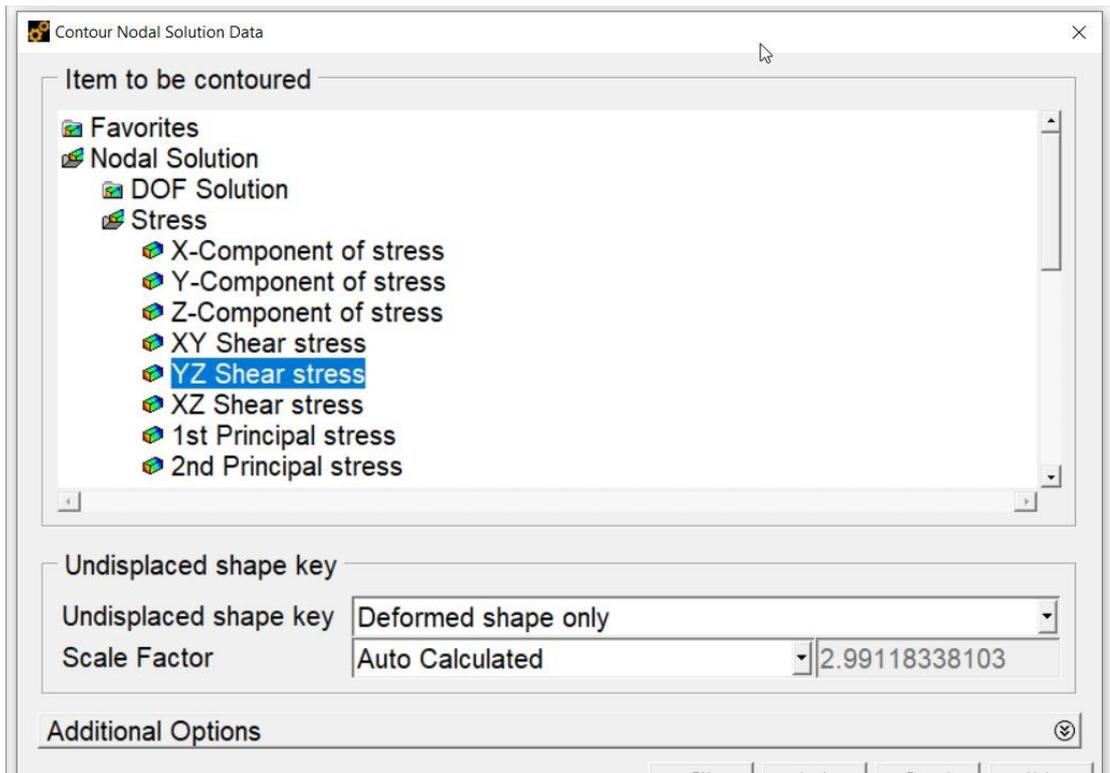


Рис.50. Выбор напряжений для вывода на экран

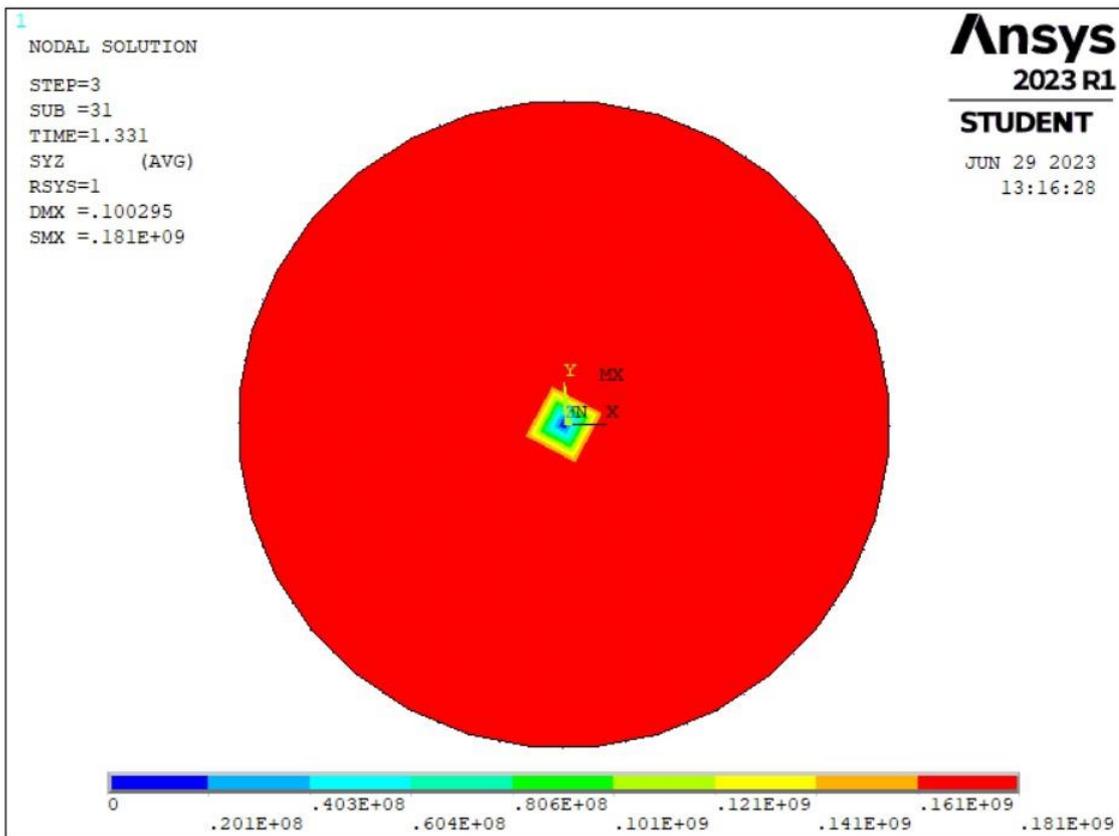


Рис.51. Отображение изополей напряжений

Далее, в том же окне *Contour Nodal Solution Data* выбираем *Plastic Strain*
> *von Mises plastic strain* и нажимаем *APPLY*.

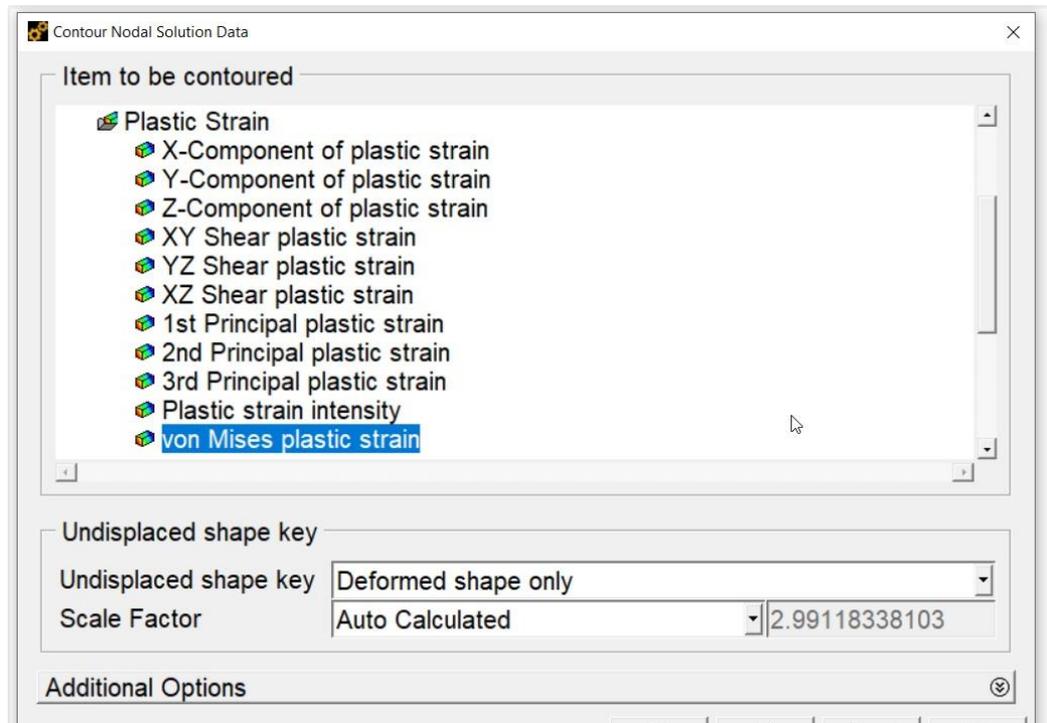


Рис.52. Выбор деформаций для вывода на экран

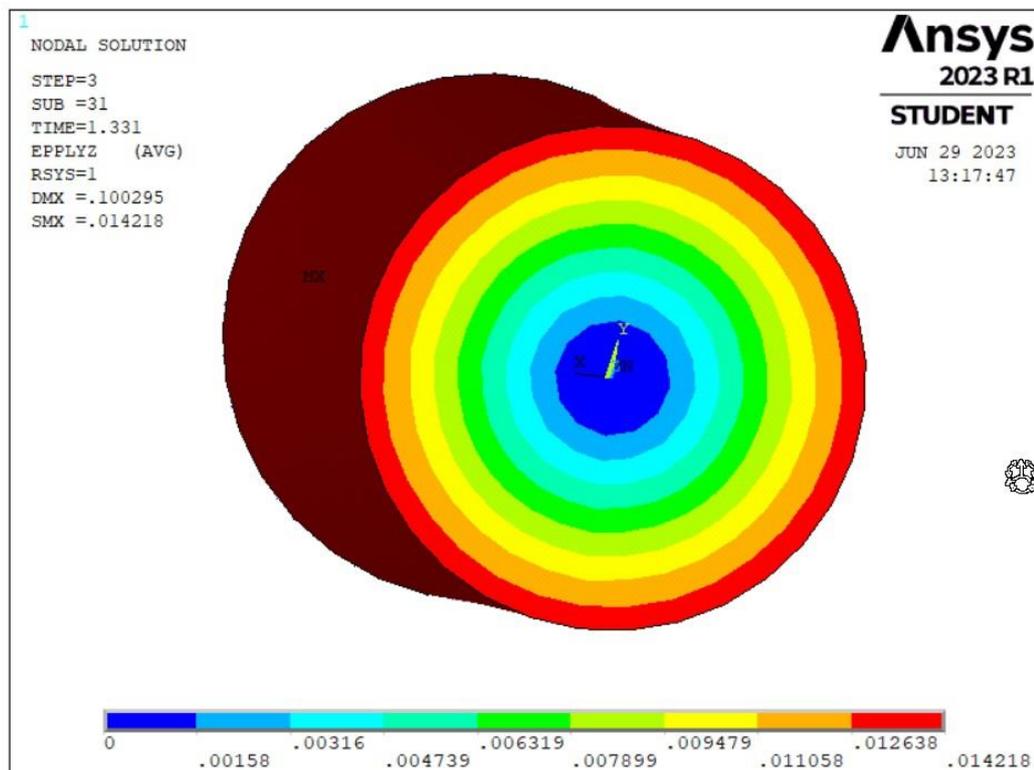


Рис.53. Отображение изополей деформаций

Теперь отобразим график изменения касательных напряжений во времени. Переходим в *TimeHist Postpro*, в открывшемся окне нажимаем на значок “+” в левом верхнем углу (*add data*). В следующем окне выбираем *Plastic Strain* > *YZ Shear plastic strain*, нажимаем ОК, далее выделяем любую точку сечения и нажимаем ОК.

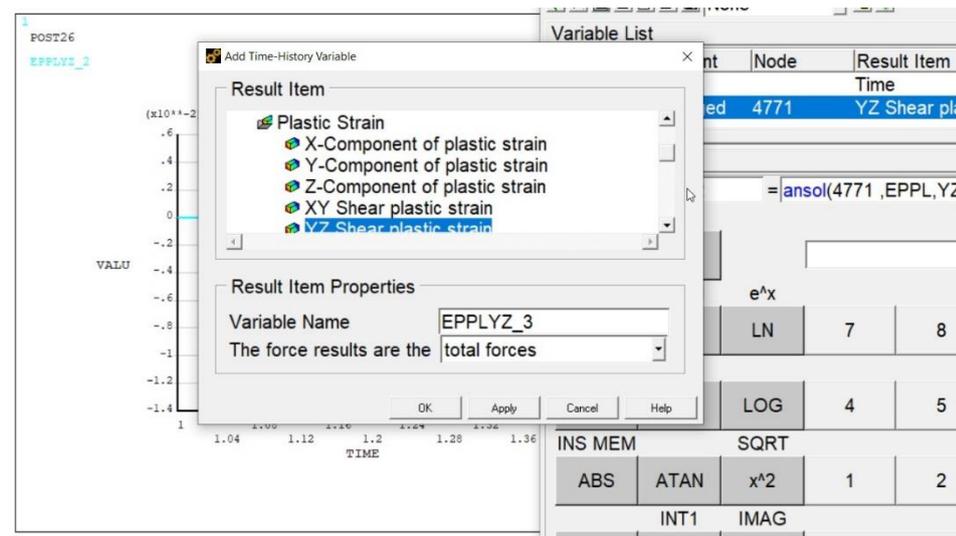


Рис.54. Окно настроек параметров для вывода графика

Для отображения графика нажимаем *Graph Data* (иконка с графиком слева вверху).

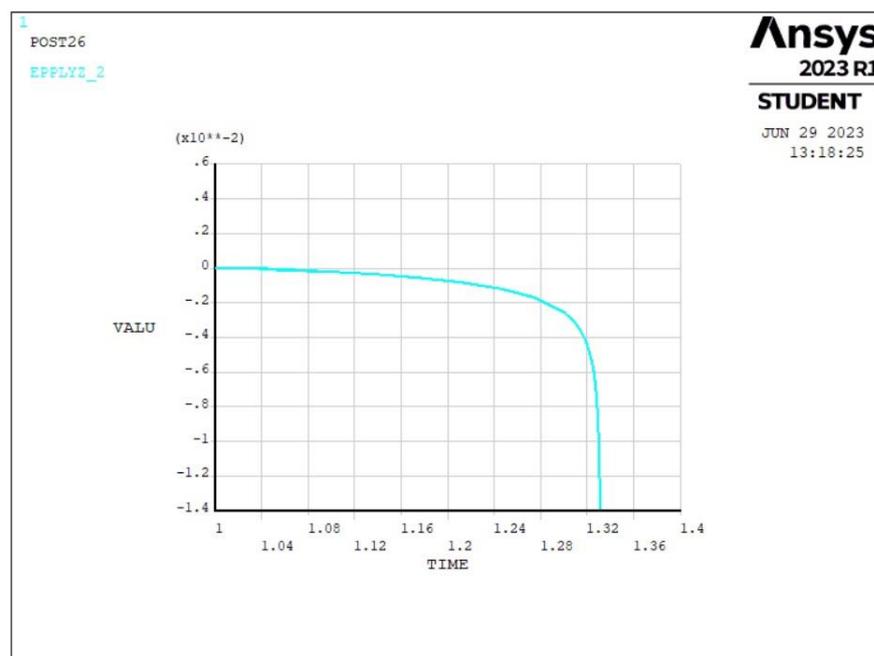


Рис.55. График изменения касательных напряжений во времени

Заключение

В работе был проведен расчёт коэффициента запаса прочности кругового стержня при упруго-пластическом кручении двумя способами: аналитическим и численным. В случае аналитического решение значение коэффициента равно 1.333, при численном моделировании в ПК Ansys – 1.331. Погрешность численного решения составляет:

$$\frac{|1.331 - 1.333|}{1.333} \cdot 100\% = 0.15\%$$

Код программы

FINISH

/CLEAR

/PREP7

! вход в препроцессор

! задание исходных данных

EPS = 1E-5

R = 1

H = 6

K = 1.4

! параметр "времени"

ST = 300E6

! предел пластичности по Мизесу

M = ((ST*3.1415*R**3)/2)/1.73

! предельный момент

! создание таблицы нагрузок

*DIM,LOAD_Q,TABLE,3,1,1,TIME

LOAD_Q(1,0)=0.0,1,k

LOAD_Q(1,1)=M,M,K*M

! задание параметров материала

ET,1,186

ET,2,184,1,0

MP,EX,1,2E11

MP,PRXY,1,0.3

TB,BISO,1

! билинейный изотропный

TBDATA,,ST,0

! предел пластичности и тангенциальный модуль

! создание геометрии

CYLIND,R,0,0,H,0,90

! разбиение сетки

ESIZE,(R/20)*5

LSEL,S,LOC,Z,H/2

LESIZE,ALL,,20

MSHKEY,1

VMESH,ALL

! симметричное копирование по X, Y

VSYM,X,ALL,,,0,0

VSYM,Y,ALL,,,0,0

NUMMRG,ALL

ALLSEL

NSEL,S,LOC,Z,H

! выбор точек сечения

*GET,NALL,NODE,0,COUNT

! количество точек в сечении

*GET,NMIN,NODE,0,NUM,MIN ! минимальный номер точки
ALLSEL

*GET,LAST,NODE,0,NUM,MAX ! максимальный номер

N,(LAST+1),0,0,H ! создание точки для задания момента

*GET,LAST,NODE,0,NUM,MAX ! получение номера последней точки

TYPE,2 ! выбор 2 типа

NSEL,S,LOC,Z,H ! выбор точек сечения

E,LAST,NMIN ! назначение элемента 2 типа между узлами

NEXT = NMIN ! переобозначение переменной для цикла

! цикл создания элемента 2 типа между всеми узлами сечения

*DO,I,0,(NALL-2)

*GET,NEXT,NODE,NEXT,NXTH

E,LAST,NEXT

*ENDDO

ALLSEL

! создание закреплений

NSEL,S,LOC,Z,0

D,ALL,ALL

ALLSEL

! создание сосредоточенного момента в виде таблицы

F,LAST,MZ,%LOAD_Q%

! решение

/SOLU

ANTYPE,0

TIME,1

! время

NSUBST,1,1,1 ! количество итераций, среднее/максимальное/минимальное

OUTRES,ERASE

! вывод результатов

OUTRES,ALL,1

SOLVE

TIME,1.3

NSUBST,10,12,8

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,1

SOLVE

TIME,1.35

DELTIM,0.001,0.001,0.001

! шаг по времени

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,1

SOLVE

Практическая работа №3

Упруго-пластическое состояние толстостенной трубы

Методические указания к выполнению практической работы 3

Для создания расчётной модели будем использовать препроцессор Ansys Mechanical APDL.

После запуска APDL появится окно:

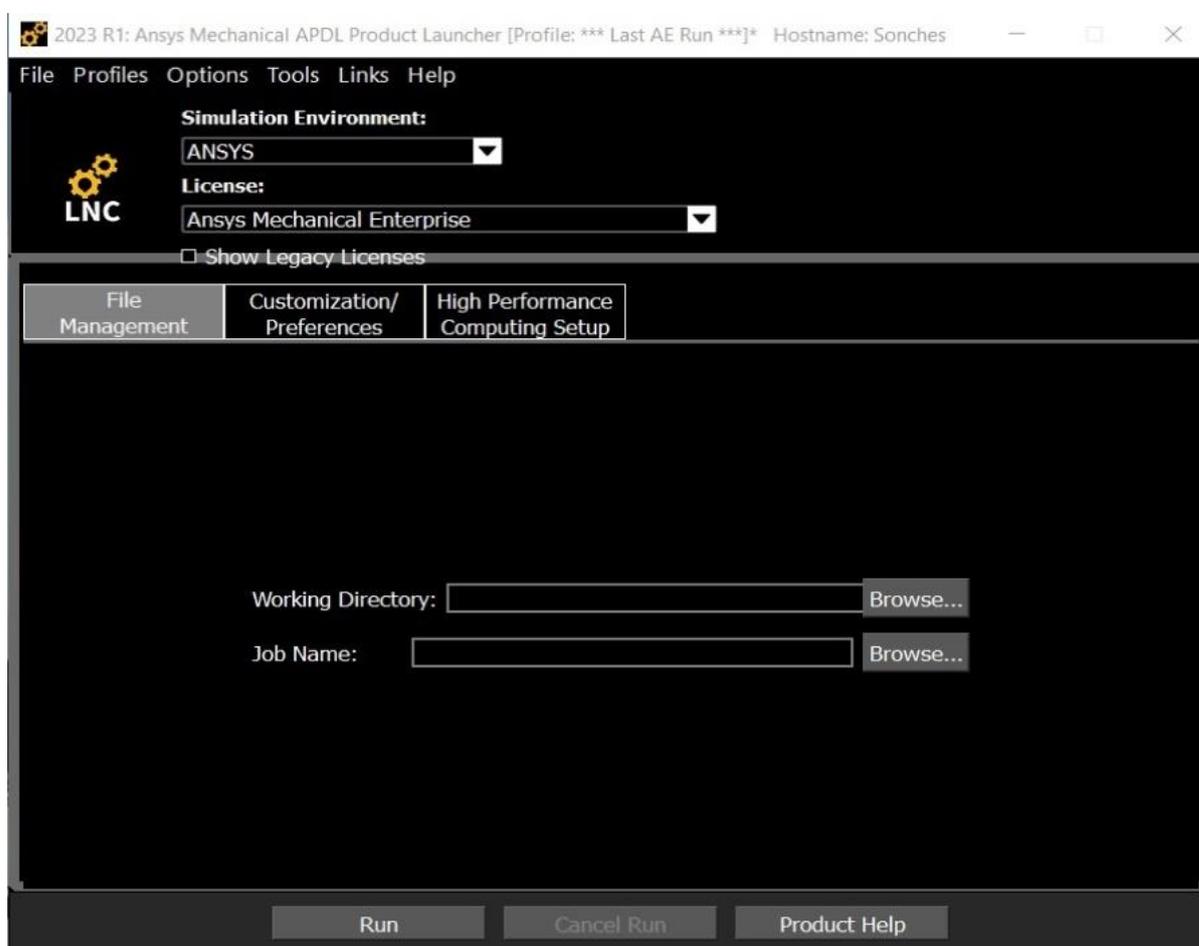


Рис.1. Окно запуска программного комплекса ANSYS Mechanical

Рядом с окном *Working Directory* нажать кнопку «Browse...» и выбрать свою рабочую директорию. В этой директории ANSYS будет сохранять все файлы. Директория должна быть создана заранее. В именах директории и пути к директории допускаются только латинские буквы. Рядом с окном *Job Name* задаем имя файла.

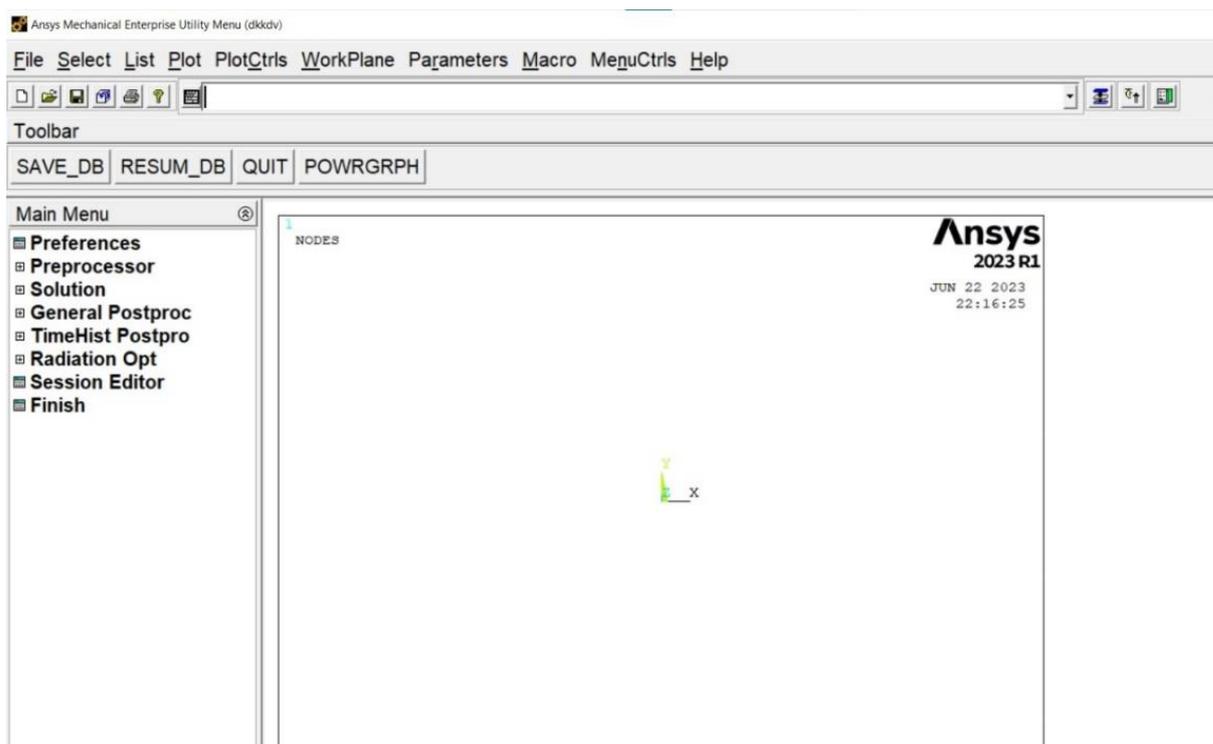


Рис.2. Рабочее окно программного комплекса ANSYS Mechanical

Выполним расчёт коэффициента запаса прочности толстостенной трубы при упруго-пластическом состоянии длиной l и радиусами a и b (внутренний и внешний соответственно) Расчётная схема имеет следующий вид:+

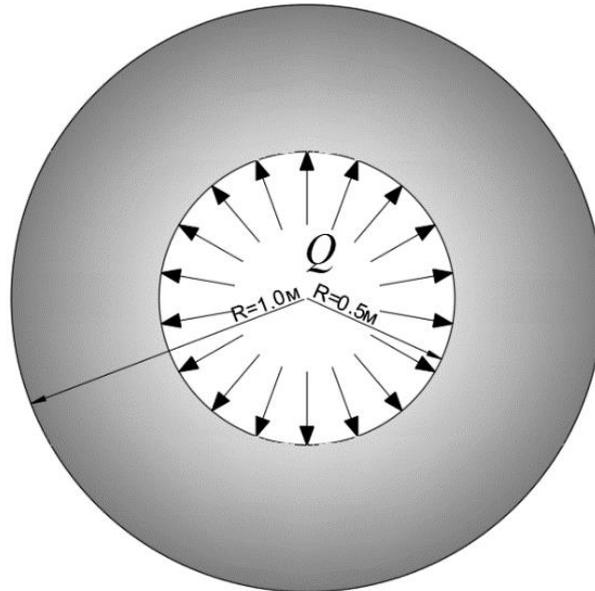


Рис.3. Схема толстостенной трубы

Исходные данные:

- поперечное сечение трубы – круглое (внутренний радиус $R_1 = 0.5$ м, внешний радиус $R_2 = 1$ м);
- характеристики материал балки: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, предел пластичности $\sigma_T = 300 \cdot 10^6$ Па;
- равномерно распределенная нагрузки по внутренней поверхности трубы.

Аналитическое решение

Отношение $\beta = \frac{P_{\text{разр}}}{P_T}$ характеризует запас прочности балок по отношению к состоянию, при котором в балке возникают первые пластические деформации, где

$$P_T = \frac{\sigma_T(b^2 - a^2)}{\sqrt{3}b^2},$$

$$P_{\text{разр}} = \frac{2\sigma_T}{\sqrt{3}} \ln \frac{b}{a},$$

Следовательно,

$$\beta = \frac{P_{\text{разр}}}{P_T} = \frac{\frac{2\sigma_T}{\sqrt{3}} \ln \frac{b}{a}}{\frac{\sigma_T(b^2 - a^2)}{\sqrt{3}b^2}} \approx 1,85.$$

Решение с помощью Ansys Mechanical APDL

Создание таблицы нагрузок.

Нагрузку будем задавать на основе диаграммы Прандтля:

Utility menu > Parameters > Array parameters > Define/Edit

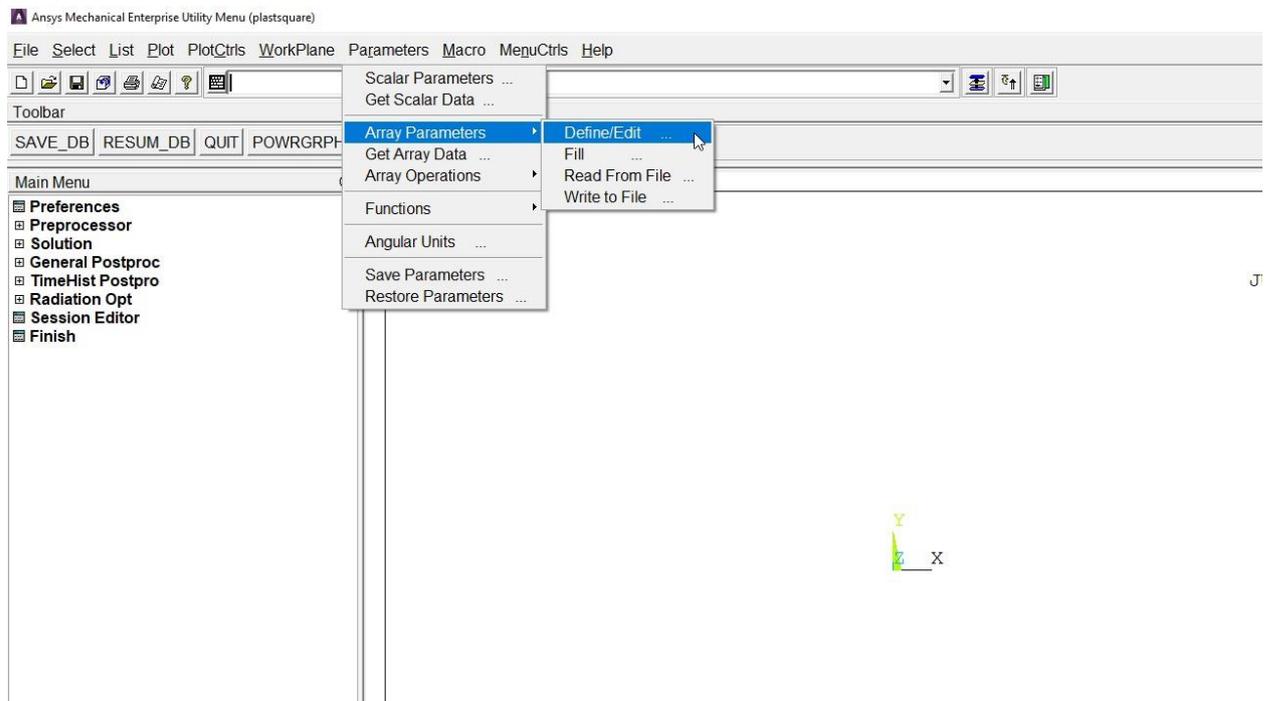


Рис.4. Создание таблицы нагрузок

В открывшемся окне *Array Parameters* нажимаем кнопку *Add*

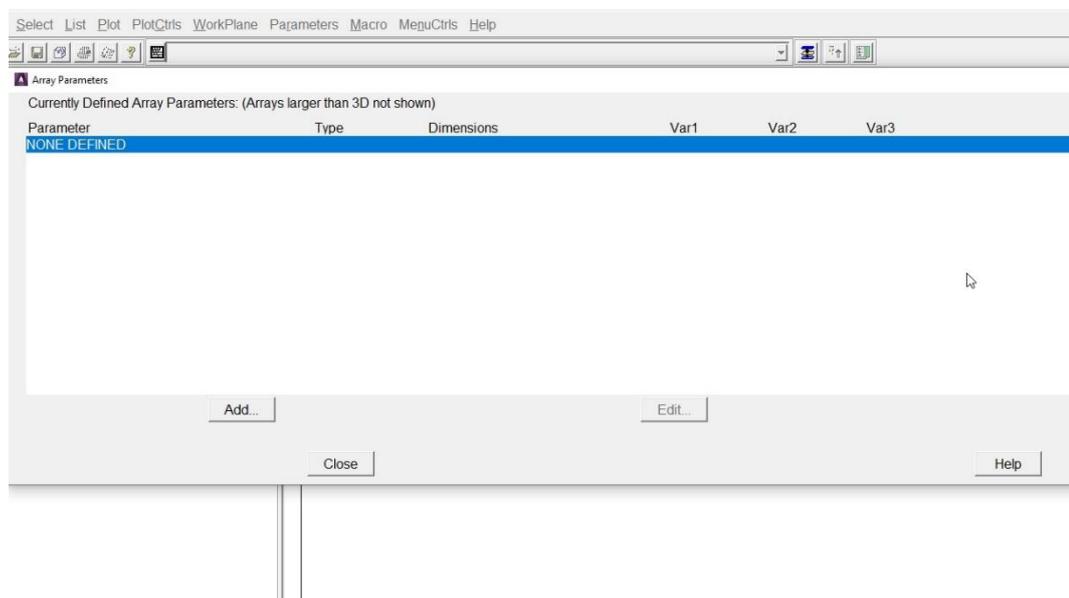


Рис.5. Окно *Array Parameters*

В открывшемся окне указываем:

- Название таблицы (*Parameter Name*) – Load_Q
- Тип таблицы (*Parameter Type*) – Table
- Количество строк, столбцов, рядов (*No. of rows, cols, planes*) – 3,1,1
- Строковая переменная (*Var1 Row variable*) – Time

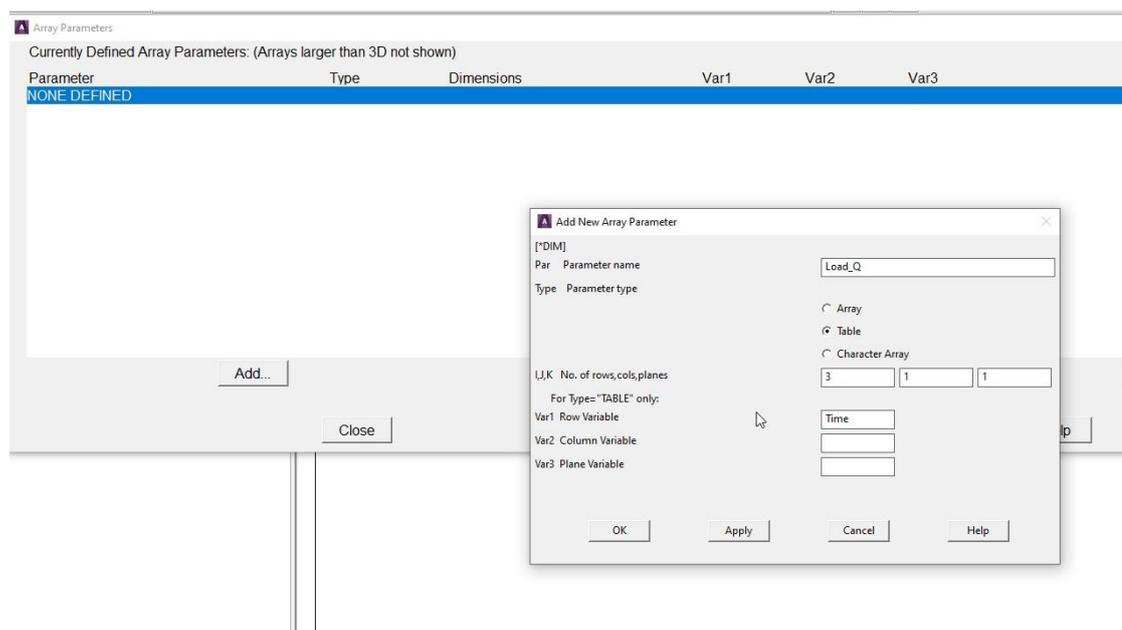


Рис.6. Окно *Add New Array Parameter*

Во вкладке *Array Parameters* нажимаем кнопку *Edit*. В открывшемся окне заполняем данные таблицы (изменение нагрузки со временем):

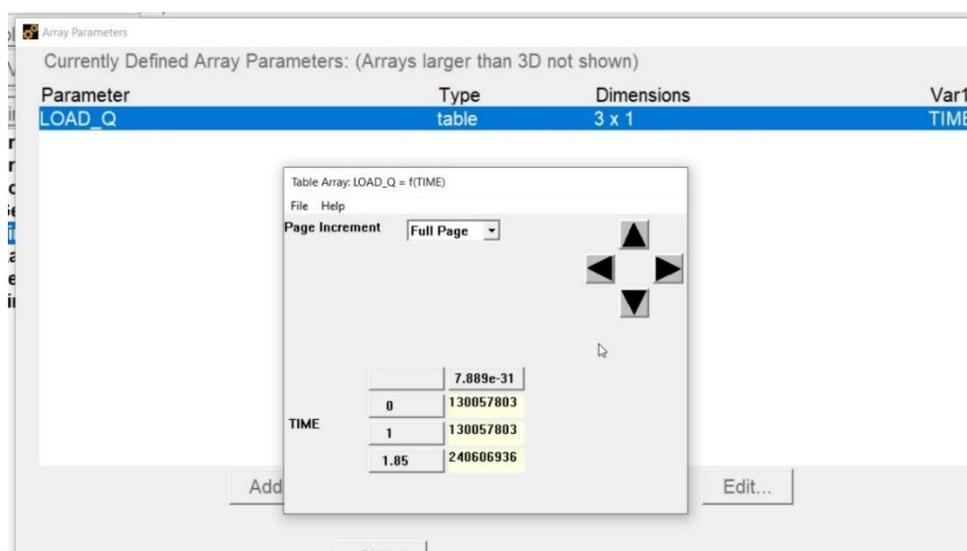


Рис.7. Окно *Table Array*

Затем нажимаем *File > Apply/Quit* и закрываем окно *Array Parameters*.

Задание элементов и их параметров

В *Main Menu* переходим в *Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete* в открывшемся окне (*Element type*) нажимаем кнопку *Add*:

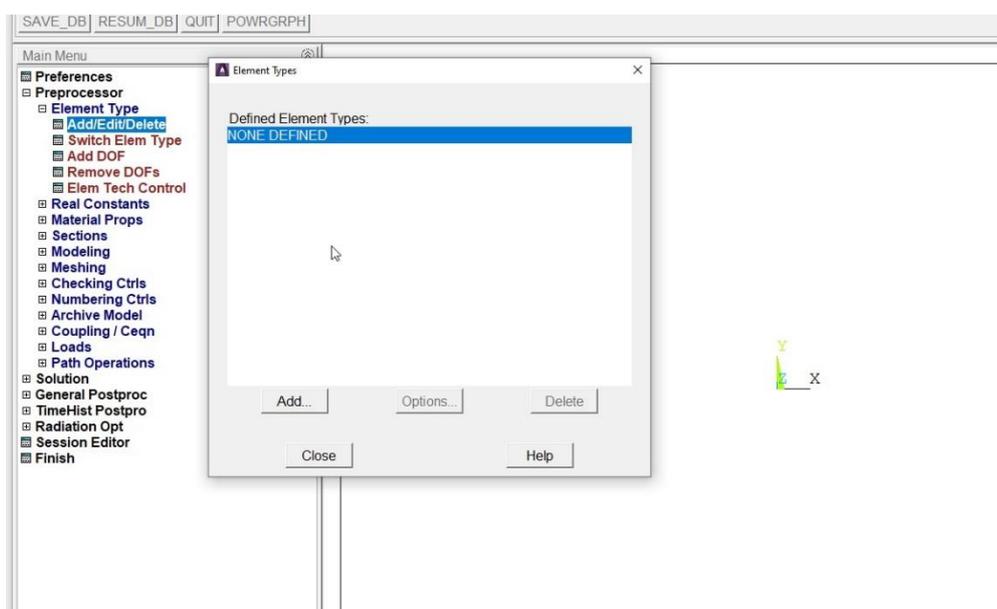


Рис.8. Окно *Element type*

В открывшемся окне в библиотеке элементов (*Library of element types*) выбираем *Solid – 20 node 186*.

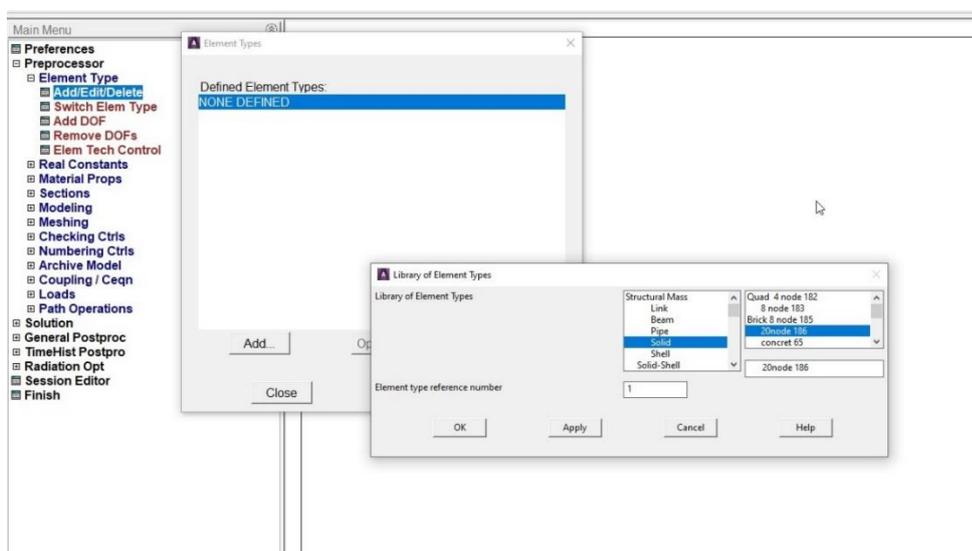


Рис.9. Окно *Library of Element type*

Номер типа элемента (*element type reference number*) – 1, нажимаем ОК. Закрываем окно *Element type*.

В препроцессоре переходим в *Material Props > Material models*. В открывшемся окне выбираем: *Structural > Nonlinear > Inelastic > Rate independent > Isotropic Hardening Plasticity > Mises Plasticity > Bilinear*.

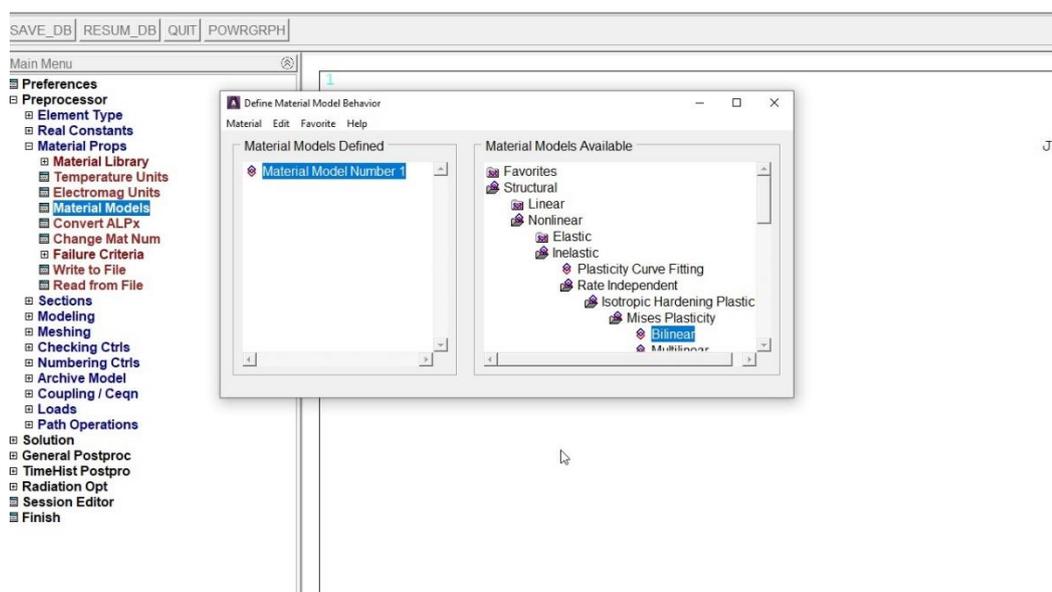


Рис.10. Задание материала. Шаг 1

В открывшемся предупреждении нажимаем ОК, далее в открывшемся окне задаем модуль упругости ($E=2e11$) и коэффициент Пуассона ($\nu=0.3$). Нажимаем ОК.

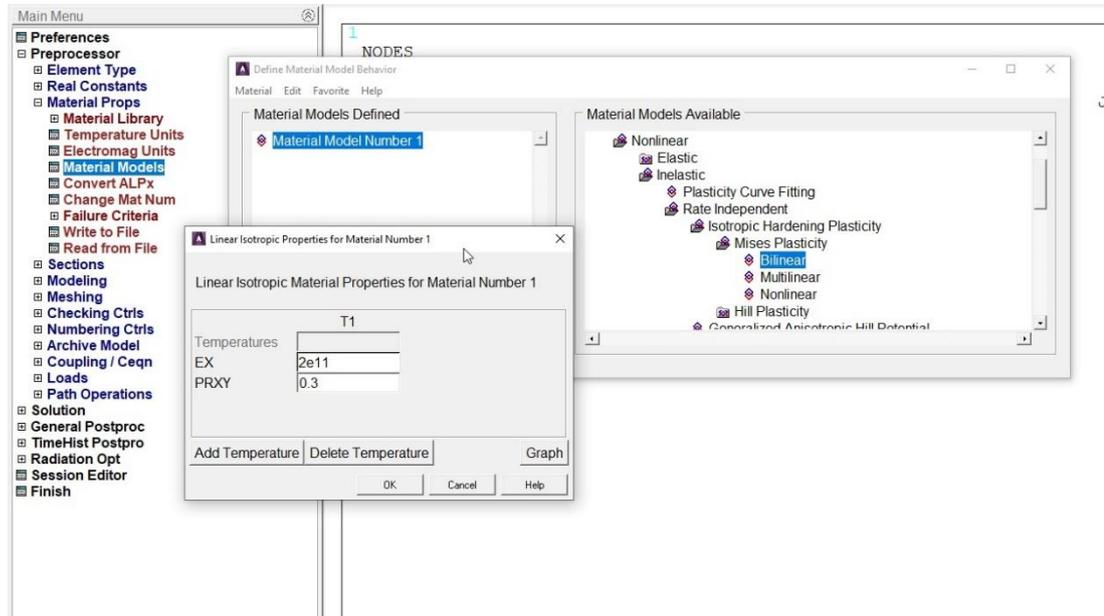


Рис.11. Задание материала. Шаг 2

Далее в открывшемся окне задаем предел пластичности по Мизесу ($Yield\ Stss=300e6$) и тангенциальный модуль ($Tang\ Mode=0$). Нажимаем ОК.

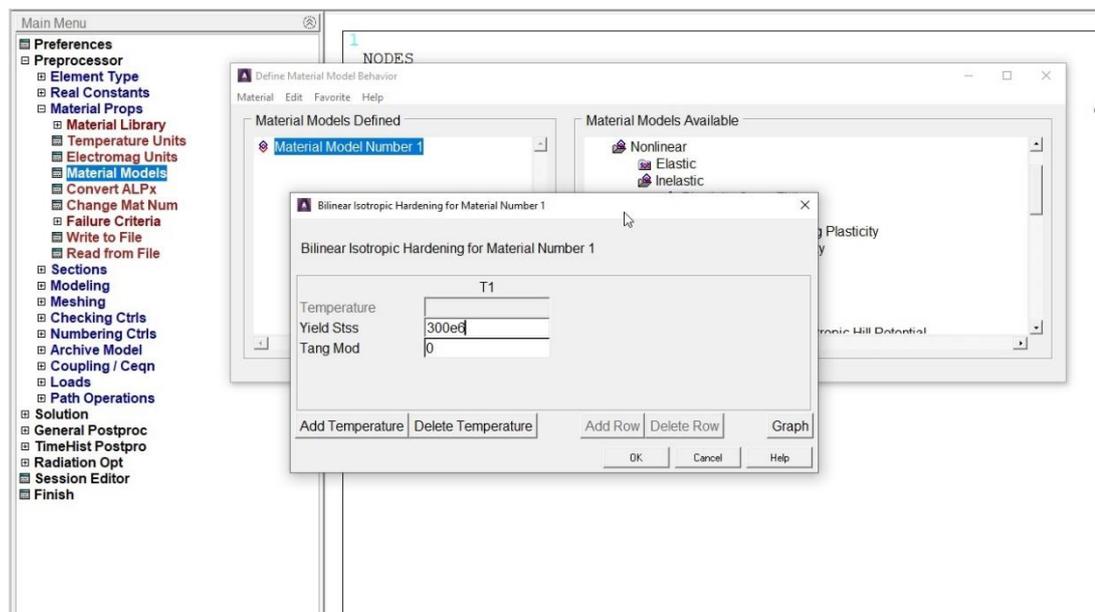


Рис.12. Задание материала. Шаг 3

Задание геометрии

Создаем четверть цилиндра (удобно для разбивки сетки). Для этого переходим в *Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cy Lind > By dimensions*. В открывшемся окне прописываем параметры:

- $RAD1 - 0.5$
- $RAD2 - 1$
- $Z1 - 0$
- $Z2 - 5$
- $THETA1 - 0$
- $THETA2 - 90$

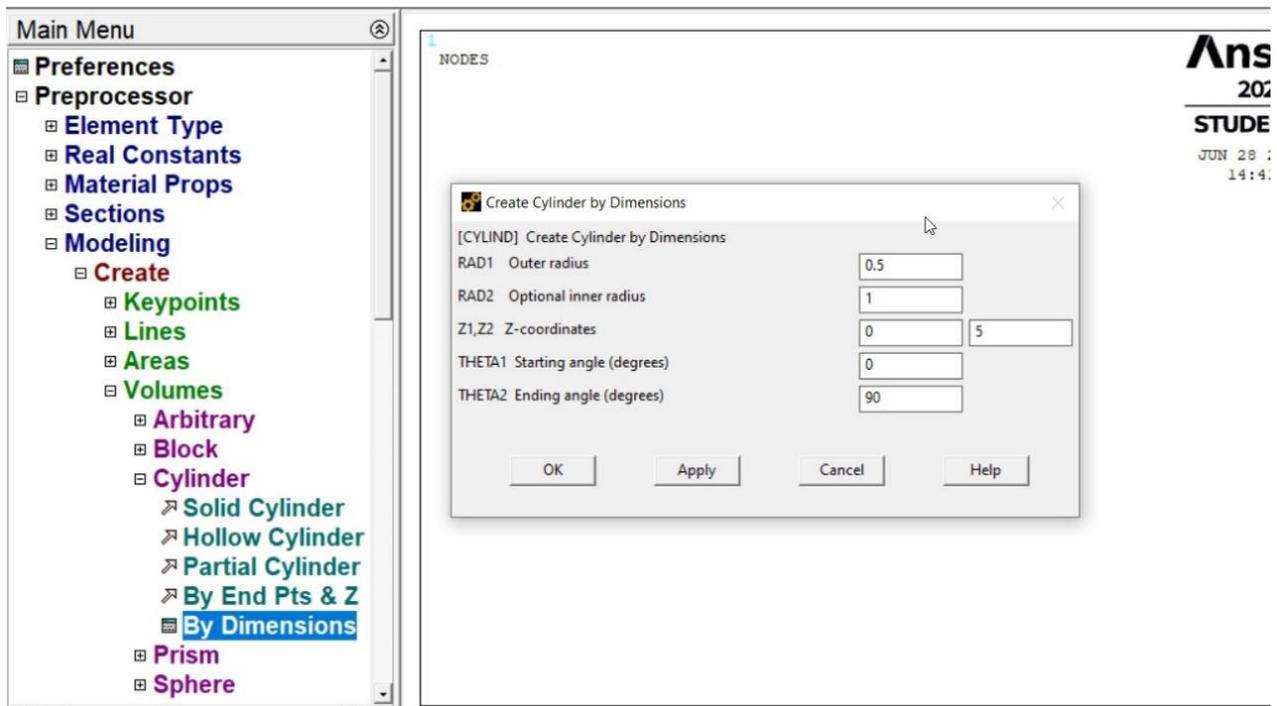


Рис.13. Создание объемного тела по параметрам

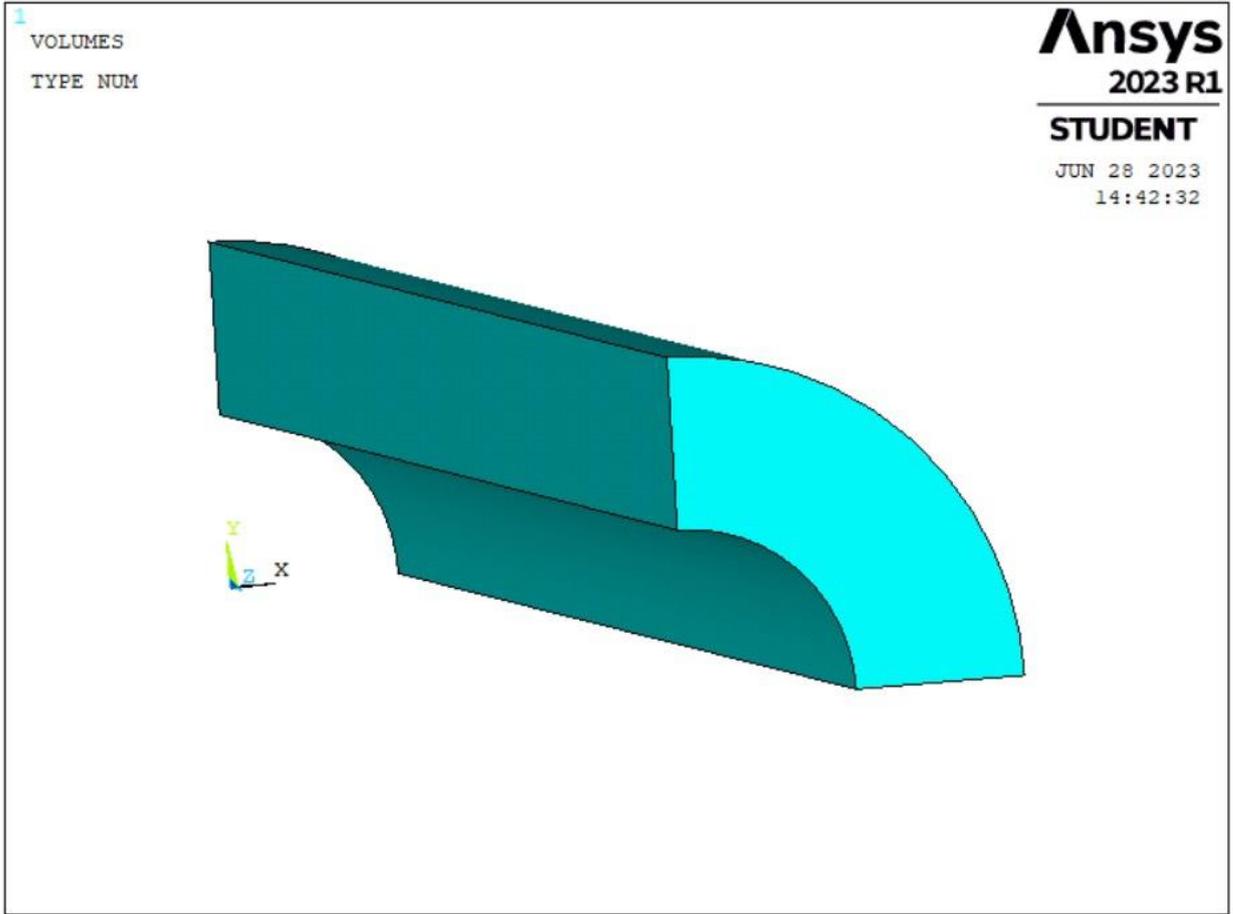


Рис.14. Геометрическая модель

Разбивка сетки

На первом шаге разбиваем сетку объемными элементами, для этого переходим в *Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs*. Далее, в открывшемся окне, в строке *Type*, выбираем 1 тип элемента (*Solid 186*). Нажимаем ОК.

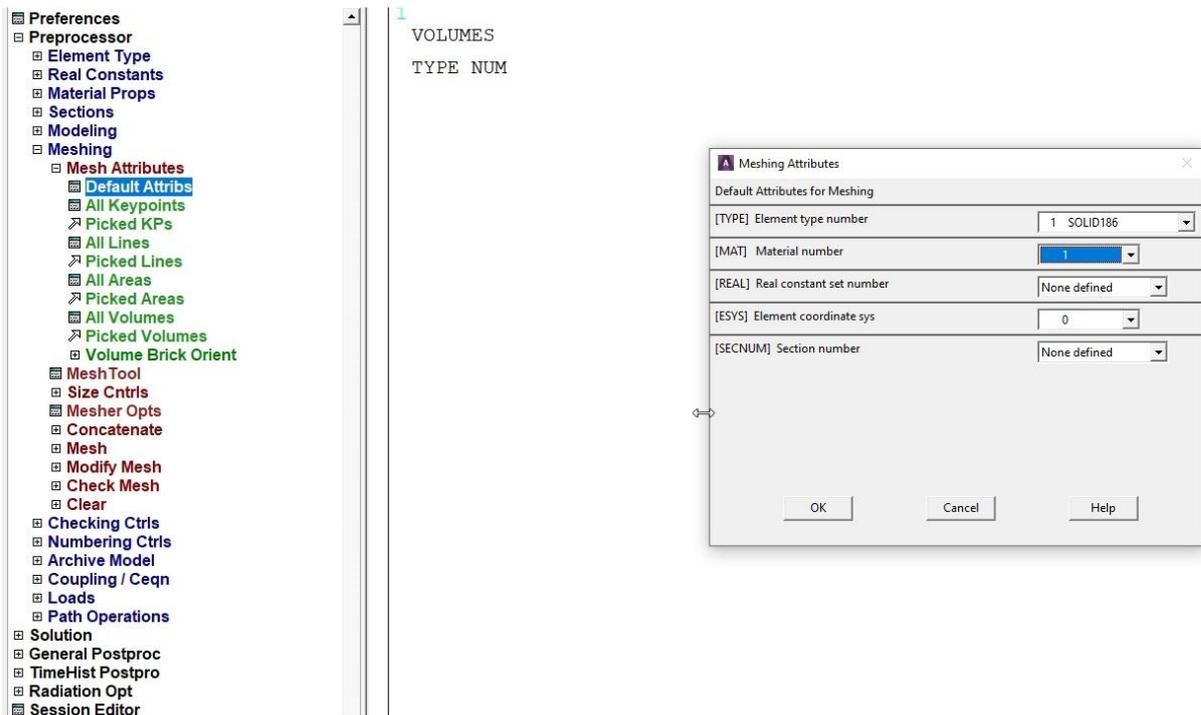


Рис.15. Задание атрибутов

На следующем шаге задаем размер элементов. Для этого переходим в *Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manualsize > Global > Size*, в открывшемся окне в строке *Size* пишем 0.04. Нажимаем ОК.

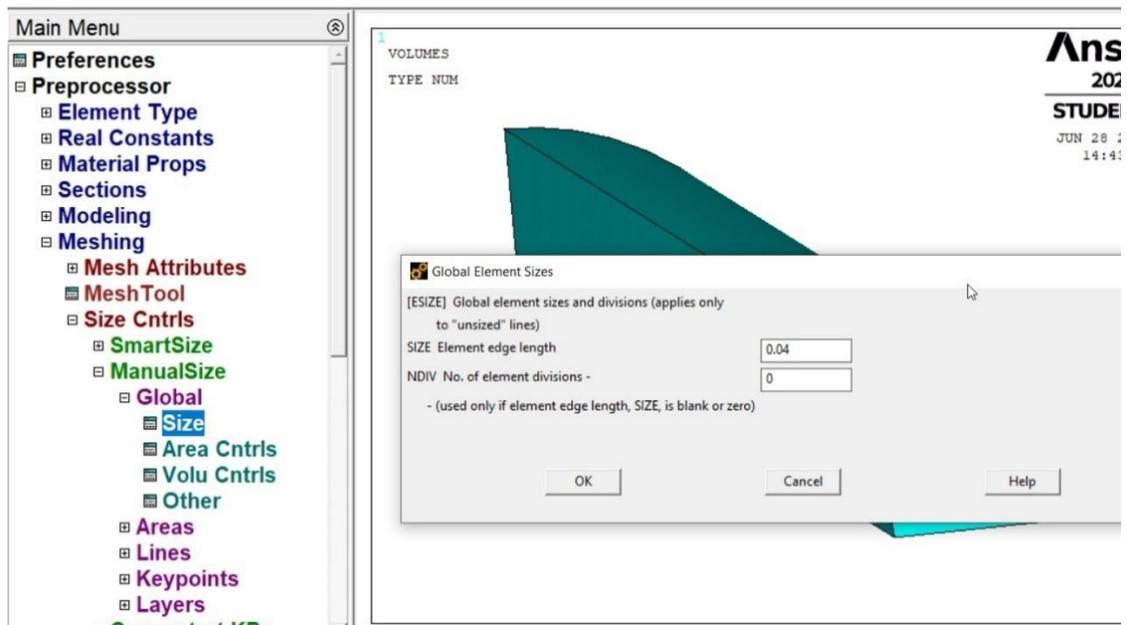


Рис.16. Задание размера конечных элементов

Далее выбираем необходимые линии по длине, для этого прописываем следующую команду: `LSEL,S,LOC,Z,H/2`

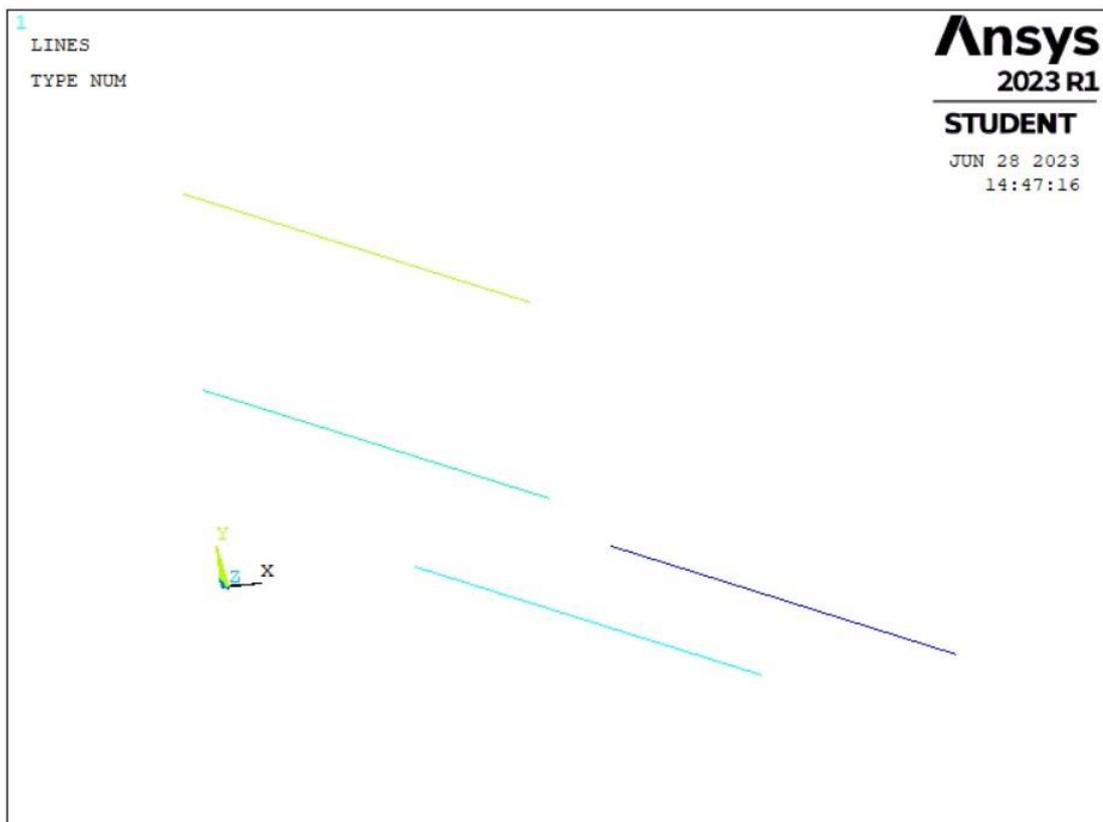


Рис.17. Выбор линий для назначения размера конечных элементов

Далее задаем количество элементов по выбранным линиям, для этого переходим в *Preprocessor* > *Meshing* > *Size Cntrls* > *Manualsize* > *Lines* > *All lines*, в открывшемся окне в строке *Ndiv* пишем 5. Нажимаем ОК.

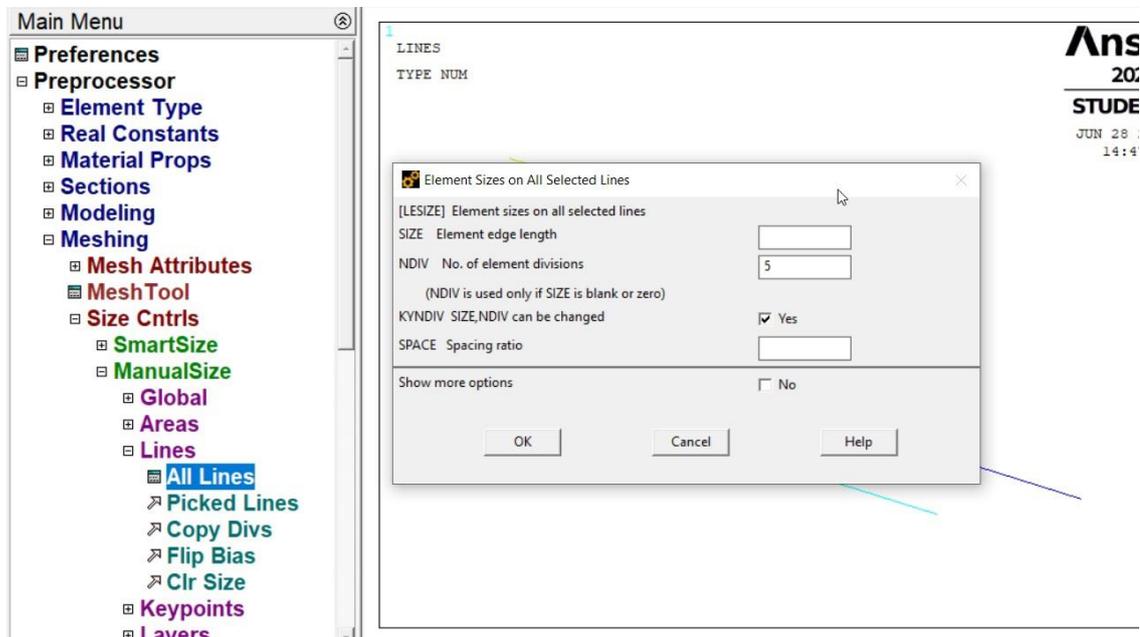


Рис.18. Назначение количества

Разбиваем объем заданными элементами. Для этого переходим в *Preprocessor* > *Meshing* > *Mesh* > *Volumes* > *Mapped* > *4 to 6 sided*, в открывшемся окне нажимаем *Pick all*.

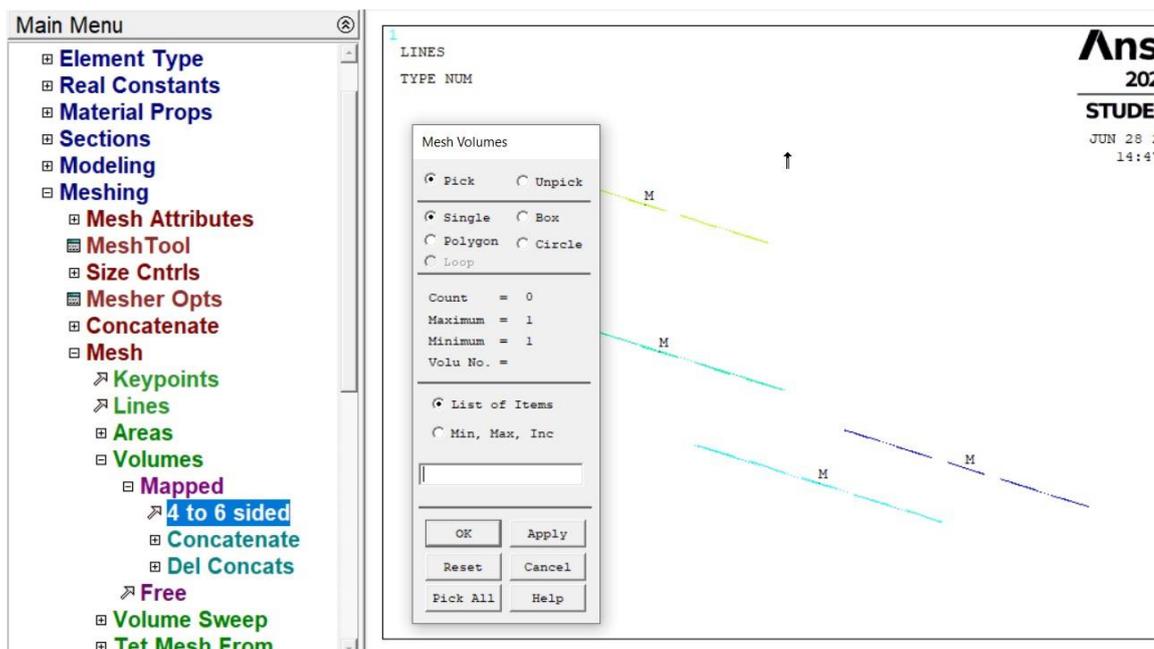


Рис.19. Отображение разметки будущих КЭ на выбранных линиях

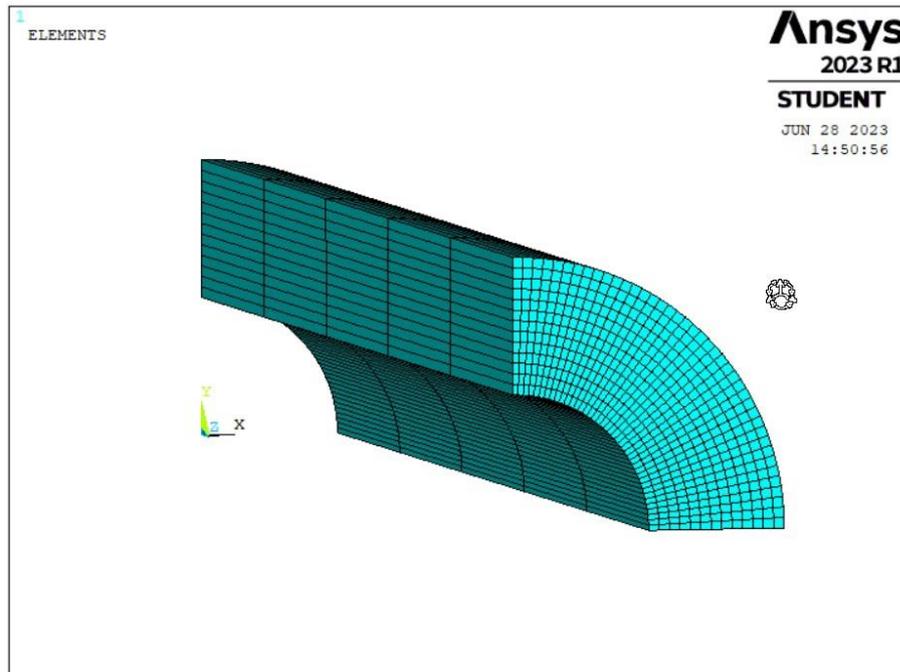


Рис.20. КЭ-модель

Далее необходимо симметрично копировать нашу модель по X и Y. Для этого переходим в *Preprocessor > Modeling > Reflect > Volumes*, в открывшемся окне нажимаем *Pick all*. В следующем окне выбираем *Y-Z plane (X)* и нажимаем ОК. Аналогично копируем по *X-Z plane (Y)*.

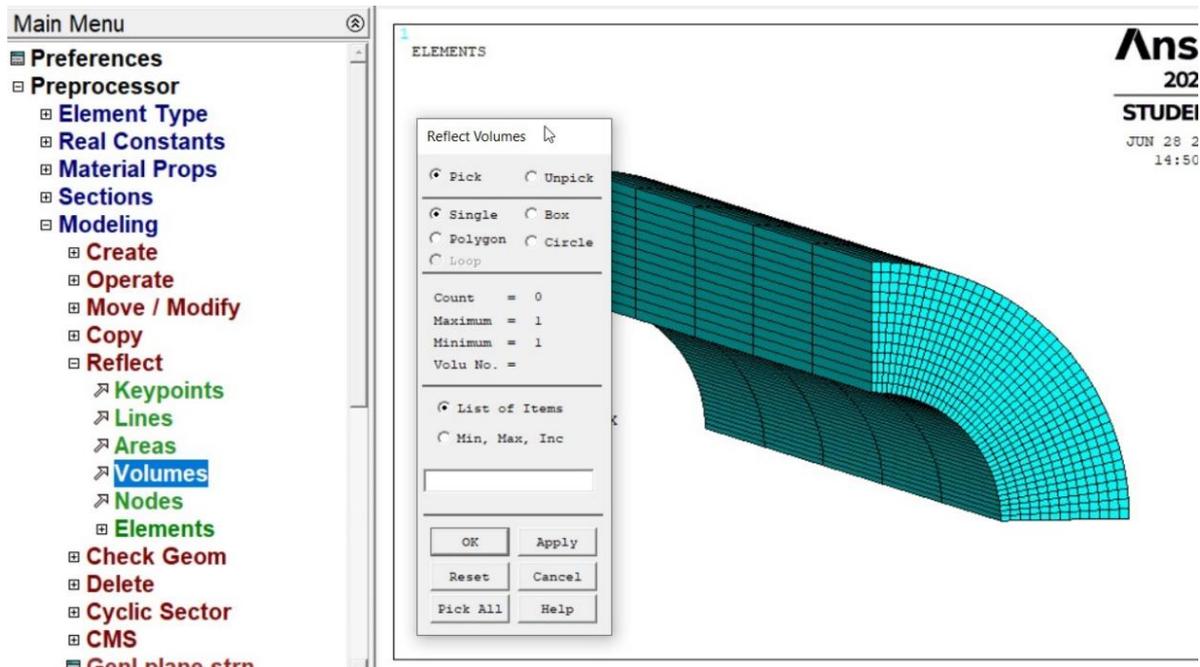


Рис.21. Выбор объемов для «отзеркаливания»

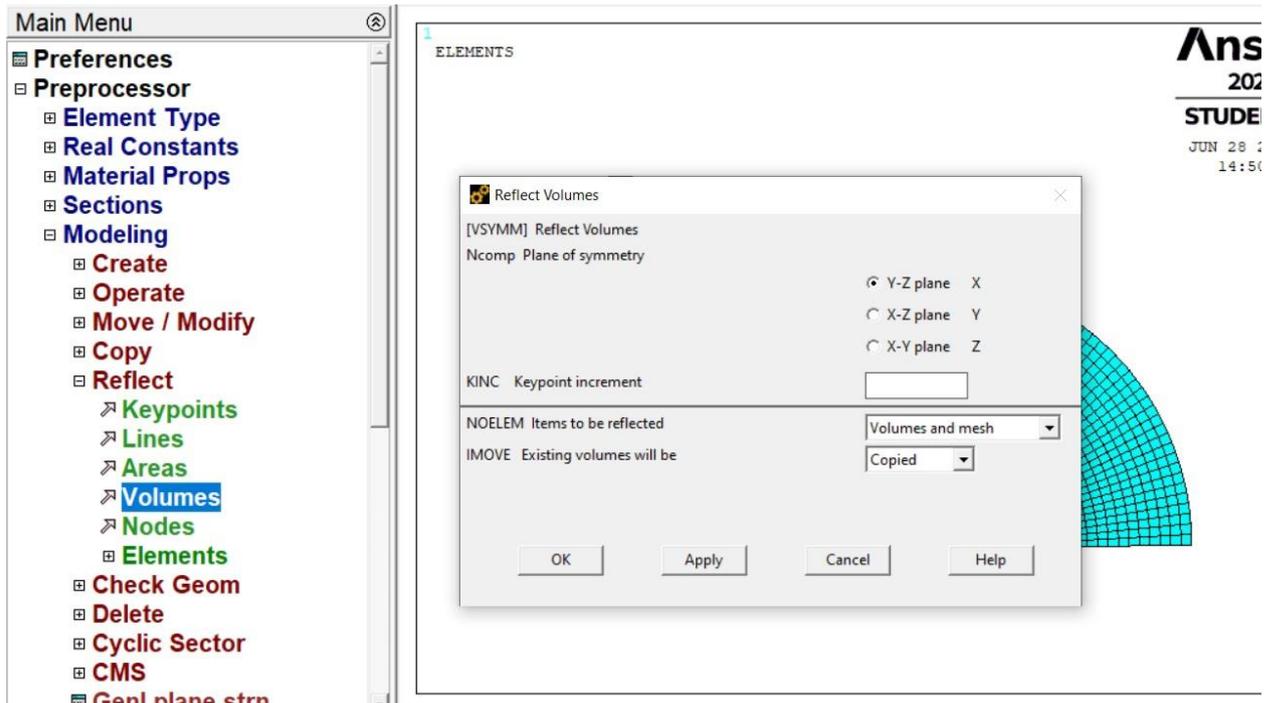


Рис.22. Настройка операции «отзеркаливания». Шаг 1

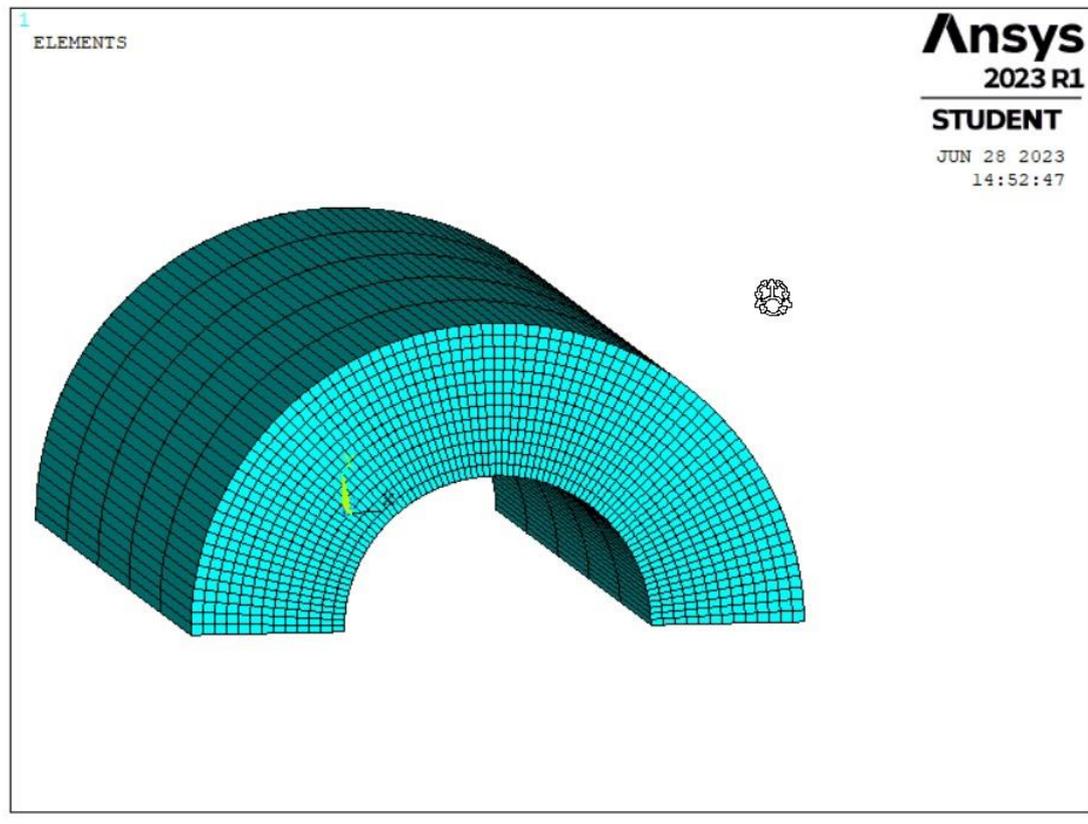


Рис.23. Результат «отзеркаливания». Шаг 1

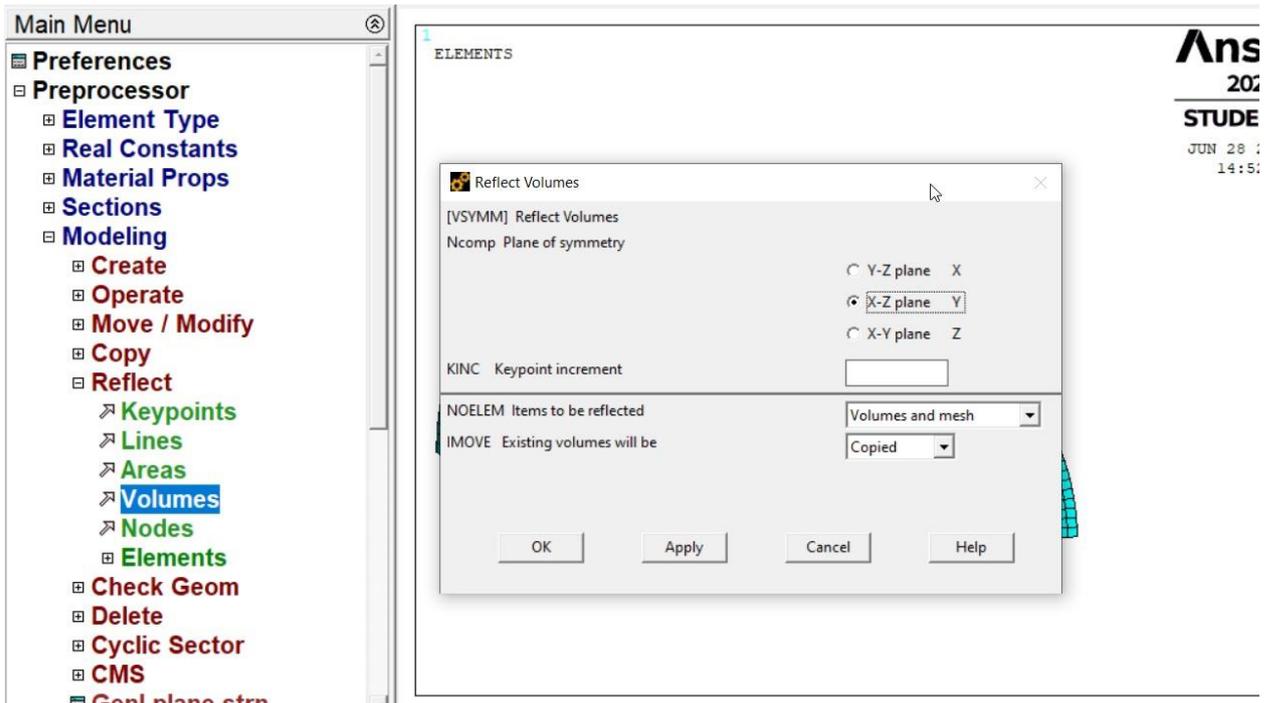


Рис.24. Настройка операции «отзеркаливания». Шаг 2



Рис.25. Результат «отзеркаливания». Шаг 2

Теперь необходимо объединить модель в единое целое. Для этого переходим в *Preprocessor > Numbering Ctrls > Merge items*, в открывшемся окне в строке *Label* выбираем *All* и нажимаем ОК.

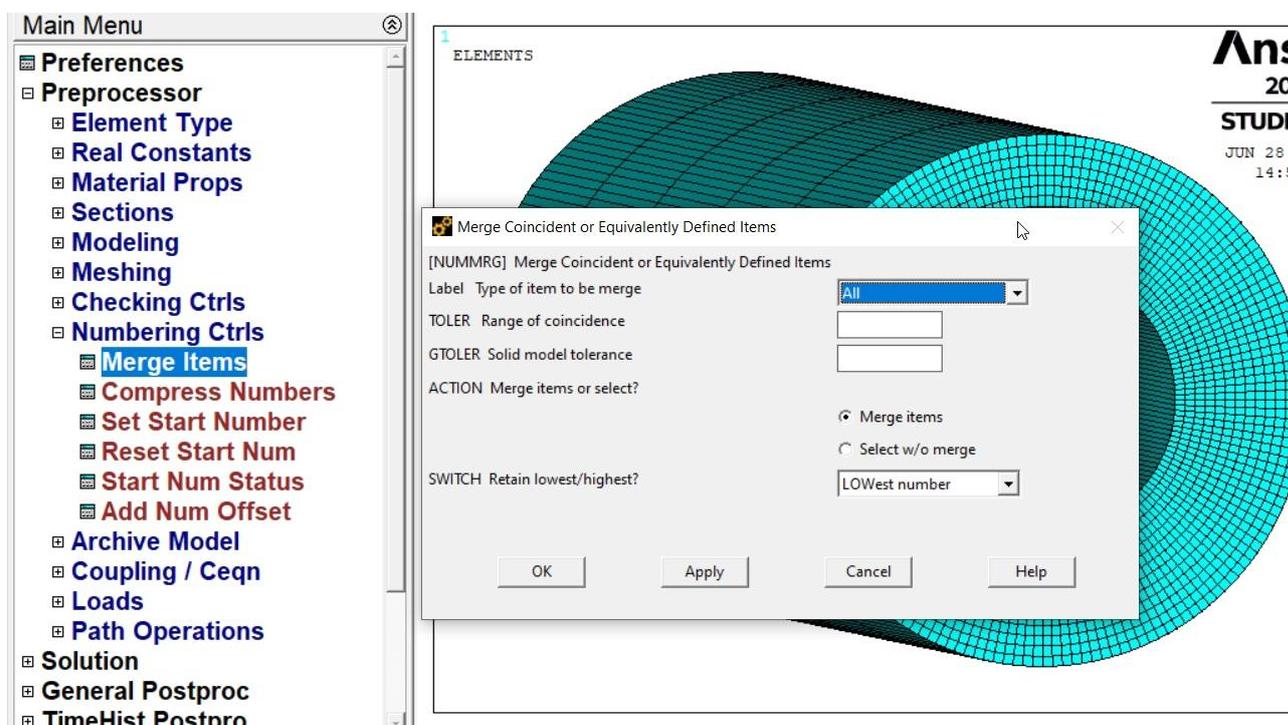


Рис.26. Настройки параметров операции «склейки».

Создание закреплений

Для создания закреплений выбираем необходимые поверхности, для этого быстрее всего написать следующие команды в командной строке:

```
ASEL,S,LOC,X,0
```

Далее задаем закрепления этим поверхностям. Для этого переходим в *Preprocessor > Loads > Define loads > Apply > Structural > Displacement > On Areas*, в открывшемся окне нажимаем *Pick All*, в следующем окне выбираем *UY* и нажимаем *OK*.

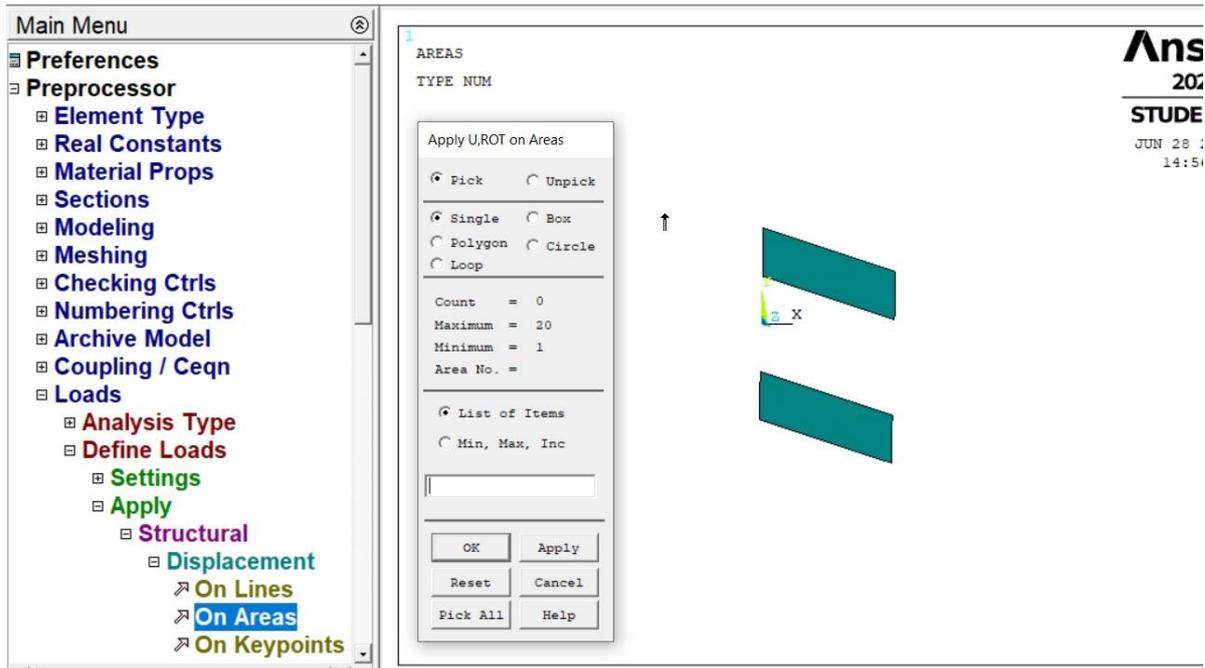


Рис.27. Выбор поверхностей для закрепления. Шаг 1

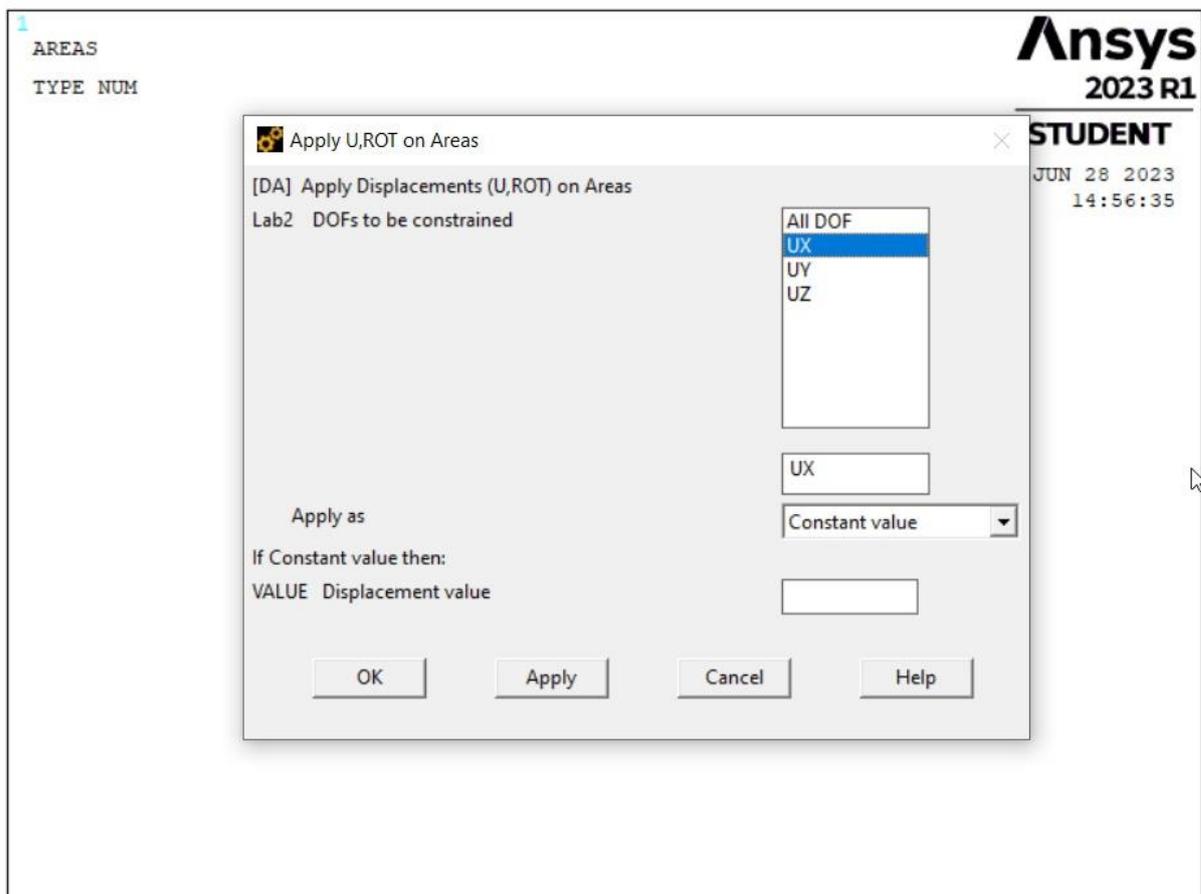


Рис.28. Закрепление выбранных поверхностей. Шаг 1

Далее аналогично выбираем и закрепляем другие поверхности из условия симметрии.

Команда выбора:

$ASEL,S,LOC,Y,0$

Закрепляем поверхности по Y (аналогично рассмотренному выше):

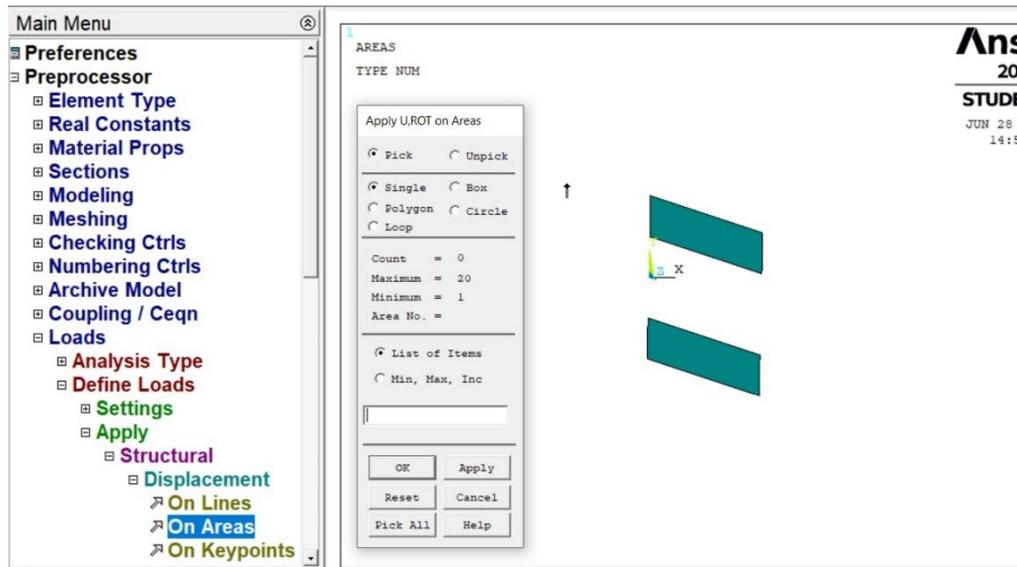


Рис.29. Выбор поверхностей для закрепления. Шаг 2

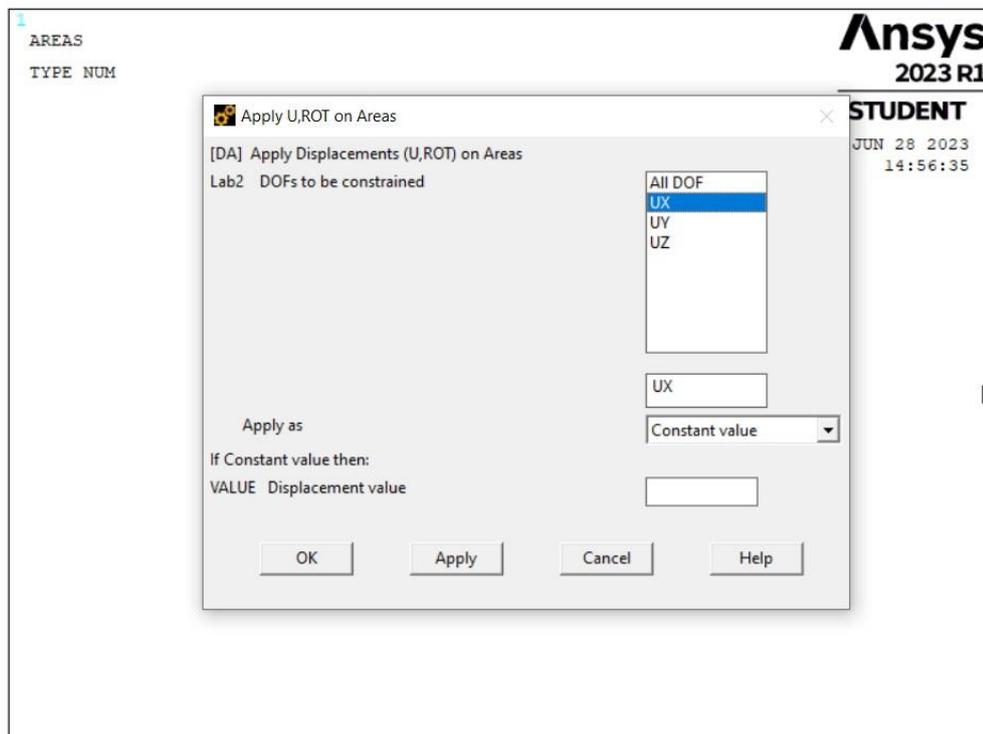


Рис.30. Закрепление выбранных поверхностей. Шаг 2

Далее выбираем следующую поверхность командой:

$ASEL,S,LOC,Z,0$

Закрепляем поверхности по Z. Затем выбираем поверхность на другом конце командой $ASEL,S,LOC,Z,0$ и также закрепляем ее по Z :

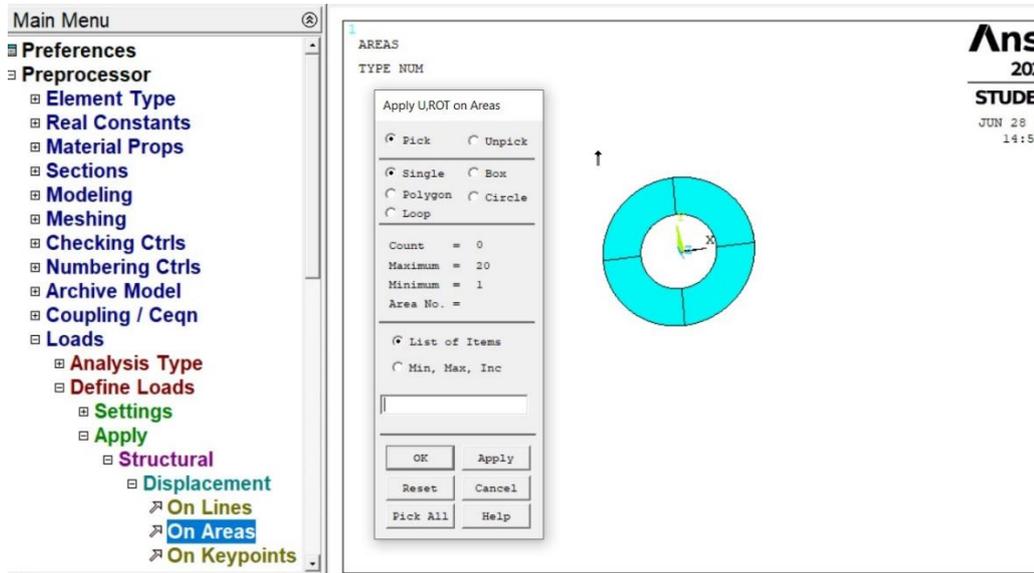


Рис.31. Выбор поверхностей для закрепления. Шаг 3

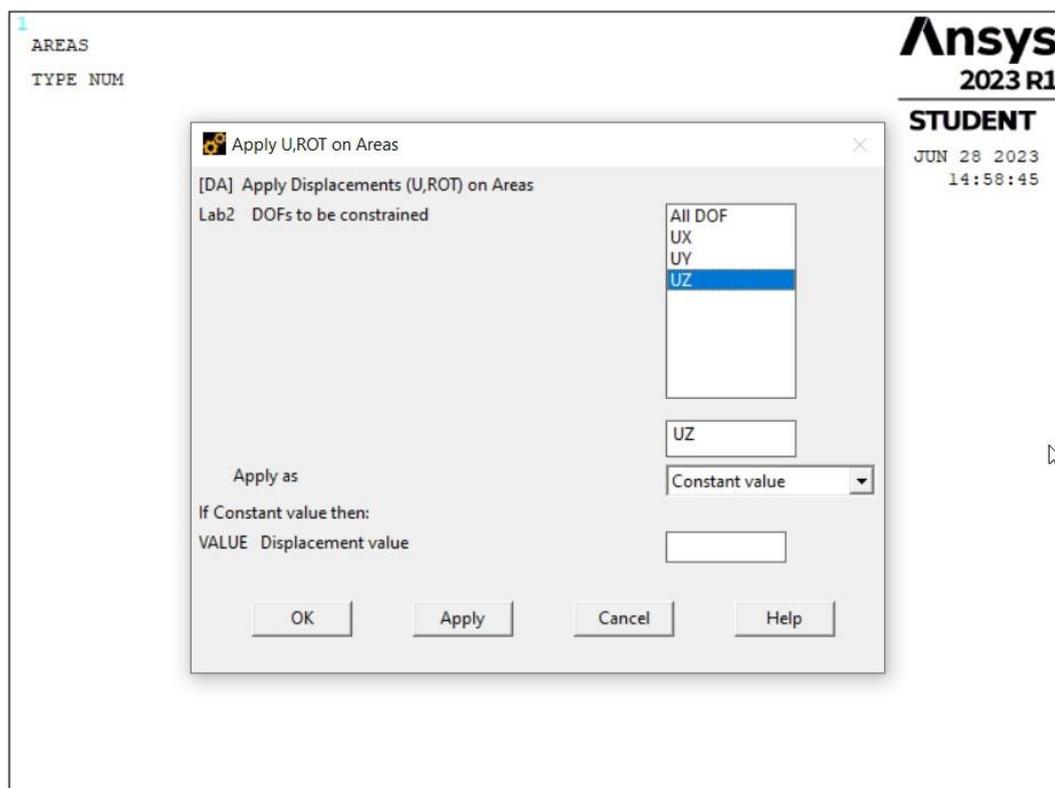


Рис.32. Закрепление выбранных поверхностей. Шаг 3

Создание загрузений

Для задания нагрузки необходимо перейти в цилиндрическую систему координат. Для этого в *Utility Menu* > *WorkPlane* > *Change Active CS to* > *Specified Coord Sys*, в открывшемся окне указываем *KCN – 1*. Нажимаем ОК.

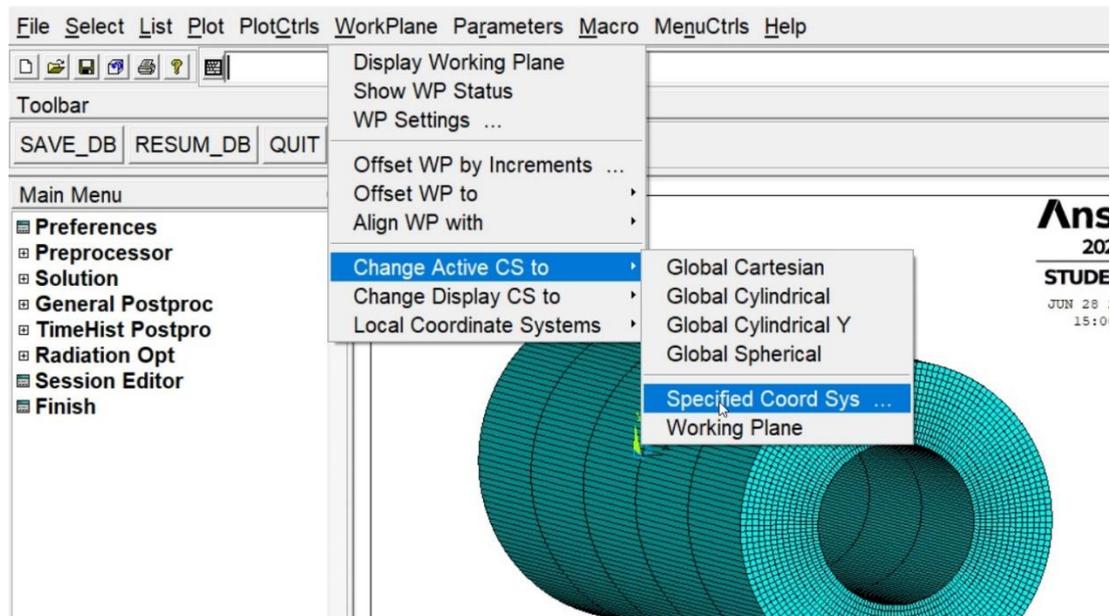


Рис.33. Выбор системы координат. Шаг 1

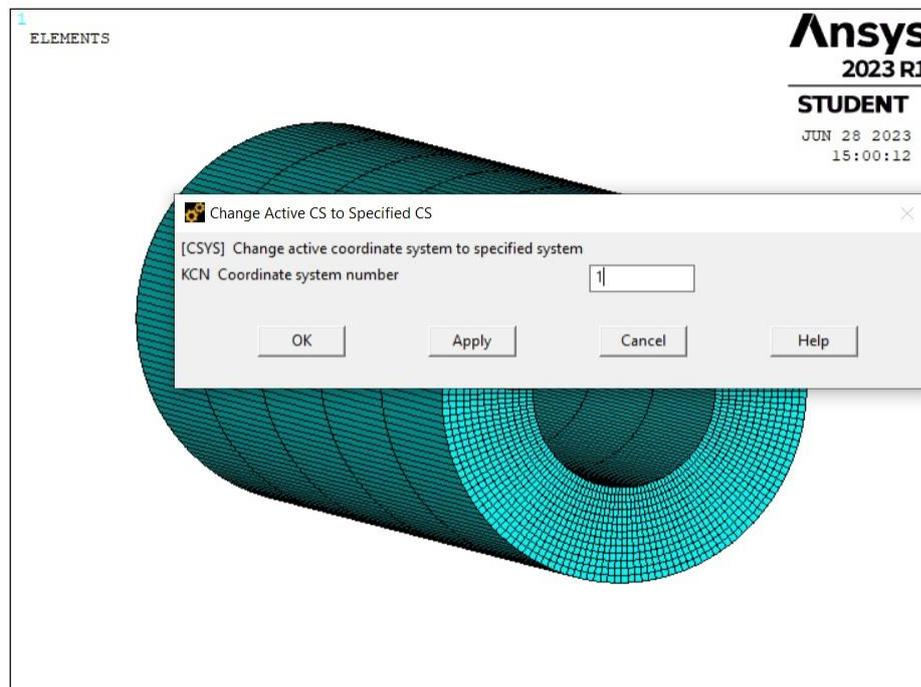


Рис.34. Выбор системы координат. Шаг 2

Задаем нагрузку в виде созданной в начале таблицы. Для этого сначала необходимо выбрать необходимую поверхность командой: $ASEL,S,LOC,X,R1$

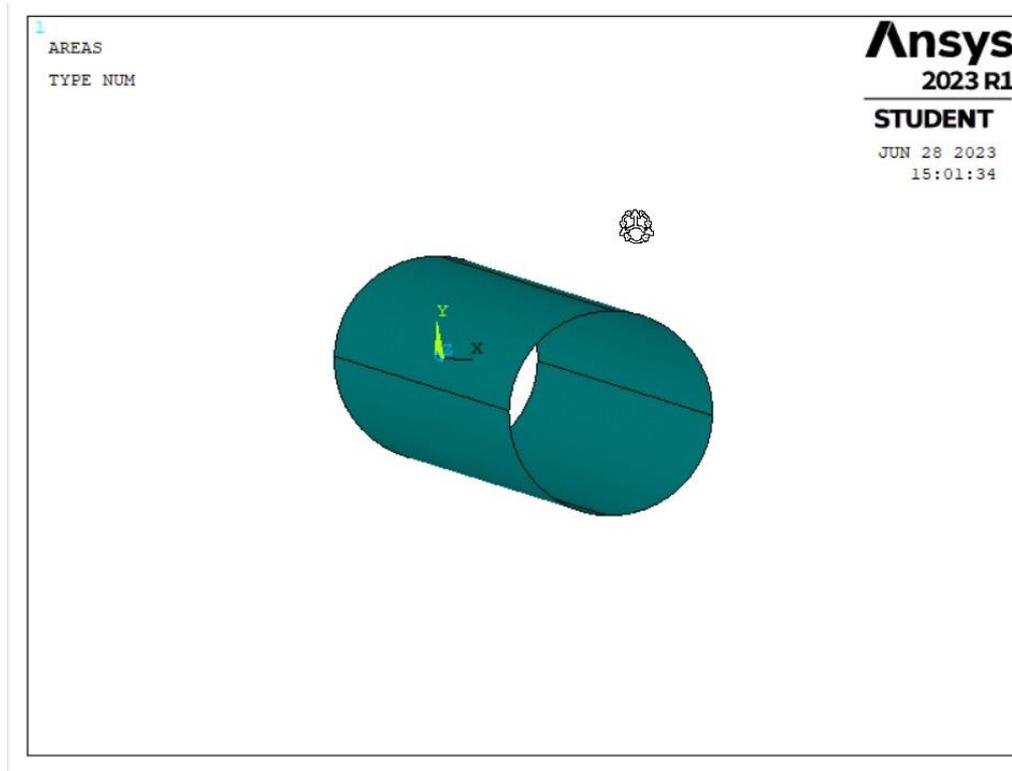


Рис.35. Выбор системы координат. Шаг 2

Далее переходим в *Preprocessor > Loads > Define loads > Apply > Structural > Pressure > On AREAS*, в открывшемся окне нажимаем *Pick All*.

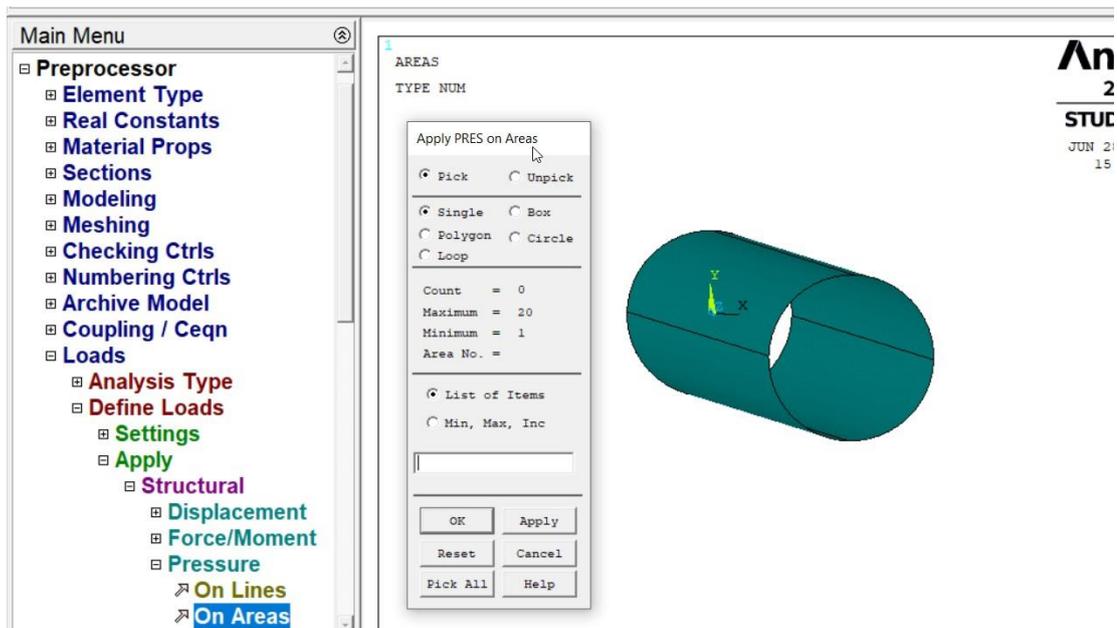


Рис.36. Выбор системы координат. Шаг 2

В следующем окне в строке *SFA* выбираем *Existing table*, в строке *LKEY* указываем *1*, нажимаем ОК.

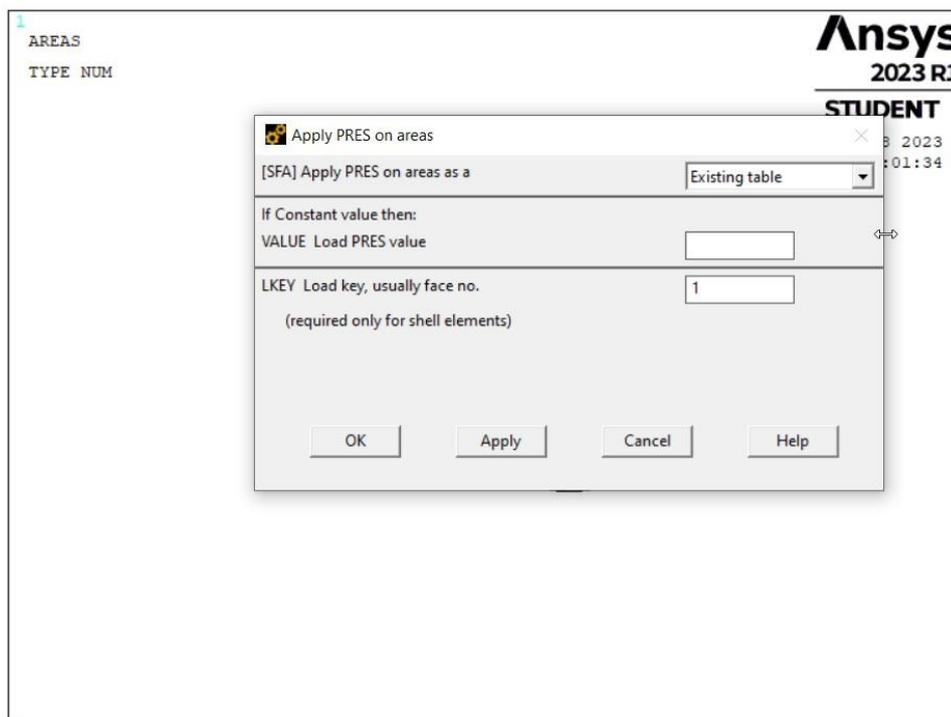


Рис.37. Выбор системы координат. Шаг 2

В следующем окне выбираем созданную таблицу. Нажимаем ОК.

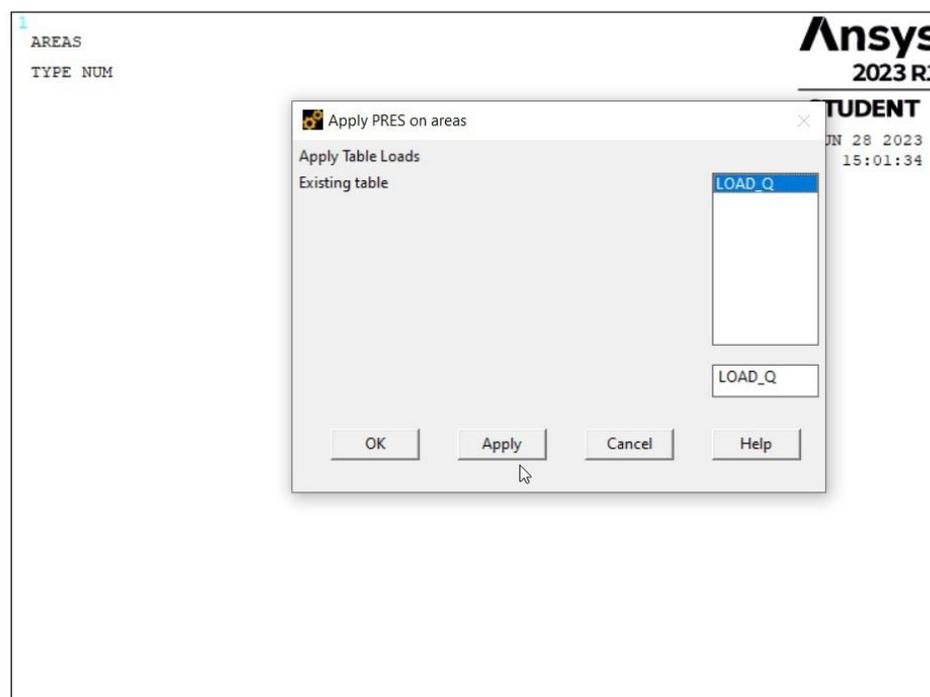


Рис.38. Выбор системы координат. Шаг 2

Решение

Переходим в *Solution > Analysis Type > Sol'n Controls*, в открывшемся окне выбираем следующие параметры расчета:

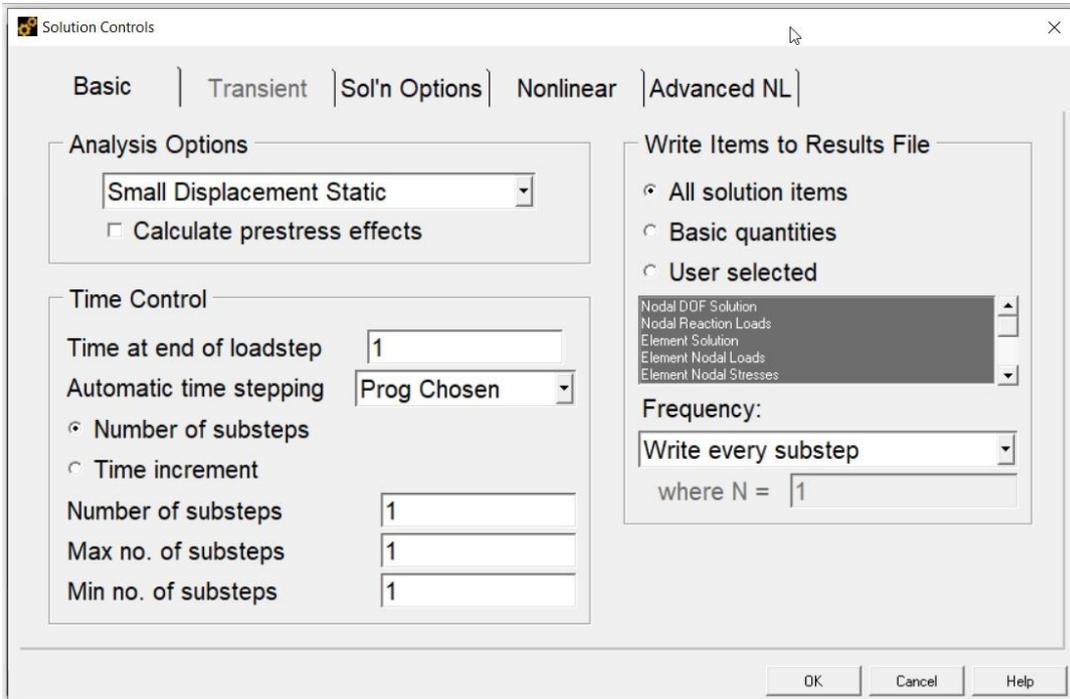


Рис.39. Настройки решения (1-ый этап расчета)

Нажимаем ОК. Запускаем расчет. Переходим в *Solution > Solve > Current LS*, в открывшемся окне нажимаем ОК.

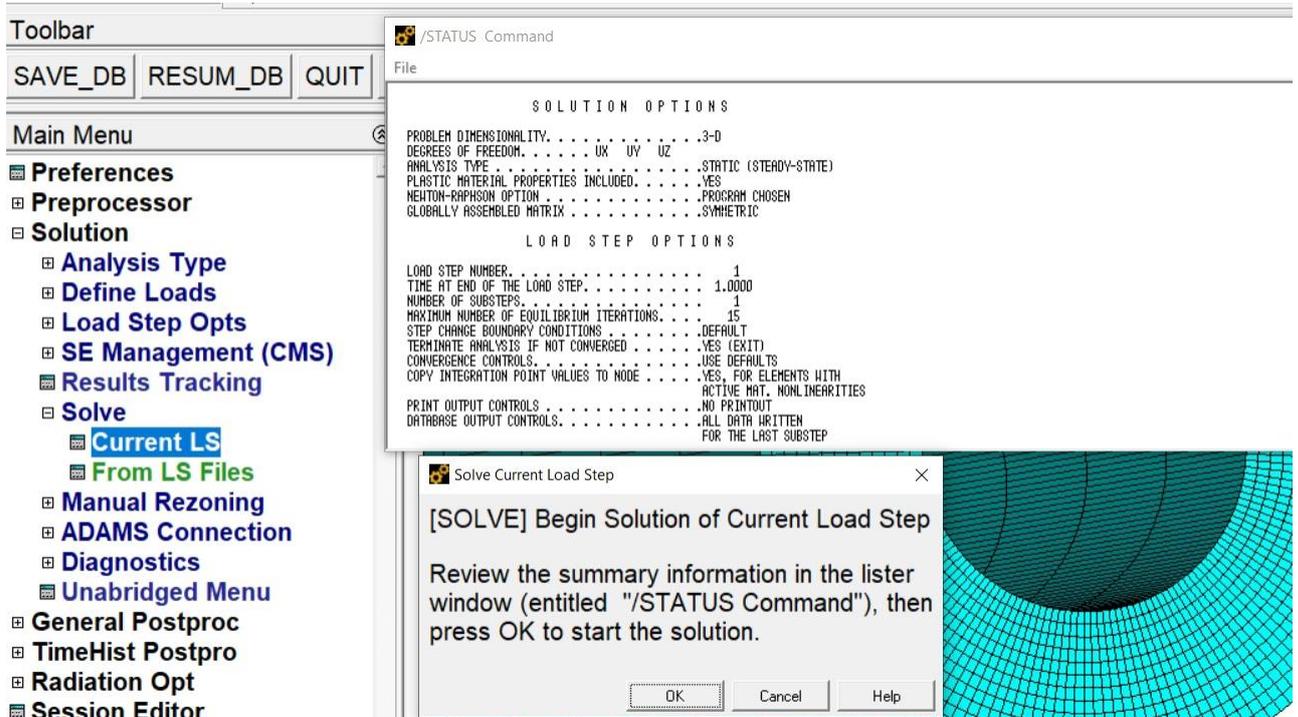


Рис.40. Запуск задачи на расчет

После окончания первого расчета, в том же окне, выбираем параметры для второго расчета, и запускаем его как описано выше:

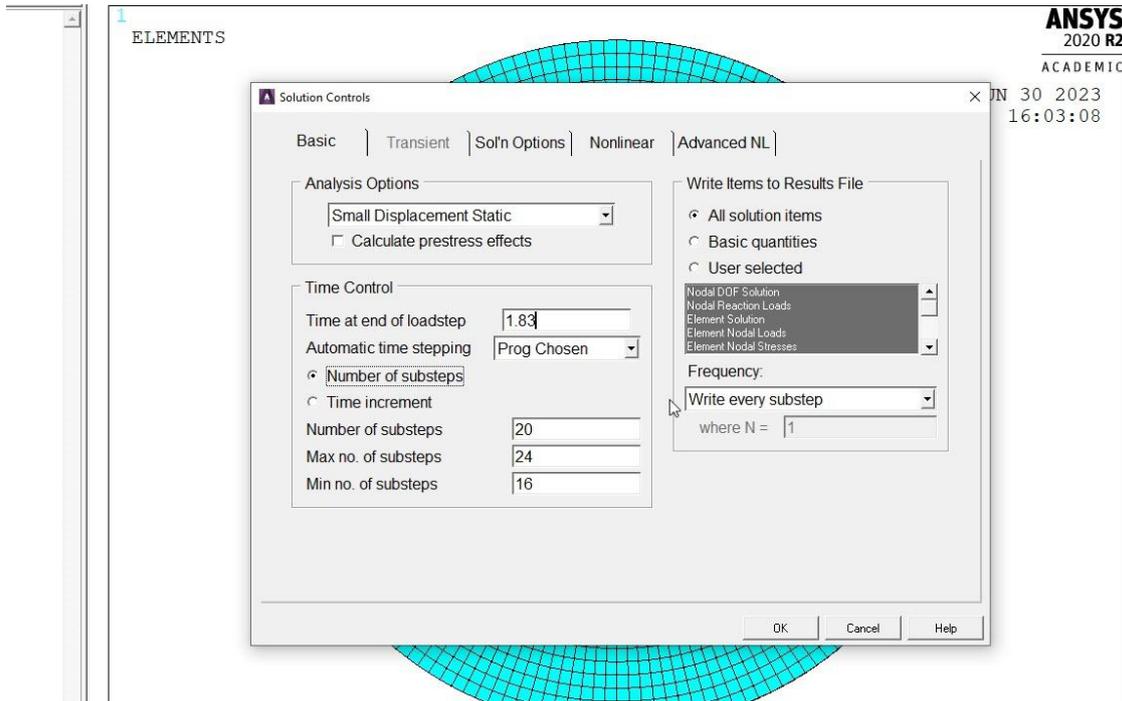


Рис.41. Настройки решения (2-ой этап расчета)

Далее выставляем параметры для третьего расчета и запускаем его:

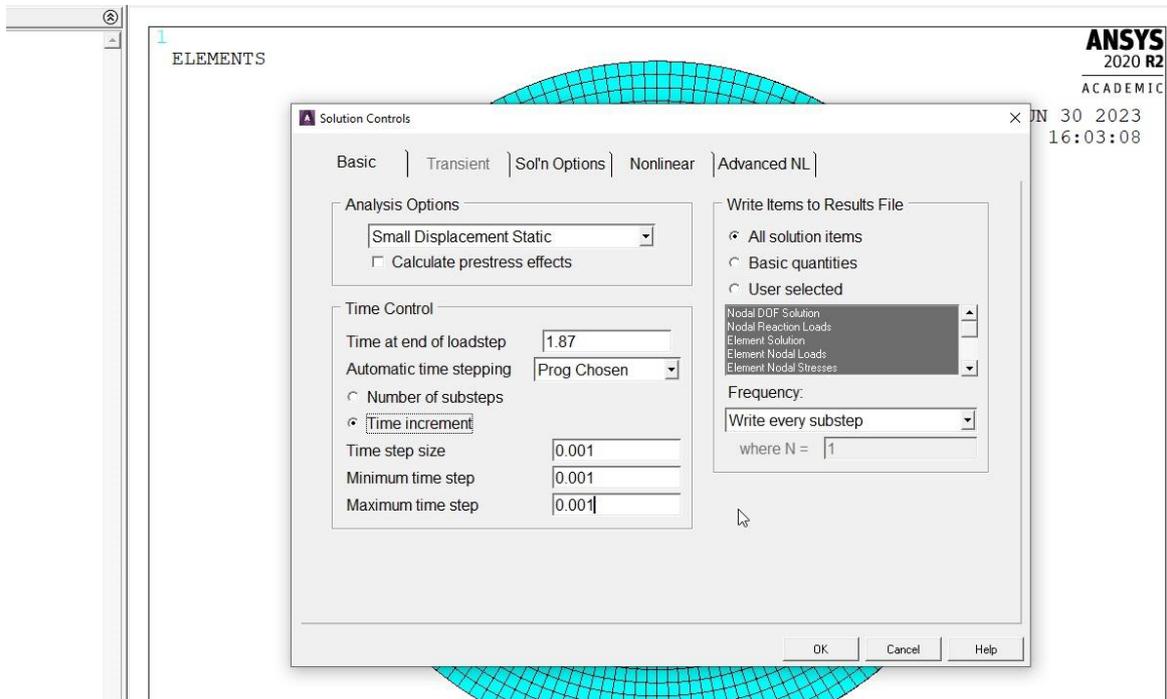


Рис.42. Настройки решения (3-ий этап расчета)

Вывод результатов

Для вывода результатов необходимо выбрать результат в момент перед разрушением. Для этого переходим в *General Postproc > Read Results > By pick*, затем выбираем момент времени 1.83 и нажимаем *Read*.

Также для отображения результатов в цилиндрической системе координат необходимо прописать команду:

RSYS,1

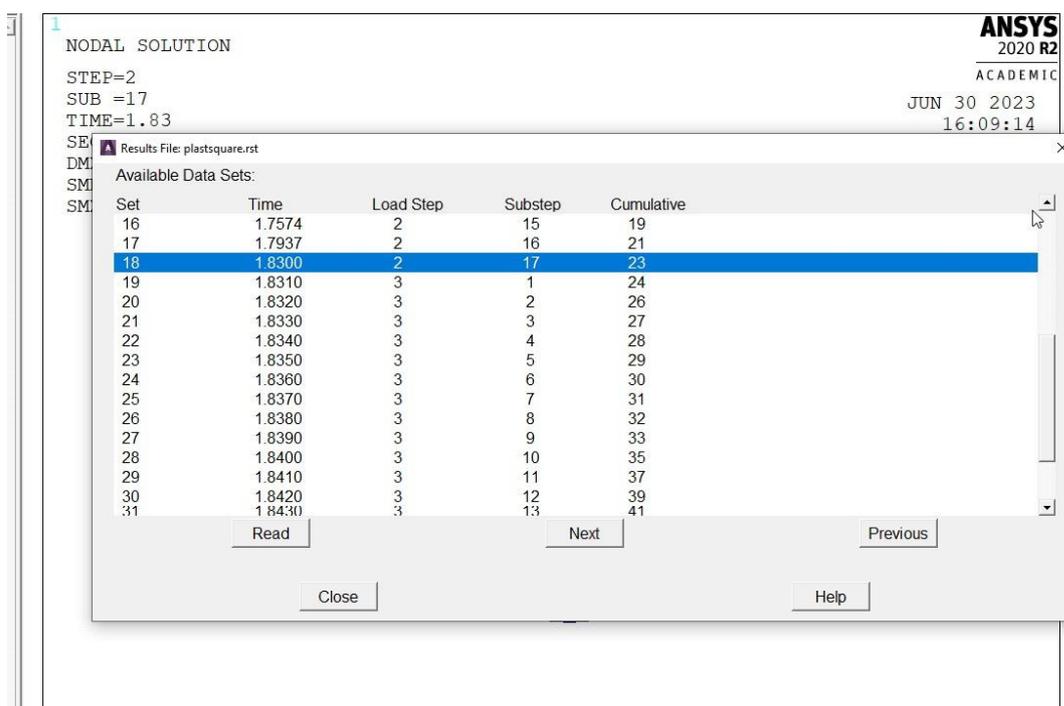


Рис.43. Выбор шага расчета для отрисовки результатов

Далее переходим в *General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu*, в открывшемся окне выбираем *Stress > von Mises stress* и нажимаем *APPLY*.

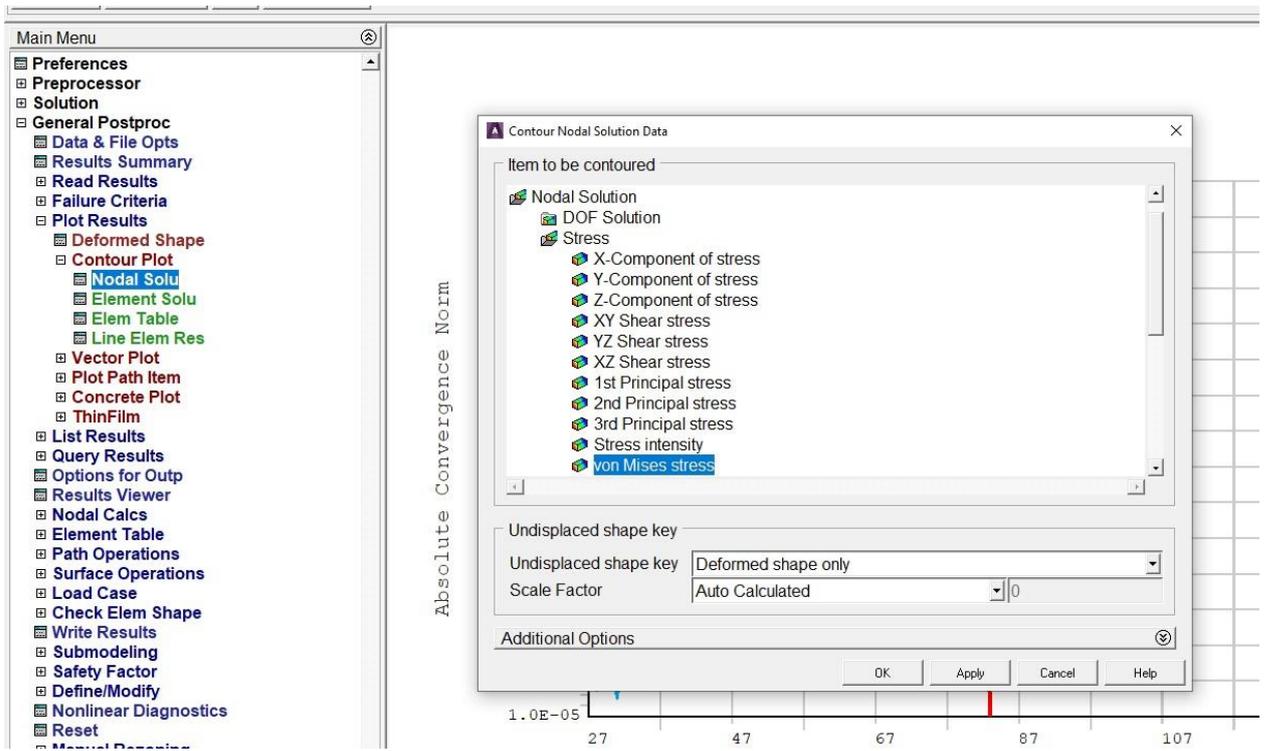


Рис.44. Выбор для отрисовки напряжений по Мизесу

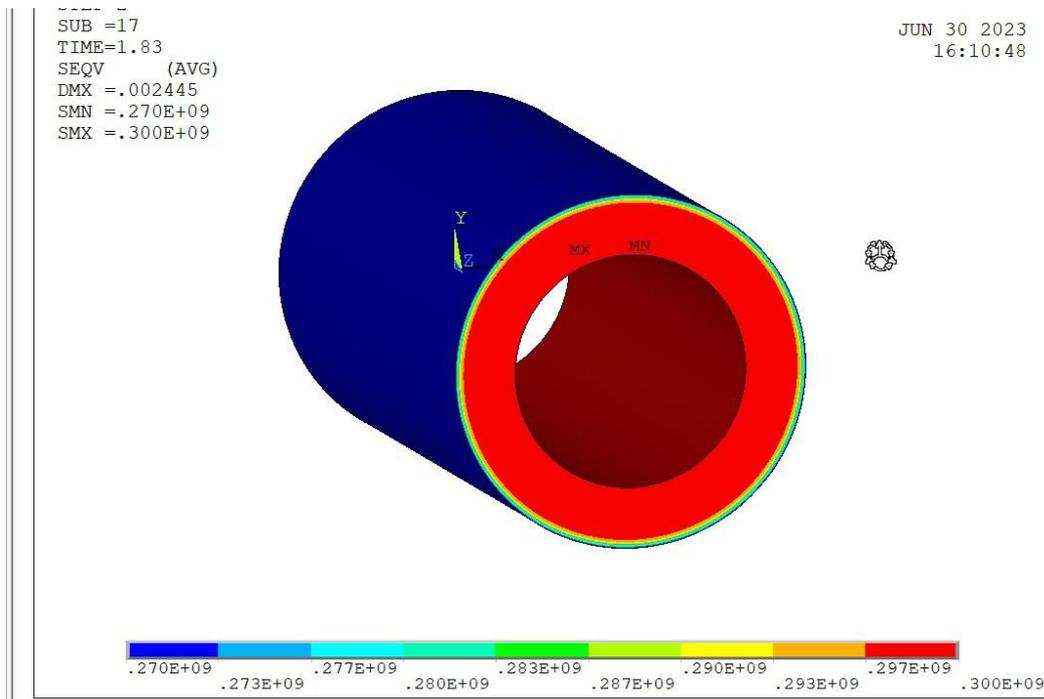


Рис.45. Изополя напряжений по Мизесу, Па

Также отрисуем радиальные и угловые напряжения выбором X-Component of Stress и Y-Component of Stress соответственно.

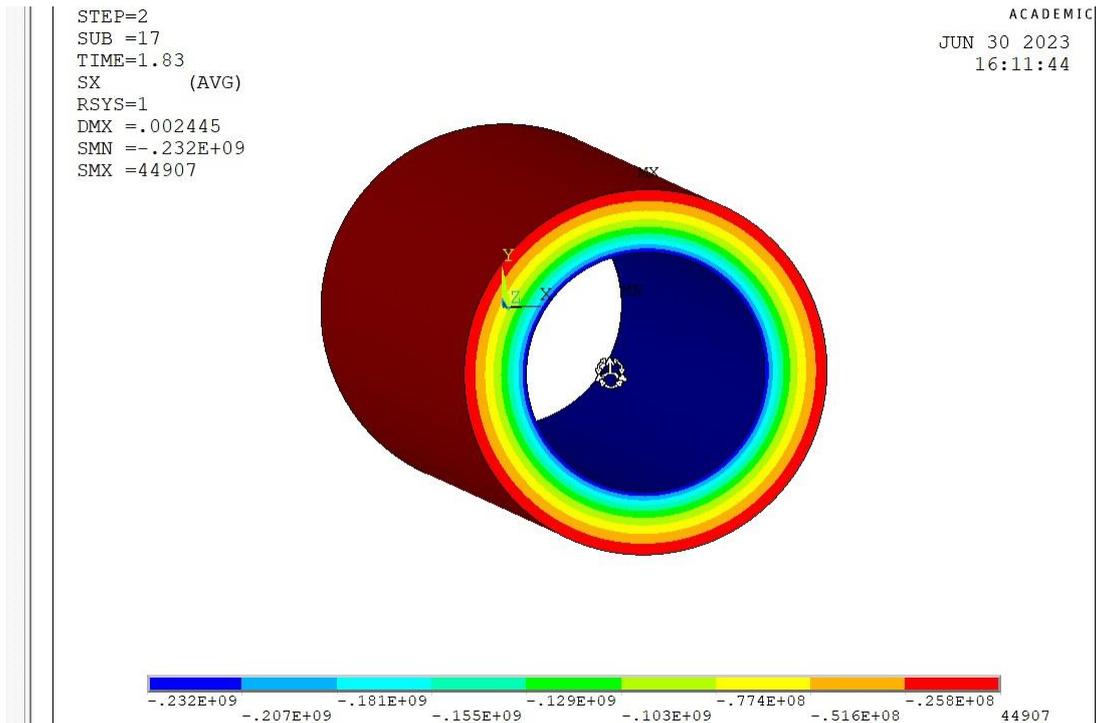


Рис.46. Изополя радиальных напряжений, Па

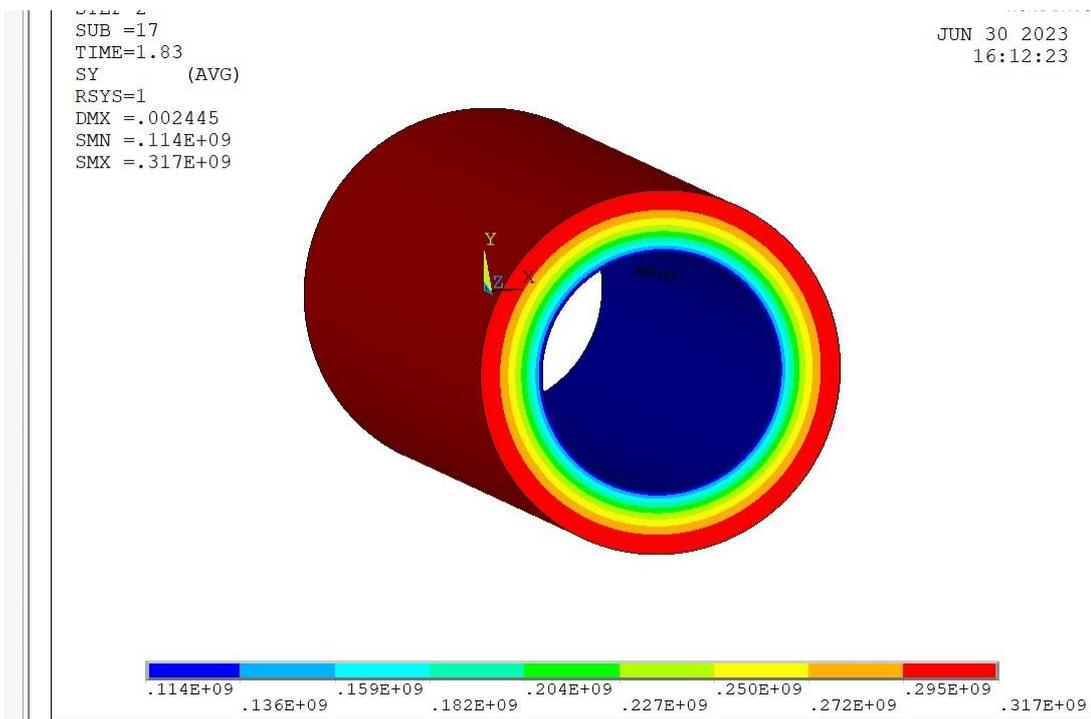


Рис.47. Изополя угловых напряжений, Па

Далее, в том же окне *Contour Nodal Solution Data* выбираем *Plastic Strain*
 > *von Mises plastic strain* и нажимаем *APPLY*.

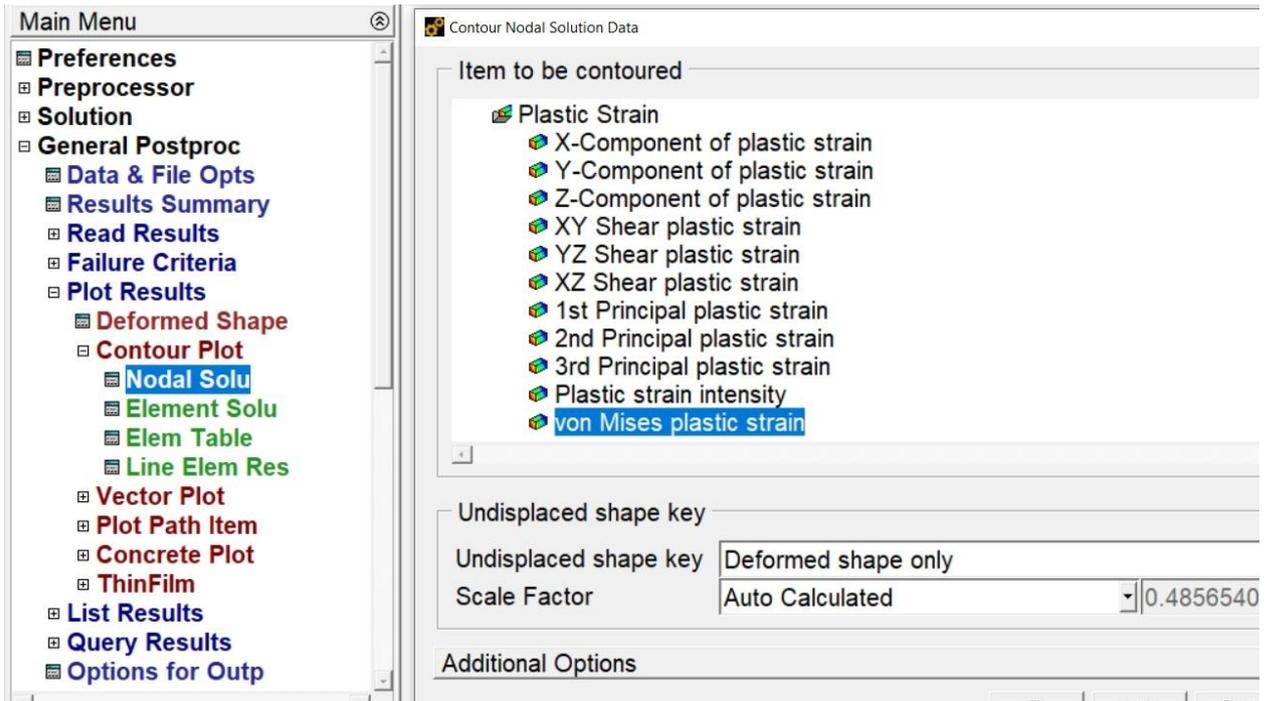


Рис.48. Выбор пластических деформаций по Мизесу

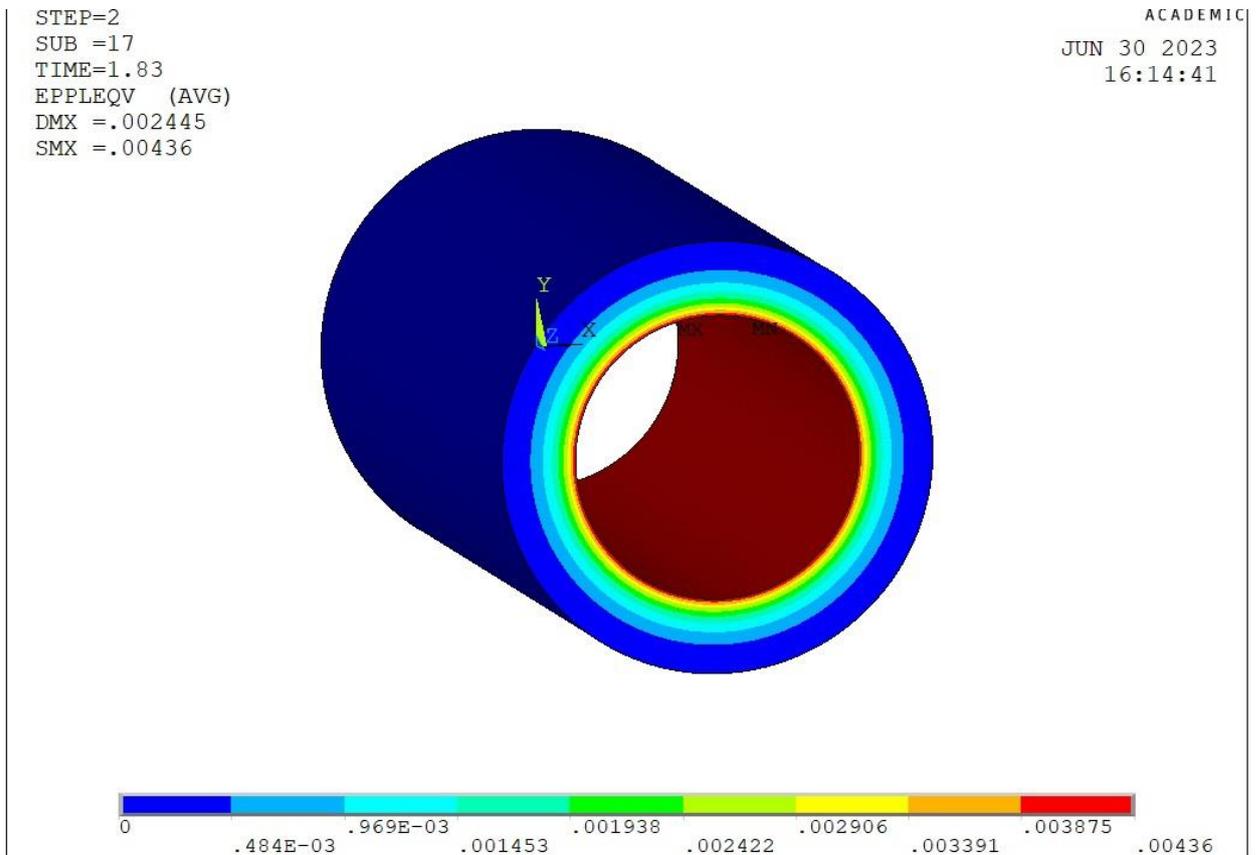


Рис.49. Пластические деформации по Мизесу

Далее рисуем график радиальных перемещений точки сечения. Для этого переходим в *TimeHist Postpro*, в открывшемся окне нажимаем на значок “+” в левом верхнем углу (*add data*). В следующем окне выбираем *DOF Solution > X component of displacement*, нажимаем ОК, далее выделяем любую точку сечения и нажимаем ОК.

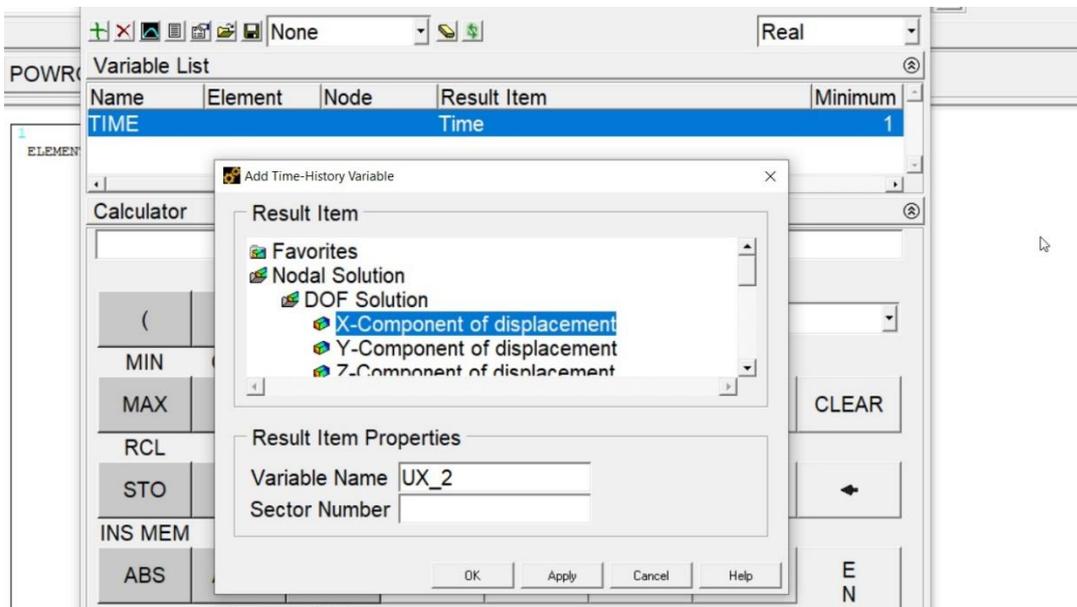


Рис.50. Выбор радиальных перемещений для отрисовки графика

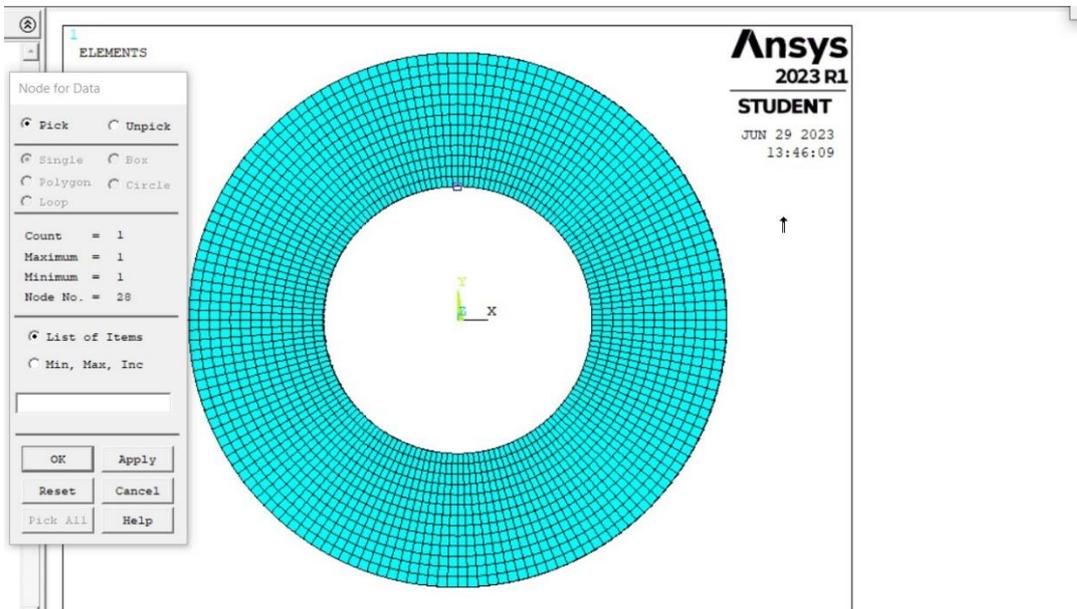


Рис.51. Выбор узла на внутреннем радиусе для отрисовки графика радиальных перемещений

Затем нажимаем *Data properties* (5 иконка в левом верхнем углу), в открывшемся окне переходим во вкладку *X-Axis* и назначаем следующие параметры:

- *Range of Values – Specified*
- *Min – 1*
- *Max – 1.83*

Нажимаем ОК.

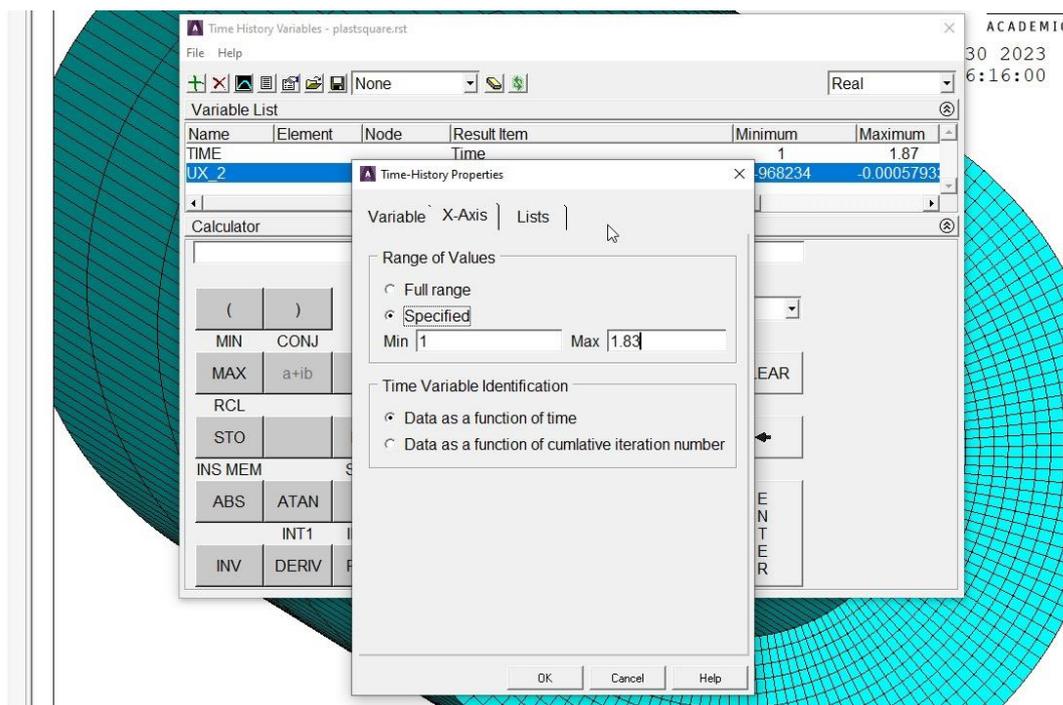


Рис.52. Настройки оси абсцисс для отрисовки графика радиальных перемещений

Для отображения графика нажимаем *Graph Data* (иконка с графиком слева вверху).

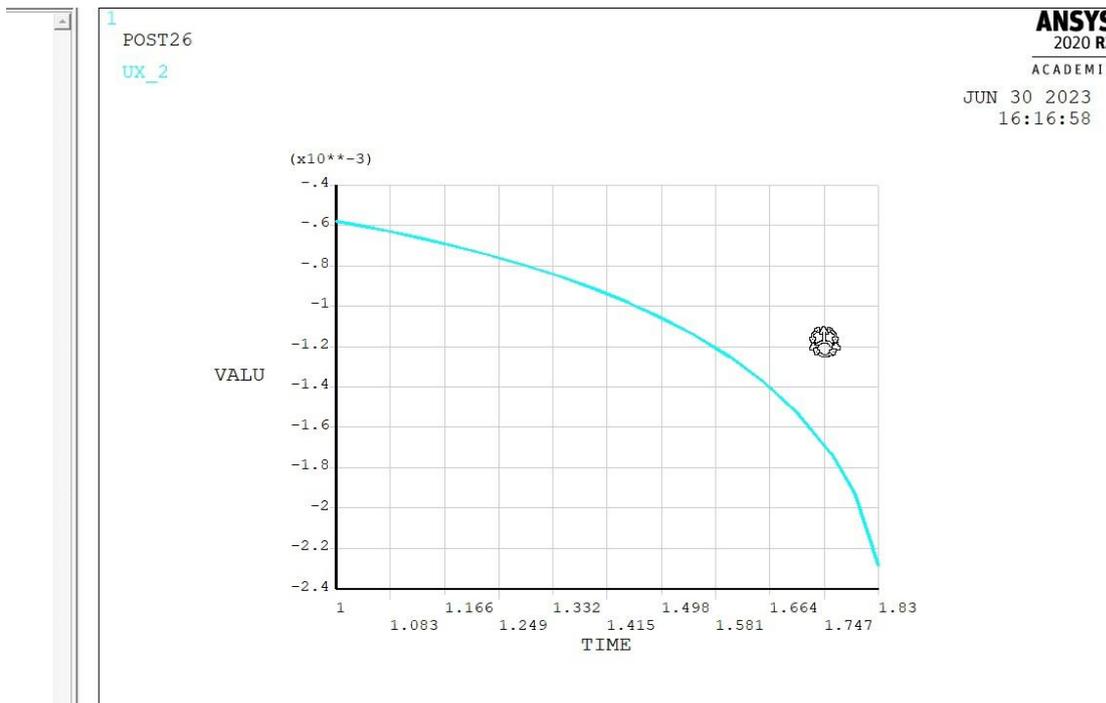


Рис.53. Графика радиальных перемещений, м

Заключение

В работе был проведен расчёт коэффициента запаса прочности толстостенной трубы при упруго-пластическом состоянии двумя способами: аналитическим и численным. В случае аналитического решение значение коэффициента равно 1.85, при численном моделировании в ПК Ansys — 1.846.

Погрешность численного решения составляет: $\frac{|1.846-1.85|}{1.85} \cdot 100\% = 0.2\%$.

Код программы

FINISH

/CLEAR

/PREP7

! Вход в препроцессор

! Задание исходных данных

R1=0.5

R2=1

H=5

K=1.85

! Параметр "времени"

ST=300E6

! Предел пластичности по Мизесу

$Q=(ST*(R2**2-R1**2))/(1.73*R2**2)$

! Предельная нагрузка

! Создание таблицы нагрузок

*DIM,LOAD_Q,TABLE,3,1,1,TIME

LOAD_Q(1,0)=0.0,1,K

LOAD_Q(1,1)=Q,Q,K*Q

! Задание параметров материала

ET,1,186

MP,EX,1,2E11

MP,PRXY,1,0.3

TB,BISO,1

! Билинейный изотропный

TBDATA,,ST,0

! Предел текучести и тангенциальный модуль

! Создание геометрии

CYLIND,R1,R2,0,H,0,90

! Разбивка сетки

ESIZE,MIN((R2+R1)/2*3.14/2/30,(R2-R1)/5)

LSEL,S,LOC,Z,H/2

LESIZE,ALL,,5

MSHKEY,1

VMESH,ALL

! Симметричное копирование по X и Y

CSYS,0

VSYM,X,ALL,,,0,0

VSYM,Y,ALL,,,0,0

NUMMRG,ALL

! Создание закреплений

ASEL,S,LOC,X,0

DA,ALL,UX

ASEL,S,LOC,Y,0

DA,ALL,UY

ASEL,S,LOC,Z,0

DA,ALL,UZ

ASEL,S,LOC,Z,H

DA,ALL,UZ

! Создание загрузений

CSYS,1

! Переход в цилиндрическую систему

ASEL,S,LOC,X,R1

SFA,ALL,1,PRES,%LOAD_Q%

! Создание распределенной нагрузки

! в виде таблицы

ALLSEL

! Решение

/SOLU

ANTYPE,0

TIME,1

! Время

NSUBST,1,1,1 !Количество итераций, среднее/максимальное/минимальное

OUTRES,ERASE

! Вывод результатов

OUTRES,ALL,1

SOLVE

TIME,1.83

NSUBST,20,24,16

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,1

SOLVE

TIME,1.87

DELTIM,0.001,0.001,0.001

! Шаг по времени

OUTRES,ERASE

OUTRES,ALL,1

SOLVE

Практическая работа №4

Расчет конструкций с учетом геометрической нелинейности

(Учет натяжения при поперечном изгибе жестко
защемленной с двух сторон балки)

Методические указания к выполнению практической работы 4

Для создания расчётной модели будем использовать препроцессор Ansys Mechanical APDL.

После запуска Product Launcher появится окно:

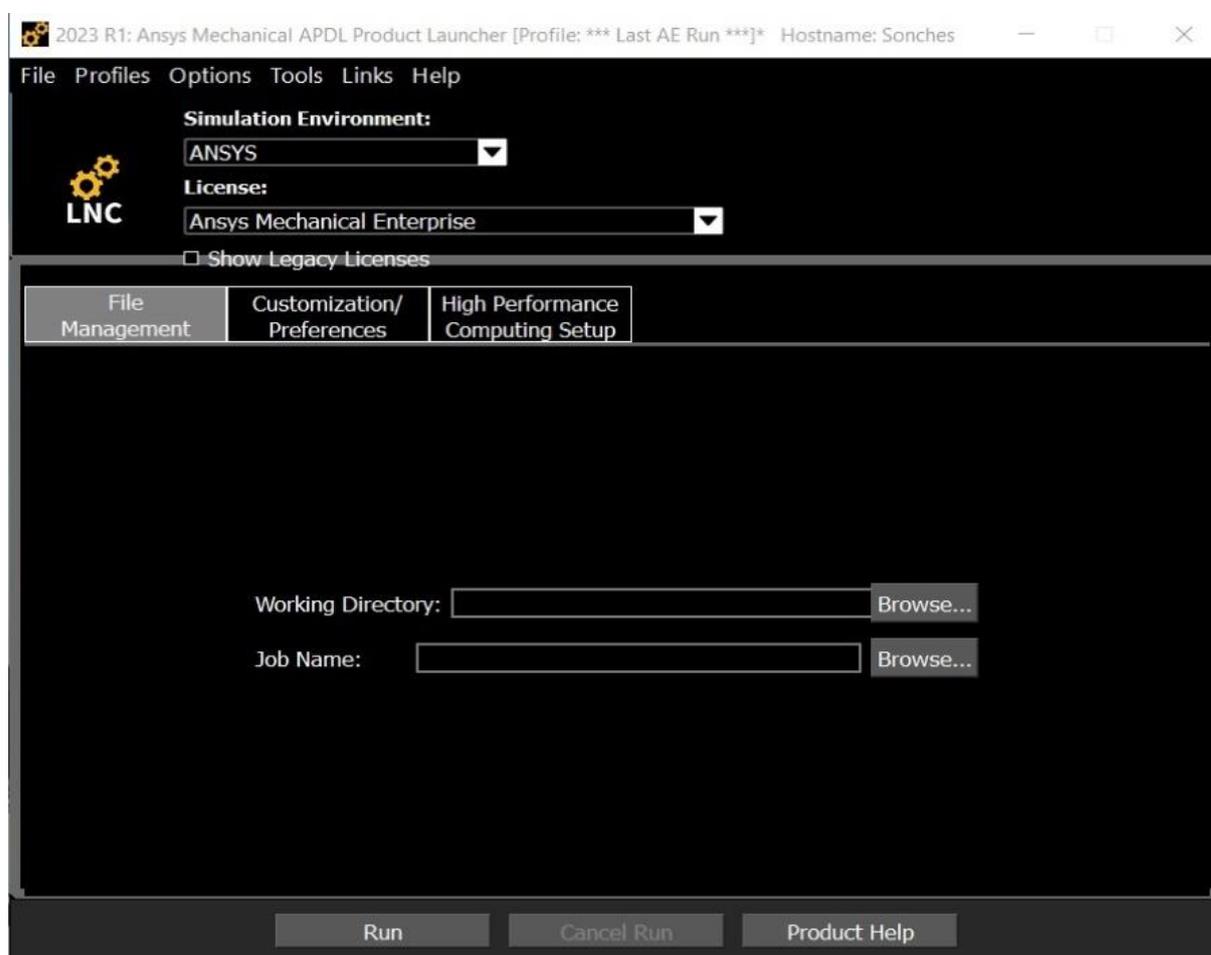


Рис.1. Окно запуска программного комплекса ANSYS Mechanical

Рядом с окном *Working Directory* нажать кнопку «Browse...» и выбрать свою рабочую директорию. В этой директории ANSYS будет сохранять все файлы. Директория должна быть создана заранее. В именах директории и пути к директории допускаются только латинские буквы. Рядом с окном *Job Name* задаем имя файла.

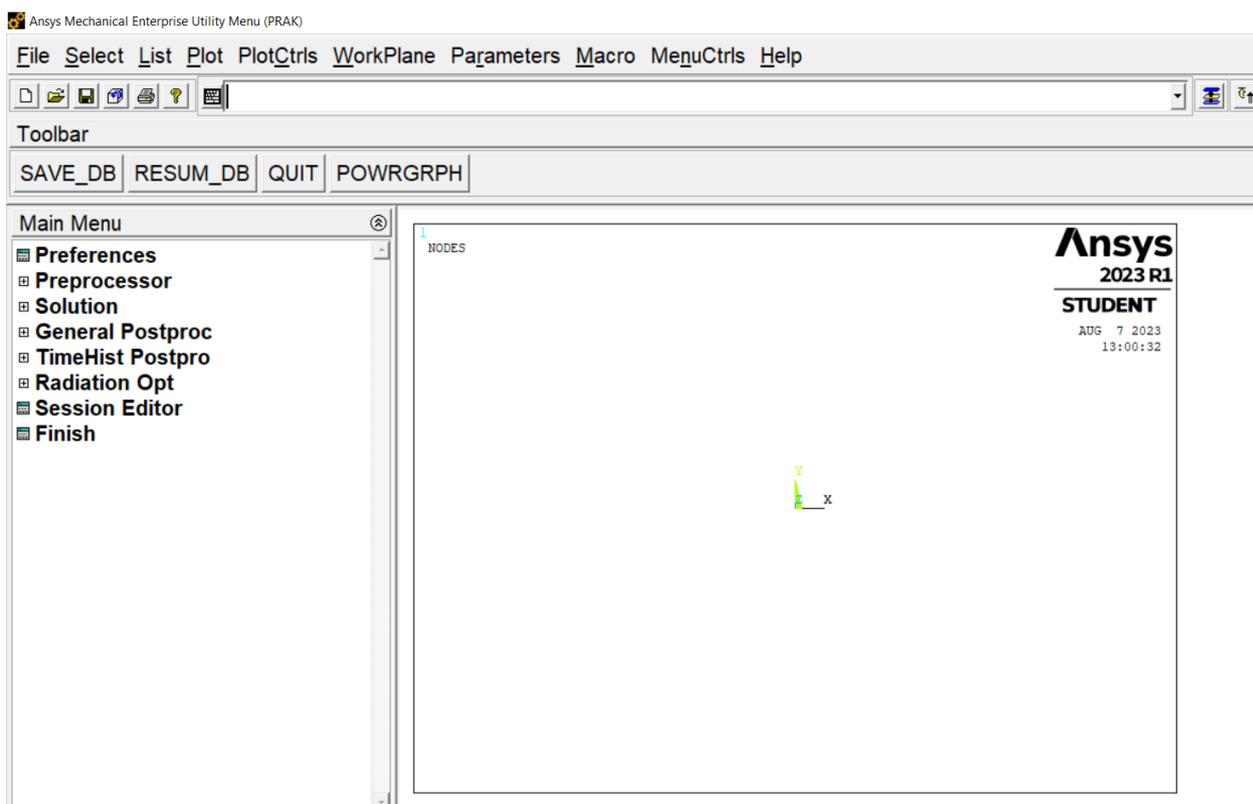


Рис.2. Рабочее окно программного комплекса ANSYS Mechanical

Выполним расчёт однопролётной жестко защемленной с двух сторон балки квадратного сечения длиной l , на верхнюю поверхность которой действует равномерно распределённая нагрузка интенсивности q . Расчётная схема балки имеет следующий вид:

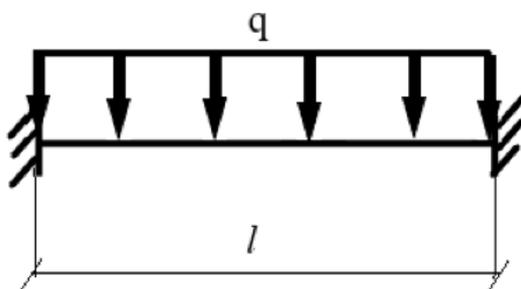


Рис.3. Схема балки

Исходные данные:

- длина балки $l = 10$ м;
- поперечное сечение балки – квадрат, длина ребра $h=0.2$ м;
- характеристики материал балки: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$;
- распределенная нагрузка $q = 2$ кН/м;

Аналитическое решение

При действии поперечной нагрузки, в жестко защемленном стержне будет возникать продольное усилие, которое так же вносит вклад в прогиб.

Рассматривая центр стержня, где прогиб будет наибольшим, и допуская случай, когда прогиб много меньше его толщины, внутреннее усилие можно вычислить как:

$$T = \frac{1}{945} * \frac{Sq^2a^6}{EI^2}, \text{ где } S - \text{ площадь сечения,}$$

I – момент инерции сечения,

a – расстояние от центра стержня до края,

а сам прогиб вычисляем как:

$$U = \frac{qa^4}{24*EI} * \left(1 - \frac{1}{9450} * \frac{Sq^2a^8}{E^2I^3} \right).$$

Следовательно,

$$T = \frac{1}{945} * \frac{0.2^2 * 2000^2 * 5^6}{2 * 10^{11} * \left(\frac{0.2^4}{12}\right)^2} = 744,1 \text{ Н;}$$

$$U = \frac{2000 * 5^4}{24 * 2 * 10^{11} * \left(\frac{0.2^4}{12}\right)} * \left(1 - \frac{1}{9450} * \frac{0.2^2 * 2000^2 * 5^8}{(2 * 10^{11})^2 * \left(\frac{0.2^4}{12}\right)^3} \right) = 1.953 * 10^{-3} \text{ м.}$$

Решение с помощью Ansys Mechanical APDL

1. Задание типов конечных элементов и их параметров

В *Main Menu* переходим в *Preprocessor* > *Element Type* > *Add/Edit/Delete* в открывшемся окне (*Element type*) нажимаем кнопку *Add*:

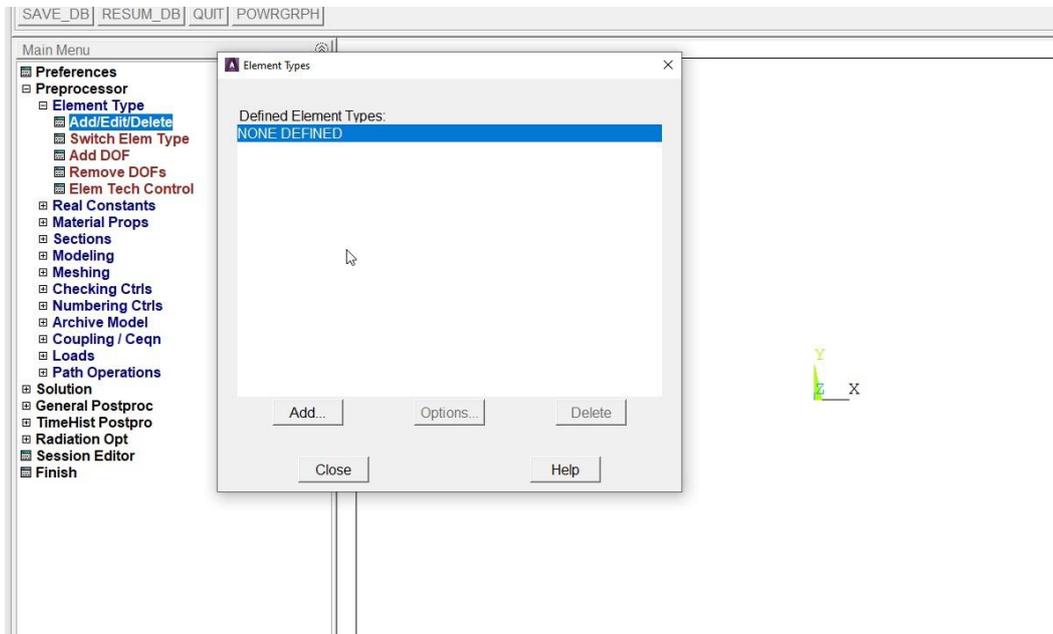


Рис.4. Окно *Element type*

В открывшемся окне в библиотеке элементов (*Library of element types*) выбираем *Beam – 2 node 188*.

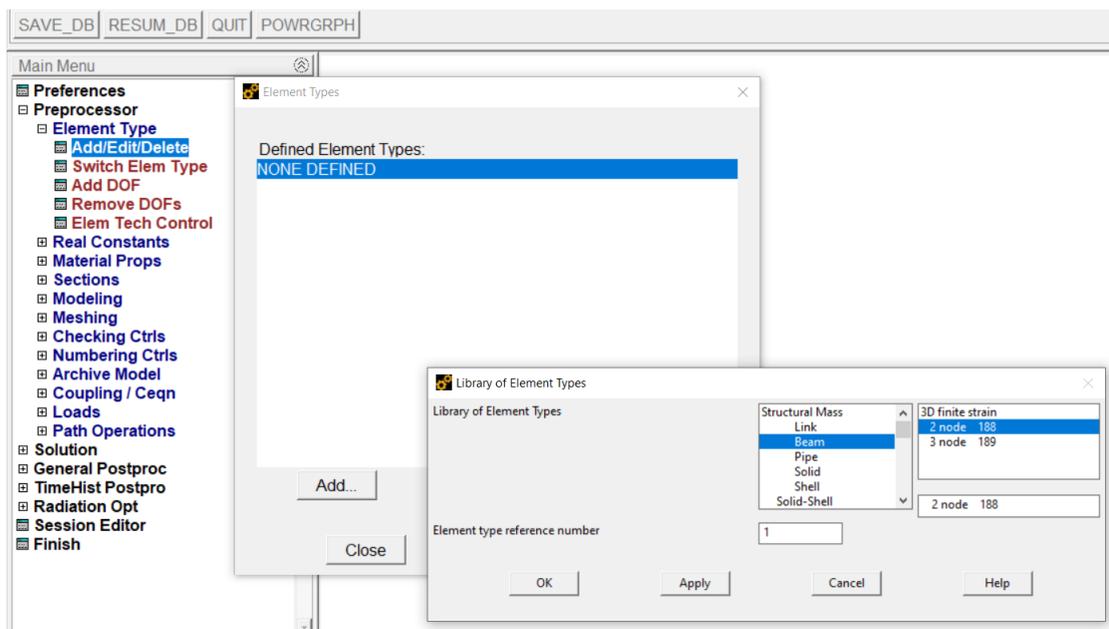


Рис.5. Окно *Library of Element type*

Номер типа элемента (*element type reference number*) – 1, нажимаем ОК.

Закрываем окно *Element type*.

В препроцессоре переходим в *Material Props > Material models*. В открывшемся окне выбираем: *Structural > Linear > Elastic > Isotropic*.

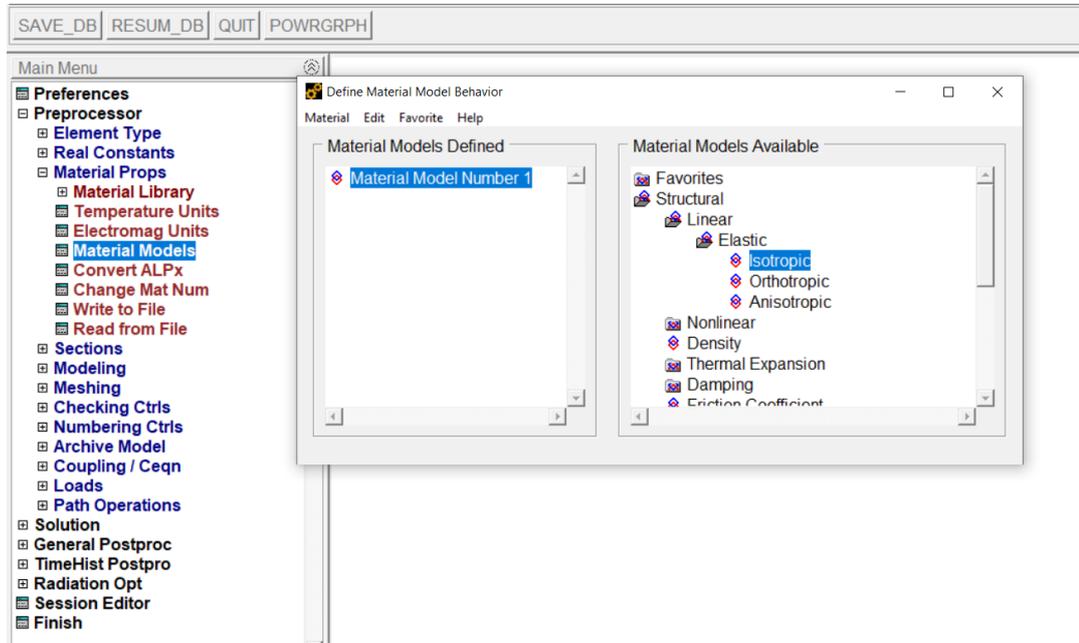


Рис.6. Задание материала. Шаг 1

Далее в открывшемся окне задаем модуль упругости ($EX=2e11$) и коэффициент Пуассона ($PRXY=0.3$). Нажимаем ОК.

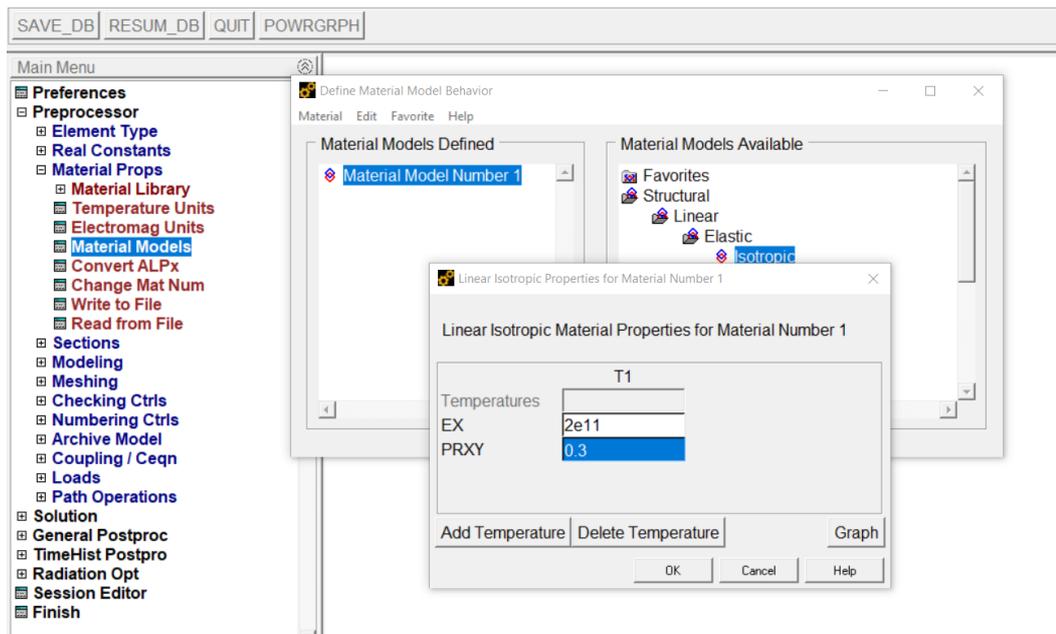


Рис.7. Задание материала. Шаг 2

2. Задание сечения и геометрии

– Создаем балку. Для этого сначала зададим сечение. Переходим в *Preprocessor* > *Sections* > *Beam* > *Common Sections*. В открывшемся окне выбираем прямоугольный подтип и прописываем параметры:

– $B - 0.2$

– $H - 0.2$

– $Nb - 8$

– $Nh - 8$

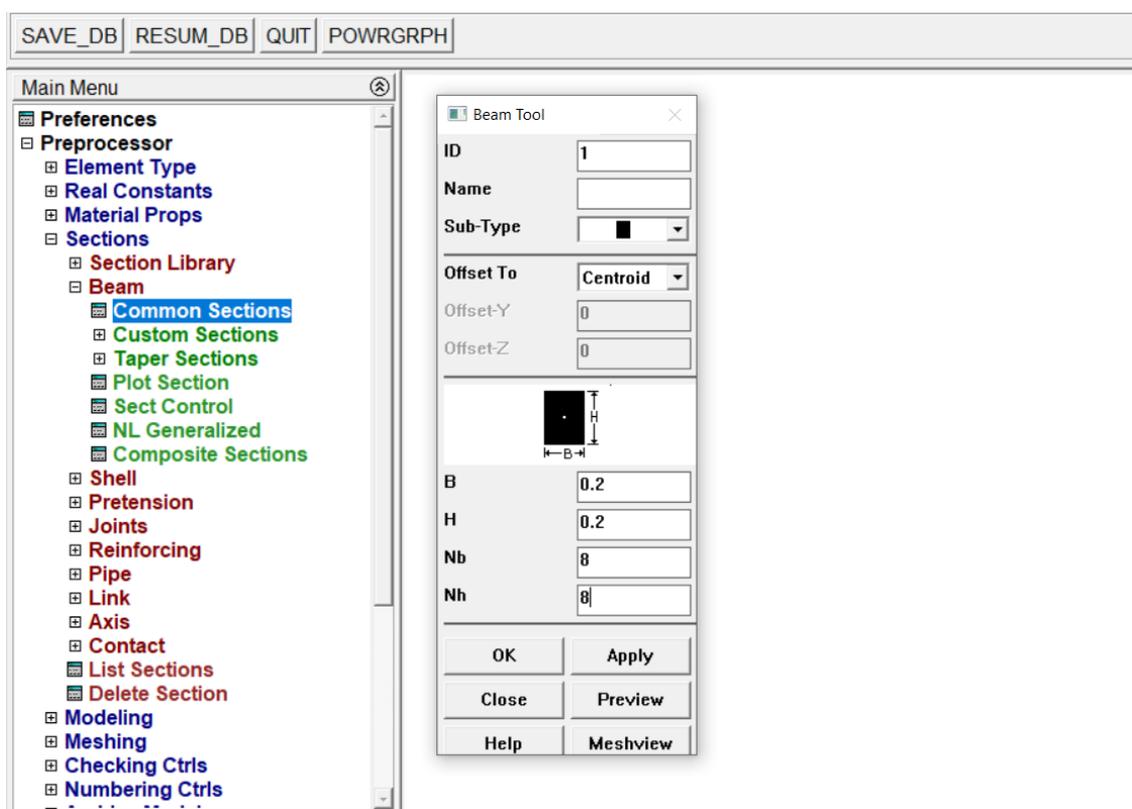


Рис.8. Задание поперечного сечения

Нажимаем ОК. Далее переходим в *Preprocessor* > *Modeling* > *Create* > *Keypoints* > *In Active CS*. В открывшемся окне сразу нажимаем ОК. Повторим операцию вызова окна, теперь пропишем координаты второй точки:

– $X - 10$

– $Y - 0$

– $Z - 0$

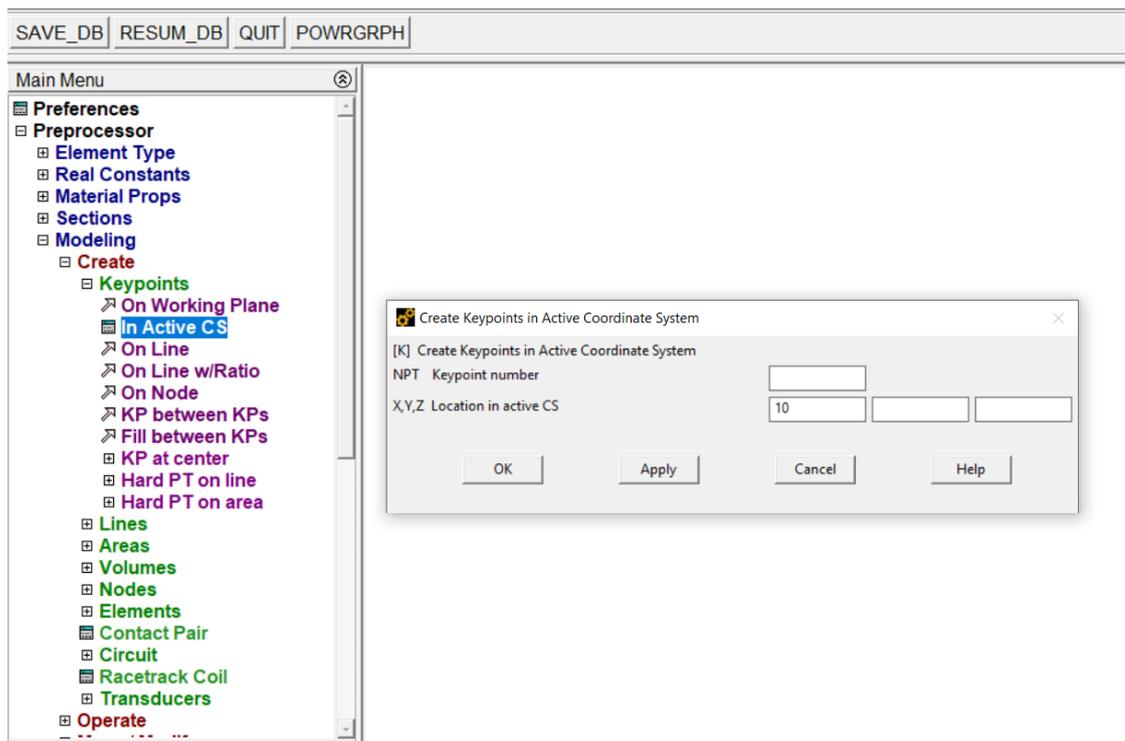


Рис.9. Задание точек геометрической модели

Теперь соединим их линией. Для этого переходим в *Preprocessor* > *Modeling* > *Create* > *Lines* > *Lines* > *Straight Line*. С помощью открывшегося окна выбираем поочередно две наши точки:

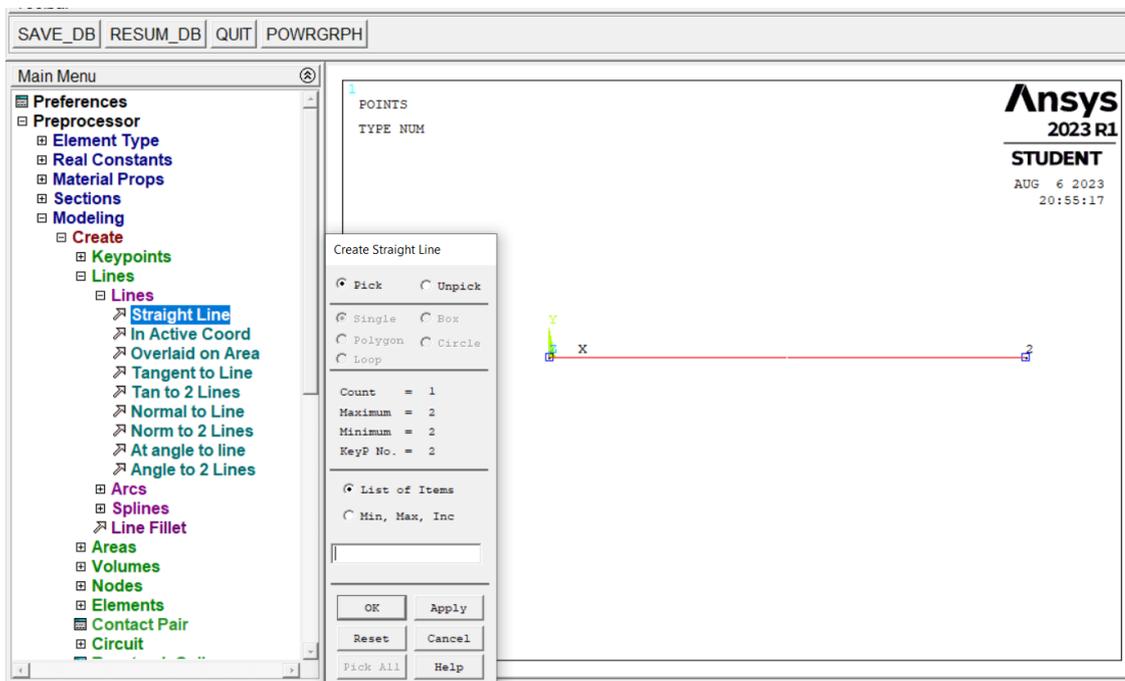


Рис.10. Соединение точек линией

Нажимаем ОК.

Создание сетки КЭ

На первом шаге назначаем атрибуты (материал, тип КЭ, сечение) созданной геометрии, для этого переходим в *Preprocessor* > *Meshing* > *Mesh Attributes* > *Default Attribs*. Далее, в открывшемся окне, в строке *Type* выбираем *1* тип элемента (*Beam 188*). Аналогично поступаем со строками *Mat* и *Secnum* (выбираем *1* тип материала и сечения соответственно). Нажимаем ОК.

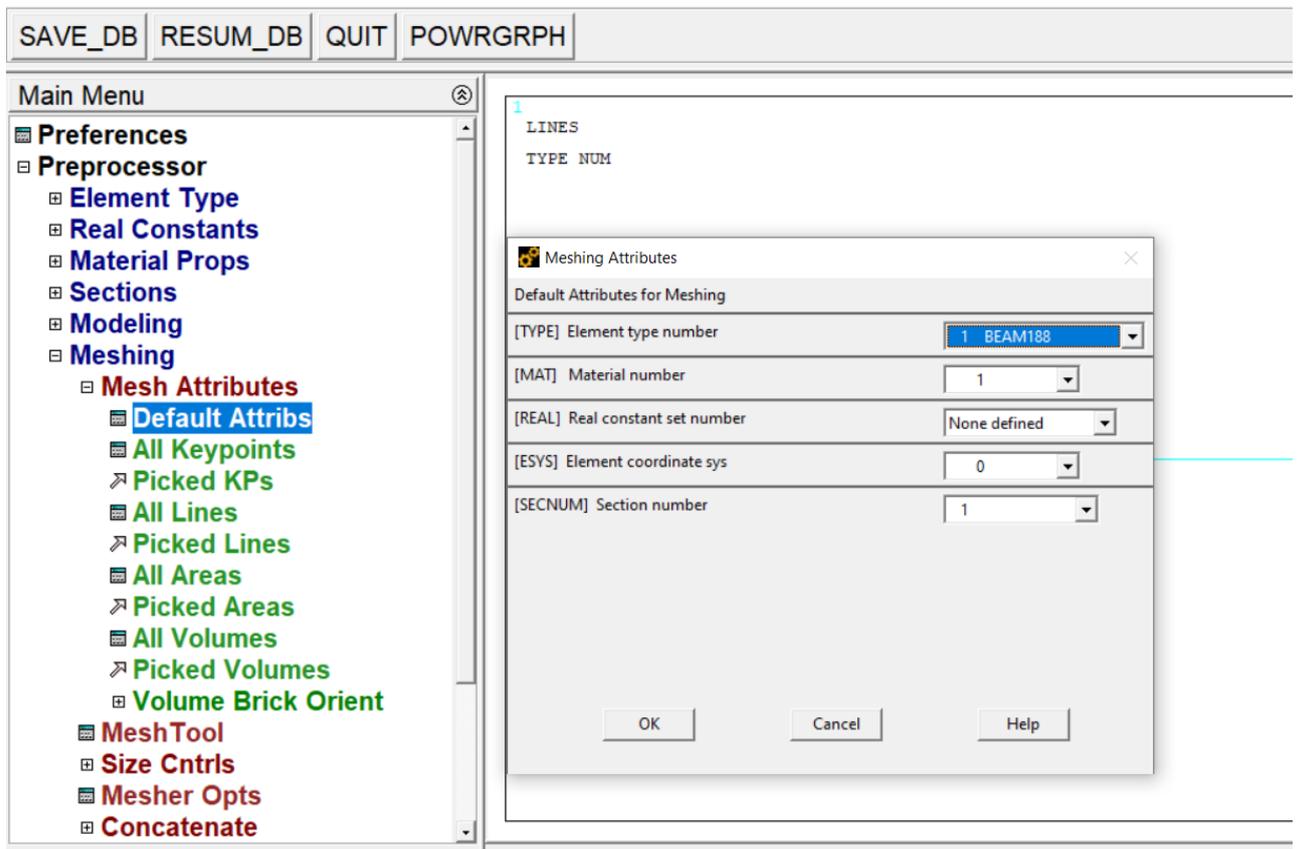


Рис.11. Присвоение атрибутов

На следующем шаге задаем размер элементов. Для этого переходим в *Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manualsize > Lines > All Lines*, в открывшемся окне в строке *Size* пишем 0.2. Нажимаем ОК.

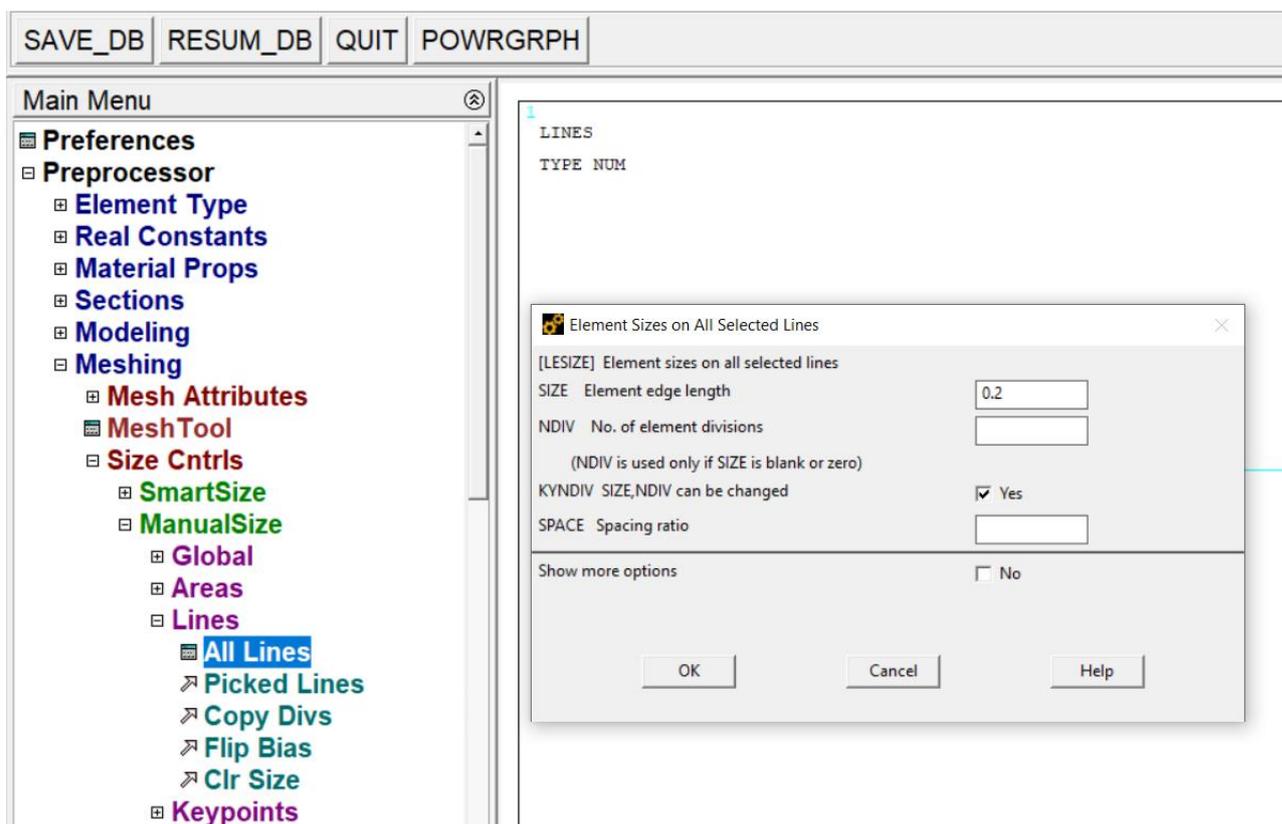


Рис.12. Назначение размеров элементов

Разбиваем линии на конечный элементы. Для этого переходим в *Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines*, в открывшемся окне нажимаем *Pick all*.

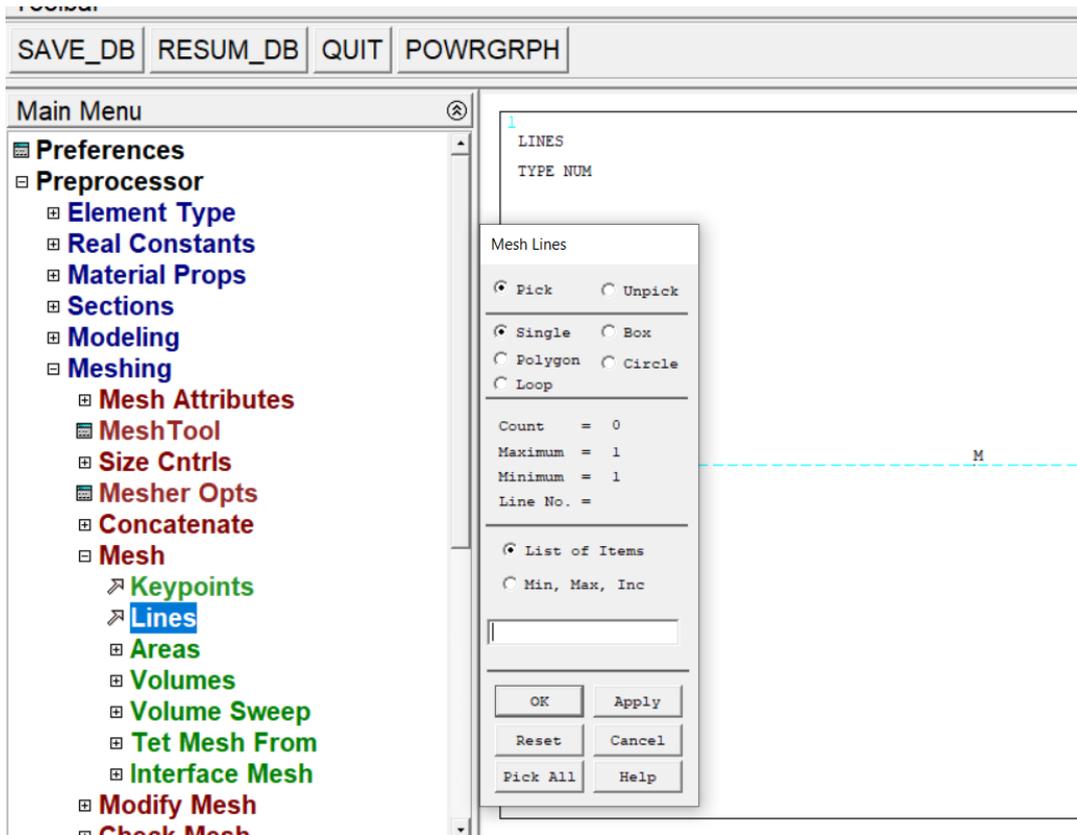


Рис.13. Выбор линии для разбиения на КЭ

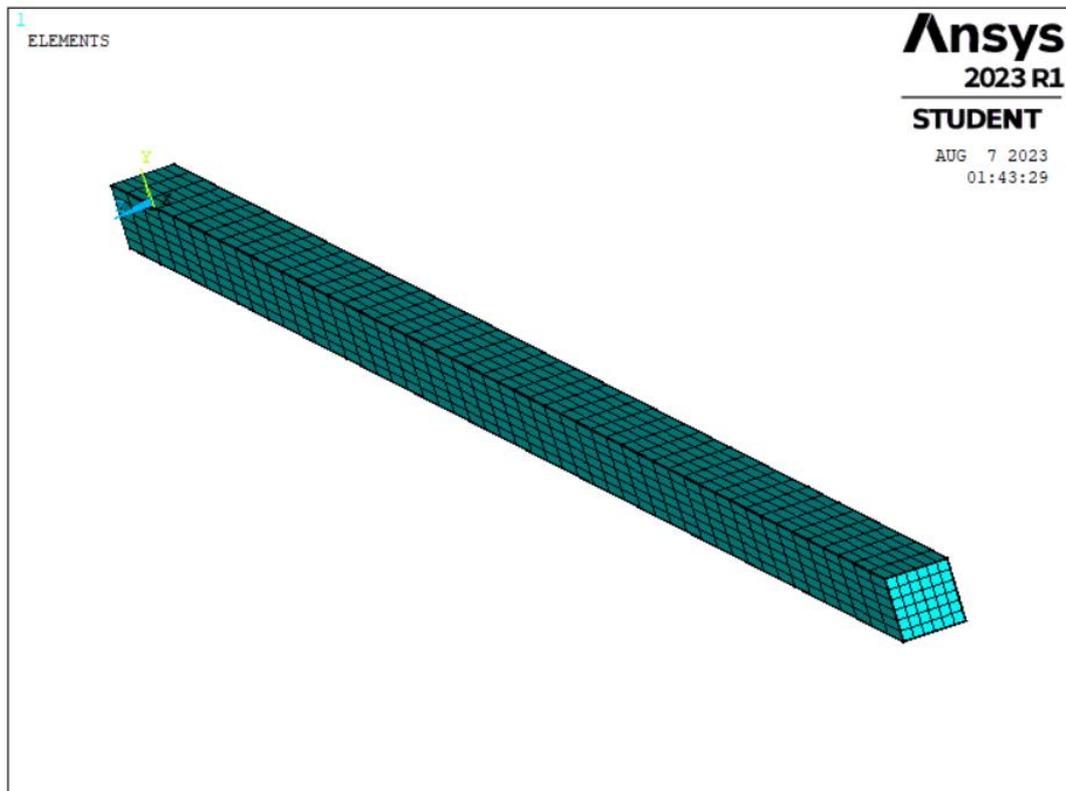


Рис.14. КЭ-модель балки

Задание граничных условий

Для задания граничных условий выбираем необходимые поверхности, для этого быстрее всего написать следующие команды в командной строке:

```
NSEL,S,LOC,X,0
```

```
NSEL,A,LOC,X,L
```

Далее задаем закрепления по всем степеням свободы в выбранных узлах. Для этого переходим в *Preprocessor > Loads > Define loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes*, в открывшемся окне нажимаем *Pick All*:

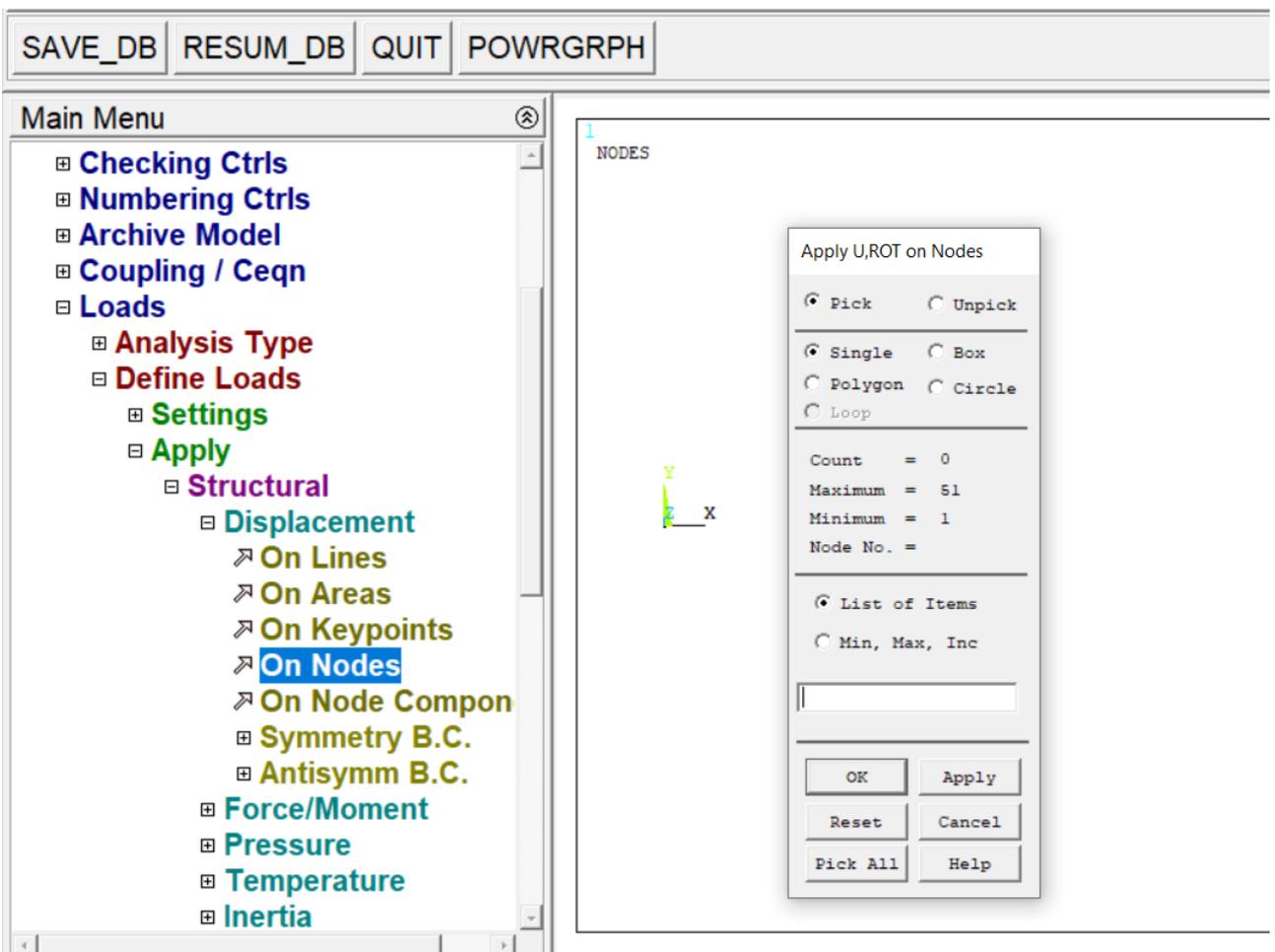


Рис.15. Выбор узлов для задания граничных условий

В следующем окне выбираем *ALL DOF* и нажимаем *OK*.

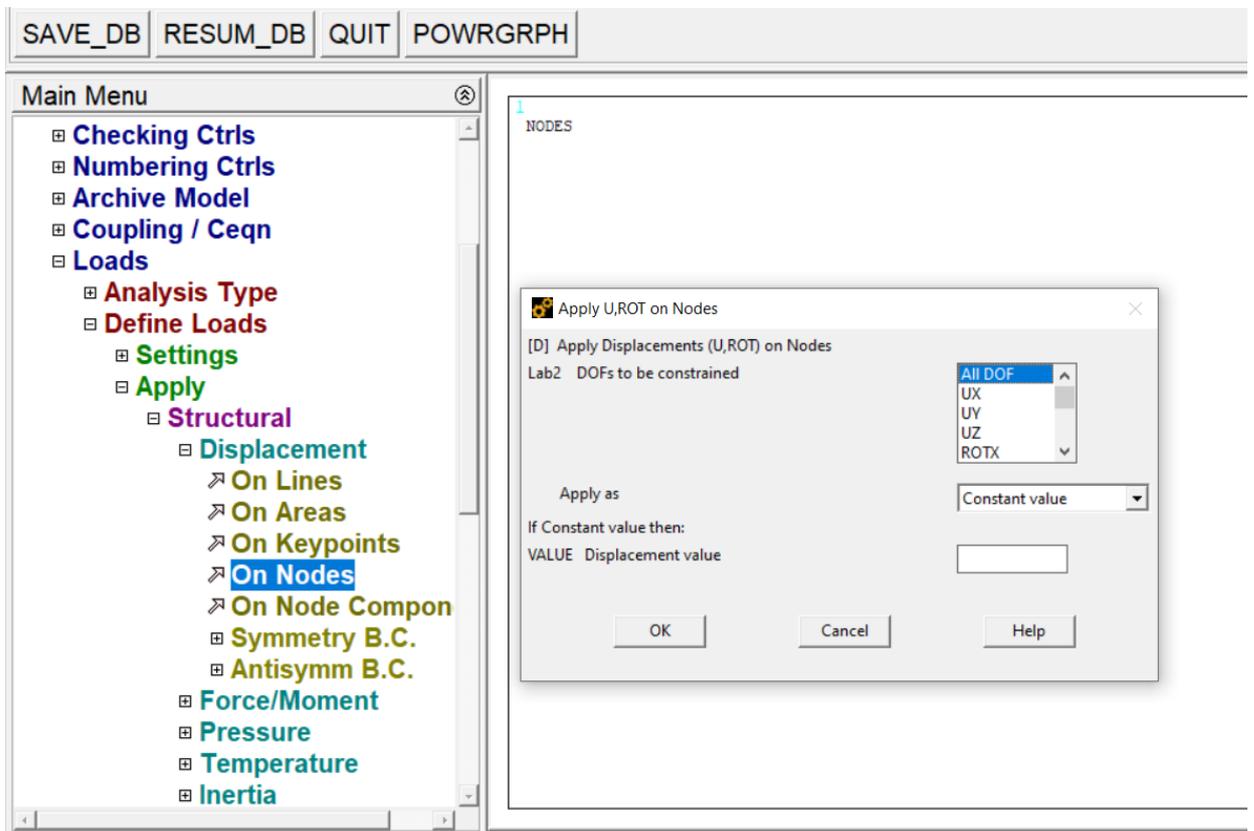


Рис.16. Выбор закрепляемых степеней свободы

Задание нагрузки

Для этого переходим в *Preprocessor* > *Loads* > *Define loads* > *Apply* > *Structural* > *Pressure* > *On Beams*, в открывшемся окне нажимаем *Pick All*.

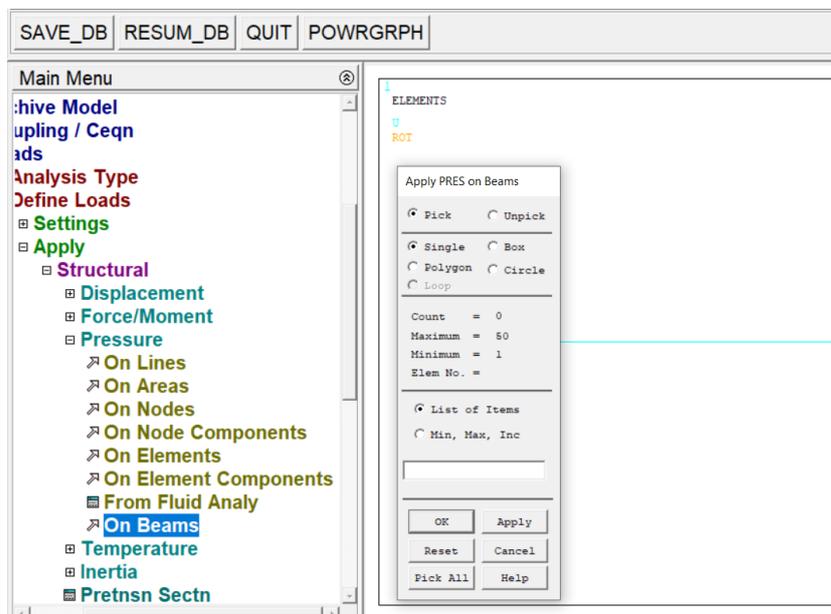


Рис.17. Выбор КЭ для задания нагрузки

В следующем окне в строке *LKey* указываем 2, в строке *VALI* указываем 2000, нажимаем ОК.

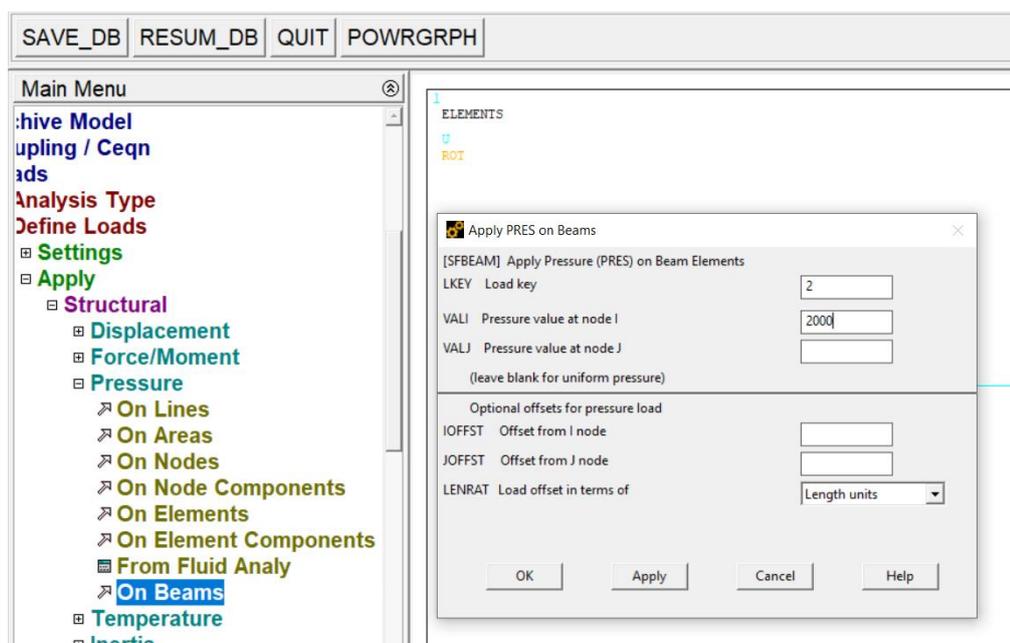


Рис.18. Задание параметров нагрузки

3. Решение

Переходим в *Solution > Analysis Type > Sol'n Controls*, в открывшемся окне выбираем следующие параметры расчета:

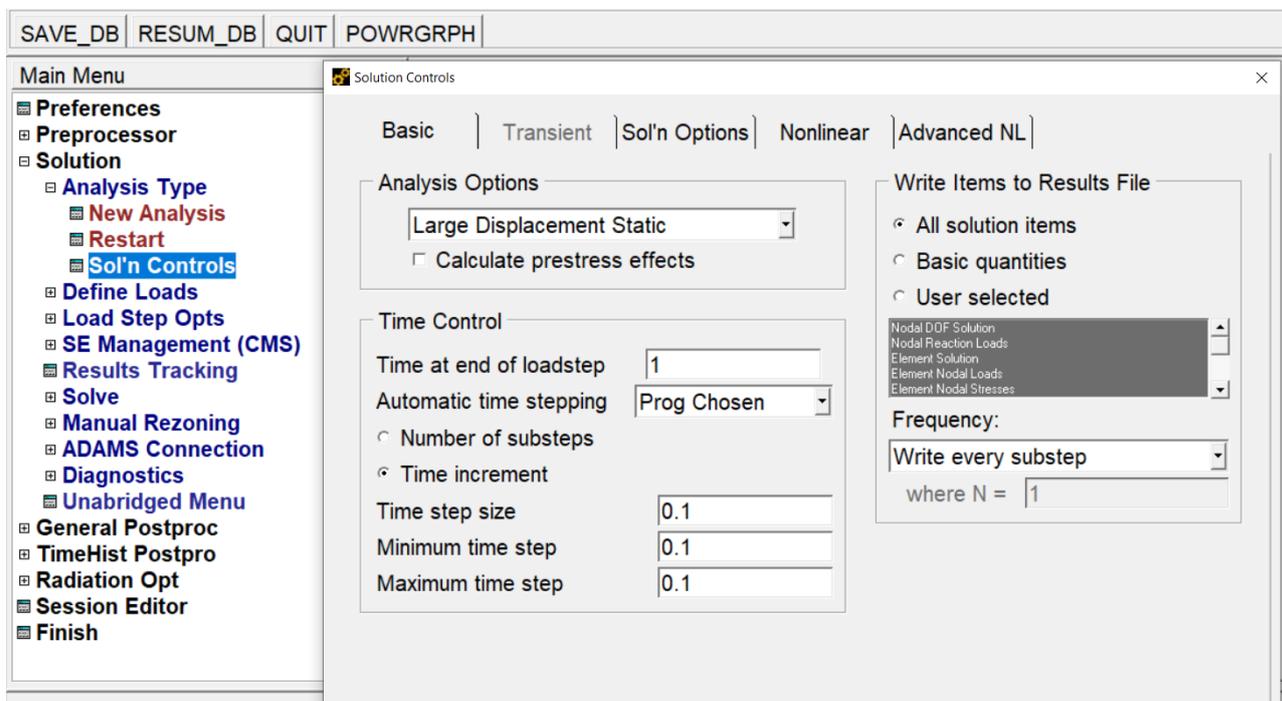


Рис.19. Настройка решателя

Нажимаем ОК. Запускаем расчет. Переходим в *Solution > Solve > Current LS*, в открывшемся окне нажимаем ОК.

4. Вывод результатов

Для вывода вертикальных перемещений переходим в *General Postproc* > *Plot Results* > *Contour Plot* > *Nodal Solu*, в открывшемся окне выбираем *DOF Solution* > *Y-Component of displacement* и нажимаем *APPLY*.

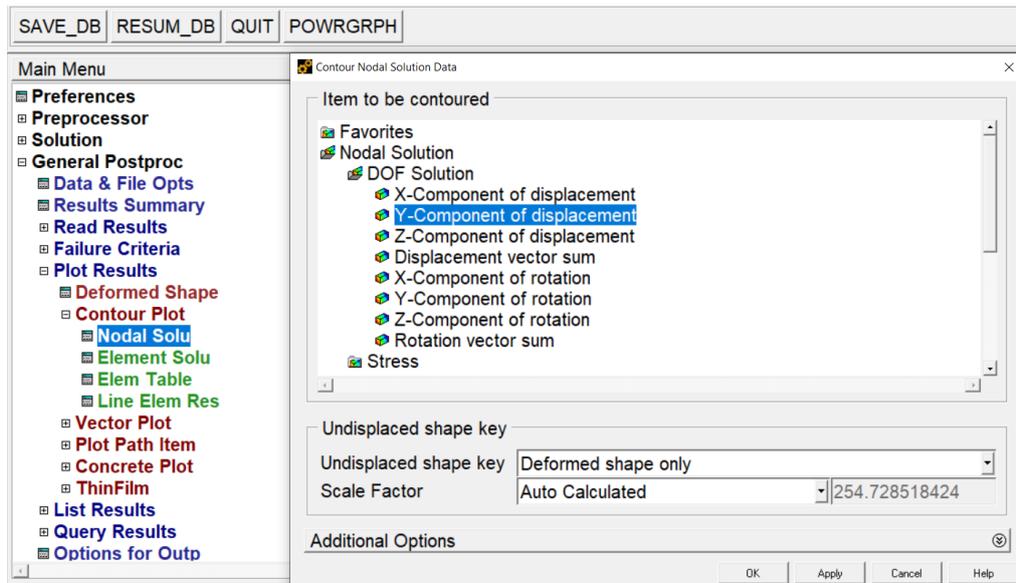


Рис.20. Вывод вертикальных перемещений

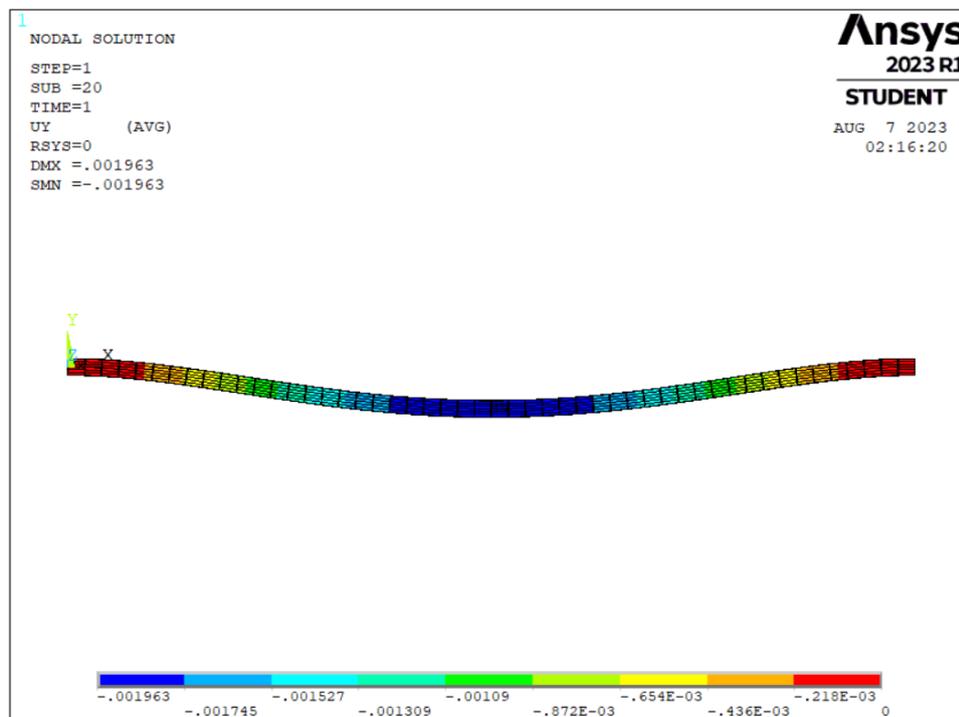


Рис.21. Изополя вертикальных перемещений

Выведем на экран величину продольной силы. Для этого перейдем в *General Postproc > Element Table > Define Table*. В открывшемся окне нажимаем *Add* и выбираем следующие настройки:

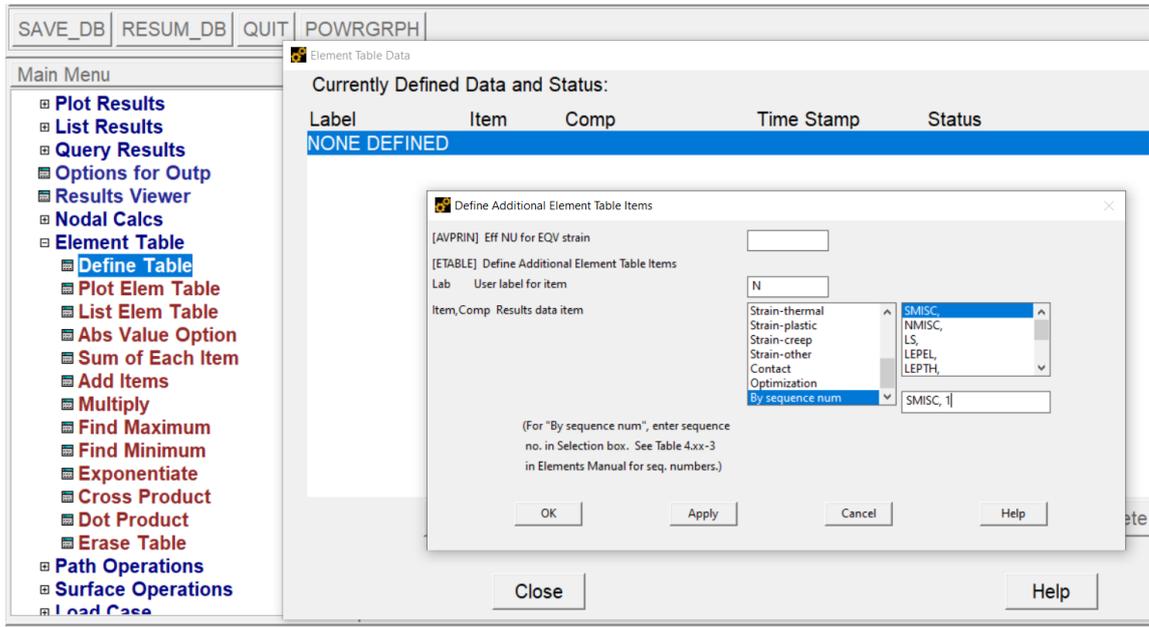


Рис.22. Настройки для вывода продольных сил

Нажимаем ОК. Далее перейдем в *General Postproc > Element Table > Plot Elem Table* и в открывшемся окне нажимаем ОК.

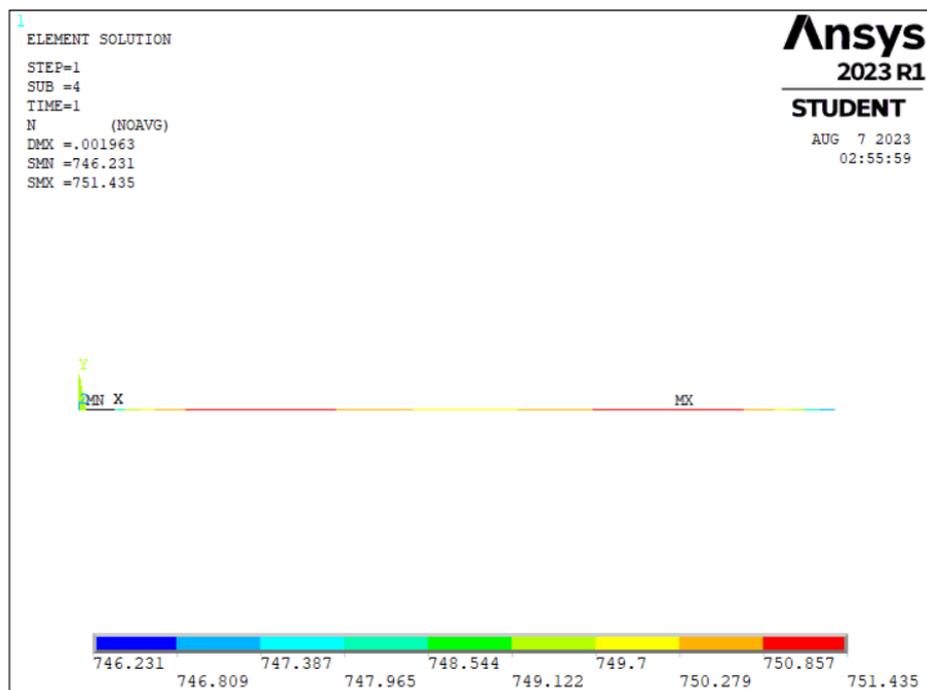


Рис.23. Продольные силы в балке

Заключение

В данной работе был произведен расчёт величины прогиба в центре балки и значения силы натяжения при действии равномерно распределенной поперечной нагрузки при двойном жестком закреплении двумя способами: аналитически и численно.

В случае аналитического решения

Значение прогиба – $U = 1.953e-3$ м,

Продольная сила – $T = 744.1$ Н

При численном моделировании в ПК ANSYS

Значение прогиба – $U = 1.963e-3$ м,

Продольная сила – $T = 748.1$ Н

Погрешность численного решения

для прогиба составляет: $\frac{|1.953e-3 - 1.963e-3|}{1.953e-3} \cdot 100\% = 0.51\% < 5\%$,

для внутреннего усилия: $\frac{|744.1 - 748.7|}{744.1} \cdot 100\% = 0.75\% < 5\%$,

что в обоих случаях является допустимой погрешностью.

Код программы

FINI

/CLEAR

/PREP7

/OUTPUT,,OUT

L=10

!длина балки, м

Q=2000

!интенсивность нагрузки, Н

B=0.2

!ребро сечения, м

E=2e11

!модуль упругости, Па

MU=0.3

!коэф. Пуассона

ET,1,BEAM188,,2

!задаем тип КЭ

SECTYPE,1,BEAM, RECT

!задаем сечение

SECDATA,B,B,8,8

UIMP,1,EX,PRXY,DENS,E,MU

!задаем свойства материала

K

! создание геометрии

K,,L

L,1,2

LESIZE,ALL,0.2

!создание сетки

LMESH,ALL

D,NODE(0,0,0),ALL

!граничные условия

D,NODE(L,0,0),ALL

SFBEAM,ALL,2,PRES,Q

/SOLU	!решение задачи
ALLSEL	
ANTYPE,STAT	
NLGEOM,ON	
TIME,1	!время
DELTIM,0.01,0.01,0.01	!шаг по времени
OUTRES,ALL,ALL	!параметры вывода
KBC,0	
SOLVE	
/POST1	
/ESHAPE,1	
PLNSOL, U,Y	!отрисовка изополей перемещений
*ASK,UY,ENTER,1	
ETABLE, NI, SMISC,1	!отрисовка эпюры продольного усилия
ETABLE, NJ, SMISC,14	
PLLS, NI, NJ,3	
*ASK,N,ENTER,1	
/EOF	

Практическая работа №5

Задача контактного взаимодействия тел

Методические указания к выполнению практической работы 5

Для создания расчётной модели будем использовать препроцессор Ansys Mechanical APDL.

После запуска APDL появится окно:

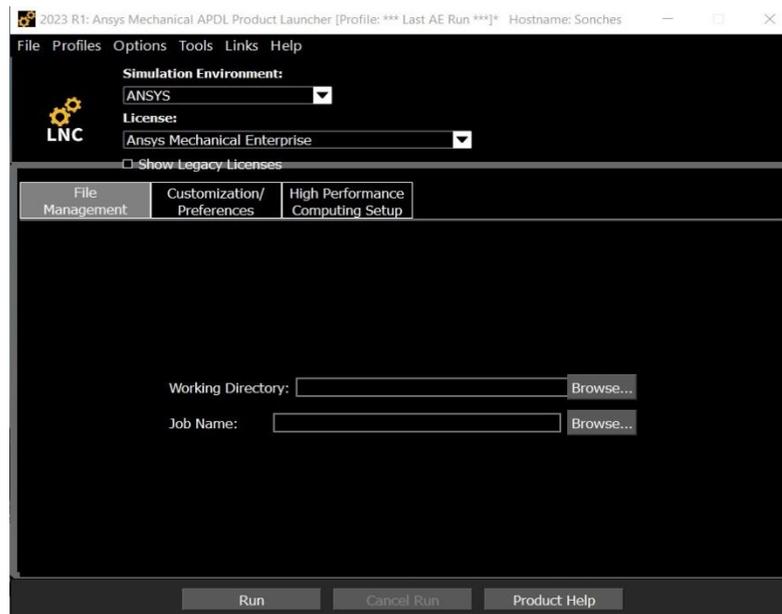


Рис.1. Окно запуска программного комплекса ANSYS Mechanical

Рядом с окном *Working Directory* нажать кнопку «Browse...» и выбрать свою рабочую директорию. В этой директории ANSYS будет сохранять все файлы. Директория должна быть создана заранее. В именах директории и пути к директории допускаются только латинские буквы. Рядом с окном *Job Name* задаем имя файла.

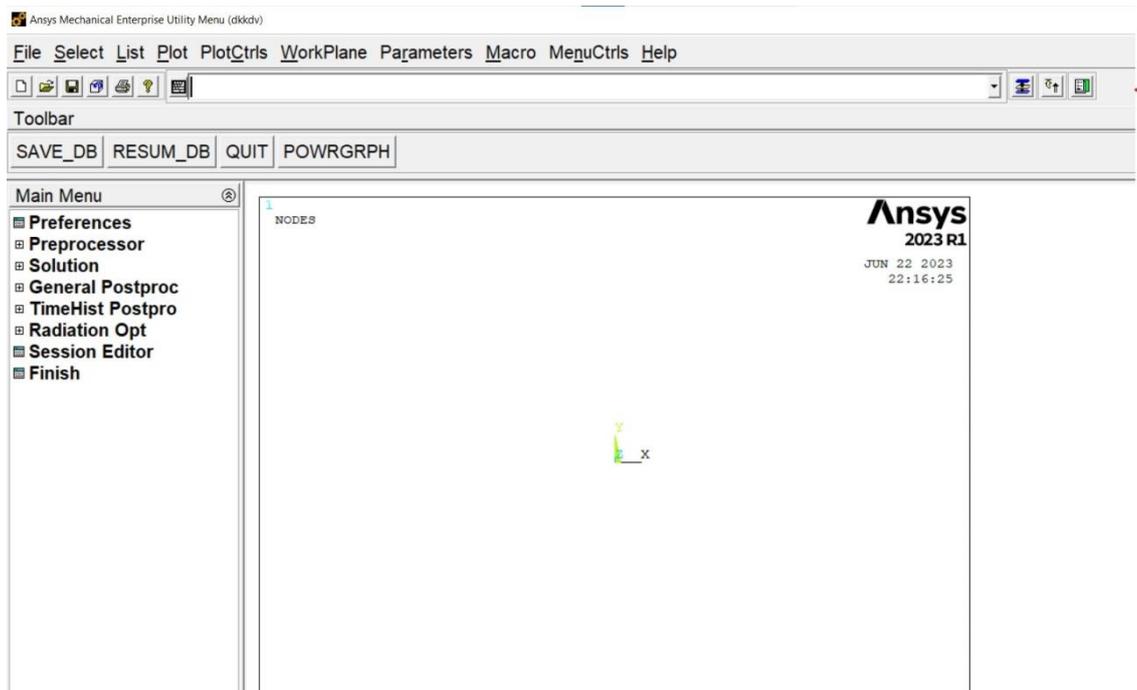


Рис.1.

Рис.2. Рабочее окно программного комплекса ANSYS Mechanical

Выполним расчет контактного взаимодействия двух упругих полусфер радиусом $R = 50$ мм, центры которых взаимно сблизились на 4мм.

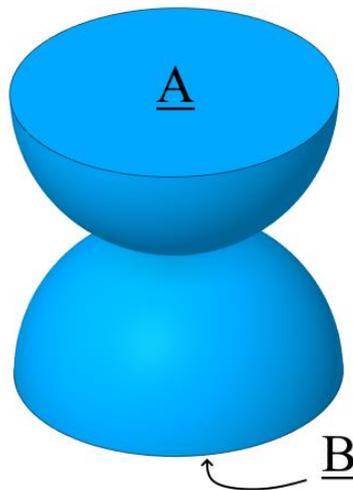


Рис.3. Схема задачи

Исходные данные:

- радиус полусфер $R = 50$ мм;
- характеристики материала: модуль упругости $E = 20000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$;
- смещение на 2 мм каждой поверхности А и В навстречу друг другу.

Аналитическое решение

Данная задача имеет известное аналитическое решение. Нормальное контактное давление в центральной точке контакта можно получить по следующей формуле:

$$\sigma_{zz} = \frac{-E}{\pi} \frac{1}{1 - \nu^2} \sqrt{\frac{2h}{R}}$$

где $h = 2 \text{ мм} - (-2 \text{ мм}) = 4 \text{ мм}$ – взаимное смещение сфер.

Подставив в формулу известные величины получим:

$$\sigma_{zz} = -2798.3 \text{ МПа}$$

Решение с помощью Ansys Mechanical APDL

5. Задание элементов и их параметров

В *Main Menu* переходим в *Preprocessor* > *Element Type* > *Add/Edit/Delete* в открывшемся окне (*Element type*) нажимаем кнопку *Add*:

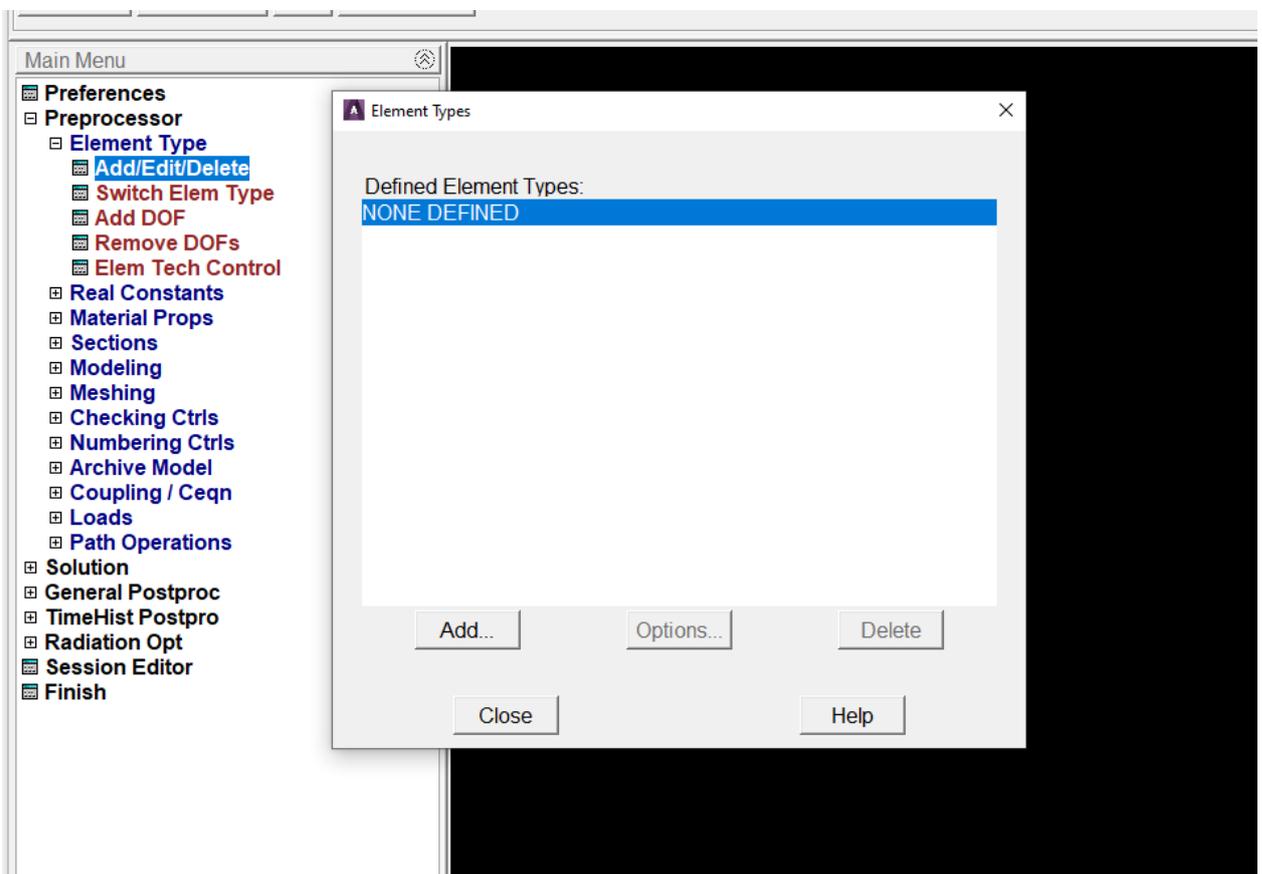


Рис.4. Окно задания типов конечных элементов

В открывшемся окне в библиотеке элементов (*Library of element types*) выбираем *Solid* – brick 8 node 185

Номер типа элемента (*element type reference number*) – 1, нажимаем ОК.

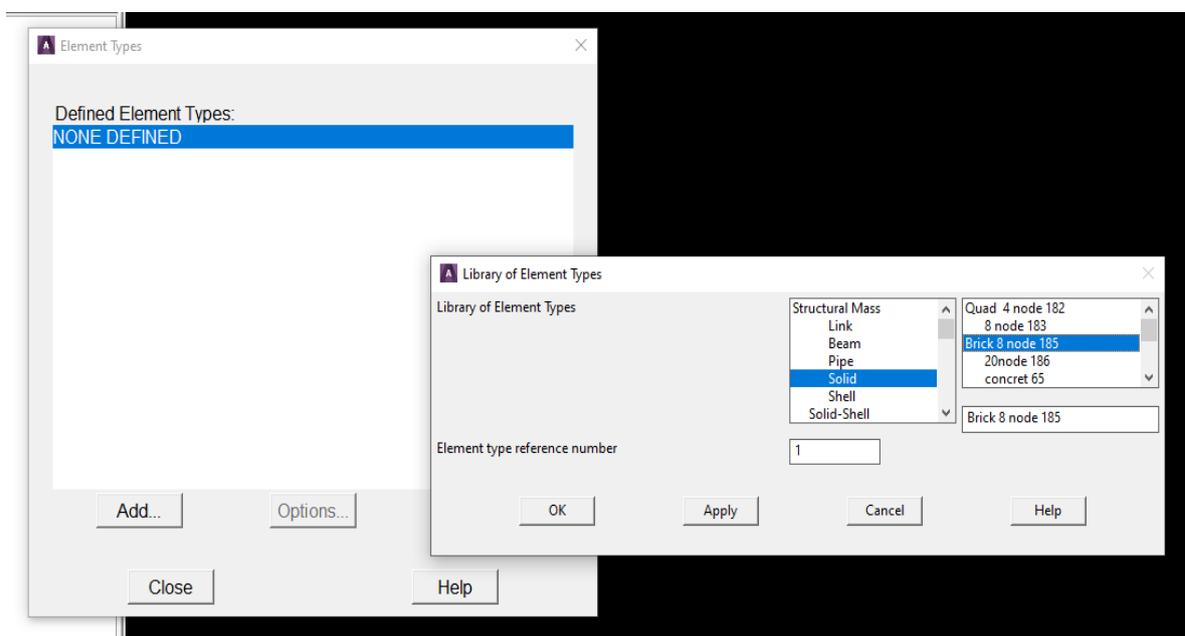


Рис.5. Выбор типа КЭ SOLID185

Номер типа элемента (*element type reference number*) – 1, нажимаем ОК.

Так же выбираем *Contact* – 3D Target 170

Номер типа элемента (*element type reference number*) – 4, нажимаем ОК.

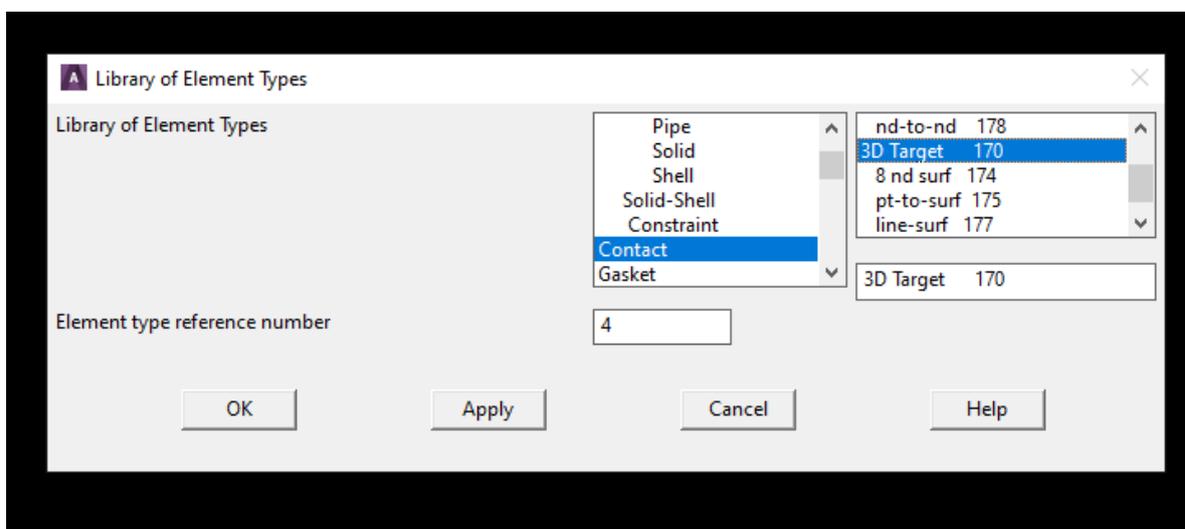


Рис.6. Выбор типа КЭ TARGET170

Закрываем окно *Element type*.

Далее вводим команду ET,3,CONTA173 в командную строку, тем самым добавляя ещё один тип элемента такой как CONTA173.

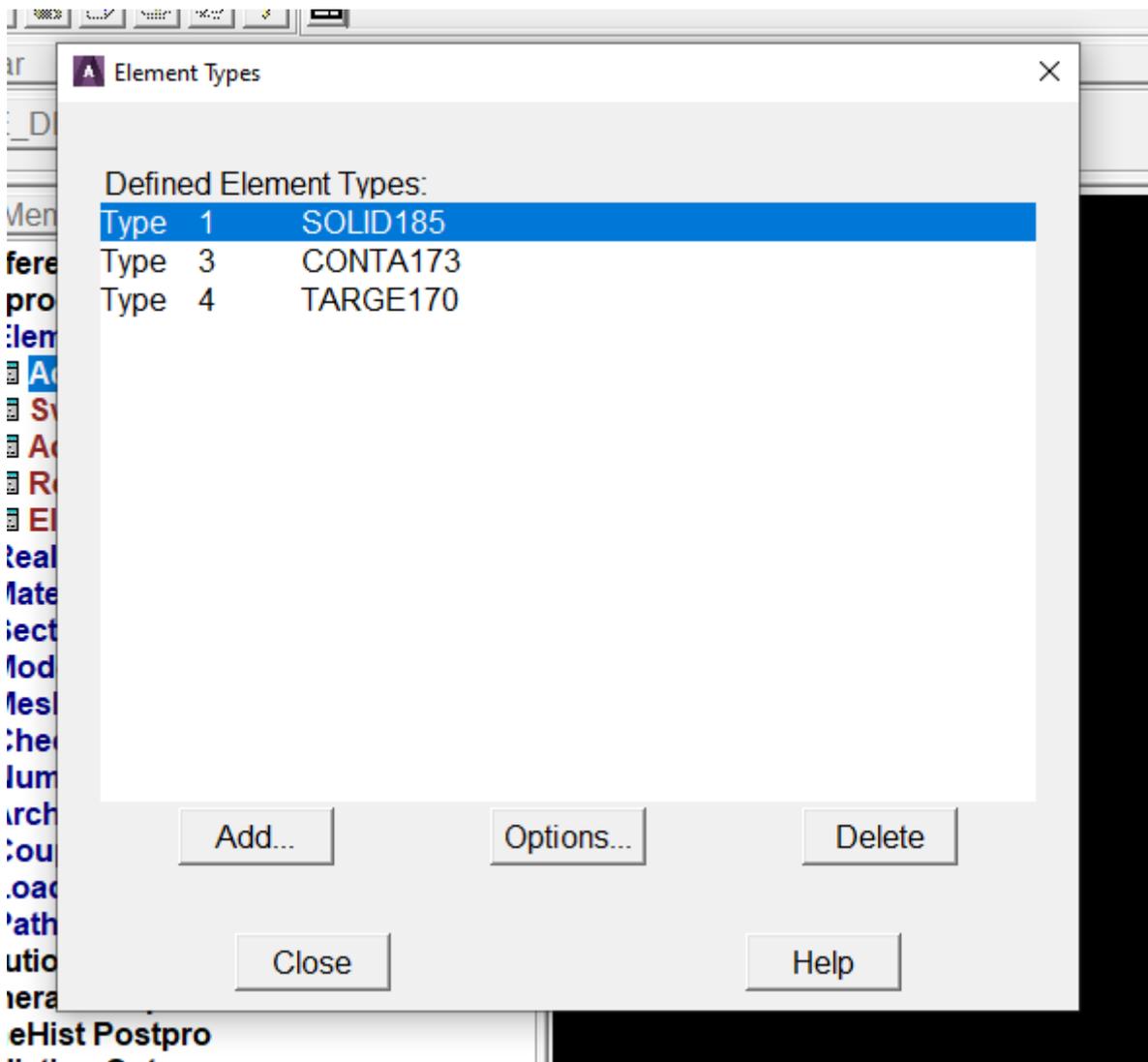


Рис.7. Переход к настройкам конечных элементов

Так же нужно задать константы для типа Contact. Для этого переходим в *Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete*. Нажимаем Add и выбираем CONTA173. Далее выбираем номер и следующие параметры:

- FTOLN=3;
- FKT=2.

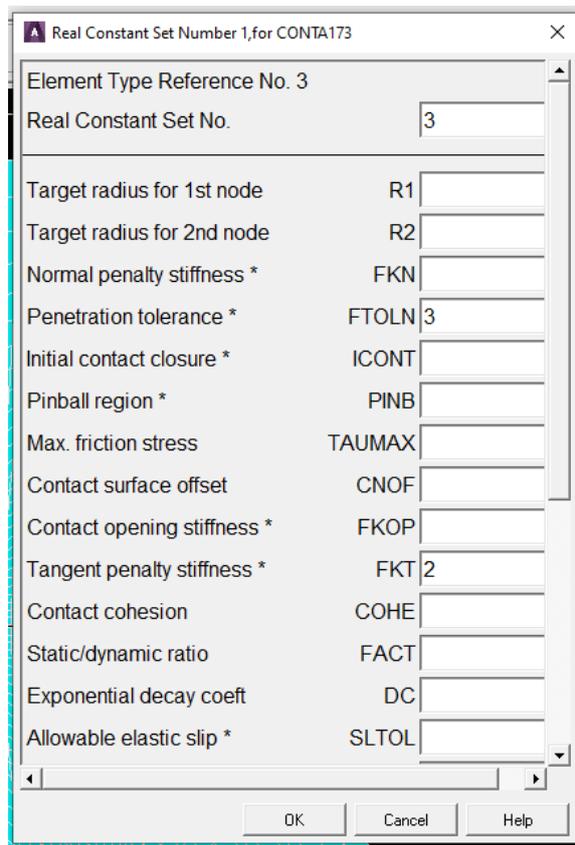


Рис.8. Настройки КЭ тупа CONTA173

В препроцессоре переходим в *Material Props > Material models*. В открывшемся окне выбираем: *Structural > Linear > Elastic > Isotropic*.

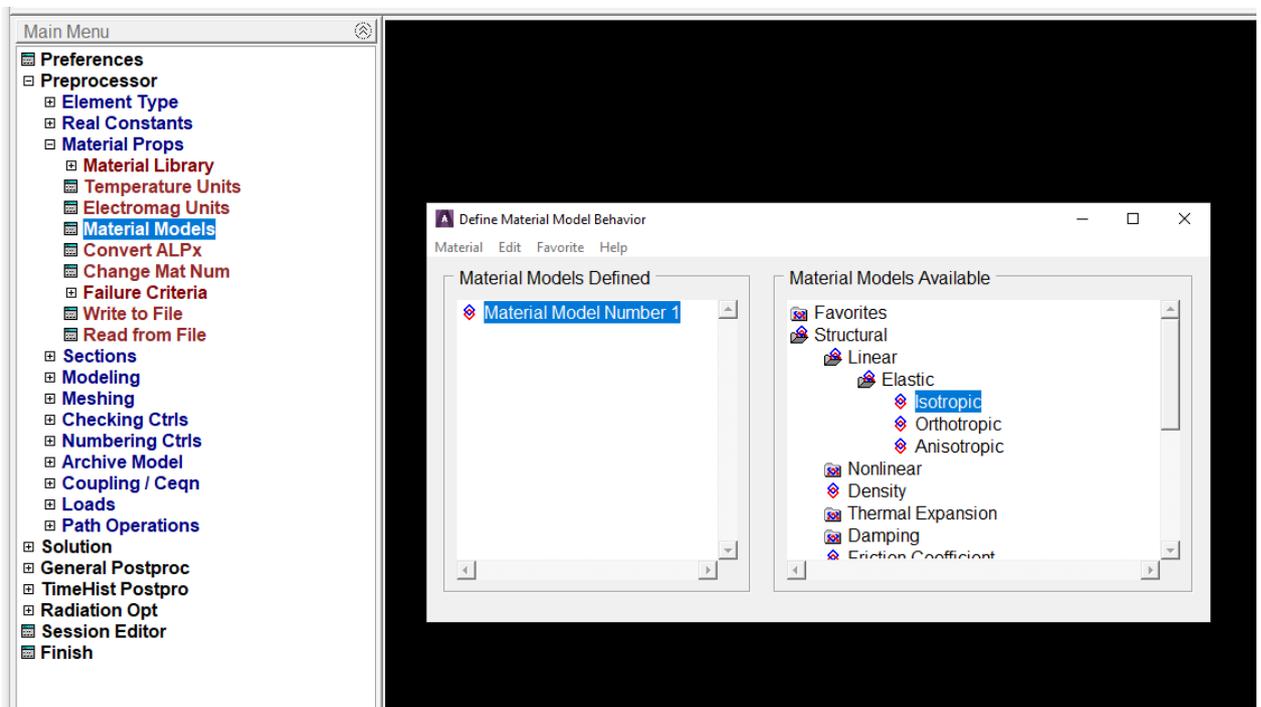


Рис.9. Выбор модели материала

Далее в открывшемся окне задаем модуль упругости ($E_X=2e4$) и коэффициент Пуассона ($PRXY=0.3$). Нажимаем ОК.

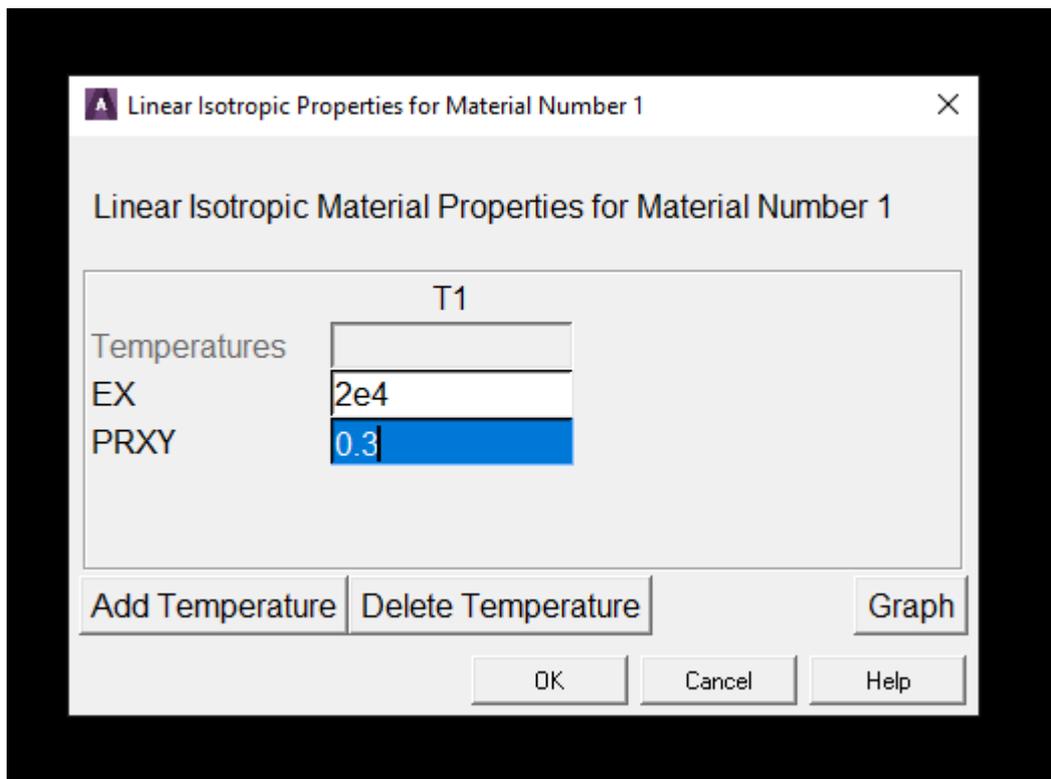


Рис.10. Задание механических характеристик материала

6. Задание геометрии

Создадим четверть круга: заходим в *Modeling > Create > Areas > Circle > By Dimensions*.

Выбираем параметры:

- $RAD1 = 50$;
- $RAD2 = 0$;
- $THETA1=0$;
- $THETA2=90$.

Нажимаем ОК.

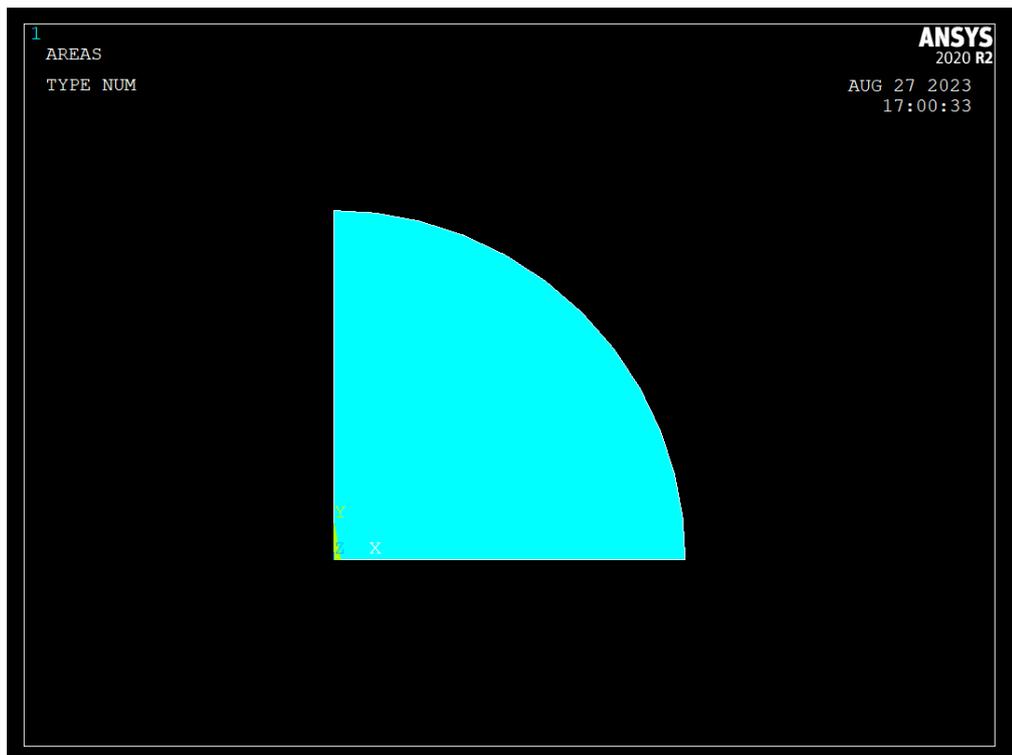


Рис.11. Геометрия четверти круга

Далее с помощью этой поверхности создадим объём в виде одной восьмой части сферы: заходим в *Modeling > Operate > Extrude > Areas > About Axis*.

Выбираем нашу поверхность:



Рис.12. Выбор поверхности для выдавливания вокруг оси ZX

Далее выбираем точки на оси, вокруг которой будем поворачивать поверхность.

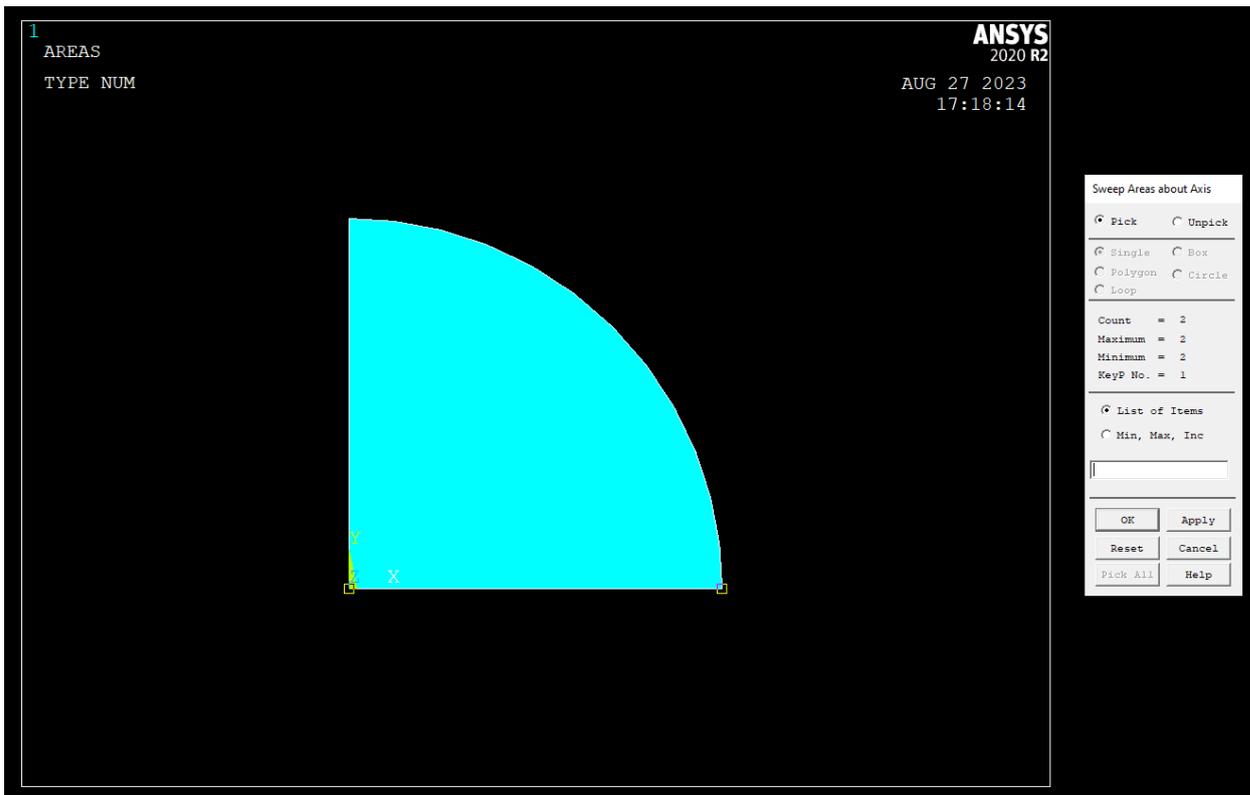


Рис.13. Выбор точек для выдавливания вокруг оси ZX

В окне *Sweep Areas about Axis* вводим $ARC = 90$ и нажимаем *OK*.

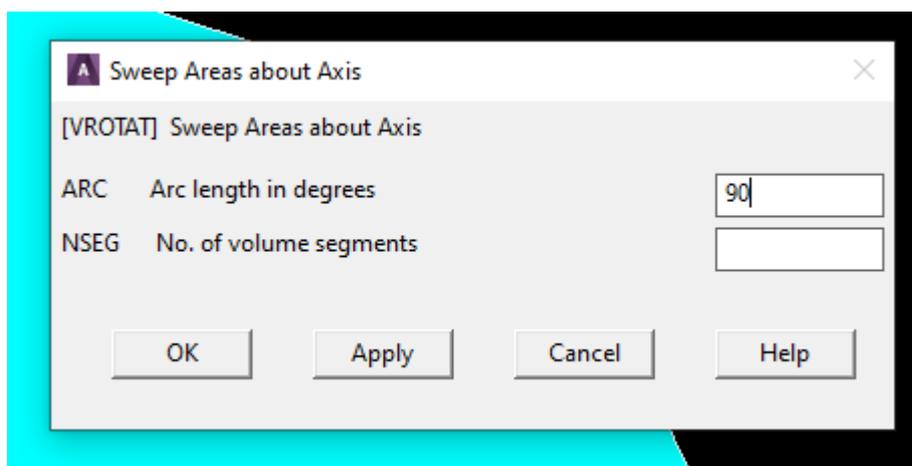


Рис.14. Задание угла для выдавливания вокруг оси

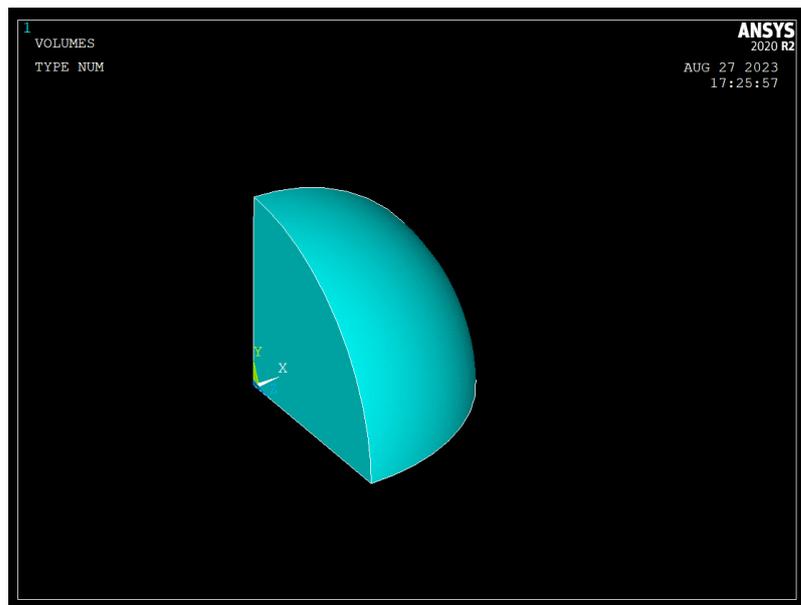


Рис.15. Объем одной восьмой шара

Теперь необходимо скопировать данный объем.

Заходим в *Modeling > Reflect > Volumes*, выбираем объем и нажимаем

OK.

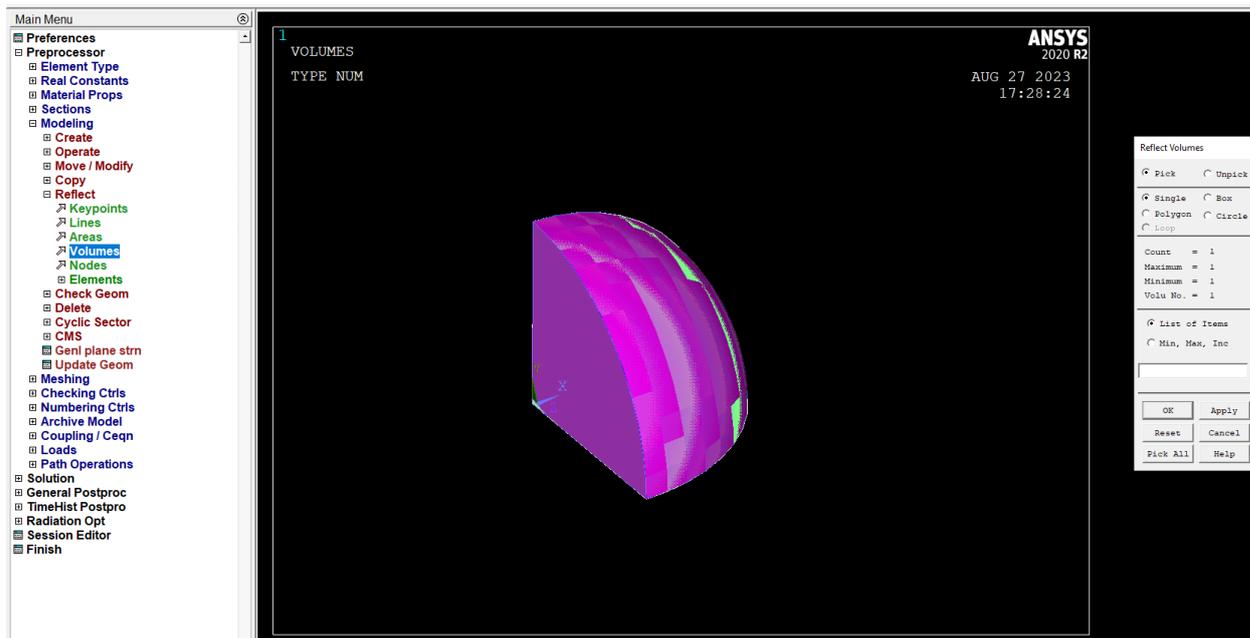


Рис.16. Выбор объема для отражения относительно плоскости XZ

В окне *Reflect Volumes* в *Plane of symmetry* выбираем *X-Z plane Y*.

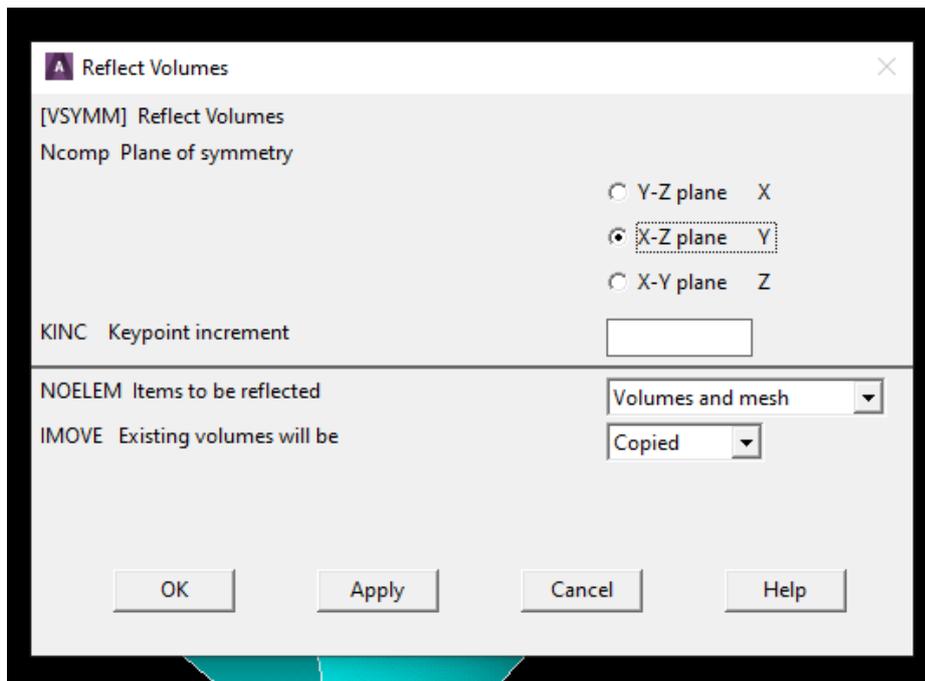


Рис.17. Выбор плоскости отражения

Тем самым мы скопировали наш перевернутый объём.

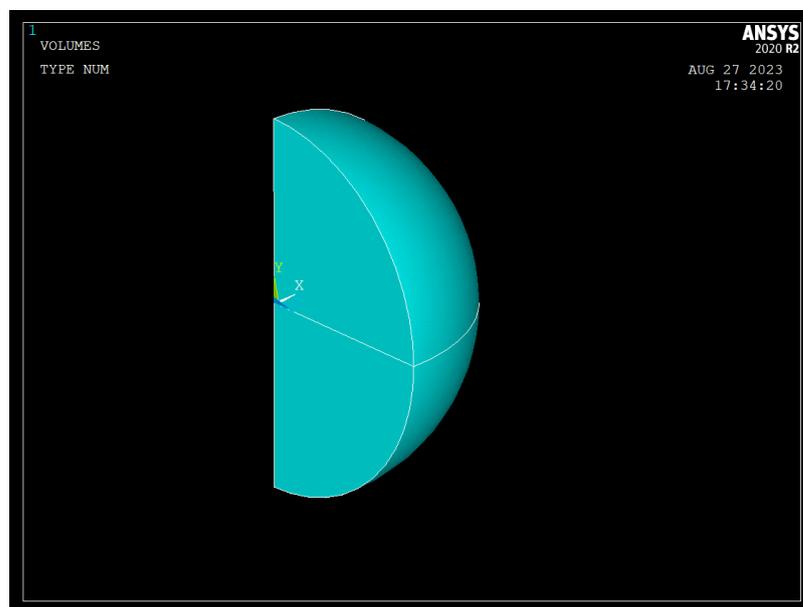


Рис.17. Выбор плоскости отражения

Далее перейдем в *Modeling > Copy > Volumes*, выбираем нижний объём.

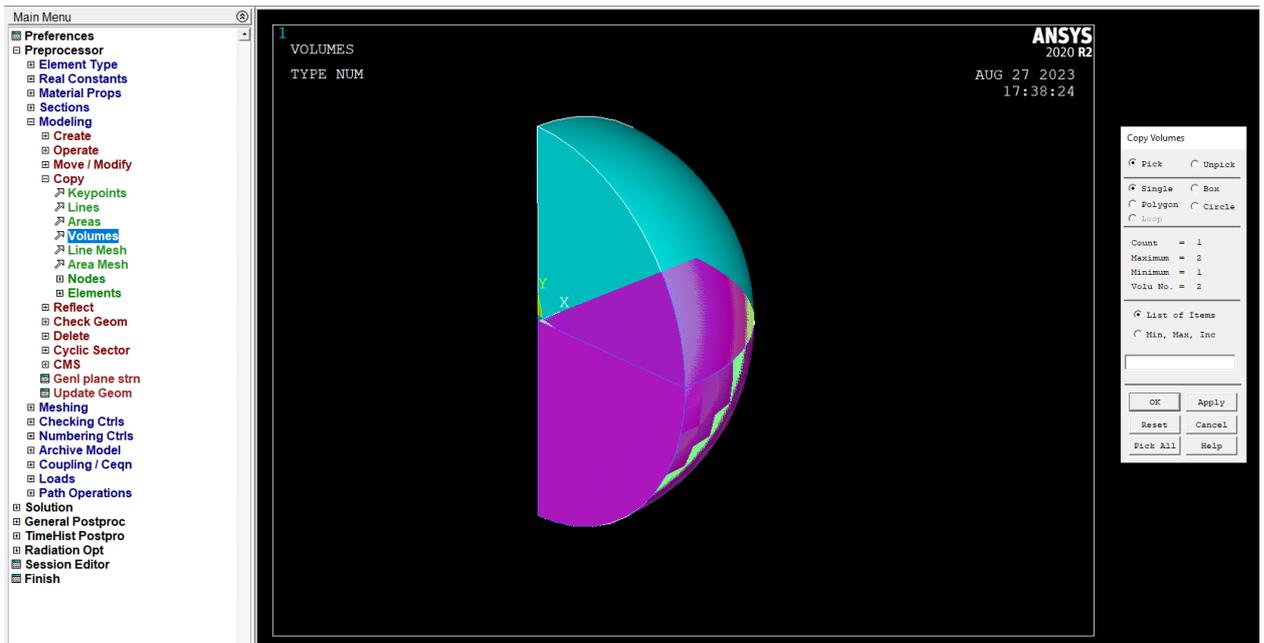


Рис.18. Выбор объема для копирования

В открывшемся окне вводим параметры:

- Number of copies = 2;
- DY = 100;

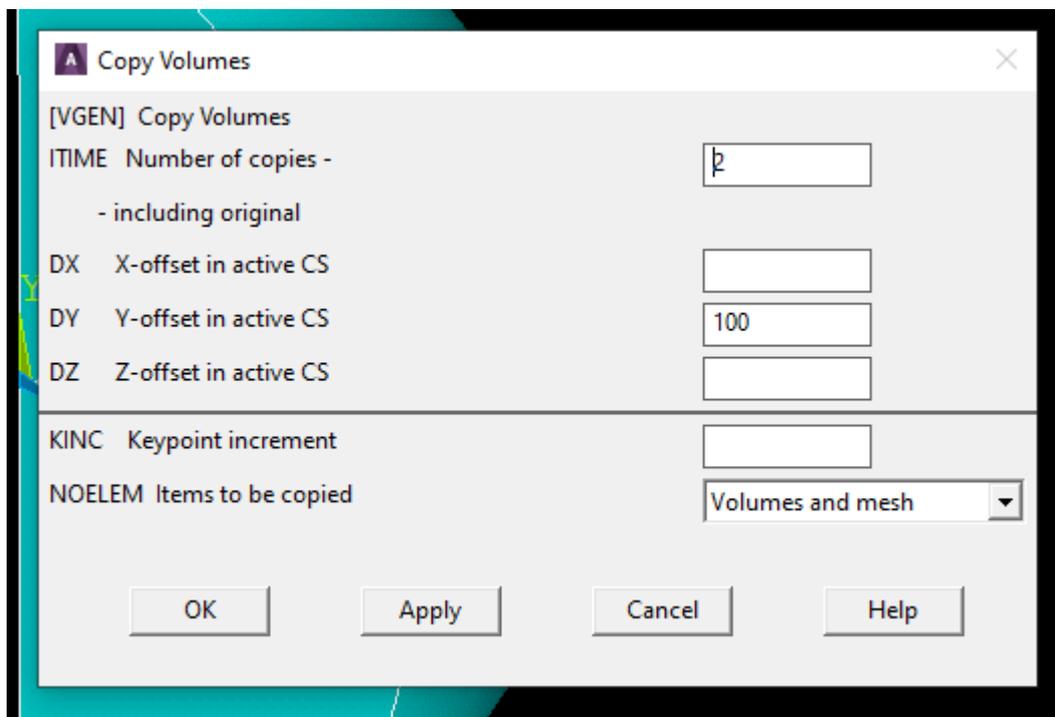


Рис.19. Задание расстояния копирования

Далее можем просто удалить нижний объём. Переходим в *Modeling* > *Delete* > *Volumes and below*, выбираем объём и нажимаем *OK*.

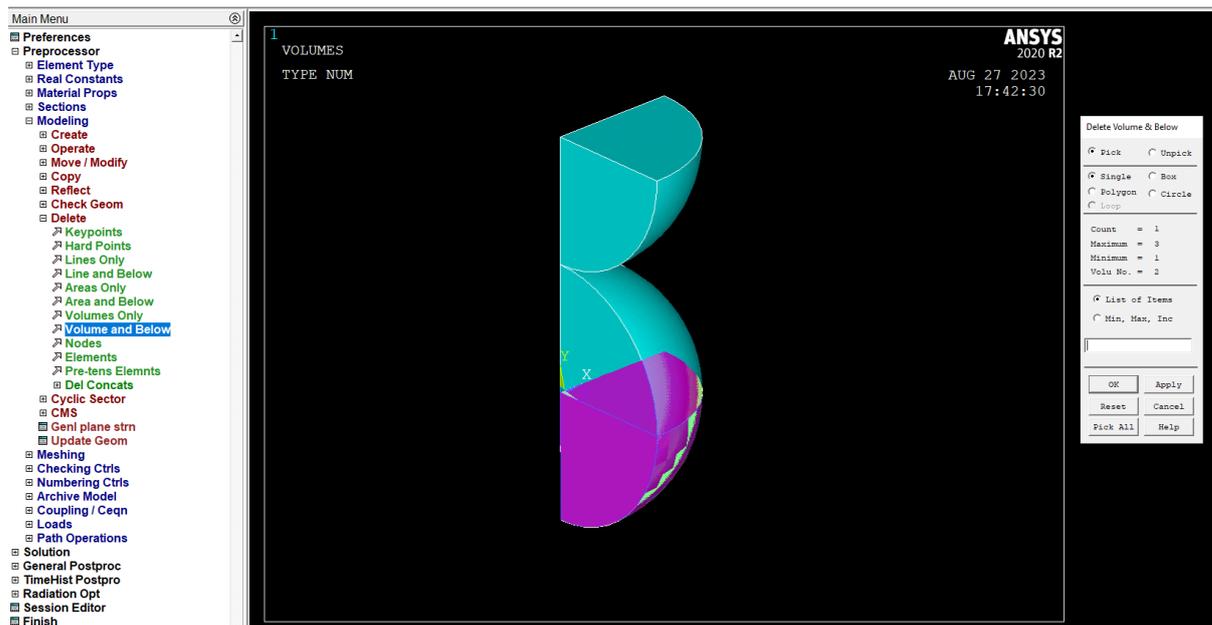


Рис.20. Выбор нижнего объема для удаления

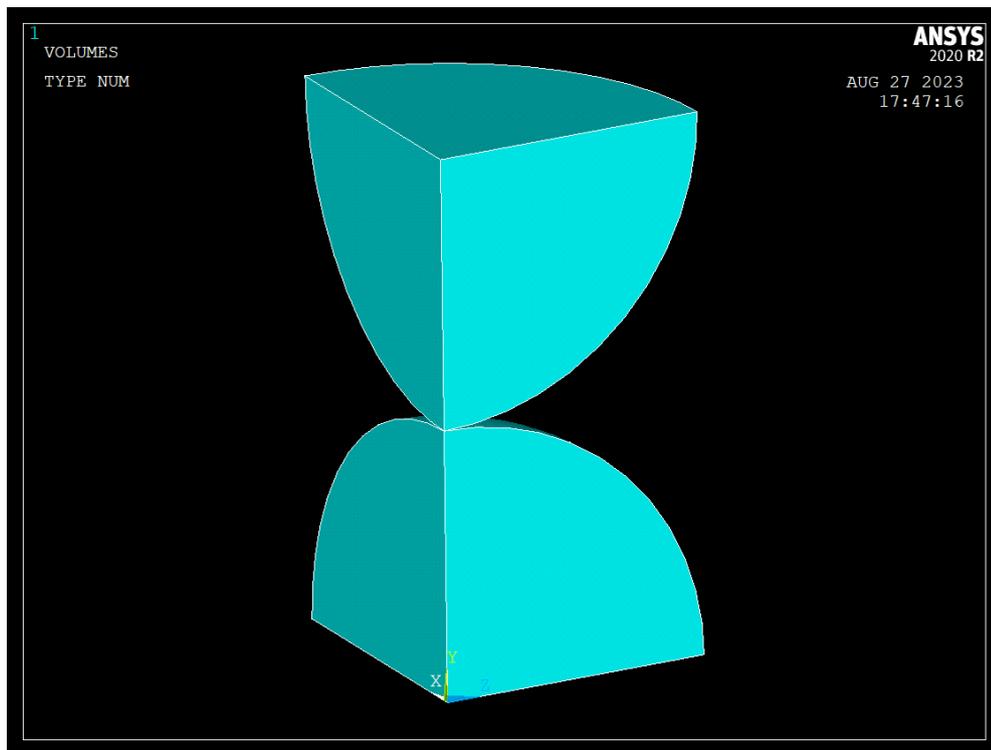


Рис.21. Итоговая геометрическая модель

7. Разбивка сетки и добавление элементов CONTACT и TARGET

Для удобства введём командную строку /PNUM,LINE,1 чтобы видеть номера линий и в верхнем меню переходим в *Plot > Lines*.

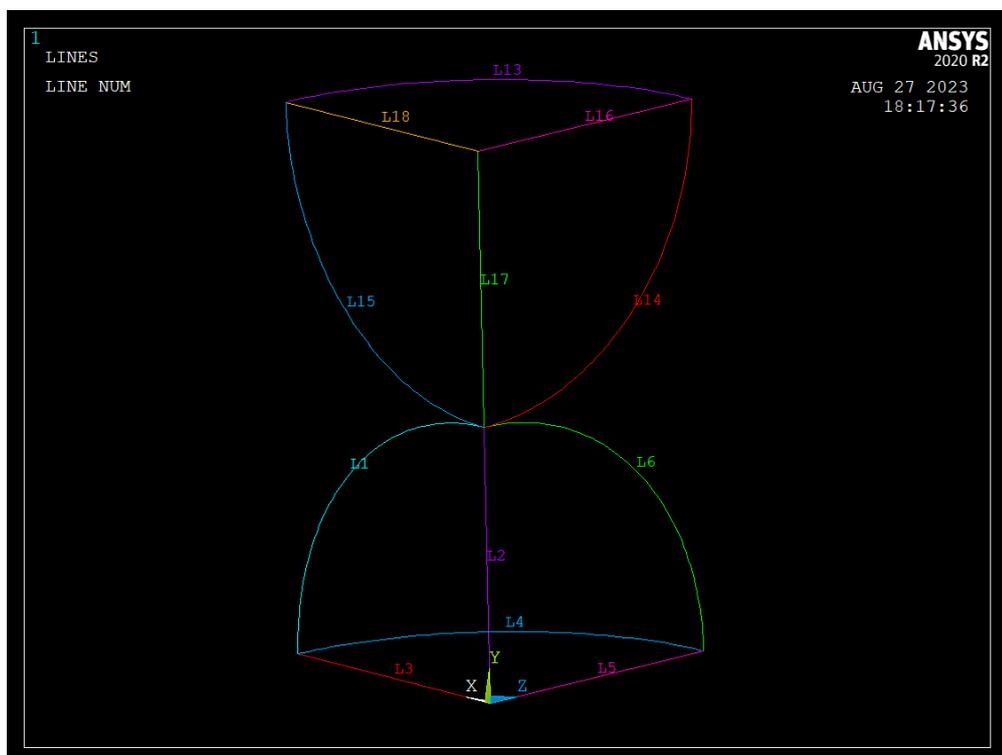


Рис.22. Отображения линий и их номеров

Заходим в *Meshing > Size Cntrl*s > *ManualSize > Lines > Picked Lines* и выбираем линии 1 и 15. Нажимаем *OK*.

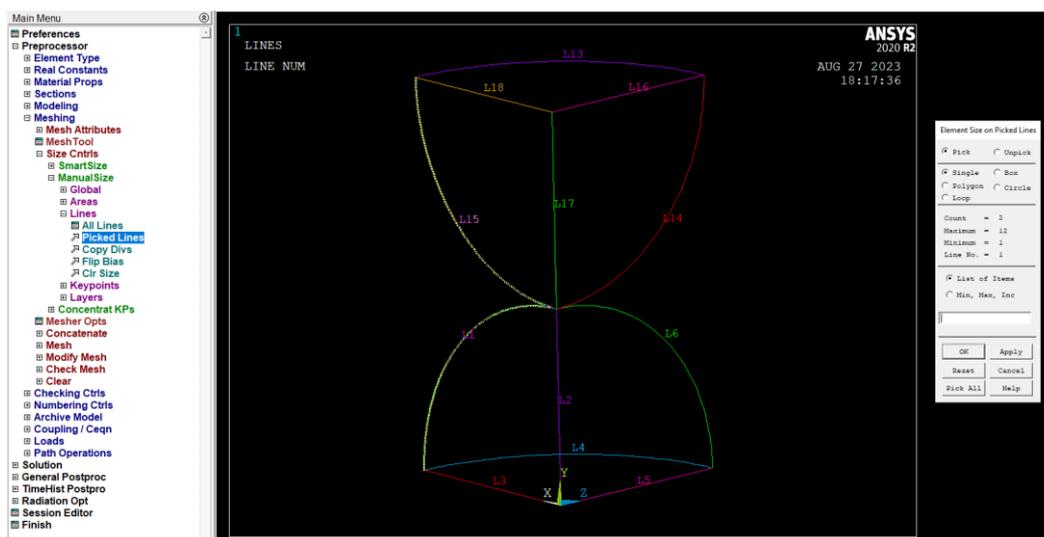


Рис.23. Выбор линий для задания размеров

В открывшемся окне вводим параметры:

- $NDIV = 28$;

– $SPACE = 1/10$.

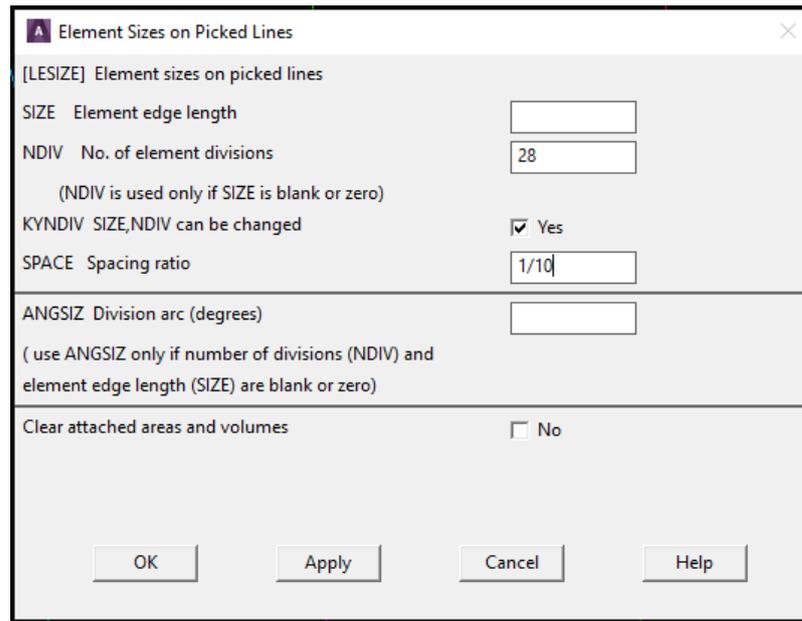


Рис.24. Задание размеров КЭ на выбранных линиях

Таким образом мы добились сгущения сетки в центре модели:

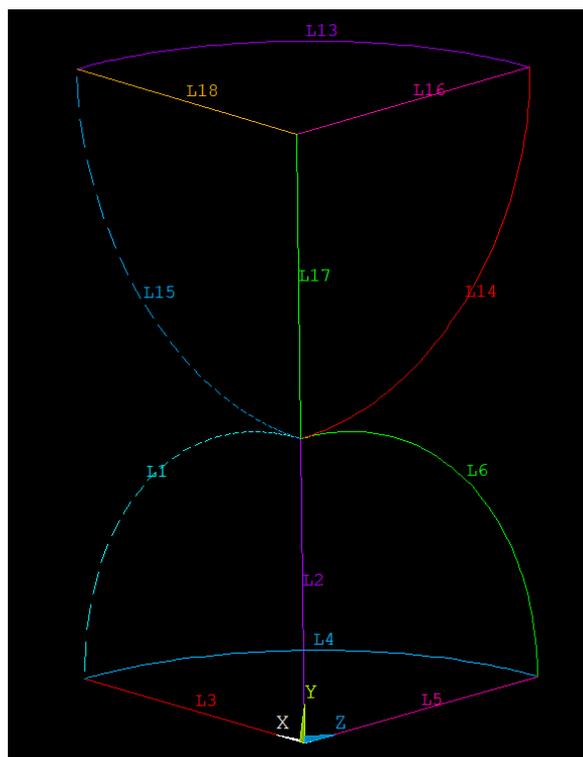


Рис.25. Выбор линий для задания размеров

Далее по той же схеме выбираем линии 2, 6, 14, 17 и параметр SPACE меняем на 10.

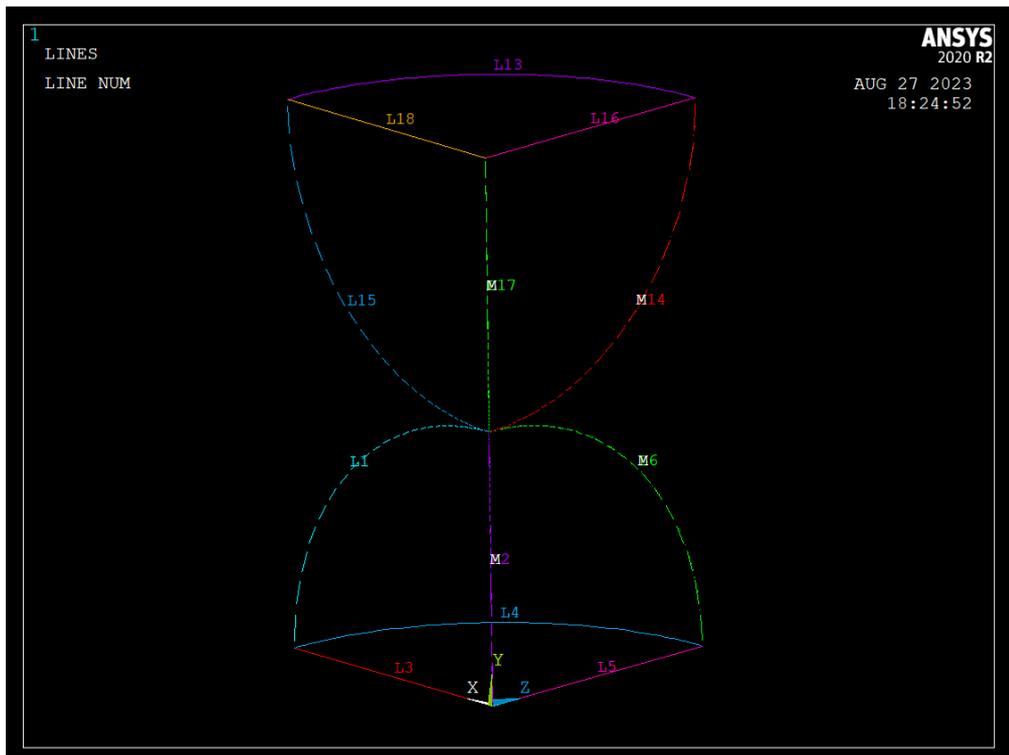


Рис.26. Выбор линий для задания размеров

По тому же принципу выбираем оставшиеся линии, в параметре SPACE ставим пробел.

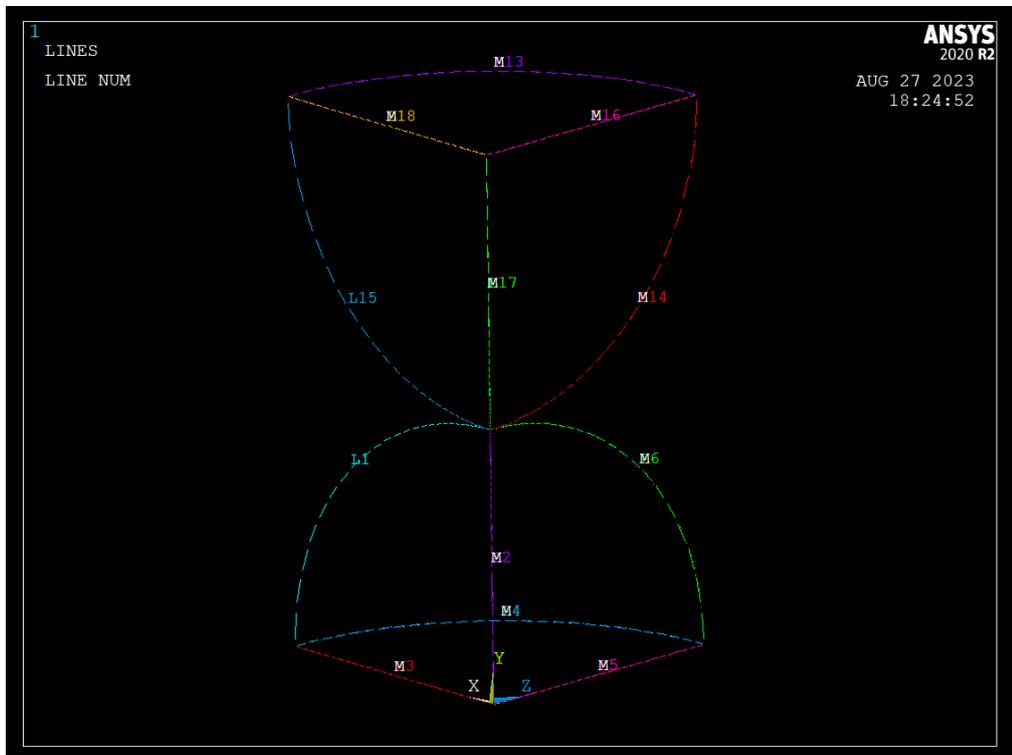


Рис.27. Выбор линий для задания размеров

Переходим в *Mesh > Volumes > Mapped > 4 to 6 sided*, нажимаем *Pick All*.

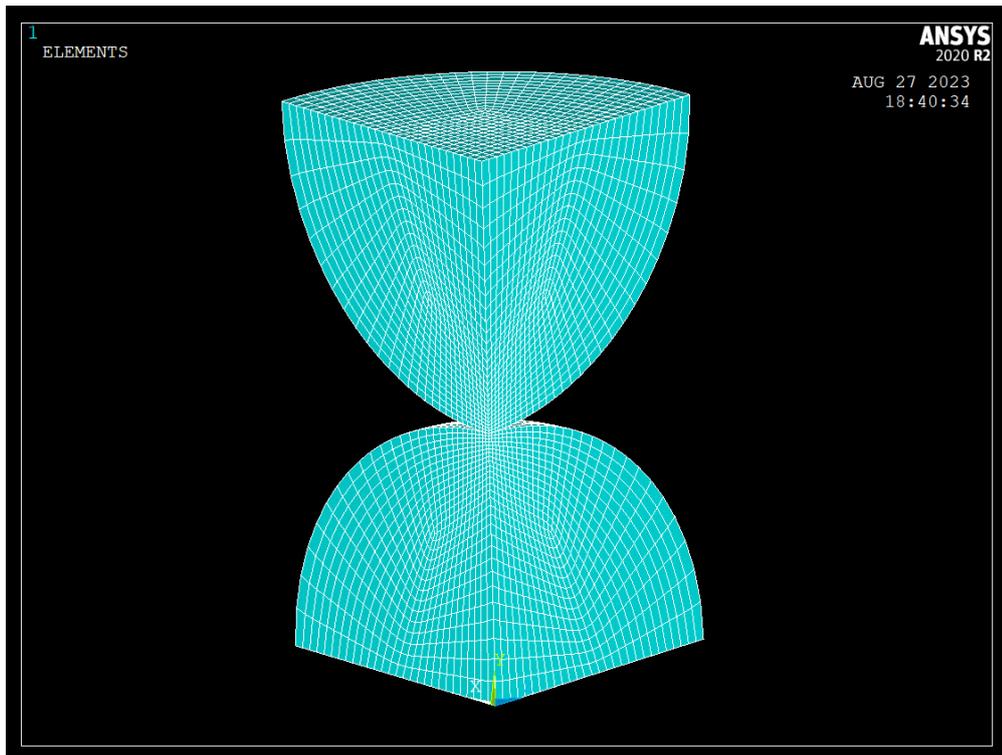


Рис.28. Конечноэлементная модель (без контактных элементов)

Далее в верхнем меню переходим в *Select > Entities*. В открывшемся меню выбираем *Areas, By Num/Pick, From Full* нажимаем ОК и выбираем нужную поверхность.

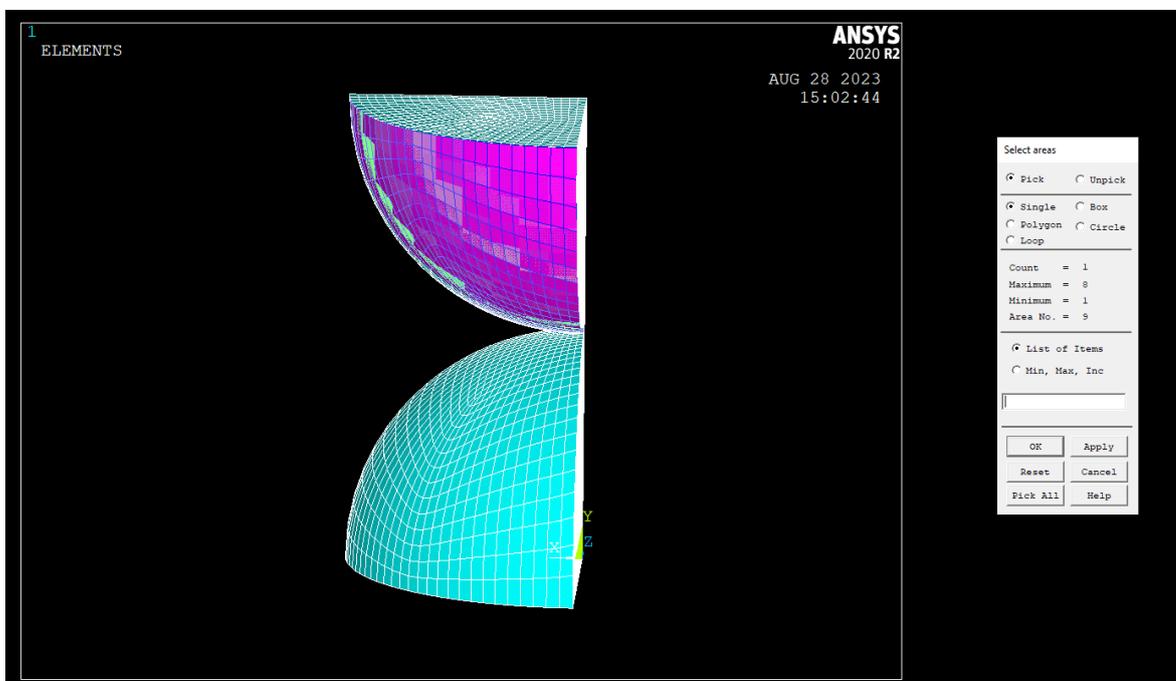


Рис.29. Выбор поверхности для задания контактных элементов

Далее все в том же меню выбираем *Nodes, Attached to, Areas, all* нажимаем ОК.

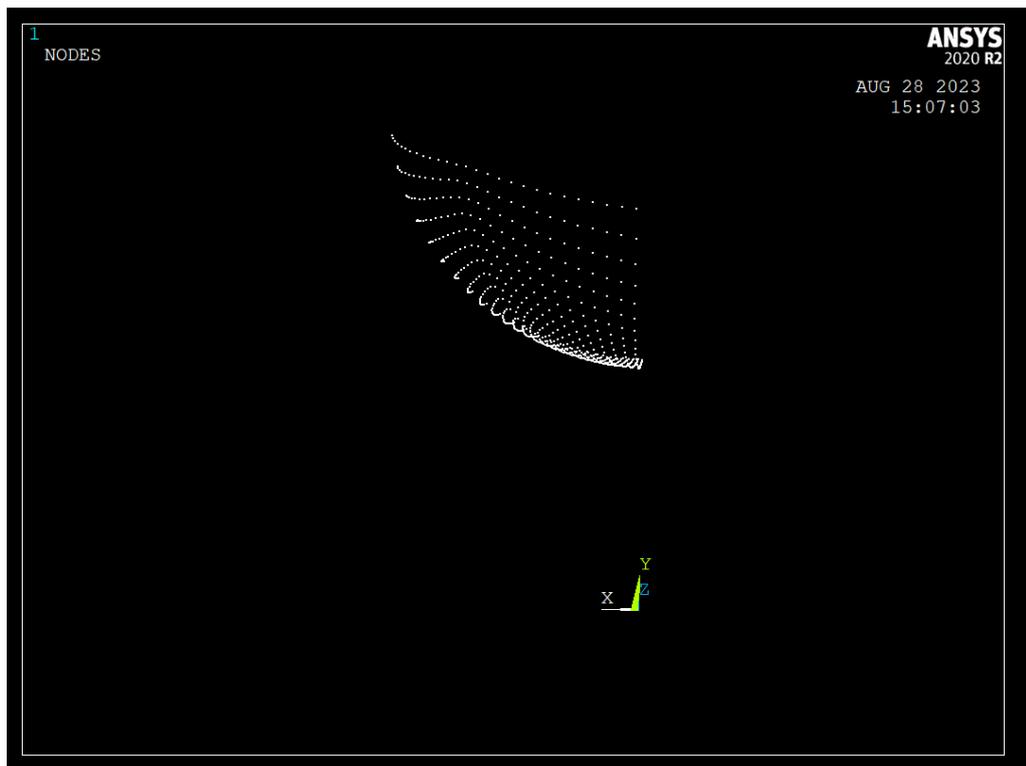


Рис.30. Узлы на контактной поверхности

Далее по такой же схеме выбираем *Elements, Attached to, Nodes* нажимаем ОК.

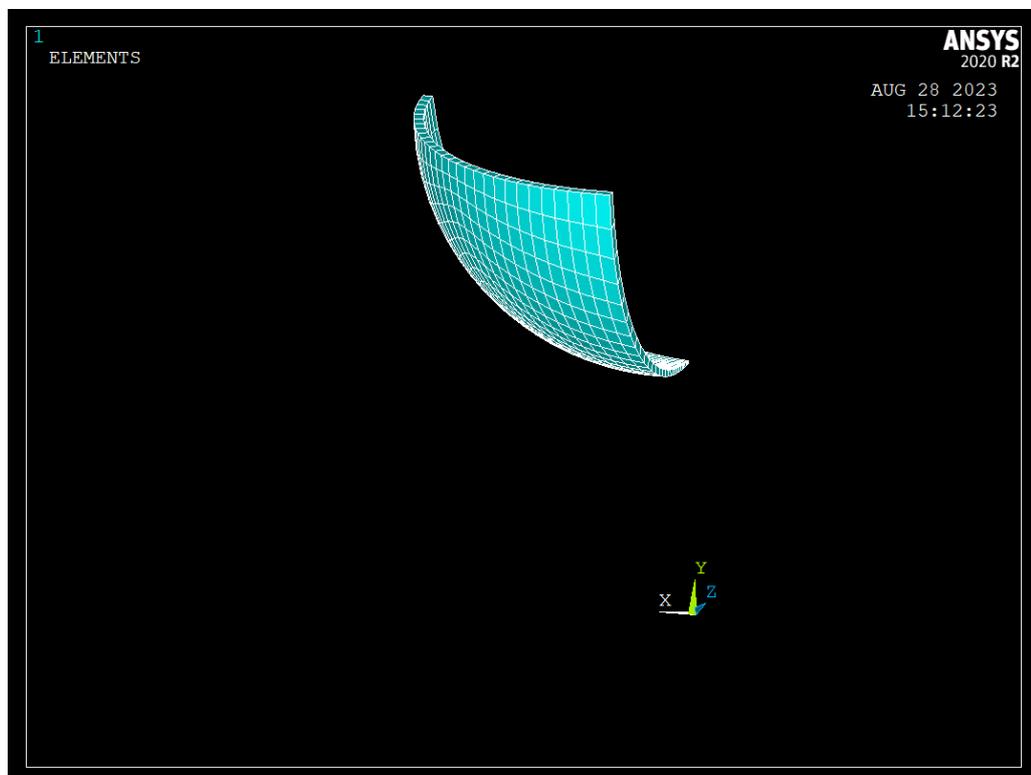


Рис.31. Конечные элементы на поверхности

Далее задаём для этих элементов тип Contact. Для этого заходим в *Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs* и выбираем нужные элементы и константы.

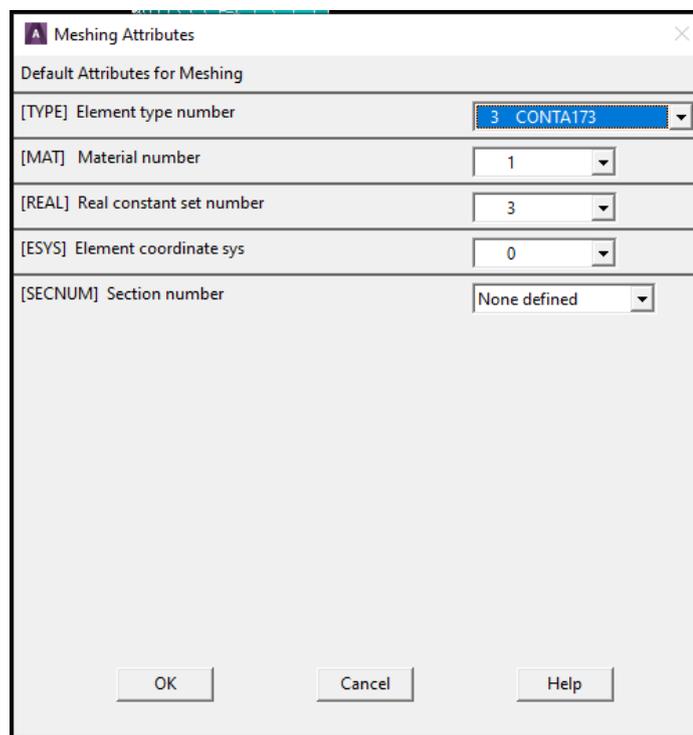


Рис.32. Выбор активных атрибутов конечных элементов

Теперь добавляем для данных элементов типа Contact элементы типа Target. Для этого заходим в *Modeling > Create > Elements > Surf / Contact > Surf to Surf*, в открывшемся окне в *Tab* Bottom surface и в *Shape* Same as target и в меню выбора нажимаем *Pick All*.

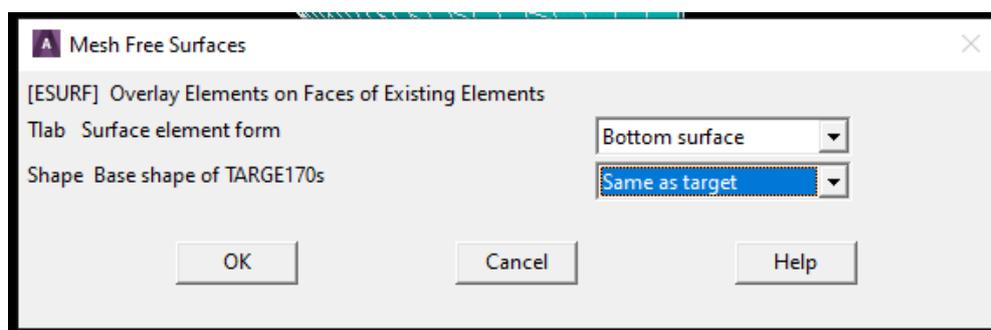


Рис.33. Панель создания поверхностных конечных элементов

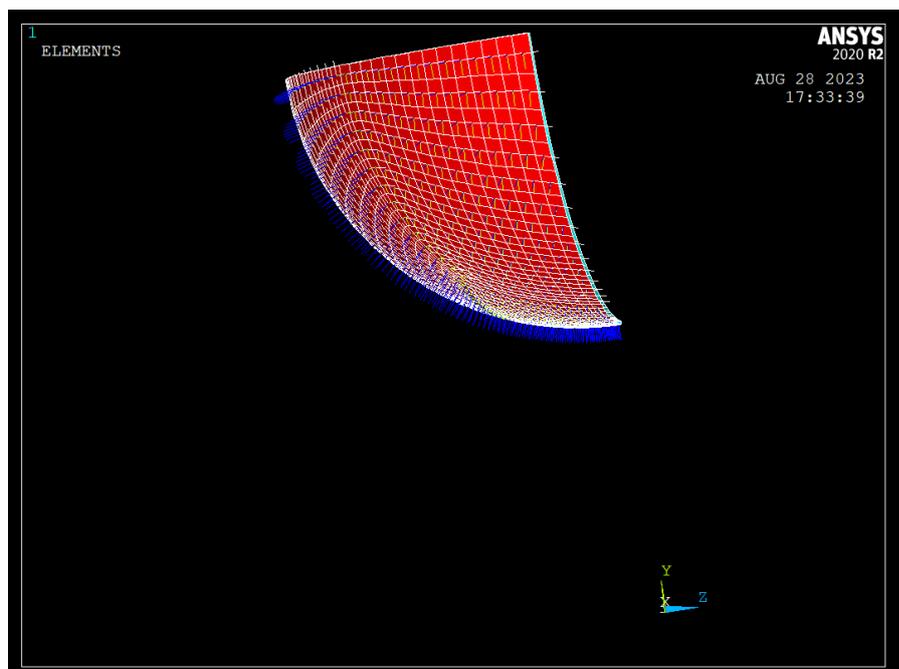


Рис.34. Конечные элементы типа CONTA173

Далее по тому же принципу выбираем верхние элементы нижней части модели и по тому же пути добавляем уже для выбранных элементов типы элементов Target. Только в окне *Mesh Free Surfaces* в *Tab* нужно поставить *Top surfaces*.

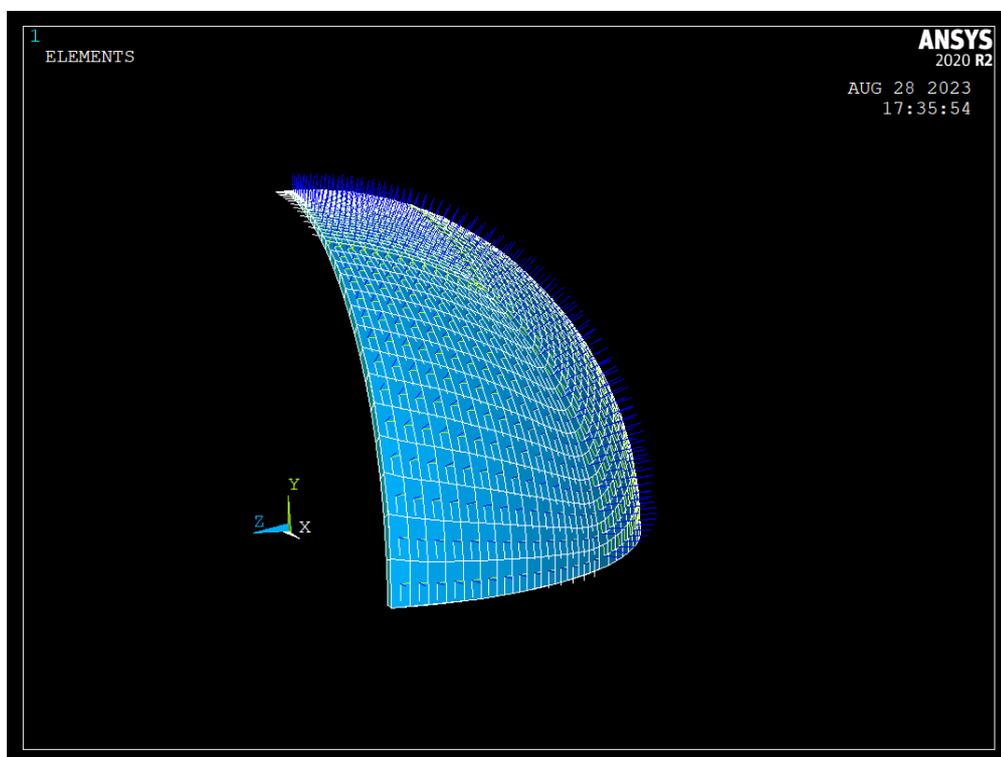


Рис.35. Конечные элементы типа TARGET170

8. Задание граничных условий

Для задания граничных условий необходимо выбрать нижние и верхние узлы модели. Для этого в верхнем меню заходим в *Select > Entities*, в открывшемся меню выбираем *Nodes, By location, Y – Coordinates*, в *Min/Max* пишем *0* и нажимаем *ОК*.

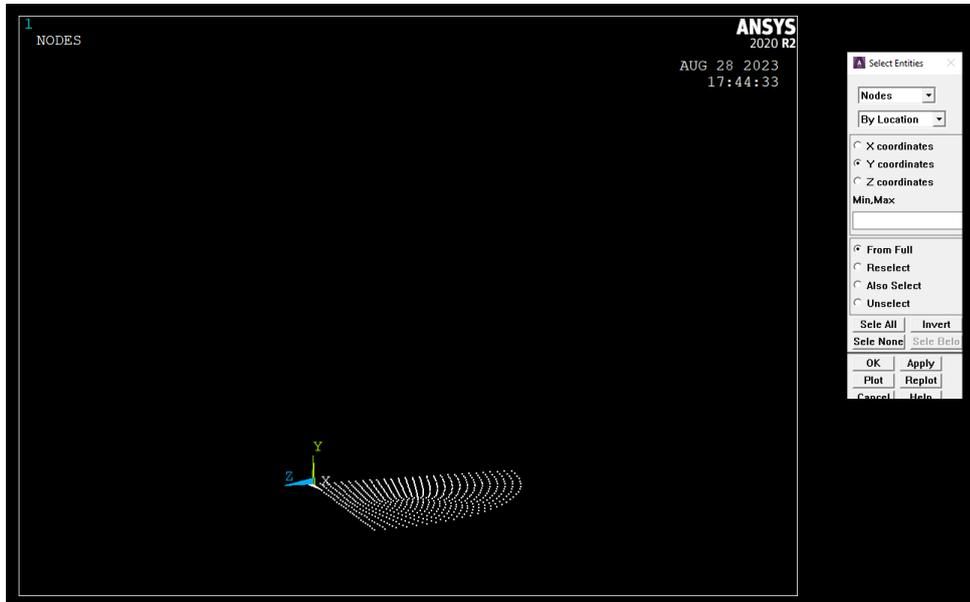


Рис.36. Узлы на нижней поверхности нижней сферы

Далее заходим в *Loads > Define Loads > Apply > Structural > On Nodes*.

В открывшемся окне в *Lab2* выбираем *UY*, *Apply as Constant value*, *VALUE = 2*.

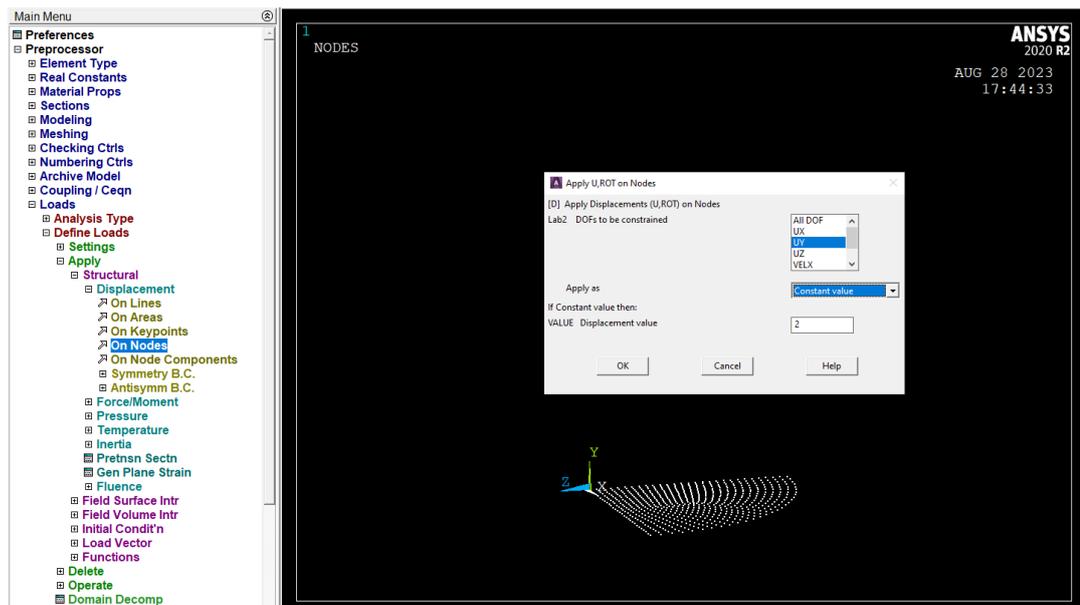


Рис.37. Задание закрепления со смещением

По тому же принципу выбираем верхние узлы, но в окне *Apply U,ROT on Nodes* в параметре VALUE вводим -2.

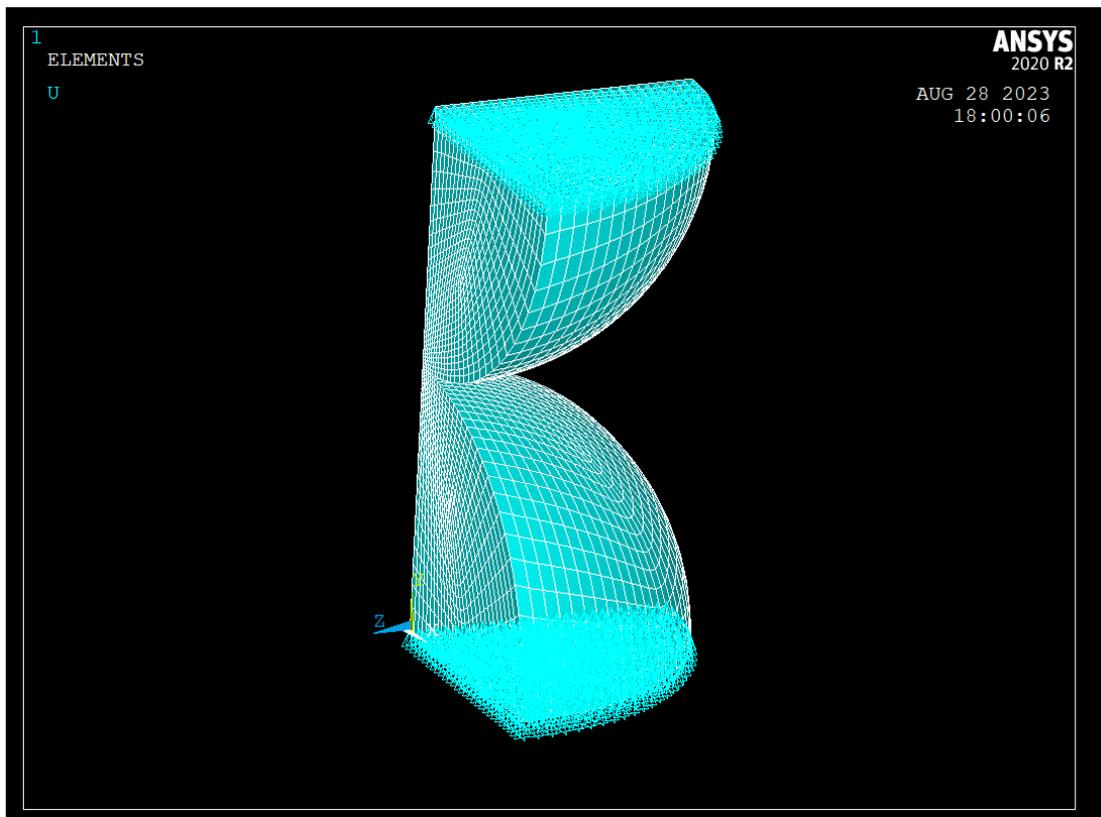


Рис.38. Отображение закреплений

Далее необходимо закрепить плоскости оставшиеся плоскости.

Заходим во все тоже меню *Select Entities* и выбираем следующие параметры:



Рис.39. Селектирование узлов

Потом заходим в то же меню для нагрузок и выбираем следующие параметры:

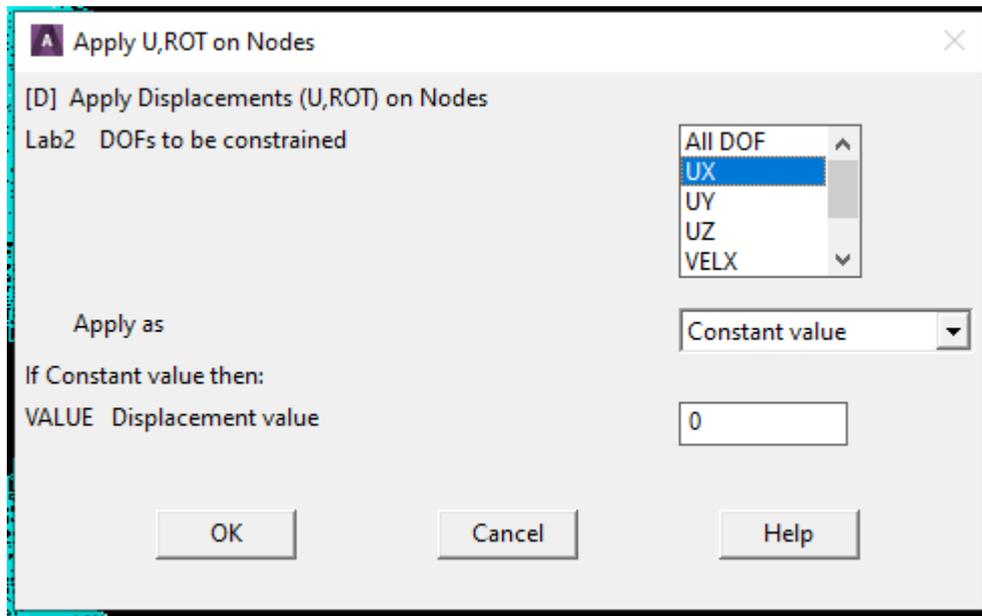


Рис.39. Задание закреплений для условий симметрии

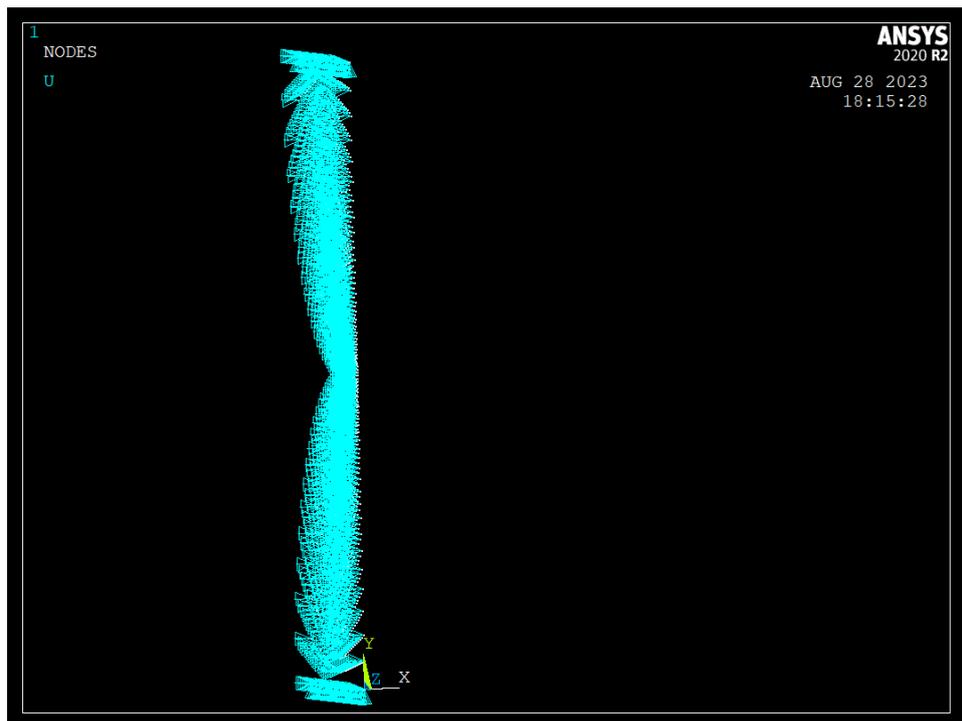


Рис.40. Отображение закреплений в плоскости YZ

По тому же принципу закрепляем узлы по координате Z.

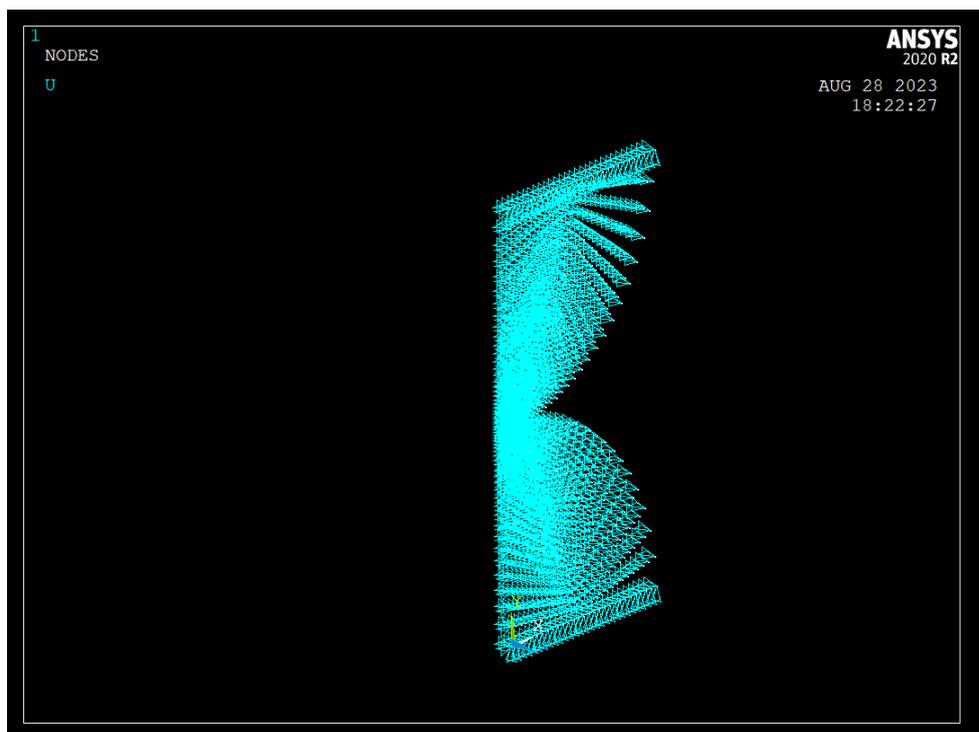


Рис.41. Отображение закреплений в плоскости XY

9. Решение

Переходим в *Solution > Analysis Type > Sol'n Controls*, в открывшемся окне выбираем следующие параметры расчета:

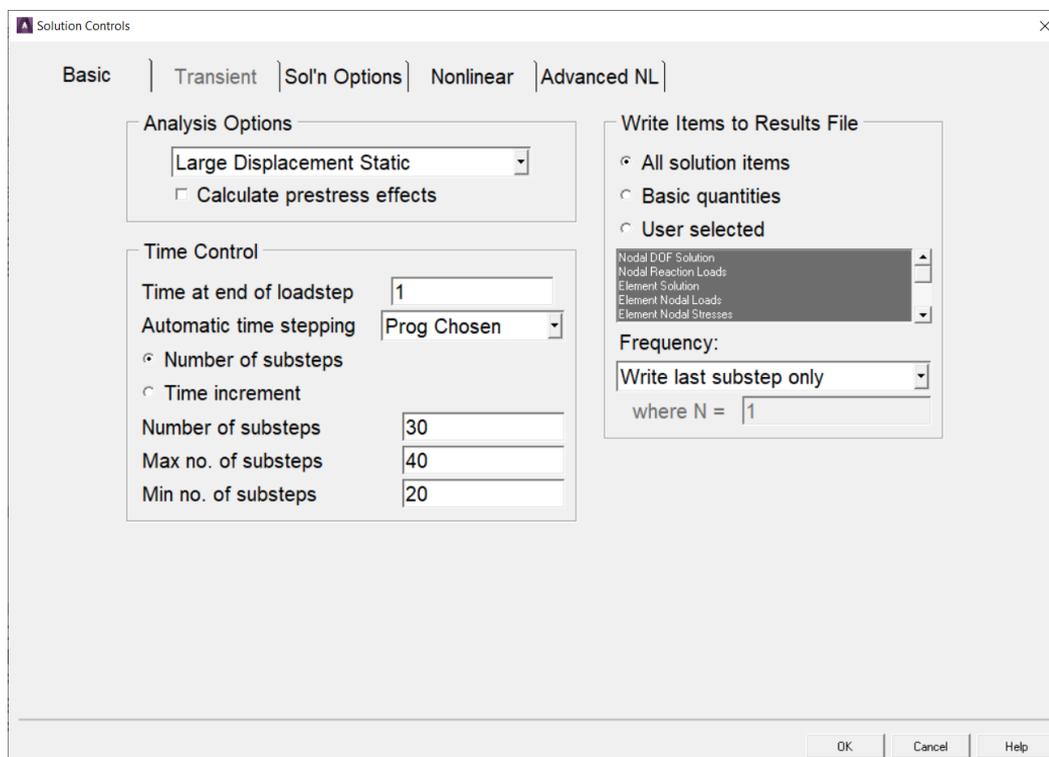


Рис.42. Настройки решения

Нажимаем ОК. Запускаем расчет. Переходим в *Solution > Solve > Current LS*, в открывшемся окне нажимаем ОК.

10. Вывод результатов

Для вывода изополей напряжений переходим в *General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu*, в открывшемся окне выбираем *Stress > Y-Component of displacement* и нажимаем *APPLY*.

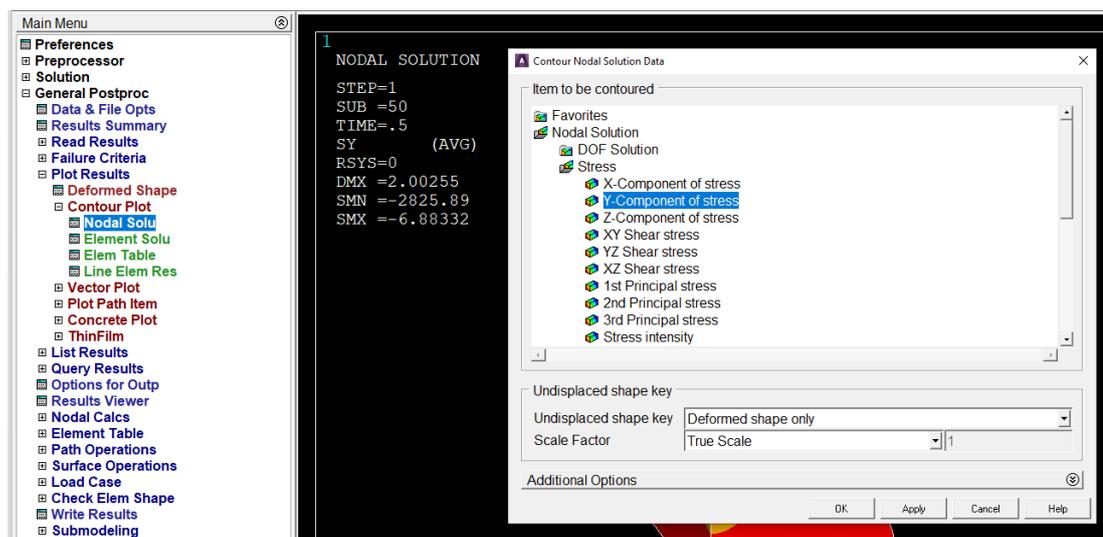


Рис.43. Выбор напряжений вдоль оси Y для отрисовки

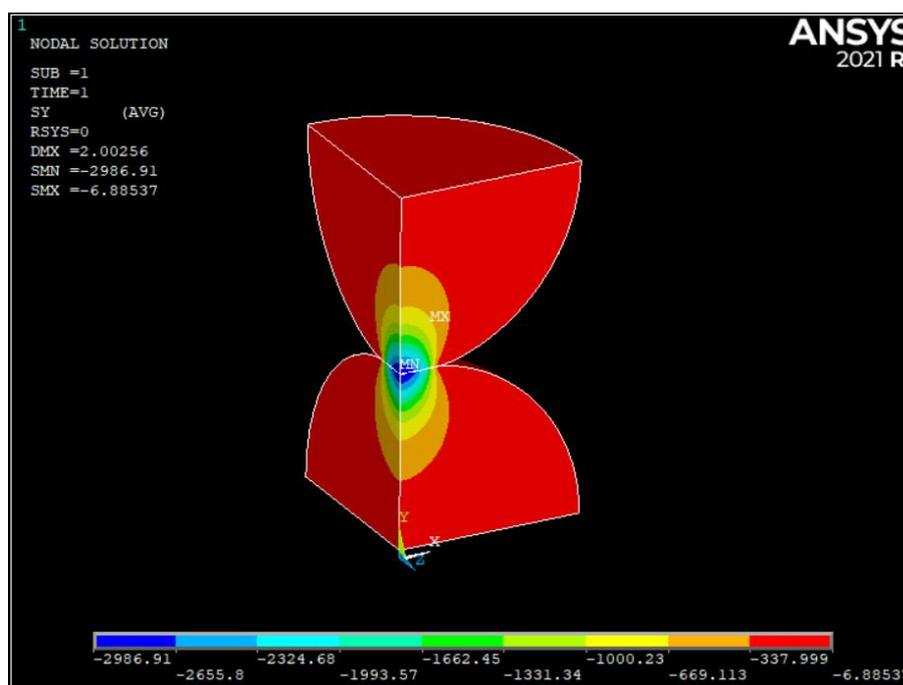


Рис.44. Изополя напряжений вдоль оси Y, МПа

Для построения графика реакции в центральном узле сферы переходим в *TimeHist Postproc* и в выпадающем автоматически меню нажмем *Add data* (зеленый плюс), выберем *Reaction Forces > Structural Forces > Y-Component of force* и выберем соответствующий узел.

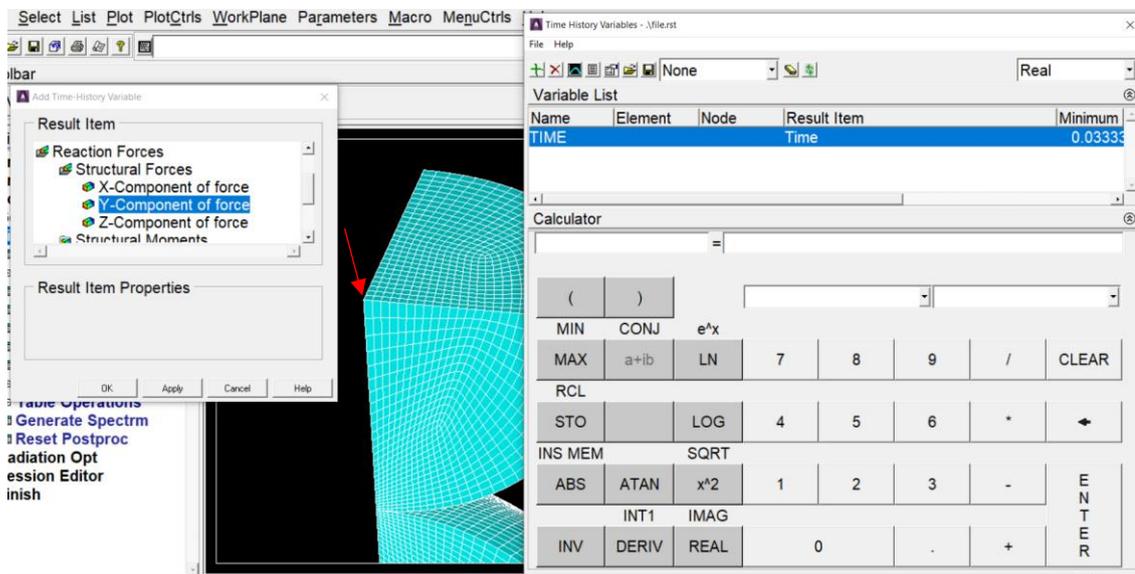


Рис.45. Создание графика реакции в центральном узле

Нажав *Graph data*, получим следующий график:

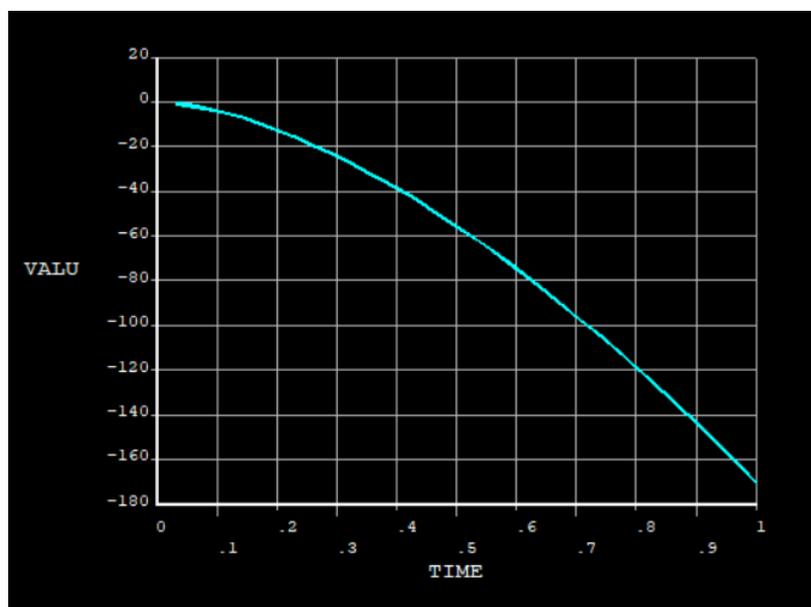


Рис.46. График реакции в центральном узле

11. Заключение

В работе был выполнен расчет контактной задачи Герца двух сфер при смещении каждой друг к другу. Были получены давление в месте контакта двумя способами: аналитическим и численным. В случае аналитического решения был получен результат $\sigma_{zz} = -2798.3$ МПа. В случае численного решения был получен результат $\sigma_{zz} = -2986.9$ МПа. Погрешность численного решения $\frac{|-2798.3 - (-2986.9)|}{2798.3} \cdot 100\% = 6.3\%$. Для улучшения результата следует увеличить количество шагов решения.

Код программы

```
FINISH  
/CLEAR  
/OUTP,,OUT  
/PREP7
```

```
E=20000          !Модуль упругости  
MU=0.3          !Коэффициент Пуассона  
R=50            !Радиус сферы  
KOL_LINE=28     !Количество разбиения сетки
```

```
PCIRC,R,0,90     !СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИИ  
VROTAT,ALL,,,,,1,3,90  
VSYMM,Y,1  
VGEN,2,2,,,,2*R  
VDELE,2,,1
```

```
ET,1,SOLID185   !задание типа элемента Solid  
UIMP,1,EX,PRXY,,E,MU  !задание характеристик материала
```

```
LSEL,S,LINE,,1   !создание сетки  
LSEL,A,LINE,,15  
LESIZE,ALL,,,KOL_LINE,1/10  
LSEL,S,LINE,,2  
LSEL,A,LINE,,17  
LSEL,A,LINE,,6  
LSEL,A,LINE,,14  
LESIZE,ALL,,,KOL_LINE,10
```

```
LSEL,S,LOC,Y  
LESIZE,ALL,,,KOL_LINE  
LSEL,S,LOC,Y,2*R  
LESIZE,ALL,,,KOL_LINE
```

```
LSEL,ALL  
VMESH,ALL
```

```
ET,3,CONTA173   !задание типа элемента Contact  
KEYO,3,4,3     !опции элемента CONTA173
```

KEYO,3,10,2 !опции элемента CONTA173
ET,4,TARGE170 ! задание типа элемента Target

ASEL,S,,,9 !добавление элементов Contact и Target в модель
NSLA,S,1
ESLN,S
TYPE,3
ESURF,,BOTTOM
TYPE,4

ASEL,S,,,2
NSLA,S,1
ESLN,S
ESURF
TYPE,4

NSEL,S,LOC,Y ! задание граничных условий
D,ALL,UY,2
NSEL,S,LOC,Y,2*R
D,ALL,UY,-2
NSEL,S,LOC,X
D,ALL,UX
NSEL,S,LOC,Z
D,ALL,UZ

ALLSEL

/SOLU ! модуль настроек решения
ANTYPE,STAT
NLGEOM,ON ! учет геометрической нелинейности
NSUBST,30,40,25 ! задание количества шагов решения
OUTRES,ALL,ALL ! отображение графика сходимости
SOLVE ! запуск задачи на решение

/POST1
SET,LAST
PLNSOL,S,Y ! вывод изополей давления

Практическая работа №6

Расчёт предельного вертикального давления при трехосном сжатии

Методические указания к выполнению практической работы 6

Для создания расчётной модели будем использовать препроцессор Ansys Mechanical APDL.

После запуска APDL появится окно:

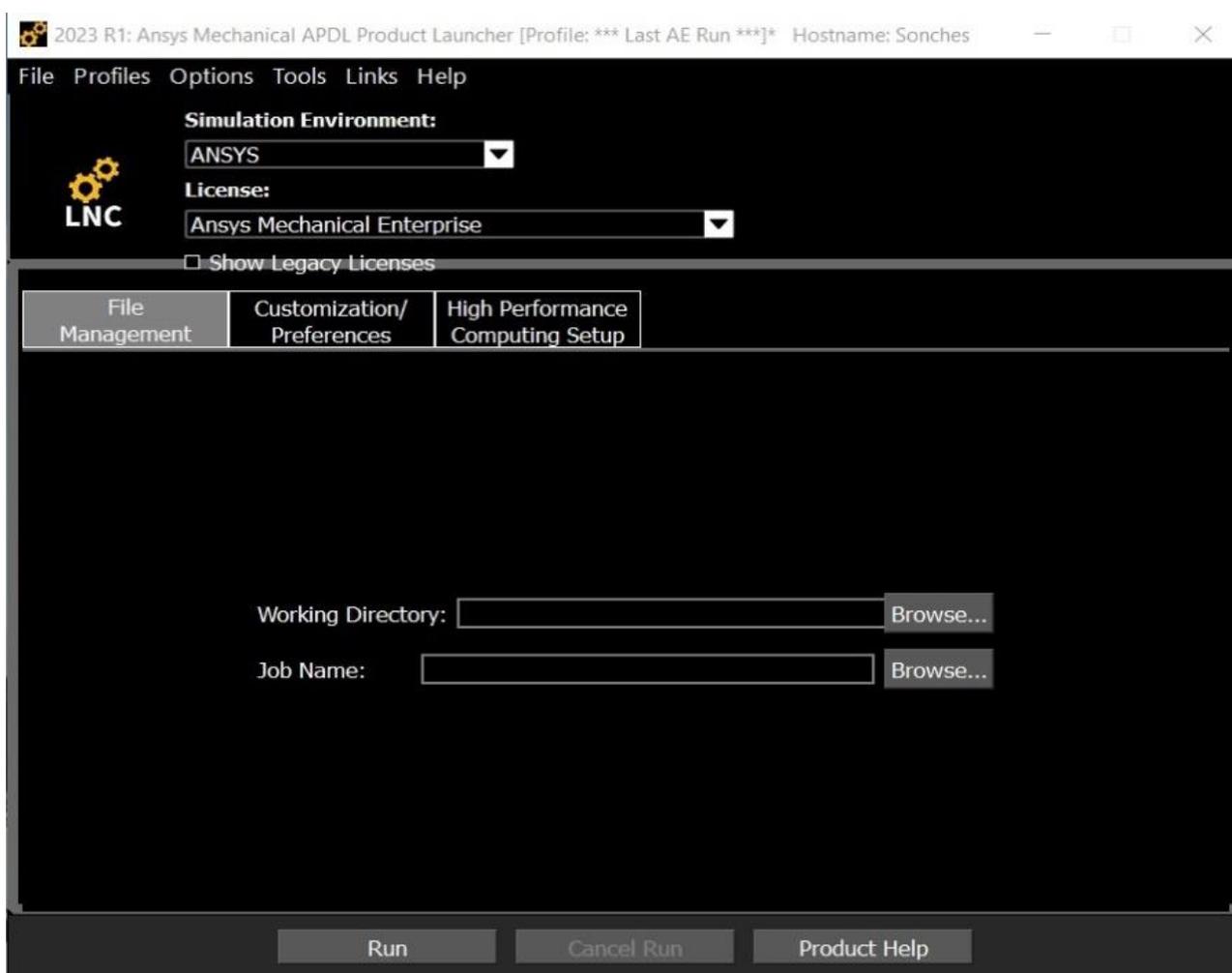


Рис.1. Окно запуска программного комплекса ANSYS Mechanical

Рядом с окном *Working Directory* нажать кнопку «Browse...» и выбрать свою рабочую директорию. В этой директории ANSYS будет сохранять все файлы. Директория должна быть создана заранее. В именах директории и пути к директории допускаются только латинские буквы. Рядом с окном *Job Name* задаем имя файла.

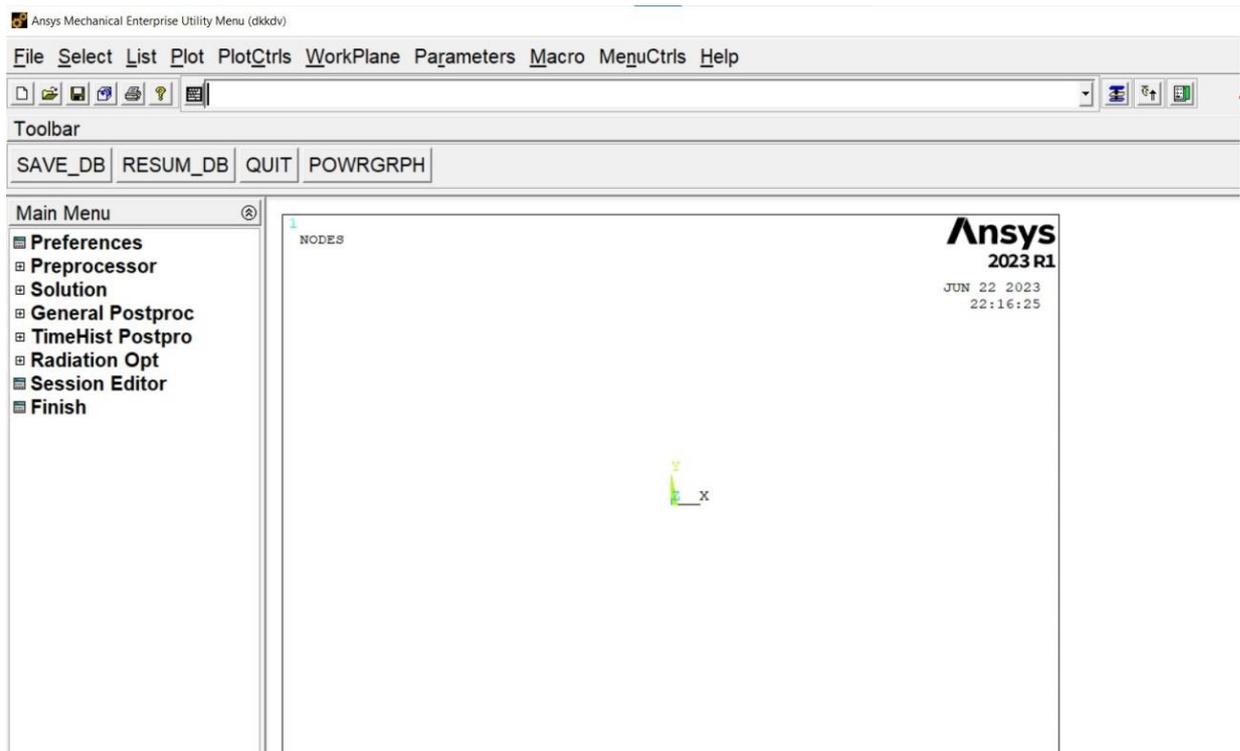


Рис.2. Рабочее окно программного комплекса ANSYS Mechanical

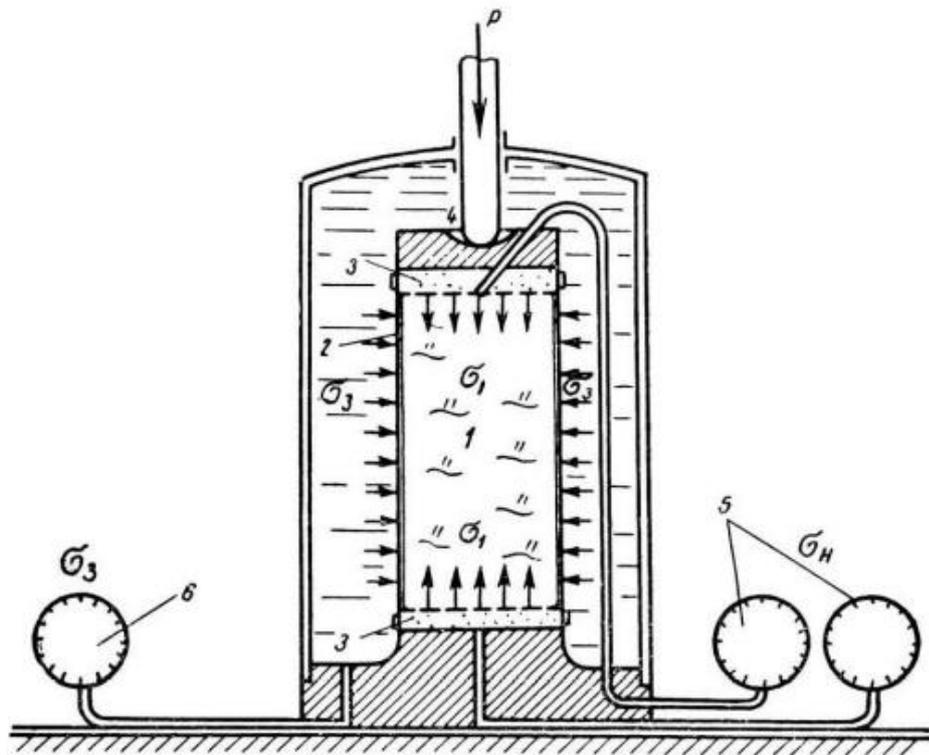


Рис.3. Схема прибора для испытания на трехосное сжатие

Трехосное сжатие грунтового образца является примером НДС грунтового массива в точке (элементарном объеме) на глубине и наиболее точно соответствует работе грунта в естественных условиях. Испытание проводят в лаборатории на образцах цилиндрической формы в приборе трехосного сжатия. Принципиальная схема приведена на Рисунке 1. Образец грунта диаметром не менее 38 мм и высотой (2...2.5) D подвергается всестороннему давлению $\sigma_2 = \sigma_3$ и получает объемные деформации. После этого при постоянном боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = const$ вертикальное давление σ_1 увеличивается до момента потери устойчивости грунтового образца ($\sigma_1^{\text{пред}}$).

Основной задачей моделирования является определение предельного вертикального давления на образец $\sigma_1^{\text{пред}}$ при различном боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3$ при осесимметричном нагружении.

Таким образом, целью данного верификационного примера является моделирование трехосного испытания для оценки корректности работы верифицируемой модели грунта Мора-Кулона в рамках элементарного объема.

Положительным результатом верификации будет получение равенства уравнения условия текучести для каждой модели при подстановке полученных значений давлений:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3, \text{ где } \sigma_1 = \sigma_1^{\text{пред}}).$$

Условия текучести для модели Мора-Кулона ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ – *главные напряжения*):

$$\sigma_1 \frac{1 - \sin \varphi}{2c \cos \varphi} - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{2c \cos \varphi} = 1$$

Исходные данные к задаче:

- высота цилиндрического образца $h = 0.1$ м;
- диаметр $d = 0.05$ м;
- Модель грунта: Мор-Кулон
- Параметры для модели Мора-Кулона:
 - Модуль деформации грунта $E = 2,5 \cdot 10^7$ Па;
 - Коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$;
 - Удельное сцепление (когезия) $c = 45 \cdot 10^3$ Па;
 - Угол внутреннего трения $\varphi = 25$ град;
 - Угол дилатансии грунта $\psi = 25$ град;
- Нагрузка:
 - Всестороннее давление: 100 кПа;
 - Дополнительное вертикальное давление: $3 \cdot 388 = 1164$ кПа (в 3 раза больше предельного вертикального давления, полученного из условия текучести Мора-Кулона).

Решение состоит из двух расчетных этапов:

1. Всестороннее обжатие образца $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$.
2. Приложение дополнительной вертикальной нагрузки $\Delta\sigma_1$, заведомо больше ее предельного значения.

Определение предельной нагрузки $\sigma_1^{\text{пред}} = \sigma_1 + \Delta\sigma_1$ осуществляется с использованием процедуры автоматического задания шага приращения нагрузки, где с установленной точностью определяется доля нагрузки, при которой система имеет устойчивое решение (условия сходимости выполняются).

Для улучшения сходимости численного решения, в качестве нагрузки для 2-го этапа расчета (приложение дополнительной вертикальной нагрузки $\Delta\sigma_1$, заведомо больше ее предельного значения) в ANSYS MAPDL будет прикладываться заданное смещение нижней опоры, пересчитанное из давления:

Закон Гука: $\sigma = E\varepsilon$

Перемещение: $u = \int_0^h \varepsilon dx = \varepsilon h$

Подставив перемещение в закон Гука:

$$\sigma = E \frac{u}{h}, \text{ откуда } u = \frac{\sigma h}{E},$$

Где: E – модуль деформации грунта, $\sigma = \sigma_1^{\text{пред}}$, h – высота цилиндрического образца, u – заданное смещение опоры, пересчитанное из предельного давления $\sigma_1^{\text{пред}}$, прикладываемое в качестве 2-го этапа решения в ANSYS.

Аналитическое решение

Воспользуемся условием текучести для модели Мора-Кулона:

$$\sigma_1 \frac{1 - \sin 25}{2 \cdot 45 \cdot \cos \varphi} - \sigma_3 \frac{1 + \sin 25}{2 \cdot 45 \cdot \cos 25} = 1$$

Подставив в условие текучести Мора-Кулона боковое давление $\sigma_3 = 100$ кПа, получим величину предельного вертикального давления $\sigma_1^{\text{пред}}=388$ кПа.

Полученное значение $\sigma_1^{\text{пред}}=388$ будет определено на основе численного моделирования в программном комплексе Ansys Mechanical APDL с использованием модели пластичности Мора-Кулона.

Решение с помощью Ansys Mechanical APDL

1. Задание типа конечных элементов и их параметров

В *Main Menu* переходим в *Preprocessor* > *Element Type* > *Add/Edit/Delete* в открывшемся окне (*Element type*) нажимаем кнопку *Add*:

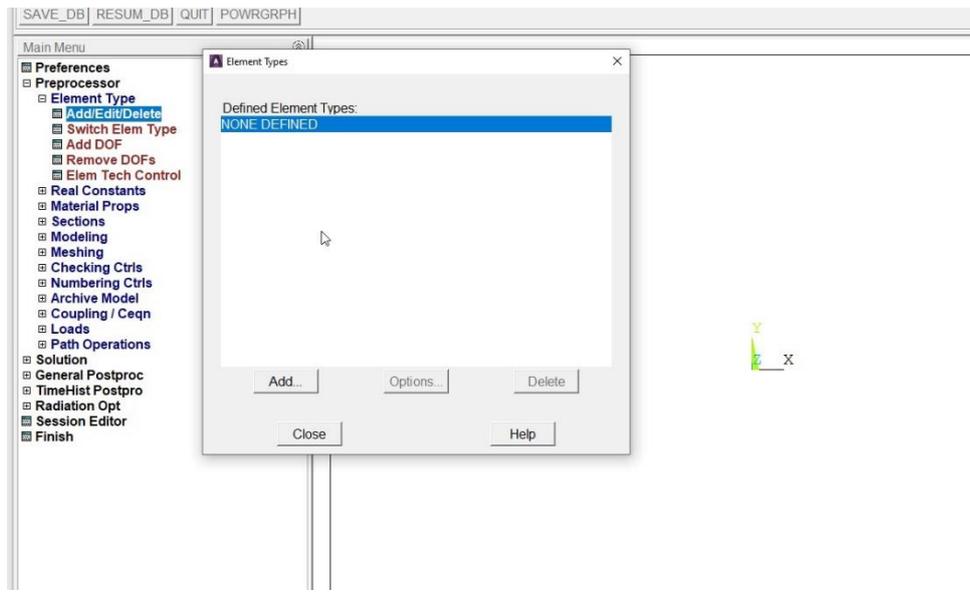


Рис.4. Окно *Element type*

В открывшемся окне в библиотеке элементов (*Library of element types*) выбираем *Solid – 20 node 186* (Трехмерный 20-ти узловый механический конечный элемент). В ячейке *Element type* вместо 1 ставим 3 (ссылочный номер данного типа элемента).

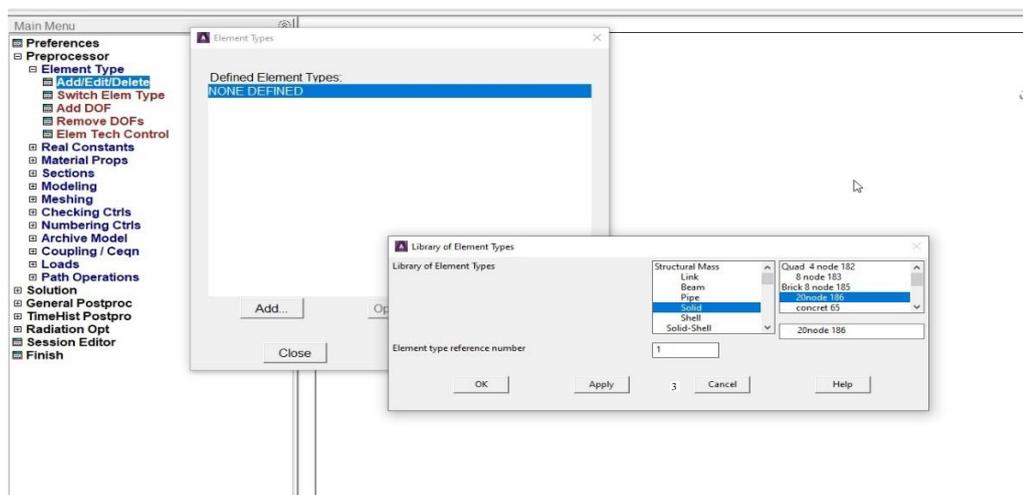


Рис.5. Выбор типа конечного элемента

Для дополнительной настройки изменим опции (команда KEYOPT) для конечного элемента SOLID186.

В командной строке прописываем:

KEYOPT,3,2,1

KEYOPT,3,3,0

KEYOPT,3,6,0

KEYOPT,3,8,0

Где: 1й параметр – ссылочный номер данного типа элемента;

2й параметр – номер опции для данного конечного элемента SOLID186 (более подробно опции для настройки можно изучить в разделе Element Reference в справке ANSYS Help);

3й параметр – значение данной опции (по умолчанию 0).

2. Создание геометрии

Создаем цилиндр. Для этого переходим в *Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > By dimensions*. В открывшемся окне прописываем входные параметры геометрической модели (см. исходные данные) и нажимаем *OK*:

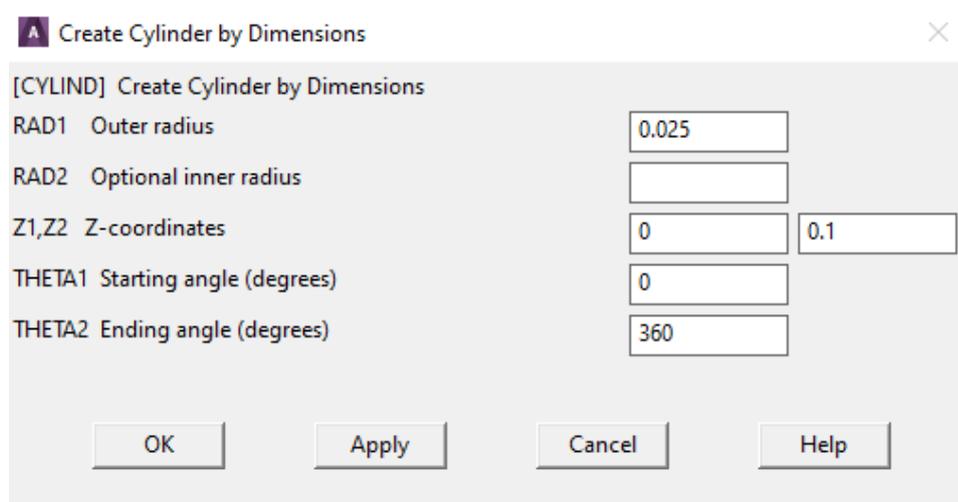


Рис.6. Задание параметров цилиндра

В графическом окне ANSYS появится цилиндрическое объемное тело:

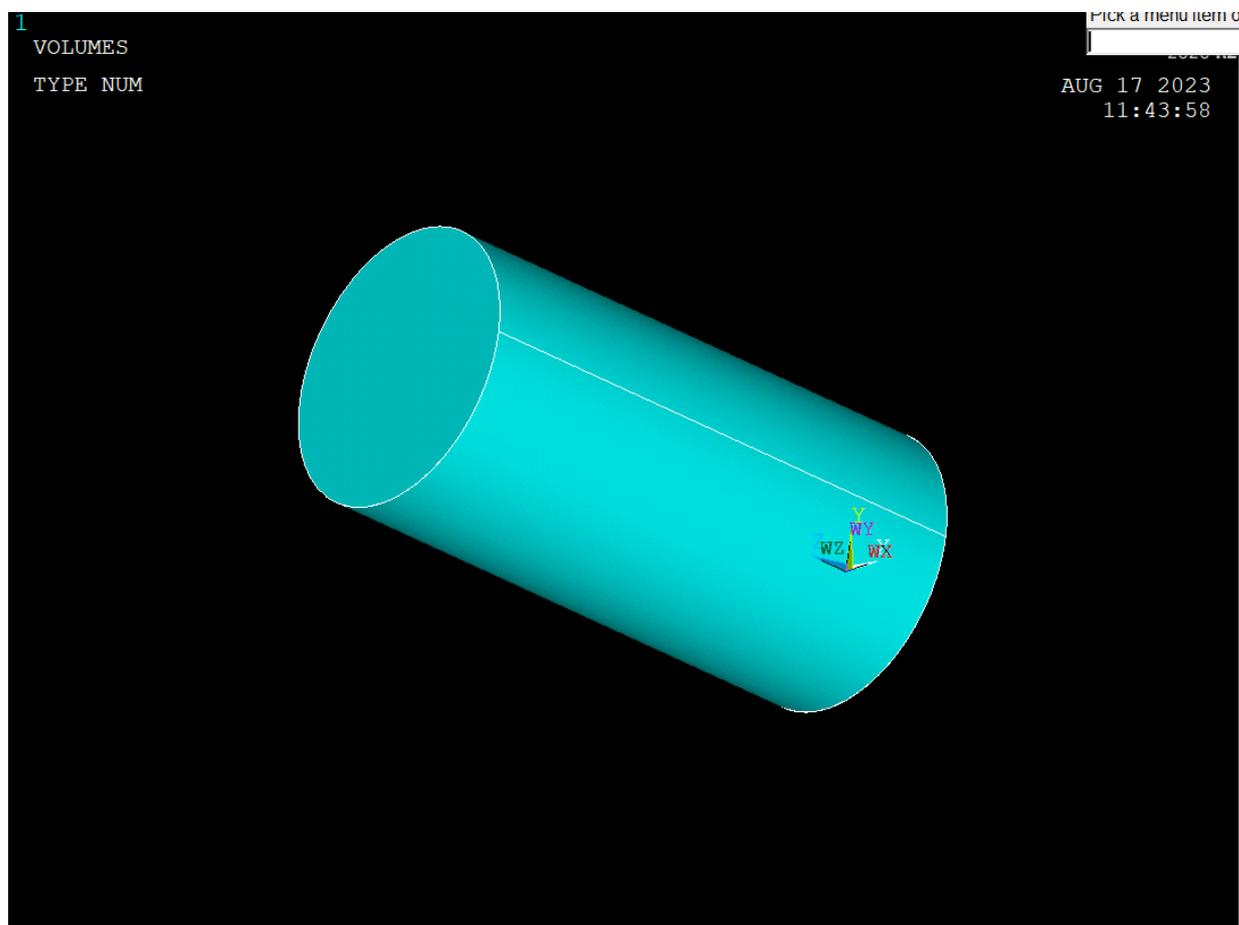


Рис.7. Геометрическая модель цилиндра

3. Задание параметров модели Мора-Кулона

На следующем шаге в ANSYS нужно выбрать модель материала (модель пластичности Мора-Кулона), которую можно задавать через графический интерфейс в Main Menu, либо через командную строку, выполнив следующие команды, опираясь на исходные данные:

```
MP,EX,1,2.5E7  
MP,NUXY,1,0.3  
TB,MC,1,,,BASE  
TBFIELD,TIME,0  
TBDATA,1,25,45E3,0,25,45E3
```

Где: MP – Material Property (свойство материала) для назначения модуля деформации EX и коэффициента Пуассона NUXY. Значение «1» соответствует ссылочному номеру материала.

TB – активирует табличный ввод данных для определения нелинейных данных о материале. Параметр MC в команде TB соответствует модели материала Мора-Кулона с базовыми (BASE) настройками материала.

TBFIELD - Определяет таблицу данных (TB) как зависящую от внутренних переменных ANSYS (в данном случае от времени TIME).

Необязательная команда

TBDATA – определяет таблицу данных для материалов, заданных через команду TB. Значение «1» соответствует позиции в таблице данных. Последующие параметры имеют следующие свойства: *Угол внутреннего трения, удельное сцепление, угол дилатансии, редуцированный угол внутреннего трения, редуцированное удельное сцепление*

4. Создание сетки КЭ

Разобьем цилиндрический объем следующим образом: Зададим размер сетки ESIZE равный 0.01 (в 5 раз меньше, чем диаметр цилиндра) и командой “VSWEEP” построим сетку объемных КЭ для цилиндра:

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Global>Size

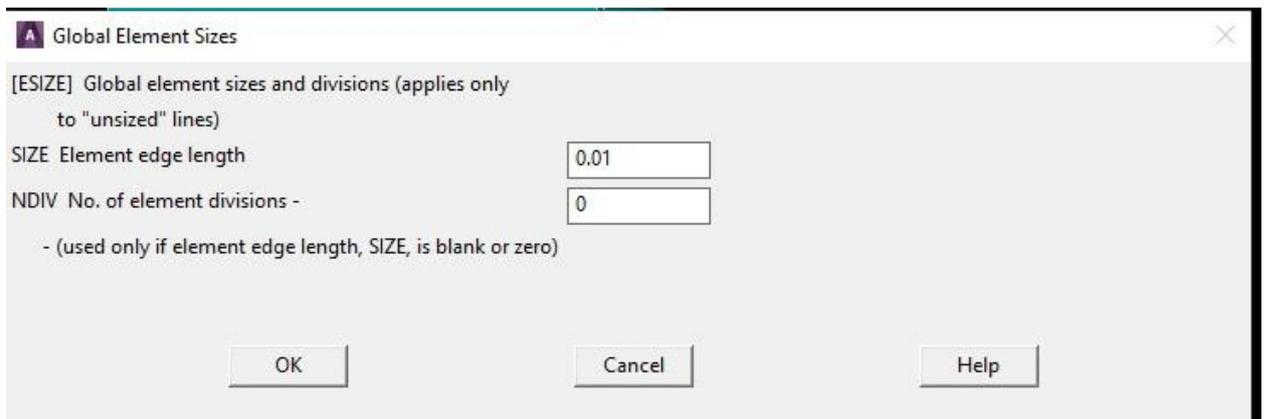


Рис.8. Задание размеров КЭ

Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volume Sweep>Sweep>Pick all

Или командами:



В графическом окне ANSYS получим следующую КЭ модель:

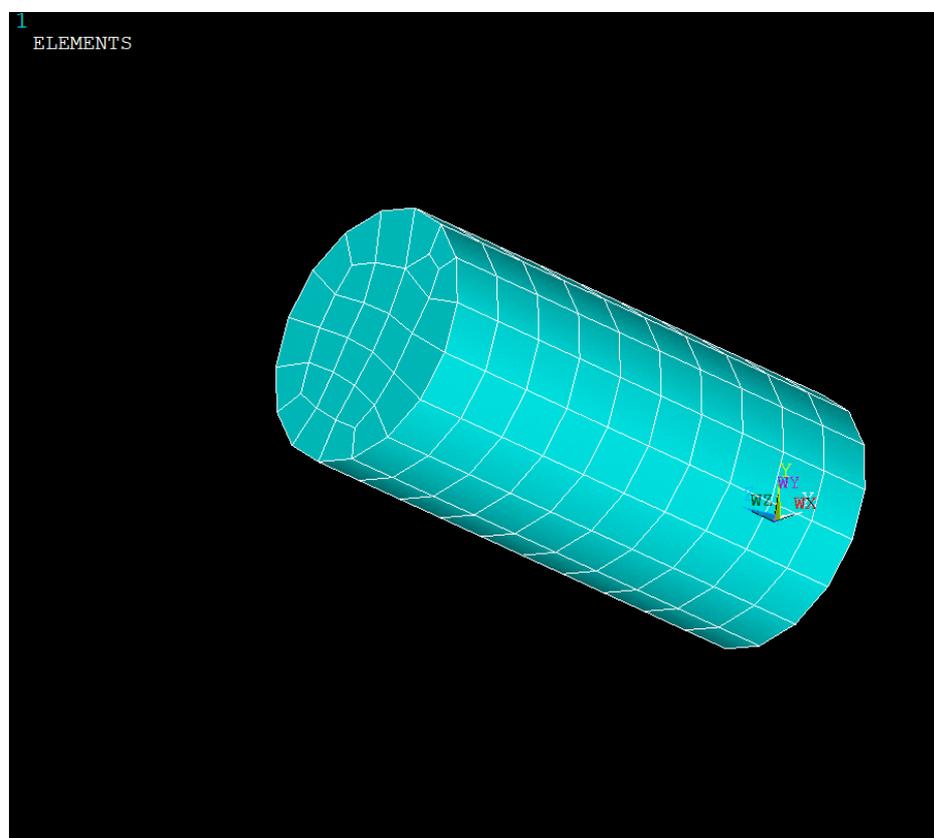


Рис.9. КЭ-модель цилиндра

5. Задание граничных условий

Для создания закреплений выбираем необходимые поверхности, для этого можно выбрать поверхности AREA с помощью графического интерфейса *Utility Menu > Select > Entities > Areas > By Location* и нажать *Apply*)



Рис.10. Выбор поверхности с координатой $z=0$

Либо с помощью команды выбора ASEL поверхностей AREA по координате $Z=0$, записав в командную строку следующую команду:

ASEL,S,LOC,Z,0

Далее задаем закрепления этой поверхности. Для этого переходим в *Preprocessor > Loads > Define loads > Apply > Structural > Displacement > On areas*, в открывшемся окне нажимаем *Pick All*, в следующем окне выбираем *UX* и нажимаем *Apply*. Аналогично закрепляем по *UY* и *UZ*:

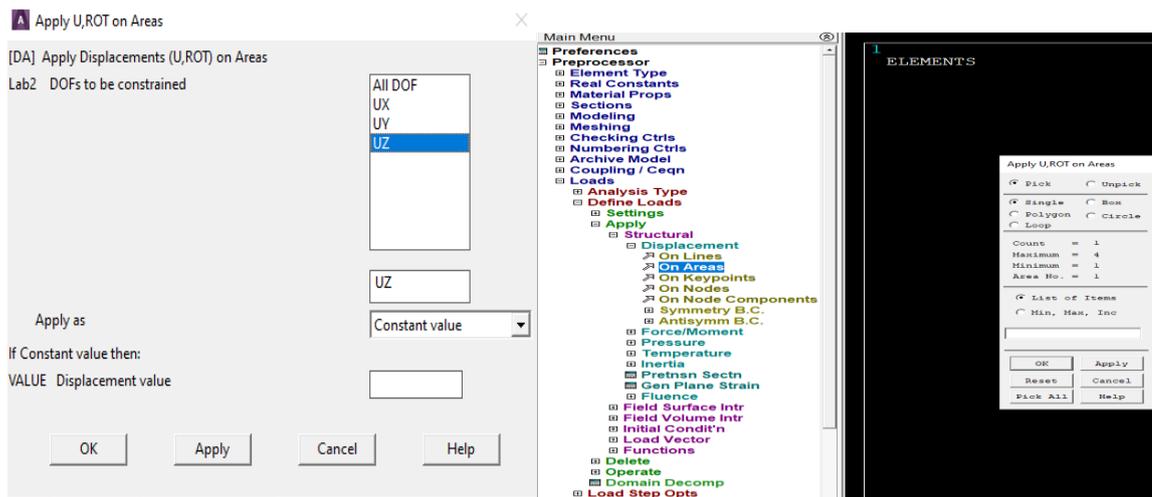


Рис.11. Выбор поверхности с координатой $z=0$

Далее прописываем команду ALLSEL (или в *Utility Menu* > *Select* > *Everything*) и выбираем (с опцией Unselect для того, чтобы убрать их из набора) верхнюю и нижнюю грани по координатам Z:

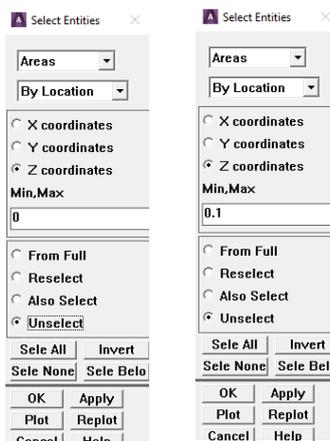


Рис.12. Удаление из выбранного набора поверхностей с координатами $z=0$ и $z=0.1$

Можно сделать так же командами в командной строке через команду ASEL с опцией U (Unselect):

```
ASEL,U,LOC,Z,0
```

```
ASEL,U,LOC,Z,0.1
```

Для удобства дальнейшей работы с поверхностями, создадим именные компоненты для оставшихся после Unselect поверхностей. Для этого нажимаем в *Utility Menu > Select > Comp/Assembly>Create Component* (Или командой *CM,SIDE,AREA*)

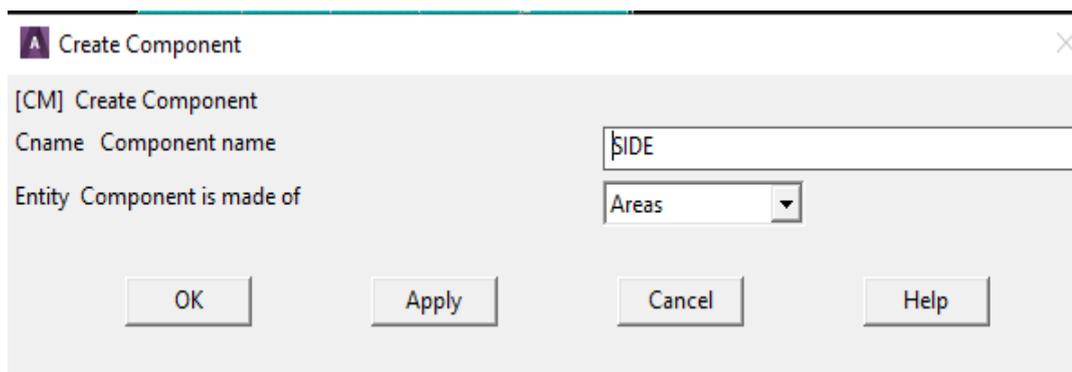


Рис.13. Создание компоненты (группы поверхностей)

И так же выбираем *Select > Everything*(команда *Allsel* в командной строке).

Далее выбираем верхнюю грань и так же задаем закрепления по направлениям *UX,UY*. Через командную строку командами:

```
ASEL,S,LOC,Z,0.1
```

```
CM,LOW,AREA
```

```
DA,ALL,UX
```

```
DA,ALL,UY
```

```
ALLSEL
```

ГДЕ:

ASEL,S – выбор поверхностей AREA в новый набор;

CM – создание компоненты с именем LOW;

DA – закрепление всех (ALL) выбранных поверхностей по направлениям UX и UY.

Командой *SFTRAN* (*Preprocessor>Loads>Define Loads>Operate>Transfer to FE>Surface Loads*) Перенесем поверхностные нагрузки(закрепления) модели в конечно-элементную модель:

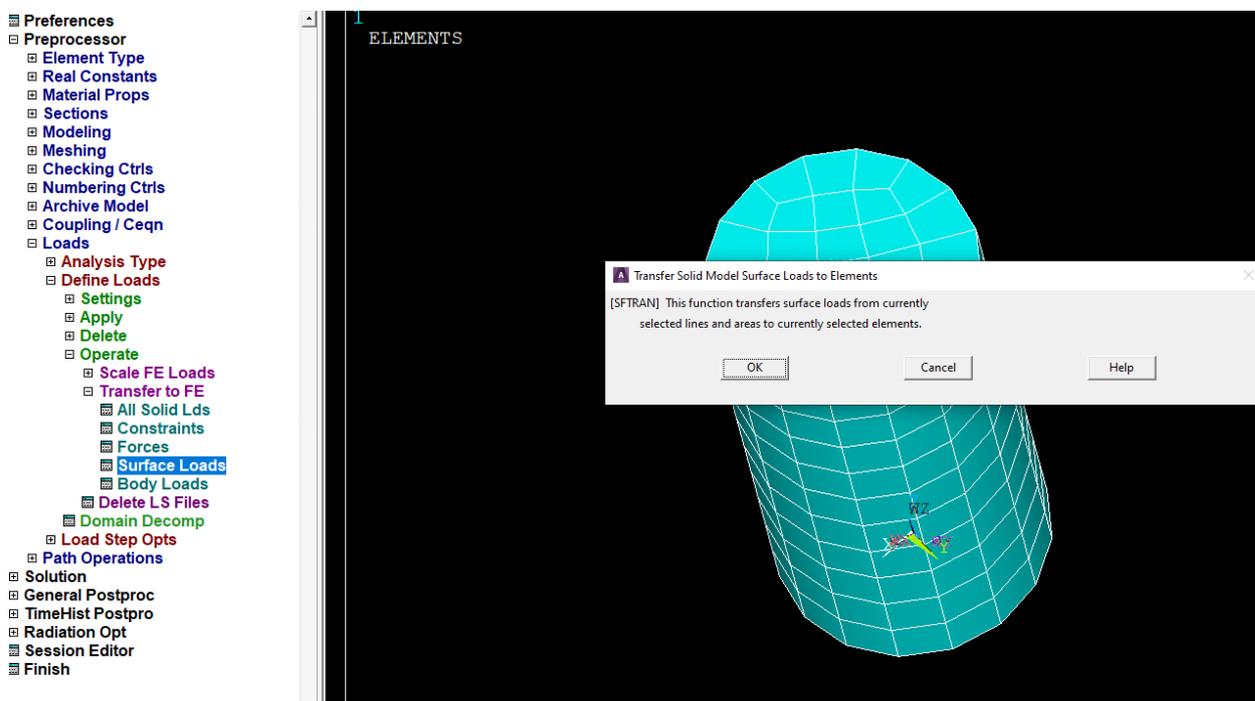


Рис.14. Перенос нагрузок и граничных условий с геометрической модели на конечно-элементную модель

Данная команда является необязательной, в новых версиях ANSYS перенос граничных условий происходит автоматически.

Далее выполним команду ALLSEL.

6. Решение

Для того, чтобы выполнить расчет, необходимо пошагово в командной строке выполнить следующий скрипт:

```
/SOLU  
antype,0  
eqslv,SPARSE,1e-5  
nlgeom,on  
nropt,unsym  
cnvtol,U,,0.005  
cnvtol,F,,0.005  
OUTRES,ALL,ALL  
Time,1  
SFA,SIDE,,PRES,Q  
NSUBST,100,500,100  
SOLVE  
Time,2  
DA,LOW,UZ,(-Q2/2.5E7*H)*3  
NSUBT,600,600,600  
SOLVE
```

Где:

/SOLU – переходим в Решатель ANSYS;

Antype,0 – выбираем тип решателя для задачи – статический анализ;

Eqslv,SPARSE – Выбор метода решения для СЛАУ (Систем Линейных Алгебраических Уравнений), параметр *SPARSE* - разреженный прямой решатель (Sparse direct equation solver);

Nlgeom,on - включает эффекты геометрической нелинейности (нарушение линейной зависимости между нагрузкой и перемещениями);

Nropt,unsym – Настройка нелинейного решателя Ньютона-Рафсона с опцией *Unsym* - полный метод Ньютона-Рафсона с несимметричными матрицами элементов;

Cnvtol,U,,0.005 - Устанавливает значения критерия сходимости (0.5%) для нелинейного анализа (сходимость по перемещениям *U*)

Cnvtol,F,,0.005 - Устанавливает значения критерия сходимости (0.5%) для нелинейного анализа (сходимость по силам *F*)

OUTRES,ALL,ALL - Управляет данными решения, записываемыми в базу данных. Записываем все (*ALL*) результаты для всех (*ALL*) шагов решения;

Time,1 - Устанавливает время *TIME=1* для текущего шага нагрузки. При *TIME=1* моделируем первый из расчетных этапов (см. постановку задачи):
Всестороннее обжатие образца;

SFA,SIDE,,PRES,100E3 – Задаёт поверхностные (*SFA*) нагрузки в виде давления *PRES* на именную компоненту поверхностей *SIDE* со значением давления 100E3;

NSUBT,100,500,100 - Указывает количество подшагов решения (*NSUBST = TIME/ΔT*) для текущего *TIME* (начальное количество шагов, максимальное и минимальное количество)

Solve – запуск задачи на расчет;

Time,2 - Устанавливает время *TIME=2* для текущего шага нагрузки. При *TIME=2* моделируем второй из расчетных этапов (см. постановку задачи):
Дополнительное вертикальное давление;

*DA,LOW,UZ,(-388E3/2.5E7*0.01)*3* – Прикладывает заданное смещение опоры (*DA*) для именной компоненты *LOW* по направлению *UZ* со значением смещения, вычисленного через предельное вертикальное давление σ_1 через заданное смещение нижней опоры для лучшей сходимости (см. постановку задачи)

NSUBT,600,600,600 – Указывает количество подшагов решения (*NSUBST = TIME/ΔT*) для текущего *TIME* (начальное количество шагов, максимальное и минимальное количество)

Solve – запуск задачи на расчет.

После запуска на расчет появится график сходимости численного решения:

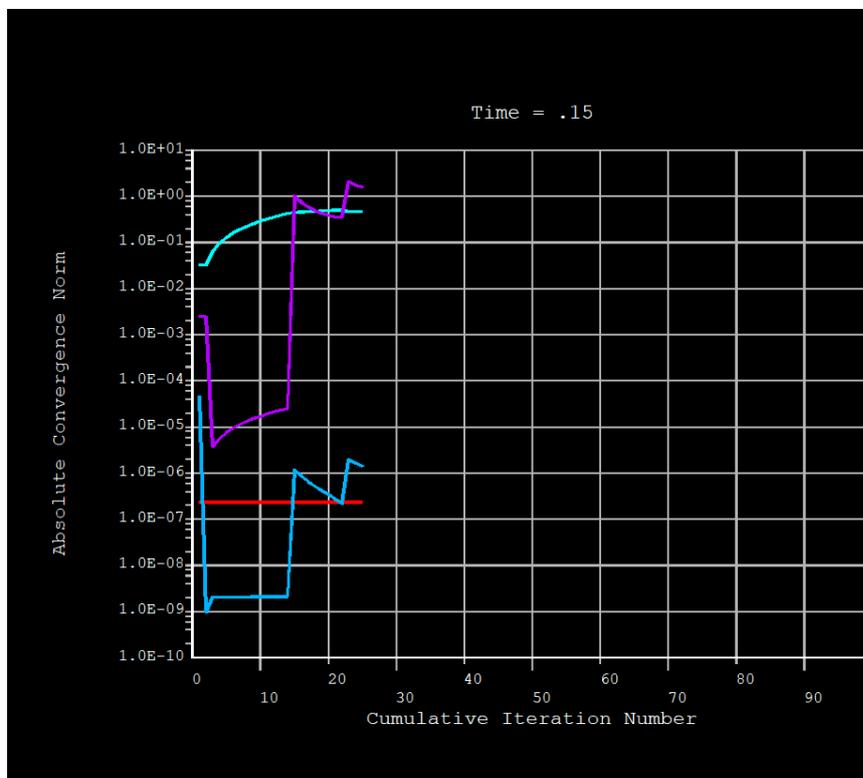


Рис.15. Ход решения задачи

7. Вывод результатов

Для вывода результатов моделирования (1-е главные (растягивающие) пластические деформации) необходимо перейти в *General Postproc > Plot Results > Nodal Solu > Plastic Strain > 1st Principal plastic strain*

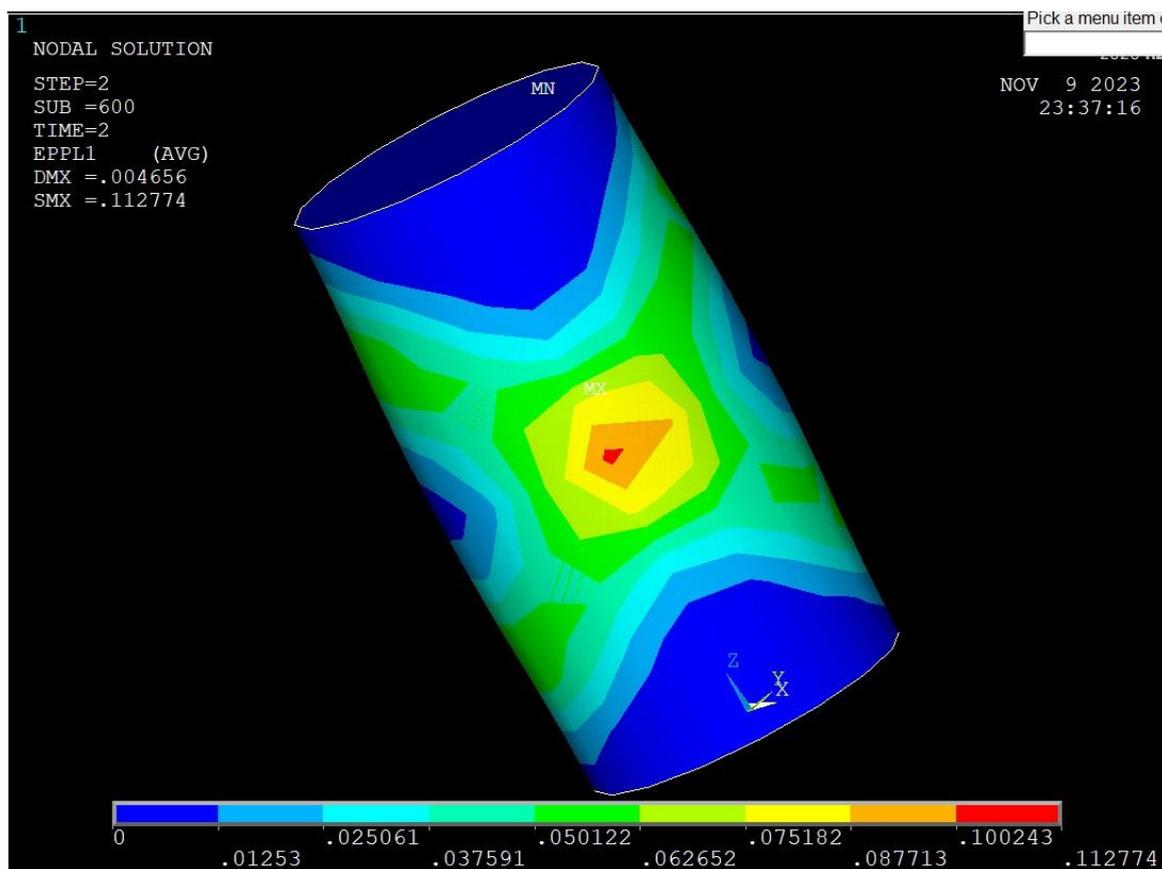


Рис.16. Механизм разрушения образца
(1-й инвариант пластических деформаций)

Для отображения графика изменения вертикального давления σ_1 необходимо выполнить следующие команды:

```
/post26  
NSEL,S,LOC,Z,0  
*get,numbnod,node,,count  
node=1  
node=ndnext(node)  
rforce,2,node,f,z  
*do,i,1,numbnod-1  
node=ndnext(node)  
rforce,3,node,f,z  
add,2,2,3  
*enddo  
plvar,2
```

где:

/post26 – вход во временной постпроцессор для построения графиков решения, зависящее от времени

NSEL,S,LOC,Z,0 - Выбирает все узлы в новый набор *NSEL,S* по координате *Z=0* (где расположена опора);

**get,numbnod,node,,count* – Запрашивает из базы данных ANSYS значение количества узлов и сохраняет его как скалярный параметр (число) в переменную *numbnod*;

Rforce,2,node,f,z – Создает график (ссылочный номер 2) силы реакции опоры узла с номером *node=1* по направлению *Fz*

**do,I,1,numbnod-1* - Определяет начало цикла *DO переменной *I*, проходящей значение от 1 до *numbnod-1*.

node=ndnext(node) – определяет номер следующего узла в наборе

Add,2,2,3 - Добавляет (суммирует) переменные графиков (суммирует график 2 и 3 и записывает его во 2й номер)

**enddo* - Завершает цикл выполнения и запускает циклическое действие

Plvar,2 - Отображает график со ссылочным номером 2.

После выполнения данных команд в графическом окне ANSYS отобразится график зависимости опорной реакции Fz от времени TIME. При значении силы 800 график выходит на асимптоту, соответствующая предельной несущей способности:

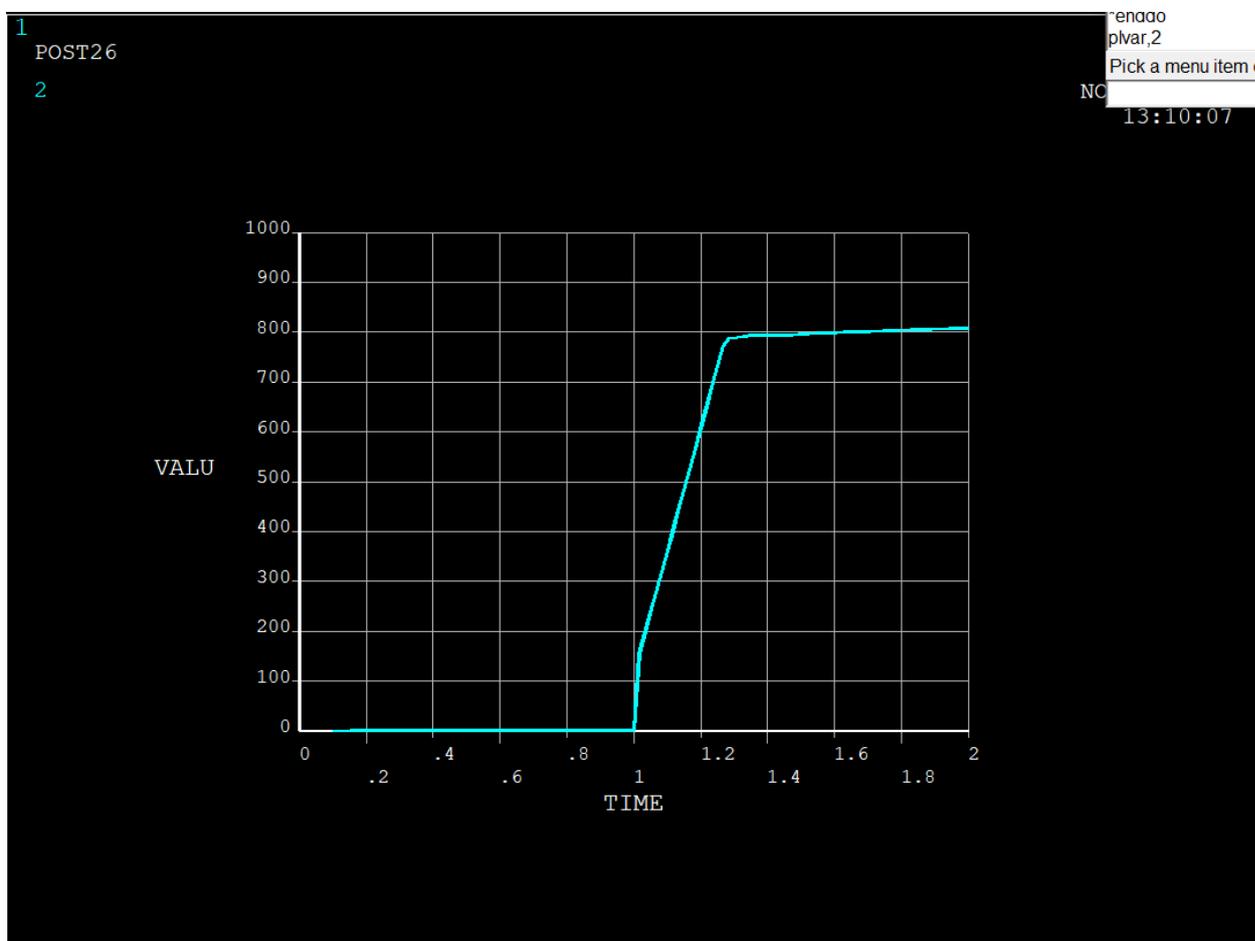


Рис.17. График значений реакции опор

Для перехода от графика сил Fz к графику давления σ_z (соответствующая σ_1), нужно данный график разделить на площадь грунтового образца. Тогда финальный скрипт, отображающий график σ_1 , по которому возможно определение предельной несущей способности $\sigma_1^{\text{пред}}$, будет следующим:

```
/post26
nset,s,loc,z,0
*get,ncount,node,0,count
*get,NNUM,node,0,num,min
RFORCE,2,NNUM,F,Z
*DO,I,1,ncount-1
NNUM=NDNEXT(NNUM)
RFORCE,3,NNUM,F,Z
ADD,2,2,3
*ENDDO
plvar,2
prod,3,2,,,,,1/((4*atan(1)*D**2/4)*1000)
plvar,3
```

В результате получим следующий график вертикальных напряжений, по результатам которого можно установить, что предельная несущая способность данного грунтового образца соответствует вертикальному давлению $\sigma_1^{\text{пред}} \approx 388$ кПа, что соответствует условию текучести Мора-Кулона:

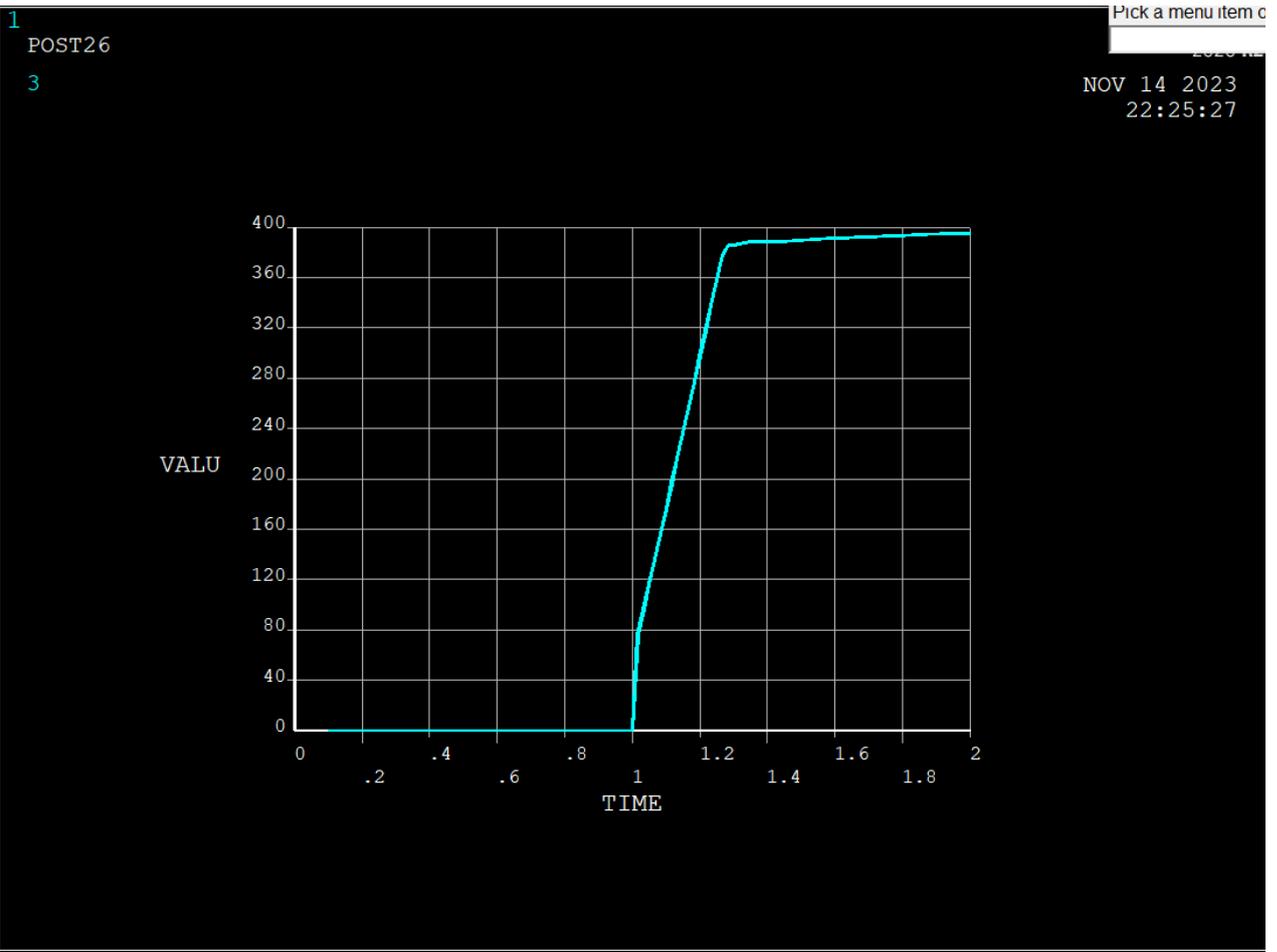


Рис.18. График значений напряжения

8. Решение на основе модели пластичности Друкера-Прагера

Схожим образом решается задача на основе модели пластичности Друкера-Прагера. Модель материала Мора-Кулона задавалась командами:

```
TB,MC,1,,,BASE  
TBFIELD,TIME,0  
TBDATA,1,25,45E3,0,25,45E3
```

Для использования модели пластичности Друкера-Прагера необходимо задать следующий код:

```
TB,EDP,1,1,2,LYFUN  
TBDATA,1,alpha,sigma  
tb,edp,1,1,2,LFROT
```

Где параметры α и σ определяются следующим образом:

$$\alpha = \frac{2 \cdot \sin(\varphi)}{(\sqrt{3} \cdot (3 - \sin(\varphi)))}; \quad \sigma = \frac{6 \cdot c \cdot \cos(\varphi)}{(\sqrt{3} \cdot (3 - \sin(\varphi)))}$$

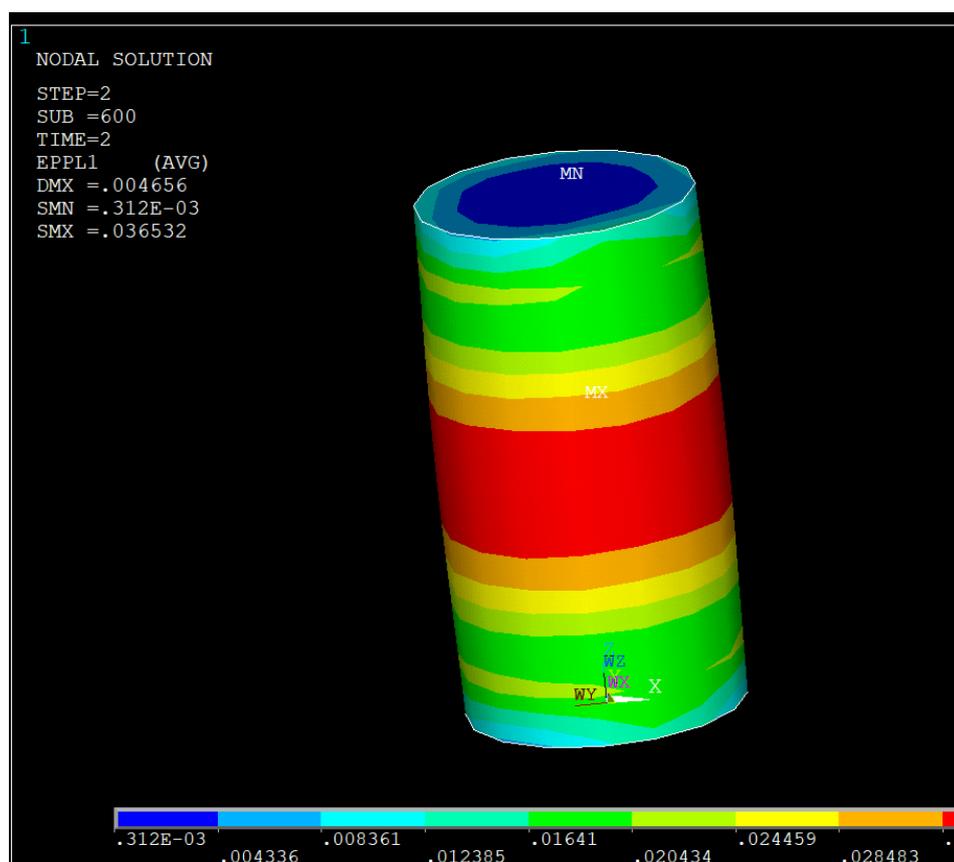


Рис.18. Механизм разрушения образца (1-й инвариант пластических деформаций) на основе модели Друкера-Прагера

9. Заключение

В данной работе был произведен расчёт предельного значения вертикального давления при трехосном сжатии двумя методами-численными в ПО ANSYS и аналитически. Оба решения сходятся к единому значению с некоторой погрешностью. При увеличении предельного значения в ANSYS график перестает расти, достигая все время одного и того же максимального значения, равного аналитическому.

КОД ПРОГРАММЫ

FINISH

/CLEAR

/PREP7

! Вход в препроцессор

!Задание исходных данных

D=0.05

! Диаметр = 50мм

N=20

! Число разбиений

H=0.1

! Высота = 100 мм

c = 45E3

! коэффициент c

D = 0.05

a1 = 25

! Угол внутреннего трения

a2 = 25

! Угол дилатансии грунта

Q2 = 388E3

Q = 100E3

! Поверхностная нагрузка

EG = 2.5E7

! Построение геометрической модели

CYL4,,,D/2,,,H

! Четверть цилиндра(или весь цилиндр)

! Задание параметров материала

ET,3,186

! Задание типа КЭ

KEYOPT,3,2,1

KEYOPT,3,3,0

KEYOPT,3,6,0

KEYOPT,3,8,0

MP,EX,1,EG

! Модуль упругости

MP,NUXY,1,0.3

! Коэффициент Пуассона

TB,MC,1,,,BASE

TBFIELD,TIME,0

TBDATA,1, a1, c,a2, a1, c

! Создание сетки КЭ

ESIZE,0.01

! Выбор шага

VSWEEP,ALL

! Создание конечно-элементной сетки

методом SWEEP

! Задание граничных условий

ASEL,S,LOC,Z,0

! Выбор нижней грани

DA,ALL,UZ

! Закрепление по UZ

DA,ALL,UX

! Закрепление по UX

DA,ALL,UY

! Закрепление по UY

ALLSEL

ASEL,U,LOC,Z,0	! Вырез нижней грани
ASEL,U,LOC,Z,H	! Вырез верхней грани
CM,SIDE,AREA	! Боковое закрепление
ALLSEL	
ASEL,S,LOC,Z,H	! Выбор верхней грани
CM,LOW,AREA	! Закрепление по нижней грани
DA,ALL,UX	! Закрепление по UX
DA,ALL,UY	! Закрепление по UY
ALLSEL	
SFTRAN	
ALLSEL	
EPLO	
ALLSEL	
/SOLU	! Решатель
antype,0	! Статический анализ
eqslv,SPARSE	! Выбор метода решения СЛАУ
nlgeom,on	! Геометрическая нелинейность
propt,unsum	! Настройка нелинейного решателя Ньютона-Рафсона
cnvtol,U,,0.005	! Критерий сходимости для нелинейного анализа(Перемещения)
cnvtol,F,,0.005	! Критерий сходимости для нелинейного анализа(Силы)
OUTRES,ALL,ALL	! Выбор данных для записи в файл результатов
Time,1	! Моделируем первый из расчетных этапов

SFA,SIDE,,PRES,Q	! Боковая нагрузка
NSUBST,100,500,100	! Количество подшагов решения
SOLVE	! Запуск задачи на расчет (1й этап)
Time,2	! Моделируем второй расчетный этап
NSUBT,600,600,600	! Указываем количество подшагов решения
DA,LOW,UZ,(-Q2/EG*H)*3	! Заданное смещение опоры
SOLVE	! Запуск задачи на расчет (2й этап)
/post26	! Вход постпроцессор
NSEL,S,LOC,Z,0	! Выбираем узлы с координатой z=0
*get,numbnod,node,,count	! Запрашиваем значение количества узлов
node=1	
node=ndnext(node)	! Определяем номер следующего узла в наборе
rforce,2,node,f,z	! Создает график силы реакции опоры узла
	! С номером node=1 по направлению Fz
*do,i,1,numbnod-1	! Определяет начало цикла *DO переменной I,
	! проходящей значение от 1 до numbnod-1
node=ndnext(node)	
rforce,3,node,f,z	! Создает график силы реакции опоры узла
	! с номером node=1 по направлению Fz
add,2,2,3	! Добавляет (суммирует) переменные графиков
	! (суммирует график 2 и 3 и записывает его во 2й номер)
*enddo	
plvar,2	! Отображает график 2 сил Fz
prod,3,2,,,,,1/((4*atan(1)*D**2/4)*1000)	
	! Умножение графика сил на 1/площадь
plvar,3	! Отображает график 3 напряжений сигма 1

Практическая работа №7

Расчет конструкций с учетом генетической нелинейности

Методические указания к выполнению практической работы 7

1. Постановка задачи

Необходимо сравнить результаты статического расчёта для одномоментной схемы и с учётом генетической нелинейности на модели 11-ти этажного здания, а именно: перемещения по вдоль оси колонн (OY) и значения продольных сил в колоннах. План типового этажа приведён на рисунке ниже, верхний этаж является жёстким, по периметру этажа расположены стены, а вдоль стороны с ядром жёсткости – треть стены. На каждом этапе возведения на этаж задаётся полезная нагрузка

$$q_1 = 15 \text{ кН/м}^2, \quad (1)$$

а на последнем, 12-ом, этапе все этажи нагружаются дополнительной нагрузкой

$$q_2 = 10 \text{ кН/м}^2 \quad (2)$$

На уровне земли $z = 0\text{м}$ здание жёстко закреплено

Требуется решить задачу в программном комплексе ANSYS методом конечных элементов. В модели использованы конечные элементы со следующими характеристиками:

Объект на геометрической модели	Тип КЭ	Материал	Сечение
Колонны	Beam188	B25	Квадрат, 0.5м*0.5м
Перекрытия	Shell181	B25	Толщина 0.2м
Стены и пилоны	Shell181	B25	Толщина 0.4м Длина пилонов 1м

Несущие конструкции выполнены из бетона марки B25. Модуль упругости $E=3 \times 10^7 \text{ кН/м}^2$, Коэффициент Пуассона $\nu=0.2$, Плотность $\rho=2500 \text{ кг/м}^3$

План типового этажа:

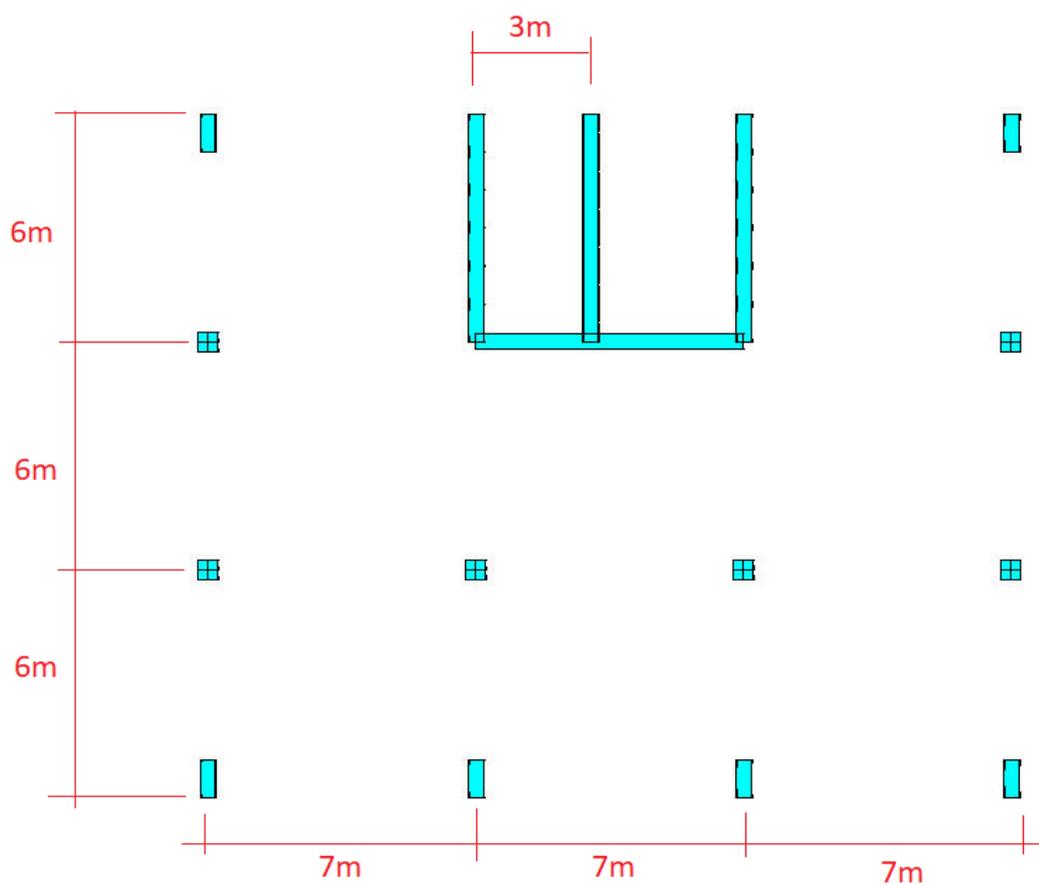


Рис.1. Схема вертикальных конструкций типового этажа

2. Создание проекта

Для создания расчетной модели будем использовать препроцессор Ansys Mechanical APDL. После запуска APDL появится окно:

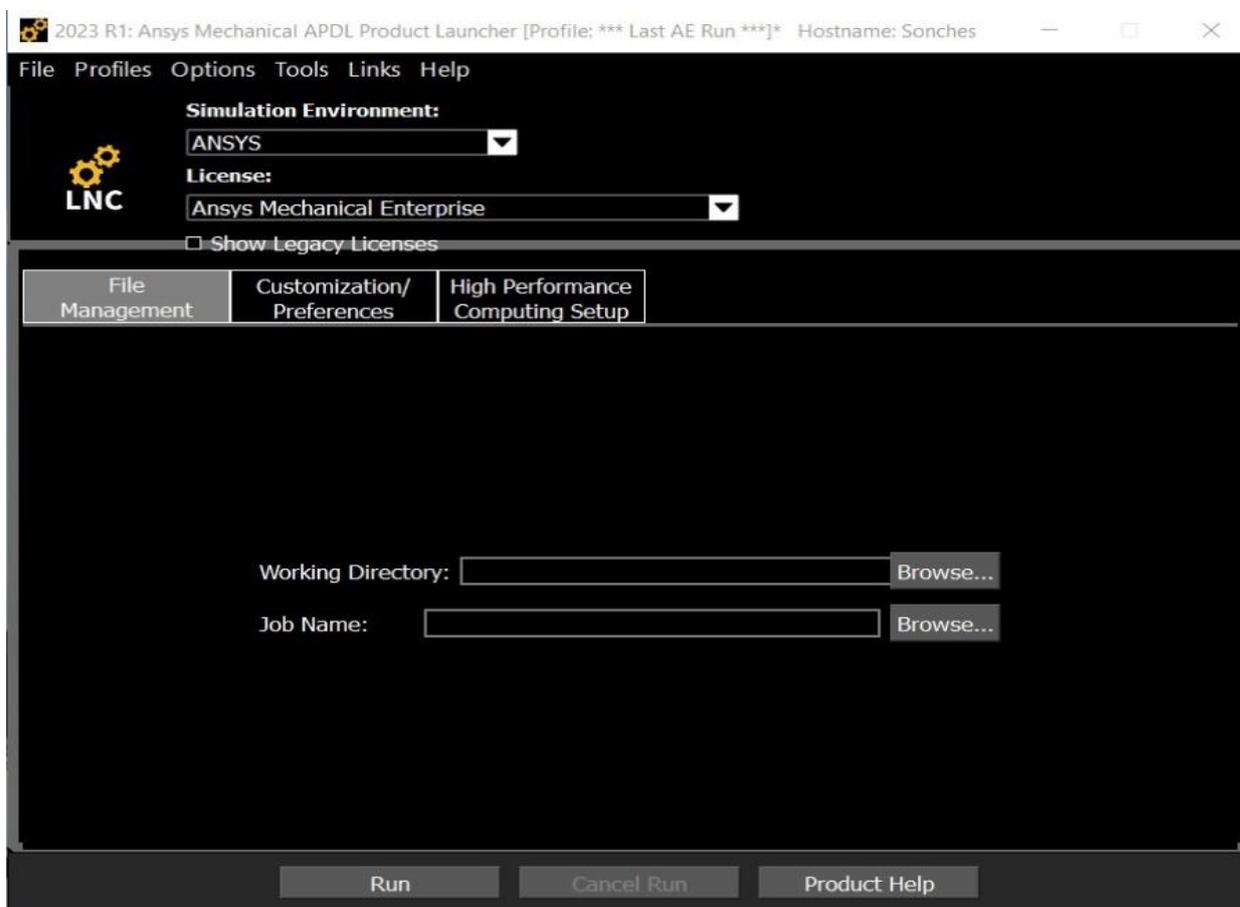


Рис.2. Окно запуска программного комплекса ANSYS Mechanical

Рядом с окном *Working Directory* нажать кнопку «Browse...» и выбрать свою рабочую директорию. В этой директории ANSYS будет сохранять все файлы. Директория должна быть создана заранее. В именах директории и пути к директории допускаются только латинские буквы. Рядом с окном *Job Name* задаем имя файла.

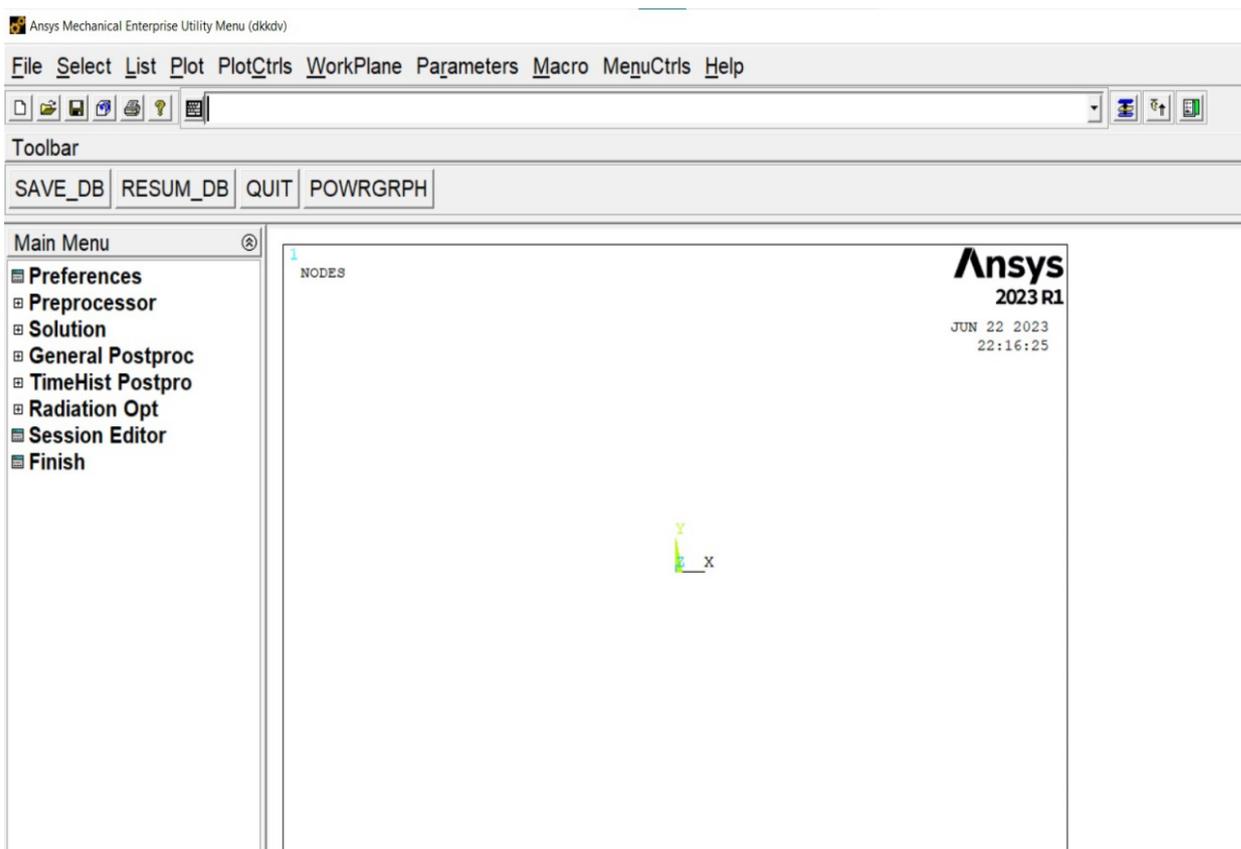


Рис.3. Рабочее окно программного комплекса ANSYS Mechanical

3. Задание свойств материалов и сечений

Необходимо задать типы конечных элементов, с которыми мы будем работать, а также материалы и сечения.

Для добавления типа конечного элемента необходимо в *Main menu* перейти *Preprocessor* > *Element Type* > *Add/Edit/Delete*. В открывшейся таблице нажать *add*, для добавления нового типа. В открывшейся таблице выбрать *beam* > *2 node 188* и нажать *apply*. Добавленный элемент отобразится в таблице *Element Type* под номером 1. Это стержневой конечный элемент.

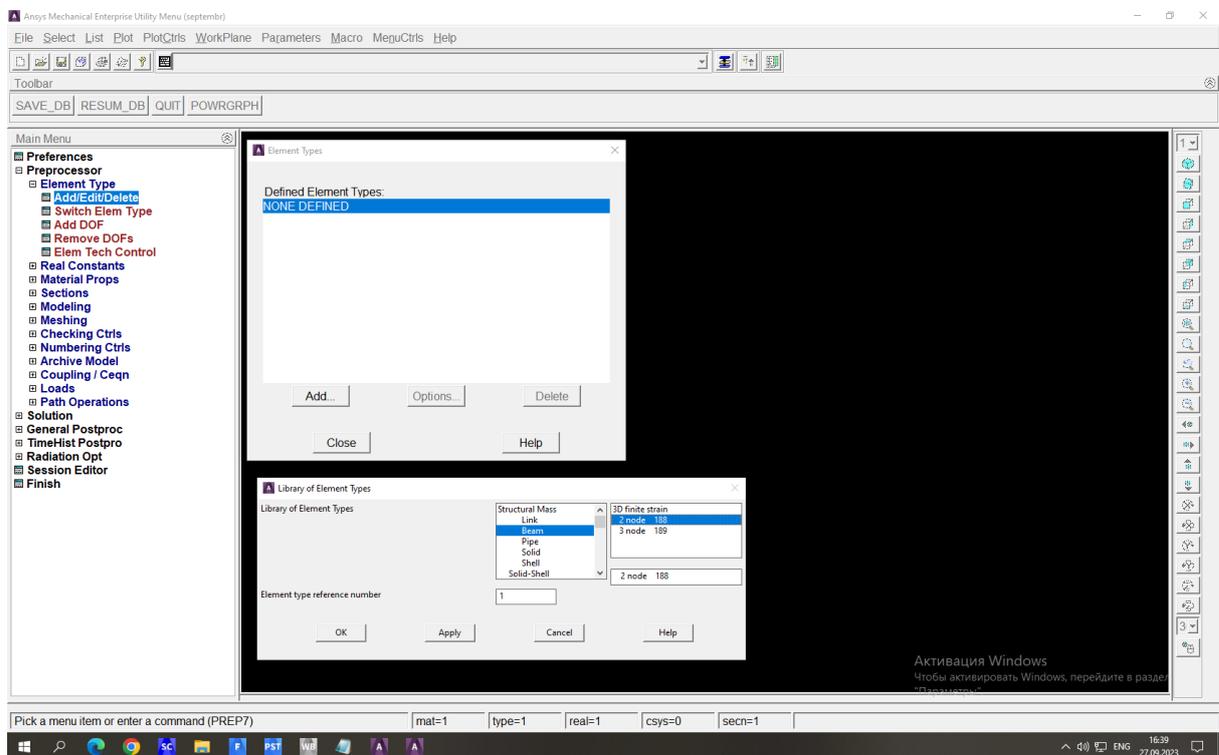


Рис.4. Задание типов конечных элементов

Тоже самое необходимо сделать и для пластинчатого элемента, но выбрать *Shell > 3D 4node 181*. И получим таблицу конечных элементов, которые будем использовать.

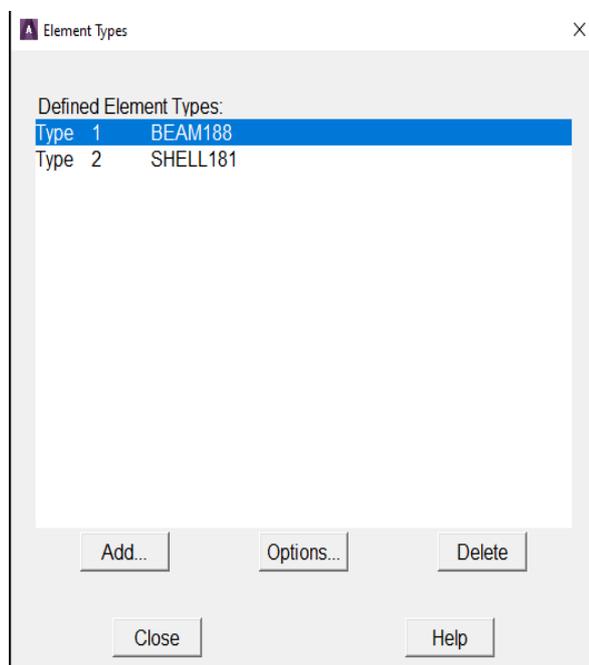


Рис.5. Задание типов конечных элементов

Теперь необходимо задать материалы стен, плит и колонн. По заданию используется один материал – бетон В25. Чтобы задать модель материала нужно в *Main Menu* перейти *Preprocessor* > *Material Props* > *Material Models*. Откроется таблица материалов, использующихся в проекте. В ней в правой колонке необходимо найти *Structural* > *Linear* > *Elastic* > *Isotropic*. Откроется следующая таблица свойств материала. Необходимо задать модуль упругости бетона $EX = 3e07$ и коэффициент Пуассона $PRXY = 0.2$ и нажать *Ok*. Далее необходимо добавить следующее свойство – плотность. В правой колонке находим *Density*. Открывается таблица задания плотности. в ячейку *DENS* вписываем 2.5 и нажимаем *Ok*.

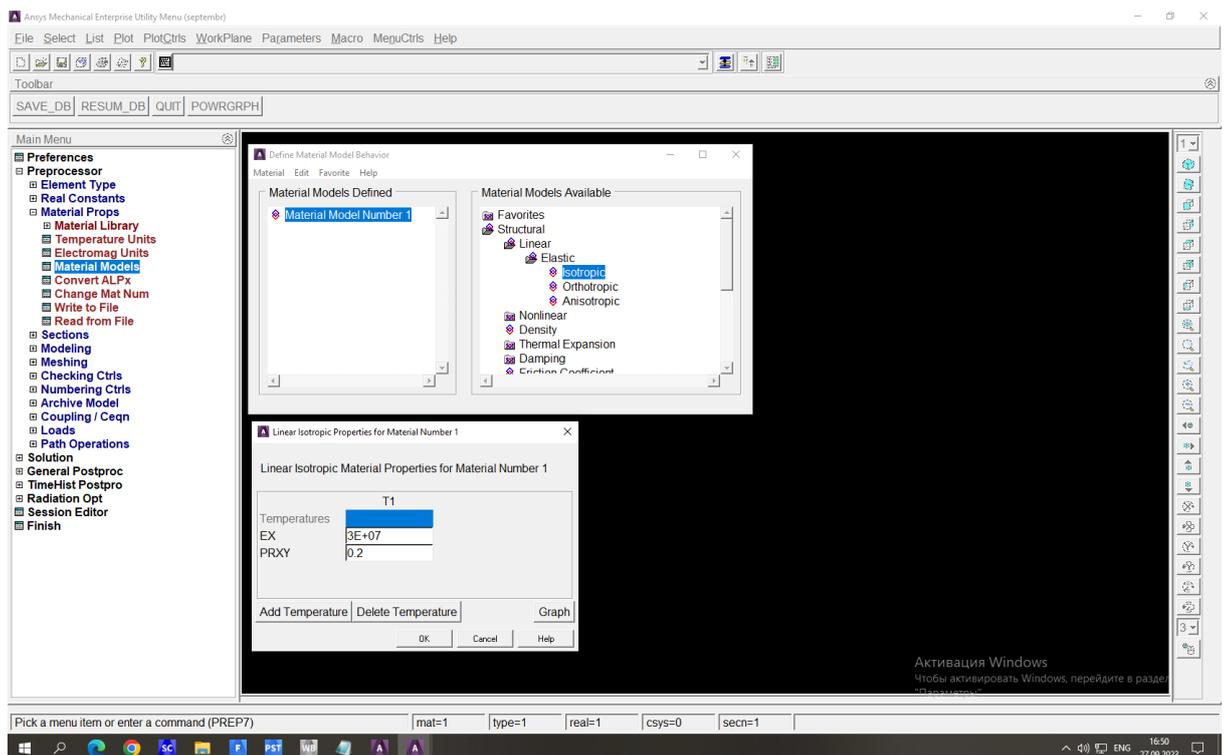


Рис.6. Задание характеристик материала. Шаг 1

В итоге получаем модель материала под номером 1 с заданными модулем упругости, коэффициентом Пуассона и плотностью.

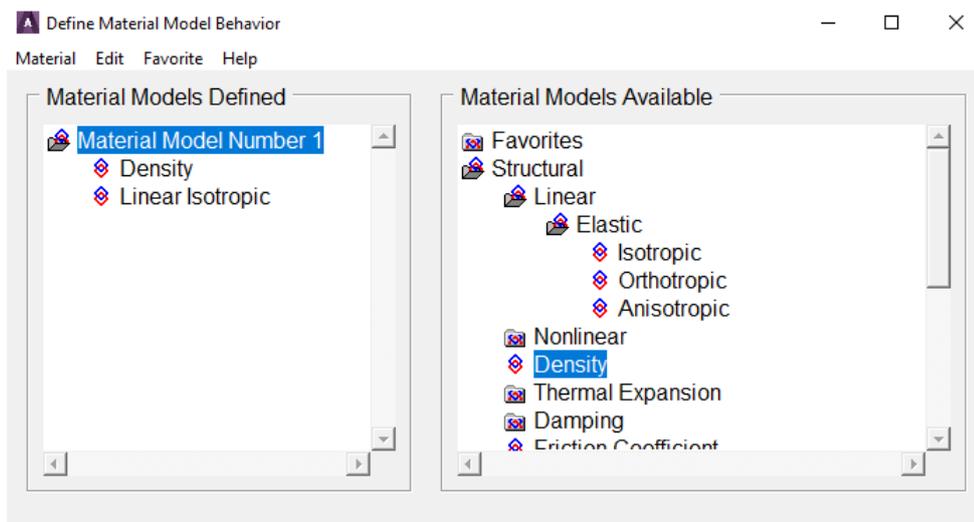


Рис.7. Задание характеристик материала. Шаг 2

Теперь зададим размеры сечений КЭ. Начнём со стержневых элементов - колонн. В Main Menu переходим *Preprocessor > Sections > Beam > Common Sections*. Откроется окно *Beam Tool*. Далее необходимо задать тип сечения и размеры. В окошке ID вписываем “1” - это номер сечения. В следующем окошке записываем имя сечения “К-1”. Ниже в выпадающем списке *Sub-Type* выбираем сечение в виде прямоугольника. В окошках В и Н вписываем размеры сечения колонны 0.5 и 0.5.

Для задания толщин плиты перекрытия и стен необходимо перейти в *Sections > Shell > Lay-up > Add/Edit*. Откроется окно *Create and Modify Shell Sections* здесь необходимо задать толщину *Thickness* пластины 0,4 - это стены и пилоны. Сохраняем на *OK* и открываем окошко по тому же пути. Теперь в окошке необходимо поменять “2” на “3” и задать толщину 0.2 - это перекрытия. Таким образом, мы задали 3 сечения: 1-ый для колонн, 2-ой для стен, 3-й для перекрытий.

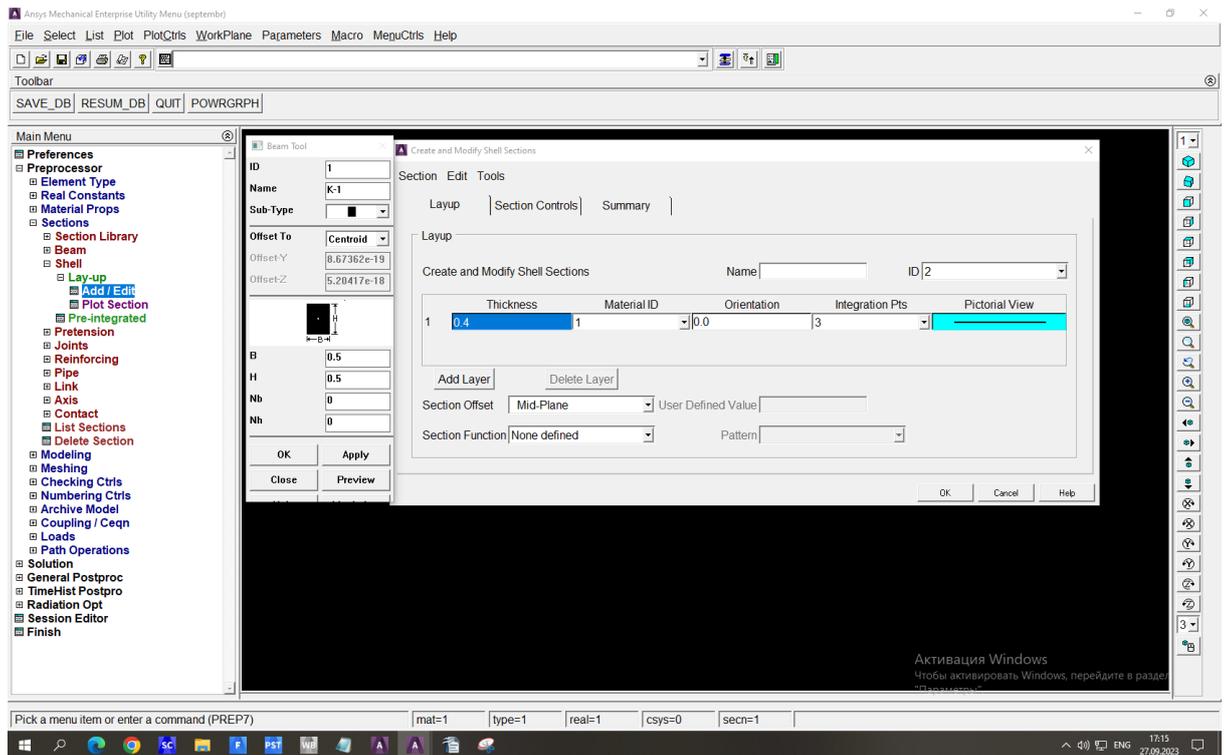


Рис.8. Задание толщин стенам, пилонам и плитам перекрытий

Прежде чем переходить к построению геометрии необходимо сохранить то, что мы уже сделали. на полоске *Utility Menu* необходимо перейти *File > Save as Jobname.db*. Файл сохранится в папке, которую вы назначали в *Working Directory*, Причем сохранятся все характеристики элементов, сечений, геометрия, КЭ-сетка и тд. Как открыть модель описано ниже.

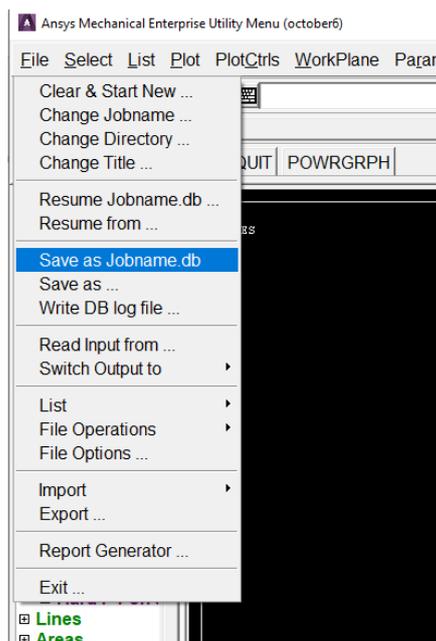


Рис.9. Сохранение проекта

4. Построение геометрической модели первого этажа

Следующий этап - построение геометрии. Начнём с построения узлов для колонн, стен и пилонов. Необходимо в *Main Menu* перейти *Preprocessor* > *Modeling* > *Create* > *Key Points* > *In Active CS*. Откроется окно ввода координат узла.

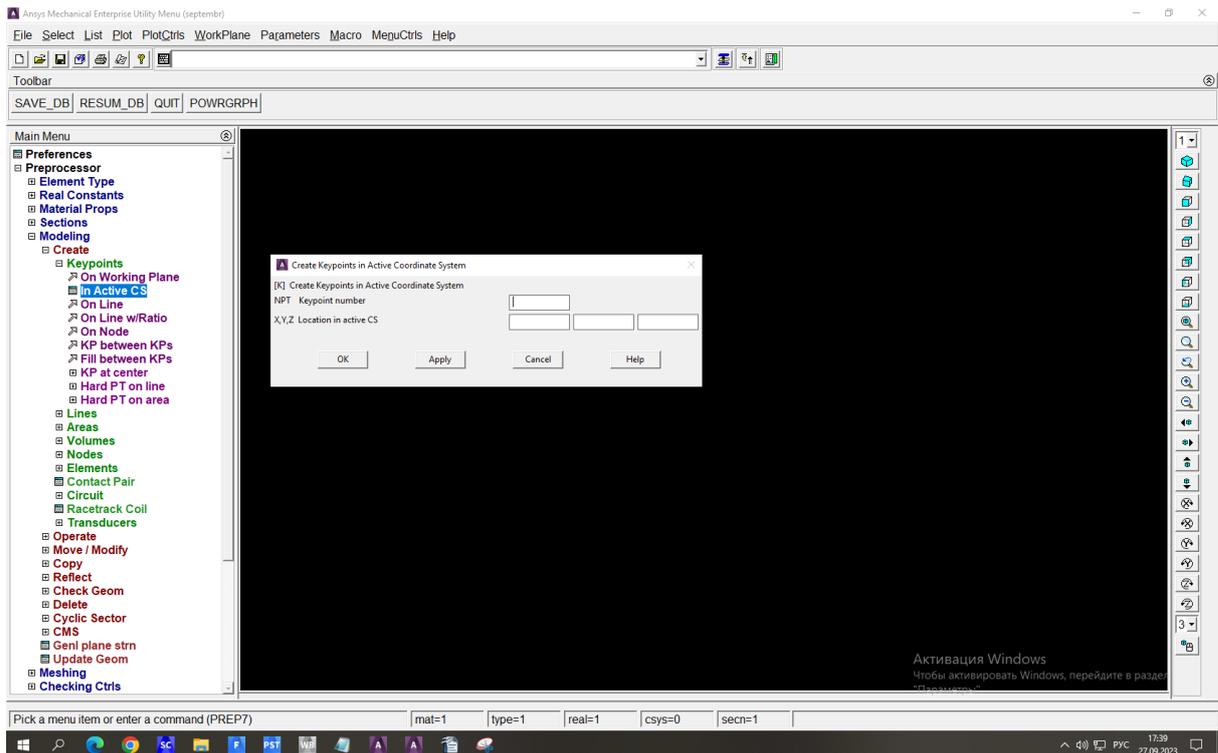


Рис.10. Создание точек

Необходимо ввести поочередно координаты всех узлов стен, пилонов, колонн на нулевом уровне, то есть третья координата $y = 0$, подтвердить нажатием *Apply*, ANSYS отрисует узел на экране. Например, для первого пилона (0,0,0) и (0,0,1), так как ширина пилона 1 м. Для первой колонны (0,0,6), так как ширина пролёта 6 м. Координаты вводятся в соответствии со схемой типового этажа.

Далее необходимо скопировать эти узлы по координате $y = 3$ м - это высота этажа. Необходимо в *Main Menu* перейти *Preprocessor* > *Modeling* > *Copy* > *Keypoints*. Откроется окно выбора узлов, которые нужно скопировать. В поле снизу вписать “ALL” для выбора всех узлов и нажать ОК.



Рис.11. Выбор точек для копирования

Откроется следующее окно. В окошко *ITIME Number of copies* вписать “2” - это число копий узлов, включая те узлы, что мы копируем. В окошко *DY Y-offset in active CS* вписать “3” - это высота этажа, отмеряемая по Y. И нажать ОК.

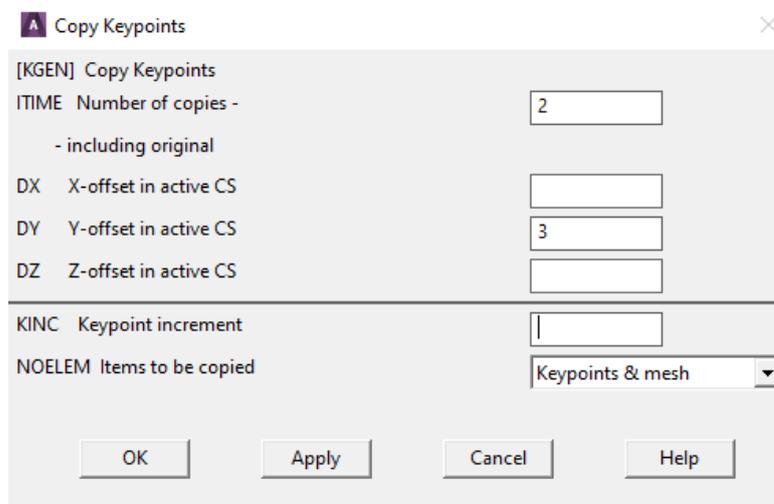


Рис.12. Задание параметров для копирования точек

Далее необходимо соединить линиями и плоскостями узлы, соответствующие одной несущей конструкции. Начнём со стержней для колонн. Необходимо перейти в *Main Menu* перейти *Preprocessor* > *Modeling* > *Create* > *Lines* > *Lines* > *Straight Line*. Откроется окошко выбора узлов, между которыми нужно построить линии. Теперь на рабочей области необходимо кликнуть на два узла колонны, и автоматически появится линия. Повторить со всеми колоннами.

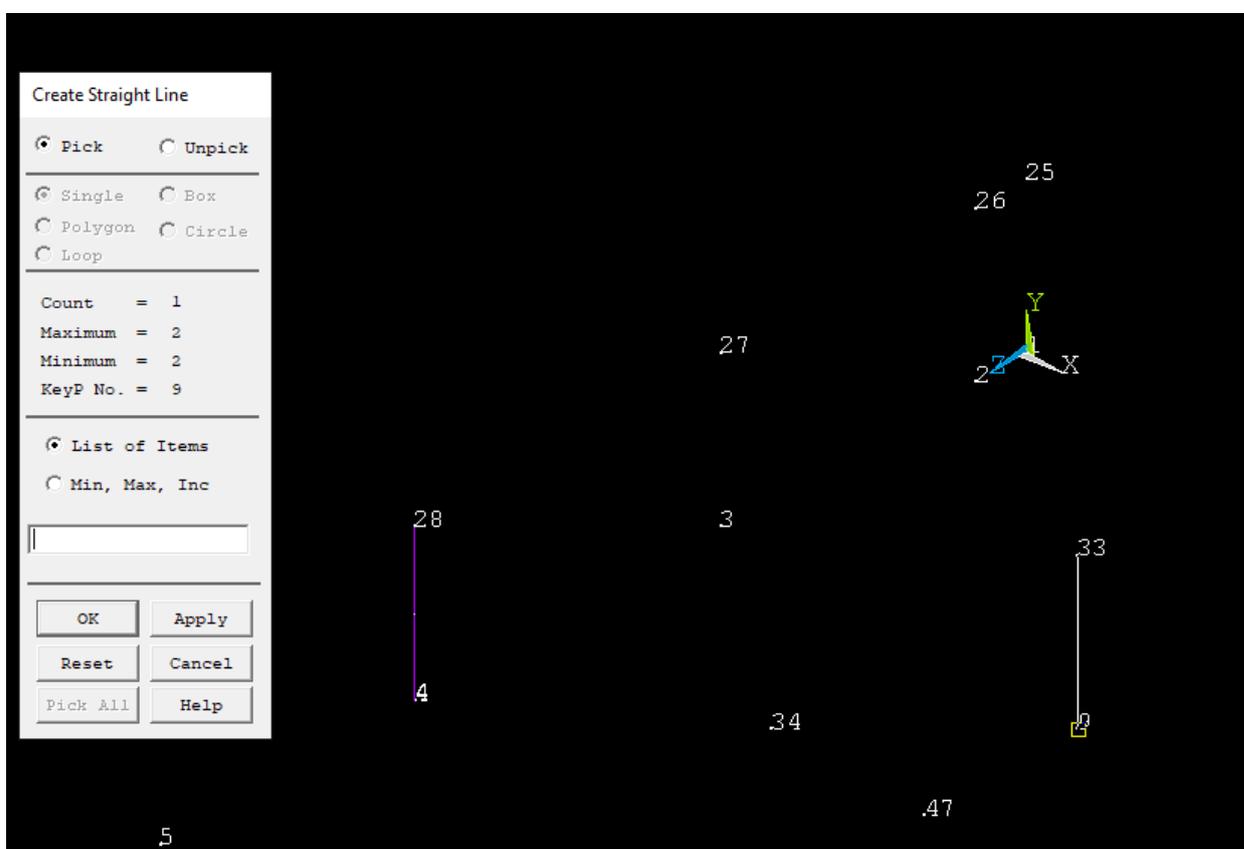


Рис.13. Соединение точек линиями

Может произойти так, что только что построенная линия пропадёт. Она не удалась, ANSYS ее не отображает. Чтобы снова видеть линию необходимо в *Utility menu* перейти *Plot > Multi-Plots*. Теперь на рабочем поле видно все геометрические элементы: линии и узлы. Если необходимо показать только один конкретный тип геометрии, необходимо во вкладке *Plots* выбрать то, что нужно отобразить.

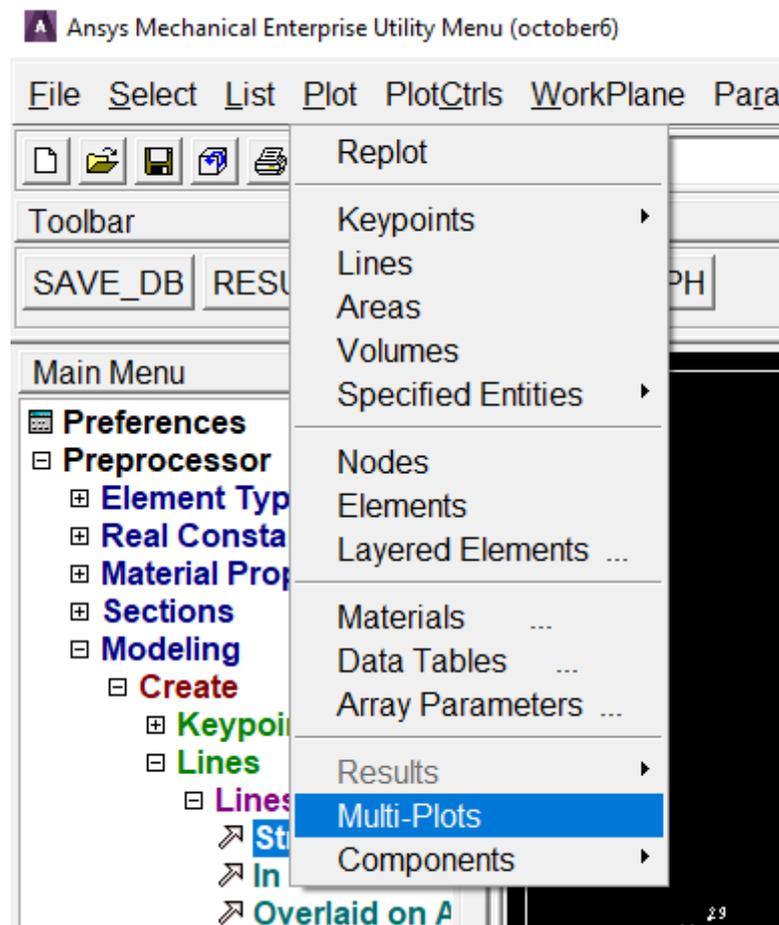


Рис.14. Настройка отображения объектов

Следующий этап – построение стен и пилонов. Необходимо перейти в *Main Menu* перейти *Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs*. Откроется окно.

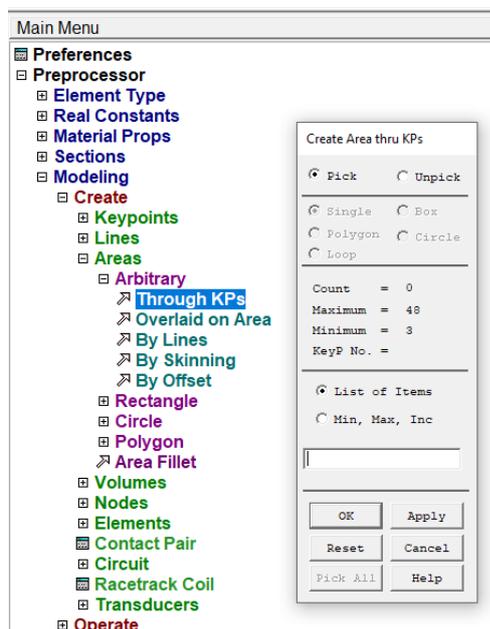


Рис.15. Построение поверхностей по точкам

Далее необходимо выбрать последовательно 4 точки, по которым необходимо построить плоскость. И нажать *Apply*, появится плоскость. Сделать так со всеми стенами и пилонами.

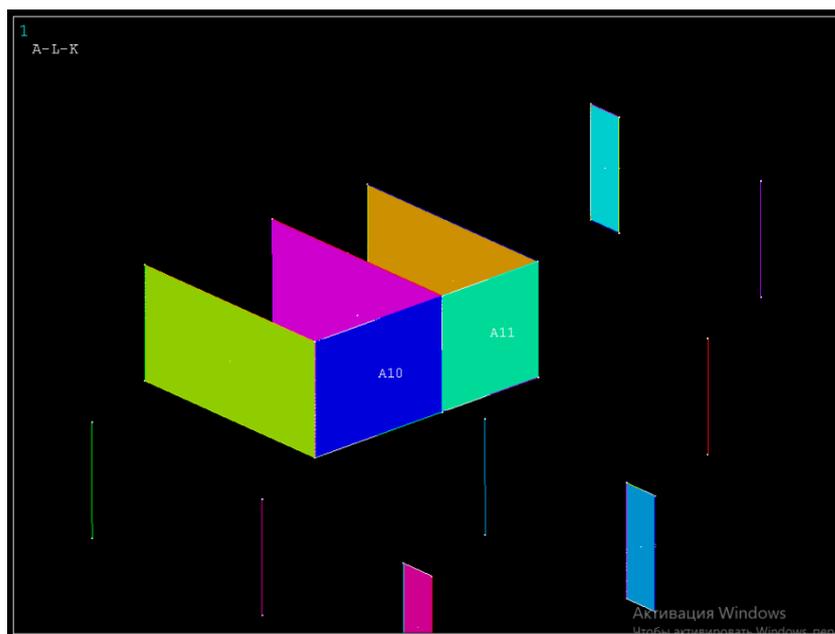


Рис.16. Стены и пилоны 1-го этажа

Причем узлы необходимо выбирать так, чтобы поверхность одной стены была замоделирована несколькими поверхностями. То есть должно быть так, чтобы все элементы (плоскости и стержни) имели общие узлы.

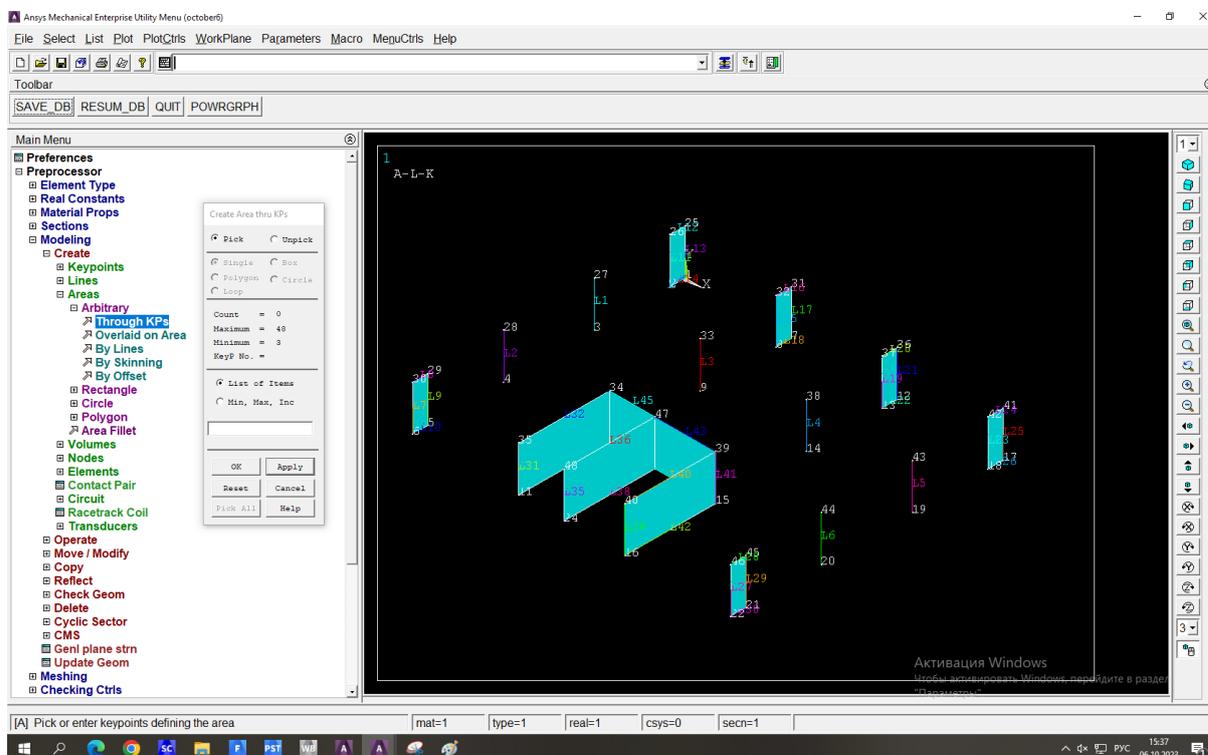


Рис.17. Стены и пилоны 1-го этажа

Теперь построим перекрытие типового этажа. Для начала проведём вспомогательные линии, которые в будущем помогут разделить плоскость, чтобы сетка сгенерировалась нормально. То есть чтобы у КЭ-элементов перекрытия были общие узлы с КЭ-элементами типового этажа. Также строим линии.

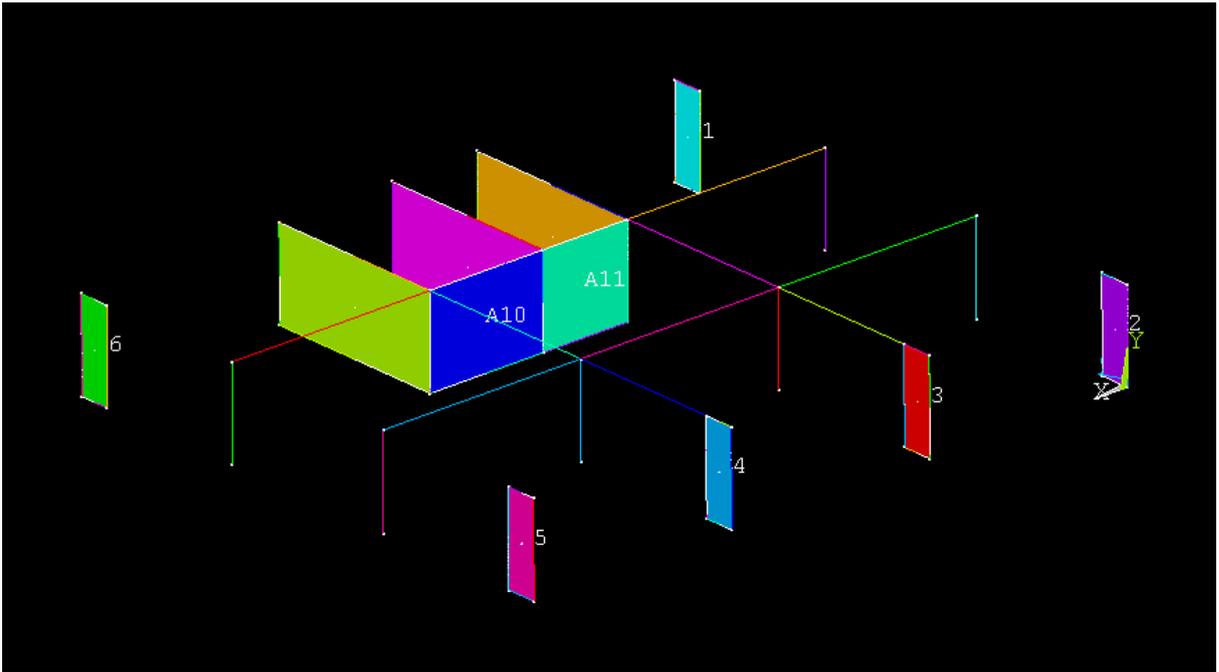


Рис.18. Построение вспомогательных линий

Далее строим плоскость по самым крайним точкам пилонов этажа.

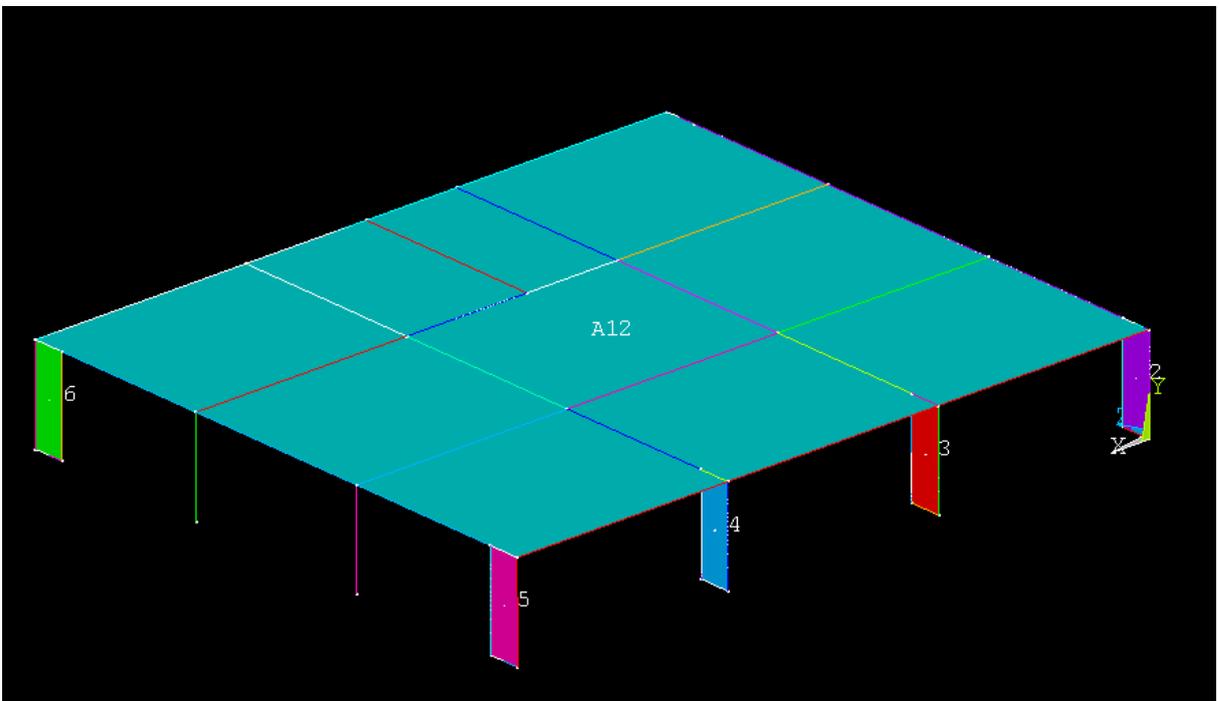


Рис.19. Построение поверхности плиты перекрытия 1-го этажа

Теперь разделим эту плоскость линиями, которые лежат в ней. Необходимо перейти в *Main Menu* перейти *Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Area by Line*. Выйдет окошко. Сначала необходимо выбрать плоскость перекрытия, нажать *OK*, затем выбрать все линии, которыми делим плоскость, снова нажать *OK*. Плоскость разделена.

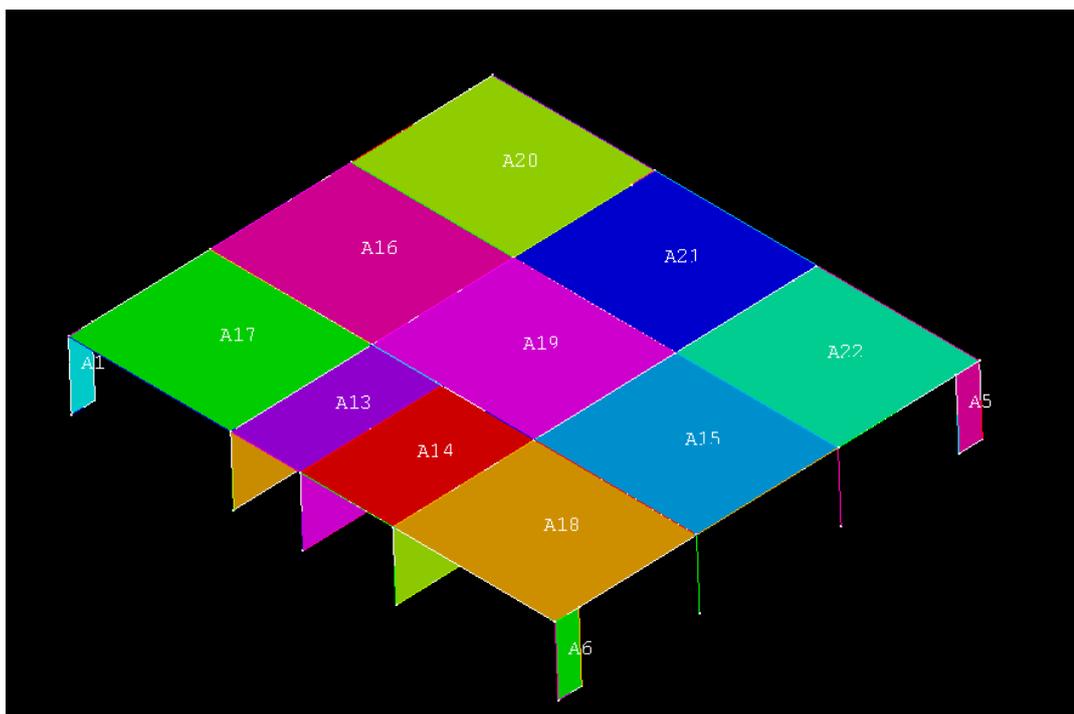


Рис.20. Построение поверхности плиты перекрытия 1-го этажа

Переходим в *Utility menu* перейти *Plot > Multi-Plots*. Геометрия типового этажа готова.

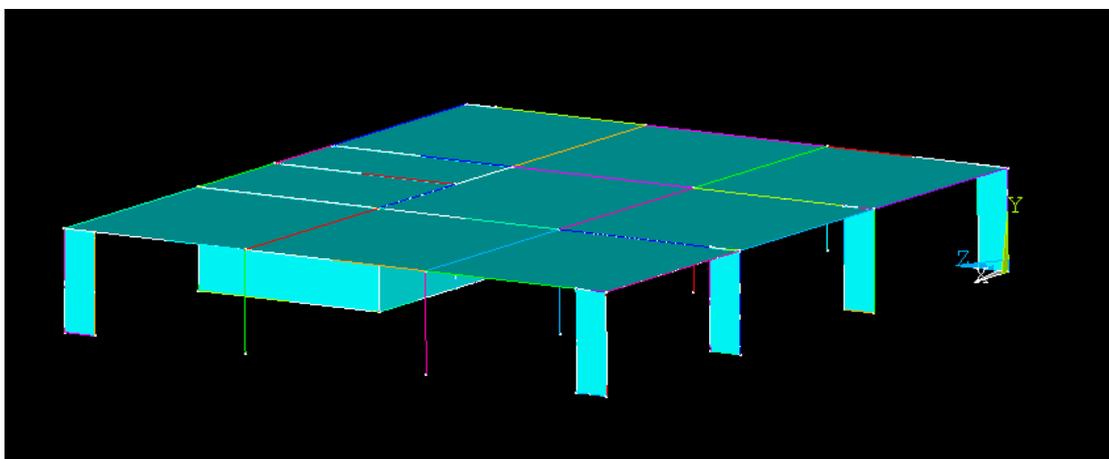


Рис.21. Готовая геометрия типового этажа

5. Создание КЭ модели первого этажа

Теперь необходимо разбить сетку и назначить элементам материалы и сечения. Для того, чтобы разбить сетку в начале необходимо присвоить каждому элементу геометрии сечение, материал и тип КЭ. В *Main menu* необходимо перейти *Preprocessor* > *Meshing* > *Mesh Attributes* > *All lines*. Откроется окно. В окошке *MAT Material number* необходимо поставить “1” - это номер нашего бетона класса 25. В окошке *TYPE Element type number* необходимо выбрать “1 BEAM188” - это тип конечного элемента, которым мы моделируем колонны. В окошке *SECT Element section* выбираем “1 K-1” - это сечение колонны. Нажимаем *OK*.

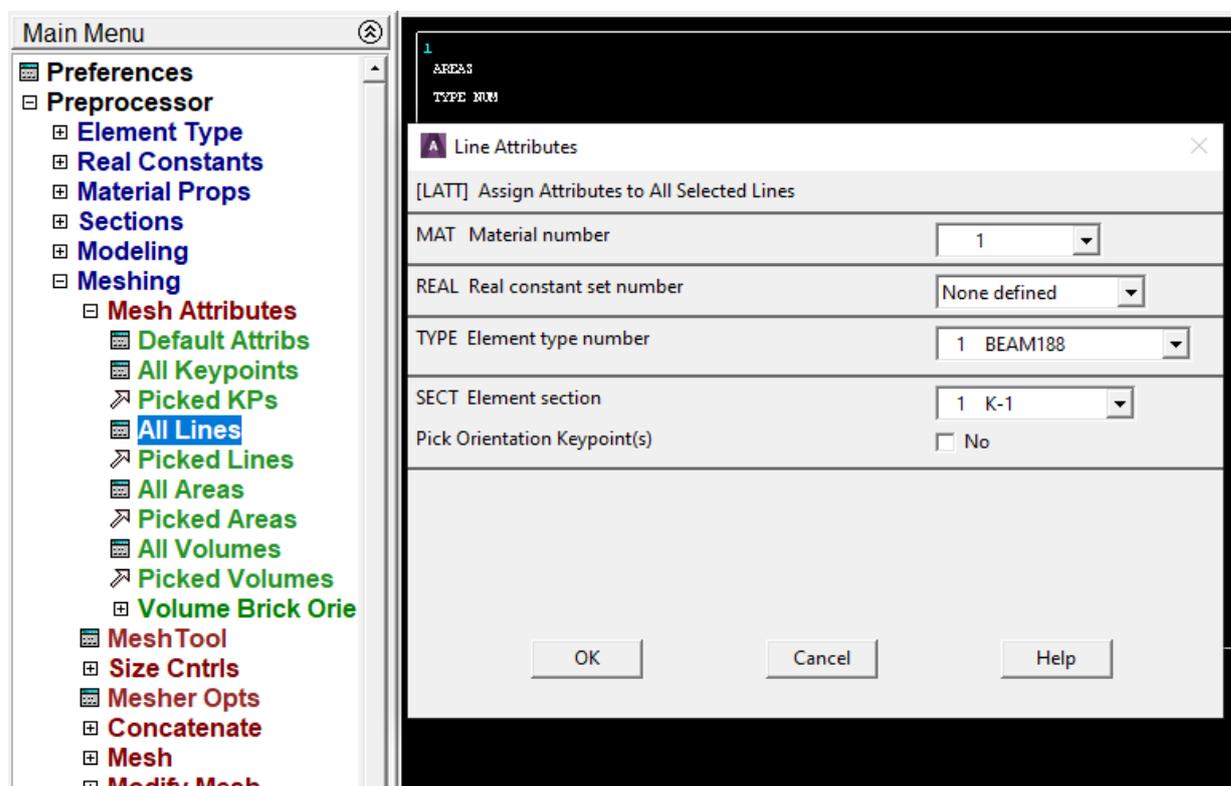


Рис.22. Назначение атрибутов

В *Main menu* необходимо перейти *Preprocessor* > *Meshing* > *Mesh Attributes* > *Picked Areas*. Откроется окно. Теперь необходимо выбрать все горизонтальные плоскости. Для этого на правой колонке программы необходимо выбрать вид сбоку . А в открытом окошке *Box*. Затем протянуть область выделения так, чтобы туда попали только плоскости перекрытия. И нажать *OK*.

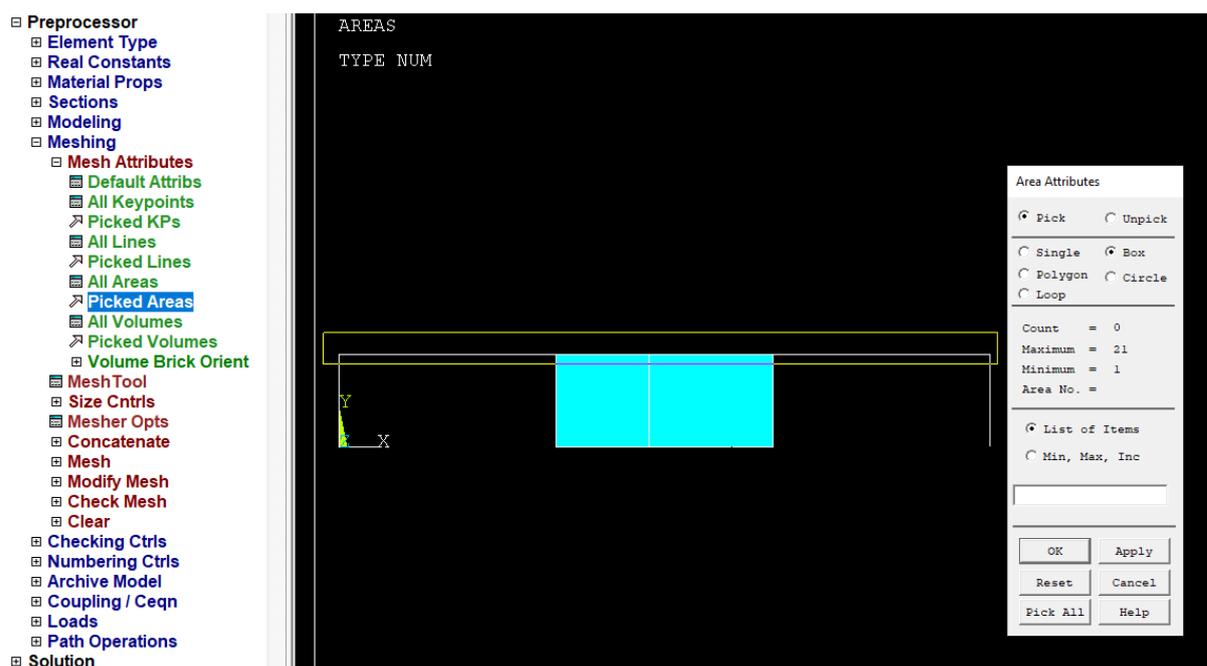


Рис.23. Выбор поверхностей для назначения атрибутов

Откроется окошко назначения атрибутов КЭ. Выбрать соответствующий элементу перекрытия материал, тип и сечение. И нажать *OK*. Далее проделать то же самое с плоскостями стен и пилонов, однако, выбрать 2-е сечение.

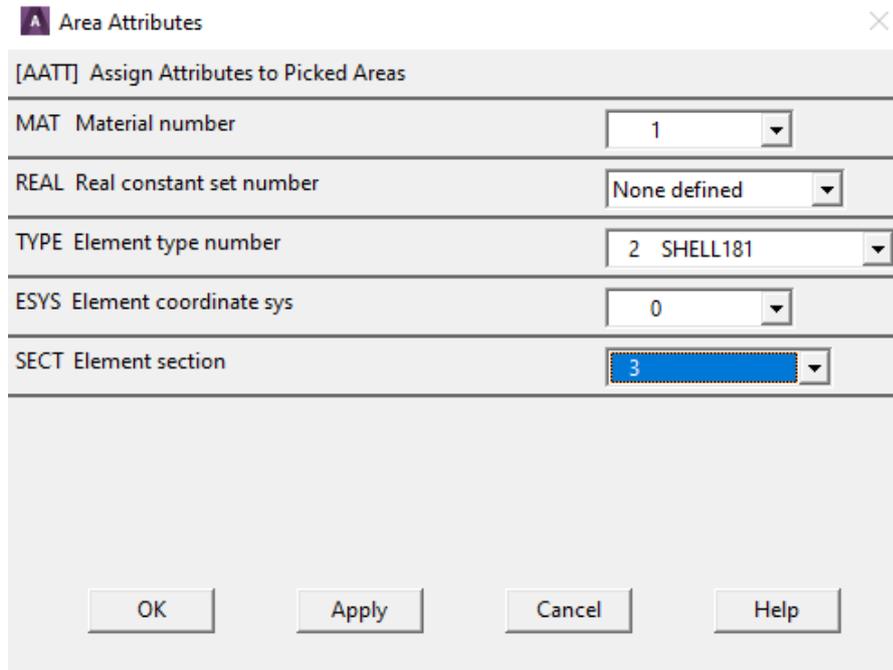


Рис.24. Назначение атрибутов

Атрибуты КЭ заданы. Теперь необходимо разбить сетку. Для этого необходимо *Main menu* перейти *Preprocessor > Meshing > Mesh tools*. В открывшемся окне в разделе *Size Controls > Global* нажать кнопку *Set*. Откроется окно, в котором в окошке *SIZE Element edge length* нужно вписать “0.5” - это размер КЭ для всех элементов. Нажимаем *OK*. Далее в разделе *Mesh* в выпадающем меню выбираем *Areas* и, ничего не меняя, нажимаем кнопку *Mesh* чуть ниже. Открывается окошко выбора плоскостей, нажимаем кнопку *Pick all*. Плоскости разбиты. Далее по тому же алгоритму разбиваем ТОЛЬКО линии колонн. То есть на этапе выбора линий необходимо выбрать только линии, которые соответствуют колоннам. КЭ-модель типового этажа готова.

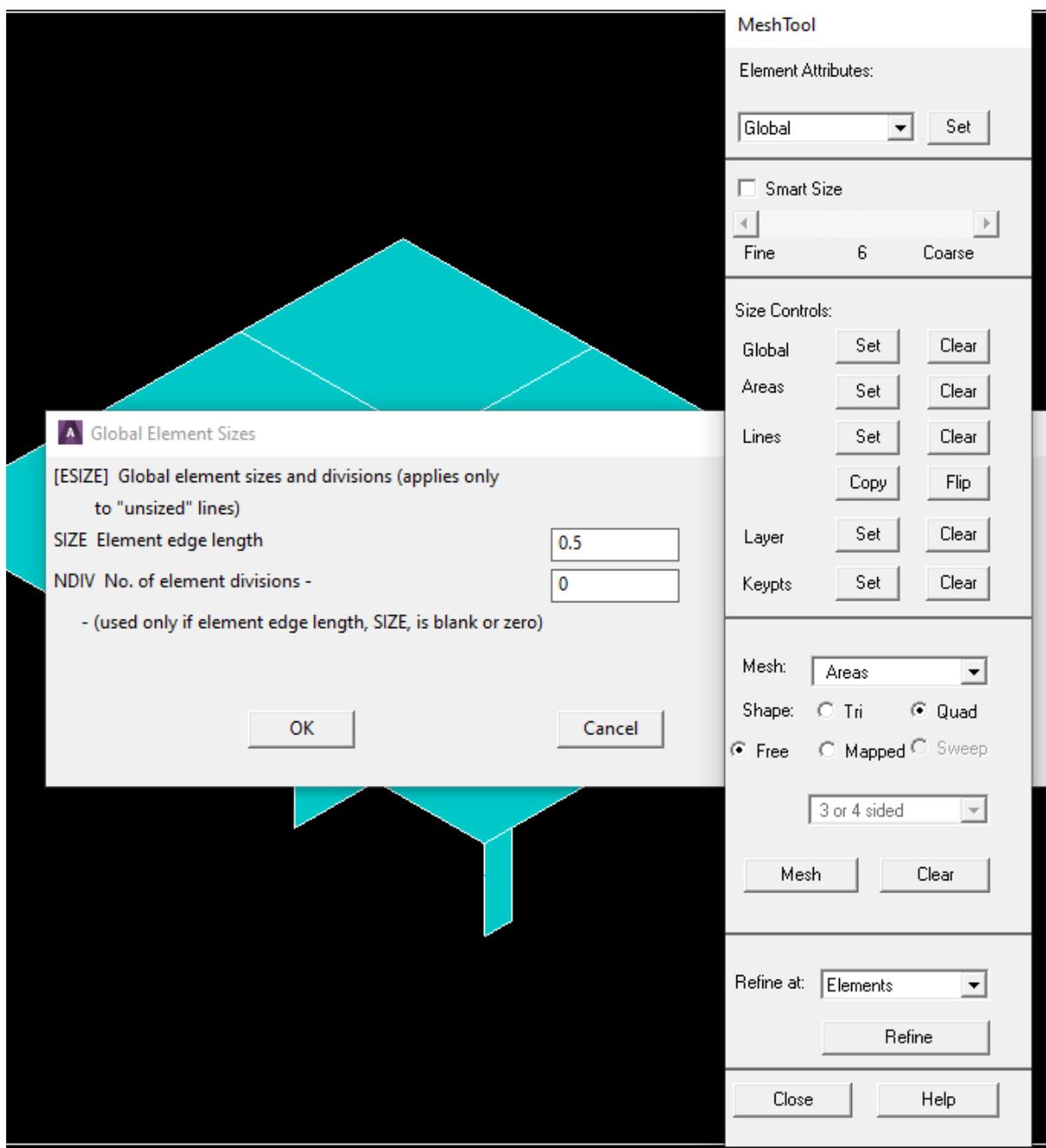


Рис.25. Окно Meshtool. Создание сетки КЭ

Чтобы посмотреть сечения элементов необходимо в командной строке вписать */eshape,1* - команда, которая включает отображение сечений КЭ, а затем в *Utility menu > Plot > Elements*. В рабочей области отобразится КЭ-модель типового этажа.

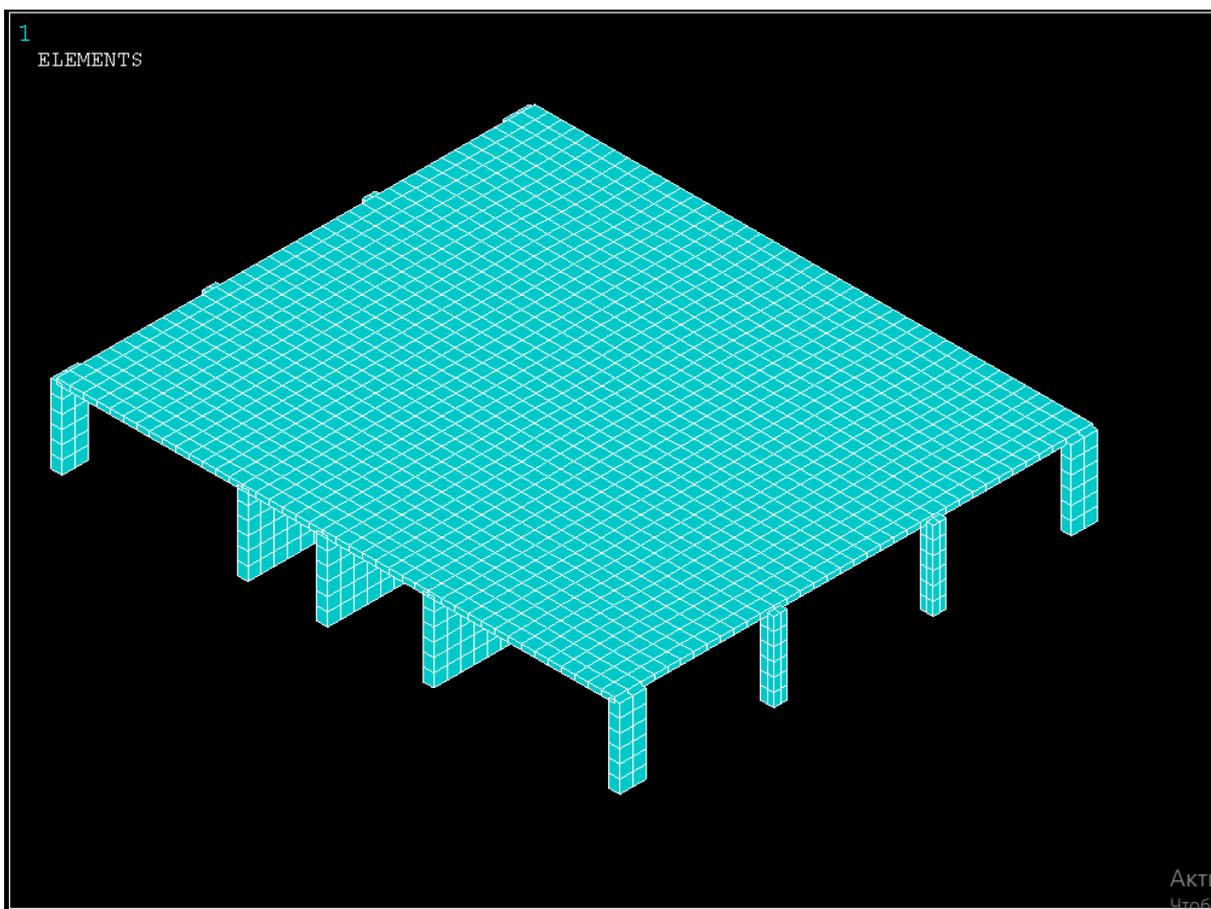


Рис.26. КЭ-модель первого этажа

6. Создание КЭ модели здания

Откопируем типовой этаж 11 раз. Для этого необходимо в *Main menu* перейти *Preprocessor > Modeling > Copy > Areas*, в открывшемся окне нажать *Pick all*. Откроется окно, в котором необходимо в окошке *ITIME* вписать “11” - это количество копий, включая оригинал, в окошко *DY* - “3” - высота этажа, нажать *OK*. Плоскости скопировались уже с КЭ-сеткой.

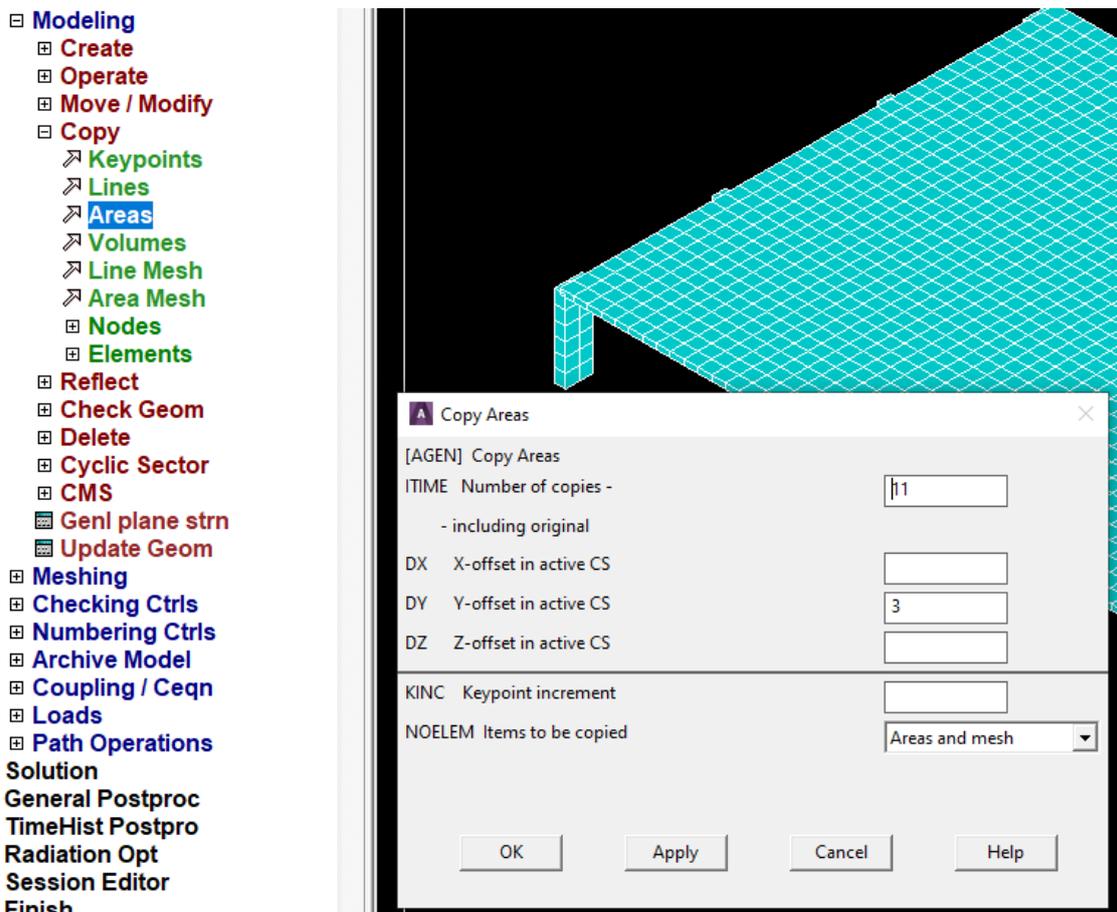


Рис.27. Настройки для копирования поверхностей

Чтобы скопировать колонны необходимо в *Main menu* перейти *Preprocessor > Modeling > Copy > Lines*. Откроется окно выбора линий, необходимо выбрать линии колонн. Чтобы увидеть линии нужно в *Utility menu* выбрать *Plot > Lines*. После подтверждаем выбор и открывается окошко, которое заполняем также как на рисунке выше.

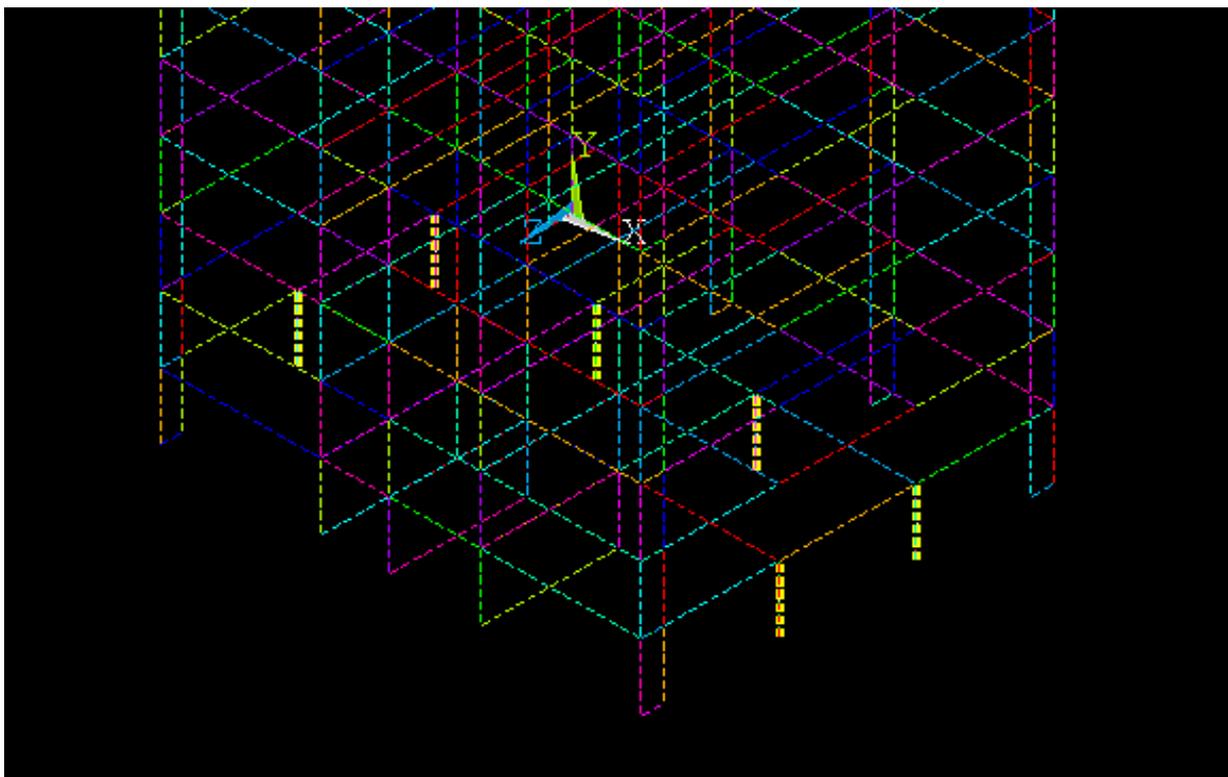


Рис.28. Выбор линий для копирования

Так как мы скопировали элементы вместе с узлами получилось так, что в некоторых точках находится два узла, необходимо их склеить. Для этого в командной строке необходимо прописать NUMMRG,ALL. Эта команда склеит повторяющиеся элементы.

Получили 11-этажное здание. Однако, согласно чертежам, верхний этаж аутригерный, то есть не хватает рёбер жесткости - стен по периметру этажа. Переходим в *Plot > Areas* и добавим стены на верхнем этаже. Вдоль боковых сторон, где есть колонны, добавляем плоскости от пилона до пилона способом,

которым мы строили стены и пилоны, то есть по 4 точкам через *Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Arbitrary > Through KPs*, обязательно строить плоскость не от пилон до пилон, а от пилон до колонны, от колонны до колонны и тд, чтобы элементы колонн принадлежали стенам и сетка разбилась правильно.

Так как с двух других сторон стены высотой 1 м от уровня пола, то их моделируем следующим образом: скопируем линии, которые ограничивают плоскость перекрытия-пола последнего этажа на 1 м вверх по оси *u*, и построим плоскости по тому же способу. Линии, находящиеся между ядрами жёсткости (стенами) копировать не нужно. Для того, чтобы скопировать линии нужно в *Main menu* перейти *Preprocessor > Modeling > Copy > Lines*, выделить линии, которые нужно скопировать и нажать *OK*. в следующем окне вписать 2 в окошко *INC* и 1 в окошко *DY*, подтвердить.

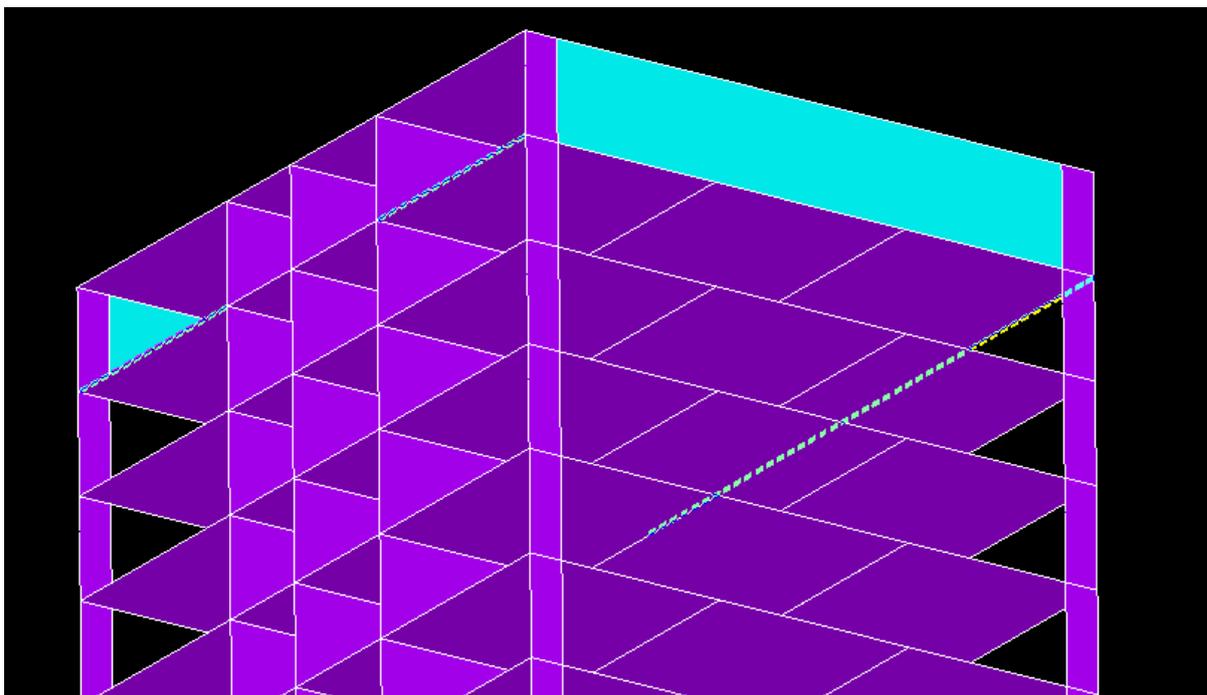


Рис.29. Достаиваем стены аутриггерного этажа

Если включим *Plot > Lines* увидим следующую картину:

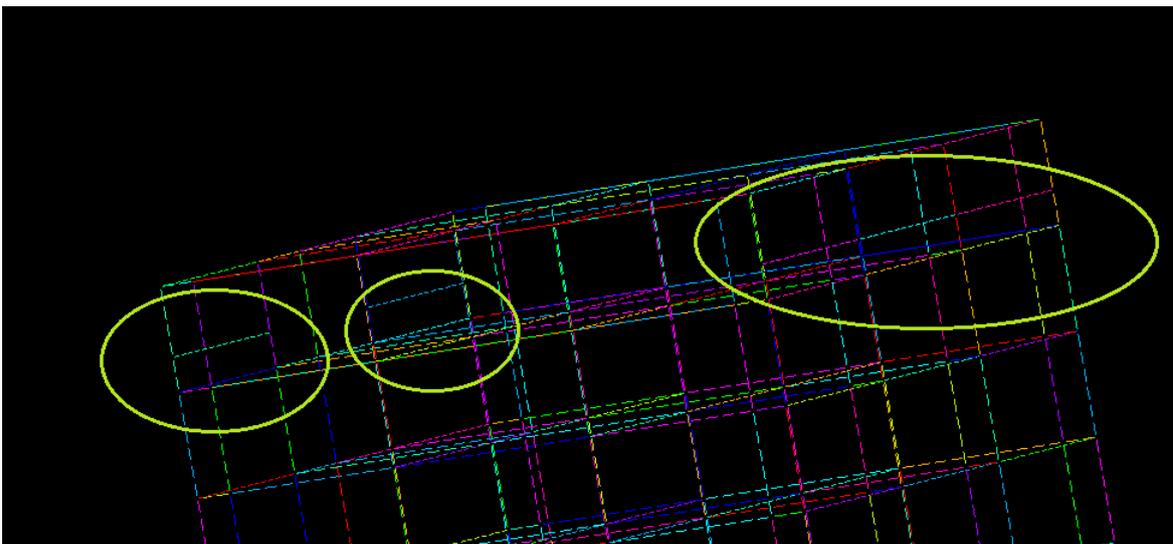


Рис.30. Отображение линий. Выделены вспомогательные линии для построения парапетов

Теперь построим по образовавшимся точкам плоскости с помощью той же команды и тем же способом. Получим:

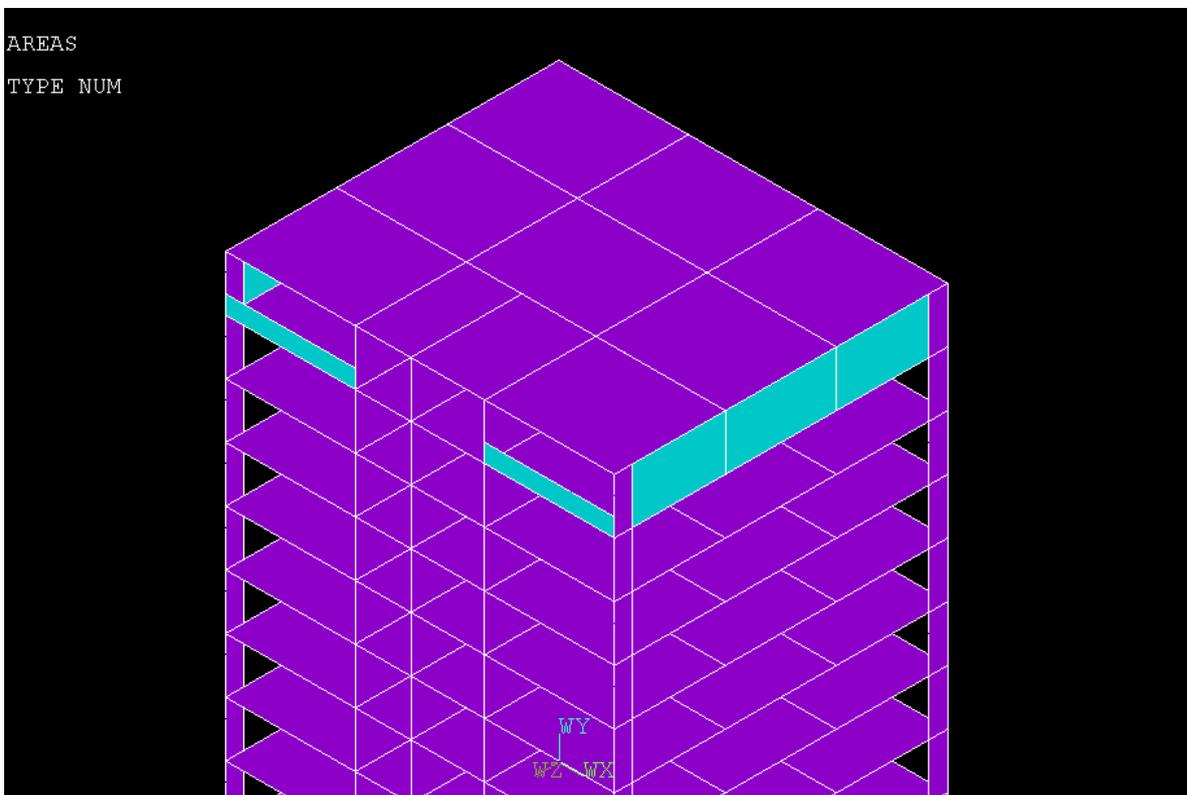


Рис.31. Парапеты построены

Теперь необходимо создать сетку на этих стенах способом описанным выше: задаем атрибуты этим поверхностям (*Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Picked Areas*), разбиваем сетку 0,5м (*Preprocessor > Meshing > Mesh tools*). Получим такую КЭ-модель. Сечения элементов можно отобразить, написав в командной строке последовательно /ESHAPE,1 (0, если необходимо отключить отображение сечений) и EPL0. Не забудьте прописать NUMMRG, ALL в командной строке, чтобы склеить раздвоившиеся узлы. Если появится окно с предупреждением нажмите *Close*.

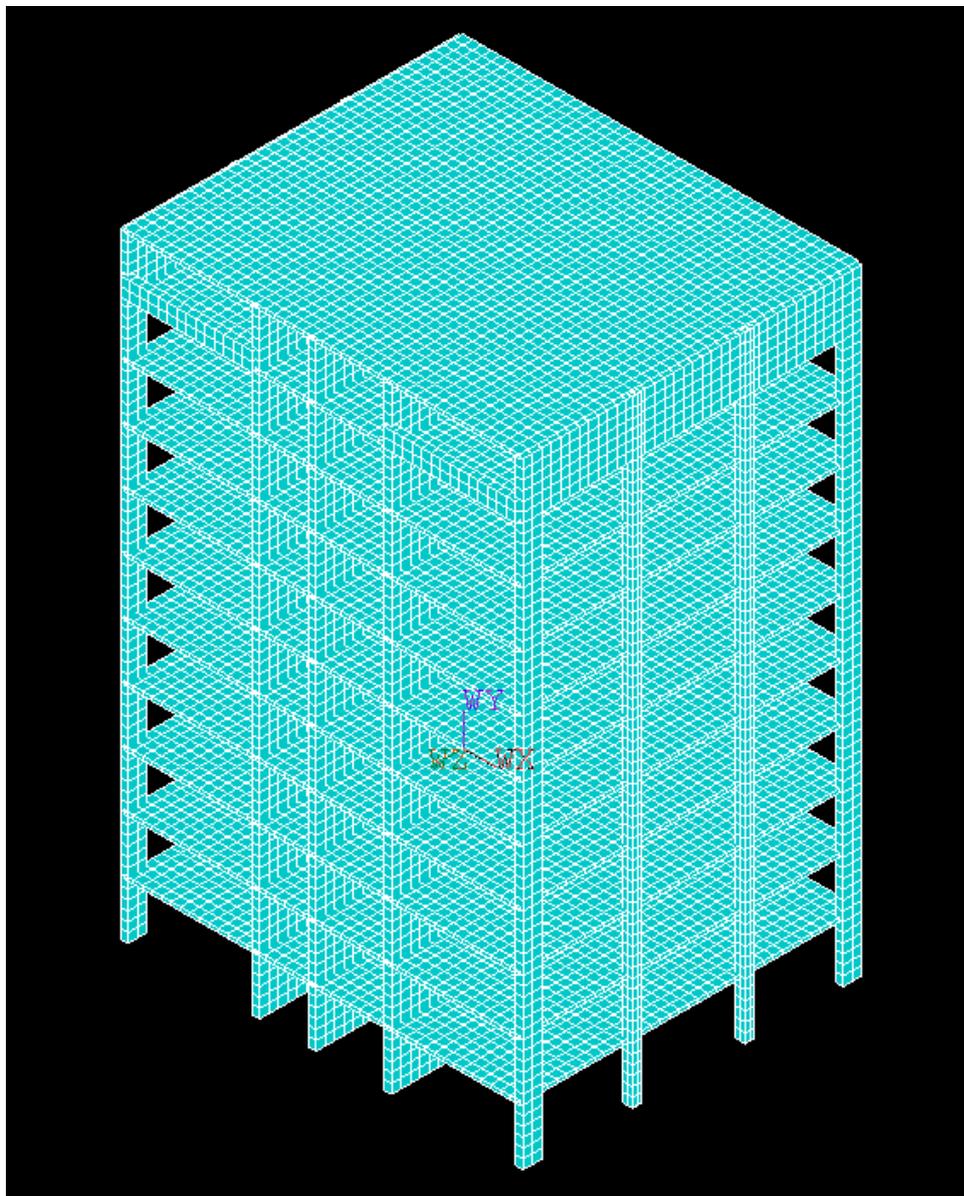


Рис.32. КЭ модель всего здания

7. Граничные условия (закрепления)

Добавим граничные условия для задачи - жёстко закрепим нашу модель в узлах на уровне $y=0$. Для этого необходимо в *Main menu* > *Preprocessor* > *Loads* > *Define Loads* > *Apply* > *Structural* > *Displacement* > *On Nodes*. Выбрать только узлы на уровне $y=0$. Для этого на правой колонке программы выбрать любой вид сбоку и с помощью бокса (*Box*) выбрать самые нижние узлы. Нажать *OK*. Открылось новое окно, в котором необходимо выбрать из списка *All DOF*, остальное оставить как есть и нажать *OK*.

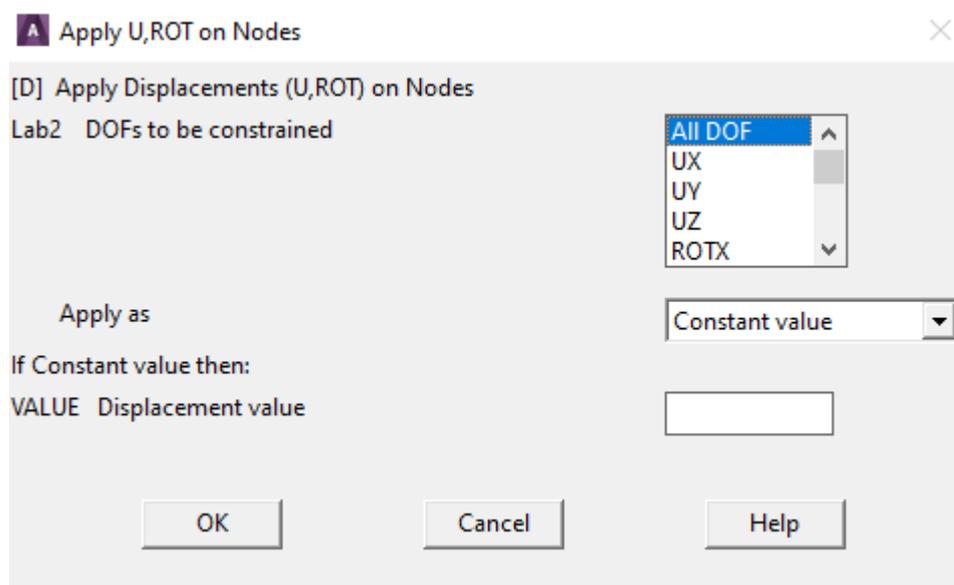


Рис.33. Выбор степеней свободы для закрепления

Как посмотреть задались ли связи? Необходимо перейти *Utility menu* > *PlotCtrls* > *Symbols* ... Откроется окно, в котором необходимо выбрать параметры как на картинке. Для того, чтобы отображались связи, приложенные распределённые нагрузки.

Тогда на нижних узлах здания появятся следующие символы, это закрепления.

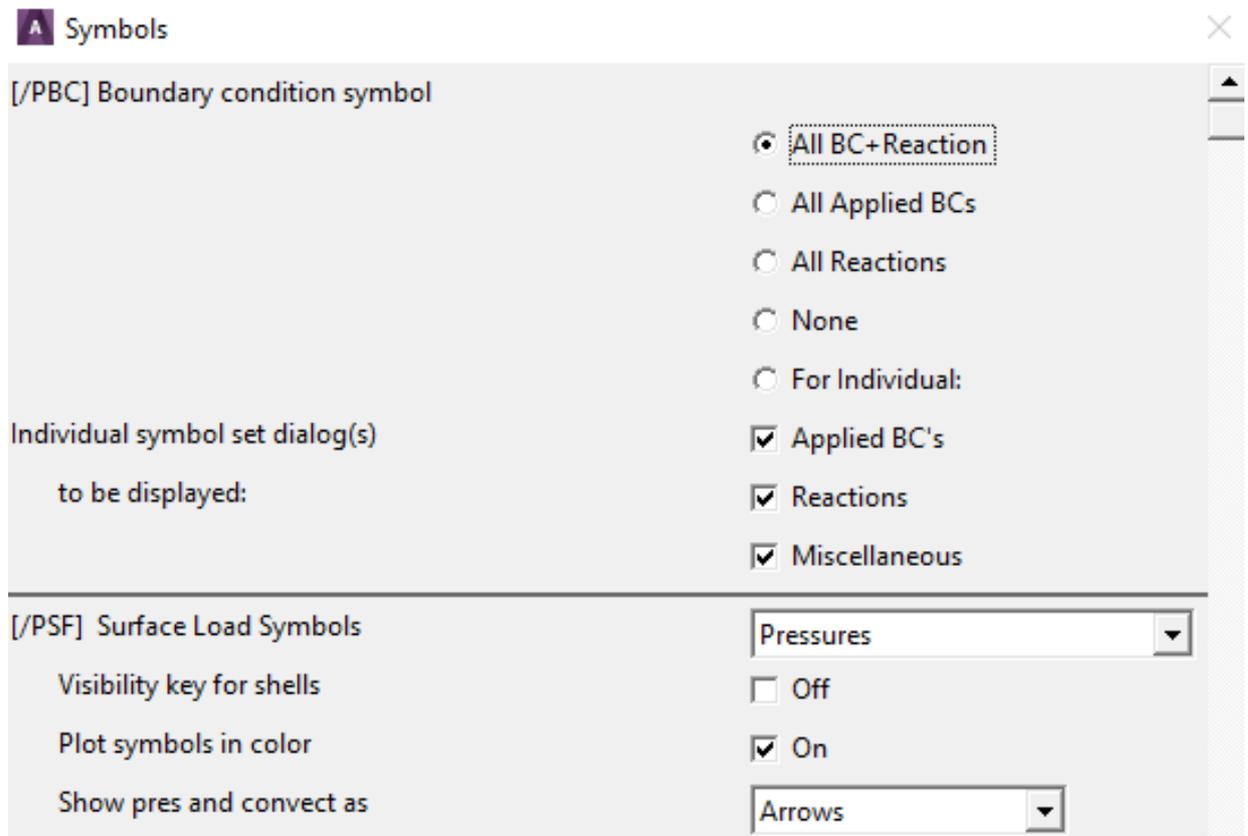


Рис.34. Настройка отображения граничных условий

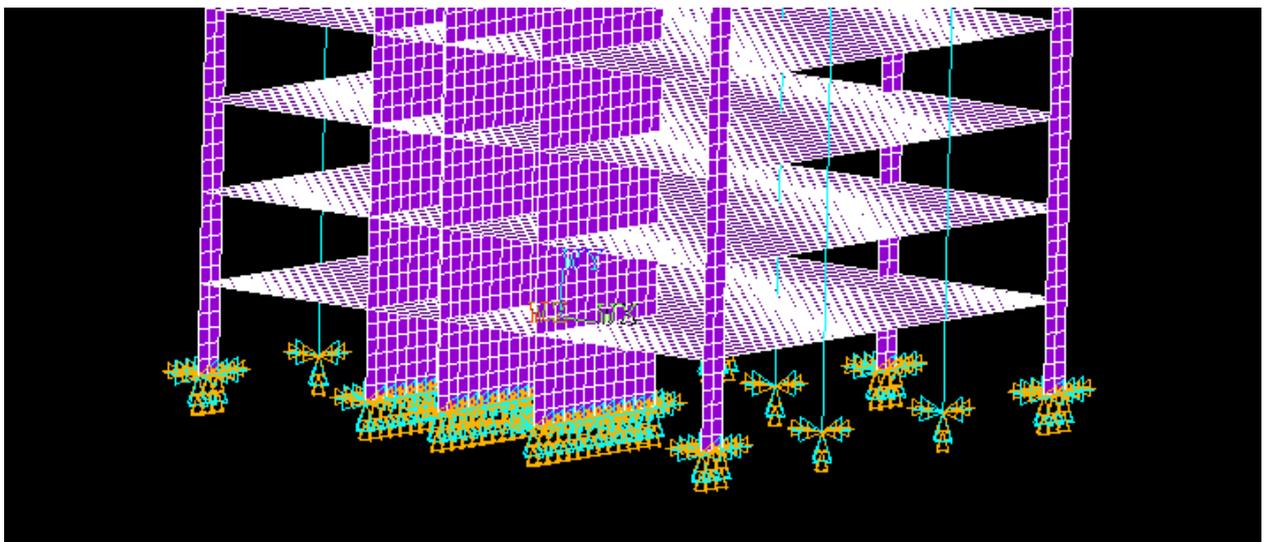


Рис.35. Показаны назначенные граничные условия

8. Сохранение модели в ANSYS

Теперь необходимо сохранить модель под тремя различными именами, так как дальнейшие задачи для линейного и нелинейного расчета будут отличаться, а третья модель будет использоваться для расчета с помощью макроса. Чтобы сохранить модель необходимо *Utility menu > File > Save as...* Откроется следующее окно, где необходимо написать название файла (только на английском, название не должно начинаться с цифры) и указать папку, в которую файл сохранить. Подтвердить нажатием *OK*. И сохраните под другим именем второй раз. Или можно прописать в командной строке *SAVE, "Project Name", DB,,ALL*. Где вторая компонента - название файла. Также в отдельную папку необходимо сохранить файл с результатами расчёта. Он имеет расширение *.rst*, и его название соответствует названию проекта. Чтобы открыть файл результатов нужно перейти *Main menu > General Postproc > Results Viewer* и найти в нужной папке свой файл.

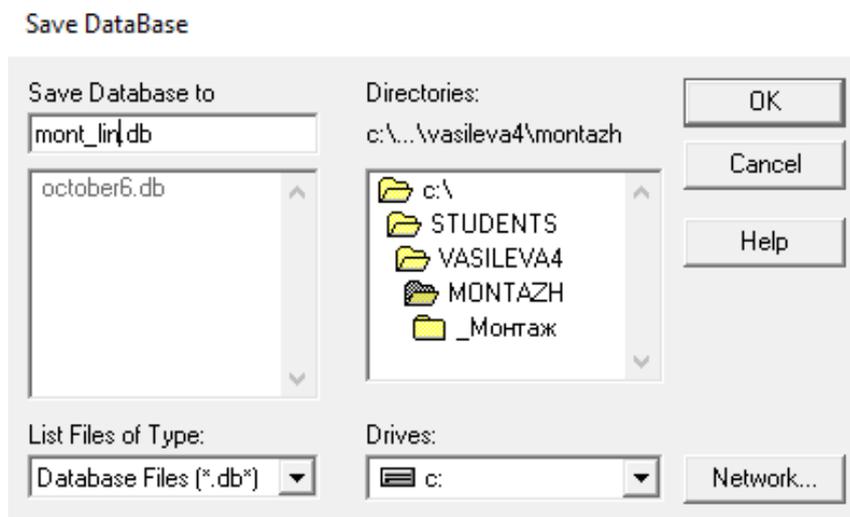


Рис.36. Окно сохранения

9. Задание нагрузки для одномоментной схемы

Прежде чем выполнять статический расчет необходимо задать нагрузки: равномерно-распределённую и собственный вес несущих конструкций. На все перекрытия здания (включая покрытие) действует равномерно распределённая нагрузка $q = 2,5 \text{ т/м}^2 = 25 \text{ кН/м}^2$. Для начала надо фрагментировать только горизонтальные элементы-оболочки. Необходимо перейти в *Utility menu > Select > Entities*, откроется окошко, в котором необходимо из выпадающих списков выбрать *Elements, By Attributes, Section ID num, From Full*. В окошко вписать “3” - это номер сечения КЭ, по которому выбираем элементы перекрытия. Нажимаем *OK*. Чтобы отображение обновилось необходимо в командной строке прописать *EPLO*. Получим следующую картину.

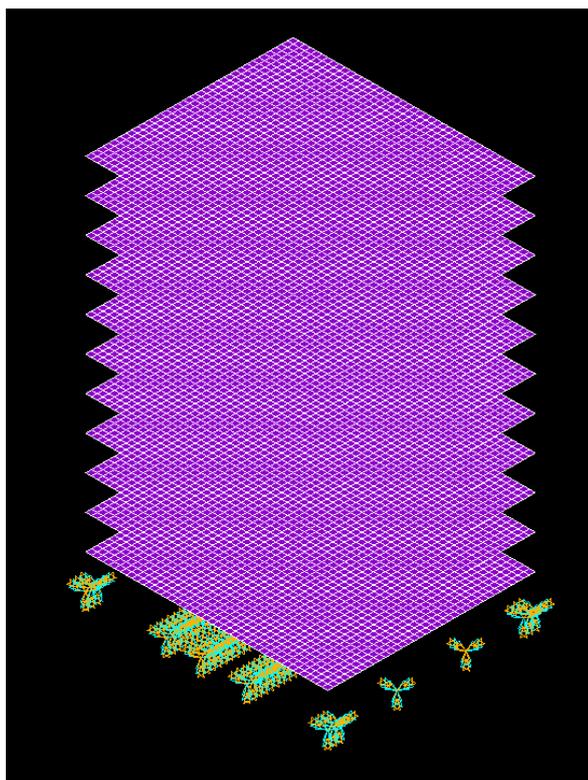


Рис.37. Выбранные поверхности для задания нагрузки

Теперь будет в разы проще задать нагрузку. Переходим в *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Element*. Откроется окно выбора элементов. Нажмите *Pick All*, откроется другое окно.

Здесь в окошке *SFE* необходимо из выпадающего списка выбрать *Constant value*, в окошке *LKEY* вписать “1” - это направление действия нагрузки - по нормали КЭ. В окошке *VALUE* вписать значение нагрузки 25 кН и нажать *OK*.

[SFE] Apply PRES on elems as a		Constant value
LKEY Load key, usually face no.	1	
If Constant value then:		
VALUE Load PRES value	25	
Optional PRES at other face nodes (leave blank for uniform PRES)		
VAL2 Load PRES at 2nd node	<input type="text"/>	
VAL3 Load PRES at 3rd node	<input type="text"/>	
VAL4 Load PRES at 4th node	<input type="text"/>	
OK Apply Cancel Help		

Рис.38. Окно для задания нагрузки

Теперь необходимо отменить фрагментацию перекрытий. Переходим *Utility menu > Select > Everything*. Если отображение не обновилось пропишите в командной строке *EPLO*. Зададим собственный вес. Для этого переходим *Main menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Gravity > Global*. Откроется окно, где в окошко *ACELY* необходимо вписать “10” - это ускорение свободного падения в м/с² (для простоты берем 10, а не 9,81). Нажимаем *OK*.

Следующим этапом отобразим все приложенные нагрузки. Переходим *Utility menu > PlotCtrls > Symbols..*, в открывшемся окне в выпадающем списке */PSF* выбрать *Pressures*, а ниже в выпадающем списке *Show pres and convect as* выбрать *Arrows*. Нажать *OK*. Получим следующее отображение: КЭ-модель с заданными нагрузками. Слева подписана “легенда”, показывающая, что отображается и каким цветом. То есть в данный момент заданы связи препятствующие поступательному и вращательному движению по всем направлениям (*U ROT*), собственный вес (*ACEL*) и нагрузка (*PRES-norm*).

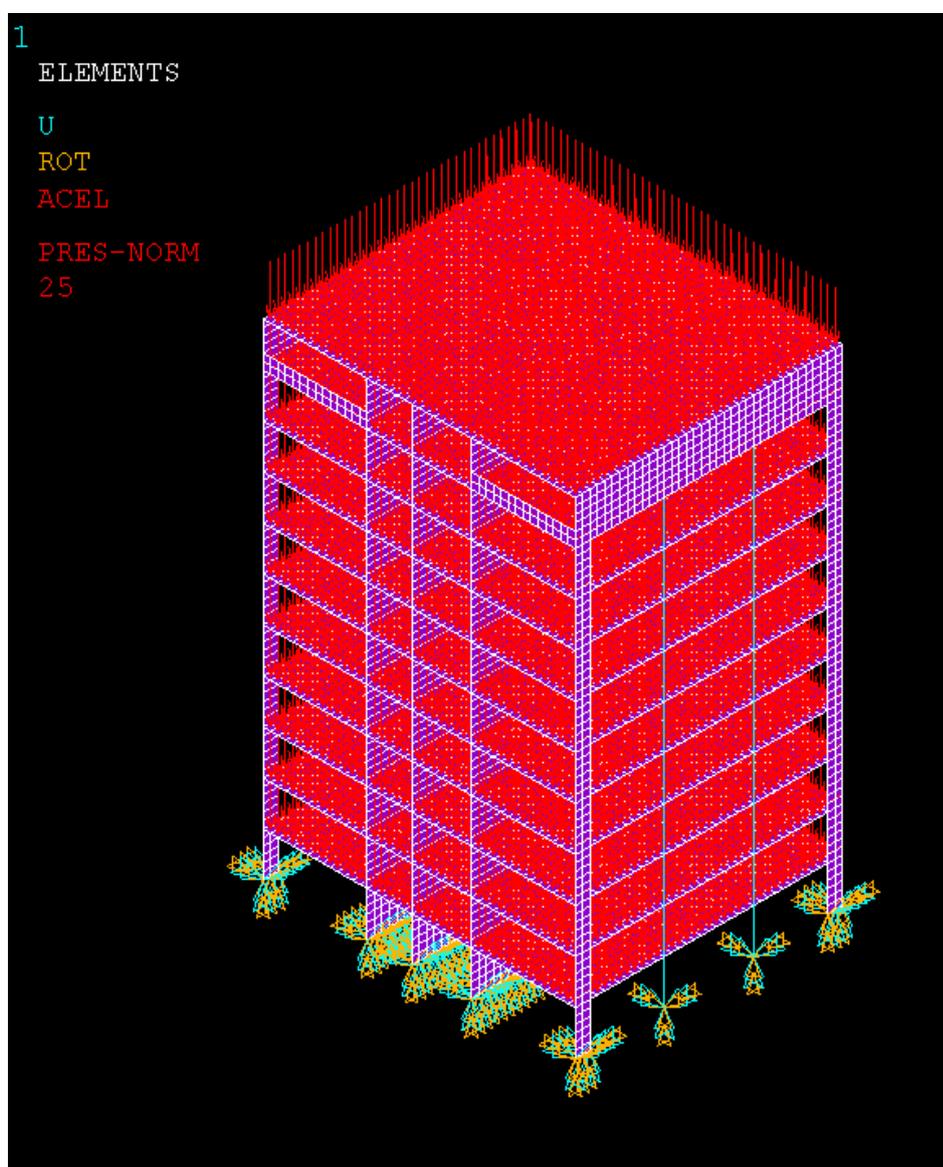


Рис.39. Отображение приложенной нагрузки

10. Линейный статический расчет

Прежде чем провести расчет необходимо настроить параметры расчета, указать линейность/нелинейность, вид расчета и тд. Для этого перейдем в *Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis* и в открывшемся окне выбрать *Static*, нажать *OK*. Для статического расчета больше ничего настраивать не нужно.

Чтобы запустить расчет необходимо перейти *Main menu > Solution > Solve > Current LS*. Откроется два окошка. В одном необходимо нажать *OK*, а во втором ознакомится с информацией по расчету: количеством степеней свободы, типом расчета и тд. После ознакомления его можно закрывать. Если расчет прошел успешно и без ошибок, появится окно *Solution is done*.

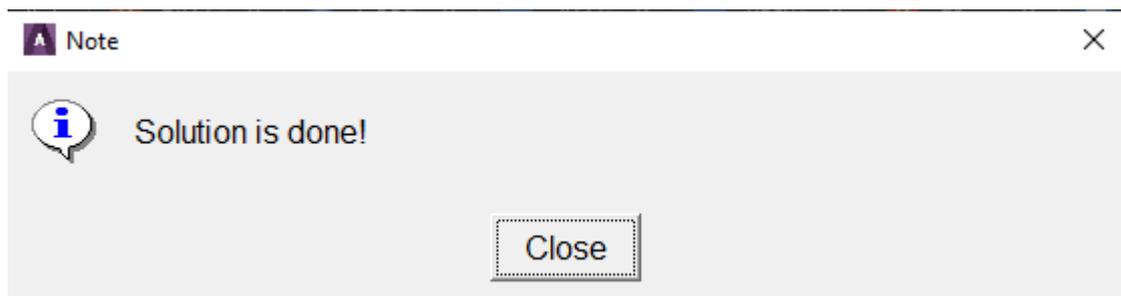


Рис.40. Сообщение о завершении расчета

Теперь необходимо прописать в командной строке *FINI* и сохранить проект - нажать *SAVE_DB* на *Toolbar* под командной строкой.

11. Создание компонент из элементов для нелинейного статического расчета

Для начала необходимо открыть файл с моделькой для нелинейного расчета. Как открыть файл можно посмотреть ниже, в пункте 14. Теперь необходимо разбить элементы принадлежащие каждому этажу на группы, так называемые компоненты.

Выбираем элементы одного этажа. Выбираем любой вид сбоку на самой левой панели видов. Затем переходим в *Utility menu > Select > Entities...* Выбираем *Elements, By Num/Pick* и нажимаем *OK*. В открывшемся меню выбираем *Box* и слева направо проводим бокс так, чтобы все элементы одного этажа попали в область.

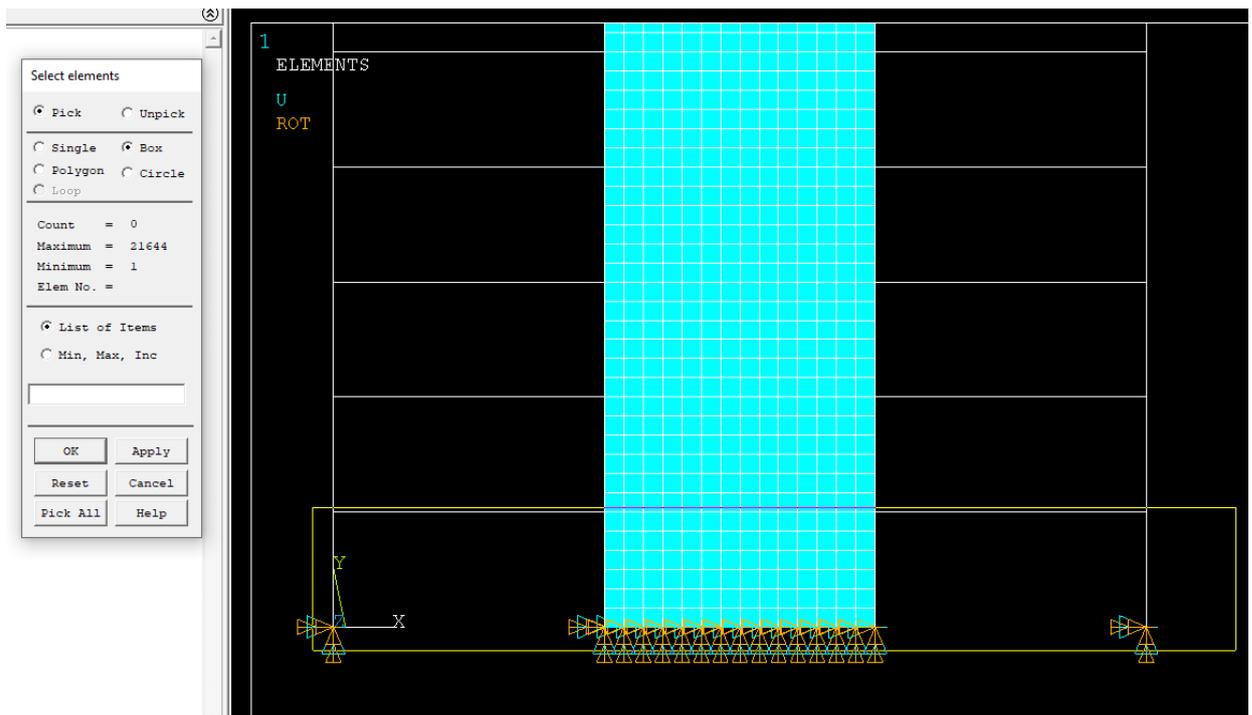


Рис.41. Выбор КЭ

И нажимаем *OK*. Теперь если мы пропишем в командной строке *EPLO* на экране останутся только выбранные элементы.

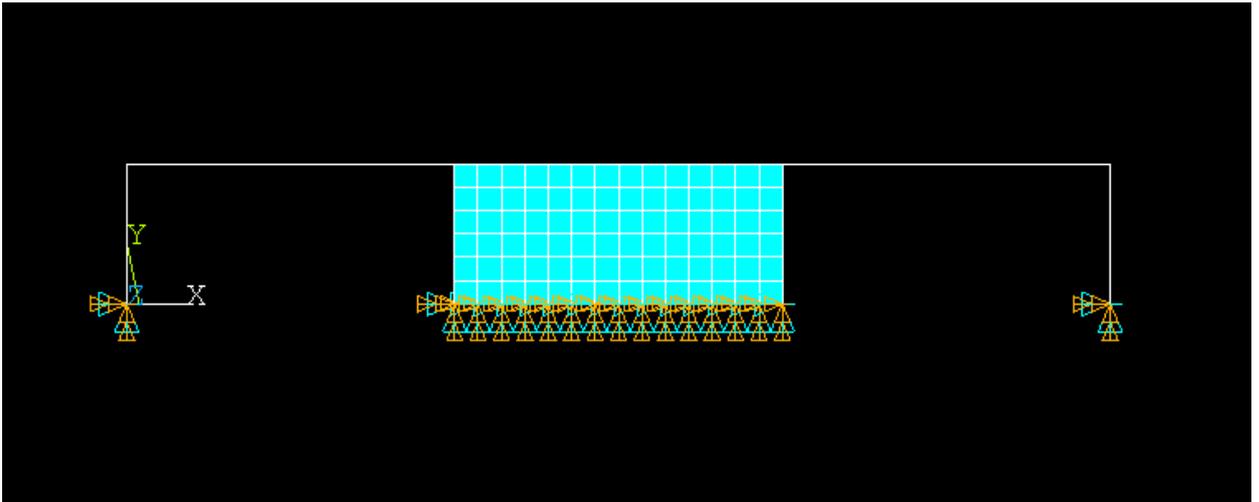


Рис.42. Отображение выбранного набора КЭ

Создаем из этих элементов компоненту. *Utility menu > Select > Comp/Assembly > Create Component*. Откроется окно, в нем в окне необходимо вписать название компоненты “S1”, где 1 - номер этажа, в выпадающем списке выбрать *Elements*, так как сохранять в компоненту мы будем именно элементы. Нажимаем *OK*.

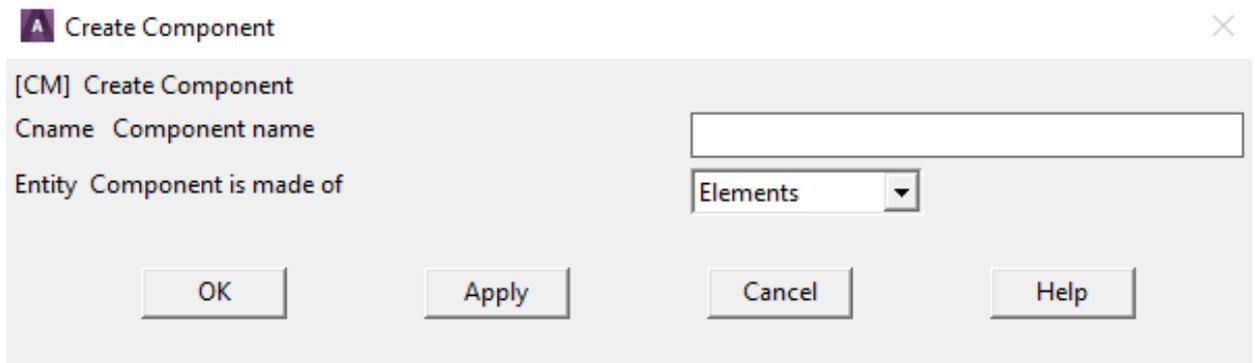


Рис.43. Создание компоненты (группы КЭ)

Далее возвращаем видимость все модели, прописав в командной строке последовательно две команды *ALLSEL* и *EPLO*. Теперь эти действия нужно сделать для оставшихся этажей, всего должно получиться 11 компонент. Как только процесс закончен, перейдите *Utility menu > Select > Component Manager*. Откроется менюшка, здесь можно просмотреть все имеющиеся компоненты и, если нужно, удалить какие-то нажатием *ПКМ* и выбором *Delete*, также при выборе *Plot* на экране построится эта компонента, а при выборе *Plot in context* компонента будет выделена на фоне всей модели.

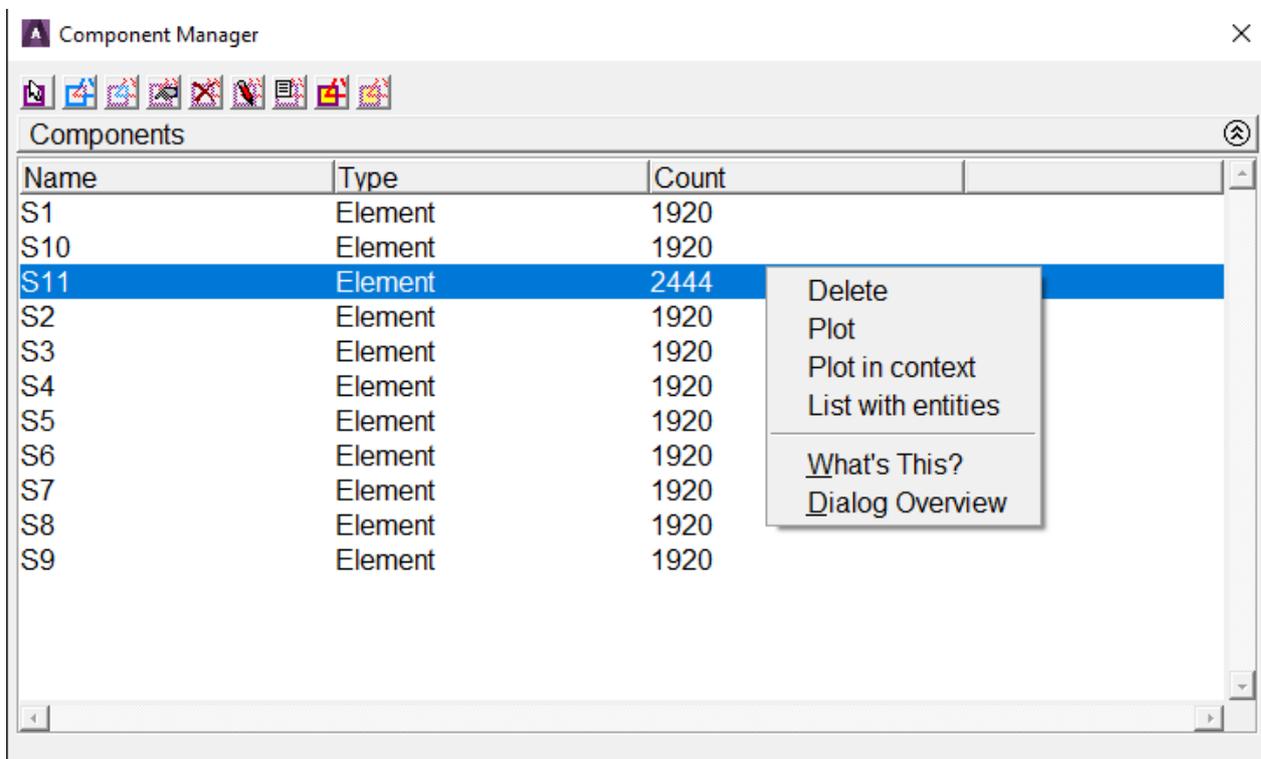


Рис.44. Окно *Component manager*

12. Подготовка к нелинейному статическому расчету

Алгоритм расчета на поэтапное возведение в ANSYS состоит в том, что мы последовательно включаем компоненты-этажи, а узлы выключенных этажей жёстко закрепляем, нагружаем активные этажи и рассчитываем. Чтобы результаты последовательных расчетов не перезаписывали друг друга

добавляем шкалу псевдо-времени, на которой будем отмечать этап возведения здания.

Прежде чем начнём работать по алгоритму, зададим собственный вес конструкции. В *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Inertia > Gravity > Global* и в окошко *ACELY* только открывшегося окна вписать “10”.

Теперь необходимо включить учёт нелинейности в расчете. В *Main menu* перейдём *Solution > Analysis Type > Sol'n Controls*, откроется окно, в котором в разделе *Basic* в выпадающем списке *Analysis Options* необходимо выбрать *Large Displacement Static*. Эта надстройка позволяет учитывать большие перемещения. В нашей задаче таких перемещений не возникает, но эту надстройку включить необходимо.

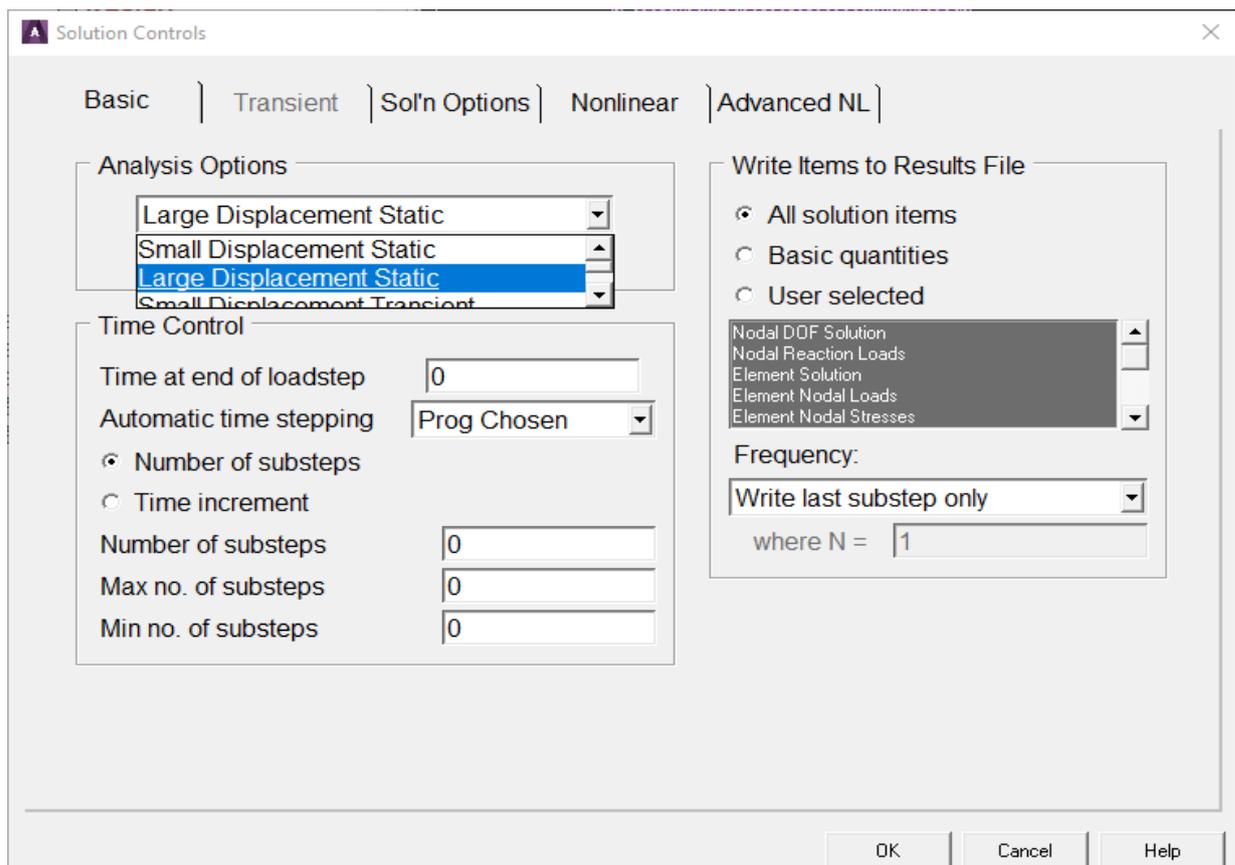


Рис.45. Настройка решателя

Теперь нужно подготовить модель выполнению алгоритма расчёта. Для этого закрепим все узлы, кроме тех, что принадлежат элементам первого этажа, необходимо выбрать элементы первого этажа с помощью компонент: *Utility Menu > Select > Comp/Assembly > Select Comp/Assembly...* Откроется окно, в котором необходимо выбрать первый из двух вариантов и подтвердить. В следующем окне необходимо выбрать имя первого этажа, а в выпадающем списке *From full set* и подтвердить.

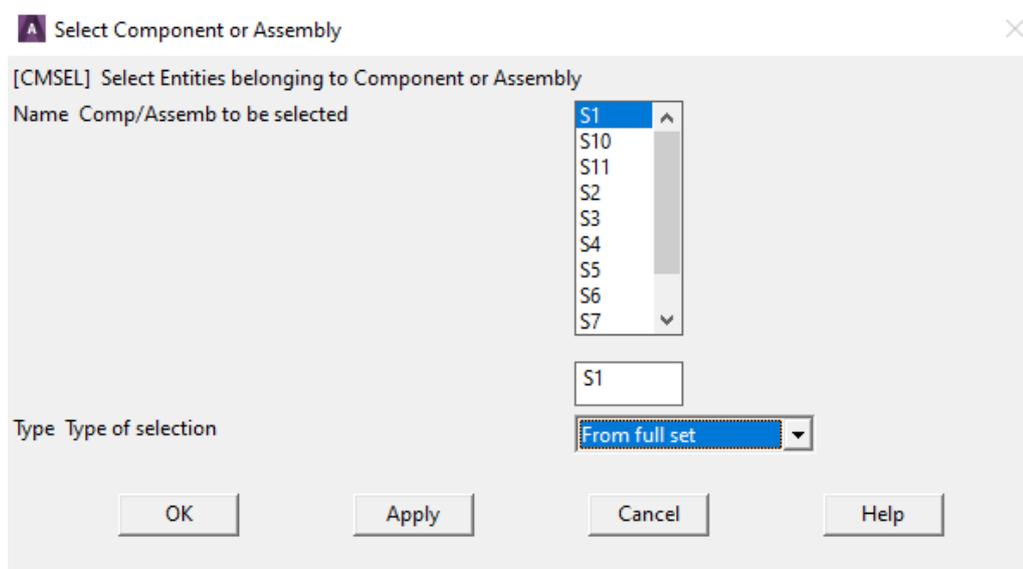


Рис.46. Выбор компоненты

Чтобы отобразился наш выбранный первый этаж, нужно в командной строке прописать *EPL0*. Теперь выберем все узлы, принадлежащие этому этажу и инвертируем выбор. В командной строке прописываем *nsle* - эта команда выберет все узлы, принадлежащие выбранным элементам, после команду *n sel, inve* - команда инвертирует выбор узлов. То есть теперь выбраны узлы, которые не принадлежат первому этажу. Закрепим их. *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes*. Откроется окно, где необходимо выбрать *Pick All*. В следующем открывшемся окне выбираем *All DOF* и подтверждаем. Узлы закреплены. Чтобы отобразить их нужно написать команду *nplo*.

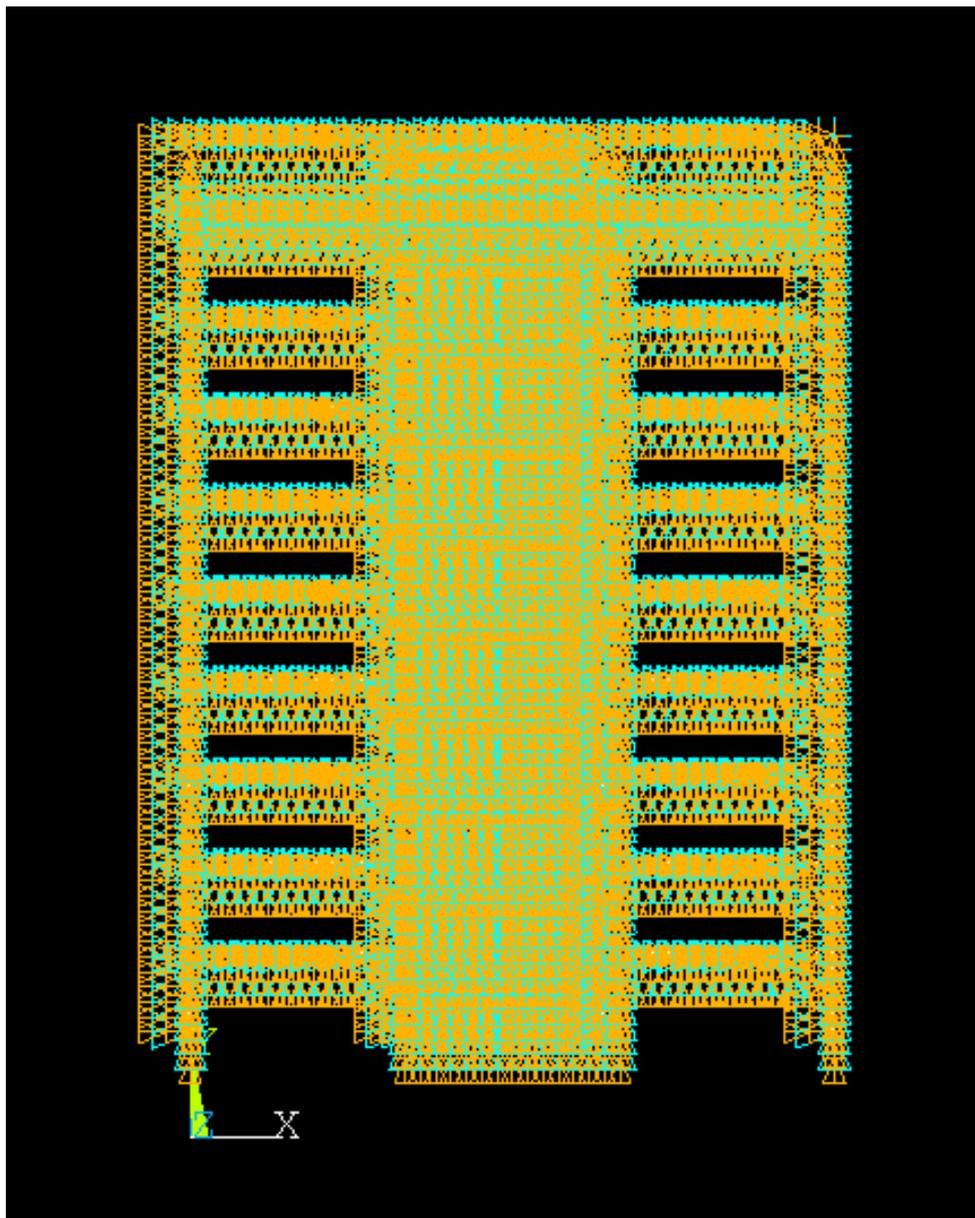


Рис.47. Закрепление узлов неактивных элементов

Теперь необходимо выключить из расчета элементы, принадлежащие верхним этажам. В командной строке прописываем *esln*. Далее в *Main Menu* переходим *Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Other > Birth&Death > Kill Elements*, в открывшемся окне выбора элементов в окошке вписываем *all* и нажимаем подтвердить. Выключенные элементы всё еще отображаются, но они имеют нулевую матрицу жесткости. Чтобы отобразить все элементы впишите в командную строку *ALLSEL* и *eplo*.

13. Алгоритм статического нелинейного расчета

Зададим нагрузку на перекрытие первого этажа. Выбор элементов перекрытия можно осуществлять любым вышеописанным методом. Пусть в примере будет так: выбираем любой вид сбоку на панельке справа, переходим *Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Elements*. Вох-ом выбираем элементы перекрытия и нажимаем *OK*. В открывшемся окне вводим значение нагрузки 15 и подтверждаем.

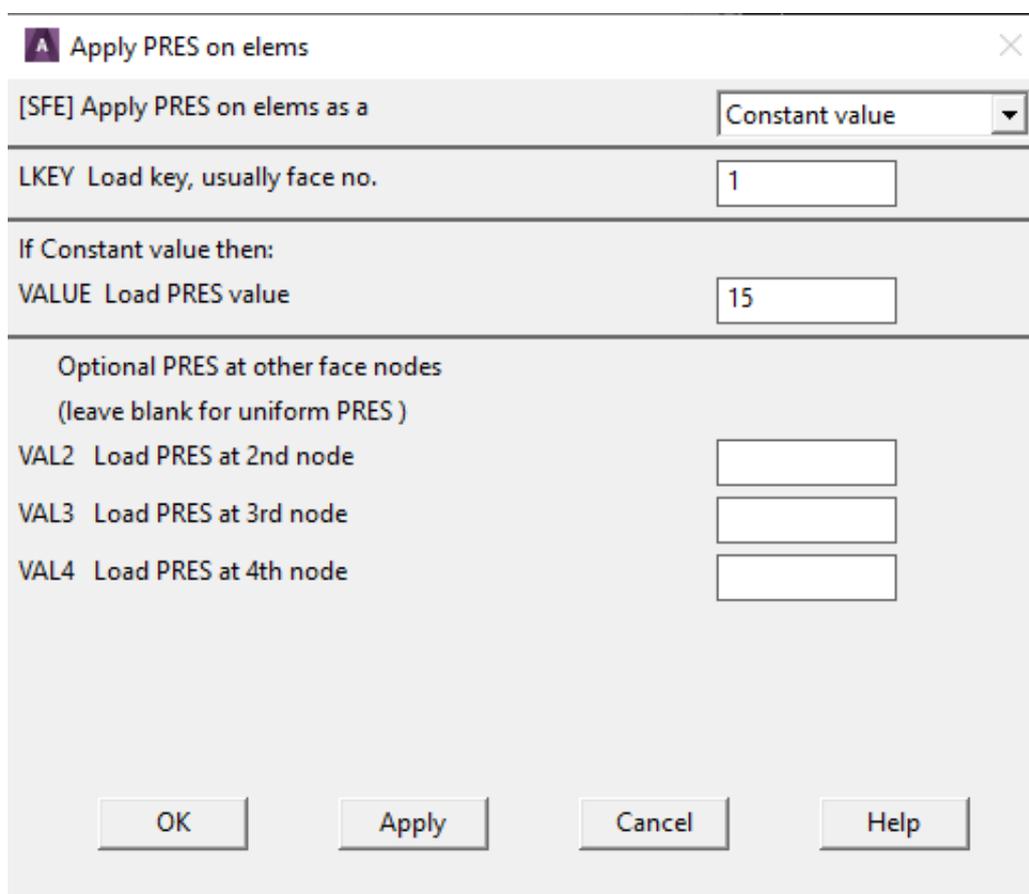


Рис.48. Окно задания нагрузки

Теперь задаём псевдо-время, которое будет обозначать этап возведения. Для этого в командной строке пропишем *TIME, 1*. “1” означает номер этапа. Теперь можно настроить решатель и запустить на расчёт по вышеописанному методу. Если появилось окно-предупреждение, нажимаем *YES*. Расчёт

успешно выполнен, но на экране появились графики - это графики невязок. В данной задаче они нам не нужны.

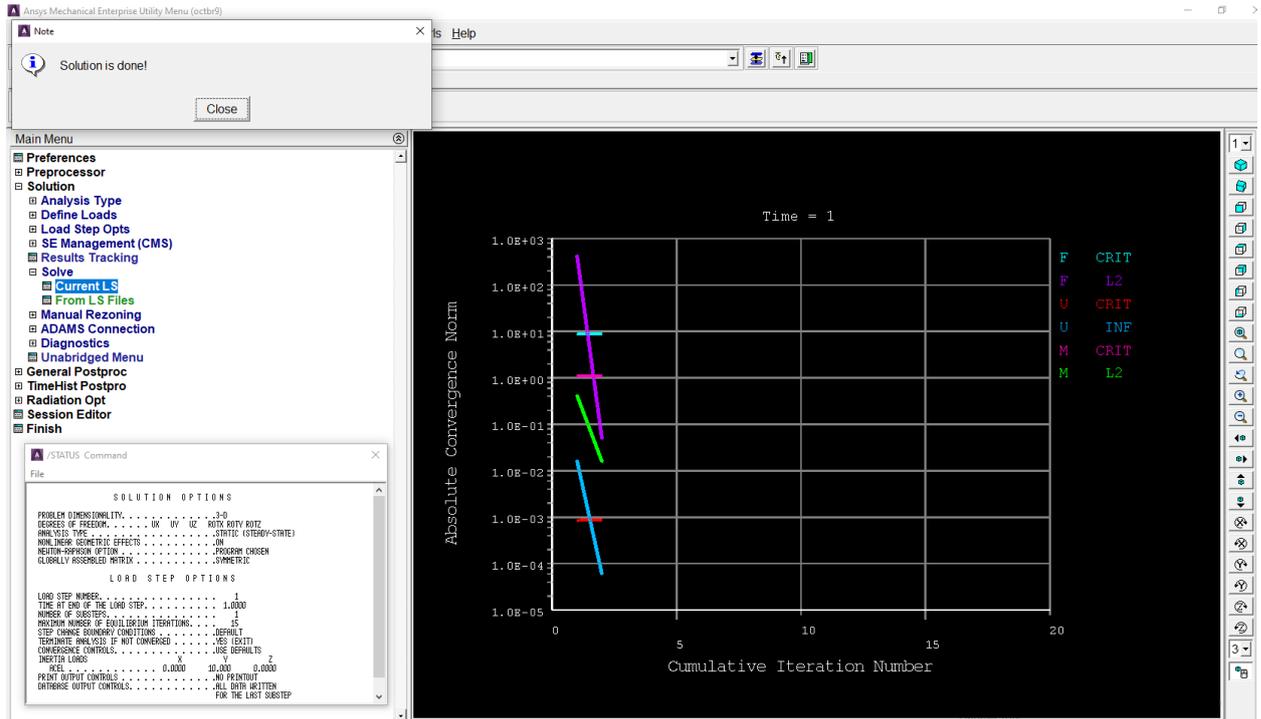


Рис.49. Завершение расчета 1-й стадии возведения

Следующие операции выполним с помощью макроса, в котором запишем цикл. Чтобы запустить макрос, необходимо вписать его название в командную строку. Текст макроса с комментариями: (особое внимание уделите работе с компонентами и конструкции %i%, которая подставляет значение i на данном шаге выполнения цикла в название компоненты)

*do,i,2,11 !цикл, в котором мы включаем следующий этаж,
 cmsel,s,s%i% !работа с компонентой. Выделение элементов,
 которые содержит в себе компонента.

nsle \$ ddelete,all,all !удаляем закрепление его узлов,
 ealive,all !включаем элементы (возвращаем не нулевую матрицу
 жесткости)

esel,s,sect,,3 !выбираем перекрытия по номеру сечения

sfe,all,,pres,,15 !задаём нагрузку на перекрытие

```

alls                !выделяем все элементы перед запуском на расчёт
TIME,i              !устанавливаем шаг и количество итераций
NSUBST,1,10000,1
SOLVE               !запускаем расчёт
*enddo

```

Ждём, пока значение *TIME* над графиком не будет равно 11. Тогда расчет первых 11 этапов будет закончен.

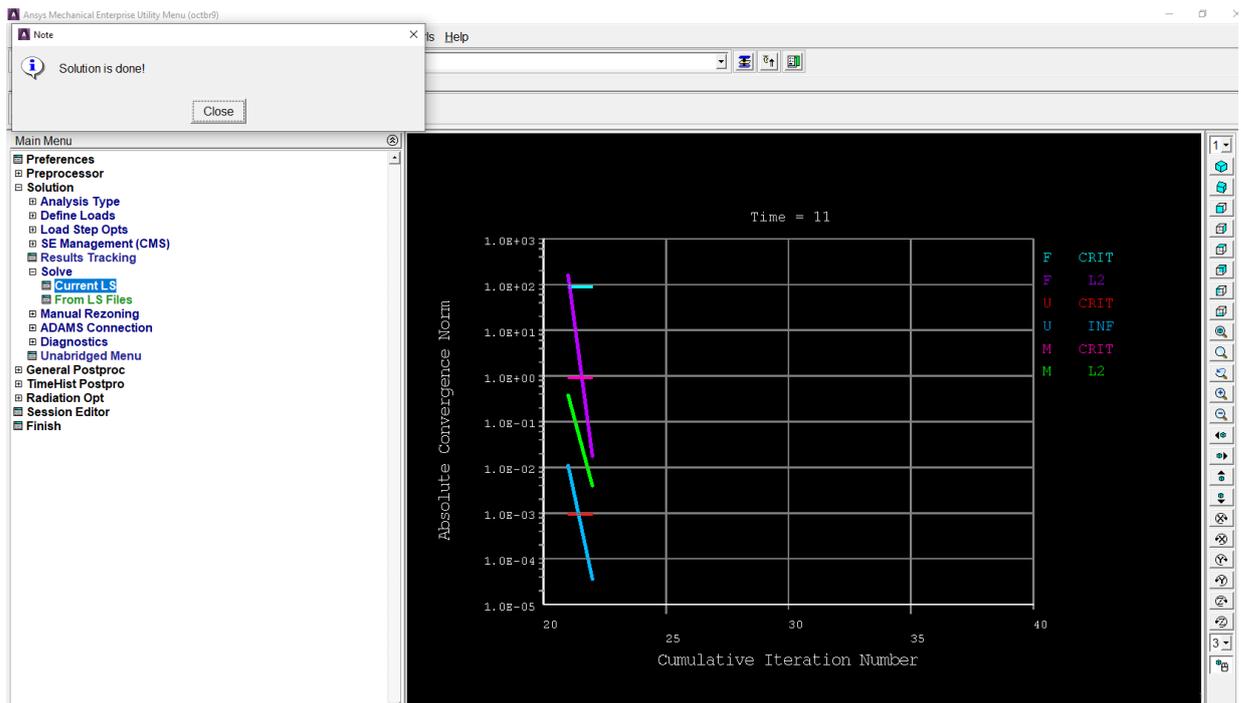


Рис.50. Завершение расчета 11-й стадии возведения

На двенадцатом этапе возведения необходимо добавить ко всем нагрузкам дополнительные 10 кН. Для этого выбираем элементы перекрытия по номеру сечения. *Utility Menu > Select > Entities...*

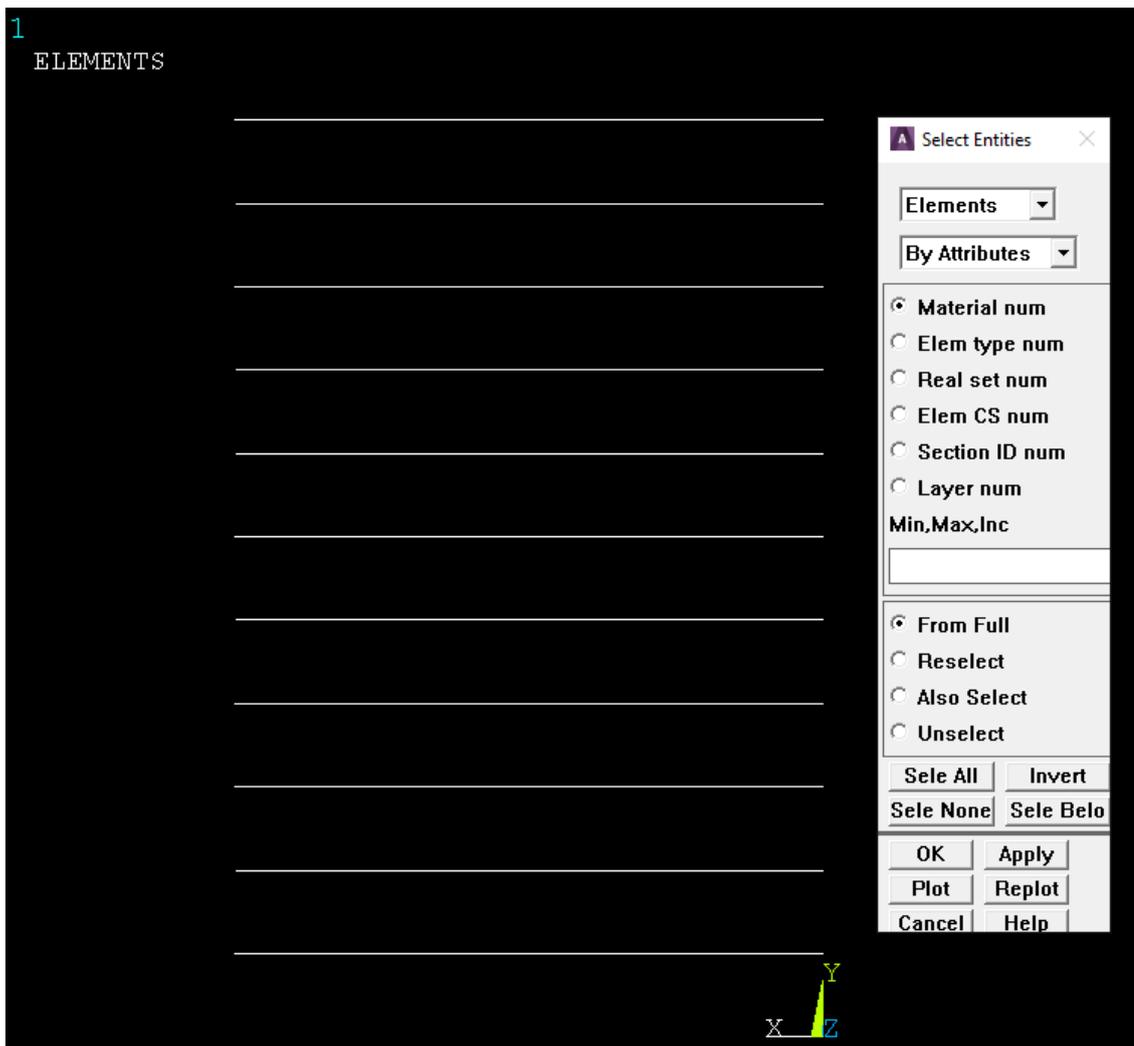


Рис.51. Выбор элементов для задания нагрузки

Прежде чем задавать эту нагрузку необходимо включить возможность сложение нагрузок, иначе новая нагрузка перезапишет старую. Переходим в *Main Menu > Solution > Define Loads > Settings > Replace vs Add > Surface Loads*. В открывшемся окне выбираем из первого выпадающего списка *Pressure (PRES)* “Add to existing” и подтвердить, нажав *OK*. Теперь можно задавать дополнительную нагрузку.

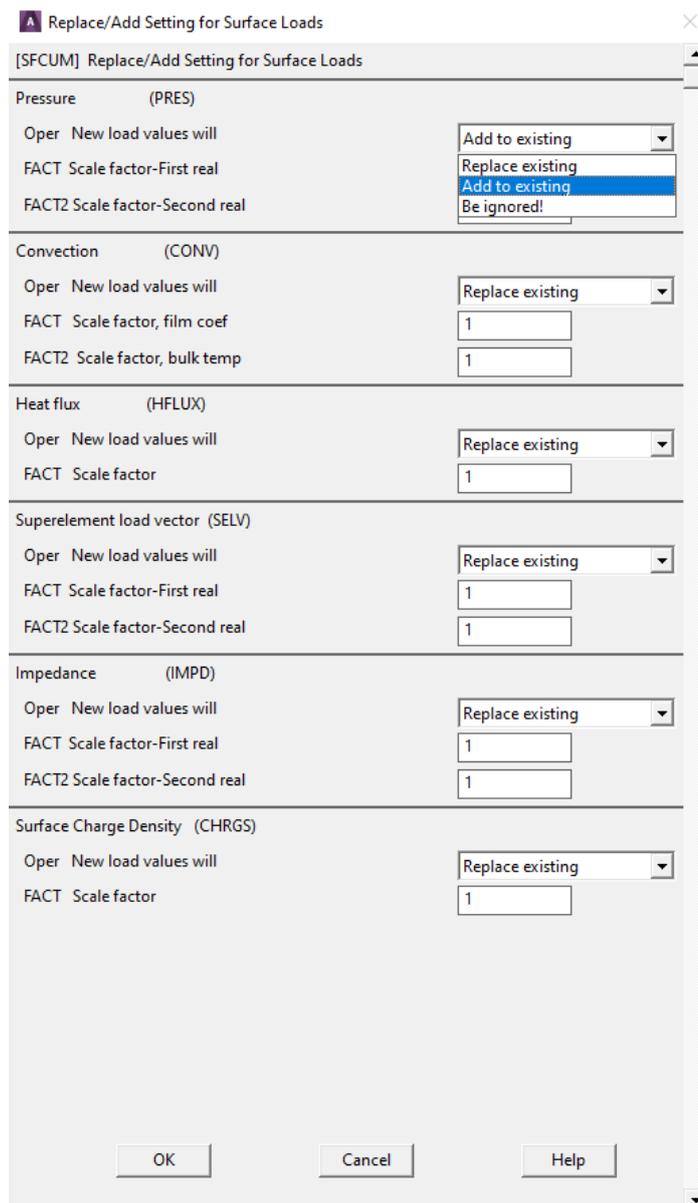


Рис.52. Настройка суммирования нагрузок

Задаём нагрузку *Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Element*. В появившемся окне нажимаем *Pick all*, а в следующем в окне *VALUE* вписываем “10”. Нагрузки сложились, можно запускать расчёт, но выбраны только перекрытия, вписываем в командную строку *ALLSEL* для того, чтобы выбрать все элементы. Теперь в командной строке прописываем 12-ый шаг - *TIME, 12* и запускаем расчёт.

14. Загрузка готовых моделей

Для того, чтобы открыть готовую модель необходимо в *Utility menu* выбрать *Resume from*. Откроется окно *Resume Database*, где в *Directories* необходимо выбрать папку и файл, который должен иметь разрешение *.db*. Название файла должно быть на латинице.

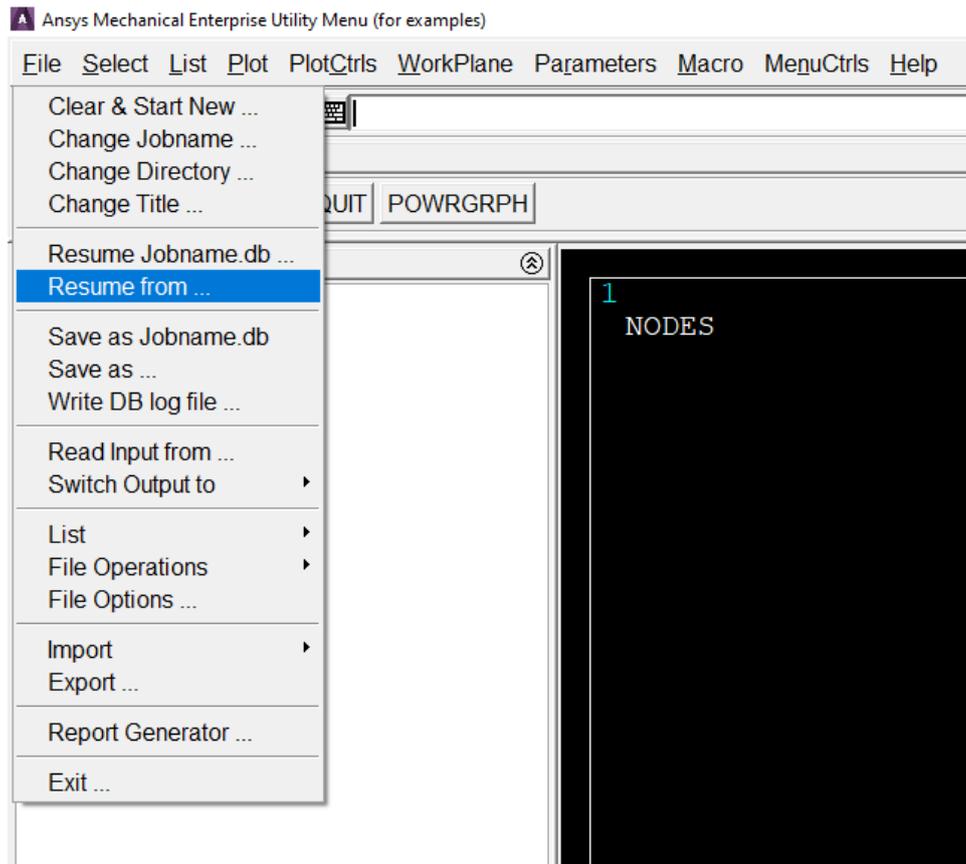


Рис.53. Загрузка модели из файла

Также можно сохранить готовую КЭ или геометрическую модель, выбрав *Save as ...* и введя название файла и выбрав папку, куда модель необходимо сохранить, в появившемся окне.

Можно покрутить или масштабировать модель с помощью кнопок на правой панели графического интерфейса. Вернуться в исходное положение,

изометрию, можно нажатием кнопки ,

а включить управление с помощью мышки на . Тогда перемещение модели в окне

осуществляется на ЛКМ, поворот на ПКМ, масштаб - нажатием на колесико мыши.

Если после каких-либо действий необходимо восстановить исходную модель, необходимо нажать *RESUME_DB* на *Toolbar* в верхней части графического интерфейса. Модель вернётся в исходное состояние.

15. Проверка моделей

После подгрузки модели необходимо проверить, какие элементы используются в модели, их сечения элементов, материалы, закрепления и тд.

Чтобы посмотреть типы элементов необходимо в *Main Menu* перейти в *Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete* в открывшемся окне (*Element type*) проверяем типы элементов, которые используются в модели

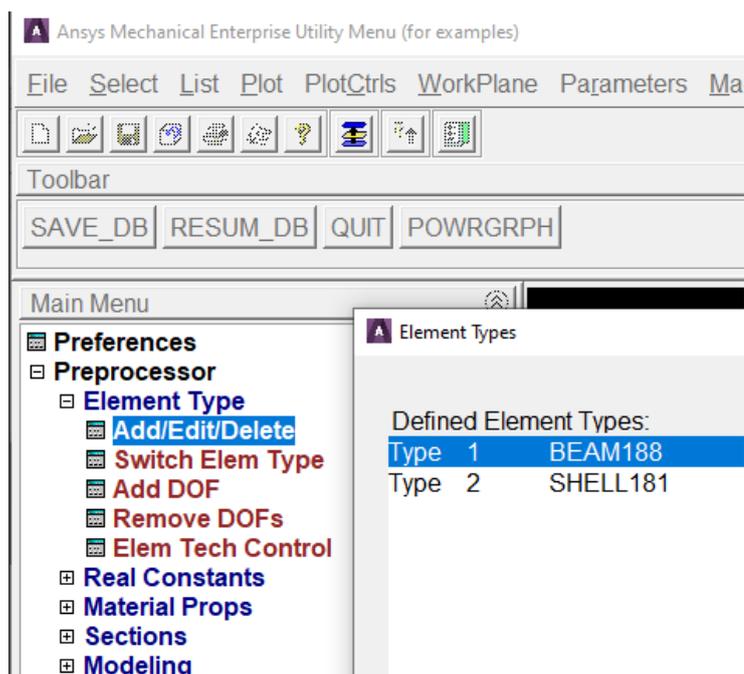


Рис.54. Просмотр заданных типов КЭ

Чтобы посмотреть материалы необходимо в *Utility menu* выбрать *List > Properties > All Materials*. Откроется окно *MPLIST Command*, где перечислены используемые в модели материалы и их свойства. В нашем случае модуль упругости *E_x*, коэффициент Пуассона *PRXY* и плотность *DENS*.

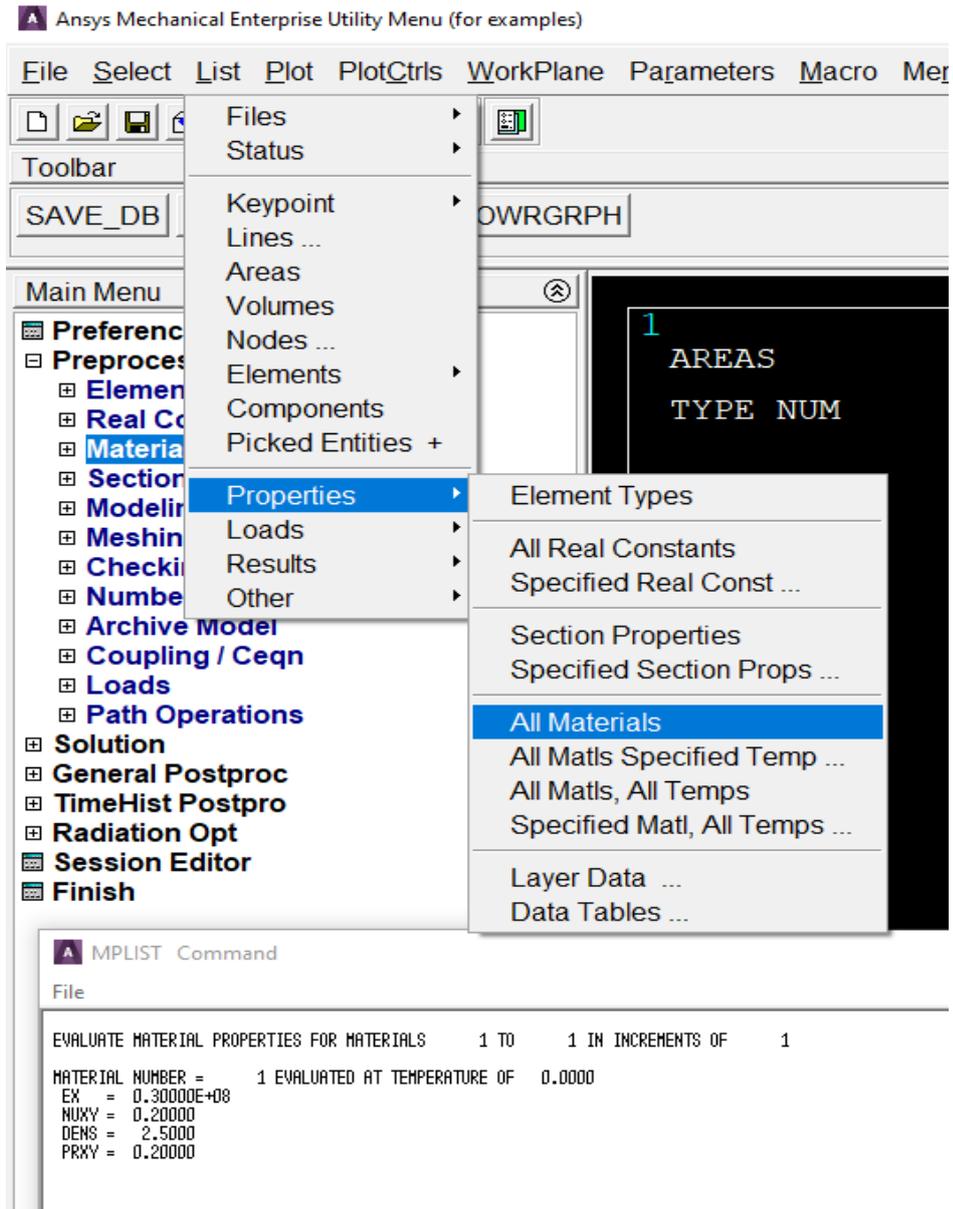


Рис.55. Просмотр заданных материалов

Чтобы посмотреть сечения элементов необходимо в *Main menu* выбрать *Preprocessor > Sections > List Sections* в появившемся окне (*List Summary of Section Properties*) в первом выпадающем списке выбрать сечение с 1 номером, в следующем с наибольшим номером. В следующих окнах выставить значения согласно рисунку:

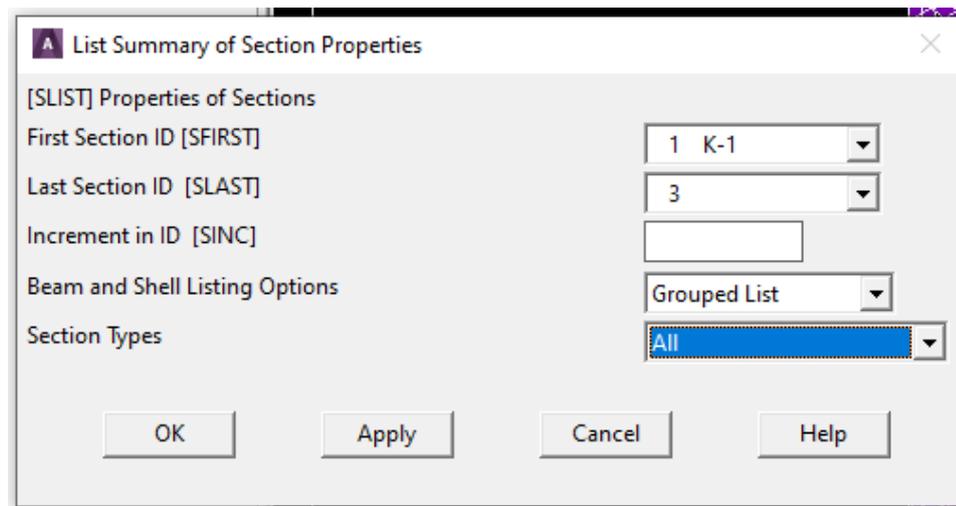


Рис.56. Просмотр заданных сечений

И нажать *OK*, тогда откроется окно-список всех сечений конечных элементов. Можно посмотреть их номера, характеристики, к каким типам элементов они принадлежат.

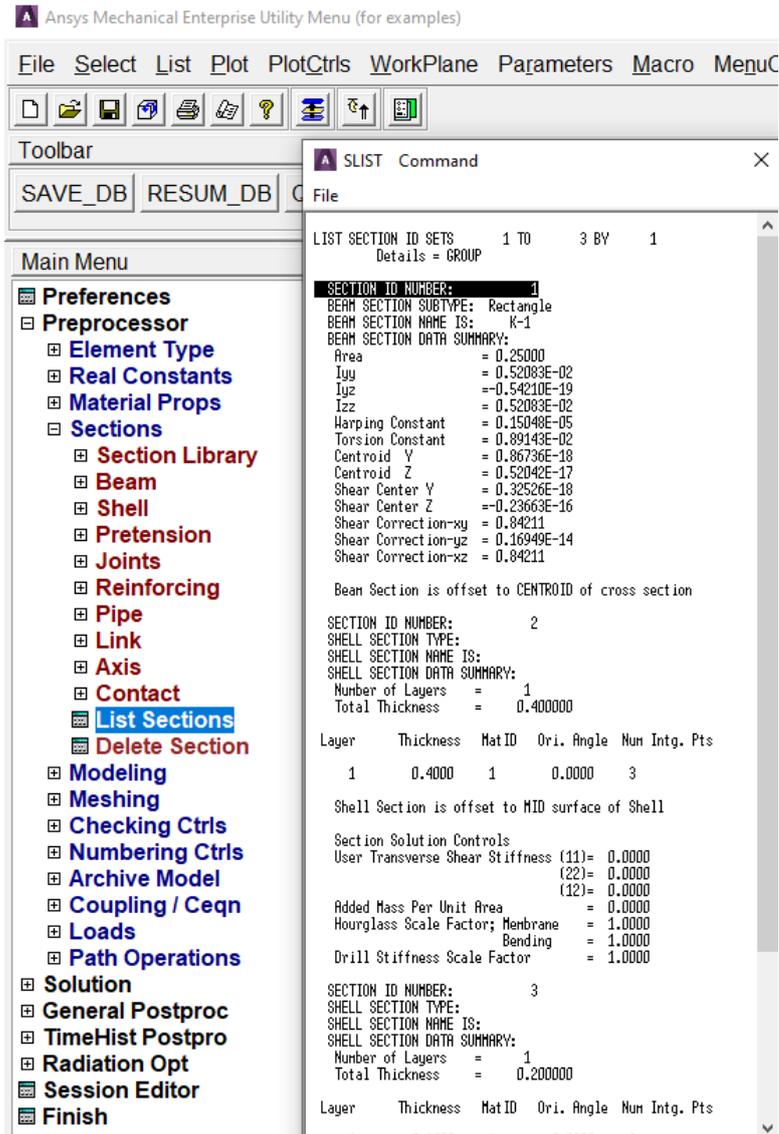


Рис.57. Просмотр заданных сечений

После проверки всех типов, сечений и материалов, можно переходить в решатель.

16. Запуск готовых макросов

Для того, чтобы запустить готовый макрос, написанный в текстовом редакторе, необходимо в командную строку *Command Prompt*, расположенную сверху под *Utility menu* или открыто в отдельном окне, вписать название макроса и нажать *Ввод* на клавиатуре. Текстовый файл макроса должен иметь расширение *.MAC*. Вписывать расширение в

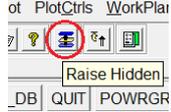
командную строку не обязательно. В случае, если найти командную строку не удастся, необходимо нажать *Raise Hidden* , это сделает снова видимыми все открытые окна.



Рис.58. Запуск макроса

Тогда ANSYS последовательно выполняет каждый шаг текстового файла. Всё, что находится за *!* в тексте макроса ANSYS не читает, это пользовательские комментарии. Также считывание макроса заканчивается, если ANSYS встречает в тексте */EOF*.

Для решения данной задачи необходим следующий код.

<code>/SOLU</code>	!переход в решатель
<code>ANTYPE,STATIC</code>	!выбор статического расчета
<code>nlgeom,on</code>	!учитываем нелинейность
<code>nropt,full</code>	
<code>! 1-й этаж</code>	
<code>alls</code>	
<code>ealive,all</code>	!включаем все этажи
<code>cmsel,s,s1</code>	!выбираем элементы, принадлежащие первому этажу
<code>nsle</code>	!выбираем узлы, принадлежащие этим элементам
<code>esel,inve \$ ekill,all</code>	!выбираем элементы, не принадлежащие узлам
	! и “убиваем” их
<code>nsel,inve \$ d,all,all</code>	!выбираем узлы, принадлежащие “убитым” элементам
	!и закрепляем их по всем степеням свободы
<code>esel,s,sect,,3</code>	!выбираем перекрытие

sfe,all,,pres,,1.5*9.81	!задаём на него нагрузку в кН
alls	!выбираем все живые элементы
TIME,1	!1-ый шаг расчета
NSUBST,1,10000,1	!макс. и мин. количество итераций
SOLVE	!запуск решателя
*do,i,2,11	!цикл, в котором включаем следующий этаж,
cmsel,s,s%i%	
nsle \$ ddelete,all,all	!удаляем закрепление его узлов,
ealive,all	
esel,s,sect,,3	
sfe,all,,pres,,15	!задаём нагрузку на перекрытие,
alls	
TIME,i	!устанавливаем шаг и количество итераций,расчет
NSUBST,1,10000,1	
SOLVE	!запускаем
*enddo	
TIME,12	!последний этап
sfcum,pres,add	!включаем возможность складывать нагрузки,
esel,s,sect,,3	!действующие на элементы
sfe,all,,pres,,1.0*9.81	!задаём нагрузку на все перекрытия
alls	
NSUBST,1,10000,1	
SOLVE	!решаем
finish	!выходим из решателя и завершаем работу

17. Просмотр результатов нелинейного статического расчета

В данной задаче самым интересным для нас будет сравнение перемещений по оси OY и сравнение продольных усилий в колоннах. Начнём с поэтапного возведения. ANSYS сохранил все результаты полученные по каждому шагу псевдо-времени, потому мы можем выбрать любой этап и посмотреть усилия, перемещения и тд. Нас интересует последний этап. Чтобы включить результаты 12-го этапа необходимо перейти в постпроцессор: *Main Menu > General Postproc > Read results > By Pick*. Откроется окно, в котором необходимо кликнуть на последний, 12-ый, этап и нажать *Read* и *Close*.

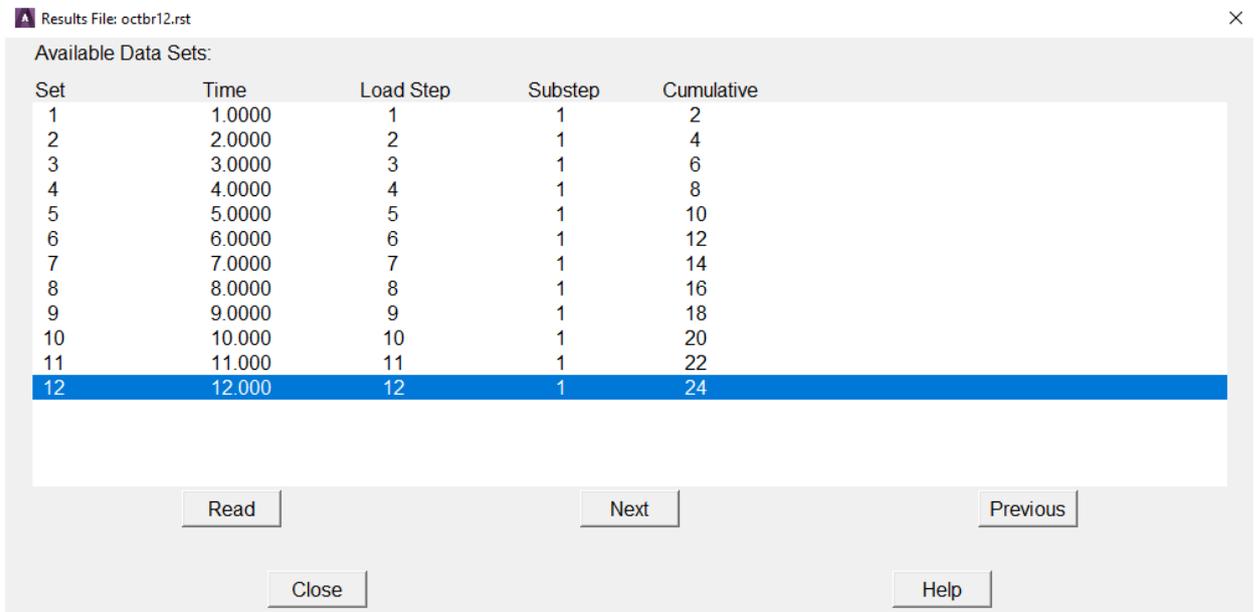


Рис.59. Выбор стадии монтажа для вывода результатов

ANSYS переключился на 12 этап. Теперь для просмотра перемещений и эпюр продольных усилий необходимо перейти в *Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu*. Откроется окошко, в котором необходимо в папке *Nodal Solution* выбрать *DOF Solution > Y-Component of displacement*. Внизу, в выпадающем списке, выбрать *Auto Calculated* и нажать *OK*.

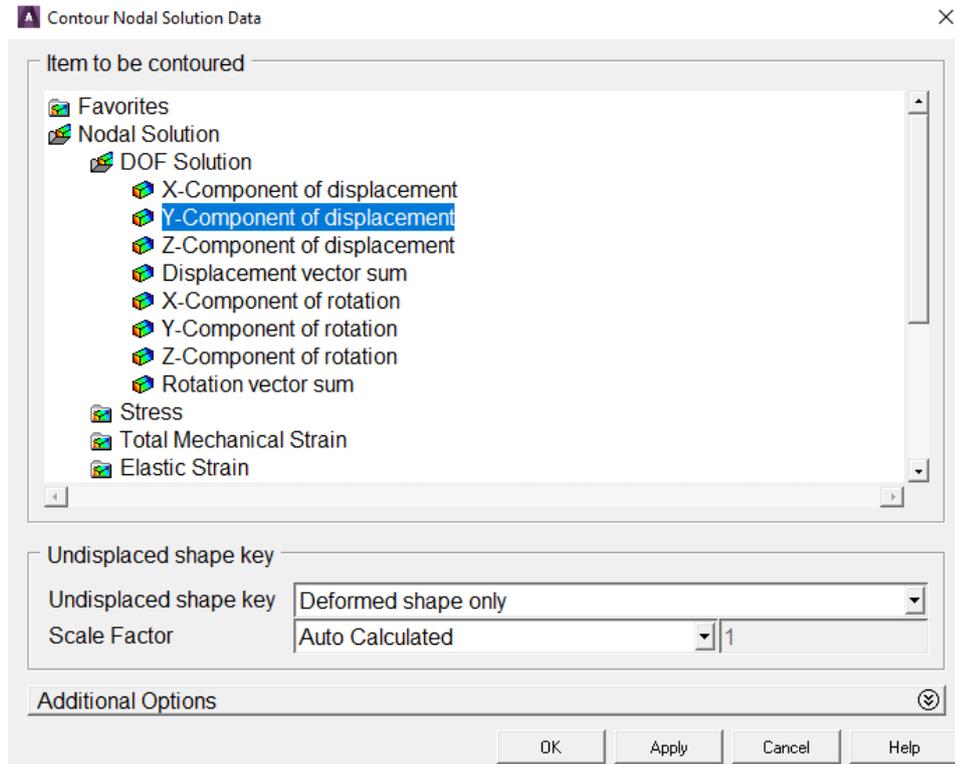


Рис.60. Вывод вертикальных перемещений

Получилась деформированная схема с изополями перемещений. Внизу шкала перемещений по OY.

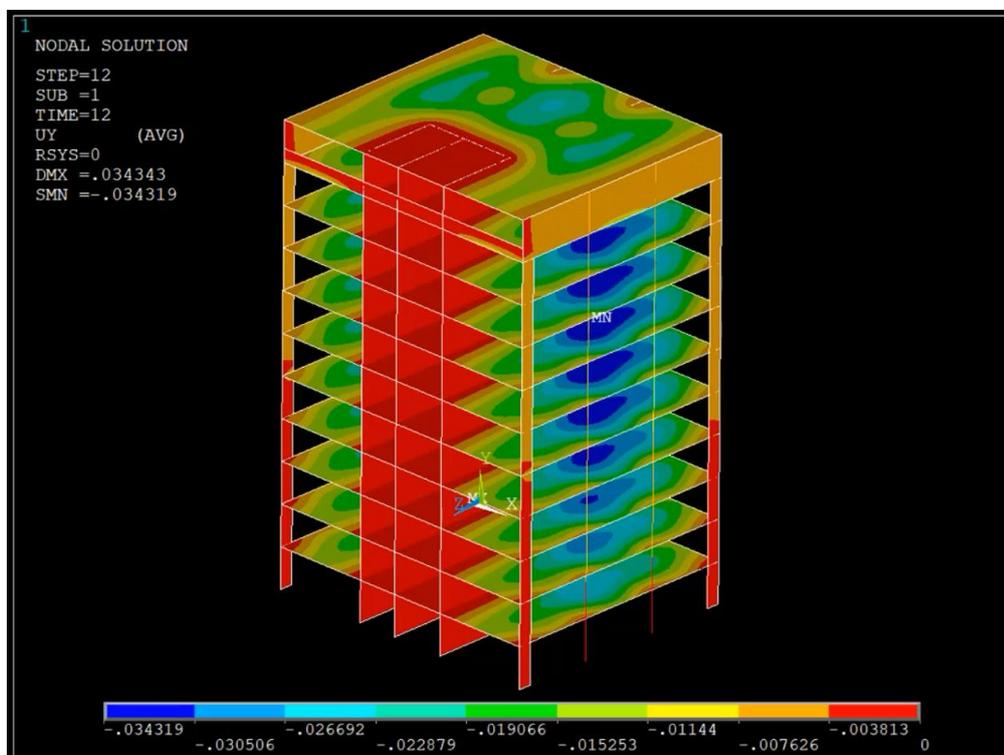


Рис.61. Изополя вертикальных перемещений на деформированной схеме

Для того, чтобы отобразить эпюры усилий, сначала нужно оставить на экране только колонны. Необходимо в *Utility Menu* перейти *Select > Entities*, в открывшемся меню в первом выпадающем списке выбрать *Elements*, в следующем *By Attributes* и выбрать *Section ID num*, в нижнем окошке напишите “1” - сечение под этим номером принадлежит колоннам. И подтвердите, нажав *OK*. Если колонны не отображаются, пропишите команду *eplo* в командную строку.

Для построения эпюр в колоннах необходимо построить специальную таблицу *Element Table*. Переходим в *Main Menu > General Postproc > Element Table > Define Table > Add...* Откроется окно, в котором нужно заполнить второе окно - это название эпюры, у нас эпюра продольных сил N. Из списка выбрать *By sequence num*, из правого списка выбрать *SMISC*, и в окно ниже дописать “1”. Это номер, который соотнесен с продольной силой для КЭ *Beam188*, подробнее можно прочесть в *HELP в Element library*.

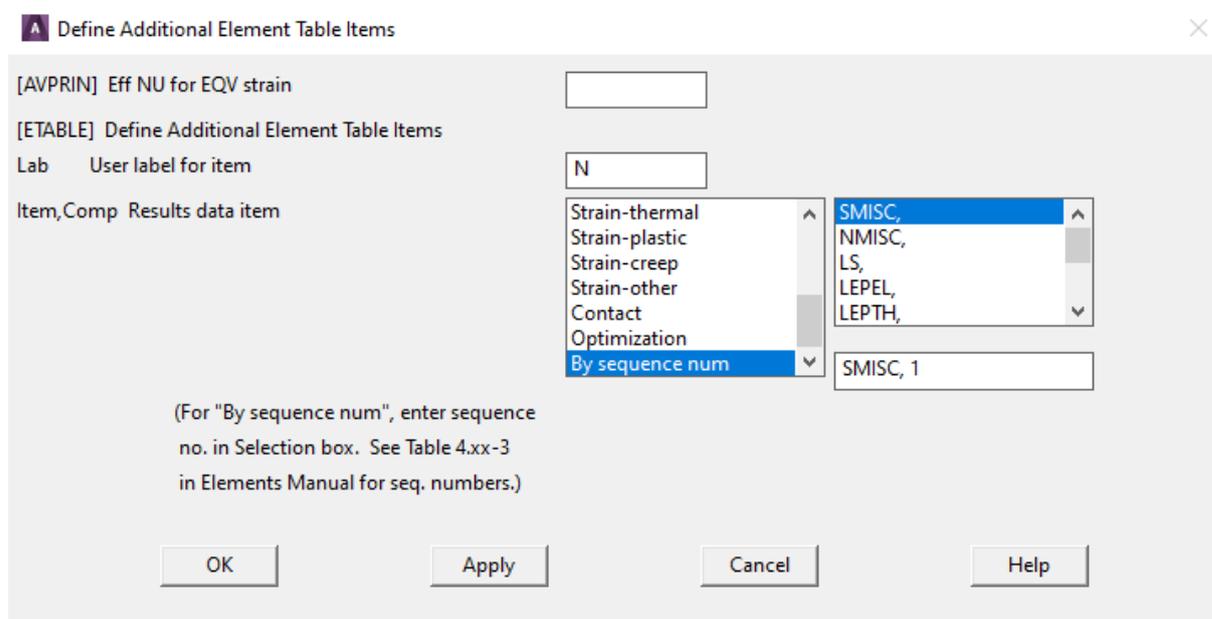


Рис.62. Создание элементных таблиц. Шаг 1

Подтвердите нажатием *OK*. Окно закроется и только что созданный элемент появится в таблице. Точно также нужно сделать со вторым элементом таблицы.

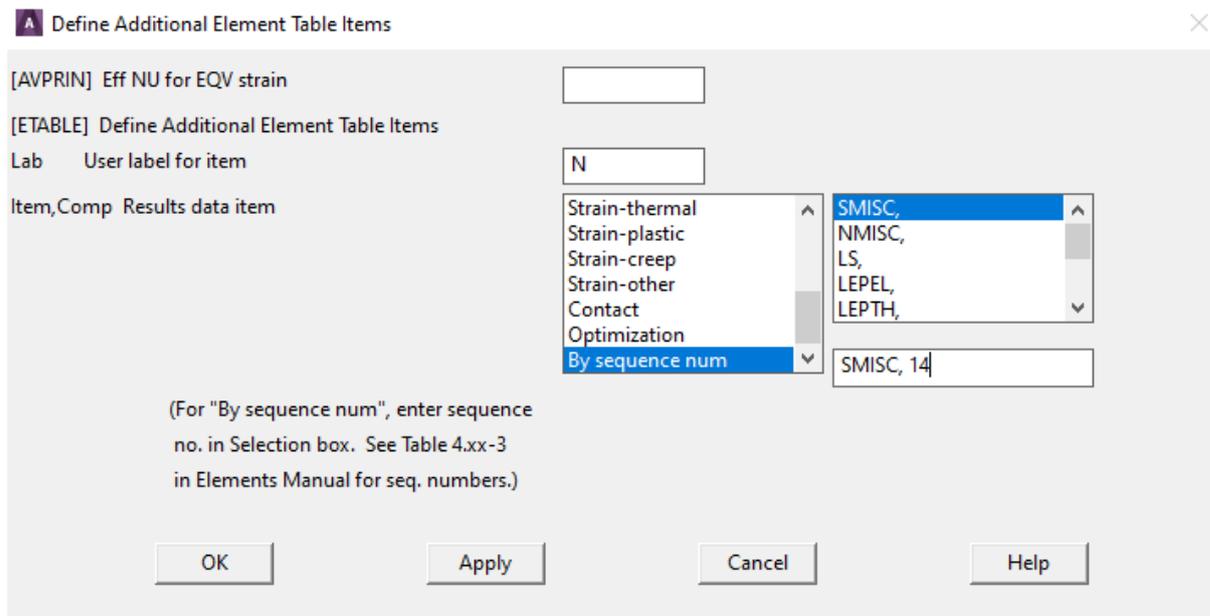


Рис.63. Создание элементных таблиц. Шаг 2

Эти элементы появятся в списке. Теперь можно закрывать это окно.



Рис.64. Просмотр созданных элементных таблиц

Теперь можно рисовать эпюру. Переходим *Main Menu > General Postproc > Plot results > Contour Plot > Line Elem Res*. Выбираем две только что созданные таблицы по названию, остальное оставляем как есть. И нажимаем *OK*.

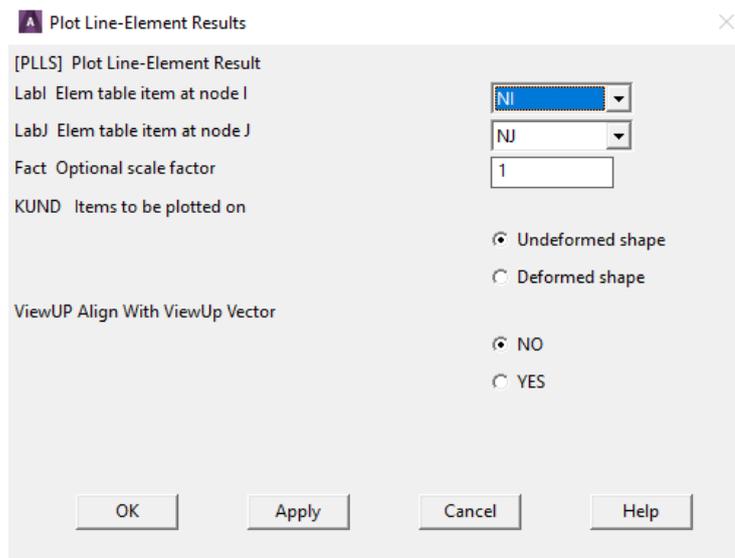


Рис.65. Построение эпюры продольных сил с использованием созданных элементных таблиц

Получаем эпюру продольных усилий в колоннах. Наибольшие сжимающие усилия находятся в центральных колоннах нижнего этажа.

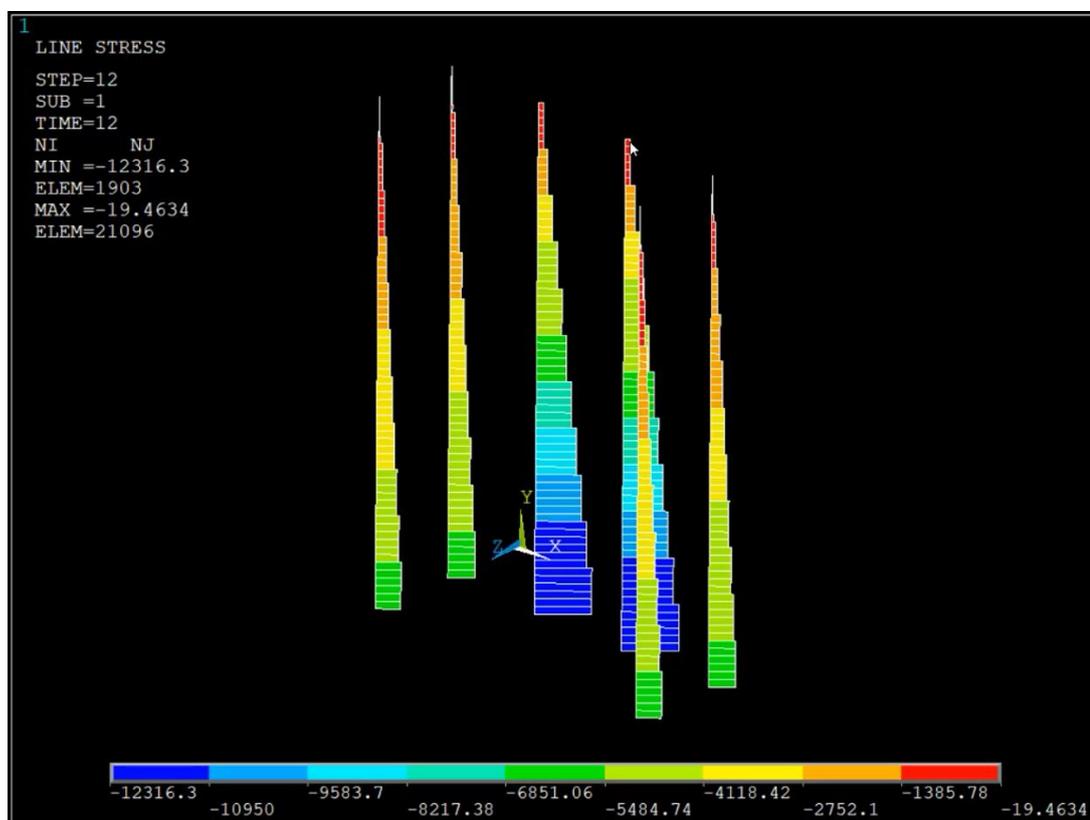


Рис.66. Эпюры продольных сил

18. Просмотр результатов линейного статического расчёта

Для просмотра результатов линейного расчёта не нужно включать определённый этап расчёта, то есть после получения окна *Solution Done* можно сразу переходить в *Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu* для просмотра перемещений по вертикальной оси. Получим следующие перемещения.

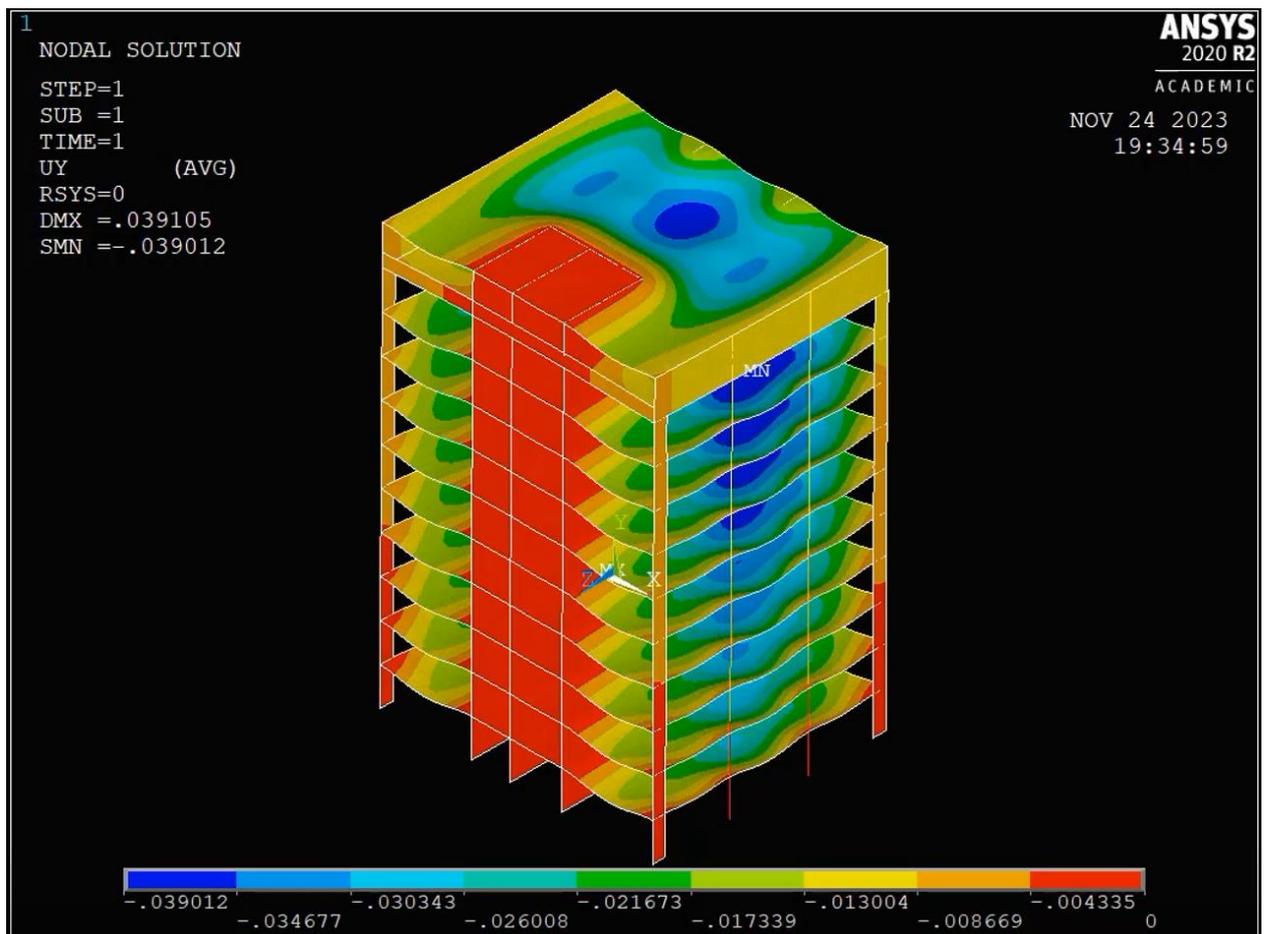


Рис.67. Изополя вертикальных перемещений на деформированной схеме

Построить эпюры нужно по способу, описанному для поэтапного расчёта. Получим следующие результаты:

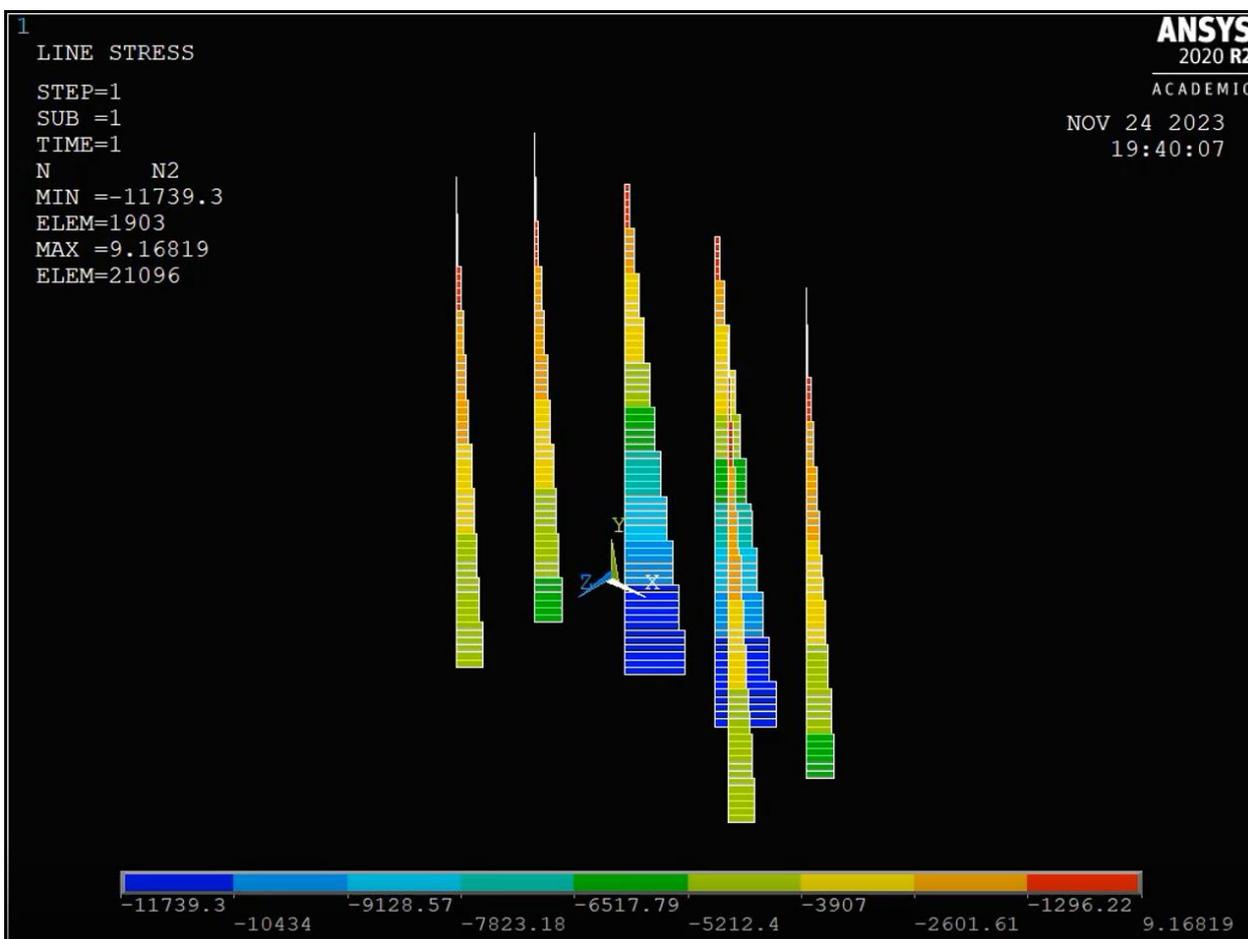


Рис.68. Эпюры продольных сил

19.Сопоставление результатов расчетов

	Одномоментная схема	Поэтапное возведение (монтаж)	δ , %
Продольные усилия N max, кН	9.2	-19.7	-
Продольные усилия N min, кН	-11739.3	-12316.3	4,7
Перемещение Uy max, мм	-39,0	-34,3	12,1

Таким образом при расчете без учёта генетической нелинейности в колоннах верхнего этажа появляются растягивающие усилия, чего на самом деле не происходит. Расчет с учётом поэтапности возведения же показывает более физичные и соответствующие реальности результаты.