

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический  
университет»

Кафедра «Ракетные двигатели»

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

для выполнения лабораторных работ по дисциплине  
«Динамика и прочность ракетных двигателей»  
для студентов специальности 160700.65, 24.05.02  
«Проектирование авиационных и  
ракетных двигателей» очной формы обучения

Воронеж 2015

Составители: д-р техн. наук Ю.В. Демьяненко  
канд. техн. наук А.А. Гуртовой  
д-р техн. наук А.В. Кретинин  
канд. физ.-мат. наук А.М. Сушков

УДК 621.4

Методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Динамика и прочность ракетных двигателей» для студентов специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; Сост.: Ю.В. Демьяненко, А.А. Гуртовой, А.В. Кретинин, А.М. Сушков. Воронеж, 2015. 31 с.

В методических указаниях для выполнения лабораторных работ содержатся подробные пошаговые инструкции по расчету напряженно-деформированного состояния тривиальных конструкций с использованием программного комплекса Ansys. Выполнение данных лабораторных работ позволит приобрести базовые навыки расчетов на прочность с помощью Ansys.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Г.И. Скоморохов  
Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук,  
проф. В.С. Рачук.

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский  
государственный технический  
университет», 2015

## **ВВЕДЕНИЕ**

В лабораторной работе № 1 содержатся основные сведения о типах элементов, используемых в программе ANSYS, рассмотрены два метода построения конечно-элементной модели, приведены примеры создания произвольной и упорядоченной конечно-элементной сетки. В методических указаниях приведены иллюстрации к примерам построения произвольной и упорядоченной сеток, также приведен пример оценки качества построенной конечно-элементной сетки.

В лабораторной работе № 2 содержатся основные подходы к расчету напряженно-деформированного состояния пластины в программе конечно-элементного анализа ANSYS, рассмотрен пример расчета плоской пластины с отверстием, которое нагружено через жесткую вставку давлением, распределенным линейно по контуру нижней половины отверстия.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

В ANSYS имеется более 200 различных типов элементов. Как правило, в различных вариантах программы доступны не все виды элементов. Это зависит от того, какие виды расчета могут использоваться в данном варианте программы. Каждый тип элементов использует значения свойств материала, а также заданные вещественные константы.

Существует два метода создания конечно-элементной модели: сплошное моделирование и прямая генерация. При сплошном моделировании сначала моделируется геометрический вид модели, затем данную геометрическую модель можно разбить на элементы (таким образом, накладывается конечно-элементная сетка). В этом случае проектировщик имеет возможность контролировать размер и форму создаваемых программой элементов. В случае прямой генерации «вручную» определяется расположение каждого узла и связь каждого элемента. При такой генерации доступно копирование существующих узлов и элементов, симметричное отражение и так далее.

Средства управления построением сетки, используемые программой ANSYS по умолчанию, могут дать сетку, вполне адекватную для анализируемой модели. В этом случае нет необходимости задавать такие средства явным образом. Однако если такие средства предполагается использовать, их следует определить до построения сетки.

Средства управления дают возможность устанавливать форму конечных элементов, расположение срединных узлов и размеров элементов при построении сетки конечных элементов на твердотельной модели. Этот этап является одним из наиболее важных для всего

выполняемого анализа, поскольку принимаемые на этой стадии решения могут существенным образом сказаться на точности результатов и затратах на проведение расчета. Перед разбиением модели важно определить, какое разбиение соответствует предстоящему анализу: свободное или упорядоченное, см. рис. 1.

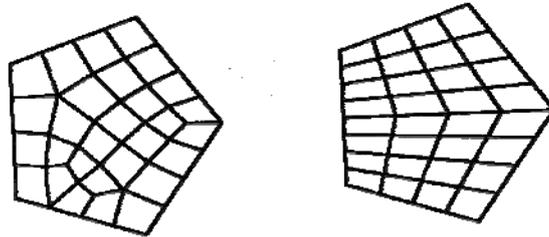


Рис. 1. Примеры произвольного и упорядоченного разбиений

Упорядоченная сетка, в отличие от произвольной сетки, накладывает ограничения на форму элементов и структуру их размещения. Такая сетка состоит только из четырехугольных (плоских) или только шестигранных (объемных) элементов. Кроме того, упорядоченная сетка имеет, как правило, регулярную структуру с явными рядами элементов. Если желательно получить именно такой тип сетки, то пользователь должен строить геометрическую модель как совокупность достаточно правильных объемов и/или поверхностей, для которых приемлема упорядоченная сетка элементов.

При построении сетки (особенно при генерации произвольной сетки), могут обнаружиться, так называемые вырожденные элементы, которые изменили свою форму путем слияния двух или более узлов. Например, 4-узловой элемент в результате создания конечно-элементной сетки может превратиться в 2-х или 3-узловой. Обычно плохая форма конечных элементов приводит к плохим численным результатам. По этой

причине программа ANSYS выполняет проверку формы элементов (по величине отношения сторон, угла формы и угла конусности) для выдачи предупреждения о том, появятся ли построении сетки элементы с плохой формой. К сожалению, не существует универсального критерия, который можно использовать для идентификации элементов с плохой формой. Другими словами, форма элемента, приводящая к неудовлетворительным результатам для одного вида анализа, может дать превосходные результаты для другого. Итак, пользователь должен отдавать себе отчет в том, что в программе ANSYS для выявления элементов с плохой формой применяется достаточно произвольные критерии. Факт выдачи предупреждения о наличии плохих элементов не обязательно означает, что такие элементы действительно присутствуют в модели. Для проверки формы элементов уже существующей сетки (как построенной программой ANSYS, так и импортированной из CAD-программ) используется команда **Main Menu > Preprocessor > Meshing > Check Elems.**

Наиболее удобным средством построения сетки является применение панели **MeshTool**, которая является диалоговым окном, в котором имеются основные инструменты, необходимые для построения конечно-элементной сетки, см. рис. 2.

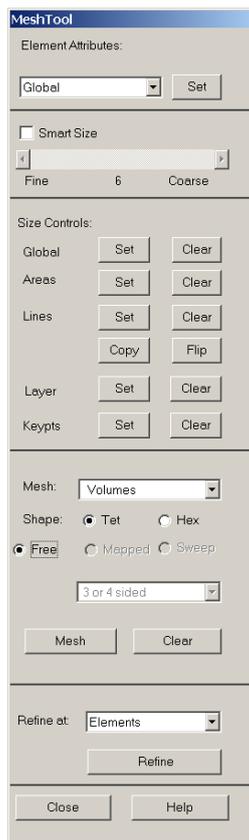


Рис. 2. Инструмент для создания конечно-элементной сетки *MeshTool*

Функции доступные через *MeshTool*, включают:

1. Управление уровнями *SmartSizing*. С помощью программного средства разумного выбора размеров конечных элемента (*SmartSizing*) выбираются исходные значения для операций построения произвольной сетки. Это средство дает сеточному генератору наилучшие возможности построить элементы приемлемых размеров. Оно обеспечивает построение как грубой, так и мелкой сетки для элементов h- и p-методов.

2. Управление размерами элементов **Size Controls**. Этот уровень позволяет установить или очистить заданный размер элемента. Кнопка **Set** вызывает окно для задания размеров соответствующих активных компонентов модели. Кнопка **Clear** удаляет установленные размеры элементов.
3. Определение формы элемента **Shape**. Она может быть в виде тетраэдра **Tet** или гексаэдра **Hex**.
4. Определение типа разбиений (свободный или упорядоченный). **Free** – соответствует произвольному автоматическому разбиению модели, **Mapped** – соответствует упорядоченной разбивке, **Sweep** – протягивание сетки вдоль всего объема разбиваемого тела.
5. Разбиение компонентов твердотельной модели (кнопка **Mesh**).
6. Очистка разбиения (кнопка **Clear**).
7. Уточнение сетки (кнопка **Refine**).

### 3. Задание

Научиться генерировать упорядоченные и произвольные сетки с помощью встроенного генератора сеток.

### 4. Методические указания по выполнению задания

#### 4.1. Построение произвольной конечно-элементной сетки

Построим пластину вида, см. рис. 3.

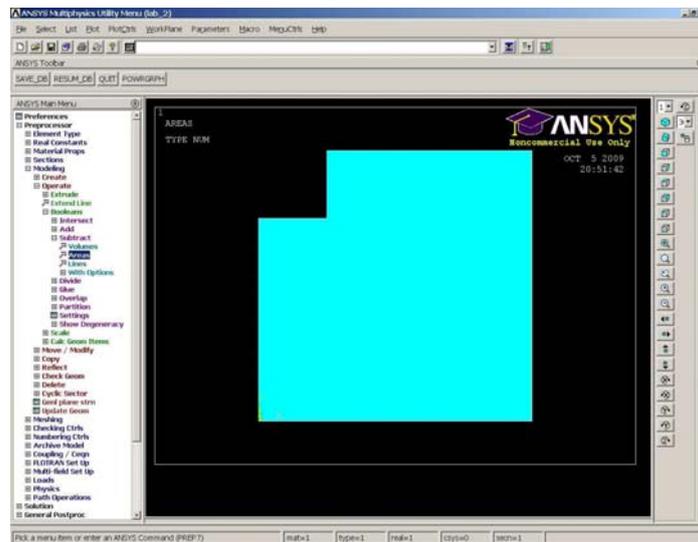


Рис. 3. Модель пластины

- Для этого построим квадрат, используя команду **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By Dimensions**. В появившемся диалоговом окне зададим координаты квадрата  $X1 = 0$ ,  $Y1 = 0$ ,  $X2 = 2$ ,  $Y2 = 2$ .
- Далее создадим маленький квадрат сверху с размерами  $X1 = 0$ ,  $Y1 = 1,5$ ,  $X2 = 0,5$ ,  $Y2 = 2$ .
- Вычтем из большого квадрата маленький квадрат **Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Areas**.
- Пронумеруем площади. Чтобы площади были видны, необходимо выполнить команду **Utility Menu > PlotCtrls > Numbering**. В открывшемся окне напротив **Area Numbers** поставим галочку **ON**, а затем прорисуем площади **Utility Menu >**

***Plot > Areas.***

- Зададим тип элемента, с помощью которого будет генерироваться сетка. Пусть это будет элемент ***Plane 42***. Для выбора этого элемента выполним ***Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete***. Нажимаем кнопку ***Add*** для того, чтобы добавить элемент, а затем из предложенного списка выбираем элемент ***Plane 42: Structural Solid Quad 4 node 42***, см. рис. 4.

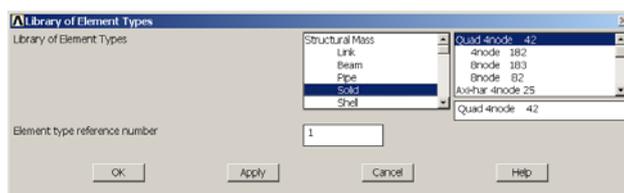


Рис. 4. Выбор типа элемента

- Для того чтобы построить произвольную сетку откроем ***Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free***.
- Укажем мышкой плоскость пластины, на которую требуется нанести сетку и нажмем ***Ok***. Получим сетку как показано, на рис. 5.

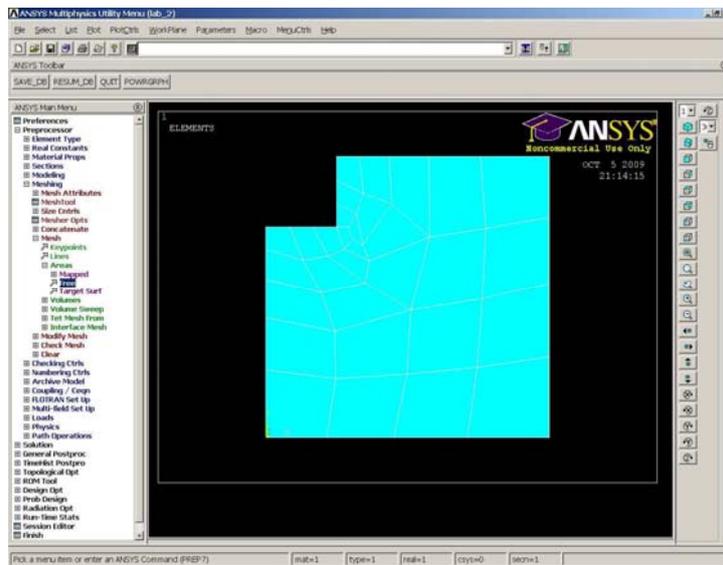


Рис. 5. Произвольная сетка

- Для проверки качества сетки воспользуемся командой **Main Menu > Preprocessor > Meshing > Check Mesh > Individual Elm > Plot Warning / Error Elements**. При этом появится окно, сообщающее о цветовой гамме некачественно созданных элементов, см. рис. 6.

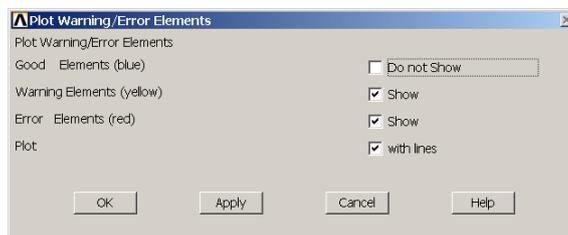


Рис. 6. Окно задания свойств изображения ошибочных и неправильных элементов.

В нашем случае элементы с ошибками будут показываться красным цветом, а некачественные элементы будут иметь желтый цвет.

- Таким образом, используя произвольную сетку, мы получили один некачественный элемент, см. рис. 7.

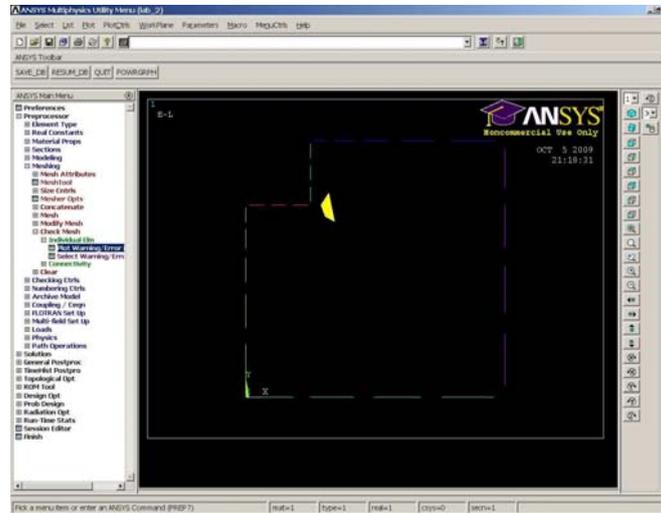


Рис. 7. Оценка качества созданной сетки

Таким образом, произвольная сетка не всегда гарантирует хорошую форму элементов сетки. Построим для этой же пластины упорядоченную сетку.

#### 4.2. Построение упорядоченной конечно-элементной сетки

- Для построения упорядоченной сетки удобно пользоваться инструментом *MeshTool*.
- Зададим число разбиений на элементы по линиям,

образующим стороны пластины. Для этого выполним *Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool*. Выбираем кнопку *Lines Set*. Открывается меню *Element Sizes on Picked Lines*. Выделяем с помощью мыши 2 линии образующие верхнюю и боковую части пластины рядом с вырезом, нажимаем *Ok*. При этом появляется окно, см. рис. 8, в котором необходимо задать количество разбиений линии на элементы. Пусть на каждой из выбранных линий будет по 6 элементов.

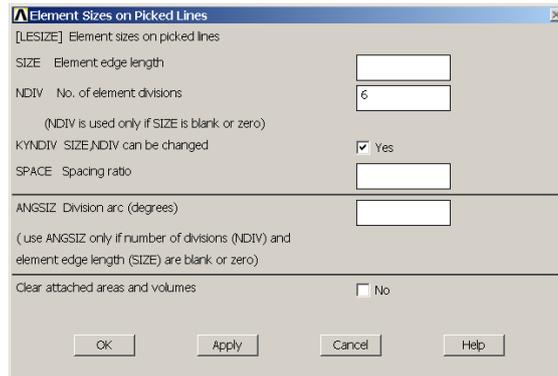


Рис. 8. Окно для задания размеров элементов на выбранных линиях

- Правильную сетку можно построить только на четырехугольных областях. В нашем же случае область является шестиугольной. Поэтому для построения правильной сетки нам придется «сшить» несколько линий.
- «Сошьем» линии, образующие прямой угол в местах, где был вырезан маленький квадрат и напротив. Для этого воспользуемся командой *Main*

**Menu > Preprocessor > Meshing > Concatenate > Lines.** С помощью мыши выделяем первую пару линий, **Apply**, а затем выделяем также и вторую пару сшиваемых линий. Нажимаем **Ok**.

- Для построения правильной сетки в инструменте **MeshTool** выбираем, что элементы будут четырехугольными – **QUAD**. Сетка правильная – **Mapped**. Далее нажимаем кнопку **Mesh** и выделяем область мышкой, **Ok**. Получим сетку правильную сетку, см. рис. 9.

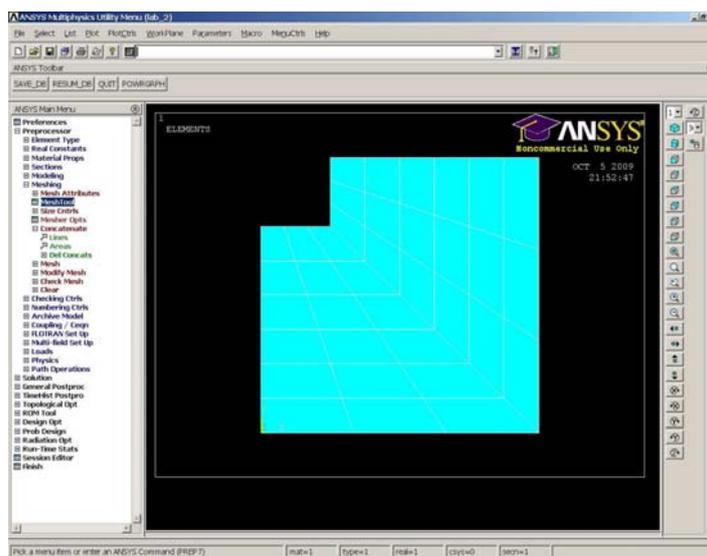


Рис. 9. Упорядоченная сетка

Таким образом, мы видим, что упорядоченные сетки требуют большей затраты времени пользователем, но вместе с тем позволяют пользователю управлять количеством узлов и элементов, что в свою очередь приводит к созданию элементов правильной формы, что в итоге повышает точность решения задачи.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Статический анализ используется для определения перемещений, напряжений, деформаций и усилий, возникающих в конструкции или ее составных частях при действии нагрузок, не сопровождающихся процессами рассеяния энергии или появлением существенных инерционных эффектов. Нагрузки включают внешние силы и давление, инерционные и центробежные силы, заданные (ненулевые) перемещения, температуры (для учета температурных деформаций) и потоки (для расчета распухания материала).

Статический анализ может быть линейным или нелинейным. Разрешены все типы нелинейностей: большие деформации, пластичность, ползучесть, наличие элементов зазора, гиперупругость и т.д.

Для линейного статического анализа с использованием объемных или оболочечных элементов можно получить величину ошибки расчета, обусловленную сеточной дискретизацией. Области с неприемлемо высокими значениями ошибки являются претендентами на измельчение сетки.

Практически все полученные результаты (напряжения, деформации, перемещения и т.д.) можно вывести в виде изолиний, векторов и в табличной форме.

### Задание

Определить напряженно-деформированное состояние пластины с отверстием, показанной на рис. 10. Отверстие нагружено через жесткую вставку давлением, распределенным линейно по контуру нижней половины отверстия. Начало глобальной системы прямоугольных координат помещено в центр верхнего левого отверстия.

Допущение: рассматривается плосконапряженное состояние (уголок тонкий), напряжение  $\sigma_z = 0$ .

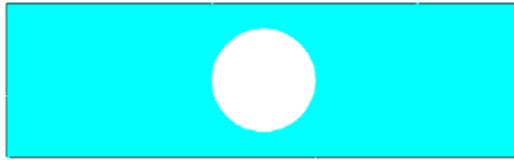


Рис. 10. Пластина с отверстием

**Исходные данные:** Кронштейн изготовлен из листовой 20 мм стали с модулем упругости  $E = 200$  ГПа, коэффициентом Пуассона  $\mu = 0,3$  и пределом текучести  $\sigma_y = 400$  МПа. Геометрические параметры кронштейна показаны на рис. 1. Равнодействующая давления составляет  $p = 150$  кН.

**Методические указания по выполнению задания**

1. Сделаем заголовок решаемой задачи.
- 1.1. Для этого выберем пункт пользовательского меню

**Utility Menu: File → Change title**



Рис. 11. Окно для ввода заголовка задачи

- 1.2. В открывшемся окне введем название заголовка **PLATE STRESSES AND DEFLECTIONS**, как показано на рис. 10.
- 1.3. Нажимаем **OK**.
2. Выберем структурный тип анализа.
- 2.1. Для этого раскрываем главное меню **Main Menu: Preferences**.

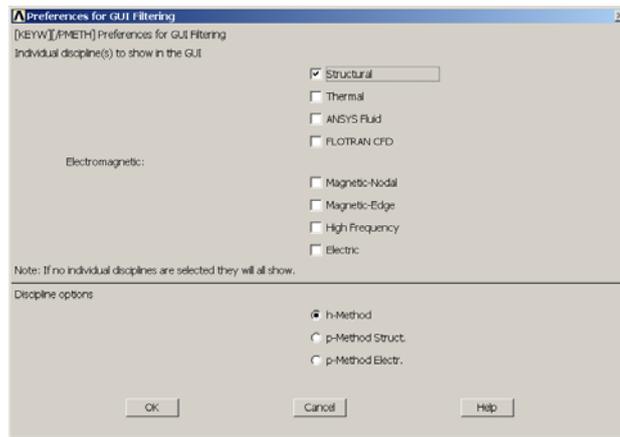


Рис. 12. Окно для выбора типа анализа

- 2.2. В открывшемся окне выбираем пункт Structural, как показано на рис. 11.
- 2.3. Нажимаем **OK**.
3. Выбираем тип элемента
  - 3.1. Для этого раскрываем главное меню **Main Menu: Preprocessor** → **Element Type** → **Add/Edit/Delete**

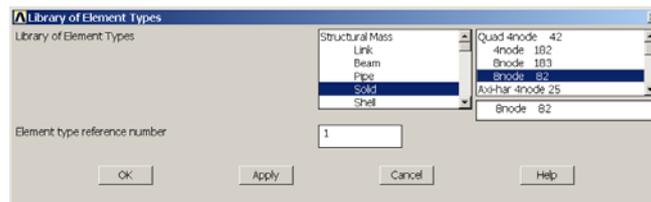


Рис. 13. Окно для выбора типа элемента

- 3.2. В появившемся окне (см. рис. 13) выбираем 8-узловой плоский балочный элемент **PLANE82** из группы Structural Mass. Нажимаем **OK** для завершения выбора элемента.
- 3.3. В окне выбора типа элемента нажимаем кнопку

**Options**, чтобы задать дополнительные параметры, требующие задания толщины элемента и вывода напряжений во всех точках интегрирования, см. рис. 14

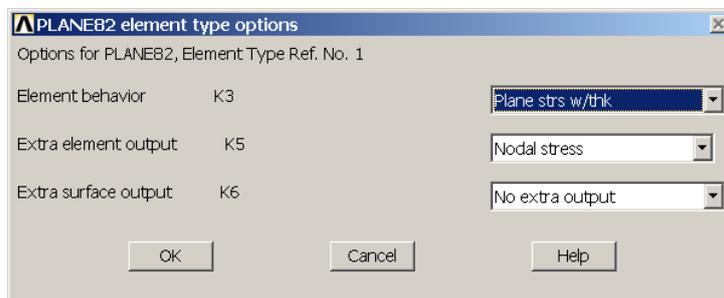


Рис. 14. Окно задания опций элемента

- 3.4. Закрываем окно выбора элемента, для этого нажимаем кнопку **Close**.
4. Зададим толщину пластины.
  - 4.1. Для этого выполним команду **Main Menu: Preprocessor → Real Constants → Add/Edit/Delete**.
  - 4.2. После нажатия кнопки «Добавить» (**Add**), в появившемся окне зададим толщину элемента 20 мм, как это показано на рис. 15



Рис. 15. Окно задания толщины элемента

5. Задаем свойства материала, из которого изготовлена

пластина

- 5.1. Для этого раскрываем главное меню **Main Menu: Preprocessor** → **Material props** → **Material Models**

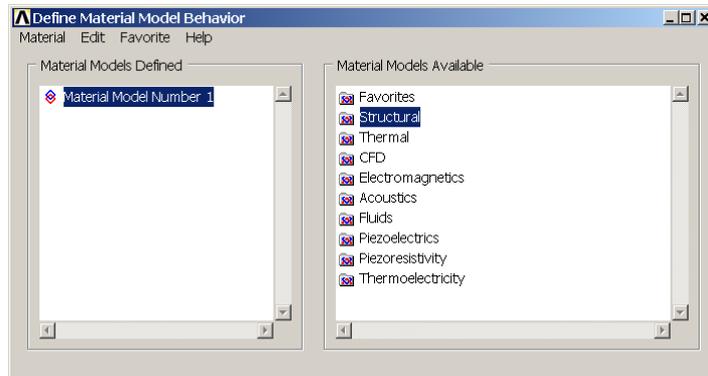


Рис. 16. Окно для выбора материала

- 5.2. В появившемся окне (рис. 16) выбираем тип модели материала как **Structural**
- 5.3. Раскрываем список для данного типа материала и задаем, что материал балки изотропный, упругий и подчиняется линейному закону **Structural** → **Linear** → **Elastic** → **Isotropic**, см. рис. 17

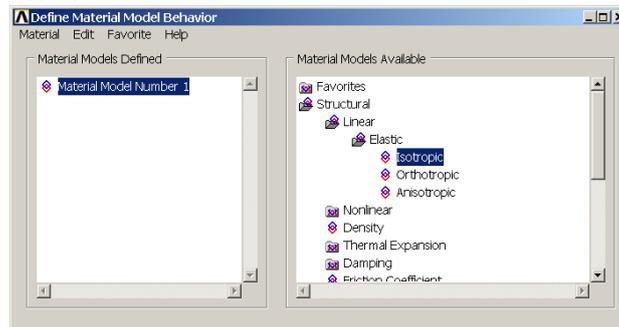


Рис. 17. Окно для выбора материала

- 5.4. Дважды щелкаем на пункт **Isotropic** для того, чтобы появилось окно для задания упругих свойств материала. В появившемся окне в ячейке **EX** вводим значение модуля упругости  $E = 200$  ГПа, а в ячейке **PRXY** вводим значение коэффициента Пуассона показано на рис. 18  $\nu = 0,3$ , как

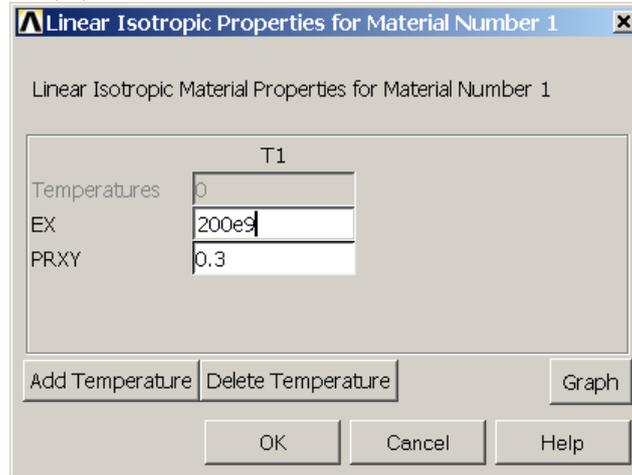


Рис. 18. Окно для задания упругих свойств материала

- 5.5. Нажимаем **OK**.
6. Создаем геометрическую модель пластины с отверстием.
- 6.1. Создадим пластину, у которой левый нижний угол имеет координаты  $X,Y,Z = (0,0,0)$ , а правый верхний угол  $X,Y,Z = (0.5,0.15,0)$ . Для этого раскрываем главное меню и выбираем **Main Menu: Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By 2 Corners**. Зададим геометрию пластины, как показано на рис. 19.

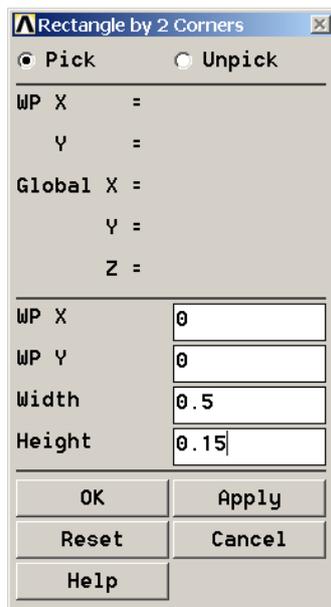


Рис. 19. Окно для задания геометрических параметров пластины

- 6.2. Нажимаем **OK**.
- 6.3. Сделаем отверстие с радиусом  $r = 0,05$  м в центре пластины. Для этого сначала создадим в центре пластины твердотельный круг: **Main Menu: Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Circle > Solid Circle**, см. рис. 20.

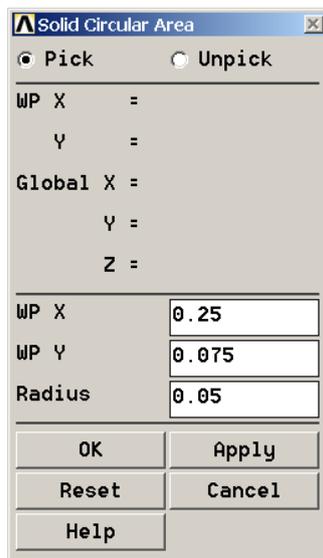


Рис. 20. Окно для задания геометрии круга

- 6.4. Нажимаем **OK**. Чтобы получить отверстие в пластине, вычтем круг из пластины. Для этого в главном меню выбираем **Main Menu: Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Areas**.
7. Разбивка конструкции на элементы.
- 7.1. Создадим сетку с заданным размером элементов. Для этого в главном меню выбираем **Main Menu: Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Areas > All Areas**.
- 7.2. Зададим размер элемента равным 0,05 м, как показано на рис. 21.



Рис. 21. Окно задания размера элемента

7.3. Нажмем **OK**.

7.4. Чтобы разбить пластину на элементы, вызовем инструмент **MeshTool**. Создадим произвольную сетку, для этого выберем тип разбивки **Free** и нажмем кнопку **Mesh**, построим сетку.

7.5. Для улучшения полученной сетки в **MeshTool** нажмем кнопку **Refine**. В итоге получим сетку как показано на рис. 22.

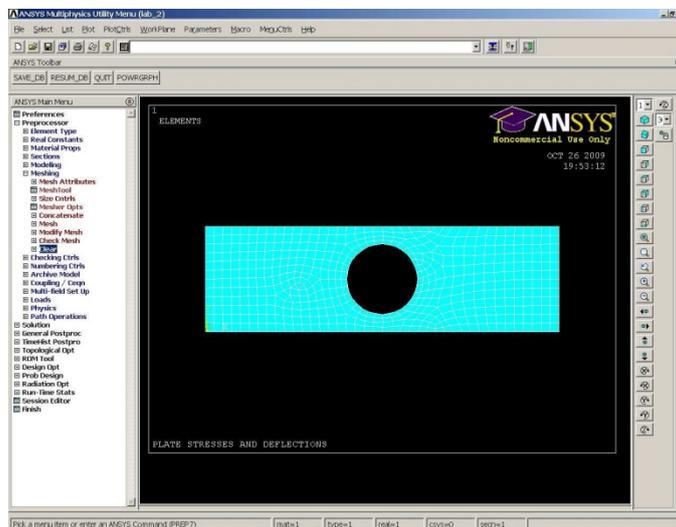


Рис. 22. Конечно-элементная сетка

8. Зададим граничные условия.

8.1.

Ограничим перемещения (*Displacements*) слева и справа. В главном меню выбираем **Main Menu: Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines**.

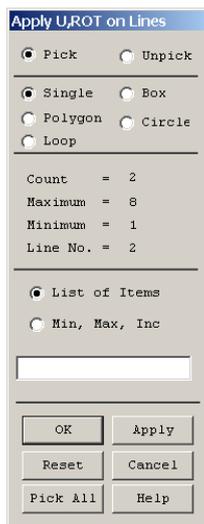


Рис. 23. Окно для выбора линий для задания граничных условий

Выберем с помощью мыши линии справа и слева пластины. После этого появится окно для задания перемещений в выбранных линиях (см. рис. 24). Ограничим перемещения в этих линиях по всем направлениям.

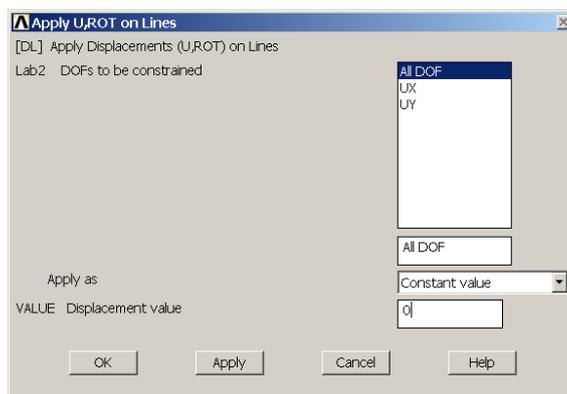


Рис. 24. Окно для задания перемещений

9. Нажимаем **OK**.
10. Зададим нагрузку на отверстие.
- 10.1. В ANSYS контур круглого отверстия образован четырьмя линиями. Приложим давление вдоль двух линий, образующих нижнюю половину отверстия. По условию задачи равнодействующая давления составляет  $p = 150$  кН, поэтому необходимо рассчитать давление в наиболее нагруженной части отверстия по формуле

$$P_{\max} = \frac{pr}{4t}$$

где  $t$  - толщина пластины,  $r$  - радиус отверстия,  $p$  - равнодействующая давления.

- 10.2. Приложим рассчитанную нагрузку на нижнюю часть отверстия. Для этого раскрываем главное меню и выбираем **Main Menu: Solution**  
**> Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Lines.**
- 10.3. Появляется окно для выбора линии, к которой будет приложена равномерно распределенная нагрузка (см. рис. 24).

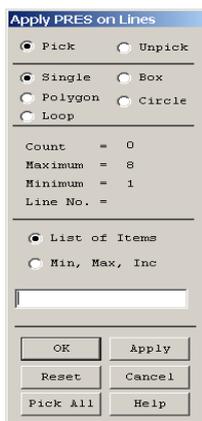


Рис. 25. Окно выбора линии, к которой будет приложена нагрузка

- 10.4. Отметим мышью левую нижнюю часть границы отверстия, *Apply*. В появившееся окно записываем значение равномерно распределенной нагрузки (см. рис. 26)

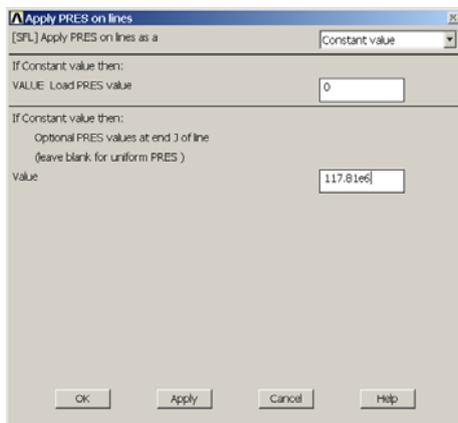


Рис. 26. Окно задания значения нагрузки

- 10.5. Аналогично нагружаем правую нижнюю часть отверстия, см. рис. 27

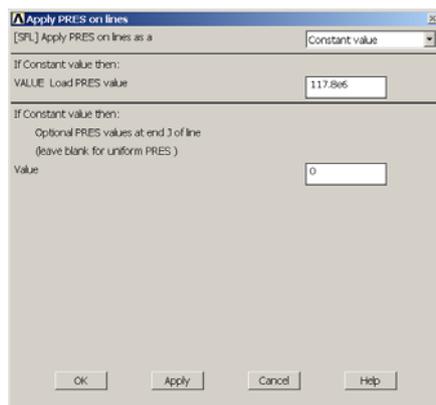


Рис. 27. Окно задания значения нагрузки

10.6. Нажимаем **OK**. В итоге получаем готовую для расчета конечно-элементную модель пластины (см. рис. 28).

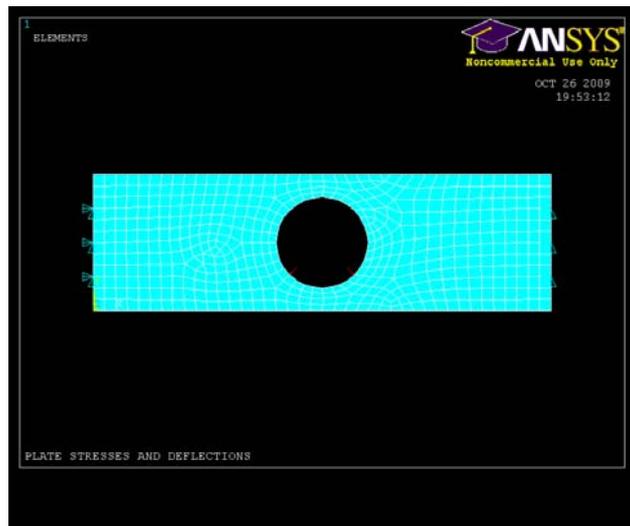


Рис. 28. Вид конечно-элементной модели пластины с отверстием с заданными граничными условиями и нагрузкой

11. Рассчитаем пластину.

11.1. Для этого в главном меню раскрываем список **Main Menu** → **Solution** → **Solve** → **Current LS**.

11.2. Нажать **OK** для запуска программы на счет, предварительно проанализировав сообщение в белом информационном окне.

11.3. **Close** в желтом окне с надписью **Solution is done!** (расчет окончен!).

12. Просмотр деформаций.

12.1. Сначала считываем результаты. Для этого выполним команду

**Main Menu > General Postproc > Read Results > First Set.**

12.2. Прорисовываем результаты вычислений. Для этого выполняем **Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape**. В появившемся окне отмечаем **Deformed + Undeformed**, нажимаем **OK**.

12.3. В результате получим графическое изображение деформированной пластины и её первоначального вида, как на рис. 29.

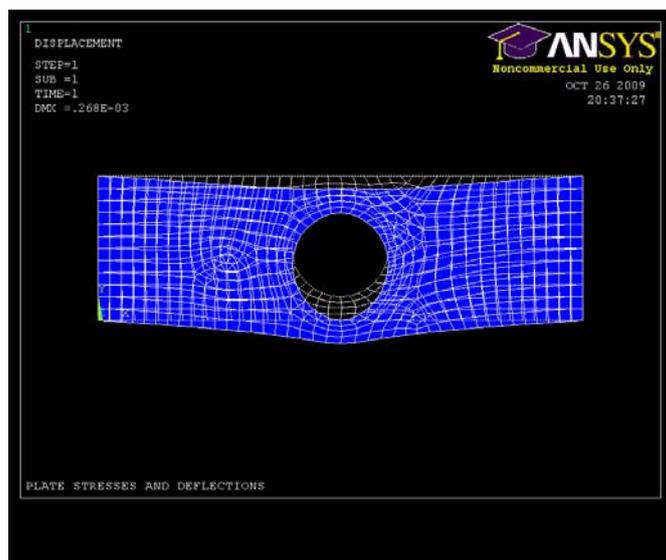


Рис. 29. Деформированная пластина

13. Покажем перемещения пластины.

12.1. Для этого выполним команду **General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solution...** В появившемся окне выберем **Nodal Solution > DOF Solution > Displacement vector sum**, как показано на рис. 30

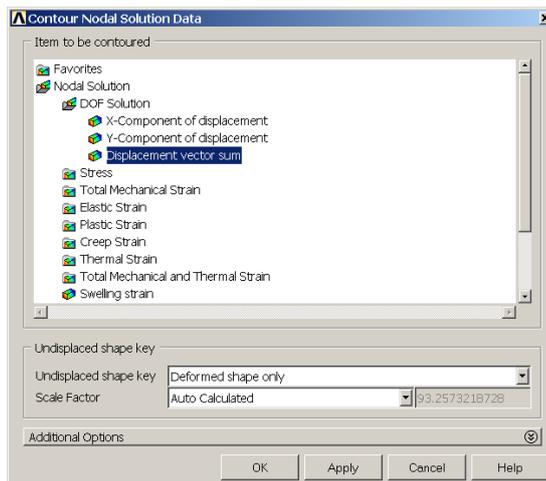


Рис. 30. Окно выбора результатов расчетов

12.2. Нажимаем **ОК**.

12.3. Получим графическое изображение перемещений пластины, см. рис. 31

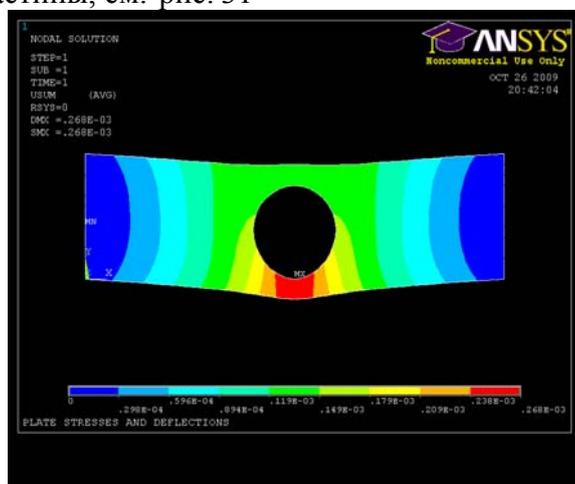


Рис. 31. Перемещения пластины Найдем напряжения в пластине по Мизесу.

- 13.1. Для этого выполним команду *General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solution...* В появившемся окне выберем *Nodal Solution > Stress > von Mises stress*, как показано на рис. 32

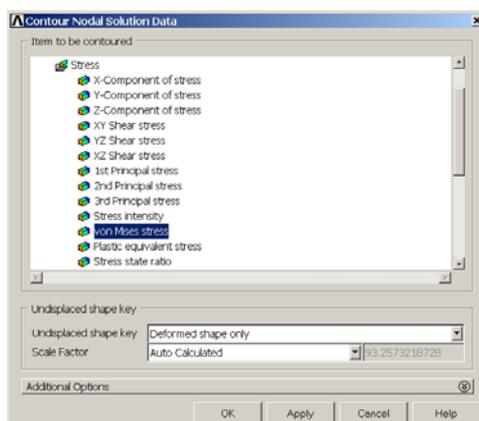


Рис. 32. Окно выбора результатов расчетов

- 13.2. Получим графическое изображение напряжения в пластине по Мизесу, см. рис. 33.

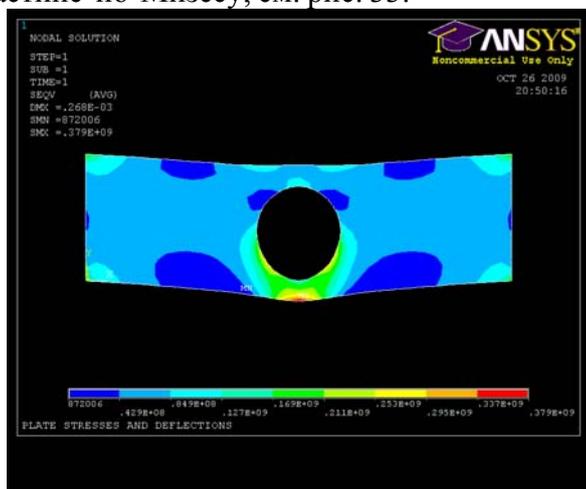


Рис. 33. Напряжения по Мизесу

### **Литература**

1. ANSYS Modeling and Meshing Guide.
2. ANSYS Operations Guide.
3. *Каплун, А. Б.* ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. - М.: Едиториал УРСС, 2003. - 272 с.
4. *Конюхов, А. В.* Основы анализа конструкций в ANSYS. Казань: КГУ, 2001. - 102 с.
5. *Чигарев, А.В.* Ansys для инженеров/ А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. - М.: Машиностроение, 2004. - 512 с.

### **Содержание**

Введение 3

Лабораторная работа № 1

3

Лабораторная работа № 2

15

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

для выполнения лабораторных работ по дисциплине  
«Динамика и прочность ракетных двигателей» для студентов  
специальности 160700.65, 24.05.02 «Проектирование  
авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения

Составители: Гуртовой Андрей Александрович  
Демьяненко Юрий Васильевич  
Кретинин Александр Валентинович  
Сушков Алексей Михайлович

В авторской редакции

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394026 Воронеж, Московский пр., 14