

Министерство образования и науки Украины
Донецкий национальный технический университет

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам
по курсу «Математическое моделирование в маркшейдерии»
(Часть 1)

Донецк – 2010

Министерство образования и науки Украины
Донецкий национальный технический университет

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторным работам
по курсу «Математическое моделирование в маркшейдерии»
для магистров специальности 8.090307
(Часть 1)

Утверждено
на заседании кафедры
маркшейдерского дела
Протокол №5 от 05.11.2010г.

Донецк - 2010

УДК 622.1:528

Методические указания к лабораторным работам по курсу «Математическое моделирование в маркшейдерии» для магистров специальности 8.090307. Часть 1 / Сост.: В.В. Назимко, Н.А. Бугаёва, И.В. Назимко – Донецк: ДонНТУ, 2010. – 82 с.

Составители:

В.В. Назимко, проф.
Н.А. Бугаёва, асс.
И.В. Назимко, н.с. (УкрНИМИ)

Отв. за выпуск

Н.Н. Грищенко, проф.

Содержание

1. Лабораторная работа №1 Углубленная проработка теоретических основ метода конечных элементов (МКЭ) (4 часа).....	5
2. Лабораторная работа №2 Анализ прикладной задачи, обоснование расчетной схемы, выбор граничных условий и исходных параметров модели (6 часов).....	13
3. Лабораторная работа №3 Ознакомление с интерфейсом пакета ANSYS и основными разделами руководства пользователя (2 часа)	21
4. Лабораторная работа №4 Ознакомление с интерфейсом базового анализа (2 часа)	26
5. Лабораторная работа №5 Подготовка параметров материалов модели (6 часа)	59
6. Лабораторная работа №6 Задание граничных условий и решение задачи (2 часа)	69
7. Лабораторная работа №7 Анализ результатов расчета напряженно-деформированного состояния и представление их в графическом виде. (4 часа)	76

Лабораторная работа №1

Углубленная проработка теоретических основ метода конечных элементов (МКЭ)

Метод конечных элементов (МКЭ) возник из строительной механики и теории упругости, а в последствии получил широкое распространение для решения задачи гидродинамики, электро- и магнитодинамики при изучении сложных физических процессов, связанных с распространением сейсмических волн в земной коре и других физических явлениях, имеющих сложную природу и протекающих в средах со сложной структурой, геометрией и разнообразными физическими свойствами. Представители инженерного направления решают довольно сложные технические задачи, часто не задумываясь над строгим обоснованием применяемых ими приемов, а построенные алгоритмы и программы проверяют на известных точных решениях.

Область применения метода конечных элементов существенно расширилась, когда в 1968 г. было показано, что уравнения, определяющие элементы в задачах строительной механики, распространения тепла, гидромеханики, могут быть легко получены с помощью таких вариантов метода взвешенных невязок, как метод Галёркина или способ наименьших квадратов. Установление этого факта сыграло важную роль в теоретическом обосновании метода конечных элементов, поскольку позволило применять его при решении многих типов дифференциальных уравнений. Таким образом, метод конечных элементов из численной процедуры решения задач строительной механики превратился в общий метод численного решения дифференциальных уравнений или систем дифференциальных уравнений.

Прежде всего, необходимо отметить, что число связей между любым конечным элементом, ограниченным воображаемыми поверхностями, и соседними элементами бесконечно. Дискретизировать такие задачи можно посредством применения следующей методики.

1. Сплошная среда разделяется воображаемыми линиями или поверхностями на некоторое количество конечных элементов.

2. Делается предположение о том, что элементы связаны между собой в узловых точках, расположенных на границах этих элементов. Основными неизвестными в таком случае становятся перемещения этих узловых точек.

3. Затем выбирается функция, однозначно определяющая перемещения внутри каждого элемента через перемещения узловых точек.

4. Функции перемещений однозначно определяют деформации внутри элемента через узловые перемещения. Эти деформации при известных начальных деформациях и упругих свойствах элемента позволяют определить напряжения как внутри элемента, так и на его границах.

5. Определяется система сил, сосредоточенных в узлах и уравновешивающих напряжения на границе и некоторые распределенные нагрузки, а затем записывается соотношение для жесткостей.

1.1. Описание свойств конечного элемента

Характеристики конечного элемента и основные правила их получения будем представлять в математической форме. Будем использовать матричную форму записи.

В примере используем элементы треугольной формы, показанные на рисунке 1.1.

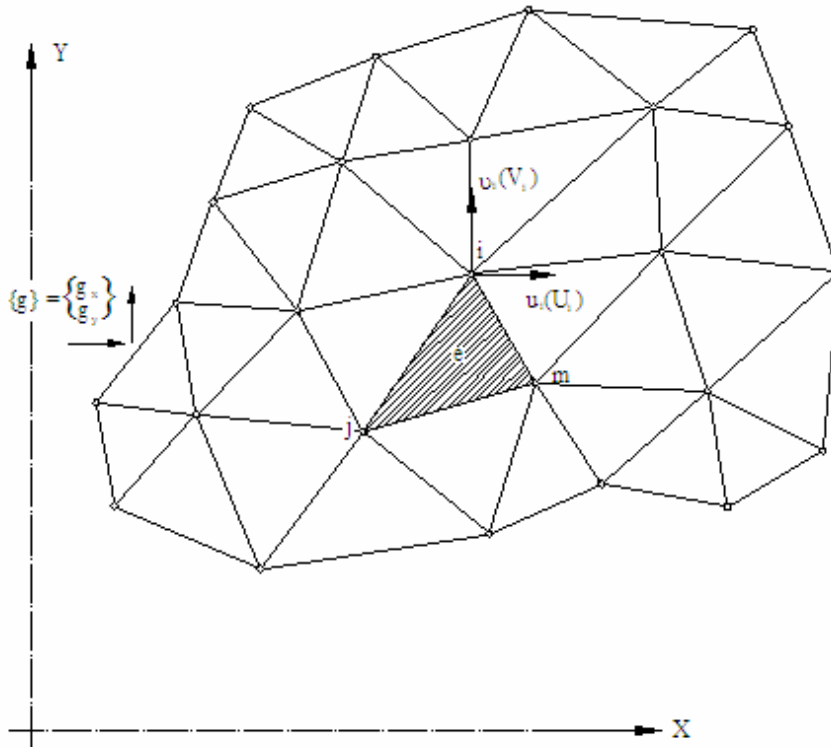


Рис. 1.1 – Плоская область, разбитая на конечные элементы

Рассмотрим функцию перемещения конечного элемента.

Типичный конечный элемент e определяется узловыми точками i, j, m и т.д. и прямолинейными границами. Пусть перемещения любой точки внутри элемента задаются вектор-столбцом:

$$\{f\} = [N]\{\delta\}^e = [N_i, N_j, N_m \dots] \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_m \\ \vdots \end{Bmatrix}, \quad (1.1)$$

где компоненты $[N]$ являются в общем случае функциями положения, а $\{\delta\}^e$ представляют собой перемещения узловых точек рассматриваемого элемента.

В случае плоского напряженного состояния вектор-столбец:

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{Bmatrix}$$

содержит горизонтальное и вертикальное перемещение типичной точки внутри элемента, а столбец:

$$\{\delta_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}$$

содержит соответствующие перемещения узла i .

Функции N_i , N_j , N_m должны быть выбраны таким образом, чтобы при подстановке в (1.1) координат узлов получались соответствующие узловые перемещения. То есть:

$$\begin{aligned} N_i(x_i, y_i) &= 1 \text{ (единичная матрица)} \\ N_i(x_j, y_j) &= N_i(x_m, y_m) = 0 \text{ и т.д.} \end{aligned}$$

чего можно достигнуть посредством соответствующего выбора линейных относительно x и y функций.

Функции $[N]$ называются функциями формы и играют важную роль в методе конечных элементов.

Теперь можно приступить к рассмотрению деформации конечного элемента.

Если известны перемещения во всех точках элемента, то в них можно определить и деформации. Они находятся с помощью соотношения, которое можно записать в следующем виде:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}^e. \quad (1.2)$$

Матрицу $[B]$ можно легко получить из соотношения (1.1), если известны функции формы N_i , N_j , N_m . Если эти функции линейные, деформации постоянны по всему элементу.

Рассмотрим теперь напряжения конечного элемента.

В общем случае материал, который находится внутри элемента, может иметь начальные деформации, обусловленные температурными воздействиями, усадкой, кристаллизацией и т.д. Если обозначить эти деформации через $\{\varepsilon_0\}$, то напряжения будут определяться разностью между существующими и начальными деформациями.

Кроме того, удобно предположить, что в рассматриваемый момент времени в теле существует некоторые остаточные напряжения $\{\sigma_0\}$, которые, например, можно замерить, но нельзя предсказать без знания полной истории нагружения материала. Эти напряжения можно просто добавить к общему

выражению. Таким образом, в предположении упругого поведения соотношения между напряжениями и деформациями будут линейными:

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}, \quad (1.3)$$

где $[D]$ – матрица упругости, содержащая характеристики материала.

Для частного случая плоского напряженного состояния необходимо рассмотреть три компонента напряжений, соответствующие введенным деформациям. В принятых обозначениях они записываются в следующем виде:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}.$$

Матрица $[D]$ легко получается из обычных соотношений между напряжениями и деформациями для изотропного материала:

$$\varepsilon_x - (\varepsilon_x)_0 = \frac{1}{E}\sigma_x - \frac{\nu}{E}\sigma_y,$$

$$\varepsilon_y - (\varepsilon_y)_0 = -\frac{\nu}{E}\sigma_x + \frac{1}{E}\sigma_y,$$

$$\gamma_{xy} - (\gamma_{xy})_0 = \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy}.$$

Отсюда можно получить:

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}.$$

Следующим этапом будет рассмотрение эквивалентных узловых сил. Допустим, что столбец:

$$\{F\}^e = \begin{Bmatrix} F_i \\ F_j \\ F_m \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

определяет силы, которые статически эквивалентны граничным напряжениям и действующим на элемент распределенным нагрузкам. Каждая из сил $\{F_i\}$ должна иметь столько же компонент, сколько и соответствующее узловое перемещение $\{\delta_i\}$, и действовать в соответствующем направлении.

Распределенные нагрузки $\{p\}$ определяются как нагрузки, приходящиеся на единицу объема материала элемента и действующее в направлениях, соответствующих направлениям перемещений в этой точке.

В частном случае плоского напряженного состояния узловые силы будут записаны в следующем виде:

$$\{F_i\} = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \end{Bmatrix},$$

где U и V – компоненты, соответствующие перемещениям u и v . Распределенная нагрузка будет иметь следующий вид:

$$\{p\} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \end{Bmatrix},$$

где X и Y – компоненты «объемных сил».

Простейший способ сделать узловые силы статически эквивалентными действующим граничным напряжениям и распределенным нагрузкам состоит в задании произвольного (виртуального) узлового перемещения и приравнении внешней и внутренней работ, совершаемых различными силами и напряжениями на этом перемещении.

Пусть $d\{\delta\}^e$ – виртуальное перемещение в узле. Тогда, воспользовавшись соотношениями (1.1) и (1.2), можно получить соответственно перемещения и деформации в следующем виде:

$$d\{f\} = [N] d\{\delta\}^e \text{ и } d\{\epsilon\} = [B] d\{\delta\}^e. \quad (1.4)$$

Работа, совершаемая узловыми силами, равна сумме произведений компонент каждой силы на соответствующие перемещения, что в матричном виде будет выглядеть так:

$$(d\{\delta\}^e)^T \cdot \{F\}^e. \quad (1.5)$$

Аналогично, внутренняя работа напряжений и распределенных сил, приходящихся на единицу объема, будет равна

$$d\{\epsilon\}^T \{\sigma\} - d\{f\}^T \{p\} \quad (1.6)$$

или, исходя из правил матричной алгебры по транспонированию матриц осуществляется по формуле $([A] \ [B])^T = [A]^T [B]^T$ и составит:

$$(d\{\delta\}^e)^T ([B]^T \{\sigma\} - [N]^T \{p\}). \quad (1.7)$$

Приравнявая работу внешних сил суммарной внутренней работе, получаемой интегрированием по объему элемента, получим:

$$(d\{\delta\}^e)^T \{F\}^e = (d\{\delta\}^e)^T \left(\int [B]^T \{\sigma\} dV - \int [N]^T \{p\} dV \right). \quad (1.8)$$

Поскольку это соотношение справедливо для любого виртуального

перемещения, коэффициенты в правой и левой частях должны быть, соответственно, равны. После подстановки (1.2) и (1.3), получаем следующий результат:

$$\{F\}^e = \left(\int [B]^T [D] [B] dV \right) \{\delta\}^e - \int [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dV + \int [B]^T \{\sigma_0\} dV - \int [N]^T [p] dV. \quad (1.9)$$

Эта зависимость является одной из основных характеристик любого элемента. Матрица жесткости тогда примет следующий вид:

$$[k]^e = \int [B]^T [D] [B] dV. \quad (1.10)$$

Узловые силы, обусловленные распределенными нагрузками, имеют такой вид:

$$\{F\}_p^e = \int [N]^T [p] dV, \quad (1.11)$$

а силы, обусловленные начальной деформацией, будут выражены как:

$$\{F\}_{\epsilon_0}^e = \int [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dV. \quad (1.12)$$

Узловые силы, обусловленные начальным напряжением, будут записаны в следующем виде:

$$\{F\}_{\sigma_0}^e = \int [B]^T \{\sigma_0\} dV. \quad (1.13)$$

Если система начальных напряжений самоуравновешена, то после составления ансамбля силы, определяемые соотношением (1.13), тождественно равны нулю. Поэтому обычно оценка компонент этих сил не проводится. Однако, если, например, исследуются выработки горной породы, в которой заданы тектонические напряжения, то необходимо учитывать, что удаление материала может вызвать нарушение силового баланса.

При использовании треугольного элемента в задачах о плоском напряженном состоянии, основные характеристики получаются после соответствующей подстановки. В этом случае матрица $[B]$ и интегрирование выполняется тривиально.

Составление ансамбля и дальнейшее решение производятся с помощью достаточно простой процедуры. В общем случае в узлах могут быть приложены сосредоточенные внешние силы. Тогда для сохранения равновесия в узлах следует дополнительно ввести матрицу сил:

$$\{R\} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{Bmatrix}. \quad (1.14)$$

Важно сделать акцент на элементах, соприкасающихся с границей. Если на границе заданы перемещения, то никаких затруднений и сложностей не возникнет. Поэтому рассмотрим случай, когда на границе задана распределенная внешняя нагрузка, например, нагрузка $\{g\}$ на единицу площади. Тогда в узлах граничного элемента необходимо приложить дополнительную нагрузку. Для этого используем принцип виртуальной работы:

$$\{F\}_p^e = - \int [N]^T \{g\} dS, \quad (1.15)$$

где интегрирование проводится по границе элемента. Важно отметить следующее: для того, чтобы записанное выше выражение было справедливо, $\{g\}$ должно иметь такое же число компонент, что и $\{f\}$.

На фигуре 1.1 показан граничный элемент для случая плоского напряженного состояния. Интегрирование в (1.15) редко удается выполнить точно. Часто, исходя из физических соображений, поверхностная нагрузка просто заменяется приложенными в граничных узлах сосредоточенными силами, которые определяются из условий статистического равновесия. Для рассматриваемого частного случая результаты будут эквивалентны.

После того, как из решения общей системы уравнений определены узловые перемещения, из соотношений (1.2) и (1.3) могут быть найдены напряжения в любой точке элемента:

$$\{\sigma\} = [D] [B] \{\delta\}^e - [D] \{\varepsilon_0\} + \{\sigma_0\}. \quad (1.16)$$

В этом выражении матрица напряжений элемента будет иметь следующий вид:

$$[S]^e = [D] [B]. \quad (1.17)$$

К этой матрице должны быть добавлены напряжения

$$\{\sigma_{\varepsilon_0}\} = - [D] \{\varepsilon_0\} + \{\sigma_0\}. \quad (1.18)$$

Отсутствие составляющего напряжения, вызванного распределенной нагрузкой $\{\sigma\}_p^e$, объясняется тем, что рассматриваются только условия общего равновесия, а не равновесия внутри каждого элемента.

Обобщенный характер перемещений, деформаций и напряжений можно представить следующим образом. Физический смысл перемещений, деформаций и напряжений в рассмотренном случае очевиден. В рассматриваемом плоском элементе термин «перемещение» может обозначать прогиб и наклон в данной точке. Тогда «деформациями» будут кривизны срединной поверхности, а «напряжениями» – внутренние изгибающие моменты.

Все полученные здесь выражения справедливы и в общем случае при условии, что сумма произведений перемещений на соответствующие компоненты нагрузок определяет внешнюю работу, тогда как сумма произведений деформации на соответствующие компоненты напряжений – внутреннюю работу.

В качестве обоснования выбора именно метода конечных элементов для решения задач о состоянии массива горных пород, приводится ряд преимуществ этого метода:

1) Массив горных пород представляет собой твердое тело, которому присущи слоистость, дефектность, неоднородность, гетерогенность среды и процессы в горном массиве, свойства которых довольно сложно предсказать. Именно метод конечных элементов решает такого рода проблемы посредством разбивки изучаемого объекта на конечные элементы.

2) В процессе подработки происходит разрушение горных пород за пределом упругости при сдвигении. Именно метод конечных элементов позволяет легко решать задачи разрушения.

3) При ведении горных разработок конфигурация выработанного пространства очень сложная, то есть смоделировать реальное отображение существующей планировки работ, реально отобразить ее в пространстве и во времени является достаточно трудоемким и сложным процессом. Метод конечных элементов позволяет получить специфический подход к решению и этой сложности.

Лабораторная работа №2

Анализ прикладной задачи, обоснование расчетной схемы, выбор граничных условий и исходных параметров модели

Программа располагает широким перечнем расчетных средств, которые могут учесть разнообразные конструктивные нелинейности; дают возможность решить самый общий случай контактной задачи для поверхностей; допускают наличие больших (конечных) деформаций и углов поворота; позволяют выполнить интерактивную оптимизацию и анализ влияния электромагнитных полей, получить решение задач гидроаэродинамики и много другое – вместе с параметрическим моделированием, адаптивным перестроением сетки и обширными возможностями создания макрокоманд с помощью языка параметрического программирования. Система меню обеспечивает ввод данных и выбор действий программы с помощью диалоговых панелей, выпадающих меню и окон.

Средства твердотельного моделирования включают в себя представление геометрии конструкции, основанное на использовании сплайновой технологии, геометрических примитивов и операций булевой алгебры.

Программа допускает два режима работы: пакетный (Batch) и интерактивный (Interactive).

Пакетный режим работы ANSYS-программы задается программой пользователя. Первая строка в файле должна быть /batch, обозначающая пакетный режим. Этот режим особенно эффективен при решении задач, не требующих постоянной связи с компьютером.

Интерактивный режим предполагает постоянное взаимодействие с компьютером: вы запускаете команду, программа выполняет её и отмечает, что она выполнена; затем вы запускаете другую команду и т.д. Если вы ошибетесь, можно исправить ошибку, повторно правильно набрав команду. Интерактивный режим позволяет использовать наиболее подходящие свойства графического режима, подсрочной подсказки, системного меню и графического выбора (pick) [1].

Решение задач с помощью программы ANSYS состоит из трех этапов: препроцессорная (предварительная) подготовка (Preprocessing), получение решения (Solving the Equations) и постпроцессорная обработка результатов (Postprocessing).

На стадии препроцессорной подготовки выполняется выбор типа расчета, построение модели и приложение нагрузок (включая и граничные условия). Здесь задаются необходимые для решения исходные данные. Пользователь выбирает координатные системы и типы конечных элементов, указывает упругие постоянные и физико-механические свойства материала, строит твердотельную модель и сетку конечных элементов, выполняет необходимые действия с узлами и элементами сетки, задает уравнения связи и ограничения. Можно также использовать модуль статистического учета для оценки ожидаемых размеров файлов и затрат ресурсов памяти.

В программе ANSYS используются координатные системы для размещения в пространстве геометрических объектов, определения направлений степеней свободы в узлах сетки, задания свойств материала в разных направлениях, для управления графическим изображением и содержанием выходных результатов. Можно

использовать декартовы, цилиндрические, сферические, эллиптические и тороидальные системы координат. Все они могут быть расположены и ориентированы в пространстве произвольным образом.

Исходные данные, введенные при препроцессорной подготовке, становятся частью центральной базы данных программы. Эта база данных разделена на таблицы координатных систем, типов элементов, свойств материала, ключевых точек, узлов сетки, нагрузок и т.д. Как только в таблице появляются некоторые данные, на них становится возможным ссылаться по входному номеру таблицы. Кроме того, существует набор команд управления базой данных, чтобы выделить некоторую ее часть для определенных операций. Выделение необходимых данных можно проводить по местоположению геометрических объектов, графическим примитивам твердой модели, типам конечных элементов, видам материалов, номерам узлов и элементов и т. п.

Пользователь имеет возможность ввести обширную информацию, относящуюся к данной расчетной модели, но программа будет использовать только ту ее часть из базы данных, которая необходима для определенного вида расчета. Вид расчета задается при входе в программу.

Еще одним способом выбора данных является разделение модели на компоненты или слои, представляющие собой группы геометрических объектов, которые выделены пользователем для большей наглядности. Для наглядности компоненты могут быть окрашены в разные цвета.

2.1. Способы построения геометрической модели

В программе ANSYS существуют три разных способа построения геометрической модели: импорт модели, предварительно построенной другой программой; твердотельное моделирование и непосредственное создание модели в интерактивном режиме работы с программой. Можно выбрать любой из этих методов или использовать их комбинацию для построения расчетной модели.

Импорт модели. Программа ANSYS позволяет наносить сетку на модель, импортированную из другой программы, а также имеет возможность менять геометрию модели с целью упрощения расчета. Использование автоматических средств позволяет улучшить модель за счет устранения ненужных зазоров, перекрытий или взаимных внедрений ее частей, а также выполнить слияние объектов и создание объемов. Это дает возможность получить значительно более простую расчетную модель путем ее «подчистки» и получения приемлемого варианта. Процедуры упрощения позволяют наилучшим образом подготовить модель для нанесения сетки за счет удаления отверстий, полостей и выпуклостей, исключения мелких подробностей.

Твердотельное моделирование. В программе ANSYS доступны следующие два способа моделирования: нисходящий и восходящий. В первом случае пользователь указывает только самый высокий порядок сложности объектов модели. Используемые обычно объекты (такие, как сферы и призмы, т. е. формы, которые называются геометрическими примитивами) могут быть созданы за одно обращение к меню. Например, пользователь определяет объемный примитив, а программа автоматически

находит связанные с ним поверхности, линии и ключевые точки. Прimitives позволяют непосредственно указывать геометрические формы. В программе ANSYS можно легко и быстро определить в двумерном случае такие формы, как окружности и прямоугольники, или параллелепипеды, сферы, конусы и цилиндры - в трехмерном. После того как геометрические объекты указаны (с помощью примитивов, считыванием данных из файлов формата .IGES или непосредственным построением), к ним можно применять операции булевой алгебры. При импортировании геометрии в формате .IGES пользователь имеет возможность управлять значениями допусков на слияние объектов модели, выявлять «проблемные» области и возможные ошибки.

Непосредственное создание модели в интерактивном режиме работы. В этом случае чаще всего применяется так называемое «восходящее моделирование». При восходящем моделировании пользователь строит модель, начиная с объектов самого низкого порядка. Сначала задаются ключевые точки, затем связанные с ними линии, поверхности и объемы - именно в таком порядке.

Независимо от используемого способа построения модели имеется возможность применять операции булевой алгебры для объединения наборов данных и за счет этого как бы создавать «скульптуру» модели. Программа имеет набор таких булевых операций, как сложение, вычитание, пересечение, деление, склеивание и объединение.

Еще одним эффективным методом построения модели в программе ANSYS является построение некоторой поверхности с помощью так называемого метода «обтягивания каркаса». С помощью этого метода можно задать некоторый набор поперечных сечений, а затем дать программе команду построить поверхность, которая будет точно соответствовать указанным сечениям.

2.2. Построение сетки

После того, как построена твердотельная модель, строится ее конечно-элементный аналог (т.е. сетка узлов и элементов).

Задание типов элементов. Библиотека конечных элементов программы ANSYS содержит более 80 типов, каждый из которых определяет, среди прочего, применимость элемента к той или иной области расчетов (прочностной, тепловой, магнитный и электрический анализы, движение жидкости или связанные задачи), характерную форму элемента (линейную, плоскую, в виде бруска и т. д.), а также двумерность (2-D) или трехмерность (3-D) элемента.

После выбора типа элементов необходимо задать их константы. Константы элемента - это свойства, специфичные для данного типа элемента. Например, для элемента BEAM3 - балочного 2-D элемента - константами являются площадь поперечного сечения, момент инерции, высота и др.

Задание свойств материалов. Свойства материала требуются для большинства типов элементов. В зависимости от области приложения свойства могут быть линейными, нелинейными и (или) анизотропными.

Линейные свойства могут зависеть или не зависеть от температуры, быть изотропными или ортотропными. Зависимость свойств от температуры имеет форму полинома (вплоть до четвертой степени) или задается таблично.

Нелинейные соотношения, такие как кривые деформирования материала для различных видов упрочнения, кривые ползучести, зависимости для радиационного распухания, описание гиперупругих свойств, обычно задаются в виде таблицы.

Анизотропные свойства для упругих материалов задаются в матричном виде. Следует заметить, что описание анизотропной пластичности требует задания разных кривых «напряжение-деформация» для разных направлений.

В программе ANSYS предусмотрено четыре способа генерации сетки: использование метода экструзии, создание упорядоченной сетки, создание произвольной сетки (автоматически) и адаптивное построение.

Метод экструзии. Метод экструзии (выдавливания) используется для превращения областей двумерной сетки в трехмерные объекты, состоящие из параллелепипедов, клиновидных элементов или их комбинации. Процесс экструзии осуществляется с помощью процедур смещения из плоскости, буксировки, поступательного и вращательного перемещений.

Создание упорядоченной сетки. Построение упорядоченной сетки требует предварительного разбиения модели на отдельные составные части с простой геометрией, а затем - выбора таких атрибутов элемента и соответствующих команд управления качеством сетки, чтобы можно было построить конечно-элементную модель с упорядоченной сеткой. Создаваемая программой ANSYS упорядоченная сетка может состоять из шестигранных, четырехугольных и треугольных элементов. Для получения треугольной сетки программа выделяет области модели, предназначенные для нанесения упорядоченной сетки, создает сначала четырехугольную сетку, а затем превращает ее в сетку из треугольных элементов.

В качестве дополнительного способа построения упорядоченной сетки на некоторой поверхности используется деление противоположных граничных линий этой поверхности таким образом, чтобы можно было осуществить переход от одного размера сетки к другому. Построение упорядоченной сетки переменного размера возможно только для поверхностей, ограниченных четырьмя линиями. При большом числе ограничивающих линий можно выполнить операцию их конкатенации.

Создание произвольной сетки (автоматически). Программа ANSYS имеет в своем составе генераторы произвольной сетки, с помощью которых сетка может наноситься непосредственно на модель достаточно сложной геометрии без необходимости строить сетку для отдельных частей и затем собирать их в единую модель. Произвольную сетку можно строить из треугольных, четырехугольных и четырехгранных элементов.

При произвольном построении сетки реализован алгоритм разумного выбора размеров конечного элемента, позволяющий строить сетку элементов с учетом кривизны поверхности модели и наилучшего отображения ее реальной геометрии. Кроме того, можно выбрать мелкую или крупную сетку элементов, указав в качестве управляющего параметра любое число из диапазона от единицы до десяти.

При построении сетки возможно также указание общего размера элемента, деление граничной линии, указание размеров в окрестности заданных геометрических точек, коэффициентов растяжения или сжатия вдали от границ, задание ограничения на кривизну и возможность задания «жестких» точек (т. е. задание точного положения узла вместе с размерами сетки в такой точке).

По сравнению с произвольной сеткой упорядоченная плоская сетка может содержать только четырехугольные или треугольные элементы, а упорядоченная объемная сетка - объемные шестигранные элементы.

Непосредственное создание модели в интерактивном режиме. При использовании этого подхода конечно-элементную модель можно построить, определив положение каждого узла, а также размеры, форму и связность для всех элементов сетки. Узлы используются для того, чтобы определить положение элементов в пространстве, а элементы определяют связность модели. И те, и другие можно задавать наиболее удобным способом, не заботясь об эффективности решения.

Адаптивное построение сетки. Адаптивное построение сетки состоит в том, что после создания модели и задания граничных условий программа генерирует конечно-элементную сетку, выполняет расчет, оценивает ошибку за счет сеточной дискретизации и меняет размер сетки от решения к решению до тех пор, пока расчетная погрешность не станет меньше некоторой наперед заданной величины (или пока не будет достигнуто установленное число итераций).

Модификация сетки. Возможности программы ANSYS допускают модификацию конечно-элементной сетки. Например, могут быть изменены атрибуты узлов и элементов. Если модель состоит из повторяющихся областей, то можно создать сетку только для некоторой области модели, а затем сделать копию этой области. После того как геометрическая модель покрывается сеткой конечных элементов, программа автоматически обеспечивает их взаимно-перекрестный контроль, чтобы гарантировать правильность выполняемых видоизменений сеточной модели. Такие проверки предотвращают некорректное уничтожение или порчу данных, относящихся к твердотельной и сеточной моделям. Так, например, ключевые точки, линии, поверхности или объемы сеточной модели нельзя уничтожить или переместить до тех пор, пока пользователь явным образом не потребует, от программы отменить их автоматический контроль.

2.3. Приложение нагрузок и получение решения

После того, как при препроцессорной подготовке построена расчетная модель, можно переходить к стадии решения задачи. Этот этап включает в себя задание вида анализа и его опций, нагрузок, шага решения и заканчивается запуском на счет конечно-элементной задачи.

Программа ANSYS предусматривает два метода решения задач, связанных с расчетом конструкций (Structural problems): h-метод и p-метод. Первый из перечисленных методов может применяться при любом типе расчетов (статический, динамический, тепловой и т. п.), в то время как второй метод может использоваться только в линейном статическом анализе. При прочих равных условиях, h-метод требует более частой сетки, чем p-метод.

2.4. Выбор типа анализа и его опций

Тип анализа выбирается на основе условий нагружения и реакции системы, которую предполагается получить. Так, например, если нужно найти собственные частоты и формы колебаний, то следует выбрать модальный анализ. В программе ANSYS доступны следующие виды прочностных расчетов: статический (или стационарный), динамический (или нестационарный), гармонический, модальный, спектральный и расчет устойчивости.

Опции анализа дают возможность уточнить параметры проводимого расчета. Типичным является выбор метода решения, учет или отказ от учета влияния напряженного состояния конструкции на ее жесткость (Stress stiffness), а также опций применения метода Ньютона-Рафсона.

Выбранный вид анализа указывает программе, какие разрешающие уравнения следует использовать для решения данной задачи. Самый общий набор доступных видов анализа состоит из средств решения прочностных и тепловых задач.

Каждая категория расчетов включает несколько их отдельных типов (например, статический и динамический типы прочностных расчетов).

Выбором опций можно дополнительно определить особенности проводимого анализа. Так, например, для решения нелинейных уравнений имеется возможность указать один из нескольких вариантов метода Ньютона-Рафсона.

2.5. Приложение нагрузок

Под нагрузками понимаются как внешние и внутренние усилия, так и граничные условия в виде ограничений на перемещения. В программе ANSYS нагрузки разделены на следующие категории:

- ограничения степеней свободы;
- сосредоточенные силы и моменты сил;
- поверхностные нагрузки;
- объемные силы;
- инерционные нагрузки.

Большинство этих нагрузок может быть приложено или к твердотельной модели (в ключевых точках, по линиям и поверхностям), или к конечно-элементной модели (в узлах и к элементам).

Конкретный вид нагрузок зависит от вида проводимого анализа (например, приложенная в точке нагрузка может быть сосредоточенной силой при прочностном анализе или тепловым потоком при расчете теплопередачи).

Необходимо различать термины *шаг нагружения* и *шаг решения*.

Шаг нагружения - это та конфигурация нагрузок, для которой получено решение. Например, к конструкции можно приложить ветровую нагрузку на первом шаге нагружения, а на втором - гравитационную нагрузку. Таким образом, каждое заданное сочетание (конфигурация) нагрузок называется шагом нагружения. Решение может состоять из одного или более таких шагов. Значения нагрузки для данного шага нагружения могут меняться постепенно от шага к шагу (т. е. нагрузка может быть плавной, иметь наклонный участок) или меняться скачком за один шаг. Последний

вариант можно использовать, например, для моделирования резкого нагружения при анализе переходных, нестационарных процессов.

При нестационарном анализе полную последовательность нагрузок полезно разбить на несколько шагов нагружения.

Шаг решения - это изменение счетного шага внутри шага нагружения; используется главным образом при нестационарном и нелинейном анализе для улучшения точности и сходимости. Шаг решения также называют *шагом по времени*, т. е. шагом, выполняемым в течение некоторого промежутка времени.

Заметим, что в программе ANSYS понятие время используется как при нестационарном, так и при стационарном анализе. В первом случае - это обычная длительность процесса в секундах, минутах или часах. При решении статических задач время используется как указатель на тот или иной шаг нагружения или шаг решения.

Указание опций для шага нагружения. Опциями шага нагружения являются такие опции, которые могут быть изменены при переходе от одного шага нагружения к другому: число шагов решения, время окончания шага нагрузки или выбор выходных параметров решения. В зависимости от типа выполняемого расчета указание опций может требоваться или не требоваться.

Для указания допустимых пределов изменения степеней свободы в узлах модели могут использоваться заданные условия-ограничения. Например, в соответствии с требованиями прочностного анализа могут быть ограничены повороты и смещения узлов на закрепленном крае модели.

Кроме возможности задавать ограничения на стадии получения решения существует возможность делать это при препроцессорной подготовке, используя твердотельную или конечно-элементную модель. Ограничения степеней свободы, заданные на твердотельной модели, автоматически передаются программой в сеточную модель при инициализации процедуры численного решения.

На стадии получения решения имеется возможность изменить свойства материала и атрибуты конечного элемента (например, толщину), активизировать или деактивировать элементы (опции «есть» - birth и «нет» - death).

После того, как все соответствующие параметры заданы, может быть выполнено и само решение. По команде SOLVE программа обращается за информацией о модели и нагрузках к базе данных и выполняет вычисления. Результаты записываются в специальный файл и в базу данных. При этом в базе данных может храниться только один набор результатов, тогда как в файл могут быть записаны результаты для всех шагов решения.

2.6. Просмотр результатов

Для просмотра результатов можно использовать два постпроцессора программы ANSYS. *Общий постпроцессор* используется для анализа результатов одного шага решения и обеспечивает, среди прочего, получение линий уровня, картину деформированного состояния, листинг результатов, оценку погрешности счета, объединение расчетных случаев, проведение вычислений на основе полученных данных. *Постпроцессор процесса*

нагрузки используется для просмотра результатов в указанных точках расчетной модели на каждом шаге решения; можно получить график результатов как функцию времени или частоты, листинг результатов, выполнить арифметические и алгебраические вычисления [1, 4].

Лабораторная работа №3
Ознакомление с интерфейсом пакета ANSYS и основными разделами
руководства пользователя

3.1. Интерфейс пользователя

С помощью интерфейса программы ANSYS обеспечивается удобный интерактивный доступ к функциям, командам, документации и справочным материалам программы, создается своего рода путеводитель, обучающий пользованию программой шаг за шагом при проведении анализа. В то же время программой предоставляется полная документация в интерактивном режиме и самая современная система HELP на основе гипертекстового представления для помощи опытным пользователям при выполнении сложных видов работ.

Существуют четыре общих метода ввода инструкций для программы, когда используются следующие возможности интерфейса:

- * меню;
- * панели диалога;
- * линейка инструментов;
- * непосредственный ввод команд.

Меню представляет собой перечень нескольких логически связанных процедур управления программой, которые расположены в отдельных окнах. К этим окнам, которые можно переместить или убрать с помощью мыши, доступ возможен в процессе работы. Команды программы объединены в отдельные функциональные группы для быстрого доступа в соответствующие моменты. Семь основных меню или оконных областей, показанных на рис. 3.1, включают в себя следующее.

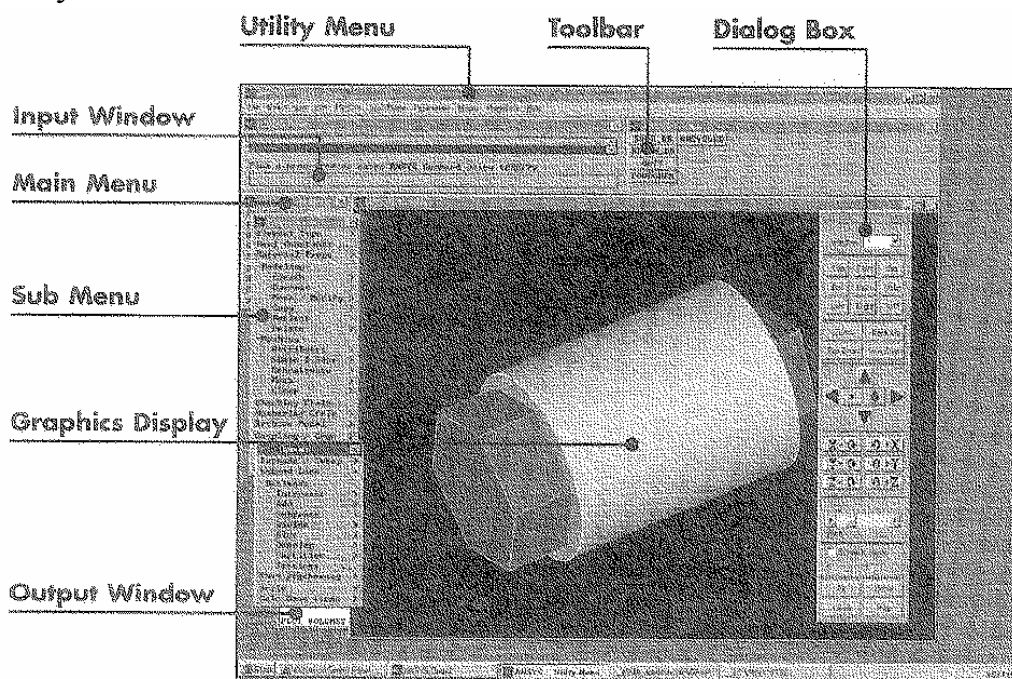


Рис. 3.1 - Интерфейс программы ANSYS

- **Меню утилит** - содержит набор часто используемых процедур, которые отображены здесь для доступа в любой момент работы программы. Выполнению этих процедур предшествует появление в каскадном порядке выпадающих меню, которые позволяют непосредственно выполнить нужное действие или перейти в панель диалога. Меню утилит не обладает жестким режимом работы, и пользователь может выполнить несколько действий за одно обращение (например, отказаться от прежнего намерения и перейти к выполнению другой операции).
- **Главное меню** - перечисляет основные функции программы, которые группируются в располагаемые сбоку всплывающие (динамические) меню, вид которых зависит от продвижения по программе.
- **Окно ввода** - представляет собой область для набора команд и показа сообщений-подсказок программы. Имеется возможность обратиться к списку введенных ранее команд. Команды можно извлекать из файла регистрации (log-файла) введенных ранее команд и/или входных файлов для последующего ввода.
- **Графическое окно** - представляет собой область для вывода такой графической информации, как конечно-элементная модель или графики результатов анализа.
- **Окно вывода** - фиксирует отклик программы на команды и действия пользователя. Всегда доступно при работе графического интерфейса.
- **Линейка инструментов** - дает возможность пользователю разместить обычно используемые процедуры, например, команды или написанные пользователем подпрограммы для быстрого их запуска щелчком мыши.
- **Панель диалога** - это окно, предоставляющее пользователю на выбор перечень действий для выполнения процедур и установки необходимых настроек. Такие панели подсказывают, какие данные следует вводить и какие решения принимать для определенных процедур (рис. 3.2).

Линейка инструментов является весьма эффективным средством для запуска команд программы, что определяется широкими возможностями ее конфигурирования. Предоставляет пользователю средства создавать кнопки с текстом и иметь немедленный доступ к часто исполняемым командам (рис. 3.3). Линейка инструментов может вместить до 200 кнопок.

Независимо от того, каким образом заданы команды, они в конечном счете используются для передачи всех данных и управления всеми действиями программы. Интерфейс пользователя организован так, чтобы осуществлять выбор и исполнение команд путем удобного и “интуитивного” использования меню, панелей диалога и линейки инструментов.

Интерактивный характер интерфейса и группирование команд по функциональной близости делают прозрачным смысл команд по их краткому синтаксису. Пользователи, знакомые с командами программы, могут вводить их непосредственно с клавиатуры.

Любая однажды выполненная команда записывается в файл регистрации сеанса работы. Доступ к этому файлу возможен из окна вывода, что позволяет

обратиться к списку команд в случае ошибки или записать его в виде файла для исполнения в пакетном режиме.

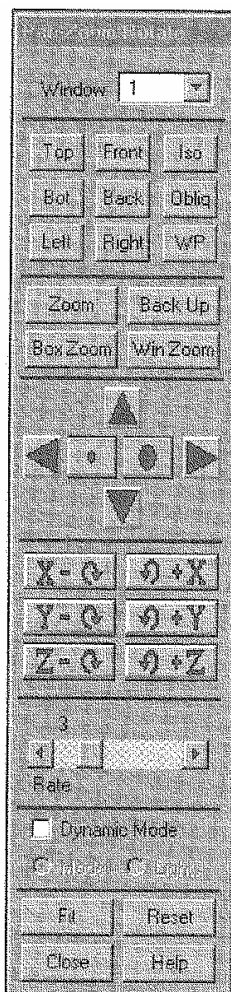


Рис. 3.2 - Панель диалога

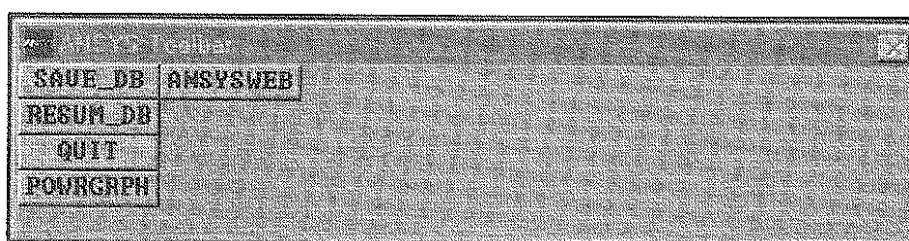


Рис. 3.3 - Линейка инструментов

Программа также использует графический индикатор в виде меняющего длину столбика при выполнении потенциально продолжительной процедуры (например, построение сетки). Пользователь имеет возможность остановить такую операцию простым щелчком мыши.

Программа ANSYS поддерживает большое число графических опций для работы с графическими системами XP Windows, OPEN GL и некоторыми другими системами отображения трехмерной графики.

3.2. Графические возможности

Полностью интерактивная графика (т.е. средства и системы ввода, отображения и редактирования изображений) является составной частью программы ANSYS. Графика важна для проверки исходных данных и просмотра результатов решения на этапе постпроцессорной обработки.

Модуль PowerGraphics обладает значительной скоростью построения геометрических объектов и графиков результатов. Высокая скорость достигается за счет сохранения геометрии как некоторого “готового” объекта в памяти машины, а не построением ее всякий раз заново.

Возможности модуля PowerGraphics позволяют быстро выдавать изображения: изоповерхностей (т.е. поверхностей равного значения какой-либо величины); графических объектов, разделенных на составные части, в виде одной сборки или совокупности так называемых Q-разрезов (в виде тонких “ломтиков”); Q-разрезов с топологическими деталями.

Графические средства программы ANSYS включают следующее:

- отображение граничных условий на твердотельных и конечно-элементных моделях;
- представление результатов цветными областями равных значений;
- графики зависимостей полученных результатов от времени или от некоторого расстояния в пределах расчетной модели;
- преобразование изображений общего характера (смена направления взгляда, распаивание окна до максимального размера, укрупнение плана, вращение);
- растягивание твердотельных примитивов;
- многооконный режим работы;
- показ невидимых линий, сечений и перспективных изображений;
- программное средство для Z-буферирования (плавное затенение и быстрая “отрисовка” объекта);
- изображение теней на объекте от источника света;
- повышение ясности изображения (удаление внутренних линий, разделение смежных линий элемента и выбор независимого масштаба изображения по вертикали и горизонтали);
- создание композиции из нескольких объектов (например, дополнение твердотельной модели);
- наличие палитры до 256 цветов;
- трехмерная визуализация, включающая изображение градиентов, изоповерхностей, траекторий частиц потока и разрезов объемов;
- аппроксимация графиков X-Y с помощью широкого набора кривых, их двумерное и объемное представление; выбор цветовой гаммы графиков, фона и линий сетки, выбор толщин линий;
- графическое отображение длительности процедур построения сетки, подготовки листинга и процесса решения задачи;

- средства дополнения графических изображений текстом, размерными линиями, фигурами, символами, круговыми диаграммами и т.п.;
- средства анимации для отображения изменений деформированной формы, результатов счета в зависимости от времени, “оживления” Q-разрезов и изоповерхностей;
- цветовая индикация большинства графических объектов (элементов сетки, линий, областей, объемов, граничных условий, окраски экрана, контурных линий и индексов) в зависимости от их ранга или типа;
- полупрозрачные изображения для элементов, твердотельных объектов, составных частей группы объектов и изоповерхностей;
- показ истинной формы и поперечного сечения трубопроводов, патрубков, балок и магнитов;
- показ отдельных слоев композитных материалов и их пространственной ориентации;
- разделение окон по цвету фона;
- сохранение в файле спецификаций вывода на экран для повторного обращения к ним;
- средства получения твердых копий графики, включая системы Postscript, HPGL и TIFF [5].

Лабораторная работа №4 Ознакомление с интерфейсом базового анализа

4.1. Указание типов элементов, геометрических характеристик, поперечных сечений элементов и свойств материала

Указание типов элементов, свойств материалов и геометрических характеристик элементов проводится в препроцессоре.

Для выбора типа элемента, применяемого для создания сетки конечных элементов, используется экранное меню: **Preprocessor - Element Type - Add/Edit/Delete**

Ниже опции Add/Edit/Delete имеются еще несколько опций, позволяющих выполнять дополнительные действия с типами конечных элементов:

- > **Switch Elem Type** - изменение типа конечного элемента для проведения расчетов иных задач механики сплошной среды (переход от задач МДТТ к задачам расчета полей температур и обратно, переход от элементов расчета магнитных полей к элементам расчета полей температур и так далее). При расчетах только задач МДТТ применение этой опции не требуется;

- > **Add DOF** - добавление степеней свобод в узлы элементов (перемещений, скоростей, давления и так далее). При расчетах задач МДТТ применение этой опции не требуется;

- > **Remove DOFs** - удаление степеней свобод;

- > **Elem Tech Control** - опция формулировки свойств отдельных элементов (SHELL181, PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187, BEAM 188, BEAM 189, SHELL208, SHELL209). Как указывалось выше, данные элементы (кроме балок) используются для расчета сложных физически нелинейных задач.

После вызова данной последовательности (Add/Edit/Delete) на экране появляется диалоговая панель Element Types, показанная на рис. 4.1.

В поле Defined Element Types: указываются типы элементов, выбранные из библиотеки элементов, которые в дальнейшем будут применяться для создания сетки.

Запись NONE DEFINED означает, что ни один из типов элементов не указан.

Кнопка Add..., позволяет добавлять новый тип элемента в список используемых типов элементов.

Кнопка Options... позволяет менять признаки элементов (например, для элементов типа Plane можно указывать тип напряженно-деформированного состояния).

Кнопка Delete позволяет удалять тип элемента из списка используемых для создания расчетной модели (сетки).

Кнопка Close закрывает диалоговую панель Element Types.

Кнопка Help вызывает интерактивную помощь.

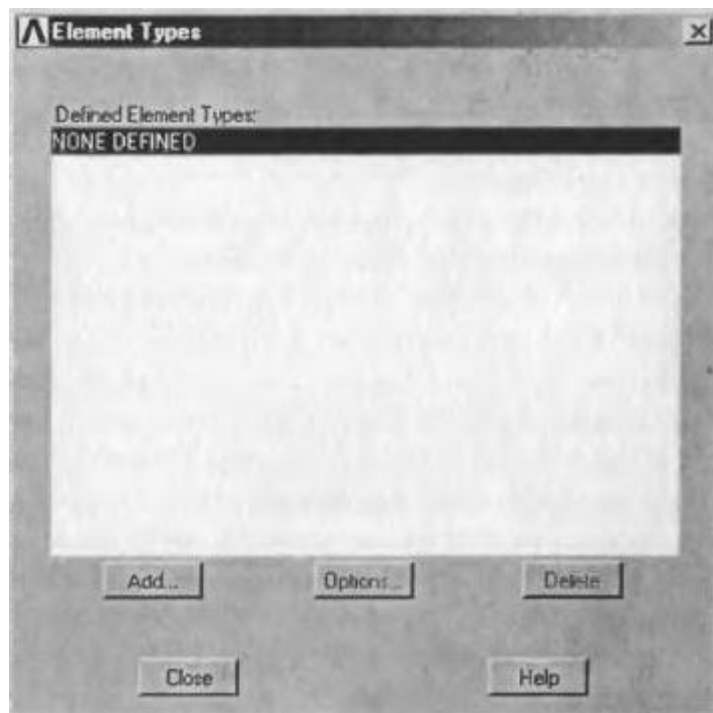


Рис. 4.1 - Диалоговая панель Element Types

После применения кнопки Add... на экране появляется еще одна диалоговая панель Library of Element Types, показанная на рис. 4.2.

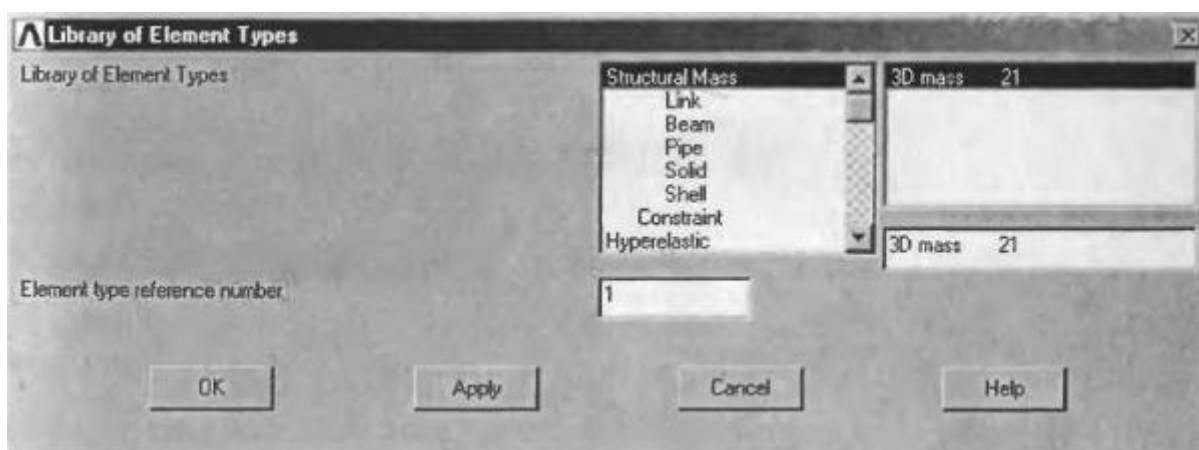


Рис. 4.2 - Диалоговая панель Library of Element Types

В поле Library of Element Types указываются типы применяемых элементов. В левой части списка указывается группа типов конечных элементов (например, Structural Mass - сосредоточенная масса задач МДТТ, Structural Link - стержень задач МДТТ, Structural Beam - балка задач МДТТ и так далее). В правой части списка указывается конкретный тип конечного элемента - 3D mass 21 (то есть элемент MASS21), 3D finit stn 180 (то есть элемент LINK180) и т. д.

В поле Element type reference number указывается порядковый номер, под которым данный тип элемента будет помещен в список применяемых типов

конечных элементов. Как правило, данный номер назначается автоматически (1,2,3...), и менять его не обязательно.

Кнопка ОК вызывает внесение указанного типа элемента в список применяемых типов. После применения кнопки ОК диалоговая панель Library of Element Types закрывается

Кнопка Apply вызывает внесение указанного типа элемента в список применяемых типов. После применения кнопки Apply диалоговая панель Library of Element Types не закрывается и можно указывать новый тип конечного элемента.

Кнопка Cancel вызывает выход из диалоговой панели Library of Element Types без сохранения.

Кнопка Help вызывает интерактивную помощь.

После указания типа конечного элемента и выхода из диалоговой панели Library of Element Types исходная (вызванная первой) диалоговая панель Element Types приобретает вид, показанный на рис. 4.3 (Type 1 SOLID92).



Рис. 4.3 - Диалоговая панель Element Types с записью о выбранном типе конечного элемента

4.2. Создание геометрической модели снизу вверх

Геометрическая модель, прежде всего, предназначена для последующего создания на ее основе расчетной модели (сетки конечных элементов). Несмотря на то, что в комплексе МКЭ ANSYS объекты расчетной модели (узлы и элементы) могут создаваться и непосредственно, геометрическая модель

способствует ускорению создания расчетной модели и, при необходимости, ее изменению.

При создании модели снизу вверх сначала создаются точки, затем, на основе точек, линии, а далее поверхности и объемы. При этом геометрические объекты препроцессора имеют иерархию, которая требует при использовании метода снизу вверх для создания линий наличия точек, для создания поверхностей - наличия линий, а для создания объемов - наличия поверхностей.

Для создания объектов геометрической модели используется вызываемая из экранного меню следующая последовательность: **Preprocessor - Modeling Create**

В данном разделе экранного меню содержатся операции, позволяющие создавать различные объекты геометрической и расчетной моделей:

- > Keypoints - точки;
- > Lines - линии;
- > Areas - поверхности;
- > Volumes - объемы;
- > Nodes - узлы;
- > Elements - элементы;
- > Contact Pair - контактные пары (используются при расчете контактных задач);
- > Piping Models - модели трубопроводов;
- > Circuit - модели различных объектов, включая электрические сети, упругие демпферы и различные связи, пьезоэлектрические элементы и тому подобное;
- У Racetrack Coil - электромагнитные контуры;
- > Transducers - электромеханические преобразователи.

4.2.1. Создание точек

Для создания точек могут использоваться следующие операции:

- > On Working Plane - создание новой точки в имеющейся рабочей плоскости путем указания ее расположения мышью;
- > In Active CS - создание новой точки в активной системе координат при помощи специальной диалоговой панели;
- > On Line - создание новой точки, располагающейся на уже существующей линии (расположение точки указывается мышью);
- > On Line w/Ratio - создание новой точки, располагающейся на уже существующей линии (расположение точки указывается при помощи специальной диалоговой панели);
- > On Node - создание новой точки, координаты которой совпадают с координатами существующего узла;
- > KP between KPs - создание новой точки, располагающейся на условной линии, соединяющей 2 существующие точки (расположение точки указывается при помощи специальной диалоговой панели). Данная условная линия является

прямой в декартовой системе координат, и спиралью в цилиндрической системе координат;

- > Fill between KPs - создание нескольких новых точек, располагающихся на условной линии, соединяющей 2 существующие точки (расположение точек указывается при помощи специальной диалоговой панели);

- > KP at center - создание новой точки в центре окружности, проходящей через 3 существующие точки (операция имеет дополнительные возможности);

- > Hard PT on line - создание специального объекта, имеющего вид точки (жесткой точки, объекта типа hardpoint), на существующей линии;

- > Hard PT on area - создание специального объекта, имеющего вид точки (жесткой точки, объекта типа hardpoint), на существующей поверхности.

При вызове последовательности **Preprocessor - Modeling - Create Keypoints - In Active CS** на экране появляется диалоговая панель Create Keypoints in Active Coordinate System, показанная на рис. 4.4.

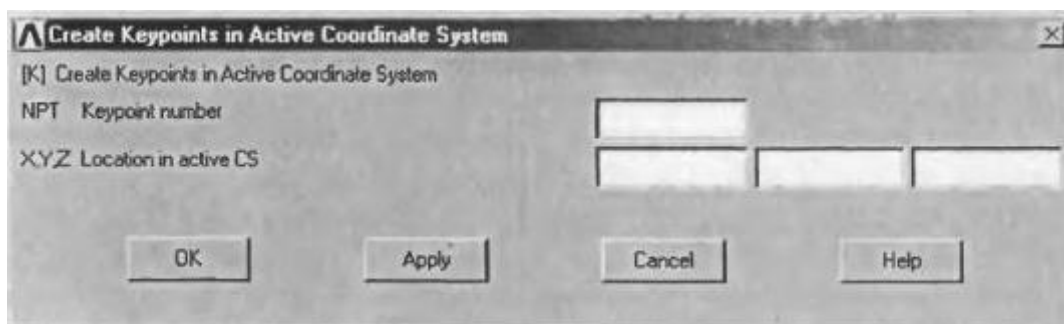


Рис. 4.4 - Диалоговая панель Create Keypoints in Active Coordinate System

В данной диалоговой панели в поле NPT Keypoint number указывается номер создаваемой точки (если номер точки не указывается, таковой назначается автоматически), а в поле X,Y,Z Location in active CS указываются координаты точки в действующей системе координат.

При вызове последовательности **Preprocessor Modeling => Create Keypoints On Line w/Ratio** на экране сначала появляется панель указания, при помощи которой указывается линия, на которой создается новая точка. Далее появляется диалоговая панель Create KP on Line (рис. 4.5), в которой в поле Line ratio (0-1) указывается относительная координата создаваемой точки на линии (поскольку относительная длина линии равна 1, это значение должно находиться в пределах от 0 до 1). Значение 0,5 соответствует созданию точки на середине линии. При указании других значений данной относительной координаты следует учитывать направление линии.

При вызове последовательности **Preprocessor Modeling - Create Keypoints - KP between KPs** на экране сначала появляется панель указания, при помощи которой указываются точки, между которыми создается новая точка. Далее появляется диалоговая панель KBETween options (рис. 4.6), в которой в поле [KBET]Value Type: указывается признак расположения точки (RATI, то есть относительная длина, или DIST, то есть длина), а в поле [KBET]Value (ratio, or distance): указывается значение этого расстояния. При

использовании данной операции относительное расстояние может превосходить значение 1.



Рис. 4.5 - Диалоговая панель Create KP on Line

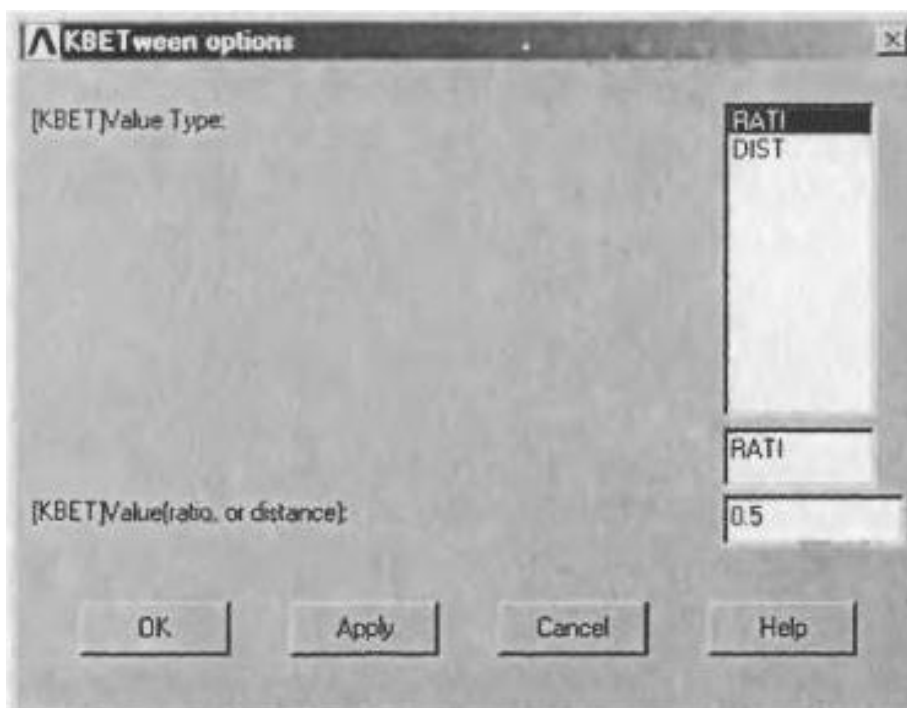


Рис. 4.6 - Диалоговая панель KBETween options

При вызове последовательности **Preprocessor Modeling Create - Keypoints - Fill between KPs** на экране сначала появляется панель указания, при помощи которой указываются точки, между которыми создаются новые точки. Далее появляется диалоговая панель **Create KP by Filling between KPs** (рис. 4.7).

В данной диалоговой панели в полях NP1, NP2 Fill between keypoints указываются номера исходных точек, между которыми создаются новые. В поле NFILL No of keypoints to fill указывается число создаваемых точек. В поле NSTRT Starting keypoint number указывается номер первой создаваемой точки. В поле NINC Inc. between filled keyups указывается приращение номеров

создаваемых точек. В поле SPACE Spacing ratio указывается отношение расстояний между создаваемыми точками.

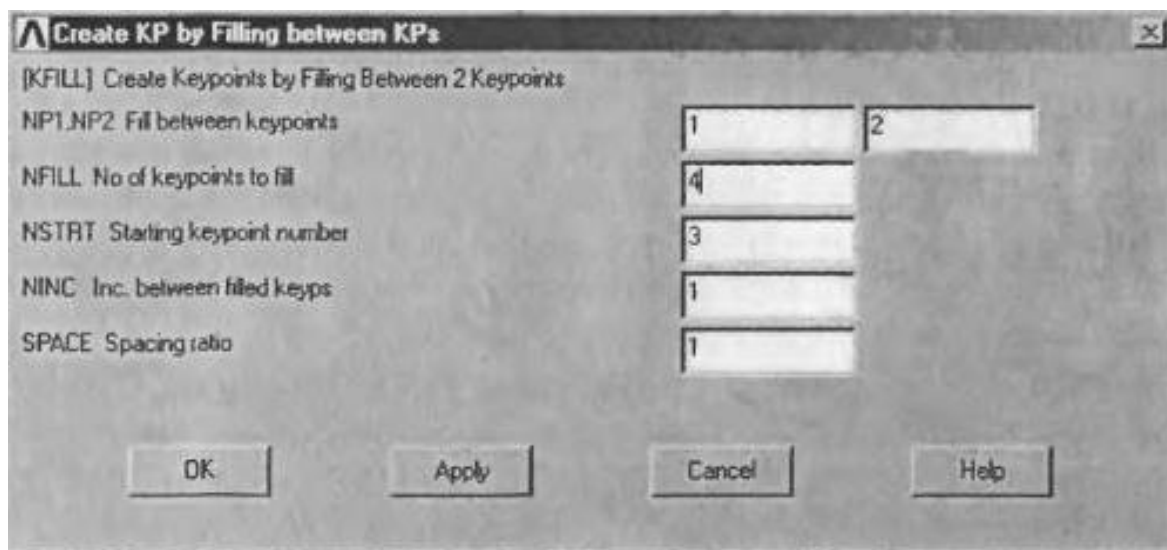


Рис. 4.7 - Диалоговая панель Create KP by Filling between KPs

4.2.2. Создание линий

Для создания линий могут использоваться следующие операции:

- > Lines - создание линий (в основном, прямых линий, спиралей в цилиндрической системе координат и некоторых иных типов линий);
- > Arcs - создание дуг окружностей;
- > Splines - создание сплайнов;
- > Line Fillet - создание галтелей между существующими линиями.

Операции построения собственно линий включают в себя следующие:

- > Straight Line - создание прямой линии (кратчайшей линии между 2 точками);
 - > In Active Coord - создание линии, имеющей постоянный наклон к осям активной системы координат (прямой в декартовой системе координат и спирали в цилиндрической системе координат);
 - > Overlaid on Area - создание линии, лежащей на указанной поверхности, и соединяющей 2 указанные пользователем точки;
 - > Tangent to Line - создание линии, касательной к существующей линии, и проходящей через указанные пользователем точку, лежащую на существующей линии и точку, являющуюся вторым концом создаваемой линии (данная операция требует существования линии и точки, не совпадающей с концами этой линии);
 - > Tan to 2 Line - создание линии, касательной к двум существующим линиям, проходящей через указываемые пользователем конечные точки этих линий;

- > Normal to Line - создание линии, перпендикулярной к существующей линии, и проходящей через указываемую пользователем точку (существующая линия в точке пересечения делится на 2 новых);
- > Norm to 2 Lines - создание линии, перпендикулярной к двум существующим линиям (существующие линии в точках пересечения делятся на 2 новых);
- > At angle to line - создание линии, проходящую через указываемую пользователем точку, и пересекающей существующую линию под указываемым пользователем углом. Значение данного угла указывается при помощи диалоговой панели Straight line at angle to line (рис. 4.8);

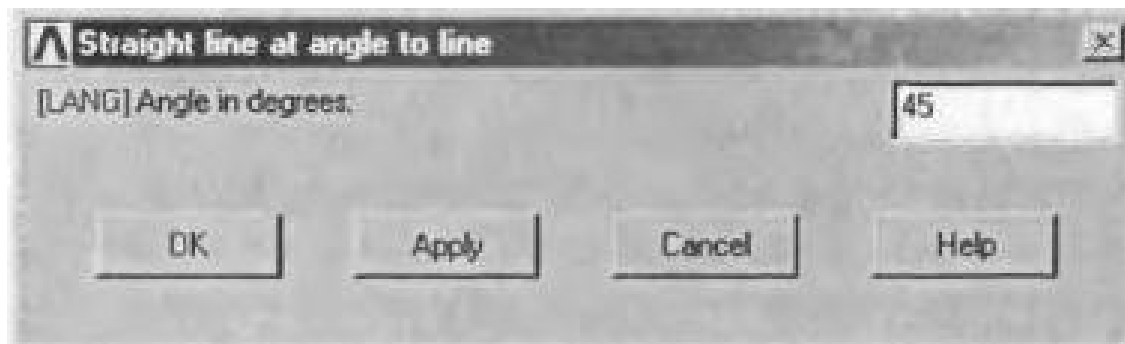


Рис. 4.8 - Диалоговая панель Straight line at angle to line

- > Angle to 2 Lines - создание линии, пересекающей 2 существующие под указанными пользователем углами. Значения данных углов задаются при помощи диалоговой панели Straight Line at Angle to 2 Lines (рис. 4.9).

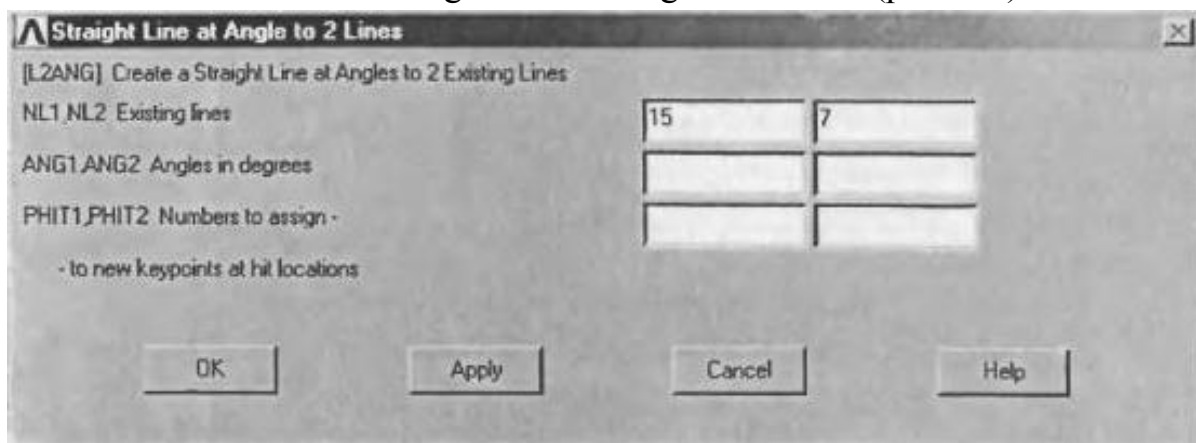


Рис. 4.9 - Диалоговая панель Straight Line at Angle to 2 Lines

Дуги окружностей создаются следующими операциями:

- > Through 3 KPs - построение дуги окружности по начальной, конечной и внутренней точкам дуги окружности;
- > By End KPs & Rad - построение дуги окружности по начальной и конечной точкам, и точке, заведомо лежащей внутри окружности (радиус

окружности указывается в поле RAD Radius of the Arc диалоговой панели Arc by End KPs & Radius, показанной на рис. 4.10).

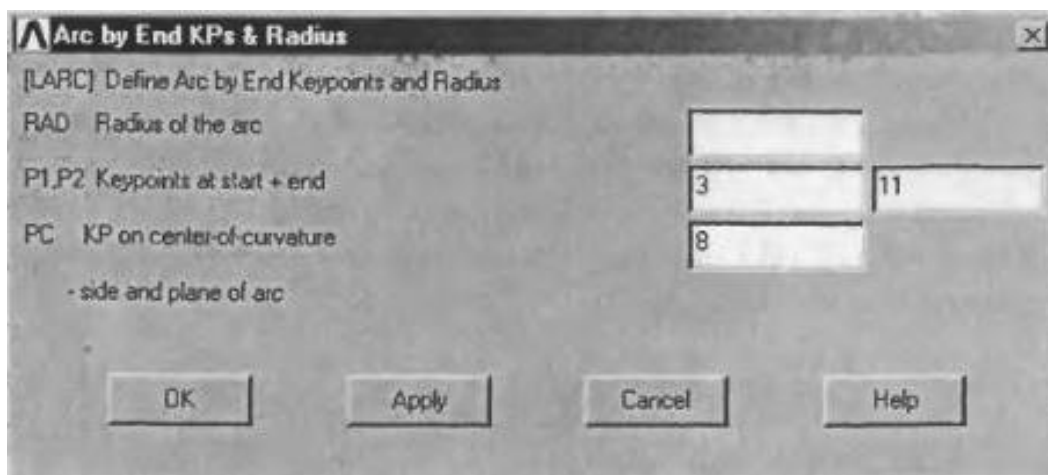


Рис. 4.10 - Диалоговая панель Arc by End KPs & Radius

У By Cent & Radius - построение дуги окружности по центру и радиусу (для указания точки центра и радиуса используется рабочая плоскость; длина дуги создаваемой окружности и число действительно создаваемых линий указывается в полях ARC Arc length in degrees и NSEG Number of lines in arc диалоговой панели Arc by Center & Radius, показанной на рис. 4.11).

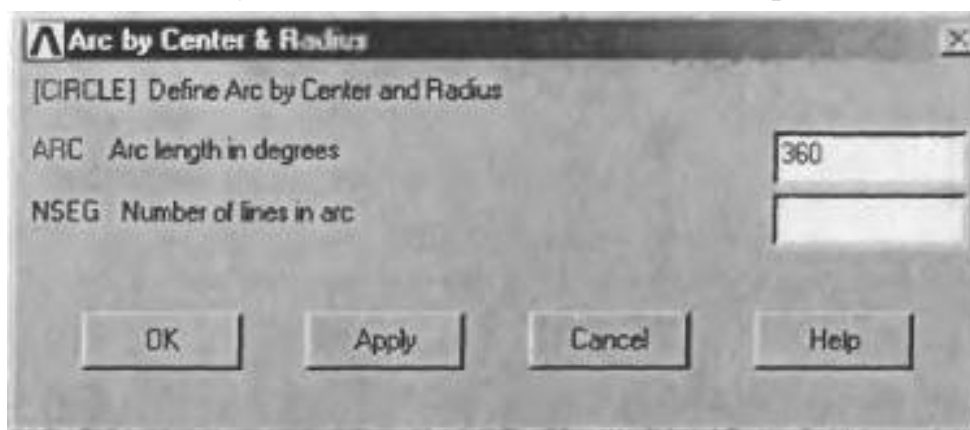


Рис. 4.11 - Диалоговая панель Arc by Center & Radius

> Full Circle - построение полной окружности по центру и радиусу (для указания точки центра и радиуса используется рабочая плоскость).

Сплайны создаются следующими операциями:

> Spline thru Locs - создание сплайна по начальной, конечной точкам и промежуточным точкам (на самом деле указываются только 2 точки, а промежуточные точки указываются на рабочей плоскости);

> Spline thru KPs - создание сплайна по начальной, промежуточным и конечной точкам;

> Segmented Spline - создание серии сплайнов, каждый из которых проходит только через 2 точки, имеющих идентичное направление касательных в общих конечных точках;

> With Options - те же самые перечисленные выше три операции, имеющие дополнительную возможность указания направления касательных в начальной и конечной точке создаваемого сплайна. Направления касательных указываются при помощи специальной диалоговой панели B-Spline, показанной на рис. 4.12.

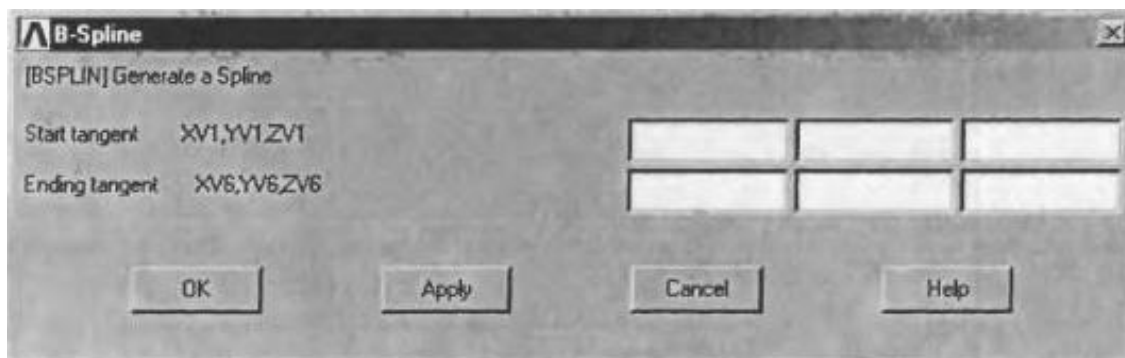


Рис. 4.12 - Диалоговая панель B-Spline

При построении галтели указываются 2 линии, имеющие общую точку. Радиус галтели указывается в поле RAD Fillet radius диалоговой панели Line Fillet, показанной на рис. 4.13.

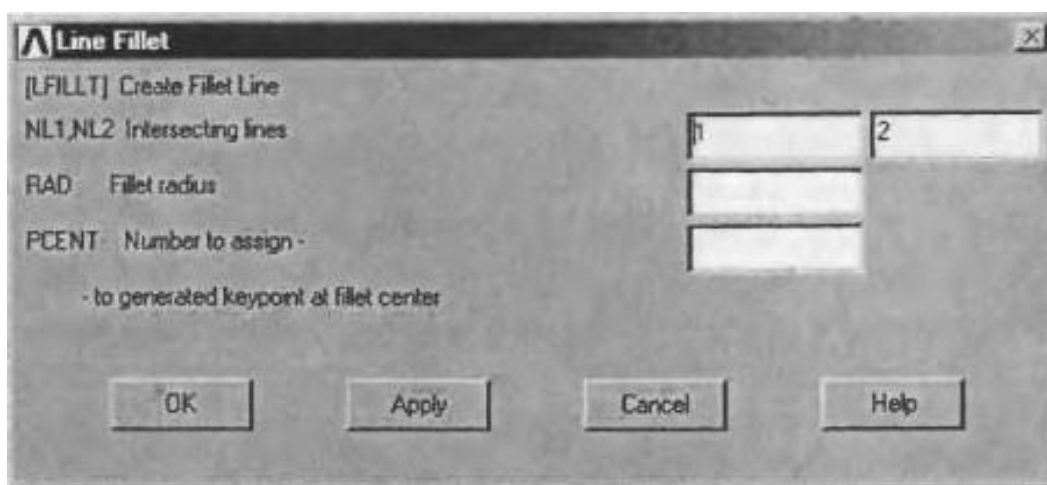


Рис. 4.13 - Диалоговая панель Line Fillet

4.2.3. Создание поверхностей

Операции создания поверхностей включают в себя следующие:

- > Arbitrary - создание поверхностей при помощи существующих точек, Линий или путем использования существующих поверхностей;
- > Rectangle - создание поверхностей прямоугольной формы;
- > Circle - создание круглых поверхностей;
- > Polygon - создание поверхностей - правильных многоугольников;
- > Area Fillet - создание галтели между двумя поверхностями.

Операции создания поверхностей на основе существующих объектов нижнего уровня (точек, линий) или при помощи отдельных операций над существующими поверхностями включают в себя следующие:

- > Through KPs - создание поверхности по точкам, являющимися конечными точками ребер поверхности. Если между точками существуют линии, эти линии будут являться ребрами новой поверхности. Если между точками линии отсутствуют, ребра будут являться прямыми линиями. Создание поверхности, имеющей более четырех ребер, не лежащих в одной плоскости, невозможно;

- > Overlaid on Area - создание поверхности по точкам и существующей поверхности. Ребра новой поверхности являются линиями, проведенными между указанными пользователем точками по данной поверхности;

- > By Lines - создание поверхности путем указания ее ребер. Все ребра должны попарно иметь общие конечные точки. Создание поверхности, имеющей более четырех ребер, не лежащих в одной плоскости, невозможно;

- > By Skinning - создание поверхности, проходящей через семейство не пересекающихся линий (аналог операций Loft, имеющихся в комплексах САД);

- > By Offset - создание поверхности путем перемещения существующей поверхности в направлении ее нормали. Величина перемещения указывается в поле DIST Offset distance диалоговой панели Create Area by Offset From Base Area (рис. 4.14).

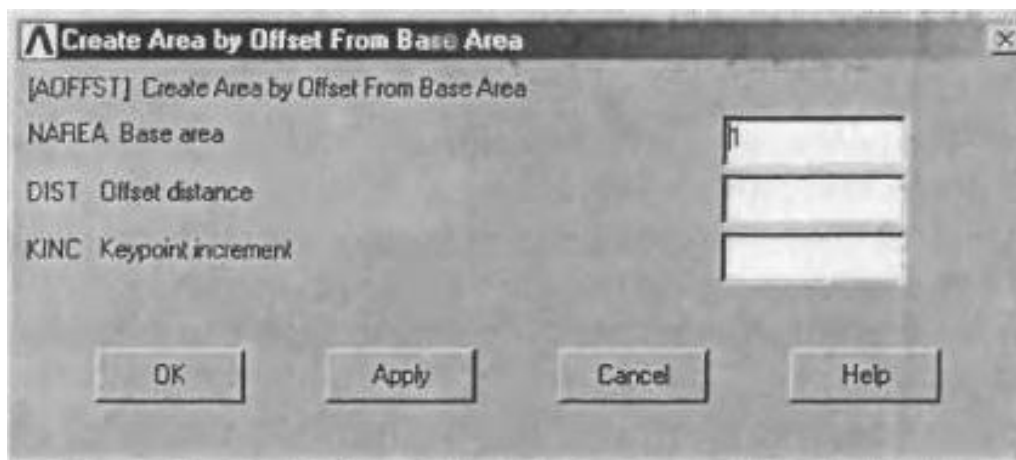


Рис. 4.14 - Диалоговая панель Create Area by Offset From Base Area

Построение галтели между двумя существующими поверхностями (Area Fillet) проводится путем указания двух пересекающихся поверхностей и радиуса галтели. Радиус указывается в поле RAD Fillet radius диалоговой панели Area Fillet (рис. 4.15).

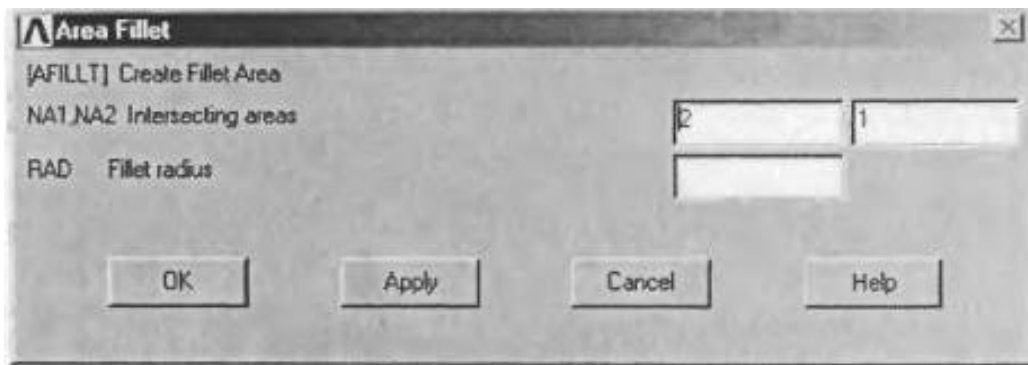


Рис. 4.15 - Диалоговая панель Area Fillet

4.2.4. Создание объемов

Операции создания поверхностей включают в себя следующие:

- > Arbitrary - создание объемов при помощи существующих точек или поверхностей;
- > Block - создание параллелепипедов;
- > Cylinder - создание цилиндров;
- > Prism - создание призматических объемов;
- > Sphere - создание сфер;
- > Cone - создание конусов;
- > Torus - создание торов.

Операции создания объемов на основе существующих точек или поверхностей включают в себя следующие:

- > V Through KPs - создание объема путем указания точек – его вершин. При создании объема следует указывать точки в порядке обхода таковых по правой восходящей спирали;
- > By Areas - создание объема путем замыкания поверхностей. Все поверхности должны иметь общие ребра, а каждое ребро должно использоваться только 2 раза.

4.3. Копирование, масштабирование и иные операции создания геометрических объектов

Процедура создания геометрической модели не ограничивается только операциями ее последовательного формирования снизу вверх или прямого - сверху вниз. Препроцессор комплекса МКЭ ANSYS допускает и иные методы подготовки геометрической модели. К этим методам относятся операции создания геометрических объектов путем экструзии (вытягивания или выдавливания) объектов вдоль линий или на указанное пользователем расстояние, вращения таковых вокруг осей, копирования, масштабирования, переноса, отражения относительно плоскостей, и иные.

Данные операции с объектами также вызываются из экранного меню:

- > Operate - операции создания и вычисления характеристик геометрических объектов, к которым, в свою очередь, относятся:
 - > Extrude- операции экструзии (вытягивания или выдавливания) объектов и создания тел (и поверхностей) вращения;
 - > Extend Line - операция продления линий;
 - > Boolean - логические (Булевы) операции (см. следующую главу);
 - > Scale - операции масштабирования объектов;
 - > Calc Geom Items - операции вычисления характеристик геометрических объектов (объема, моментов инерции и других);
 - > Move / Modify - перенос и изменение отдельных характеристик геометрических объектов;
 - > Copy - операции копирования объектов;
 - > Reflect - операции отражения объектов;
 - > Check Geom- контроль формы геометрических объектов;
 - > Delete - удаление объектов.

4.3.1. Операции вытягивания и вращения объектов

Операции вытягивания и вращения объектов вызываются из экранного меню последовательностью **Preprocessor – Modeling - Operate**:

> Elem Ext Opts - указание типа элемента, номера материала, номера набора геометрических характеристик, номера системы координат элемента и характерных размеров конечных элементов в случае, если вместе с новым геометрическим объектом проводится создание на его основе и фрагмента сетки конечных элементов.

Все данные свойства указываются при помощи диалоговой панели Element Extrusion Options, показанной на рис. 4.16.

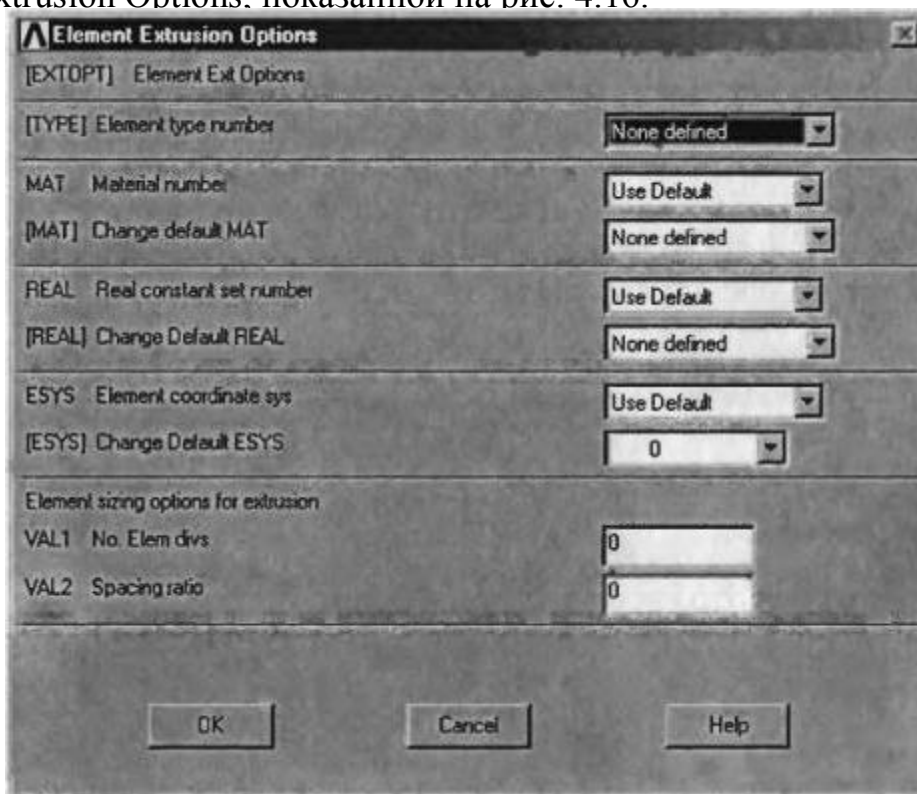


Рис. 4.16 - Диалоговая панель Element Extrusion Options

В данной диалоговой панели в раскрывающемся списке [TYPE] Element type number указывается тип элемента, используемого при создании сетки вместе с новым геометрическим объектом. В списке MAT Material number можно выбрать признак Use Default (номер материала, применяемого по умолчанию) или From Areas (номер материала, указанный для поверхностей; это существенно при создании поверхностей, получаемых перемещением поверхностей) В списке [MAT] Change default MAT можно указать номер применяемого материала. Аналогично, указываются номера геометрических характеристик (соответственно, списки REAL Real constant set number и [REAL] Change Default REAL), и номер системы координат элементов (списки ESYS Element coordinate sys и [ESYS] Change Default ESYS). В поле VAL1 Na Elem divs указывается число элементов, создаваемых вдоль линии, по которой проводится вытягивание, или в направлении перемещения исходного объекта. В поле VAL2 Spacing ratio указывается соотношение размеров создаваемых элементов;

> Areas — операции вытягивания и поворота поверхностей (для создания объемов);

> Lines - операции вытягивания и поворота линий (для создания поверхностей);

> Keypoints - операции вытягивания и поворота точек (для создания линий).

Операции вытягивания и вращения поверхностей включают в себя следующие:

> Along Normal - создание объема путем перемещения поверхности в направлении ее нормали. При вызове данной операции на экране появляется панель указания Extrude Area by Norm, и поверхности, на основе которых создаются объемы, они выбираются мышью на экране (или их номера указываются в текстовом поле панели). После вызова в панели указания кнопок О К или Apply на экране появляется диалоговая панель Extrude Area along Normal, показанная на рис. 4.17.

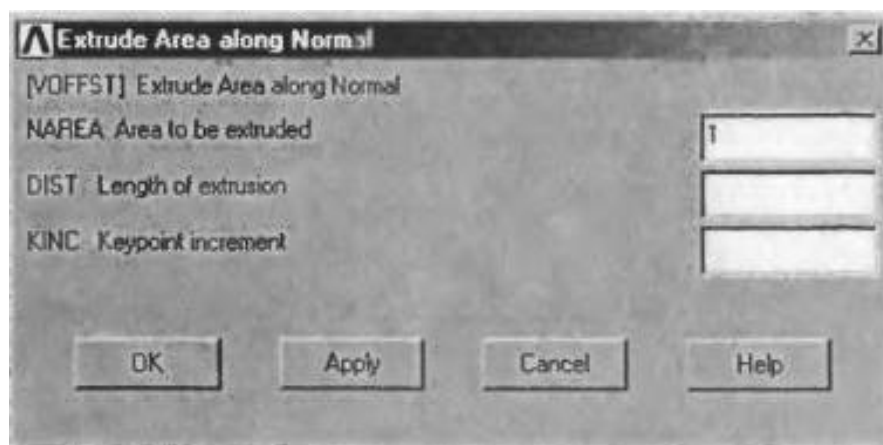


Рис. 4.17 - Диалоговая панель Extrude Area along Normal

В данной диалоговой панели в поле NAREA Area to be extruded указываются номера используемых поверхностей. В поле DIST Length of extrusion указывается расстояние вдоль нормали, на которое перемещаются поверхности. В поле KINC Keypoint increment (приращение номеров точек) можно ничего не указывать.

> By XYZ Offset - создание объема путем перемещения поверхности на указанные расстояния. При вызове данной операции на экране появляется панель указания Extrude Area by Offset, и поверхности, на основе которых создаются объемы, указываются мышью на экране (или их номера указываются в текстовом поле панели указания). После вызова в панели указания кнопок ОК или Apply на экране появляется диалоговая панель Extrude Areas by XYZ Offset, показанная на рис. 4.18.

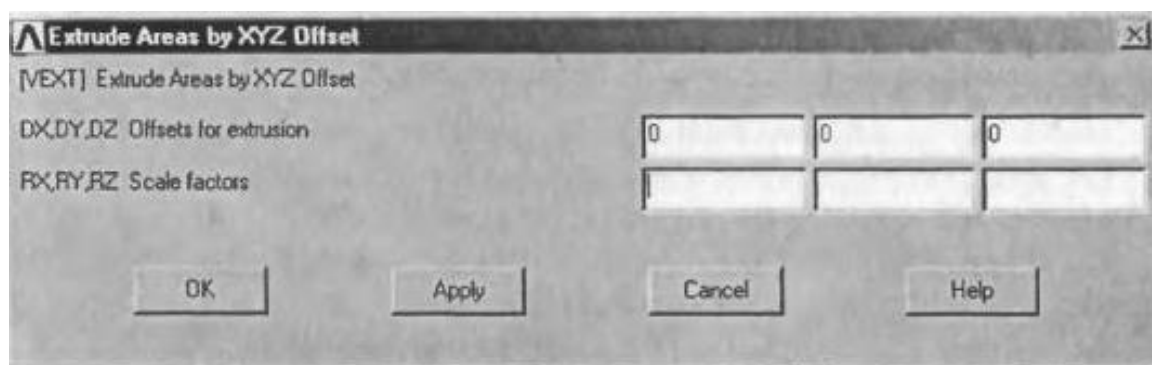


Рис. 4.18 - Диалоговая панель Extrude Areas by XYZ Offset

В данной диалоговой панели в полях DX, DY, DZ Offset for extrusion указываются расстояния вдоль осей X, Y и Z, на которые перемещается указанная поверхность, а в полях RX, RY, RZ Scale factors - коэффициенты, на которые умножаются размеры исходной поверхности при ее перемещении. Значения этих коэффициентов могут не совпадать;

> About Axis - создание объема путем вращения поверхности вокруг оси. При вызове данной операции на экране появляется панель указания Sweep Areas about Axis, и пользователь должен указать поверхность (одну или несколько). Далее в панели указания следует нажать кнопку Apply. Далее также указываются 2 точки, образующие ось вращения. После вызова в панели указания кнопок ОК или Apply на экране появляется диалоговая панель Sweep Areas about Axis, показанная на рис. 4.19.

В данной диалоговой панели в поле ARC Arc length in degrees указывается угол поворота поверхности, а в поле NSEG No. of volume segment - число создаваемых объемов;

> Along Lines - создание объемов путем вытягивания поверхностей по линиям. При помощи панели указания сначала указываются поверхности (можно более одной), а затем линии, вдоль которых проводится вытягивание. Диалоговые панели при этом не используются.



Рис. 4.19 - Диалоговая панель Sweep Areas about Axis

В состав операции вытягивания и вращения линий входят следующие:

- > About Axis - создание поверхности путем вращения линии вокруг оси. При выполнении данной операции сначала указываются вращаемые линии, затем 2 точки, лежащие на оси вращения, и после этого на экране появляется диалоговая панель Sweep Lines about Axis. В данной диалоговой панели в поле ARC Arc length in degrees указывается угол поворота линии, а в поле NSEG No of area segment - число создаваемых поверхностей;

- > Along Lines - создание поверхности путем перемещения линий вдоль других линий. При помощи панели указания сначала указываются линии, вытягиваемые в поверхность (можно более одной), а затем линии, вдоль которых проводится вытягивание. Диалоговые панели при этом не используются.

В состав операции вытягивания и вращения точек входят следующие:

- > About Axis - вращение точки. При действии данной операции создается дуга окружности. Создание линии абсолютно аналогично описанным выше операциям создания объемов путем вращения поверхности и создания поверхности путем вращения линии;

- > Along Lines - вытягивание точки в линию вдоль линии (линий), указанных пользователем.

4.3.2. Операции переноса геометрических объектов

Операции переноса геометрических объектов вызываются из экранного меню последовательностью **Preprocessor Modeling - Move/Modify**:

- > Keypoints - операции переноса точек.
- > Lines - операции переноса линий;
- > Areas - операции переноса поверхностей;
- > Volumes - операции переноса объемов;
- > Nodes - операции переноса узлов;
- > Rotate Node CS - операции поворота узловых систем координат;
- > Elements - операции переноса элементов;
- > Transfer Coord - операции передачи объектов в другую систему координат;

> Reverse Normals - операции изменения нормалей (для поверхностей, элементов оболочек и т. д.).

В состав операций переноса точек входят следующие:

> Set of KPs - фактически, операция присвоения точкам новых значений координат. Эти значения координат указываются при помощи специальной диалоговой панели, вид которой не должен вызвать у пользователя особых сложностей (поскольку в ней указываются только эти новые координаты точки);

> Single KP - операция присвоения одной точке новых значений координат. Новое положение точки указывается мышью на рабочей плоскости;

> To Intersect - достаточно интересная операция переноса точки, использующая специальную диалоговую панель. Точка переносится из старого расположения в новое, которое указывается сразу в двух системах координат.

При этом для точки все равно указываются только 3 координаты. Представляется, что при правильной подготовке геометрической информации вызов данной операции является избыточным

При переносе линии указываются 3 значения изменения координат (по осям X, Y и Z)

Для поверхностей существует две операции переноса:

> Areas - перенос поверхности в пространстве. При этом указываются 3 значения изменения координат (по осям X, Y и Z);

> Area Normals - изменения направления нормали к поверхности. Операция предназначена для согласования направления нормалей нескольких поверхностей. Пользователь указывает поверхность, имеющую «правильное» направление нормали. При выполнении данной операции на экране появляется диалоговая панель, имеющая несложный вид, в которой можно указать признак сохранения направлений нормалей существующих элементов оболочек.

Для объемов существует только одна операция переноса. При этом указываются 3 значения изменения координат (по осям X, Y и Z).

Операции переноса узлов в пространстве применяются в случае, когда фрагменты сетки создаются без помощи геометрической модели. При наличии геометрической модели выполнение данных операций не требуется.

Операции поворота узловых систем координат (Rotate Node CS) применяются, как правило, для правильного приложения граничных условий к узлам. В состав данных операций входят следующие:

> To Surf Norm - операции изменения узловых систем координат в соответствии с направлением нормали к поверхности:

>On Area - системы координат узлов приводятся в соответствие с направлением нормали к поверхности;

>On Lines - системы координат узлов приводятся в соответствие с направлением системы координат линии;

> with Area - системы координат узлов, созданных на линии, приводятся в соответствие с направлением системы координат поверхности, дополнительно указываемой пользователем;

> To Active CS - присвоение узлам активной системы координат. Данная операция может применяться, например, для указания ограничений в цилиндрической системе координат (запрета осевых или окружных перемещений);

> By Angle - поворот узловой системы координат для указанного узла на указываемые при помощи специальной диалоговой поверхности узлы;

> By Vectors - указание для узла новой узловой системы координат. При этом в специальной диалоговой поверхности указываются 3 координаты для вектора, соответствующего оси X, 3 - для оси Y и 3 для оси Z.

Как представляется, наиболее простой и действенной последовательностью операций является предварительное создание новой системы координат (или выбор одной из предварительно существующих), объявление таковой активной, и последующий перенос систем координат узлов в нее последовательностью **Preprocessor – Modeling - Move/Modify - Rotate Node CS - To Active CS**

Перенос объектов в другую систему координат (**Preprocessor - Modeling - Move/Modify - Transfer Coord**) используются сравнительно редко.

Изменение направления нормали к объекту (Reverse Normals) может применяться для элементов оболочек (of Shell Elems), для линий (of Lines) и для поверхностей (of Areas). При этом объект просто указывается на экране. Никаких специальных диалоговых панелей для данных операций не предусмотрено.

4.3.3. Операции копирования объектов

Для копирования объектов предназначены следующие операции:

> Keypoints - копирование точек. При вызове данной операции на экране сначала появляется панель указания, при помощи которой указываются копируемые точки, а далее - диалоговая панель Copy Keypoints, показанная на рис. 4.20.

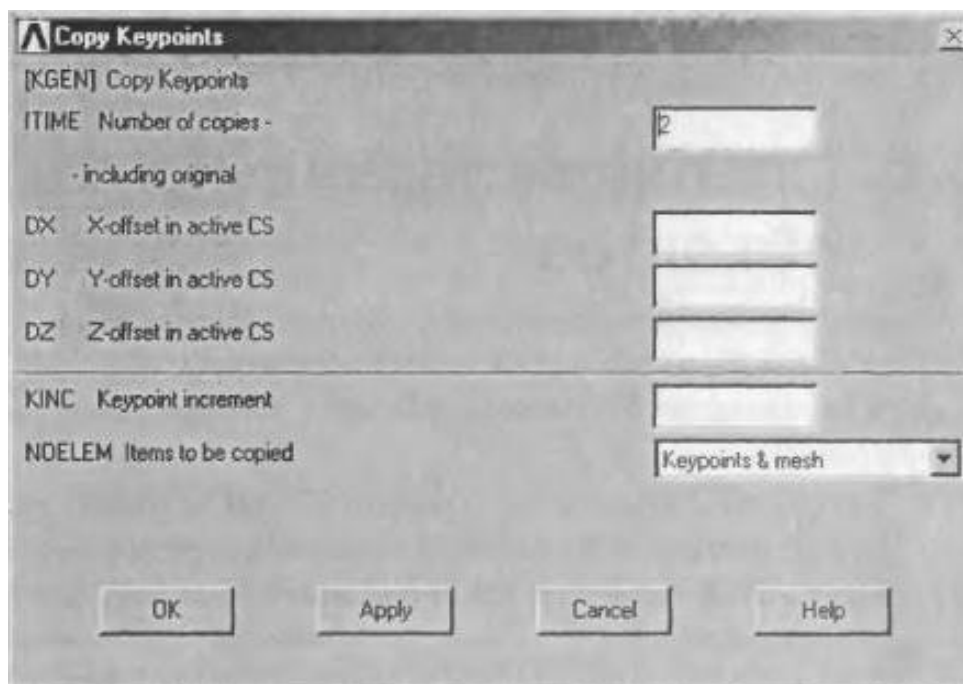


Рис. 4.20 - Диалоговая панель Copy Keypoints

В данной диалоговой панели в поле ITIME Number of copies указывается число копий создаваемых объектов, включая исходные (то есть для создания одной копии указывается значение 2, для создания двух копий - 3 и т. д.). В поле DX X-offset in active CS указывается перемещение объектов по оси X, в поле DY Y-offset in active CS указывается перемещение объектов по оси Y, в поле DZ Z-offset in active CS указывается перемещение объектов по оси Z. В поле KINC Keypoint increment (приращение номеров точек) можно ничего не указывать. В выпадающем списке NOELEM Items to be copied указывается признак создания фрагментов сеток на создаваемых объектах - Keypoints & mesh (сетка создается) или Keypoints only (сетка не создается). Для создания копий путем вращения исходных объектов вокруг оси следует применять цилиндрическую систему координат;

- > Lines - копирование линий. Используемая при этом диалоговая панель принципиально ничем не отличается от диалоговой панели Copy Keypoints, показанной на рис. 4.20;

- > Areas - копирование линий. Используемая при этом диалоговая панель принципиально ничем не отличается от диалоговой панели Copy Keypoints, показанной на рис. 4.20;

- > Volumes - копирование объемов. Используемая при этом диалоговая панель принципиально ничем не отличается от диалоговой панели Copy Keypoints, показанной на рис. 4.20;

- > Line Mesh - копирование сетки, существующей на линии. Данная операция применяется, в основном, для расчета циклически симметричных конструкций;

- > Area Mesh - копирование сетки, существующей на поверхности. Данная операция применяется, в основном, для расчета циклически симметричных конструкций;

- > Nodes - копирование узлов. Если расчетная модель создавалась на основе геометрической модели (что, как правило, и делается), применение данной операции не требуется;

- > Elements - копирование элементов. Если расчетная модель создавалась на основе геометрической модели, применение данной операции не требуется.

4.3.4. Операции зеркального отражения объектов

Операции зеркального отражения объектов выполняются относительно плоскостей XY, YZ и ZX активной системы координат.

Для зеркального отражения объектов предназначены следующие операции:

- > Keypoints - зеркальное отражение точек. При вызове данной операции на экране сначала появляется панель указания, при помощи которой указываются отражаемые точки, а затем диалоговая панель Reflect Keypoints, показанная на рис. 4.21.

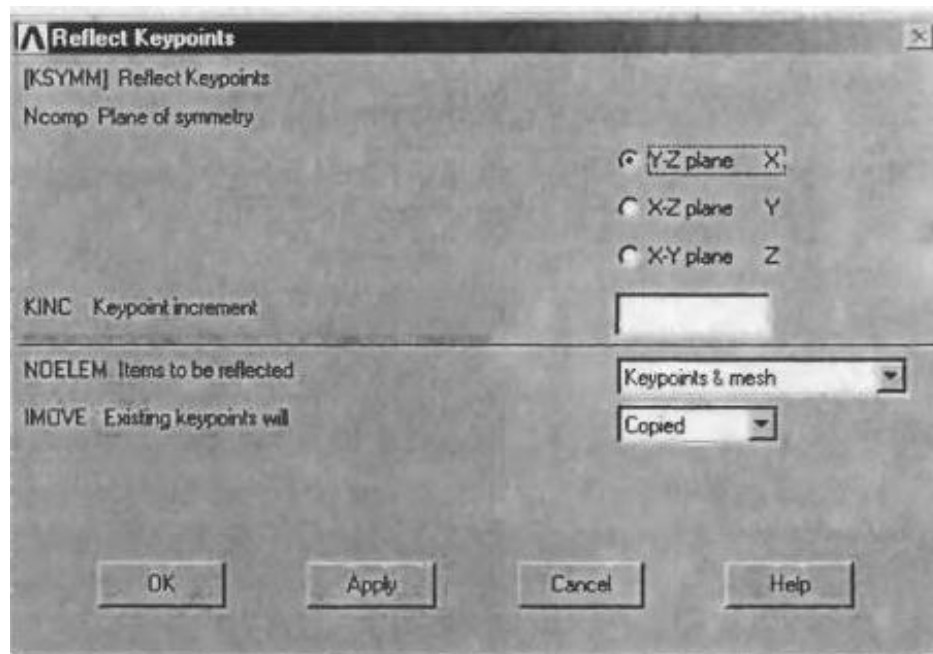


Рис. 4.21 - Диалоговая панель Reflect Keypoints

В данной диалоговой панели в области Ncomp Plane of symmetry переключатель Y-Z plane X соответствует отражению относительно плоскости YZ, переключатель X-Z plane Y соответствует отражению относительно плоскости ZX, а переключатель X-Y plane Z-отражению относительно плоскости XY. В поле KINC Keypoint increment (приращение номеров точек) можно ничего не указывать. В выпадающем списке NOELEM Items to be copied указывается признак создания фрагментов сеток на создаваемых объектах - Keypoints & mesh (сетка создается) или Keypoints only (сетка не создается). В выпадающем списке IMOVE Existing keypoints will нужно указать признак Copied (исходные точки сохраняются) или Moved (исходные точки перемещаются);

> Lines - зеркальное отражение линий. Используемая при этом диалоговая панель принципиально ничем не отличается от диалоговой панели Reflect Keypoints, показанной на рис. 4.21;

> Areas - зеркальное отражение поверхностей. Используемая при этом диалоговая панель принципиально ничем не отличается от диалоговой панели Reflect Keypoints, показанной на рис. 4.21;

> Volumes - зеркальное отражение объемов. Используемая при этом диалоговая панель принципиально ничем не отличается от диалоговой панели Reflect Keypoints, показанной на рис. 4.21;

> Nodes - зеркальное отражение узлов. Если расчетная модель создавалась на основе геометрической модели (что, как правило, и делается), применение данной операции не требуется;

> Elements - зеркальное отражение элементов. Если расчетная модель создавалась на основе геометрической модели, применение данной операции не требуется.

4.3.5. Операции удаления геометрических объектов

В состав операций удаления объектов входят следующие:

- > Keypoints - удаление точек, не входящих в состав каких-либо линий;
- > Hard Points - удаление жестких точек;
- > Lines Only - удаление линий, не входящих в состав каких-либо поверхностей. Точки, принадлежащие удаляемым линиям, при этом сохраняются;
- > Line and Below - удаление линий, не входящих в состав каких-либо поверхностей. Точки, принадлежащие удаляемым линиям, при этом также удаляются;
- > Areas Only- удаление поверхностей, не входящих в состав каких-либо объемов. Линии и точки, принадлежащие удаляемым поверхностям, при этом сохраняются;
- > Area and Below - удаление поверхностей, не входящих в состав каких-либо объемов. Линии и точки, принадлежащие удаляемым поверхностям, при этом также удаляются;
- > Volumes Only - удаление объемов Поверхности, линии и точки, принадлежащие удаляемым объемам, при этом сохраняются;
- > Volume and Below - удаление объемов. Поверхности, линии и точки, принадлежащие удаляемым объемам, при этом также удаляются;
- > Nodes - удаление узлов. Если расчетная модель создавалась на основе геометрической модели (что, как правило, и делается), применение данной операции не требуется;
- > Elements - удаление элементов. Если расчетная модель создавалась на основе геометрической модели, применение данной операции не требуется;
- > Pre-tens Elements - удаление предварительно напряженных элементов (типа PRETS179);
- > Del Concats - удаление связности геометрических объектов, предназначенной для упрощения создания сеток конечных элементов.

При удалении геометрических объектов никаких диалоговых панелей не применяется.

В состав операций геометрического моделирования дополнительно входят следующие:

- > Cyclic Sector - моделирование сектора циклически симметричной конструкции. Данные операции предназначены для упрощения расчета дисков, маховиков и аналогичных конструкций;
- > Genl plane strn - моделирование обобщенного плоского деформированного состояния;
- > Update Geom - изменение геометрии модели в соответствии с результатами предыдущего расчета (обычно применяется при выполнении нелинейных расчетов).

4.4. Логические (Булевы) операции

Логические (булевы) операции предназначены для создания новых геометрических объектов путем построения объединения исходных объектов, пересечения объектов и иных действий

Булевы операции вызываются из экранного меню последовательностью **Preprocessor - Modeling - Operate - Booleans:**

- > Intersect - построение пересечения объектов;
- > Add - объединение объектов;
- > Subtract - вычитание объектов;
- > Divide - разделение объектов на части;
- > Glue - создание объектов, имеющих согласованные границы, на основе объектов, имевших частично совпадавшие границы;
- > Overlap - создание объектов, имеющих согласованные границы, на основе частично перекрывавшихся объектов (выделение пересечений объектов);
- > Partition - создание объектов, имеющих согласованные границы, на основе частично перекрывавшихся объектов (выделение пересечений объектов). В отличие от операций из группы Overlap, исходные объекты, не связанные с прочими, не удаляются;
- > Settings - указание настроек булевых операций;
- > Show Degeneracy - операции проверки формы геометрических объектов.

4.4.1. Операции построения пересечения объектов

Операции построения пересечения объектов включают в себя следующие:

- > Common - создание общего пересечения объектов;
- > Volumes - создание общего пересечения объемов;
- > Areas - создание общего пересечения поверхностей;
- > Lines - создание общего пересечения линий;
- > Pairwise - создание попарного пересечения объектов (объемов, поверхностей и линий). Данные операции отличаются от операций из группы Common тем, что создаваемые объекты могут входить в состав не всех исходных объектов, а только части таковых;
- > Area with Volume - создание пересечения поверхности и объема (то есть поверхности, входящей одновременно в состав исходной поверхности и находящейся внутри объема). Исходные объекты (поверхность и объем) при выполнении операции удаляются;
- > Line with Volume - создание пересечения линии и объема (то есть линии, входящей одновременно в состав исходной линии и находящейся внутри объема). Исходные объекты (линия и объем) при выполнении операции удаляются;
- > Line with Area - создание пересечения линии и поверхности. Исходные объекты (линия и поверхность) при выполнении операции удаляются.

При выполнении данных операций применяются только панели указания. Никакие диалоговые панели не используются.

4.4.2. Операции объединения объектов

Операции объединения объектов включают в себя следующие:

- > Volumes - объединение объемов;
- > Areas - объединение поверхностей;
- > Lines - объединение линий.

При выполнении данных операций применяются только панели указания. Никакие диалоговые панели не используются.

4.4.3. Операции вычитания объектов

Операции вычитания объектов включают в себя следующие:

> Volumes - вычитание объемов (при выполнении данной операции при помощи панели указания сначала указывается объем, из которого проводится вычитание, а затем вычитаемый объем);

> Areas - вычитание поверхностей (при выполнении данной операции при помощи панели указания сначала указывается поверхность, из которой проводится вычитание, а затем вычитаемая поверхность);

> Lines - вычитание линий (при выполнении данной операции при помощи панели указания сначала указывается линия, из которой проводится вычитание, а затем вычитаемая линия);

> With Options - вычитание объектов с дополнительными опциями:

- > Volumes - вычитание объемов;
- > Areas - вычитание поверхностей;
- > Lines - вычитание линий.

При использовании варианта операций с дополнительными опциями на экране появляется диалоговая панель, вид которой для случая вычитания объемов (Subtract Volumes with Options) показан на рис. 4.22.

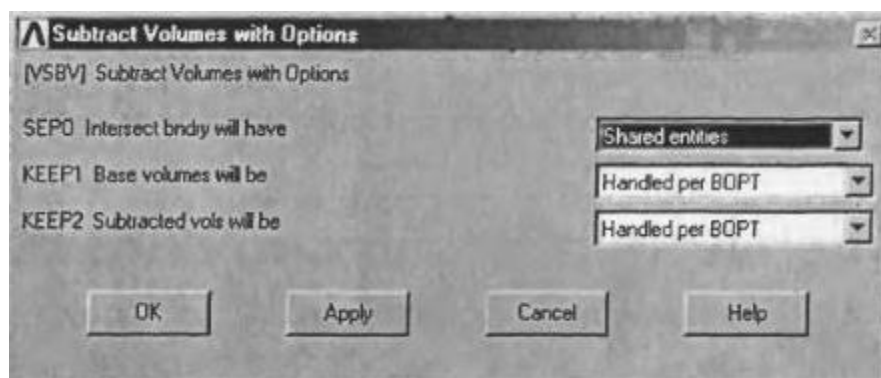


Рис. 4.22 - Диалоговая панель Subtract Volumes with Options

В данной диалоговой панели в выпадающем списке SEPO Intersect bndry will have можно выбрать опции Shared entities (при вычитании из нескольких объемов полученные объемы имеют согласованные границы) или Separate entity (при вычитании из нескольких объемов полученные объемы имеют несогласованные границы). В выпадающем списке KEEP1 Base volumes will be (признак сохранения объемов, из которых проводится вычитание) можно выбрать опции Handled per BOPТ (в соответствии с настройками команды), Keep (объекты сохраняются) и Deleted (объекты удаляются). Те же опции можно указывать и в списке KEEP2 Subtracted vols will be.

Такие же диалоговые панели появляются и при вычитании поверхностей и линии с дополнительными опциями.

Поскольку булевы операции являются достаточно сложными и требуют существенных затрат процессорного времени, операции вычитания из нескольких объектов (особенно объемов) нескольких других объектов следует применять с осторожностью.

4.4.4. Операции создания общих границ у смежных объектов

Данные операции вызываются из экранного меню последовательностью **Preprocessor Modeling - Operate - Booleans - Glue:**

- > Volumes - создание общих поверхностей у смежных объемов;
- > Areas - создание общих линий у смежных поверхностей;
- > Lines - создание общих точек у смежных линий.

При выполнении данных операций применяются только панели указания. Никакие диалоговые панели не используются.

4.4.5. Операции создания объектов, имеющих общие границы, на основе частично перекрывавшихся объектов

Данные операции вызываются из экранного меню последовательностью **Preprocessor - Modeling - Operate - Booleans - Overlap:**

- > Volumes - создание объемов на основе совокупности частично перекрывающихся объемов;
- > Areas - создание поверхностей на основе совокупности частично перекрывающихся поверхностей;
- > Lines - создание линий на основе совокупности частично перекрывающихся линий.

При выполнении данных операций применяются только панели указания. Никакие диалоговые панели не используются.

Операции группы Partition практически воспроизводят операции группы Overlap.

Настройки выполнения булевых операций вызываются их экранного меню последовательностью **Preprocessor => Modeling => Operate => Booleans => Settings**. Настройки указываются при помощи диалоговой панели Boolean Operation Settings, показанной на рис. 4.23.

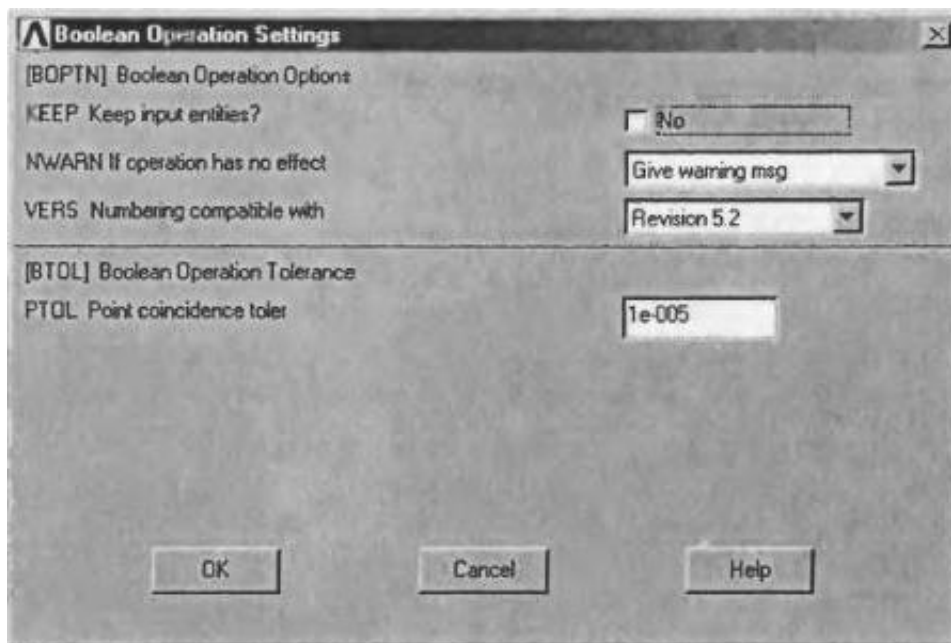


Рис. 4.23 - Диалоговая панель Boolean Operation Settings

В данной диалоговой панели значение признака KEEP Keep input entities, равное No, соответствует удалению исходных объектов, а равное Yes - сохранению исходных объектов. Значения, стоящие в полях (списках) NWARN if operation has no effect и VERS Numbering compatible with изменять не следует. Значение, указанное в поле PTOL Point coincidence toler, является допуском точности выполняемых булевых операций. Изменение этого значения без особой необходимости не требуется.

Наконец, операции группы Show Degeneracy воспроизводят операции, описанные выше.

4.5. Создание сетки конечных элементов

Операции создания сетки конечных элементов на основе геометрической модели также проводятся в среде препроцессора. К этим операциям относятся следующие:

- > Mesh Attributes - указание атрибутов сетки (типов конечных элементов, номеров материалов, наборов геометрических характеристик и прочих);
- > MeshTool - вызов специальной диалоговой панели, предназначенной для упрощения построения сетки;
- > Size Cntrl - указание характерных размеров конечных элементов;
- > Mesher Opts - указание опций создания сетки конечных элементов;
- > Concatenate - указание связности объектов, необходимой при создании сетки на геометрических объектах сложной формы;
- > Mesh - собственно операции создания сетки;
- > Modify Mesh - улучшение сетки в отдельных областях геометрической модели;
- > Check Mesh - проверка качества созданной сетки;
- > Clear - удаление сетки с объектов геометрической модели.

Операции указания атрибутов сетки для различных типов геометрических объектов включают в себя следующие:

- > Default Attribs - указание атрибутов, применяемых по умолчанию;
- > All Keypoints - указание атрибутов для всех точек, имеющих в активном наборе;
- > Picked KPs - указание атрибутов для точек, выборочно указываемых пользователем;
- > All Lines - указание атрибутов для всех линий, имеющих в активном наборе;
- > Picked Lines - указание атрибутов для линий, выборочно указываемых пользователем;
- > All Areas - указание атрибутов для всех поверхностей, имеющих в активном наборе;
- > Picked Areas - указание атрибутов для поверхностей, выборочно указываемых пользователем;
- > All Volumes - указание атрибутов для всех объемов, имеющих в активном наборе;
- > Picked Volumes - указание атрибутов для объемов, выборочно указываемых пользователем.

При указании атрибутов, применяемых по умолчанию (**Main Menu - Preprocessor - Meshing - Mesh Attributes - Default Attribs**) используется диалоговая панель Meshing Attributes, показанная на рис. 4.24.

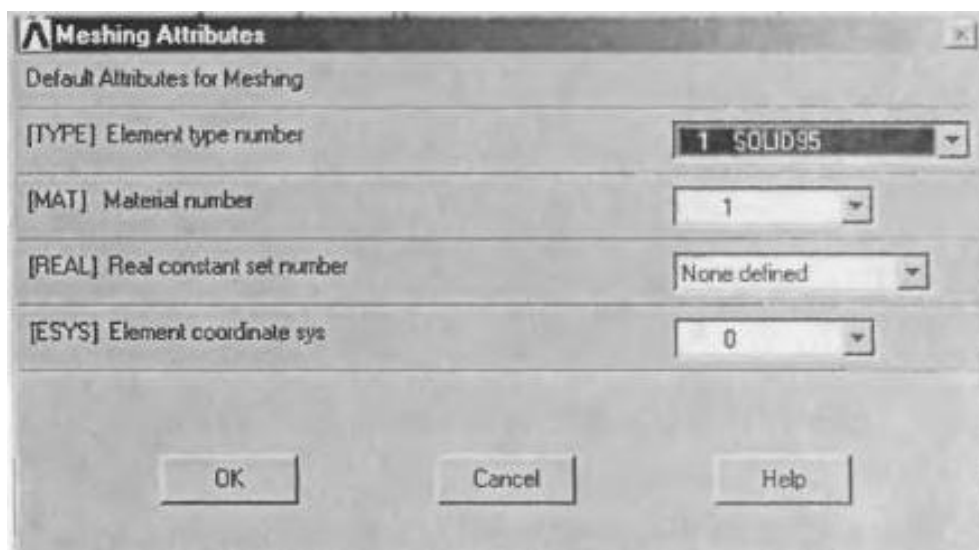


Рис. 4.24 - Диалоговая панель Meshing Attributes

В данной диалоговой панели в раскрывающемся списке [TYPE] Element type number указывается номер типа элемента, применяемого по умолчанию. В раскрывающемся списке [MAT] Material number указывается номер материала. В раскрывающемся списке [REAL] Real constant set number указывается номер набора геометрических характеристик. В раскрывающемся списке [ESYS] Element coordinate sys указывается номер системы координат, в которой указываются свойства материала.

При указании атрибутов для всех точек, имеющихся в активном наборе (Main Menu Preprocessor Meshing Mesh Attributes All Keypoints) используется диалоговая панель Keypoint Attributes.

Данная диалоговая панель принципиально ничем не отличается от диалоговой панели Meshing Attributes, показанная на рис. 4.24.

При указании атрибутов для точек, выборочно указываемых пользователем, также используется диалоговая панель Keypoint Attributes. Точки указываются на экране при помощи панели указания.

При указании атрибутов для всех линий, имеющихся в активном наборе (Main Menu - Preprocessor - Meshing - Mesh Attributes - All Lines) используется диалоговая панель Line Attributes, показанная на рис. 4.25.

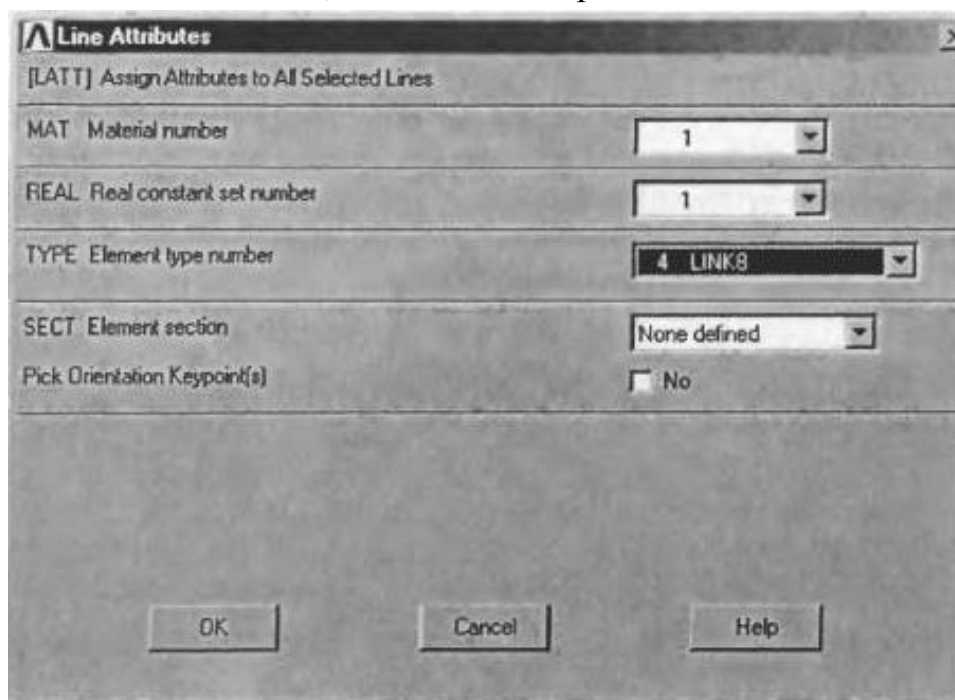


Рис. 4.25 - Диалоговая панель Line Attributes

При указании атрибутов для линий, выборочно указываемых пользователем также используется диалоговая панель Line Attributes. Линии указываются на экране при помощи панели указания.

Диалоговая панель Line Attributes несколько отличается от изображенной выше. В ней имеется признак Pick Orientation Keypoint(s), то есть указание ориентационной точки (ориентационных точек). Если на линиях создается сетка из стержней, этот признак имеет значение No (не требуется). Если на линиях создается сетка из балок, для которых важно ориентация поперечного сечения, этот признак должен иметь значение Yes, а пользователь должен указать для линий ориентационную точку. Кроме того, для ряда элементов балок (например, BEAM 188 и BEAM 189) в списке SECT Element section требуется указывать номер поперечного сечения. Указание системы координат элемента не требуется.

При указании атрибутов для всех поверхностей, имеющих в активном наборе (**Main Menu - Preprocessor - Meshing - Mesh Attributes - All Areas**) используется диалоговая панель Area Attributes, показанная на рис. 4.26.

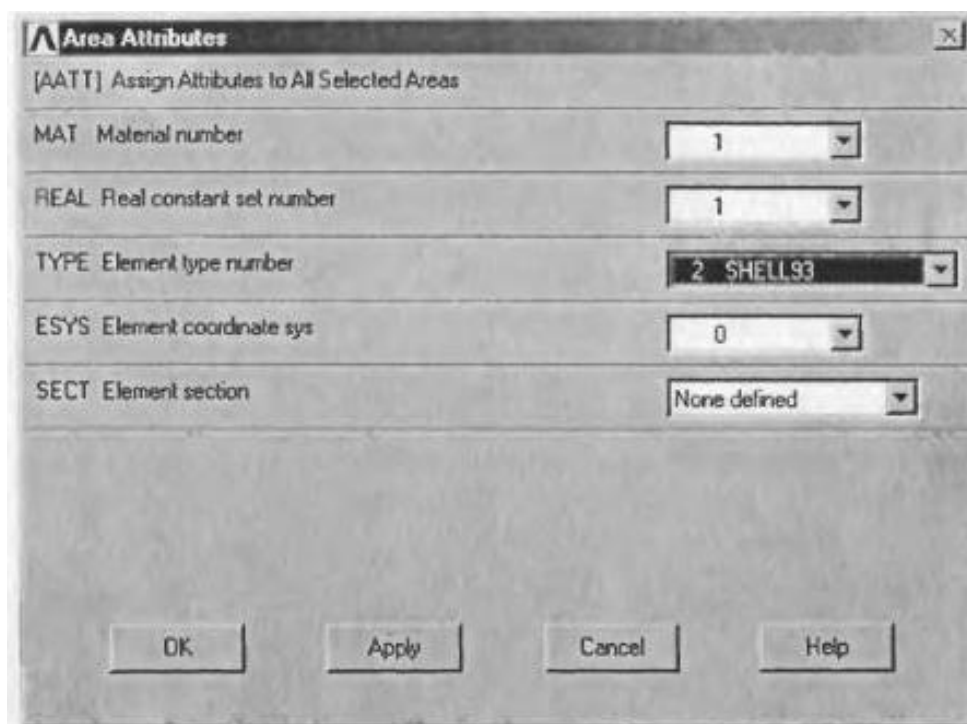


Рис. 4.26 - Диалоговая панель Area Attributes

В данной диалоговой панели для элементов можно указать номера используемых материалов, элементов, наборов геометрических характеристик, системы координат элементов и поперечного сечения.

В диалоговой панели, предназначенной для указания атрибутов объемов, указываются номера используемых материалов, элементов, наборов геометрических характеристик и системы координат элементов

Для упрощения процедуры построения сетки предназначена специальная диалоговая панель MeshTool, показанная на рис. 4.27.

Данная диалоговая панель предназначена для выполнения большого количества операций. Большинство действий, вызываемых из данной диалоговой панели, дублирует операции создания сетки, вызываемые из экранного меню.

В частности, в списке Element Attributes можно выбрать тип объектов (Global, Volumes, Areas и так далее) и после нажатия кнопки Set указывать их атрибуты. В разделе Size Controls можно указывать характерные размеры создаваемых элементов. В разделе Mesh вызываются операции создания сетки. В поле Refine at указываются области улучшения сетки и вызывается операция такого улучшения.

Операция указания опций создания сетки конечных элементов (**Main Menu - Preprocessor Meshing - Mesher Opts**) использует диалоговую панель Mesher Options, показанную на рис. 4.28.



Рис. 4.27 - Диалоговая панель MeshTool

Без особой необходимости применять вызов данной диалоговой панели не рекомендуется. Одной из интересных возможностей предоставляемых комплексом ANSYS, является создание элементов пирамидальной формы на стыке объемов, на части которых создана сетка из гексаэдров, а на другой части - из тетраэдров.

В состав операций создания объектов входят следующие:

- > Lines - операция создания связанных линий (для построения регулярных сеток на поверхностях);
- > Areas - операция создания связанных поверхностей (для построения регулярных сеток в объемах);
- > Del Concats - удаление связности объектов;
- > Areas - удаление связности поверхностей;
- > Lines - удаление связности линий.

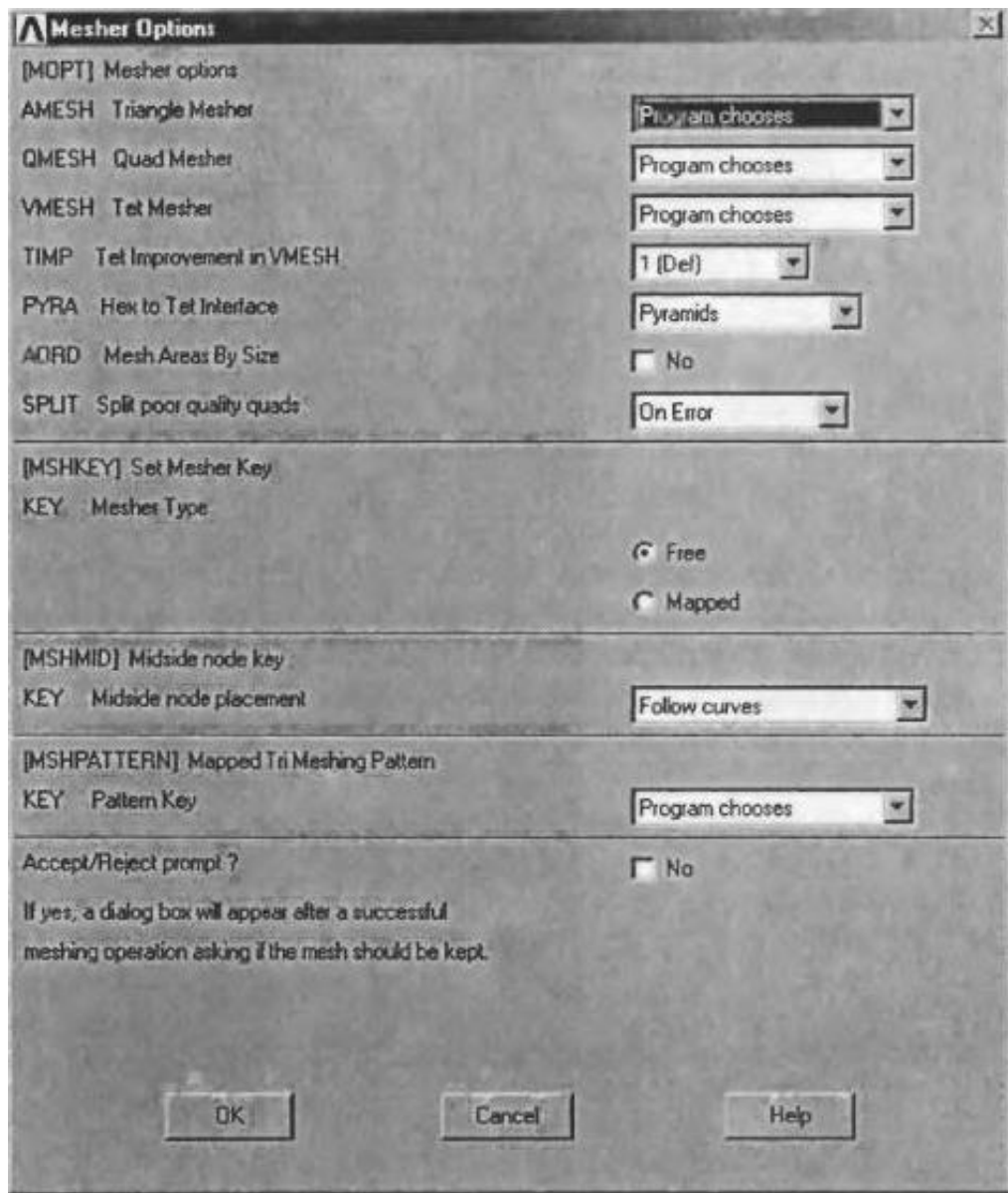


Рис. 4.28 - Диалоговая панель Mesher Options

В состав операций создания сеток на основе геометрических объектов входят следующие:

- > Keypoints - создание узлов и конечных элементов на основе точек (например, элементов сосредоточенных масс). При выполнении данной операции используется только панель указания;
- > Lines - создание узлов и конечных элементов на основе линий (например, стержней и балок) При выполнении данной операции используется только панель указания;
- > Areas - создание узлов и конечных элементов на основе поверхностей, например, мембран и оболочек (при выполнении данных операций используется только панель указания):

Mapped - создание на поверхности сетки регулярной формы: *U* By Corners - создание сетки на поверхности, ограниченной большим числом линий, путем указания трех или четырех углов. При этом линии, соединяющие данные углы, считаются едиными ребрами; *k 3* or *4 sided* - создание сетки на поверхности,

ограниченной тремя или четырьмя линиями; У Concatenate - создание связанных ребер (см. выше);

> Del Concats - удаление связанных ребер (см. выше);

> Free - создание на поверхности сетки нерегулярной формы;

> Target Surf - копирование сетки на поверхность;

> Volumes - создание узлов и конечных элементов на основе объемов (при выполнении данных операций используется только панель указания):

Mapped - создание регулярных сеток:

> 4 or 6 sided - создание сетки в объеме, ограниченном 4 или 6 поверхностями;

> Concatenate - создание связанных ребер и граней (см. выше);

> Del Concats - удаление связанных ребер и граней (см. выше);

> Free - создание в объеме сетки нерегулярной формы;

> Volume Sweep - создание узлов и конечных элементов на основе объемов путем протягивания сетки, созданной на грани объема, вдоль боковых ребер объема:

> Sweep Opts - указание опция построения сетки при помощи диалоговой панели Sweep Options, показанной на рис. 4.29.

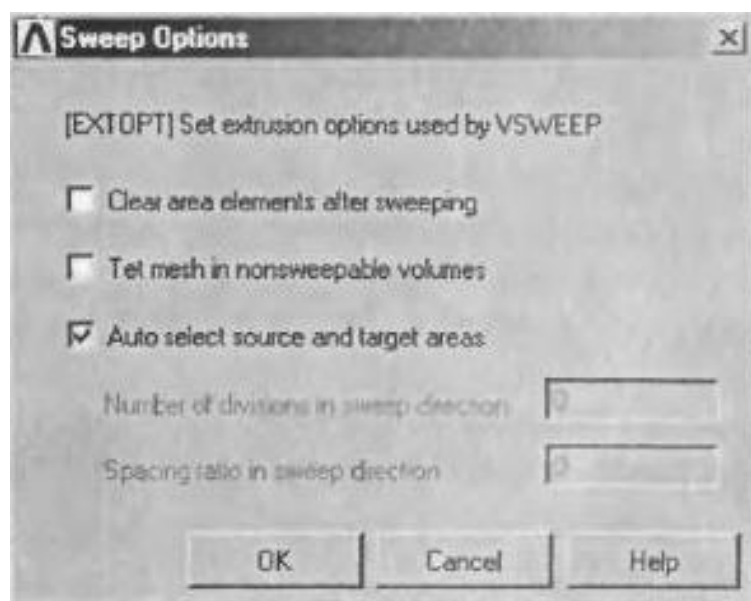


Рис. 4.29 - Диалоговая панель Sweep Options

В данной диалоговой панели признак Clear area elements after sweeping позволяет удалять после создания в объемах конечные элементы, имевшиеся на поверхностях, которые подвергались вытягиванию для создания новой сетки. Признак Tet mesh in nonsweepable volumes позволяет строить элементы-тетраэдры в случаях, когда создание элементов-гексаэдров невозможно. Признак Auto select source and target areas позволяет комплексу самому определять поверхность, подвергаемую выдавливанию, и направление этого выдавливания (то есть боковые ребра); Sweep - вызов собственно процедуры построения сетки вытягиванием;

- >Tet Mesh From - создание сетки из тетраэдров внутри объема сложной формы на основе элементов, созданных на гранях этого объема;
- > Interface Mesh - создание конечных элементов взаимодействия (например, элементов газовых уплотнений).

К операциям улучшения (изменения) сетки (**Main Menu - Preprocessor - Meshing - Modify Mesh**) относятся следующие:

> Refine at - операции улучшения сетки в отдельных областях геометрической и расчетной моделей:

>Nodes - улучшение сетки вблизи указанных пользователем узлов. Степень изменения сетки указывается при помощи диалоговой панели Refine Mesh at Node, показанной на рис. 4.30.

В списке LEVEL Level of refinement указывается уровень улучшения - от 1 (минимальный уровень) до 5 (максимальный уровень). К дополнительным опциям относятся следующие: DEPTH Depth of refinement - число слоев элементов, примыкающих к указанному узлу, на которые распространяется улучшение, POST Postprocessing - опция сглаживания формы элементов и признак сохранения элементов четырехугольной формы;

>Elements - улучшение сетки вблизи указанных пользователем элементов. Применяемые при выполнении данной операции диалоговые панели принципиально не отличаются от диалоговой панели Refine Mesh at Node, показанной на рис. 4.30;

>Keypoints - улучшение сетки вблизи указанных пользователем точек. Применяемые при выполнении данной операции диалоговые панели принципиально не отличаются от диалоговой панели Refine Mesh at Node, показанной на рис. 4.30;

>Lines - улучшение сетки вблизи указанных пользователем линий. Применяемые при выполнении данной операции диалоговые панели принципиально не отличаются от диалоговой панели Refine Mesh at Node, показанной на рис. 4.30;

>Areas - улучшение сетки вблизи указанных пользователем поверхностей. Применяемые при выполнении данной операции диалоговые панели принципиально не отличаются от диалоговой панели Refine Mesh at Node, показанной на рис. 4.30;

>All - улучшение сетки для всех конечных элементов, имеющихся в активном наборе;

>Improve Tets - улучшение формы объемных элементов - тетраэдров;

>Change Tets - изменение типа конечных элементов (замена вырожденных гексаэдров, в результате создания сетки получивших форму тетраэдров, на элементы, исходно имеющие форму тетраэдра). При выполнении данной операции для элементов, фактически имеющих одну и ту же форму, снижается количество узлов.

Применение операций проверки качества созданной сетки (**Main Menu - Preprocessor - Meshing - Check Mesh**) для элементов, созданных на основе геометрической модели, не требуется. Все создаваемые на основе

геометрической модели элементы заведомо имеют, как минимум, удовлетворительную форму (исключения крайне редки).

Операции удаления сетки с объектов геометрической модели (**Main Menu – Preprocessor – Meshing - Clear**) могут проводиться для точек, линий, поверхностей или объемов.

Лабораторная работа №5 Подготовка параметров материалов модели

Известно, что механические свойства и структурные особенности горных пород оказывают влияние на все параметры и показатели процесса сдвижения. Наиболее тесная зависимость от этого фактора прослеживается в значениях углов сдвижения δ , полученных при различных свойствах горных пород.

Механические свойства подразделяют на ряд групп: прочностные, характеризующие предельное сопротивление пород различного рода нагрузкам; деформационные, характеризующие упругую и пластическую деформируемость пород под нагрузками; акустические, характеризующие условия передачи породами упругих колебаний; реологические, характеризующие деформирование пород во времени при заданных условиях нагружения; горнотехнологические, характеризующие реакцию пород на воздействие каких-либо определенных технологических процессов или инструментов.

Рассмотрим две основные группы физико-механических свойств (прочностные и деформационные), влияющих на процесс сдвижения.

Прочностные свойства определяют способность пород сопротивляться разрушению под действием приложенных механических напряжений. Они характеризуются пределами прочности при сжатии и растяжении, сцеплением и углом внутреннего трения.

Пределом прочности $[\sigma]$ называют максимальное значение напряжения, которое выдерживает образец до разрушения:

$$[\sigma]=P/F, \quad (5.1)$$

где P – разрушающая нагрузка;

F – площадь, на которую действует приложенная нагрузка.

Предел прочности при одноосном сжатии образцов горных пород (прочность на сжатие) $[\sigma_{сж}]$ – наиболее широко определяемая характеристика прочности пород. Её наивысшее значение для горных пород достигают 5000 кгс/см^2 , минимальные значения измеряются десятками и даже единицами килограмм-сил на квадратный сантиметр. Прочность на сжатие может колебаться в весьма больших пределах в зависимости от состава и структуры пород. Обычно прочность пород на сжатие тем выше, чем выше их плотность.

Прочность на растяжение $[\sigma_p]$ горных пород значительно ниже их прочности на сжатие. Горные породы плохо сопротивляются растягивающим усилиям, появление в тех или иных участках массива пород при разработке служит критерием опасности обрушений пород и разрушения горных выработок.

Отношение $[\sigma_p]/[\sigma_{сж}]$ весьма показательно для сравнительной характеристики различных пород и колеблется в пределах $1/5 \div 1/80$, чаще же всего в пределах $1/15 \div 1/40$.

Прочность на срез (сдвиг) может быть охарактеризована двумя функционально связанными параметрами: сцеплением и углом внутреннего трения породы. Эту функциональную связь выражают уравнением Кулона-Мора:

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + [\tau_0], \quad (5.2)$$

где σ_n – нормальное напряжение при срезе;

φ – угол внутреннего трения;

$[\tau_0]$ – сцепление.

Сцепление $[\tau_0]$ характеризует предельное сопротивление срезу по площадке, на которой отсутствует нормальное давление, т.е. нет сопротивления срезающим усилиям за счет внутреннего трения. Угол внутреннего трения φ или коэффициент внутреннего трения $\operatorname{tg} \varphi$ характеризует интенсивность роста срезающих напряжений с возрастанием нормальных напряжений, т.е. представляет собой коэффициент пропорциональности между приращениями касательных $d\tau_n$ и нормальных $d\sigma_n$ напряжений при срезе:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\tau_{n_2} - \tau_{n_1}}{\sigma_{n_2} - \sigma_{n_1}} = \frac{d\tau_n}{d\sigma_n}. \quad (5.3)$$

Значение сцепления горных пород меняется в пределах от 15 кПа до 100 кПа, угол внутреннего трения – от 5-15° для некоторых глин до 35-45° для прочных массивно-кристаллических и метаморфических пород.

Упругие свойства горных пород характеризуются модулем упругости E при одноосном напряженном состоянии (модулем продольной упругости или иначе модулем Юнга), модулем сдвига G , модулем объемной упругости K и коэффициентом поперечных деформаций ν (коэффициентом Пуассона).

Модуль упругости E представляет собой отношение нормального напряжения σ_n к относительной линейной деформации образца $\varepsilon_l = \Delta l / l$ в направлении действия приложенной нагрузки:

$$E = \sigma_n / \varepsilon_l. \quad (5.4)$$

Модуль сдвига G – отношение касательного напряжения τ к относительному сдвигу Θ :

$$G = \tau / \Theta. \quad (5.5)$$

Относительный сдвиг Θ (угловая деформация) характеризует изменение формы деформируемого тела и выражается зависимостью

$$\Theta = \frac{\pi / 2 - \alpha}{\pi / 2}, \quad (5.6)$$

где α – угол наклона каждого прямоугольного элемента тела после деформирования.

Модуль объемной упругости K (модуль всестороннего сжатия) равен отношению равномерного всестороннего напряжения к относительному упругому изменению объема образца:

$$K = \sigma_v / \Delta V / V, \quad (5.7)$$

где $\Delta V / V$ – относительное изменение объема.

Коэффициент поперечных деформаций ν (коэффициент Пуассона) является мерой пропорциональности между относительными деформациями в направлении, перпендикулярном к вектору приложенной нагрузки и параллельном ему:

$$\nu = \frac{\Delta d / d}{\Delta l / l} = \varepsilon_d / \varepsilon_l. \quad (5.8)$$

Перечисленные характеристики упругих свойств пород функционально связаны между собой следующими соотношениями:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}; \quad (5.9)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}. \quad (5.10)$$

Таким образом, зная две из этих характеристик, можно расчетным путем определить значения двух других. Обычно экспериментально определяют на образцах пород характеристики E и ν .

Модули упругости различных пород изменяются в пределах 0,3-20 ГПа. С ростом плотности пород модули их упругости также возрастают. Модули упругости слоистых пород в направлении слоистости выше, чем перпендикулярно к слоистости.

Коэффициенты поперечных деформаций ν горных пород теоретически могут изменяться в пределах от 0 до 0,5. Для большинства пород они колеблются в интервале значений от 0,05 до 0,4.

Упругое деформирование представляет собой частный случай поведения пород до некоторого значения напряжений, называемого пределом упругости, когда деформации носят чисто упругий характер и исчезают после снятия нагрузки. За пределом упругости происходит пластическое деформирование с образованием необратимых остаточных деформаций. Для характеристики этого процесса применяют более общий показатель – модуль деформации, представляющий собой отношение приращений напряжений к соответствующему приращению вызываемых ими деформаций:

$$M = d\sigma / d\varepsilon. \quad (5.11)$$

Механическими характеристиками, отражающими прочность пород при простых напряженных состояниях, является сопротивление горных пород сжатию, растяжению и сдвигу.

Сложность напряженного состояния обуславливается тем, что на каждый элемент породы, находящийся в глубине массива вокруг горной выработки или под основанием, одновременно с усилием, действующим в вертикальном направлении P_1 (толща пород, нагрузка от сооружения), появляются горизонтальные составляющие, вызванные деформацией элемента под влиянием внешних сил, P_2 и P_3 .

Таким образом, элемент породы находится в объемном равномерном (по всем трем осям нормальные напряжения равны) или неравномерном напряженном состоянии. Равномерное объемное напряженное состояние имеет место в глубине массива. Неравномерное объемное напряженное состояние возникает при обнажении части породного массива.

Поскольку в природе горные породы находятся в условиях сложных напряженных состояний, возникает необходимость изучения их поведения, так как прочностные и деформационные свойства являются функциями напряженного состояния.

Так как величины компонент напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 могут принимать бесчисленное множество различных, то для сопоставления прочностных свойств материалов разрабатываются теории прочности. Задачей теории прочности является установление критерия прочности, на основании которого можно было бы сравнить между собой различные напряженные состояния.

Для установления критерия прочности необходимо знать причины разрушения материала.

Специалисты по механике горных пород считают, что из всех известных гипотез и теорий прочности наиболее удовлетворительно описывает поведение горных пород теория Мора.

По теории Мора считается, что ответственными за разрушение являются касательные напряжения, а само разрушение носит характер сдвига по площадкам, на которых достигается предельное состояние, причем величина предельного касательного напряжения является функцией нормального напряжения, действующего на площадке скольжения.

Для характеристики напряженного состояния в точке предлагается строить круговую диаграмму (рис. 5.1). Здесь σ_1 , σ_2 и σ_3 главные напряжения в исследуемой точке, τ_i - величина касательного напряжения на произвольной площадке.

По диаграмме видно, что максимальное значение τ_{\max} для любой величины нормального напряжения находится на большой окружности. Данная окружность считается определяющей прочностью материала. Все точки, лежащие внутри контура окружности, указывают, что материал находится в связанном состоянии, за ее пределами - в нарушенном. В этой связи большая окружность является предельной для данного напряженного состояния. Отсюда два напряженных состояния, изображаемые одинаковым предельным кругом, но имеющие различные внутренние круги, равноценны с точки зрения

прочности. Следовательно, прочность определяется только минимальным и максимальным главными напряжениями. Промежуточное, среднее по величине главное напряжение, на прочность не влияет.

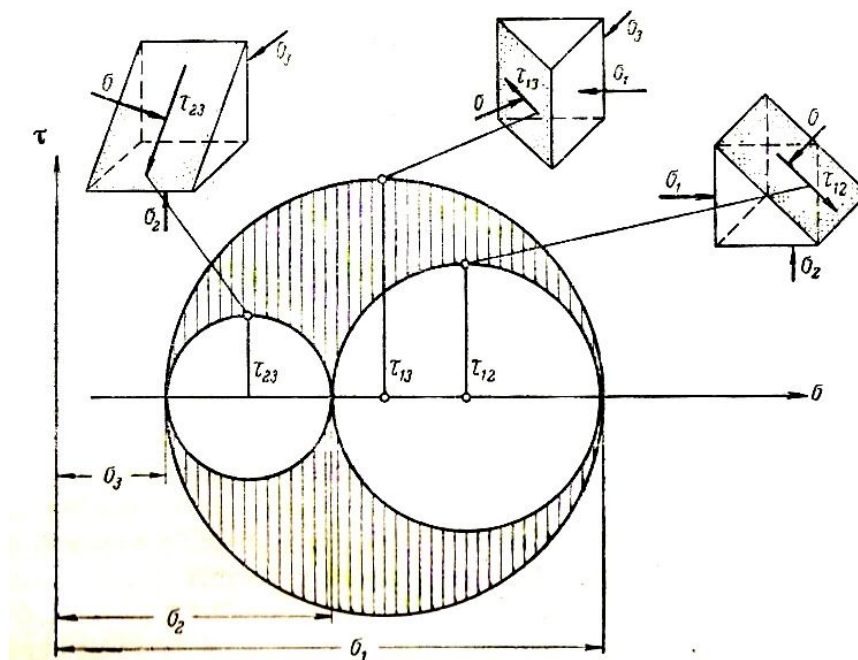


Рис. 5.1 – Круговая диаграмма напряжений Мора

Существует также графический способ интерпретации результатов опытов, который состоит в следующем. Если для нескольких видов напряженного состояния опытным путем определить величины предельных состояний и изобразить их в виде кругов напряжений на совмещенной диаграмме, то все семейство кругов будет иметь общую огибающую (рис. 5.2).

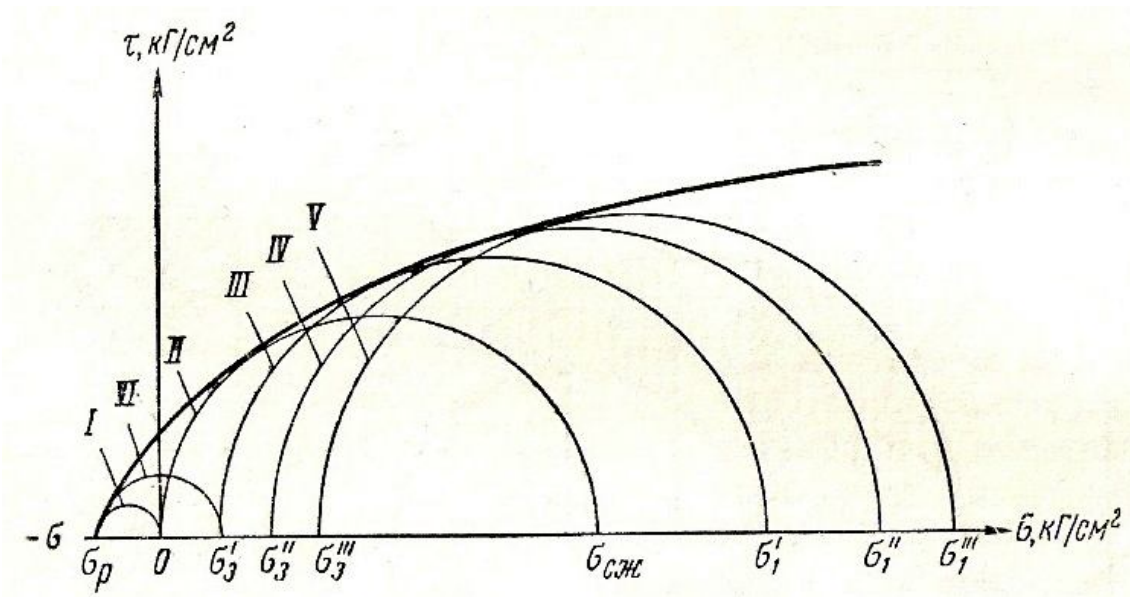


Рис. 5.2 – Типовой паспорт прочности горной породы

Графическая способ позволяет оценивать опасность того или иного напряженного состояния вписанием предельного круга этого состояния в диаграмму. Если круг исследуемого состояния пересекает огибающую, такая комбинация напряжений вызовет разрушение, если он располагается под огибающей, состояние разрушения еще не достигнуто.

Можно построить сколько угодно кругов напряженных состояний, центры которых находятся от начала координат на расстоянии, равном $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, а радиусы равны $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$. Уравнение огибающей к этим кругам запишется в виде

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = f_1\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) \quad (5.12)$$

На сегодняшний день установлено, что:

1. Огибающая должна быть монотонной кривой, симметричной относительно оси σ , замкнутой в области растягивающих напряжений и открытой в области сжатия;

2. Производная этой кривой во всем диапазоне ее существования от σ_p до $\sigma = \infty$ должна быть больше или равна нулю;

3. Огибающая пересекает в области растяжения ось σ в точке σ_p ($\sigma = -\sigma_p$); $\tau = 0$; точек, принадлежащих огибающей и находящихся левее этой точки, не существует;

4. Радиус кривизны огибающей в точке пересечения оси σ равен нулю.

Огибающая должна охватывать весь комплекс предельных механических состояний материала. Значит, на диаграмме τ, σ можно изобразить предельные круги, соответствующие напряженному состоянию одноосного растяжения и сжатия, чистого сдвига, а также условиям более сложных напряженных состояний материала.

В координатной системе (рис. 5.2) предельный круг одноосного растяжения (I), соответствующий напряженному состоянию $\sigma_1 = \sigma_p$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, разместится влево от начала координат. Он пересечет ось σ в точках $-\sigma_p$ и 0. Предельный круг одноосного сжатия II таким же образом пересечет ось σ в точках 0 и $\sigma_{сж}$. Все круги III-V, пересекающие ось σ в точках $\sigma > 0$, соответствуют объемному сжатию. Напряженное состояние чистого сдвига на диаграмме изобразится кругом VI, центр которого совпадает с началом координат.

Если с достаточной точностью можно провести к полученным из опыта предельным кругам напряжений кривую, огибающую их, значит, свойства материала описываются теорией Мора.

Зная уравнение огибающей или имея графическое изображение ее, можно установить прочность пород как при простых напряженных состояниях, так и в условиях объемного напряженного состояния. В силу этого в практике испытания горных пород огибающую называют паспортом прочности [6].

5.1. Свойства материалов

Свойства материалов, используемые при проведении расчетов и определении результатов, могут являться линейными и нелинейными.

5.1.1. Линейные свойства материалов

Линейные свойства материалов, используемые соответствующим типом элемента, указываются командой MP. Данные свойства (которые могут зависеть от температуры) называются линейными свойствами, поскольку обычные нетепловые расчеты, использующие данные свойства, требуют выполнения только единственной итерации. Наоборот, если свойства, необходимые для теплового расчета, являются зависящими от температуры, задача является нелинейной. Свойства, такие как данные связи напряжений с деформациями, называются нелинейными свойствами, поскольку расчет, использующий данные свойства, требует выполнения итерационных вычислений.

Свойства материалов задач МДТТ могут указываться как свойства изотропных, ортотропных или анизотропных материалов.

5.1.2. Нелинейные свойства материалов

Для указания свойств нелинейных материалов используются специальные таблицы данных. Таблица данных является рядом констант, которые интерпретируются при их использовании. Таблицы данных всегда связываются с номером материала и чаще всего используются для указания нелинейных данных материала (кривых напряжений – деформаций, т.е. деформирования, констант ползучести, констант набухания и кривых намагничивания). Для отдельных типов элементов таблица данных используется для указания других специальных исходных данных, не являющихся свойствами материала. Таблицы могут применяться для следующих типов данных:

- материалы с нелинейной связью напряжений и деформаций;
- пластичность чугуна;
- константы гиперупругого материала;
- константы вязкоупругого материала;
- магнитные материалы;
- анизотропные упругие материалы;
- пьезоэлектрические материалы;
- пьезорезистивные материалы;
- анизотропные материалы с диэлектрической проницаемостью;
- материалы с пластичностью, зависящей от скорости (вязкопластичные);
- материалы уплотнений;
- уравнения ползучести;
- сплавы с памятью формы;
- уравнения набухания;

- материалы элементов связей MPC184 [7].

Для указания свойств материалов используется экранное меню. В данном случае из экранного меню вызывается следующая последовательность: **Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models**.

Опция **Material Library** позволяет работать с библиотеками материалов (записывать(импортировать) свойства материала в специальный файл, читать (экспортировать) свойства материала из файла, указывать директорию для чтения и записи такого файла и так далее).

Опция **Temperature Units** позволяет указывать применяемую шкалу температур (Кельвина, Цельсия, Фаренгейта).

Опция **Electromag Units** позволяет указывать систему единиц для электромагнитных расчетов.

Опция **Convert ALPx** позволяет изменять температуру, применяемую для вычисления коэффициентов температурного расширения.

Опция **Change Mat Num** позволяет изменять номер материала, применяемого для указываемых пользователем элементов.

Опция **Write to File** позволяет записывать линейные свойства материала в файл.

Опция **Read from File** позволяет читать данные материала из файла.

После вызова последовательности **Preprocessor**→**Material Props**→**Material Models** на экране появляется диалоговая панель **Define Material Model Behavior**, показанная на рис. 5.3.



Рис. 5.3 - Диалоговая панель Define Material Model Behavior

В данной диалоговой модели в левой части имеется поле **Material Models Defined**, в котором содержится список введенных свойств материалов. При первом вызове данной диалоговой панели в списке уже имеется запись **Material Model Number 1**, но никаких свойств материала ещё не задано.

В правой части диалоговой панели имеется исходно свернутая иерархическая (древовидная) структура свойств материалов. Для указания свойств материала (в первом приближении, модуля Юнга, коэффициента Пуассона и плотности, не зависящих от температуры) следует производить двойные щелчки кнопкой мыши на следующих объектах: Structural (материалы МДТТ), Linear (линейные материалы), Elastic (упругие материалы), Isotropic (изотропные материалы). При этом структура свойств материала раскладывается. Диалоговая панель выглядит как показано на рис. 5.4.

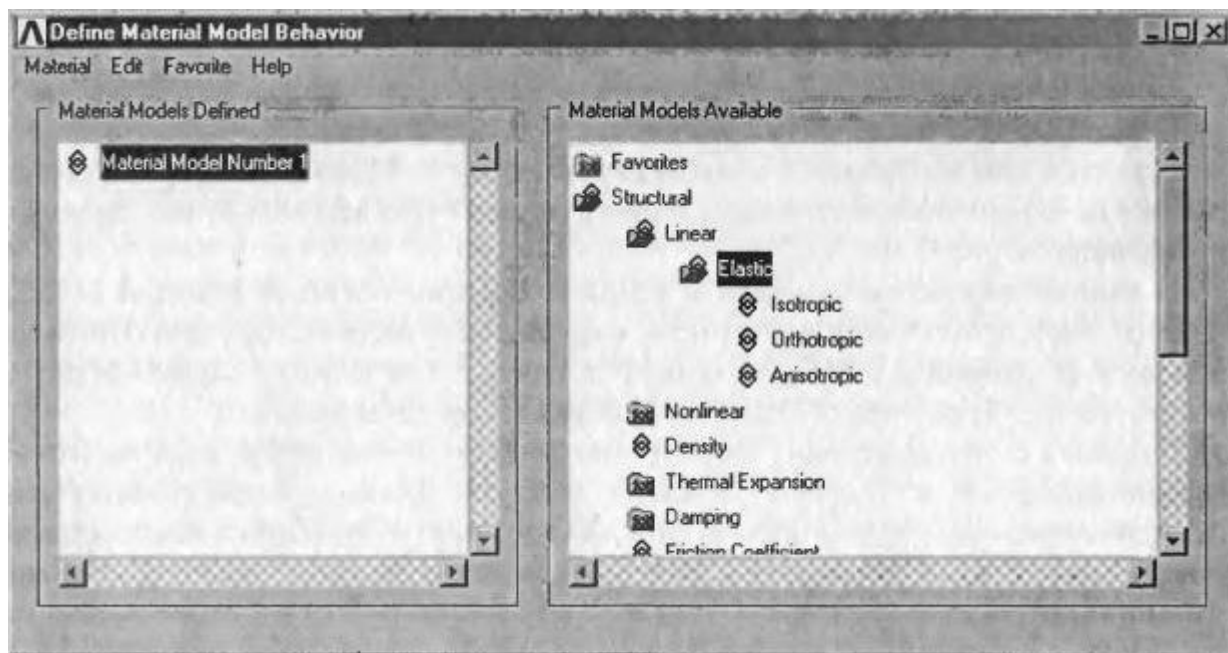


Рис. 5.4 - Диалоговая панель Define Material Model Behavior с раскрытой структурой материала

После вызова свойств Isotropic на экране появляется диалоговая панель Linear Isotropic Properties, показанная на рис. 5.5. В этой диалоговой панели указываются значения модуля Юнга (EX) и коэффициента Пуассона (PRXY).

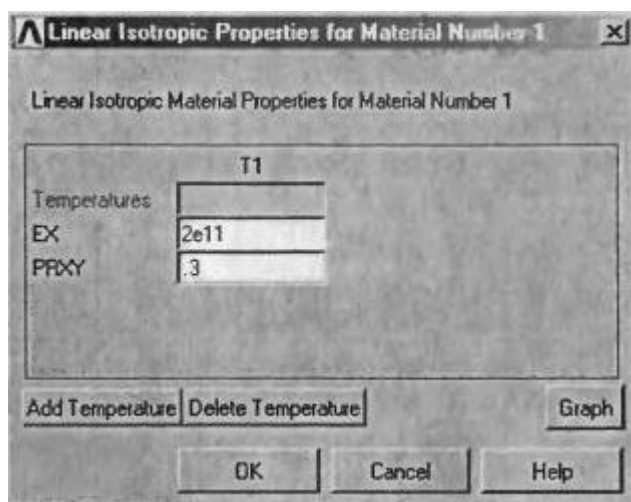


Рис. 5.5 - Диалоговая панель Linear Isotropic Properties

Кнопка Add Temperature позволяет указывать температуру, для которой определяются свойства материала. Кнопка Delete Temperature позволяет удалять такое значение температуры. Кнопка Graph позволяет строить на экране график зависимости свойств материала от температур.

Для указания плотности следует произвести двойной щелчок кнопкой мыши на объекте Density. После этого плотность указывается также при помощи специальной диалоговой панели.

После указания свойств материала в поле (списке) Material Models Defined под объектом Material Model Number 1 появляются объекты Linear Isotropic и Density (если плотность также указывалась).

Для указания свойств последующих материалов (если расчетная модель использует более одного материала) из меню диалоговой панели следует вызвать последовательность Material→New Model [3].

Лабораторная работа №6

Задание граничных условий и решение задачи

В состав операций указания типа расчета, а также нагрузок и различных опций приложения нагрузок и расчета входят следующие:

- Analysis Type – операции указания типа расчета;
- Define Loads – операции приложения, изменения и удаления нагрузок;
- Load Step Opts – операции указания опций шагов нагрузки. Отдельным шагом нагрузки считается каждая совокупность нагрузок, для которой проводится расчет.

В состав операций приложения, изменения и удаления нагрузок (**Main Menu**→**Preprocessor**→**Loads**→**Define Loads**) входят следующие:

- Setting – операции приложения температур, градиентов давления и указания опций изменения значений различных нагрузок;
- Apply – операции приложения нагрузок в различных формах;
- Delete – операции удаления нагрузок;
- Operate – операции изменения и передачи нагрузок от геометрической модели к расчетной.

В состав операций приложения нагрузок в различных формах (**Main Menu**→**Preprocessor**→**Loads**→**Define Loads**→**Apply**) входят следующие:

- Structural – операции приложения нагрузок в задачах механики деформируемого твердого тела (МДТТ);
- Field Surface Intr – указание нагрузок на поверхности раздела при расчете нескольких типов полей (например, деформируемого твердого тела и задач газовой динамики);
- Field Volume Intr – указание нагрузок в элементах при расчете нескольких типов полей (например, деформируемого твердого тела и тепловых задач);
- Initial Condit'n – указание начальных условий (значений степени свобод и скорости их изменения, в частности, при расчетах переходных процессов);
- Load Vector – приложение вектора нагрузки к суперэлементам;
- Functions – приложение граничных условий при помощи специального редактора функций.

Следует особо обратить внимание на то, что в комплексе ANSYS нагрузки могут прикладываться не только к объектам расчетной модели (узлам), но и к объектам геометрической модели (точкам, линиям, поверхностям, объемам). Если в дальнейшем сетка удаляется, нагрузки, связанные с сеткой, также удаляются.

При этом при повторном создании сетки нагрузки, приложенные к объектам геометрической модели, передаются узлам и не требуют повторного указания.

6.1. Операции приложения нагрузок

При указании нагрузок в задачах МДТТ (Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural) используются следующие группы операций:

- Displacement – указание перемещений:

- On Lines – приложение перемещений к линиям. При этом линии, к которым прикладываются нагрузки, указываются при помощи панели указания, после чего на экране появляется диалоговая панель Apply U, ROT on Lines, показанная на рис. 6.1.

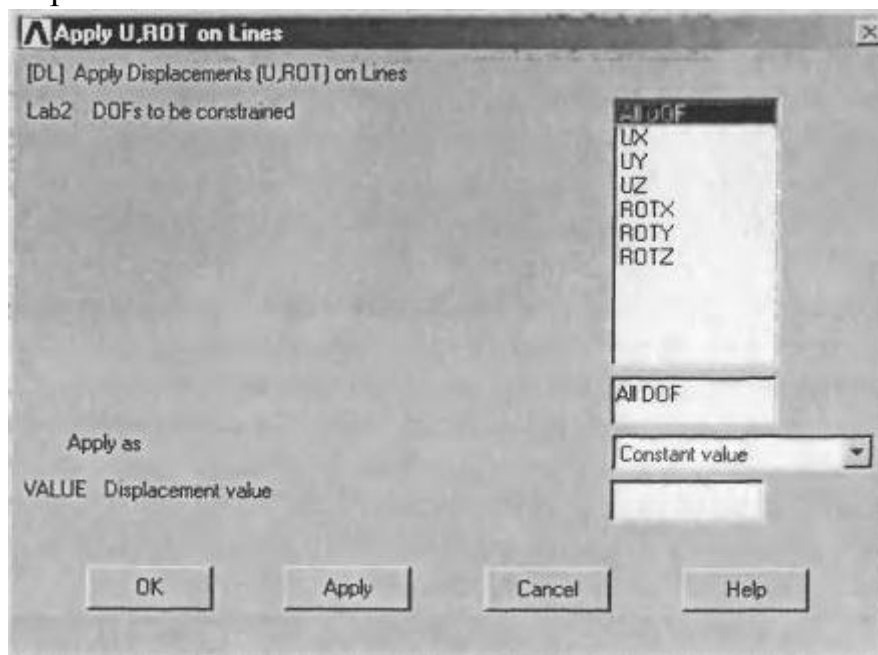


Рис. 6.1 - Диалоговая панель Apply U, ROT on Lines

В данной диалоговой панели в списке Lab2 DOFs to be constrained указывается тип степени свободы, на которое накладывается ограничение – перемещения UX, UY, UZ, повороты ROTX, ROTY, ROTZ или все степени свободы сразу (All DOF). В списке Apply as можно указать признаки Constant value (постоянное значение, обычно и применяемое), Existing table (на основе существующей таблицы параметров) и New table (создание новой таблицы);

- On Areas – приложение перемещений к поверхностям. Применяемая в данном случае диалоговая панель Apply U, ROT on Areas ничем не отличается от диалоговой панели Apply U, ROT on Lines, показанной на рис. 6.1.

- On Keypoints – приложение перемещений к точкам. Применяемая в данном случае диалоговая панель Apply U, ROT on KPs практически ничем не отличается от диалоговой панели Apply U, ROT on Lines, показанной на рис. 6.1. Признак KEXPND Expand disp to nodes применяется при указании ограничений в нескольких точках. Если данный признак отключен, перемещения передаются только узлам, связанным с данными точками. Если признак включен, перемещения переносятся и на узлы, относящиеся к объектам

геометрической модели, для всех точек которых указаны идентичные направления перемещений. Например, при приложении ограничений степеней свобод в одном и том же направлении в двух точках, являющихся концами линии, все узлы, принадлежащие линии, будут иметь соответствующие ограничения степеней свобод;

- On Nodes – приложение перемещений к узлам. Применяемая в данном случае диалоговая панель Apply U, ROT on Nodes ничем не отличается от диалоговой панели Apply U, ROT on Lines, показанной на рис. 6.1;

- On Node Component – приложение перемещений к компоненту, состоящему из узлов. Применяемая в данном случае диалоговая панель ничем не отличается от диалоговой панели Apply U, ROT on Lines, показанной на рис. 6.1;

- Symmetry B. C. – приложение симметричных граничных условий к линиям, поверхностям или узлам;

- Antisymm B. C. – приложение антисимметричных (кососимметричных) граничных условий к линиям, поверхностям или узлам;

- Pressure – приложение давления:

- On Line – приложение давления к линиям (при расчете задач плоского напряженного, плоского деформированного и осесимметричного состояний). При выполнении данной операции используется диалоговая панель Apply PRES on lines, показанная на рис. 6.2.

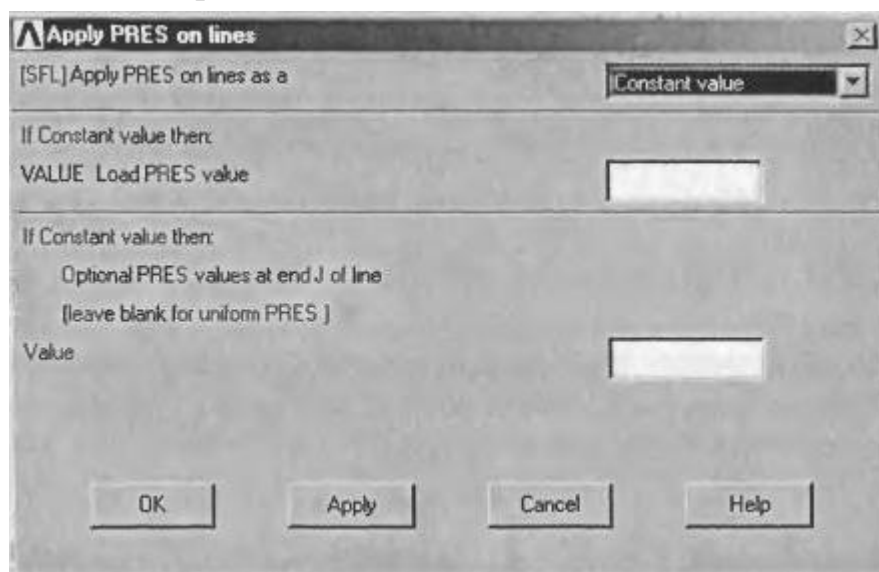


Рис. 6.2 - Диалоговая панель Apply PRES on lines

В поле VALUE Load PRES value указывается значение давления, прикладываемого к линии (или к первой точке линии). Если давление изменяется по длине линии, в поле Value указывается значение давления во второй точке линии;

- On Area – приложение давления к поверхности. При выполнении данной операции используется диалоговая панель Apply PRES on areas, показанная на рис. 6.3.

В поле VALUE Load PRES value указывается значение давления, прикладываемого к поверхности. В поле LKEY Load key, usually face no указывается номер грани элементов, к которой прикладывается давление (данный аргумент требуется указывать, и то не всегда, только при использовании элементов оболочек);

- On Node – приложение давления к узлам.
- On Node Component – приложение давления к узлам, входящим в состав компонента.
- On Elements – приложение давления к элементам. При выполнении данной операции используется диалоговая панель Apply PRES on elems, показанная на рис. 6.4.

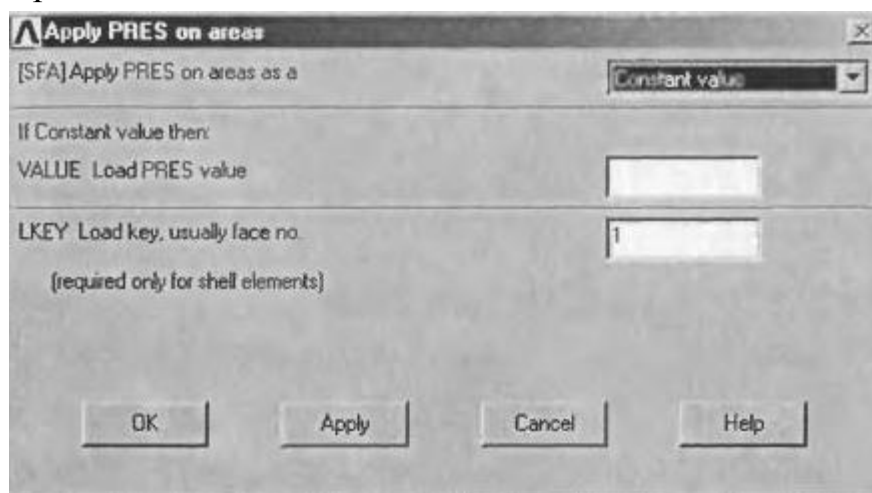


Рис. 6.3 - Диалоговая панель Apply PRES on areas

В данной диалоговой панели в поле LKEY Load key, usually face no указывается номер грани элемента, к которой прикладывается давление. В поле VALUE Load PRES value указывается значение давления, прикладываемого к грани элемента. Если давления является переменным, то есть в разных узлах имеет разные значения, в полях VAL2 Load PRES at 2nd node, VAL3 Load PRES at 3rd node и VAL4 Load PRES at 4th node указываются дополнительные значения давления (по узлам, являющимся вершинами граней);

- On Element Component – приложение давления к элементам, входящим в состав компонента. Применяемая в данном случае диалоговая панель ничем не отличается от диалоговой панели Apply PRES on elems, показанной на рис. 6.4;

- From Fluid Analy – приложение давления на основе результатов, полученных ранее на основе решения задач гидродинамики, аэродинамики или газовой динамики;

- On Beams – приложение давления к балочным элементам. При выполнении данной операции используется диалоговая панель Apply PRES on Beams, показанная на рис. 6.5.

В данной диалоговой панели в поле LKEY Load key указывается номер грани балочного элемента, к которой прикладывается давление. В поле VAL1

Pressure value at node I указывается давление в узле I элемента. В поле VALJ Pressure value at node J указывается давление в узле J (если оно отличается от давления в узле I). В поле IOFFST Offset from I node указывается расстояние от узла I до первой точки линии, по которой прикладывается давление, а в поле JOFFST Offset from J node – указывается расстояние от узла J до второй точки этой линии. Положительные значения соответствуют сдвигу этих точек внутрь элемента.

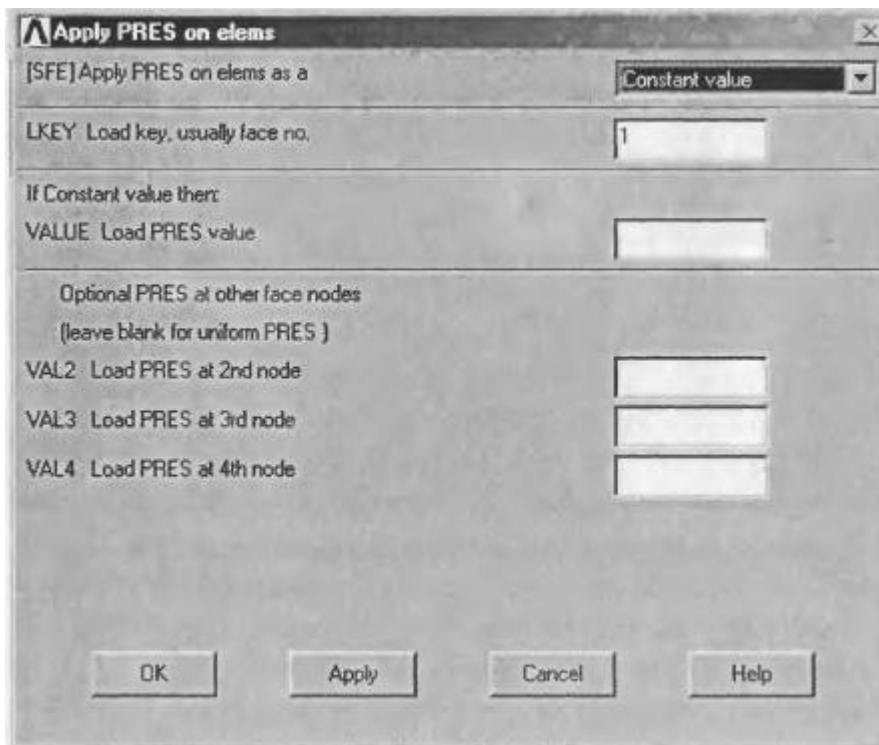


Рис. 6.4 - Диалоговая панель Apply PRES on elems

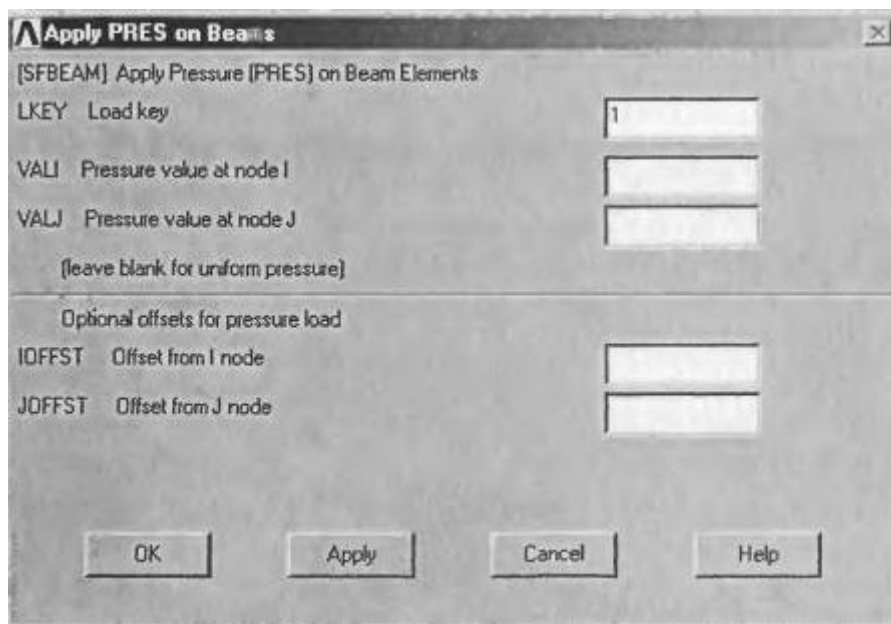


Рис. 6.5 - Диалоговая панель Apply PRES on Beams

6.2. Операции удаления нагрузок

Список операций удаления нагрузок практически воспроизводит список операций приложения нагрузок. В состав операций удаления нагрузок входят следующие наборы операций:

- All Load Data – удаление различных приложенных нагрузок;
- Structural – удаление нагрузок, прикладываемых при расчетах задач МДТТ:
 - Displacement – удаление ограничений на степени свобод (отдельно для точек, линий, поверхностей, узлов и узлов, входящих в состав компонентов).
 - Force/Moment – удаление сосредоточенных сил и моментов (отдельно для точек, узлов и узлов, входящих в состав компонентов).
 - Pressure – удаление приложенного давления (отдельно для линий, поверхностей, узлов, узлов, входящих в состав компонентов, элементов и элементов, входящих в состав компонентов).
 - Temperature – удаление приложенной температуры (отдельно для линий, поверхностей, объемов, узлов, узлов, входящих в состав компонентов, элементов и элементов, входящих в состав компонентов).
 - Inertia – удаление инерционных нагрузок (угловой скорости, углового ускорения, ускорения свободного падения и эффекта Кориолиса).
 - Section – удаление нагрузок для предварительно нагруженных соединений.
 - Other – удаление нагрузок в форме потоков заряженных частиц [3].

6.3. Инициализация решения

Command(s):

SOLVE

GUI:

Main Menu→Solution→-Solve-Current LS

После завершения решения появляется сообщение:

INFORMATION: SOLUTION IS DONE!→Close

Результаты решения записываются в выходной файл (Jobname.OUT) и в файл результатов (Jobname.RST). Если решение выполняется в интерактивном режиме, выходные данные выводятся на экран монитора. С помощью следующих команд, запускаемых до команды SOLVE, выходные данные можно перенаправить в файл:

Command(s):

/OUTPUT

GUI:

Utility Menu→File→Switch Output to→File or Output Window

В выходной файл записываются следующие сведения:

- информация о нагрузках;
- масса и моменты инерции модели;
- суммарные результаты решения задачи;

- информация о процессорном и общем времени работы программы.

Если решение проводится в интерактивном режиме, некоторые из перечисленных выше выходных данных подавляются.

Файл результатов (Jobname.RST, .RTH, .RMG, или .RFL) содержит всю информацию в бинарной форме. Просмотреть эту информацию можно на постпроцессорном этапе решения.

Ещё одним полезным файлом, создающимся в процессе решения, является файл Jobname.STAT. Этот файл показывает состояние решения и его можно использовать, например, для текущего контроля за решением итерационных нелинейных задач [1].

Лабораторная работа №7

Анализ результатов расчета напряженно-деформированного состояния и представление их в графическом виде

В программе ANSYS стадия постпроцессорной обработки следует за стадиями препроцессорной подготовки и получения решения. С помощью постпроцессорных средств программы имеется возможность обратиться к результатам решения и интерпретировать их нужным образом.

В процессе решения задачи программа ANSYS создает файл результатов (results file). Расширение этого файла зависит от области решаемой задачи. Например, для задач из области анализа конструкций (область, к которой относится большинство прочностных задач) имя файла результатов будет Jobname.RST, для тепловых задач – Jobname.RTH и т.д. [1, 3].

Набор операций, вызываемых из экранного меню в общем постпроцессоре, состоит из следующих операций:

- Data & File Opts – операция указания файла результатов и данных, читаемых из файла;
- Results Summary – вызов на экран информационного (текстового) окна, содержащего список наличных наборов результатов;
- Read Results – чтение набора результатов из файла результатов;
- Failure Criteria – указание критериев разрушения;
- Plot Results – графическое отображение результатов;
- List Results – отображение результатов в текстовом виде;
- Query Results – указание значений результатов на экране в виде подписей (в текстовой форме);
- Options for Outp – указание опций отображения значений;
- Results Viewer – вызов специального средства просмотра результатов;
- Write PGR File – запись графического файла результатов;
- Nodal Calcs – операции с узловыми результатами;
- Element Table – операции с элементными таблицами;
- Path Operations – операции с графиками значений, создаваемыми на основе путей (траекторий);
- Surface Operations – операции с вычислениями результатов на поверхностях;
- Load Case – операции со случаями нагружения;
- Write Results – операция записи результатов из базы данных в файл результатов;
- ROM Operations – операция определения перемещений при расчете связанных (многодисциплинарных) задач;
- Submodeling – операции расчета НДС в локальной зоне;
- Fatigue – операции вычисления характеристик выносливости (усталости);
- Safety Factor – операции с коэффициентами безопасности;
- Define/Modify – операции изменения расчетных значений;
- Nonlinear Diagnostics – операции диагностики нелинейных задач;

- Reset – восстановление значений настроек в состояние по умолчанию.

7.1. Чтение результатов

С помощью следующих команд производится чтение результатов расчета из файла результатов (Jobname.RST):

Command(s):

SET, шаг нагружения, ...

GUI:

Main Menu→General Postproc→-Read Results-First Set
(для первого шага нагружения)

Main Menu→General Postproc→-Read Results-Next Set
(для последующих шагов нагружения)

7.2. Показ деформированной формы модели

При выполнении прочностных расчетов часто возникает необходимость видеть форму модели после приложения нагрузки. Это может быть полезным, например, для контроля правильности задания граничных условий и приложения внешней нагрузки. Вызвать дисплей деформированной формы можно следующим образом:

Command(s):

PLDISP

GUI:

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Deformed Shape→
Def+undeformed

Utility Menu→Plot→Results→Deformed Shape→Def+undeformed

При отображении деформированного виде модели используется диалоговая панель Plot Deformed Shape, показанная на рис. 7.1.

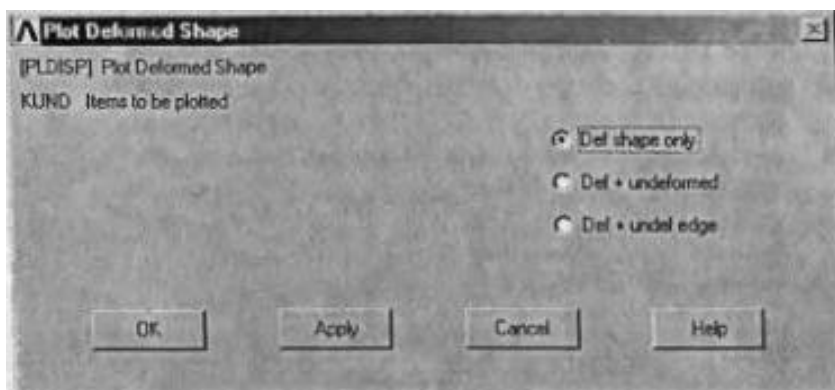


Рис. 7.1 - Диалоговая панель Plot Deformed Shape

7.3. Графическое представление результатов

Контурный дисплей (contour displays) позволяет проследить изменение исследуемой величины (напряжения, температуры и т.п.) по всей модели.

Наиболее часто при обращении к контурному дисплею используются следующие две пары команд (рис. 7.2, 7.3):

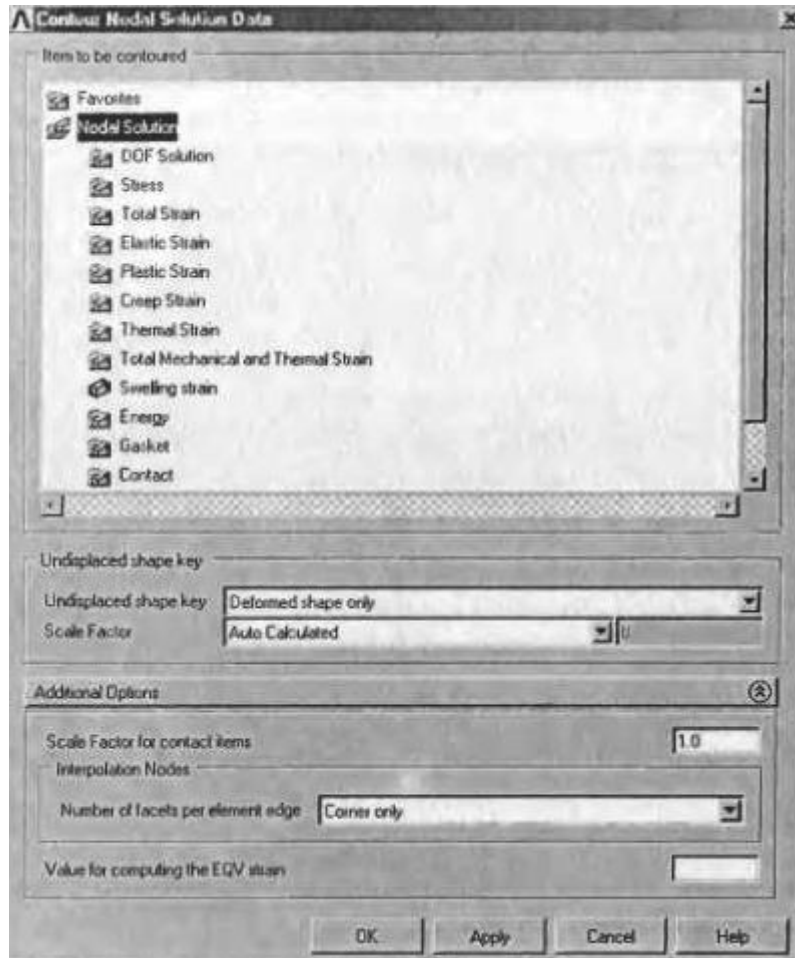


Рис. 7.2 – Диалоговая панель Contour Nodal Solution Data

а) Command(s):

PLNSOL

GUI:

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Nodal Solu

б) Command(s):

PLESOL

GUI:

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Element Solu

Внутри элемента результаты получаются линейной интерполяцией. Однако между элементами результаты не усредняются, что позволяет более точно установить градиент исследуемой величины.



Рис. 7.3 – Диалоговая панель Contour Element Solution Data

7.4. Векторный дисплей

Векторный дисплей применяется для показа изменения величины и направления вектора исследуемой функции. Примерами таких функций при выполнении прочностных расчетов являются: смещение (U), угол поворота сечения (ROT), главные напряжения (S), температурный градиент (TG).

Для вызова векторного дисплея используется одна из следующих команд:

Command(s):

PLVECT

GUI:

Main Menu→General Postproc→Plot Results→Predefined or User-Defined

На рис. 7.4 представлена диалоговая панель Vector Plot of Predefined Vectors.

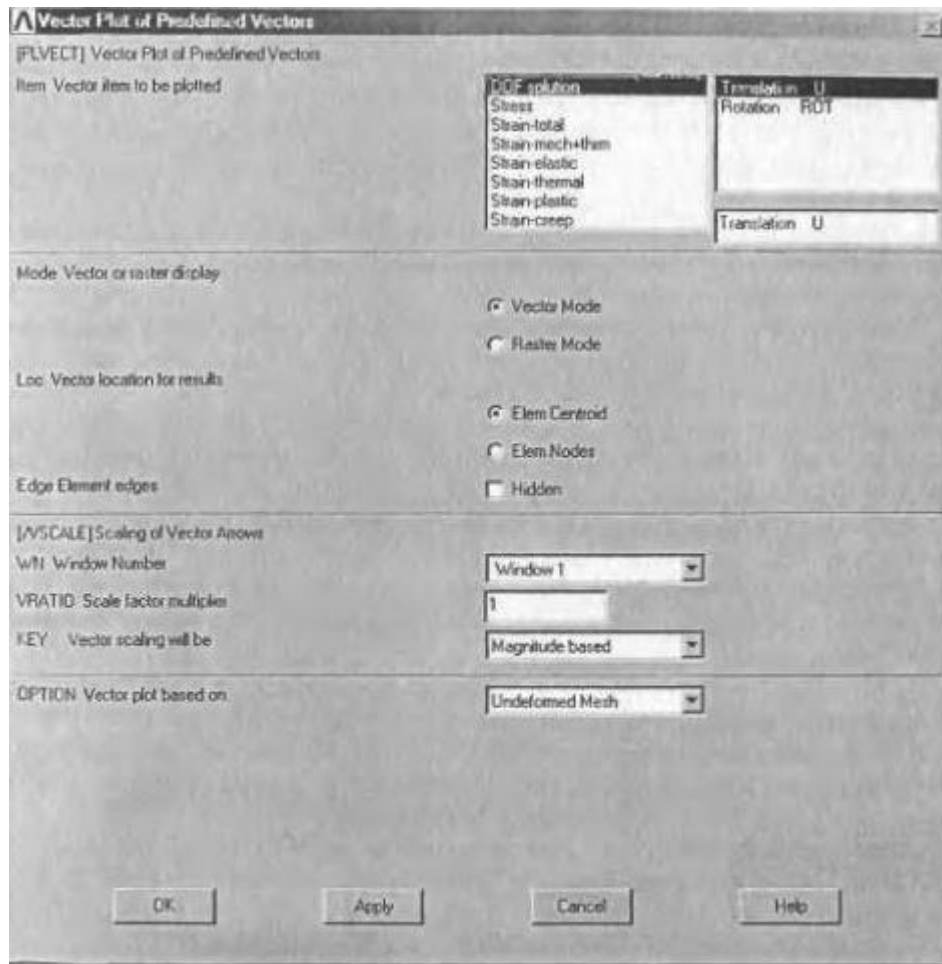


Рис. 7.4 - Диалоговая панель Vector Plot of Predefined Vectors

7.5. Дисплей граничных условий и реакций опор

Показывает на экране символы и величины граничных условий, а также реакции опор:

Command(s):

/PBC Item, ...

Item:

NFOR – силы в узлах;

NMOM – моменты сил в узлах;

RFOR – реакции опор (силы);

RMOM – реакции опор (моменты сил).

GUI:

Utility Menu→PlotCtrls→Symbols

При последующем вызове любого дисплея командами типа NPLOT, EPLOT или PLDISP в выходные данные будут включаться реакции в точках, где были ограничены степени свободы.

7.6. Представление результатов в табличной форме

Наиболее часто используются следующие две пары команд:

a) Command(s):

PRNSOL,U,X Печать x-компоненты вектора смещений U (т.е. U_x)

GUI:

Main Menu→General Postproc→ List Results→Nodal Solution

Utility Menu→ List →Results→Nodal Solution

б) Command(s):

PRESOL,S Печать всех компонент напряжений S

GUI:

Main Menu→General Postproc→ List Results→Element Solution

Список литературы

1. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003 – 272 с.
2. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г. Красковского. – М.: КомпьютерПресс, 2002 – 224 с.
3. Басов К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS. – М.: ДМК Пресс, 2006 – 248 с.
4. Программа ANSYS. Краткий курс. – Снежинск, 1996
5. Возможности программы ANSYS. / Перевод и редактирование Б.Г. Рубцова, оформление Л.П. Остапенко
6. Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. Свойства горных пород и методы их определения. - М., изд-во «Недра», 1969. – 392 с.
7. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640с.