

В.Б. БАЛЯКИН, А.Г. КОЖИН

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА ANSYS
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ
АВИАЦИОННЫХ РЕДУКТОРОВ**

2007



САМАРА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

В.Б. Балякин, А.Г. Кожин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА ANSYS ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ РЕДУКТОРОВ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 629.7.03:681.3:65.015.13(06)
ББК 39.55
Б 21



Инновационная образовательная программа "Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий"

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. С. В. Ф а л л а е в
д-р техн. наук, проф. С. И. Т к а ч е н к о

Б 21 Балякин В.Б.
Использование пакета ANSYS для проектирования деталей авиационных редукторов: учеб. пособие / В.Б. Балякин, А.Г. Кожин. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 44 с. : ил.

ISBN 978-5-7883-0502-8

Дан краткий анализ метода конечных элементов. Рассмотрены концептуальные аспекты проектирования авиационных изделий с помощью ЭВМ. Большое внимание уделено организации моделирования в пакете ANSYS. Рассмотрена возможность применения ANSYS как среды для моделирования при курсовом проектировании на примере стакана подшипника авиационного редуктора.

УДК 629.7.03:681.3:65.015.13(06)
ББК 39.55

ISBN 978-5-7883-0502-8

© Балякин В. Б., Кожин А.Г., 2007
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДЕ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	5
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ В ANSYS	7
2.1. Общие сведения об ANSYS	7
2.1.1. Что такое ANSYS	7
2.1.2. Типы прочностного анализа	7
2.1.3. Процессоры программы	8
2.1.4. База данных	9
2.1.5. Формат файлов	9
2.2. Основы работы в ANSYS	10
2.2.1. Запуск программы	10
2.2.2. Графический интерфейс пользователя	11
2.2.3. Фильтры меню	13
2.2.4. Работа с графическим изображением	13
2.2.5. Сохранение и загрузка базы данных. Файлы ANSYS	15
2.2.6. Выход из ANSYS	16
3. ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ В ANSYS	17
3.1. Основные этапы расчета	17
3.2. Создание геометрической модели (Main menu > Preprocessor > Modeling)	18
3.3. Разбиение на конечные элементы (Main menu > Preprocessor > Meshing)	21
3.4. Задание граничных условий	27
3.5. Запуск задачи на решение	32
3.6. Анализ результатов в постпроцессоре общего назначения (General Postproc)	34
3.7. Прежде чем запустить ANSYS	38
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	43

ВВЕДЕНИЕ

При конструировании механизма или машины необходимо обеспечить комплекс требований (критериев), предъявляемых к изделию, а именно: прочность, жесткость, надежность, экономичность, технологичность и др. Для удовлетворения этих требований конструктор-проектировщик авиационной техники должен выполнить кинематические, энергетические, прочностные, силовые и другие расчеты, а также выбрать материалы для деталей и их формы, обеспечивающие минимальные габариты, вес изделия, энергетические, материальные затраты и максимальную долговечность.

Проектирование машин и механизмов основано на обеспечении заданных критериев, основным из которых является прочность. Прочностной анализ разрабатываемых инженером вариантов конструкций требует большого количества расчетов, что немыслимо без использования вычислительной техники. Надёжность спроектированной конструкции зависит от правильности выбранных критериев проектирования и точности прочностных расчетов, поэтому современный инженер должен знать передовые методы прочностного анализа.

Современные методы прочностного анализа основаны на методе конечных элементов и реализованы в виде различных прикладных программ для ЭВМ. Одним из наиболее распространённых пакетов для расчёта конструкций на прочность и жёсткость является ANSYS.

Данное учебное пособие предназначено для студентов третьего курса механических специальностей, которые приступают к проектированию авиационного редуктора по дисциплине «Детали машин и основы конструирования».

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДЕ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет решать как статические, так и динамические задачи механики твердого тела. Могут учитываться неоднородность и анизотропия материала, физическая и геометрическая нелинейности [1-3, 5-7, 9].

В пособии рассматриваются только статические задачи при линейно-упругом поведении материала. Деформации предполагаются малыми.

Алгоритм МКЭ состоит из следующих основных операций.

1. Нагруженное тело (конструкция) разбивается на конечные элементы (рис. 1.1). Конечные элементы могут иметь различную форму. В результате разбивки создается сетка из границ элементов. Пересечения этих границ образуют узлы. На границах и внутри элементов могут быть созданы дополнительные узловые точки. Ансамбль из всех конечных элементов и узлов называется конечно-элементной моделью. Дискретная модель должна максимально полно покрывать область исследуемого объекта с учетом его особенностей.

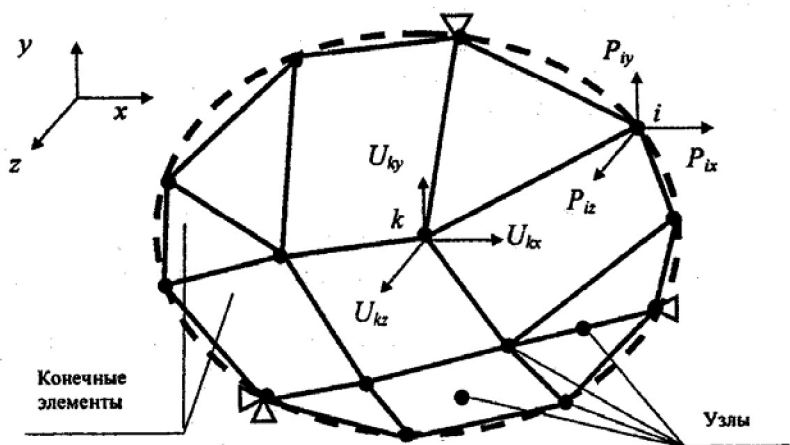


Рис. 1.1. Конечно-элементная модель

2. Состояние деформированного тела характеризуется конечным числом независимых параметров, определенных в узлах конечно-элементной сетки. Такие параметры называются обобщенными координатами, или степенями свободы. В рассматриваемых ниже задачах в качестве степеней свободы используются перемещения узлов, среди компонентов которых могут быть и угловые перемещения. Общее число узловых перемещений N определяет число степеней свободы модели. Набор узловых перемещений модели, имеющей n узлов, составляет вектор

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} U_1 \\ \dots \\ U_i \\ \dots \\ U_n \end{Bmatrix},$$

где $\{U_i\}$ - подматрица перемещений узла i , в частности, для 3-мерной задачи при использовании декартовой системы координат x, y, z

$$\{U_i\} = \begin{Bmatrix} U_{ix} \\ U_{iy} \\ U_{iz} \end{Bmatrix}.$$

3. Перемещения произвольных точек конечного элемента интерполируются через его узловые перемещения с помощью функций, зависящих от координат, которые называются функциями формы.
4. Все внешние силы, действующие на рассматриваемое тело, приводятся к эквивалентным узловым силам, образующим вектор

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ \dots \\ P_i \\ \dots \\ P_n \end{Bmatrix},$$

где $\{P_i\}$, - подматрица сил, приложенных в узле i , в частности, для 3-мерной задачи при использовании декартовой системы координат x, y, z

$$\{P_i\} = \begin{Bmatrix} P_{ix} \\ P_{iy} \\ P_{iz} \end{Bmatrix}.$$

К эквивалентным узловым силам приводятся также силы инерции и начальные, в том числе температурные, деформации.

1. С помощью вариационных принципов или условий равновесия конструкции находятся зависимости между неизвестными узловыми перемещениями $\{U\}$ и узловыми силами $\{P\}$. Для статических задач эти зависимости имеют вид

$$[K]\{U\} = \{P\}, \quad (1.1)$$

где $[K]$ – общая матрица жесткости конечно-элементной модели. Компоненты матрицы $[K]$ являются коэффициентами жесткости модели, их вычисляют путем суммирования соответствующих коэффициентов жесткости конечных элементов.

2. Система уравнений (1.1) решается прямыми или итерационными методами, в результате чего находятся узловые перемещения $\{U\}$.
3. Через узловые перемещения $\{U\}$ с помощью интерполяции вычисляются перемещения любых точек модели и другие величины, например, деформации, напряжения, реакции.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ В ANSYS

2.1. Общие сведения об ANSYS

2.1.1. Что такое ANSYS

ANSYS - многоцелевой конечно-элементный пакет для проведения анализа в широком круге инженерных дисциплин (прочность, теплофизика, динамика жидкостей и газов и электромагнетизм) [10, 11]. В отличие от большинства других пакетов такого уровня ANSYS позволяет решать в единой среде и на одной и той же конечно-элементной модели задачи:

- прочности;
- тепла;
- электромагнетизма;
- гидрогазодинамики;
- многодисциплинарного связанного анализа, объединяющего все четыре типа;
- оптимизации на основе всех вышеприведенных типов анализа.

Многоцелевая направленность программы привела к тому, что в настоящее время ANSYS широко используется практически во всех отраслях промышленности:

- автомобилестроении;
- авиакосмической отрасли;
- железнодорожном транспорте;
- судостроении и морской технике;
- двигателестроении;
- атомной энергетике;
- строительстве;
- электротехнике и электронике;
- теплотехнике;
- черной и цветной металлургии;
- других.

Совокупность программных средств фирмы ANSYS состоит из обширного семейства удобных многоцелевых расчетных кодов, имеющих много общего и призванных удовлетворять потребности пользователя в решении обширного круга инженерных задач. Флагманский продукт компании, пакет ANSYS/Multiphysics, представляет собой самое исчерпывающее программное средство в мире. Он включает в себя четыре основных компонента:

- ANSYS/Mechanical - решение задач прочности (ANSYS/Structural) и теплофизики (ANSYS/Thermal);
- ANSYS/Emag - решение задач электромагнетизма;
- ANSYS/FLOTTRAN - решение задач гидрогазодинамики;
- ANSYS/LS-DYNA - решение прочностных задач динамики при больших нелинейностях.

2.1.2. Типы прочностного анализа

Прочностной анализ (Structural Analysis) применяется для определения перемещений точек конструкции, деформаций, напряжений и реакций опор.

Прочностной статический анализ (Static analysis) используется для статических условий нагружения и позволяет учесть такие нелинейности, как большие перемещения (large deflections), большие деформации (large strain), пластичность (plasticity), гиперупругость (hyperelasticity), ползучесть (creep), контактное взаимодействие (contact) и другие.

Прочностной динамический анализ (Dynamic analysis) используется для определения действия на конструкцию или ее составные части нагрузок, зависящих от

времени. В отличие от статических расчетов в этом типе анализа принимается во внимание рассеяние энергии и инерционные эффекты переменных во времени нагрузок. Примерами таких нагрузок являются:

- циклические нагрузки (вращающиеся части оборудования);
- внезапно прикладываемые нагрузки (удар или взрыв);
- случайные нагрузки (землетрясение);
- любые другие переменные нагрузки (типа движущихся нагрузок на мосты).

В ANSYS возможны несколько типов прочностного динамического анализа:

Модальный анализ (Modal analysis) - определение собственных частот и форм колебаний конструкции.

Гармонический анализ (Harmonic analysis) - определение параметров установившегося движения линейной системы при синусоидальном силовом возбуждении.

Динамика переходных процессов (Transient Dynamic analysis) - анализ переходных процессов (неустановившихся режимов) - применяется для определения параметров динамического поведения конструкций, которые подвергаются действию нагрузок, меняющихся во времени.

Прочие типы прочностного анализа:

- Спектральный анализ (Spectrum analysis) - определение спектра отклика конструкции при ударном нагружении. Типичным приложением спектрального анализа является расчет на сейсмическое воздействие, который проводится для изучения влияния землетрясений на такие сооружения, как сети трубопроводов, башни и мосты. Результатом спектрального анализа являются функции отклика, зависящие от частоты.
- Отклик на случайную вибрацию (Random vibrations) - вариант спектрального анализа, который применяется для выявления отклика системы на возмущающие силы, не являющиеся детерминированными функциями времени. Примерами таких сил могут служить нагрузки, возникающие при работе реактивных или ракетных двигателей.
- Анализ устойчивости конструкций (Eigenvalue buckling) - используется, во-первых, для определения уровня нагрузок, при котором конструкция теряет устойчивость, во-вторых, для выяснения, сохраняет ли конструкция устойчивость при заданном уровне нагрузок. Этот тип анализа важен для определения стабильности состояния любых сооружений, несущих нагрузку, таких, как башни или мосты. В программе ANSYS имеется возможность выполнять два типа анализа устойчивости: в линейной и нелинейной постановке.
- Метод подконструкций (Substructuring, submodeling) - метод выделения из модели конструкции более простых ее составных частей - подконструкций. Используется для уменьшения времени решения или для повышения эффективности процесса моделирования за счет приведения группы или набора элементов к одному эквивалентному, самостоятельному элементу.
- Метод подмоделей (Submodeling) - делает возможным изъятие из полной расчетной модели некоторой ее части, перестроение сетки и более подробный анализ для выделенной области. Это может повысить эффективность численного моделирования, так как сначала делается анализ для грубой сетки, а затем для интересующей области - подмодели - измельчается сетка и уточняется расчет. Можно получить более точную информацию для части конструкции, не увеличивая сложность полной ее модели.

2.1.3. Процессоры программы

Все функции, выполняемые программой ANSYS, объединены в группы, которые называются процессорами (рис. 2.1). Программа имеет один препроцессор (Preprocessor), один процессор решения (Solution), два постпроцессора (General POST и Time History

POST) и несколько вспомогательных процессоров, включая оптимизатор. Препроцессор используется для создания геометрической модели конструкции, конечно-элементной модели и выбора опций для выполнения процесса решения.

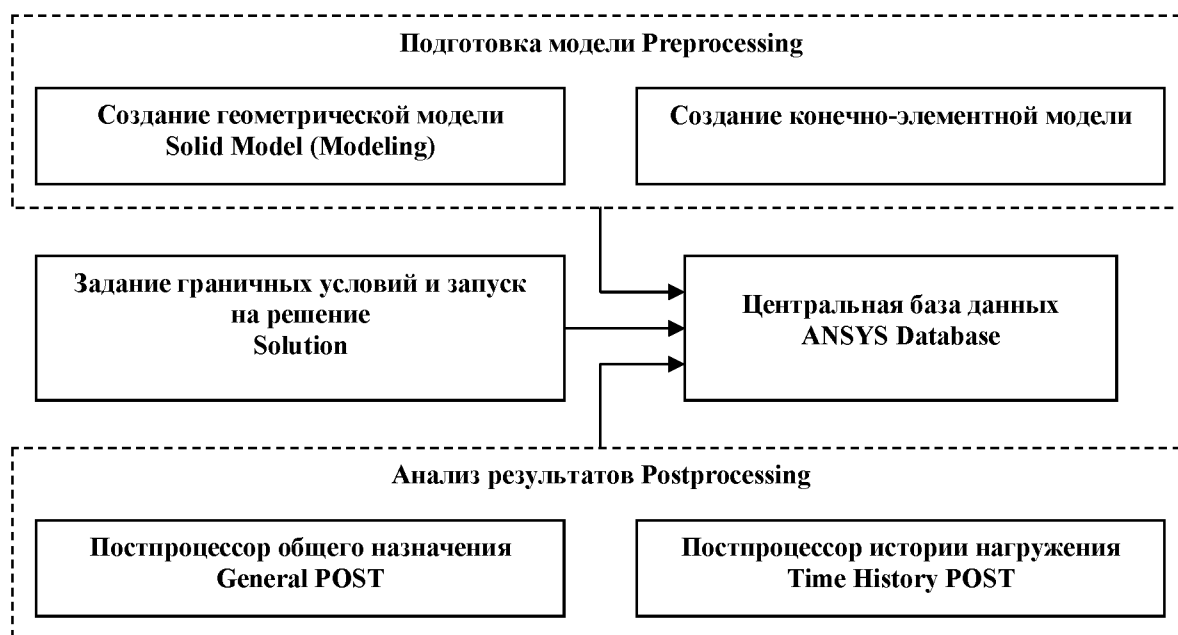


Рис. 2.1. Взаимодействие основных процессоров программы с центральной базой данных

Процессор решения используется для приложения нагрузок и граничных условий, а затем для определения отклика модели. С помощью постпроцессора пользователь обращается к результатам решения для оценки поведения расчетной модели, а также для проведения дополнительных вычислений, представляющих интерес.

2.1.4. База данных

В программе ANSYS используется одна, центральная, база данных для всего набора сведений, относящихся к модели и результатам решения (рис. 2.1). Сведения о модели (включая данные о геометрии твердотельной и конечно-элементной моделей, свойствах материалов и т.д.) записываются в базу данных на стадии препроцессорной подготовки. Нагрузки и результаты решения записываются процессором решения. Данные, полученные на основе результатов решения при их постпроцессорной обработке, записываются постпроцессором. Сведения, внесенные одним из процессоров, доступны при необходимости для других процессоров. Например, общий постпроцессор может считывать данные, относящиеся к решению и модели, а затем использовать их для постпроцессорных вычислений.

2.1.5. Формат файлов

Файлы используются для пересылки данных из одной части программы в другую, для создания базы данных и для сохранения выходных результатов работы. Эти файлы включают файлы базы данных, результатов, графических объектов и т.п. Создаваемые программой файлы имеют формат ASCII (т.е. могут легко читаться и редактироваться) или двоичный формат. По умолчанию бинарные файлы создаются программой ANSYS с использованием внешнего формата (IEEE Standard), обеспечивающего обработку данных различными аппаратными средствами. Например, данные о геометрии модели могут быть созданы пользователем в одной компьютерной системе, а затем без затруднений использованы другим пользователем программы, установленной на другой платформе.

2.2. Основы работы в ANSYS

В этом разделе обсуждается как запустить программу и выйти из нее, как использовать графический интерфейс программы, базу данных и другие файлы, создаваемые программой.

2.2.1. Запуск программы

Возможны два способа запуска программы ANSYS:

- С помощью меню операционной системы.
- С помощью командной строки.

При запуске с помощью меню операционной системы панель, доступная при нажатии на кнопку “Пуск” - «Программы» - ANSYS, будет выглядеть таким образом, как показано на рис. 2.2.

Перечислим основные ярлыки:

- Batch - командный режим работы.
- Interactive - панель настройки среды.
- Run Interactive Now - запуск сессии работы с текущими настройками.

Рекомендуется запускать сессию работы с пакетом из панели Interactive.

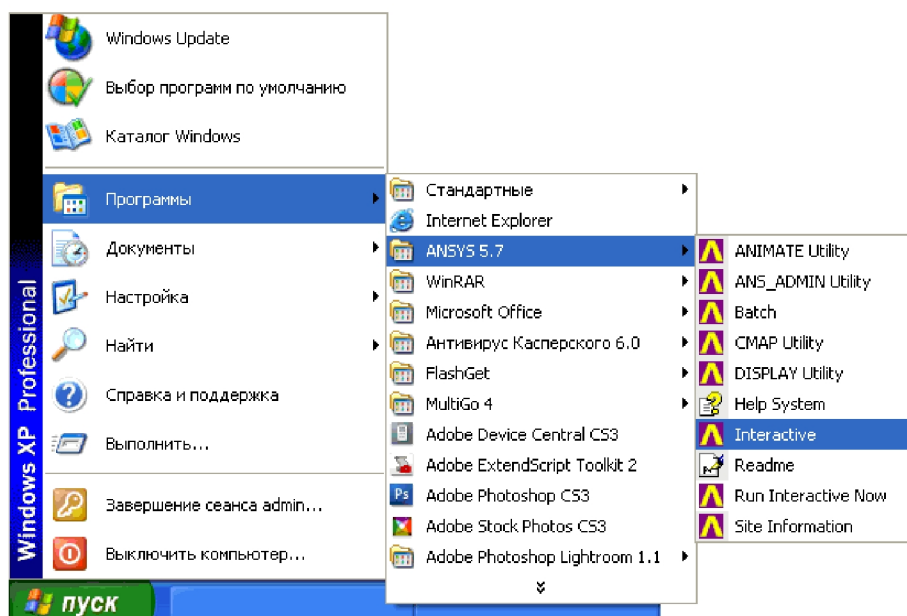


Рис. 2.2. Запуск ANSYS Interactive

Основные настройки панели ANSYS Interactive (рис. 2.3)

- Product selection - выбор одного из доступных продуктов семейства ANSYS.
- Run – сохранение новых параметров и запуск сессии.
- Close – сохранение новых параметров без запуска сессии. Working directory - папка, где будут создаваться все рабочие файлы.
- Graphics device name - тип видеодрайвера. Драйвер win32 обеспечивает отображение до 9 цветовых контуров, win32c – до 128 контуров (видеокарта 2 - 8 Mb), 3D обеспечивает динамическое вращение текстурированной модели, задание прозрачности и позиционирование источника цвета (от 8 Mb).
- Initial jobname - название сессии работы. Все файлы, создаваемые в рабочей папке, будут иметь указанное имя и разные расширения.

Важно! Имя задачи, рабочей папки, а также имена всех папок, которые содержат рабочую папку, не должны содержать русских букв (кириллицы). ANSYS не выдает

предупреждения о наличии в рабочей папке файла модели с тем же именем. Чтобы избежать потерь данных, меняйте jobname.

- Memory requested (megabytes)

For Total Workspace -суммарный размер рабочего пространства (виртуальной памяти, отводимой задаче);

For Database - размер базы данных.

Use default Memory Model – режим автоматического выделения памяти для рабочего пространства и базы данных (рекомендуется).

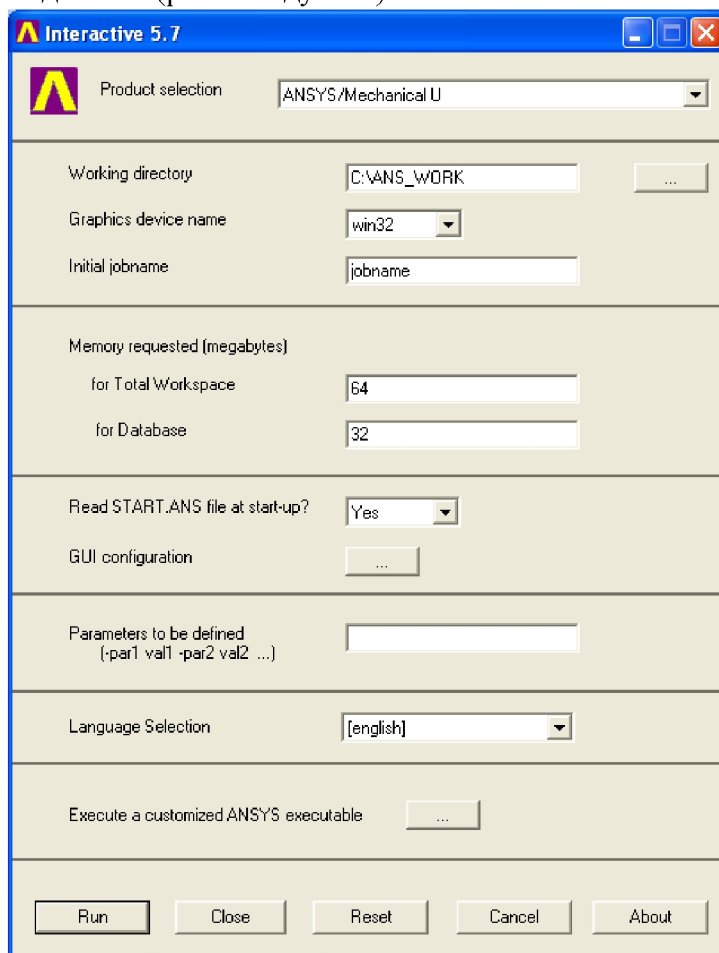


Рис. 2.3. Панель ANSYS Interactive

2.2.2. Графический интерфейс пользователя

При нажатии на кнопку Run запускается интерактивный режим работы с программой и на экране появляется графический интерфейс пользователя – GUI (рис.2.4). С помощью этого интерфейса 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. Система меню наделена "интуитивными" свойствами, помогая пользователю целесообразно управлять программой. Исходные данные можно вводить с помощью манипулятора "мышь", клавиатуры или сочетая эти два варианта.

Основным методом ввода инструкций для программы является метод ввода с помощью меню.

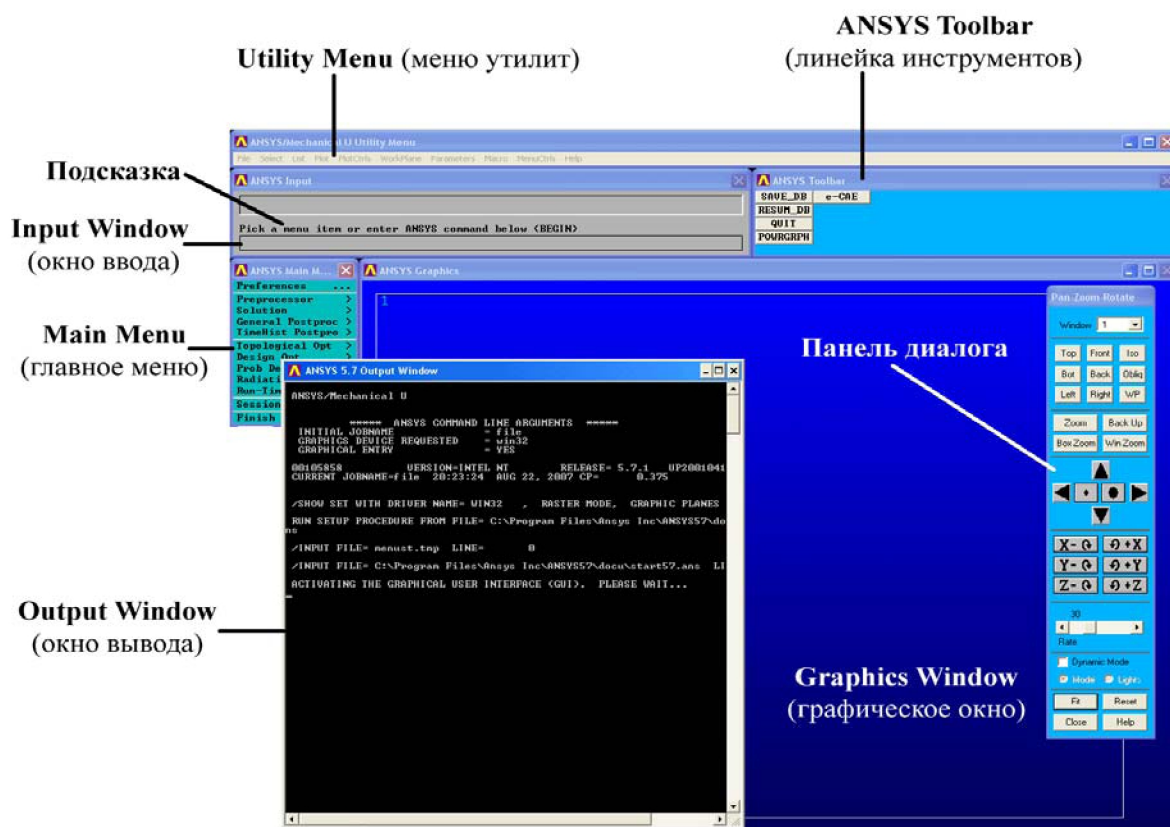


Рис. 2.4. Графический интерфейс пользователя

Меню представляет собой перечень нескольких логически связанных процедур управления программой, которые расположены в отдельных зонах экрана. К этим зонам, размер которых можно изменять 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. 2.4, включают в себя следующее.

- **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. 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. Размеры окна можно устанавливать, уменьшая или увеличивая по своему усмотрению.
- **Окно вывода** - фиксирует отклик программы на команды и действия пользователя. Всегда доступно при работе графического интерфейса. *Важно!* При закрытии этого окна ANSYS аварийно (без сохранения данных) завершает свою работу.

- **Линейка инструментов** - дает возможность пользователю разместить обычно используемые процедуры, например, команды или написанные пользователем подпрограммы, для быстрого их запуска щелчком «мыши». Можно создавать кнопки с текстом и иметь немедленный доступ к часто исполняемым командам. Линейка инструментов может вместить до 200 кнопок.
- **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. Многие панели диалога имеют кнопки Apply и OK. При нажатии кнопки Apply команда выполняется, но панель диалога остается (не закрывается) для повторного использования данной команды. При нажатии кнопки OK команда выполняется и панель диалога закрывается.

Помните, что для выполнения команд ANSYS Вы не обязаны использовать меню. Если известна команда и ее формат, Вы можете выполнить ее, набрав во входном окне с помощью клавиатуры и нажав клавишу Enter.

В нижней части экрана всегда отображается сообщение-подсказка, направляющая дальнейшие действия пользователя.

Размеры оконных областей главного меню, графического окна и линейки инструментов можно изменять с помощью «мыши» и запоминать внесенные изменения командой Utility Menu > MenuCtrls > Save Menu Layout.

2.2.3. Фильтры меню

Система меню графического интерфейса пользователя может изменяться (фильтроваться) в зависимости от типа выполняемого анализа с помощью команды Main Menu > Preferences (рис. 2.5).

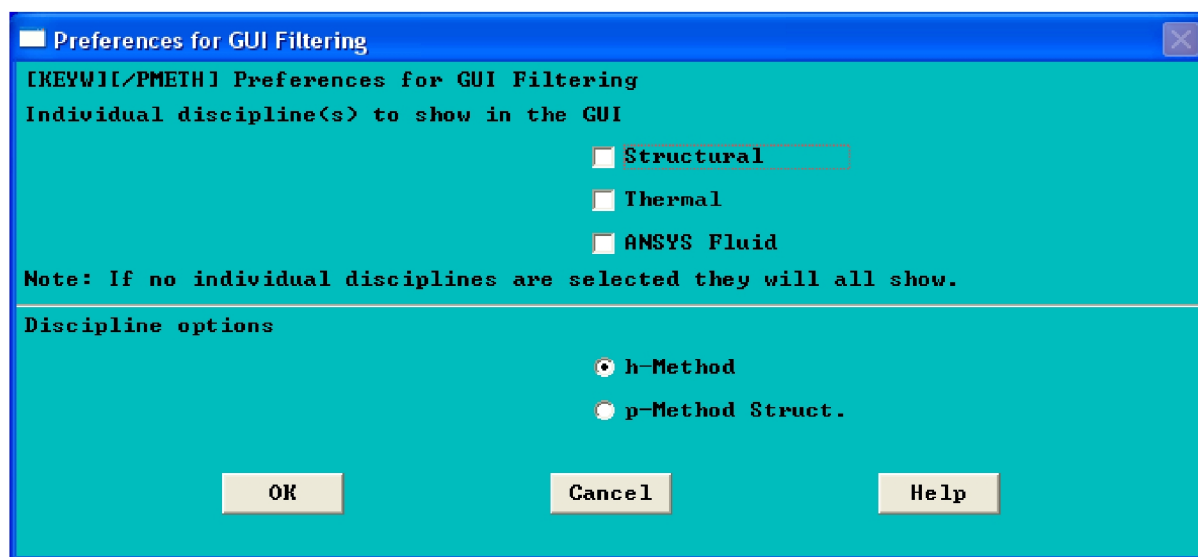


Рис. 2.5. Панель диалога фильтрации меню

Например, если Вы собираетесь решать задачу теплопроводности, можно исключить все пункты меню, не относящиеся к данному типу анализа (будут показаны только температурные конечные элементы, тепловые граничные условия и т.д.).

2.2.4. Работа с графическим изображением

Изображения в графическом окне необходимы для визуализации модели, граничных условий, результатов расчета и других входных и выходных данных. Для показа изображения того или иного объекта в графическом окне используется группа команд Plot в меню утилит или вводится соответствующая команда во входном окне (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Меню Plot

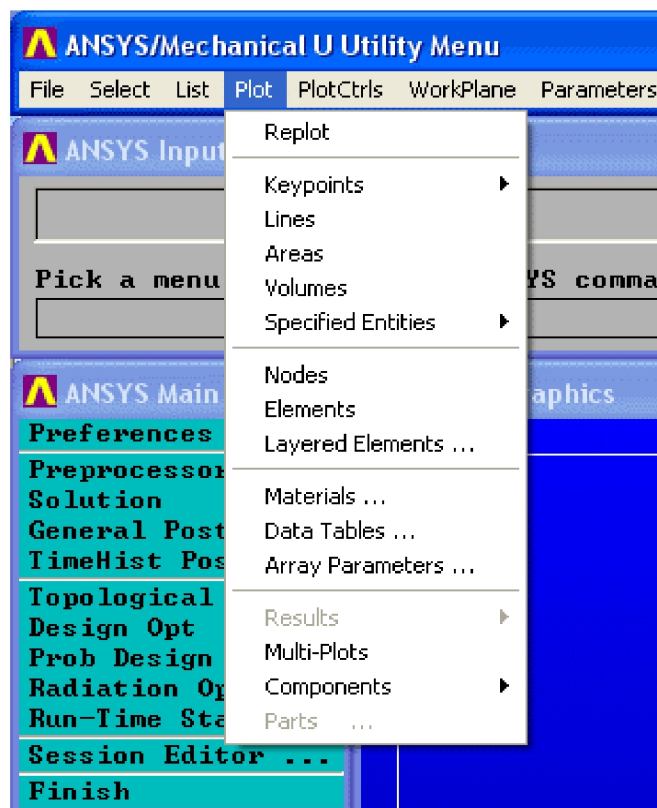


Рис. 2.7. Меню PlotCtrls

С помощью команд меню PlotCtrls можно выполнить настройку изображения (рис. 2.7), а именно:

- изменить ориентацию изображения в пространстве (подвинуть – Pan, повернуть - Rotate);
- увеличить или уменьшить изображение (Zoom);
- изменить цвета (Colors);
- изменить шрифты (Font Controls);
- показать нумерацию, символы, аннотацию и др. (Numbering, Symbols, Annotation);
- выполнить анимацию результатов (Animate) и др.

Наиболее часто из вышеперечисленных используются команды: Pan, Zoom, Rotate.

По умолчанию модель изображается в графическом окне во фронтальной проекции (ось +Z направлена на нас). Чтобы изменить проекцию, можно воспользоваться динамическим режимом (dynamic mode) используя одновременно клавишу клавиатуры Ctrl и кнопки манипулятора «мышь»:

- Ctrl + левая кн. «мыши» - перемещение модели;
- Ctrl + средняя кн. «мыши»:
- увеличение/уменьшение модели (перемещение «мыши» по вертикали);
- поворот модели вокруг оси Z (перемещение «мыши» по горизонтали);
- Ctrl + правая кн. «мыши» — вращает модель;
- вокруг оси X (перемещение «мыши» по вертикали);
- вокруг оси Y (перемещение «мыши» по горизонтали).

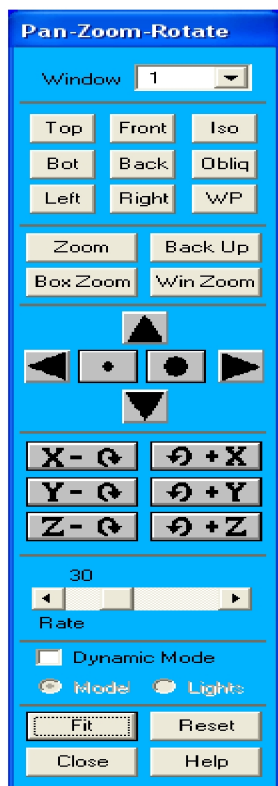


Рис.2.8. Меню Pan-Zoom-Rotate

Динамический режим можно также включить, используя панель диалога (Menu Utility > PlotCtrl > Pan-Zoom-Rotate (рис.2.8).

Другими командами, расположенными на панели диалога Pan-Zoom-Rotate являются:

- изображение стандартных проекций (вид сверху - Top, снизу - Bottom, спереди – Front, сзади – Back, слева – Left, справа – Right, изометрия - Iso, диметрия - Oblig, рабочая плоскость - WP;
- увеличение заданной области модели;
- перемещение, увеличение, уменьшение, вращение модели с заданным шагом. Шаг настраивается с помощью шкалы-движка, расположенной ниже кнопок вращения модели;
- автоматический подбор увеличения/уменьшения модели во все графическое окно (Fit);
- сброс настроек изображения (Reset).

2.2.5. Сохранение и загрузка базы данных. Файлы ANSYS

Термин «база данных» (ANSYS database) подразумевает данные ANSYS, которые хранятся в оперативной памяти компьютера при построении модели, решении задачи и просмотре результатов. База данных включает в себя как исходные данные задачи (размеры модели, свойства материалов, нагрузки и др.), так и результаты решения (перемещения, напряжения, деформации, реакции опор и т.д.).

Важно! Так как база данных хранится в оперативной памяти компьютера (RAM), необходимо принять за правило периодически сохранять базу данных в специальном файле на жестком диске компьютера. Это позволит восстановить информацию в случае аварийного выхода из ANSYS, зависания компьютера, отключения питания и др.

Для сохранения базы данных в файле необходимо выполнить команду SAVE. Самый простой способ выполнить команду SAVE – нажать соответствующую кнопку на линейке инструментов (Toolbar > Save_DB). При этом в рабочей директории образуется файл с расширением *Jobname.db*, где *Jobname* - название сессии работы (имя задачи). То же самое можно сделать из меню утилит (Utility Menu > File > Save as Jobname.db или Utility Menu > File > Save as...).

Для загрузки сохраненной базы данных в ANSYS необходимо выполнить команду RESUME (Toolbar > RESUME_DB или Utility Menu > File > Resume Jobname.db или Utility Menu > File > Resume from...).

По умолчанию имя файла для команд SAVE и RESUME - *Jobname* (текущее имя задачи), но его можно изменить на другое имя с помощью команд "Save as" и "Resume from".

Важно! Выполнение команд "Save as" и "Resume from" не изменяет текущего имени задачи.

- Если Вы сохраняете базу данных в файл, который уже существует в рабочей папке, то программа сначала скопирует этот файл в файл с тем же именем, но расширением DBB.
- Файл DB - это копия базы данных, которая находится в памяти компьютера именно в момент сохранения.
- Периодически сохраняйте базу данных. ANSYS не сохраняет базу автоматически.
- Возьмите за правило сохранять базу данных перед операциями, в выполнении которых или результате которых Вы не уверены. Команда RESUME в этом случае поможет Вам «отменить» сделанное ошибочное действие.
- Перед запуском задачи на решение (SOLVE) также рекомендуется сохранить базу данных.

Для того чтобы очистить базу данных, существует команда Utility Menu > File > Clear & Start New. Эта команда эквивалентна выходу из ANSYS и запуску его снова.

В процессе работы ANSYS сохраняет, а затем считывает из рабочей папки еще некоторые файлы. Все файлы имеют имя Jobname (текущее имя задачи) и различные расширения в зависимости от назначения файлов. Расширения файлам ANSYS обычно присваивает сам.

Для изменения текущего имени задачи необходимо выполнить команду /FILENAME (Utility Menu > File > Change Jobname.). Имя задачи должно иметь не более 32 символов и не должно содержать русских букв (кириллицы). По умолчанию имя задачи - FILE.

Типичные файлы ANSYS:

- *Jobname.log*: текстовый файл (ASCII), содержащий последовательность всех команд, выполненных в течение сессии работы. Если запустить другую сессию работы с тем же именем и в той же рабочей директории, то log-файл будет продолжен с отметкой времени запуска новой сессии.
- *Jobname.ert*: текстовый файл (ASCII), содержащий последовательность всех предупреждений и ошибок, о которых сообщалось в течение сессии работы.
- *Jobname.db*, *.dbb*: бинарные файлы базы данных. Совместимы для всех компьютерных платформ.
- *Jobname.rst*, *.rth*, *.rmg*, *.rfl*: бинарные файлы результатов расчета (*rst* - прочностной анализ, *rth* - тепловой анализ, *rmg* - анализ электромагнитных полей, *rfl* - анализ течения жидкостей и газов). Совместимы для всех компьютерных платформ.

Важно! Запускайте каждую новую задачу в отдельной рабочей директории.

- Используйте разные имена для разных задач.
- Сохраняйте в рабочей директории после окончания сессии работы следующие файлы: командный файл - *Jobname.log*, базу данных - *Jobname.db*, файл результатов - *Jobname.rst/rth/rmg/rfl*
- Используйте для удаления не нужных более файлов в течение сессии работы команды /DELETE или Utility Menu > File > ANSYS File Options.

2.2.6. Выход из ANSYS

Для выхода из программы существуют четыре способа:

1. Нажать кнопку на линейке инструментов (Toolbar > QUIT).
2. Выполнить команду EXIT в меню утилит (Utility Menu > File > Exit).
3. Ввести в командной строке (входное окно) /EXIT.
4. Нажать кнопку “х” в строке заголовка окна меню утилит.

При любом указанном способе выхода из программы появится панель диалога Exit from ANSYS (рис. 2.9). С помощью этой панели можно выйти из программы, сохранив в файле базы данных:

1. Геометрическую, конечно-элементную модель и граничные условия;
2. П.1 + опции этапа решения.
3. П. 1 + п.2 + результаты решения.
4. Выйти, ничего не сохраняя.

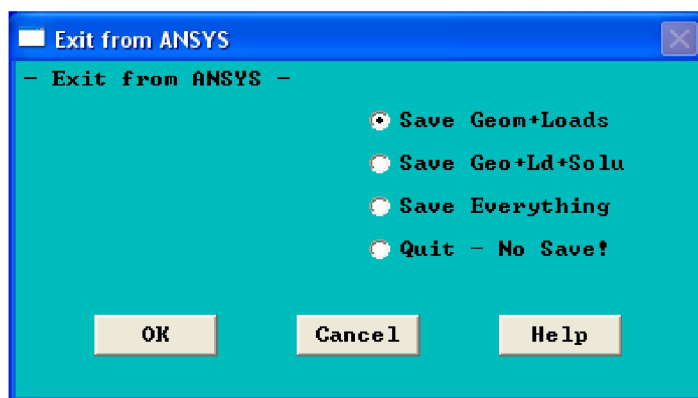


Рис. 2.9. Панель диалога Exit для ANSYS

3. ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ В ANSYS

Как уже отмечалось, прочностной анализ (Structural Analysis) применяется для определения перемещений точек конструкции, деформаций, напряжений и реакций опор. В данной главе на примере линейного статического прочностного анализа рассматриваются основные шаги, освоив которые, можно быстро научиться выполнять другие виды анализа.

Возможности прочностного статического анализа программы ANSYS используются для определения перемещений, напряжений, деформаций и усилий, которые возникают в конструкции или ее составных частях в результате приложения механических нагрузок. Статический анализ пригоден для задач, в которых действие сил инерции или процессы рассеяния энергии не оказывают существенного влияния на поведение конструкции.

Все типы расчетов, выполняемые программой ANSYS, основаны на методе конечных элементов. Совокупность дискретных областей (конечных элементов), связанных между собой в конечном числе точек (узлов), представляет собой математическую модель системы, поведение которой нужно анализировать. Основными неизвестными являются степени свободы узлов конечно-элементной модели - DOF (перемещения, повороты, температуры, давления, скорости и т.д.). Для статического анализа степенями свободы являются перемещения и углы поворота узлов конечно-элементной модели.

Разрешающее уравнение статического анализа в методе конечных элементов записывается в виде

$$[K]\{u\} = \{F\}, \quad (3.1)$$

где $[K]$ - глобальная матрица жесткости конструкции;

$\{u\}$ - вектор неизвестных перемещений;

$\{F\}$ - вектор заданных сил.

Компоненты вектора сил $\{F\}$ могут представлять собой сосредоточенные силы, тепловые нагрузки, давления и силы инерции.

При запуске на решение программа, в соответствии со степенями свободы для каждого элемента модели, формирует матрицы жесткости элемента, которые затем объединяются в глобальную матрицу жесткости конструкции $[K]$. Учитывая заданные граничные условия в виде закреплений и нагрузок, формируется вектор сил $\{F\}$. Далее полученная система линейных алгебраических уравнений (3.1) обрабатывается так называемыми "решателями" (*solver*).

После завершения решения системы уравнений определяются напряжения и деформации в конечных элементах, а также усилия и реакции внутренних и внешних связей.

3.1. Основные этапы расчета

Решение любой задачи в ANSYS включает в себя три основных этапа:

- Preprocessing (подготовка модели);
- Solution (решение);
- Postprocessing (анализ результатов).

Подготовка модели (Preprocessing)

1. Выбор типа конечного элемента и настройка его опций.
2. Задание геометрических характеристик сечения конечного элемента (площадь сечения, толщина и т.д.).
3. Задание свойств материала.
4. Построение геометрической модели конструкции.
5. Разбиение геометрической модели на конечные элементы.

Решение (Solution)

1. Выбор типа анализа и настройка его опций.

2. Задание граничных условий.

3. Запуск на решение.

Анализ результатов (Postprocessing)

1. Вызов главного постпроцессора или постпроцессора истории нагружения.

2. Просмотр результатов решения в виде таблиц, графиков, изолиний видеоклипов и др.

3.2. Создание геометрической модели (Main menu > Preprocessor > Modeling)

Типичная геометрическая модель (Solid Model) состоит из следующих геометрических объектов (рис.3.1):

- ключевые точки (Keypoints) - точки в пространстве, вершины объектов;
- линии (Lines) - представляют собой кромки объектов, на концах ограничены ключевыми точками;
- поверхности (Areas) - представляют собой грани объектов, плоскости или оболочки. Ограничены линиями;
- объемы (Volumes) - геометрические тела, ограничены поверхностями.

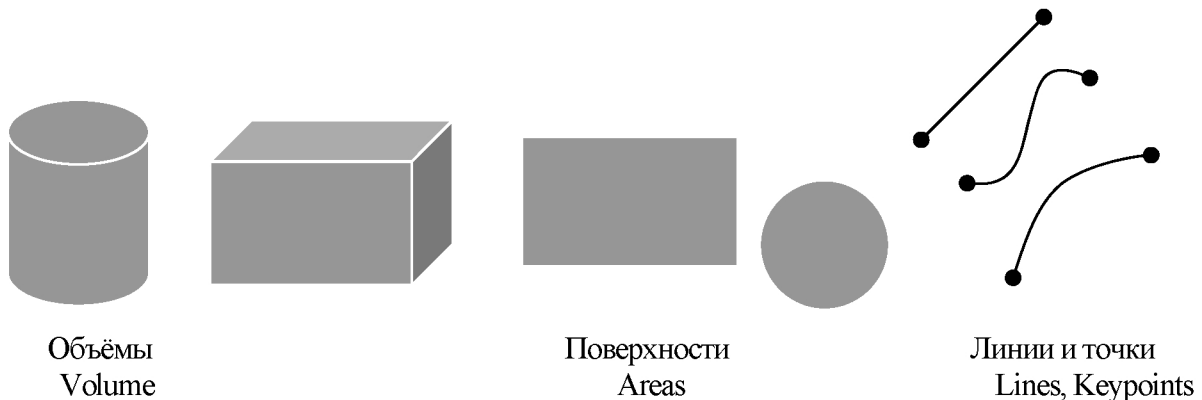


Рис. 3. 1 . Геометрические объекты

Геометрические объекты подчинены строгой иерархии. Ключевые точки – основание модели. Линии создаются по ключевым точкам, поверхности - по линиям и объемы - по поверхностям. Таким образом, нельзя удалить или изменить объект более низкого уровня (например, ключевую точку), если он принадлежит объекту более высокого уровня (линии, поверхности, объему).

Существует два подхода к построению геометрической модели:

- моделирование «сверху-вниз» (Top-down);
- моделирование «снизу-вверх» (Bottom-up).

Моделирование «сверху-вниз» сразу начинается с построения объемов (поверхностей), путем изменения и комбинации которых создается окончательная геометрия модели (рис. 3.2. а). Объемы и поверхности, которые изначально создаются при этом способе построения, имеют какую-либо правильную геометрическую форму (прямоугольник, окружность, цилиндр и т.д.) и называются - примитивами (Primitives). Операции, с помощью которых из примитивов создается окончательная геометрия, - булевы операции (Boolean operations).

При моделировании «снизу-вверх» создаются ключевые точки, по которым создаются линии, поверхности и уже затем объемы (рис. 3.2, б).

Двумерные примитивы (2-D Primitives): прямоугольники (rectangles), круги (circles), равнобедренные треугольники (triangles) и другие правильные многогранники (polygons).

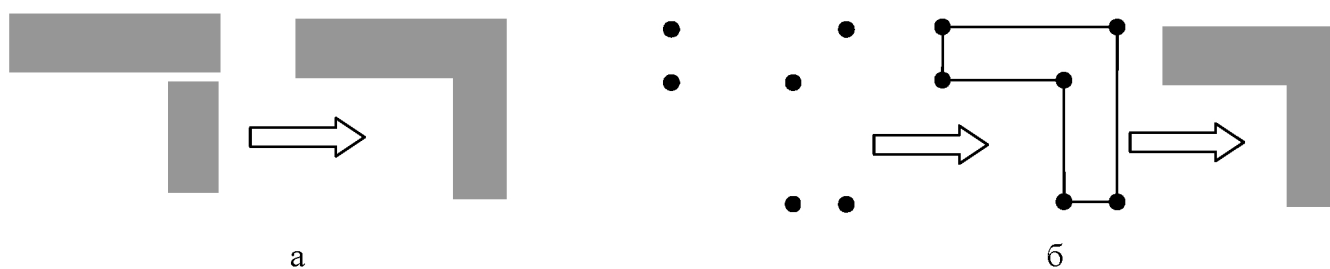


Рис. 3.2. Моделирование Top-down (а) и Bottom-up (б)

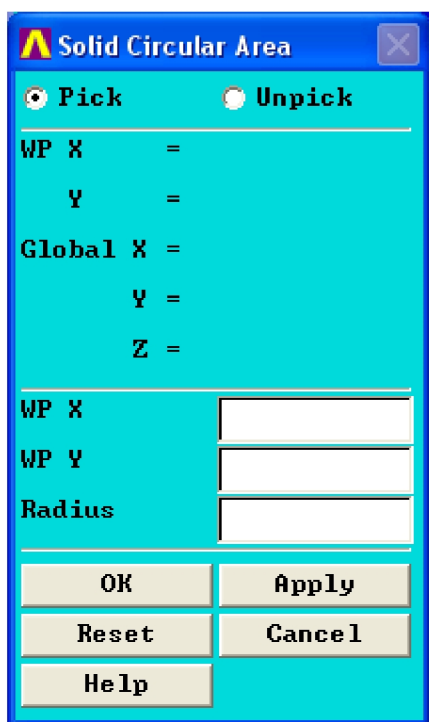


Рис. 3.3. Панель диалога создания круглой поверхности

Трехмерные примитивы (3-D Primitives): параллелепипеды (blocks), цилиндры (cylinders), призмы (prisms), сферы (spheres), конусы (cones) и торы (tores).

Когда создаются 2-D примитивы, программа создает поверхности (Areas) и автоматически все принадлежащие ей линии и ключевые точки. При создании 3-D примитивов образуются объемы (Volumes) и все принадлежащие им поверхности, линии и ключевые точки.

Примитивы создаются по их размерам (ширина – Width, высота – Height, глубина – Depth, радиус – Radius, угол – Angle и т.д.) или с помощью манипулятора «мышь» и меню для указания местоположения (Picking) в графическом окне.

Например, при создании круглой поверхности (Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Circle >) координаты центра и радиуса можно задать в появившейся панели диалога и затем нажать кнопку OK или Apply (рис. 3.3), а можно «мышью» указать положение центра в графическом окне, затем, двигая «мышью», определить радиус круга.

Булевы операции (Boolean Operations) (рис.3.4)

К булевым операциям относятся такие операции над геометрическими объектами, как сложение, вычитание, деление, склеивание, пересечение, деление пересекающихся объектов на части своими кромками. Сложение (Add) - объединяет два или более объекта в один.

Вычитание (Subtract) - удаляет совпадающие части одного или нескольких объектов из набора объектов. Операция полезна при создании отверстий, вырезов и др. При выполнении операции сначала указываются объекты, из которых вычитают, затем объекты, которые вычитаются.

Деление (Divide) - делит объект (объекты) на две или больше частей другим (другими) объектом. Создаваемые новые объекты имеют общие границы. В качестве «делителя» могут быть использованы линии, поверхности, объемы, рабочая плоскость

Склеивание (Glue) - склеивает объекты, образуя у них общие границы. Операция полезна, когда нужна граница между объектами, например для задания различных свойств материалов.

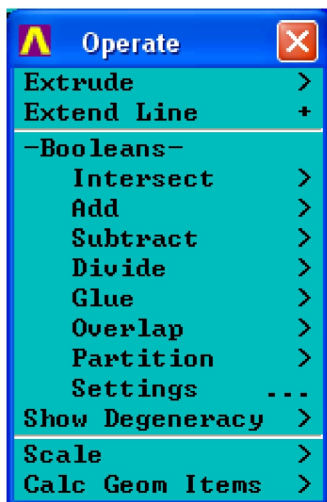


Рис. 3.4. Булевы операции

Пересечение (Intersect) - сохраняет только общую часть двух или более объектов. Есть два вида этой команды: общее пересечение (Common intersection) - получение общей части всех объектов; парное пересечение (Pairwise intersection) - нахождение общих частей пар объектов.

Overlap, Partition - деление пересекающихся объектов на части своими кромками.

По умолчанию исходные объекты, над которыми выполняется операция, удаляются (сохраняется только результат операции). Номера удаленных объектов высвобождаются и могут быть присвоены вновь созданным объектам.

Создание ключевых точек (Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints).

Для создания ключевых точек требуется указать номер точки и ее координаты в активной системе координат. Если номер ключевой точки не задается, то он присваивается автоматически (наименьший из неиспользованных номеров). Положение ключевой точки на рабочей плоскости (Working Plane) может быть задано указанием «мышью» в графическом окне или заданием координат X, Y, Z в соответствующей панели диалога. Заданные координаты интерпретируются в активной в данный момент системе координат (Active Coordinate System). По умолчанию активной системой координат является глобальная декартова (прямоугольная) система координат. Используя команду Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to..., можно изменить систему координат:

- на глобальную декартовую систему координат (Global Cartesian – csys, 0);
- на глобальную цилиндрическую систему координат (Global cylindrical – csys, 1);
- на мобильную сферическую систему координат (Global spherical – csys, 2);
- на систему координат, связанную с рабочей плоскостью (working plane – csys, 4).

Для удобства построения геометрической модели можно создавать различные пользовательские локальные системы координат (Local CS). Им можно присваивать номера начиная с 11. Локальные системы координат также могут быть декартовыми, цилиндрическими или сферическими.

Создание линий (Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines):

- ... Create > Lines > Lines - создание прямых линий через ключевые точки (Straight Line), касательных (tangent) и перпендикулярных (normal) линий, линий под углом к другой линии (At angle to line) и других;

- ... Create > Lines > Arcs - создание окружностей и дуг;
- ... Create > Lines > Splines - создание сплайнов;
- ... Create > Lines > Line Fillet - создание радиуса скругления между двумя линиями.

При создании поверхностей и объемов линии, принадлежащие им, автоматически создаются с кривизной, соответствующей активной системе координат.

Создание поверхностей (Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas):

- ... Create > Areas > Arbitrary - создание поверхностей через ключевые точки (Through KPs) или линии (By Lines);

- ... Create > Areas > Rectangle - создание прямоугольных поверхностей;
- ... Create > Areas > Circle - создание круглых поверхностей (Solid Circle), круглых поверхностей с отверстием (Annulus), секторов с отверстием (Partial Annulus) и других;
- ... Create > Areas > Polygon - создание правильных многогранников;
- ... Create > Areas > Area Fillet - создание радиуса скругления между двумя поверхностями.

Создание объемов (Main menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes):

- ... Create > Volumes > Arbitrary - создание объемов через ключевые точки (Through KPs) или поверхности (By Areas);

- ... Create > Volumes > Block - создание параллелепипедов;
- ... Create > Volumes > Cylinder - создание цилиндров (Solid cylinder), цилиндров с отверстием (Hollow cylinder), секторов цилиндров с отверстием (Partial cylinder) и других;
- ... Create > Volumes > Prism / Sphere / Cone / Torus - создание призм, сфер, конусов, торов.

Операции с объектами:

– Main menu > Preprocessor > Modeling > Move / Modify - перемещение объекта в активной системе координат на расстояние DX, DY, DZ. Линейное перемещение выполняется в декартовой системе координат, угловое (поворот) - в цилиндрической.

– Main menu > Preprocessor > Modeling > Copy - копирование объектов в активной системе координат на расстояние DX, DY, DZ.

– Main menu > Preprocessor > Modeling > Reflect - зеркальное отражение объектов относительно плоскостей системы координат YZ, XZ, XY. Команда выполняется в активной системе координат, которая должна быть декартовой.

– Main menu > Preprocessor > Modeling > Check Geom - проверка геометрии. Нахождение коротких линий (Sel Small Lines), нахождение вырожденных поверхностей и объемов (Show Degeneracy), измерение расстояния между ключевыми точками и узлами (KP distances и ND distances).

– Main menu > Preprocessor > Modeling > Delete - удаление объектов. Для удаления только указанных объектов команда ... Only. Если необходимо удалить указанные объекты и все, что им принадлежит - команда ... Below. Например: для удаления линий - Lines Only (ключевые точки, принадлежащие этим линиям не будут удалены), для удаления поверхностей и всего, что им принадлежит – Areas and Below (будут удалены поверхности, а также линии и ключевые точки, принадлежащие им).

3.3. Разбиение на конечные элементы (Main menu > Preprocessor > Meshing)

Создание конечно-элементной сетки включает в себя четыре основных этапа:

- Задание атрибутов конечных элементов.
- Настройка параметров конечно-элементного разбиения.
- Генерация конечно-элементной сетки.
- Изменение (улучшение) конечно-элементной сетки.

Рассмотрим подробнее каждый из этих этапов.

Задание атрибутов конечных элементов

С каждым конечным элементом ассоциируются следующие атрибуты:

- Тип элемента (Element type - TYPE).
- Геометрические характеристики сечения элемента (Real constant - REAL).
- Свойства материала (Material properties - MAT).

Большинство конструкций имеют различные атрибуты. Например, модель резервуара, изображенная на рис. 3.5, имеет два типа конечных элементов (оболочка и балка), два материала (алюминий и сталь) и различные геометрические характеристики сечений (две толщины оболочки и сечение балки). В этом случае необходимо точно определить, какие конечные элементы имеют те или иные атрибуты. Для этого есть три способа:

1. До разбиения на конечные элементы установить соответствующие атрибуты объектам геометрической модели (ключевым точкам, линиям, поверхностям и объемам).
2. Перед разбиением на конечные элементы какой-либо части конструкции указать, какие атрибуты присваивать модели при разбиении (команды TYPE, REAL, MAT).
3. Изменить атрибуты части элементов после разбиения на необходимые.

Если не определить, где и какие должны быть атрибуты, то по умолчанию все конечные элементы будут первого типа (TYPE=1), с первыми свойствами материала (MAT=1) и с первыми геометрическими характеристиками сечения (REAL=1).

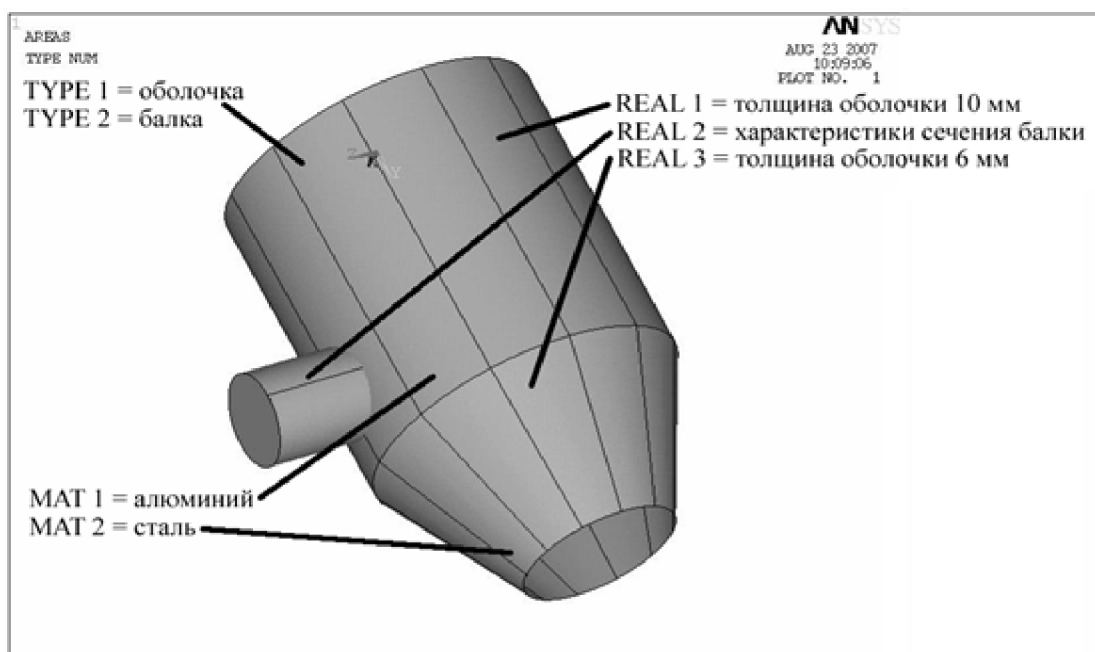


Рис. 3.5. Пример конструкции с различными атрибутами

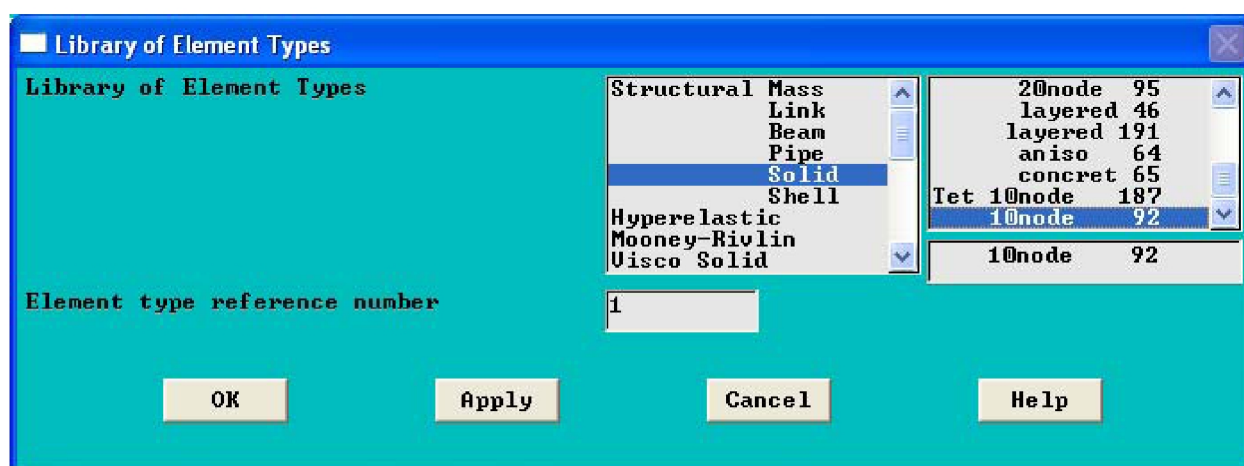


Рис. 3.6. Панель диалога для выбора типа конечных элементов

Выбор типа конечных элементов (Main menu > Preprocessor > Element Type > Add / Edit / Delete)

Библиотека конечных элементов ANSYS включает в себя более 200 типов конечных элементов. Все элементы сгруппированы по типам анализа (Structural - прочностные, Thermal - тепловые и т.д.) и группам элементов (Mass - сосредоточенные массы, Link - стержни, Beam - балки, Pipe - элемент трубопровода, Solid - двух- и трехмерные тела, Shell - оболочки и другие, рис. 3.6).

Основными параметрами конечного элемента являются:

- идентификатор конечного элемента. Состоит из описательного префикса и уникального номера. Например: Beam 3, Plane 42, Brick 45 и др.;
- типичное количество узлов. Например: Plate 4 2 - 4 узла, Plate 82 - 8 узлов;
- набор степеней свободы (DOF). Например, в задаче теплопроводности каждый узел конечного элемента имеет одну степень свободы - температуру (TEMP), а в прочностной задаче их может быть до шести - перемещения UX, UY, UZ и углы поворотов ROTX, ROTY, ROTZ;
- форма конечного элемента - параллелепипед, тетраэдр, четырехугольник, треугольник и т.д.;
- размерность пространства - двумерное – 2D (только плоскость X-Y) или трехмерное - 3D;
- порядок аппроксимации перемещений внутри элемента - линейные конечные

сечения, моменты инерции и др. Эти величины для балочного элемента и являются геометрическими характеристиками сечения. Для элемента пластины или оболочки геометрическими характеристиками сечения являются: толщина, для сосредоточенной массы - масса. Для конечных элементов трехмерного тела (и некоторых других) геометрические характеристики сечения, как правило, не требуются, так как все размеры КЭ определяются положением узлов.

Задание свойств материалов (Main menu > Preprocessor > Material Properties)

Любой тип анализа требует задания каких-либо свойств материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность и т.д. - в прочностном анализе, коэффициент теплопроводности, теплоемкость и т.д. - в задачах теплопроводности). Существует два способа задания свойств материала:

1. Загрузка свойств материала из библиотеки материалов программы ANSYS (Main menu > Preprocessor > Material Properties > Material Library > Import Library).
- Непосредственный ввод свойств с помощью меню элементы (узлы только в вершинах КЭ) или квадратичные (есть дополнительные узлы в середине каждой стороны КЭ). В линейных КЭ напряжения и деформации внутри элемента меняются по линейному закону, а в квадратичных - по квадратичному закону. Для заданного числа КЭ квадратичные элементы дают более точные результаты, но увеличиваются время решения задачи и необходимое место для хранения данных в памяти компьютера и на жестком диске (за счет большего числа узлов).

Задание геометрических характеристик сечения конечных элементов (Main menu > Preprocessor > Real constants)

2. Команды задания геометрических характеристик сечения КЭ используются для задания геометрических характеристик, которые полностью не определяются геометрией конечных элементов. Например: балочный КЭ представляет собой отрезок с двумя узлами на концах. Это определяет только длину элемента. Для того чтобы задать поперечное сечение балки, необходимо ввести площадь или команду (Main menu > Preprocessor > Material Properties > Material Models).

Первый способ может быть использован только в том случае, если в существующей библиотеке уже есть необходимые свойства. Библиотеку материалов можно пополнять новыми свойствами для дальнейшего использования (Export Library). Свойства некоторых материалов уже есть в ANSYS.

Второй способ более универсальный (рис.3.7).

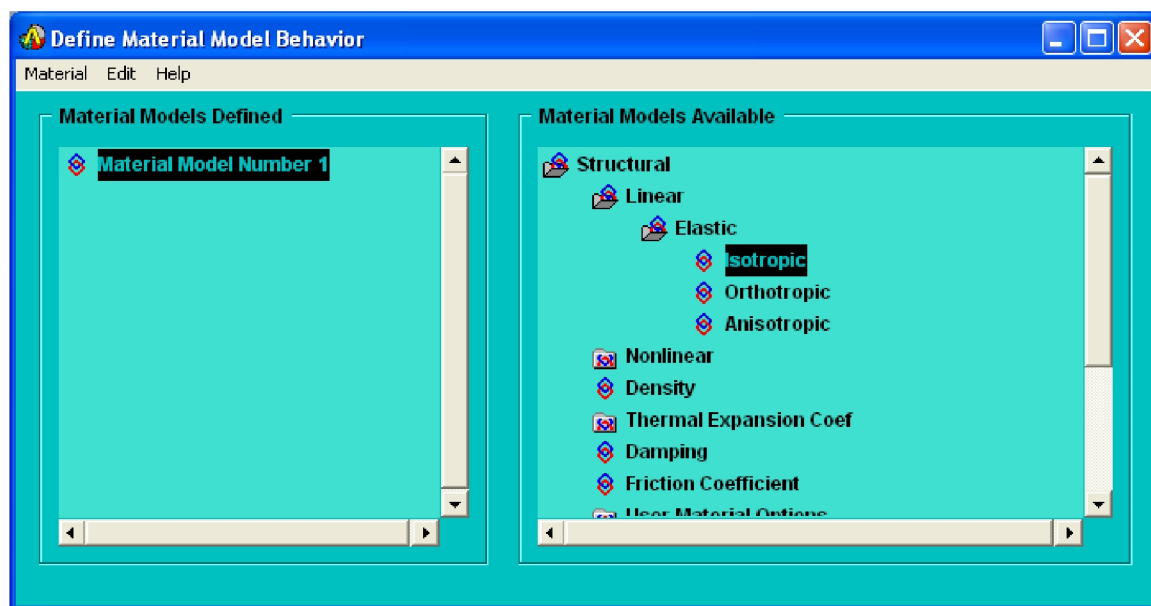


Рис. 3.7. Панель диалога задания свойств материала

С помощью него можно ввести любые свойства, которые требуются для данного типа анализа, включая, нелинейные свойства материала, свойства, зависящие от температуры, свойства анизотропных материалов и др.

Например, для упругого прочностного анализа при изотропном материале (Isotropic) обычно достаточно задать модуль упругости (Юнга) — EX, коэффициент Пуассона - NUXY (PRXY), плотность - DENS (необходима только для динамического анализа, или статического, если есть инерционные, гравитационные нагрузки и др.).

Важно!

1. В ANSYS нет команд, с помощью которых можно установить единицы измерения, которые вы будете использовать.
2. Вы должны сами для себя выбрать систему измерения и использовать ее на всех этапах решения задачи. Например, если геометрические размеры модели - в метрах (система измерений СИ), то и все свойства материалов, геометрические характеристики сечения, нагрузки и т.д. должны быть заданы в этой же системе.
3. ANSYS «не понимает» никакие единицы измерения! Программа просто принимает все числа, которые в нее вводятся, безо всякой привязки к физической сущности задачи.
4. Существующая в программе команда /UNITS позволяет задать используемые единицы измерения, но это просто информация для других пользователей, которые могут работать с Вашей моделью - какие единицы измерения использовали Вы.

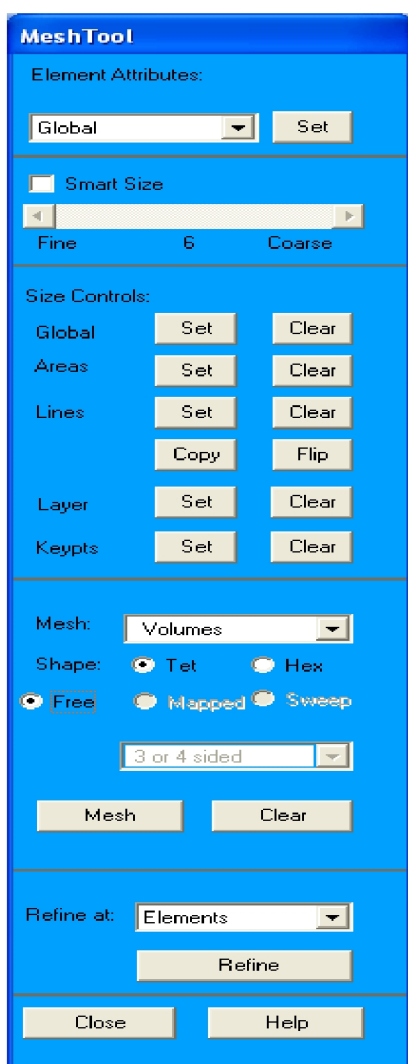


Рис. 3.8. Панель диалога Mesh Tool

рекомендуется разбивать сразу все объемы (поверхности) - это облегчает программе поиск наиболее качественного варианта сетки. Этот режим по умолчанию отключен, но именно он рекомендуется для свободного разбиения (free). Время разбиения при этом режиме может быть достаточно большим.

Настройка параметров конечно-элементного разбиения (Main menu > Preprocessor > MeshTool)

Наиболее употребимые команды, относящиеся к подготовке конечно-элементного разбиения, разбиения и изменения сетки, собраны в панели диалога MeshTool (рис.3.8).

Программа предоставляет пользователю очень широкие возможности по управлению плотностью конечно-элементной сетки как на глобальном уровне (для всей модели в целом), так и на локальном (отдельные ключевые точки, поверхности, объемы). На глобальном уровне это:

- SmartSizing («смартсайзинг»);
- Global Element Sizing (задание размера элементов для всей модели);
- Default Sizing (режим по умолчанию).

Рассмотрим особенности этих режимов.

Режим Smart Size включает алгоритм автоматического разбиения с учетом геометрических особенностей объектов (длины и кривизны линий, наличия отверстий и других особенностей модели), а также с учетом настроек, сделанных на локальном уровне для линий – Lines Set (см. ниже). Smart Size имеет 10 уровней, изменяя которые, можно регулировать плотность и качество разбиения (1 - самая точная сетка, 10 - самая грубая). По умолчанию включен уровень 6. При включенном режиме Smart Size

Global Element Sizing позволяет задать максимальную длину ребра каждого конечного элемента (SIZE) или число элементов (их ребер) вдоль всех линий (NDIV). Этот режим может использоваться самостоятельно или при включенном Smart Size. Если Smart Size выключен, то при разбиении будут получены примерно равные по размерам конечные элементы во всех разбиваемых объемах (поверхностях). При включенном Smart Size указанный размер конечных элементов будет взят за основу, но может быть изменен режимом Smart Size в соответствии с выбранным уровнем Smart Size.

Default Sizing используется программой, если не выбран никакой другой режим. При этом программа использует заложенный по умолчанию размер элемента с учетом настроек, сделанных на локальном уровне для линий.

На локальном уровне программа позволяет пользователю задать настройки разбиения для ключевых точек, линий и поверхностей (кнопки Set для Keypoints, Lines и Areas соответственно, см. рис.3.18).

Keypoints Set настраивает размер элементов вблизи указанных ключевых точек. Разные ключевые точки могут иметь разный размер элементов. Используется, как правило, в местах возможной концентрации напряжений.

Наибольшие возможности из настроек на локальном уровне имеют настройки разбиения линий. Lines Set (команда LESIZE) управляет размером (SIZE), числом (NDIV) конечных элементов на указанных линиях, а также сгущением элементов к началу (концу) линии или к середине (концам). Панель диалога для настройки разбиения по линиям показана на рис. 3.9.

При задании размера одного конечного элемента (SIZE) число элементов на линии получается автоматически в зависимости от длины линии. При задании числа элементов вдоль линии (NDIV) их размер получается автоматически. Поэтому нет смысла задавать одновременно и SIZE, и NDIV. Введенные SIZE или NDIV могут изменяться программой при разбиении, если включен режим Smart Size и параметр KYNDIV – Yes.

Для регулирования сгущения конечных элементов используется параметр SPACE. Модуль величины этого параметра представляет собой отношение размера элемента в начале линии к размеру на конце, если SPACE > 0 (сгущение к одному из концов линии), и отношение размера элемента в середине линии к размеру на концах, если SPACE < 0 (сгущение к концам линии или середине). Варианты сгущения шести конечных элементов вдоль линии приведены на рис. 3.10.

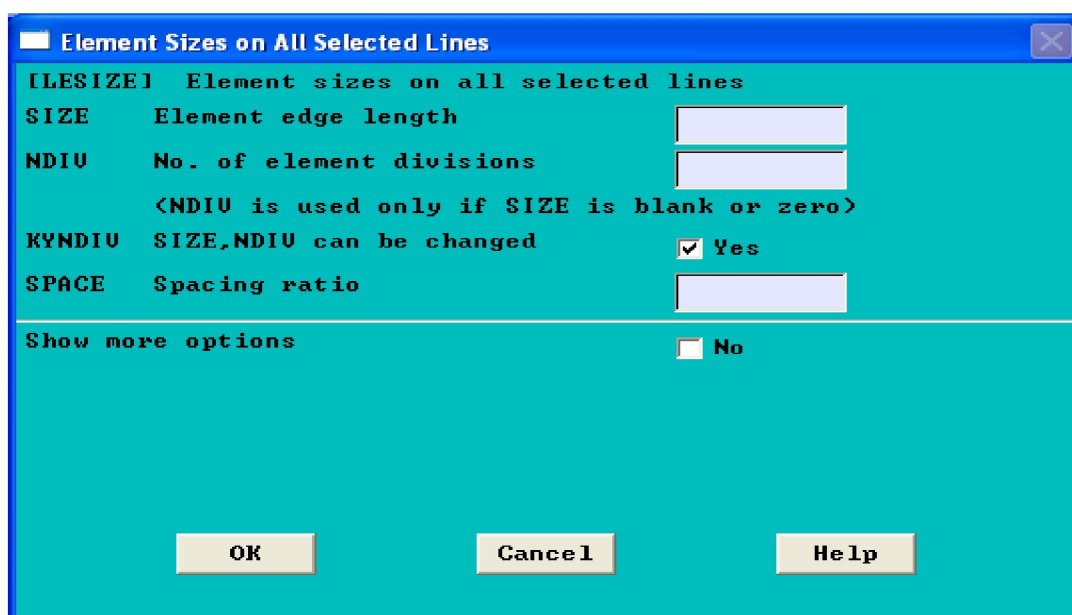


Рис. 3.9. Панель диалога для настройки разбиения по линиям

—————	SPACE = 1 (нет сгущения - по умолчанию)
—— ———	SPACE = 4 (SPACE > 1)
— — — — —	SPACE = 1/4 (0 < SPACE < 1)
—— ———	SPACE = -4 (SPACE < -1)
—— ———	SPACE = -1/4 (-1 < SPACE < 0)

Рис. 3.10. Управление сгущением элементов вдоль линии с помощью параметра SPACE

Areas Set контролирует размер элементов внутри поверхности (SIZE). Различные поверхности могут иметь различные значения SIZE. При включенном Smart Size указанный размер конечных элементов будет взят за основу, но может быть изменен режимом Smart Size в соответствии с выбранным уровнем Smart Size.

Перед разбиением необходимо также выбрать форму конечных элементов (Shape). Выбор опции Tri указывает на разбиение поверхностей треугольными конечными элементами (пластины и оболочки), Tet - на разбиение объемов тетраэдрами (объемные тела). Опция Quad указывает на разбиение поверхностей четырехугольными конечными элементами (пластины и оболочки), Hex - на разбиение объемов параллелепипедами (объемные тела).

Все команды, описанные выше, являются командами подготовки к разбиению, они только подготавливают модель к конечно-элементному разбиению, но не разбивают ее (конечные элементы и узлы не создаются).

Генерация конечно-элементной сетки

Возможны два способа разбиения на конечные элементы (табл. 3.1):

- 1) свободное разбиение – Free Mesh;
- 2) регулярное разбиение – Mapped Mesh.

Преимущества и недостатки Free Mesh и Mapped Mesh

Таблица 3.1

Free Mesh	Mapped Mesh
<u>Преимущества</u> 1. Легко создается. Нет необходимости делить сложные поверхности и объемы на простые (регулярные). <u>Недостатки</u> 1. Объемы могут быть разбиты только па тетраэдры, в результате чего получается большое количество конечных элементов. 2. Для разбиения объемов могут быть использованы только элементы высокого порядка (10 узловые квадратичные), в результате чего получается большое количество узлов.	<u>Преимущества</u> 1. Как правило, получается меньшее число элементов. 2. Позволяет использовать элементы низкого порядка (линейные), в результате чего получается небольшое количество узлов. 3. Конечно-элементная сетка регулярная и выглядит эстетично. <u>Недостатки</u> 1. Поверхности и объемы должны иметь правильную форму (регулярные) и число КЭ на их ребрах должно подчиняться определенным правилам. 2. Довольно трудно создаётся, особенно для объемов сложной формы

Free Mesh обычно используется для разбиения сложных поверхностей и объемов. При этом создаваемые конечные элементы имеют, как правило, неправильную форму и их расположение не имеет какой-либо закономерности. Этот метод разбиения используется по умолчанию.

Для выбора свободного разбиения ключ Shape устанавливается в положение Free. Сам

процесс генерации сетки запускается нажатием кнопки Mesh (рис 3.11, а). При этом программа запросит указать геометрические объекты, которые необходимо разбить на конечные элементы.

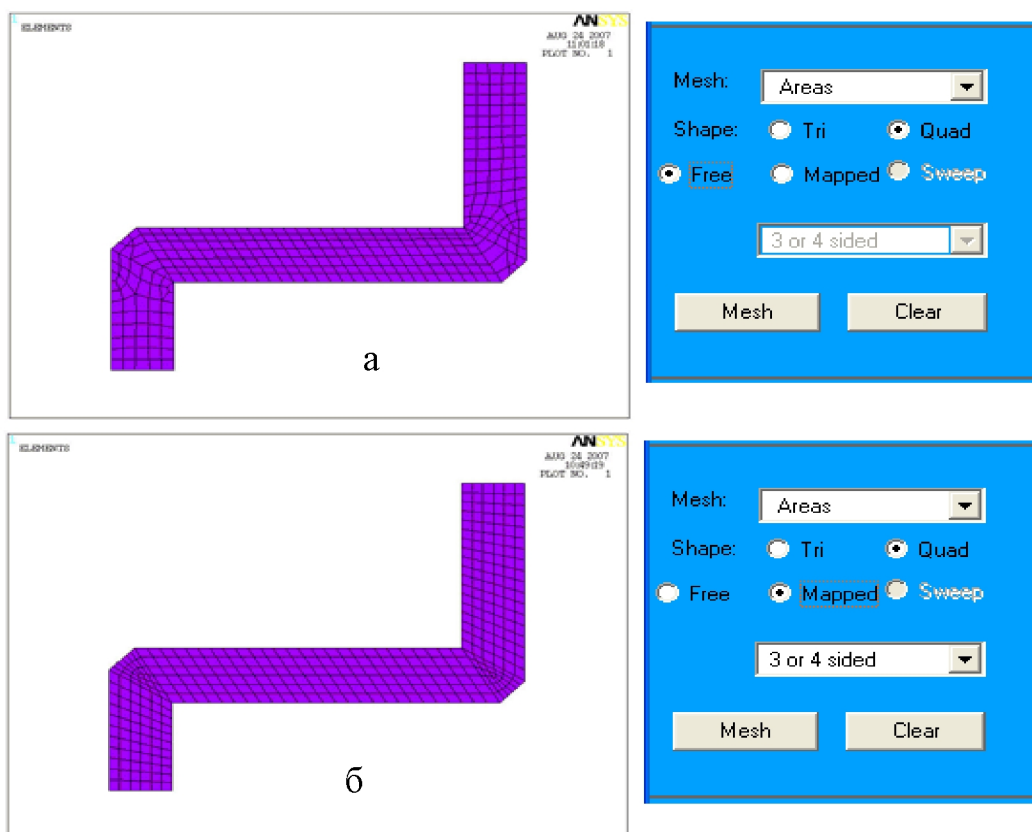


Рис. 3.11 Пример свободного (а) и регулярного (б) разбиения стакана подшипника авиационного редуктора

Mapped Mesh применяется только для «регулярных» поверхностей или объемов, таких как треугольники, четырехугольники, тетраэдры и параллелепипеды. При этом создаваемые конечные элементы имеют форму четырехугольников (для поверхностей) и параллелепипедов (для объемов). Полученная сетка имеет видимые ряды конечных элементов (рис.3.11,б). На рис.3.11,б показана поверхность сечения стакана, состоящая из пяти «регулярных» поверхностей.

3.4. Задание граничных условий

Следующий шаг после генерации конечно-элементной сетки это задание граничных условий. Все граничные условия в ANSYS объединены термином LOADS (нагрузки). Нагрузки можно задавать как в Preprocessor (Main Menu > Preprocessor > Loads > Apply), так и в Solution (Main Menu > Solution > Loads - Apply). В прочностной задаче существуют 5 категорий нагрузки (рис. 3.12):

1. Displacement - заданные степени свободы (перемещения узлов в прочностной задаче).
2. Force/Moment - сосредоточенные нагрузки (силы и моменты в прочностной задаче).
3. Pressure - распределенные нагрузки (давление в прочностной задаче).
4. Temperature - объемные нагрузки (например поле температур для прочностной задачи).



Рис. 3.12. Задание граничных условий

5. Gravity - инерционные нагрузки в прочностной задаче (гравитация, центробежные нагрузки и др.).

Граничные условия можно прикладывать как к геометрической модели (KeyPoints, Lines, Areas, Volumes), так и к конечно-элементной модели (Nodes, Elements). Первый вариант является более предпочтительным, так как при этом проще указывать объекты с нагрузками и нет необходимости заново задавать нагрузки при изменении конечно-элементной сетки (рис.3.13 и 3.14).

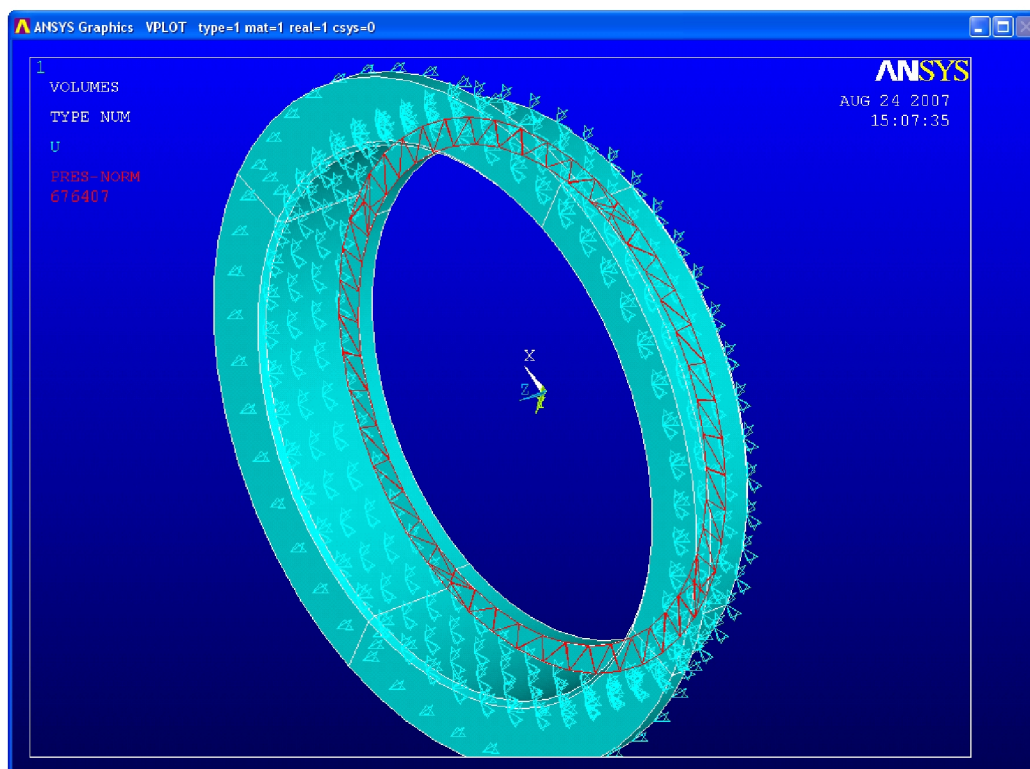


Рис. 3.13. Задание давления и граничных условий на геометрическую модель

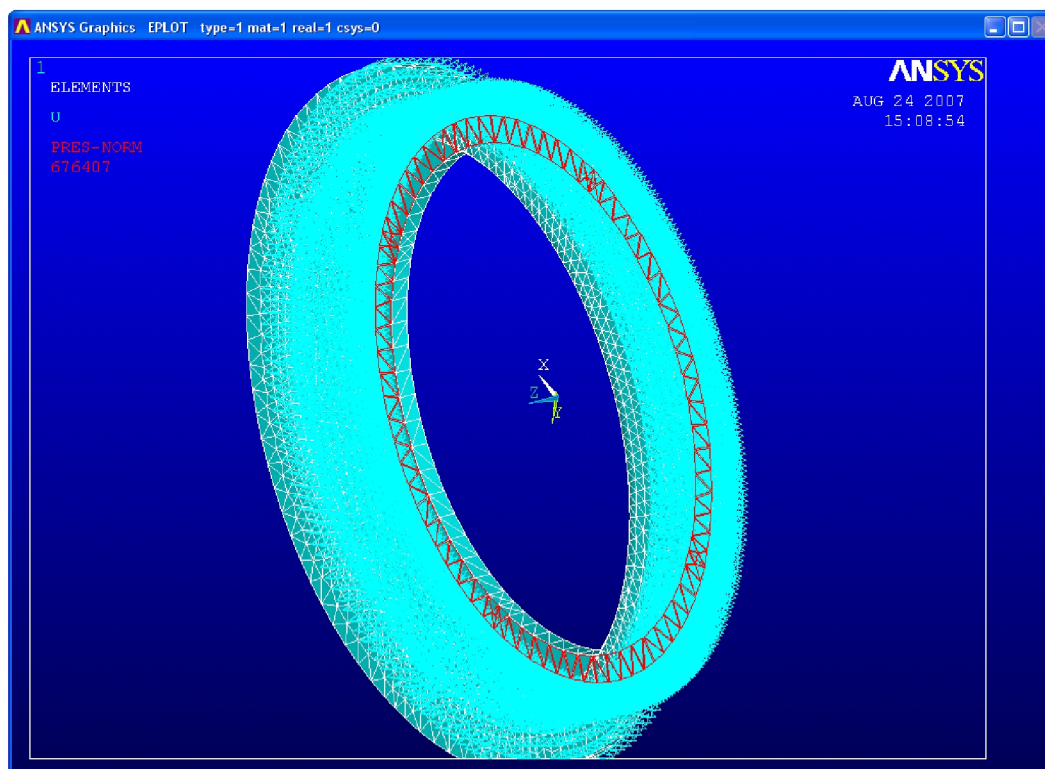


Рис. 3.14. Задание давления и граничных условий на конечно-элементную модель

Так как в МКЭ в конечном итоге все нагрузки должны быть приложены к конечно-элементной модели, то при запуске на решение программа автоматически переносит все нагрузки, приложенные к геометрической модели, на узлы и элементы.

Задание перемещений

(Main Menu > Preprocessor > Loads > Apply > Structural > Displacement)

В прочностном анализе возможны следующие перемещения узлов (DOF):

- UX, UY, UZ - поступательные перемещения вдоль осей координат;
- ROTX, ROTY, ROTZ – углы поворота вокруг осей координат.

Для задания закреплений задаются нулевые перемещения, для задания известного перемещения задается величина перемещения.

Для того чтобы задать перемещения или закрепить конструкцию необходимо:

1. Выбрать в меню (рис. 3.15) тип объекта (Line, Areas и т.д.).
2. Указать «мышью» в графическом окне конкретные объекты.
3. Выбрать в появившейся панели диалога (рис. 3.16) направление перемещений или закреплений (Lab2 – UX, UY, UZ и т.д.). Для выбора всех направлений – ALL DOF.
4. В этой же панели задать величину перемещения – VALUE (для закрепления - ноль).

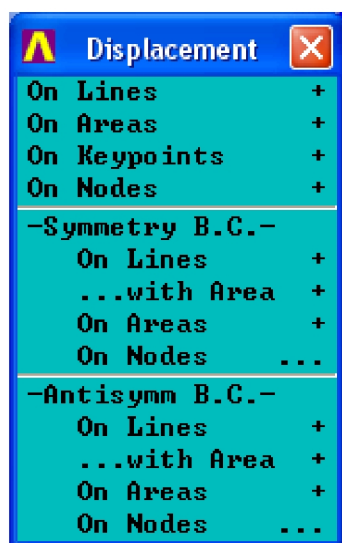


Рис. 3.15. Панель задания перемещений

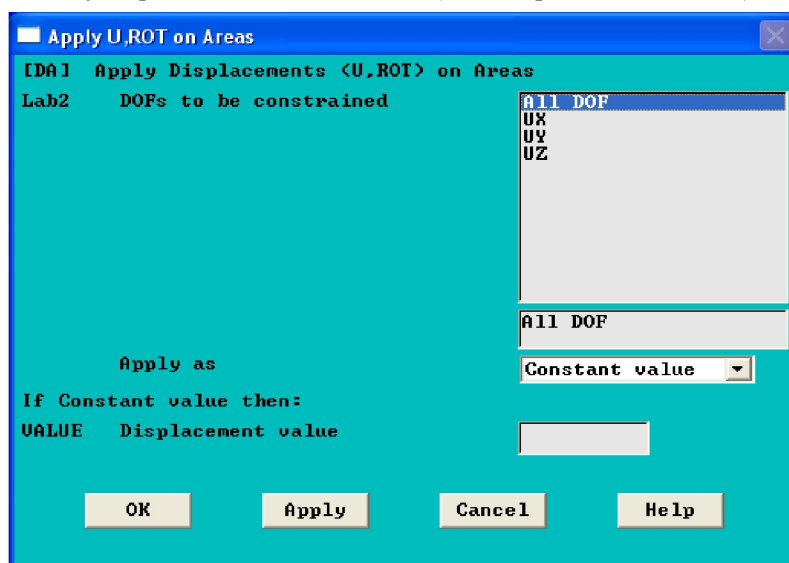


Рис. 3.16. Панель задания направления перемещений.

Задание распределенной нагрузки (давления)

(Main Menu > Preprocessor > Loads > Apply > Structural > Pressure)

Давление обычно прикладывается к линиям (2-D модели) или к поверхностям (3-D модели). Для балочных элементов давление может прикладываться только для элементов (Pressure on Beam).

Для того, чтобы приложить давление, необходимо:

1. Выбрать в меню тип нагрузки «Pressure» (рис. 3.12).
2. Выбрать в меню тип объекта (On Lines, On Areas и т.д.) (рис. 3.17).
3. Указать «мышью» в графическом окне конкретные объекты.
4. Задать в появившейся панели диалога (рис. 3.18) значение давления VALUE.

Панель диалога для задания давления имеет разный вид для разных объектов. При задании давления на линии имеется возможность задавать давление, изменяющееся вдоль линии по линейному закону. Положительная величина VALUE (Value) задает сжимающее давление (направлено к центру конечного элемента).

Задание сосредоточенных сил и моментов

(Main Menu > Preprocessor > Loads > Apply > Structural > Force/Moment).

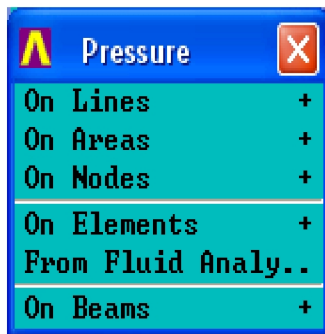


Рис. 3.17. Панель задания направления перемещений

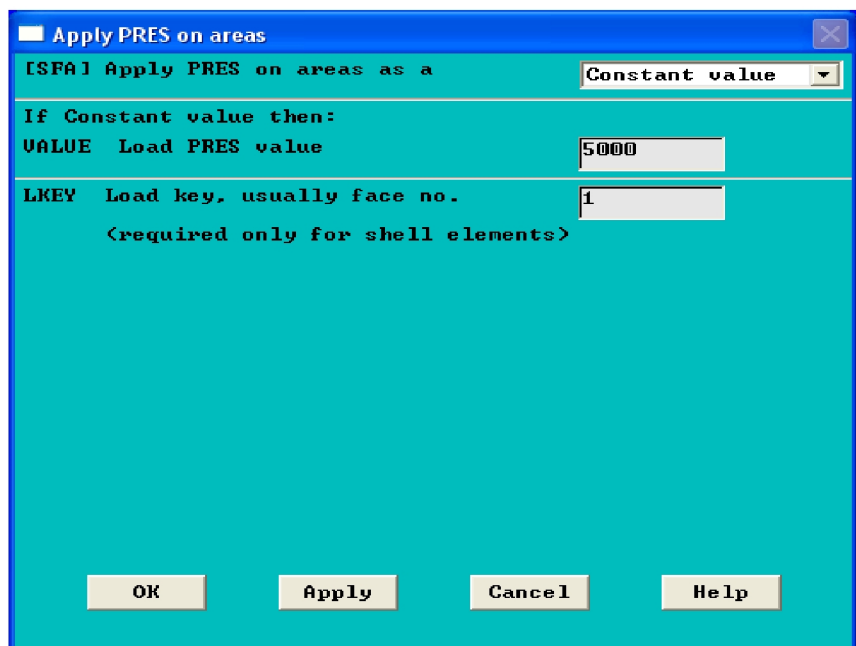


Рис. 3.18. Панель задания величины давления на плоскости

Сосредоточенные силы и моменты могут прикладываться к ключевым точкам или узлам. Сосредоточенные нагрузки обычно прикладываются в стержневых, балочных моделях или моделях с пружинами. В твердотельных или оболочечных моделях сосредоточенные нагрузки вызывают сингулярность в месте их приложения, поэтому при анализе результатов нужно иметь это в виду и игнорировать всплески напряжений в этих местах (например с помощью команд Select).

Для того, чтобы приложить силу или момент, необходимо:

1. Выбрать в меню (см. рис. 3.12) тип нагрузки «Force/Moment».
2. Выбрать в появившейся панели тип объекта (On Lines, On Areas и т.д.).
3. Указать мышью в графическом окне конкретные объекты.
4. Выбрать в появившейся панели диалога направление силы (Lab-FX, FY, FZ и т.д.).
5. В этой же панели задать величину нагрузки – VALUE.

Важно! Направление всех векторных величин как в исходных данных (силы, перемещения), так и в результатах (перемещения, силы, реакции опор) интерпретируется в узловой системе координат.

1. Узловая система координат в каждом узле своя, но по умолчанию все узловые системы координат параллельны глобальной декартовой системе координат.
2. При необходимости можно поворачивать узловые системы координат на любой угол (Main Menu > Preprocessor > Modeling > Move/Modify > Rotate Node C.S.). Во многих задачах это облегчает задание граничных условий и анализ результатов.
3. Когда задаются симметричные или антисимметричные граничные условия ANSYS автоматически изменяет узловые системы координат в соответствующих узлах.

Задание температур

(Main Menu > Preprocessor > Loads > Apply > Structural > Temperature)

Известные постоянные температуры могут прикладываться как ко всем геометрическим объектам, так и к узлам и элементам.

Для того, чтобы приложить температуру, необходимо:

1. Выбрать в меню (см. рис. 3.12) тип нагрузки «Temperature».
2. Выбрать в появившейся панели тип объекта (On Lines, On Areas и т.д.).
3. Указать «мышью» в графическом окне конкретные объекты.
4. Задать в появившейся панели диалога значение температуры – VALUE.

Для задания температурного поля, полученного при решении задачи теплопроводности, необходимо иметь результирующий файл теплового расчета (rth файл). Конечно-элементная модель, для которой получен этот файл, должна быть такой же, как в текущей прочностной задаче. С помощью команды Main Menu > Solution > Loads > Apply > Structural > Temperature > From Therm Analysis выбирается необходимый файл и из него считывается поле температур.

Задание инерционных нагрузок

(Main Menu > Solution > Loads > Apply > Structural > Gravity)

Наиболее часто из инерционных нагрузок задаются центробежные и гравитационные нагрузки. Центробежные нагрузки определяются заданием величины угловой скорости вращения (Angular Velocity) и, если требуется - углового ускорения (Angular Acceleration) вокруг одной из осей координат. Также может быть учтен эффект Кориолиса (Coriolis Effects), возникающий при сложном движении конструкции. Гравитационные нагрузки (учет собственного веса конструкции) задаются как инерционные нагрузки, возникающие в результате действия ускорения свободного падения ($g = 9.8 \text{ м/с}^2$). Для их определения необходимо задать гравитационное ускорение g вдоль одной из осей координат (как правило, Y).

Важно!

Для задания силы тяжести, действующей вниз (против оси Y), ускорение должно задаваться направленным вверх (вдоль оси Y), т.е. положительным.

Для того, чтобы задать инерционные нагрузки, необходимо в свойствах материала не забыть ввести плотность материала.

Изображение заданных граничных условий в графическом окне

(Utility menu > PlotCtrls > Symbols)

Для визуальной проверки заданных граничных условий можно изобразить их в графическом окне в виде специальных символов. С помощью панели диалога Symbols (рис.3.19) можно включать и выключать их изображение, а также выполнять некоторые настройки.

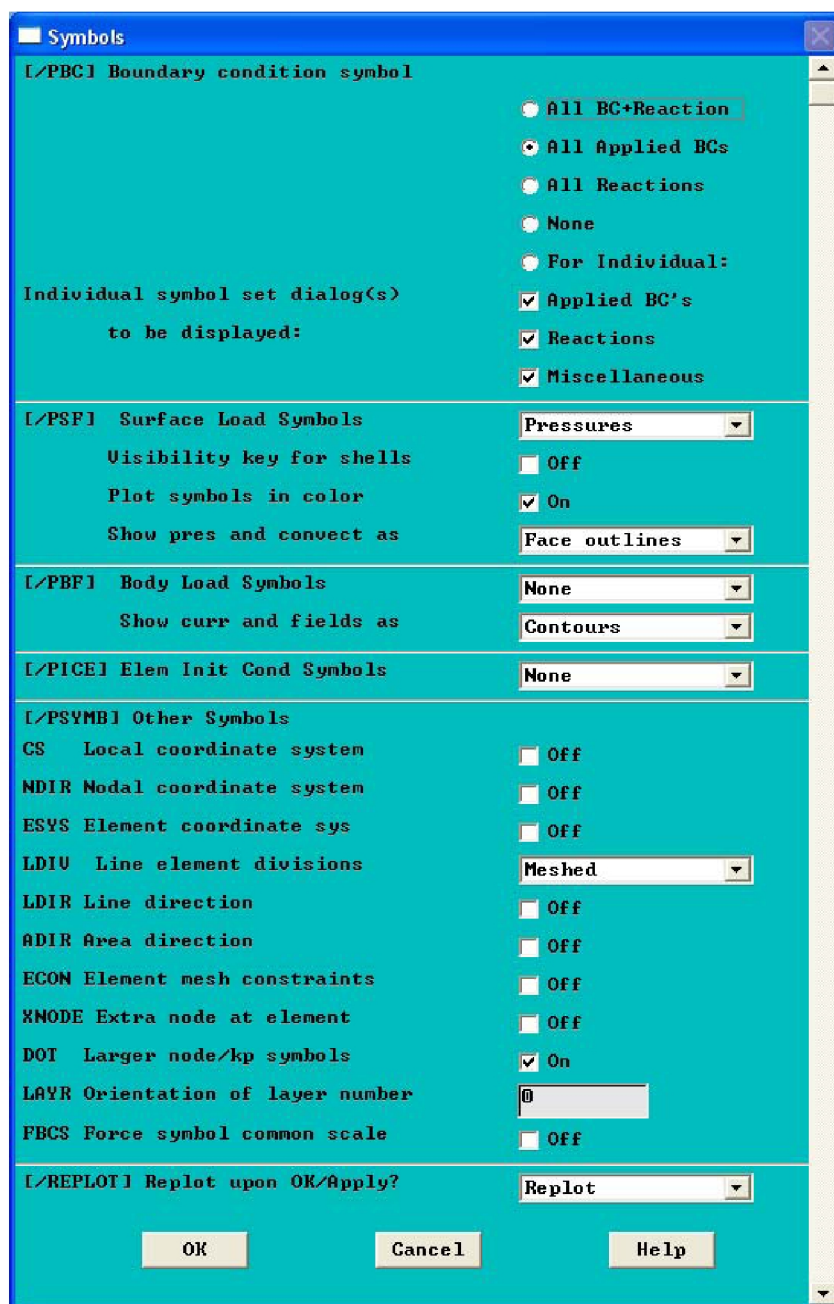


Рис. 3.19. Панель настройки изображаемых символов граничных условий

Другим способом проверки граничных условий является их просмотр в виде списков в табличном виде с помощью меню Utility menu > List > Loads.

Изменение и удаление граничных условий.

(Main Menu > Solution > Loads > Delete)

Для изменения каких-либо заданных граничных условий можно просто повторить их ввод, задав новые значения.

При удалении нагрузок рекомендуется следовать одному простому правилу: к какому объекту нагрузка прикладывалась (линия, поверхность, узел и т.д.), с такого объекта она должна и удаляться. При удалении нагрузок с геометрической модели ANSYS автоматически удаляет нагрузки с соответствующих узлов и элементов.

3.5. Запуск задачи на решение

Перед запуском на решение рекомендуется еще раз проверить следующие данные:

1. Убедиться, что на всех этапах создания модели использовались одни и те же единицы измерения.
2. Проверить заданные тип элемента и его опции (Element Type, Options), геометрические характеристики сечения (Real Constant).
3. Проверить свойства материала. Не забыть про плотность материала (для инерционных нагрузок) и коэффициент температурного расширения (для температурных напряжений).
4. Проанализировать качество конечно-элементного разбиения, особенно для мест возможной концентрации напряжений.
5. Проверить значения нагрузок и их направления.
6. Убедиться, что загружены тепловые поля из rth файла (для расчета температурных напряжений по результатам теплового расчета).

Проверить указанные данные можно, еще раз пройдя соответствующие пункты главного меню (Main Menu) или с помощью меню Utility menu > List, где в виде табличных списков даны все основные параметры модели.

Выбор решателя и настройка его опций

(Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > Sol'n Options)

Основная функция решателя (SOLVER) - это решение системы линейных алгебраических уравнений и определение неизвестных степеней свободы (в прочностной задаче – перемещения узлов). Время, которое на это потребуется решателю, может составлять от нескольких секунд до нескольких часов или дней в зависимости от размера конечно-элементной модели и характеристик используемого компьютера. При одном шаге нагружения линейного статического анализа требуется только одно такое решение, но для нелинейной или динамической (нестационарной) могут потребоваться десятки, сотни и даже тысячи таких решений. Поэтому тип решателя, который Вы выбираете для решения, имеет огромное значение.

Все решатели, используемые в ANSYS, могут быть разделены на два типа (рис. 3.20 и 3.21):

Решатели прямого типа:

-
- Frontal direct (фронтальный решатель);
 - Sparse direct (решатель метода разреженных матриц);
-
1. Итерационные решатели:
-
- Pre-Condition CG (обусловленный метод сопряженных градиентов);
 - Iterative (итерационный метод).
-

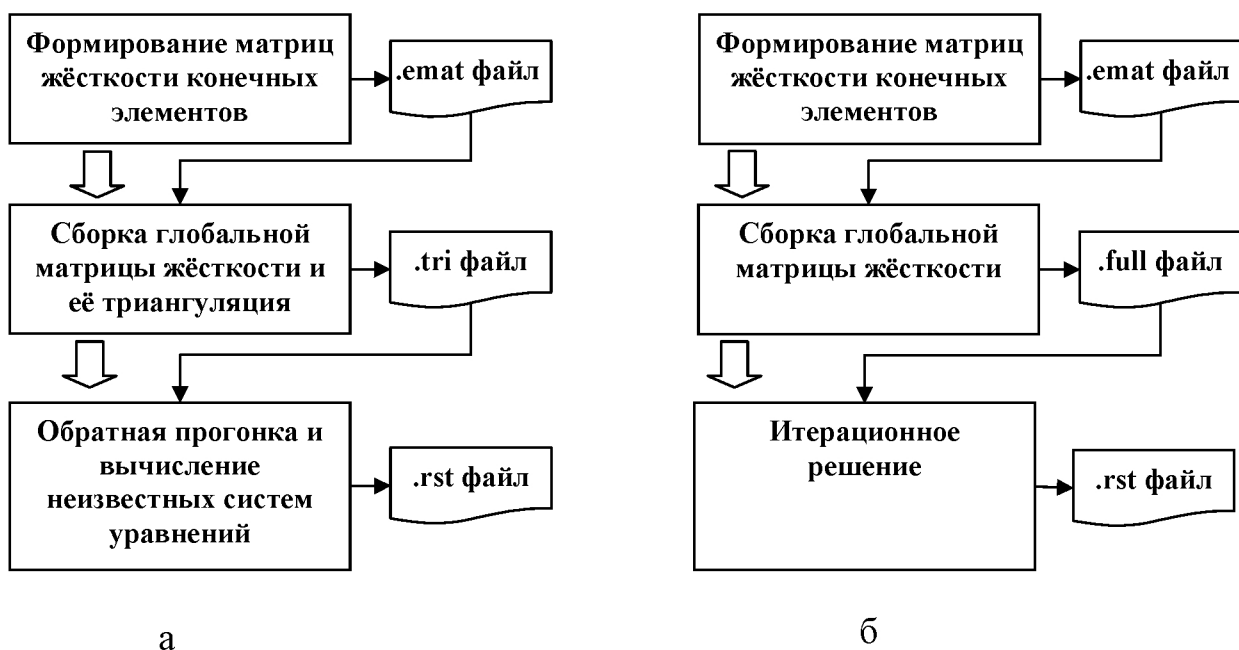


Рис. 3.20. Схема работы решателя прямого типа (а) и итерационного решателя (б)

Решатели прямого типа определяют точное решение для совместной системы линейных уравнений. Фронтальный решатель одновременно формирует общую для нескольких элементов матрицу жесткостей, состоящую из индивидуальных матриц элементов, и решает систему уравнений.

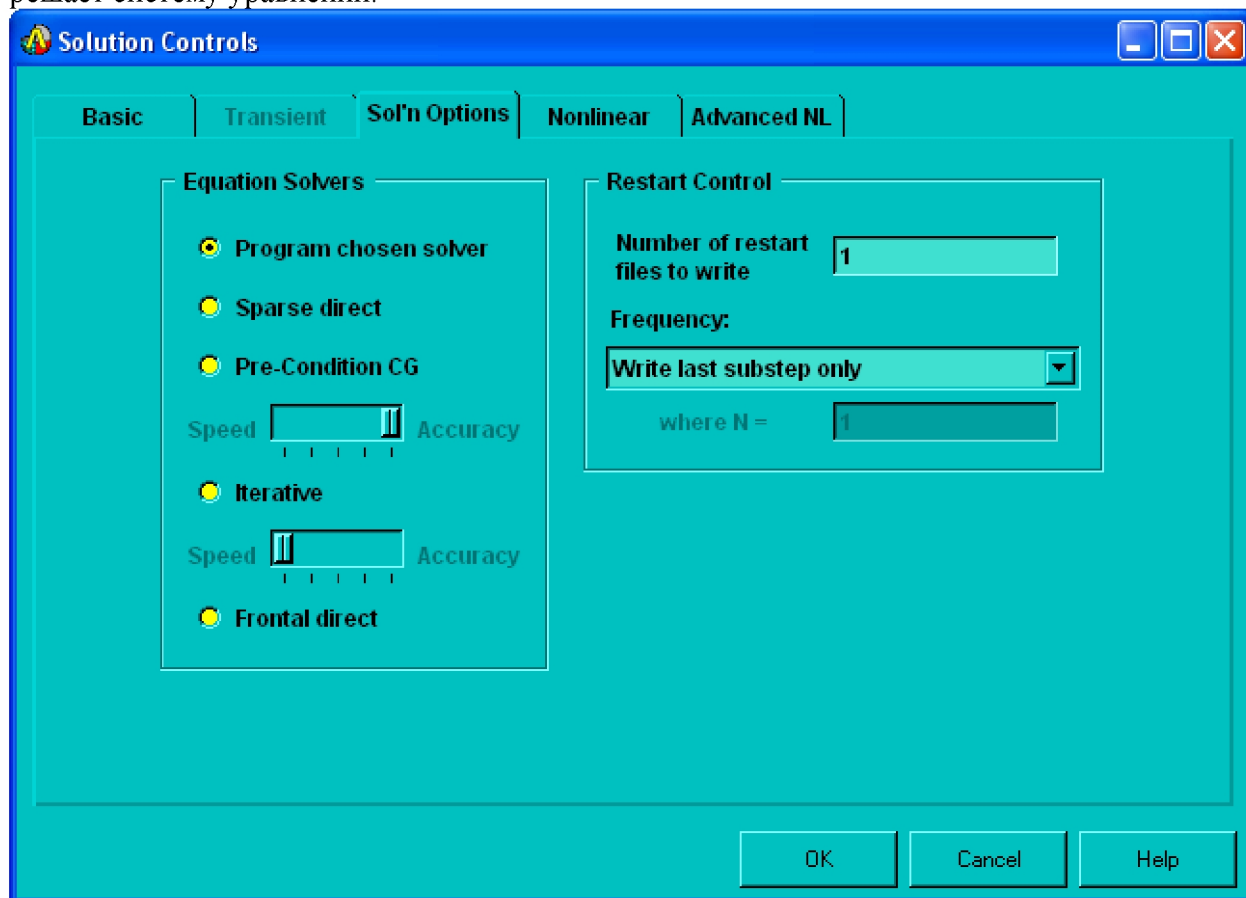


Рис. 3.21. Панель диалога выбора и настройки решателя

Эта процедура последовательно продвигается через всю модель, элемент за элементом, вводя уравнения, соответствующие степеням свободы отдельного элемента. В это же время определяются основные неизвестные и исключаются (на основе метода Гаусса) из общей матрицы, как только это становится возможным.

В решателе метода разреженных матриц используется прямое исключение уравнений для плохо обусловленных матриц системы.

В качестве альтернативы решателям прямого типа можно использовать любой из итерационных, которые сокращают время решения и ресурсы компьютера при анализе больших моделей. Итерационные решатели дают сходящееся от итерации к итерации приближенное решение. При использовании итерационных методов можно определить критерии сходимости и допусковую погрешность.

Пользователь может сам выбрать тип решателя или предоставить выбор программе (опция Program chosen solver).

Для запуска задачи на решение необходимо выполнить команду Main Menu > Solution > Solve > Current LS.

Важно! Перед выполнением этой команды рекомендуется сохранить базу данных.

В процессе решения ANSYS показывает очень много полезной информации в выходном окне (ANSYS Output Window), например:

1. Массовые характеристики модели (положения центров масс, моменты инерции и т.д.).
2. Диапазон коэффициентов матрицы жесткости. Например, можно обнаружить неверное задание свойств материала или геометрических характеристик сечения, если отношение максимального коэффициента к минимальному больше, чем 10^8 .
3. Параметры конечно-элементной модели (число узлов, элементов, степеней свободы) и параметры решателя (тип решателя, требуемая память, фактически имеющаяся память и т.д.).
4. Информация о создаваемых файлах и их размерах (jobname.emat - матрица жесткости конструкции, jobname.esav - файл с элементными данными, jobname.tri - матрица жесткости после приведения ее к треугольному виду, jobname.rst - файл с результатами расчета и другие).

По окончании решения появляется окно - решение выполнено (Solution is done).

3.6. Анализ результатов в постпроцессоре общего назначения (General Postproc)

Анализ результатов, без сомнения, - наиболее важный из этапов решения задачи, так как после него необходимо принять конструкторское решение. В связи с этим необходимо не только тщательно просмотреть результаты, но и оценить их достоверность.

В ANSYS есть два постпроцессора: General Postproc - постпроцессор общего назначения и Time History Postproc - постпроцессор истории нагружения.

General Postproc предназначен для просмотра результатов во всей конструкции сразу (или ее части), но для конкретного шага (подшага) нагружения и момента времени.

С помощью Time History Postproc можно проследить историю нагружения в конкретном указанном узле модели по всем шагам (подшкам) нагружения или на всем промежутке времени. Этот постпроцессор обычно используется при решении нелинейных или динамических (нестационарных) задач.

Рассмотрим подробнее работу в General Postproc.

К основным результатам решения задачи относятся:

1. Перемещения узлов (DOF solution) – UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ.
2. Напряжения (Stress):
 - SX, SY, SZ, SXY, SYZ, SXZ - компоненты напряжений;
 - S1, S2, S3 - главные напряжения;
 - SINT - интенсивность напряжений;

- SEQV - эквивалентные напряжения по Мизесу.
- 3. Полные деформации (Strain-Total):
 - EPTO X, EPTO Y, EPTO Z, EPTO XY, EPTO YZ, EPTO XZ - компоненты;
 - EPTO 1, EPTO 2, EPTO 3 - главные деформации;
 - EPTO INT - интенсивность деформаций;
 - EPTO EQV - эквивалентные деформации по Мизесу.
- 4. Упругие деформации (Strain-Elastic):
 - EPEL X, EPEL Y, EPEL Z, EPEL XY, EPEL YZ, EPEL XZ - компоненты;
 - EPEL 1, EPEL 2, EPEL 3 - главные деформации;
 - EPEL INT - интенсивность деформаций;
 - EPEL EQV - эквивалентные деформации по Мизесу.
- 5. Температурные деформации (Strain-Thermal):
 - EPTH X, EPTH Y, EPTH Z, EPTH XY, EPTH YZ, EPTH XZ - компоненты;
 - EPTH 1, EPTH 2, EPTH 3 - главные деформации;
 - EPTH INT - интенсивность деформаций;
 - EPTH EQV - эквивалентные деформации по Мизесу.
- 6. Пластические деформации (Strain-Plastic):
 - EPPL X, EPPL Y, EPPL Z, EPPL XY, EPPL YZ, EPPL XZ - компоненты;
 - EPPL 1, EPPL 2, EPPL 3 - главные деформации;
 - EPPL INT - интенсивность деформаций;
 - EPPL EQV - эквивалентные деформации по Мизесу.
- 7. Реакции опор (Reaction Solu):
 - FX, FY, FZ - силы;
 - MX, MY, MZ – моменты.
- 8. Результаты при контактном взаимодействии (Contact):
 - STAT - статус контакта;
 - PENE - взаимное проникновение контактных поверхностей;
 - GAP - зазор в контакте;
 - PRES - контактное давление;
 - SFRI - трение в контакте;
 - STOT - полные контактные напряжения (давление + трение);
 - SLID - проскальзывание в контакте.
- 9. и др.

Способы просмотра результатов:

1. В табличном виде (Main Menu > General Postproc > List Results).
2. В графическом виде (Plot Results, Query Results, Path Operations и др.).
3. В виде анимации (Animate).

Текстовые таблицы, картинки и анимации могут быть просмотрены на экране дисплея и сохранены в соответствующих файлах (txt, bmp, tiff, jpg, avi и др.).

Табличная форма результатов - листинг - представляет собой удобный способ представления выходных результатов в текстовом виде для помещения в отчет, демонстрации

и т.п. Операции сортировки позволяют организовать выдачу данных для отдельных искомых величин, например, для напряжений, перемещений, давлений, электрических потенциалов и любых других. Имеется возможность располагать результаты в возрастающем или убывающем порядке, находить наибольшие значения или перечислять по абсолютной величине (Main Menu > General Postproc > List Results > Sorted Listing). Для придания листингу требуемой формы или включения его в отчетный документ пользователь может обратиться к средствам форматирования и выбрать, например, заголовок листинга и число строк на странице.

В табличном виде можно также посмотреть реакции опор (Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu).

Просмотр результатов в графическом виде

Для изображения деформированной формы конструкции:

- Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape;
- выбрать Def + Undeformed (показываются начальное и актуальное состояния одновременно);
- ОК.

Более наглядным является представление результатов расчета в виде областей равных значений (Main Menu > General Postproc > Plot Results > Contour Plot). Области равных значений на графических объектах показывают, как распределены те или иные величины (например, напряжения) в пределах модели. Обычно области равных значений имеют вид изолиний, цветных полос или поверхностей равного уровня (изоповерхностей). По этому изображению можно быстро найти точку с наибольшим (наименьшим) напряжением (символы MX или MN) или наиболее нагруженную область.

Просмотр возможен для двух вариантов осреднения результатов:

1. Узловое решение (Nodal Solution) - напряжения или другая просматриваемая величина усреднены в узлах со всех соседних конечных элементов. Получается «гладкая» картина, непрерывные линии.
2. Элементное решение (Element Solution) - показывается неусредненная величина. Изолинии имеют прерывистый вид. Как правило, их величина больше, чем при узловом решении.

Кроме того, средства графического отображения информации включают векторное представление и графики результатов вдоль заданной кривой. При векторном представлении используются отрезки со стрелками, чтобы показать как абсолютное значение, так и направление векторной величины, например вектор перемещения (Main Menu > General Postproc > Plot Results > Vector Plot - Predefined). Пример: для показа перемещений выбрать DOF solution в левом окне (для прочностного анализа это перемещения) выбрать Translation U в правом окне - ОК.

График результатов представляет собой эпюру, которая показывает изменение полученных величин в зависимости от заданного пользователем пути (Main Menu > General Postproc > Path Operation). Для построения графика необходимо сделать 3 шага (рис. 3.22):

1. Задать путь (Define Path). Путь - это последовательность узлов. Одним из способов задания пути является последовательное указание «мышью» на узлы, определяющие путь (команда By Nodes), после чего необходимо ввести имя пути.
2. Выбрать величины, графики которых необходимо изобразить (Map onto Path).
3. Изобразить изменение величины вдоль пути на графике (On Graph) или в виде эпюры (On Geometry).

Процедуры отслеживания результатов с помощью графиков используются для привязки данных анализа к пространственным кривым, заданным в пределах модели. После того как интересующая величина привязана к кривой, можно получить зависимость этой величины от выбранного пути в табличной или графической форме. К выделенным таким образом массивам значений возможно применение ряда математических операций (таких как интегрирование, дифференцирование, умножение, скалярное и векторное произведение).

Еще одним средством математической обработки результатов решения является использование информации из таблиц конечных элементов (Main Menu > General Postproc > Element Table). Результаты решения можно занести в таблицу элемента (Define Table) и использовать ее для выполнения арифметических операций над содержимым колонок таблицы. К наиболее распространенным операциям относятся сложение, умножение, деление, использование экспоненциальной зависимости и вычисление коэффициента запаса.

На рисунке 3.23 приведен пример многооконного просмотра результатов (Utility Menu > PlotCtrls > Multi-Window Layout затем Utility Menu > PlotCtrls > Multi-Plot Controls).

Оценка достоверности результатов.

Подход к оценке достоверности результатов расчета зависит от типа расчета, но есть несколько общих вопросов, которые помогут сделать вывод о точности решения:

1. Уравновешивают ли реакции опор приложенную нагрузку?
2. Где расположены максимальные напряжения? Если это точка приложения сосредоточенной силы или точечного закрепления, то эти значения, как правило, не отражают реальной картины и должны быть исключены из рассмотрения.
3. Не превышают ли максимальные напряжения предел текучести материала? Если да, то результаты не имеют никакого смысла и необходимо проводить нелинейный анализ с учетом пластических деформаций.
4. Насколько адекватна конечно-элементная сетка? Для проверки есть несколько способов:

Изобразить неосредненные значения напряжений (Element Solution) и обратить внимание на элементы с большим градиентом напряжений. Эти элементы - первые «кандидаты» на улучшение сетки.

Если различие между осредненными результатами (Nodal Solution) и неосредненными (Element Solution) велико, то, скорее всего, сетка слишком грубая.

Если результаты при включенном режиме Power Graphics (ANSYS ToolBar > PowerGrph – ON) существенно отличаются от результатов с отключенным режимом Power Graphics (ANSYS ToolBar > PowerGrph – OFF) - сетка также слишком грубая.

Переразбить модель на конечные элементы, вдвое увеличив плотность сетки, запустить на решение и сравнить полученные результаты. Если результаты изменились несущественно - скорее всего плотность сетки достаточная, в противном случае необходимо дальнейшее улучшение сетки.



Рис.3.22. Меню для построения графиков (эпюр)

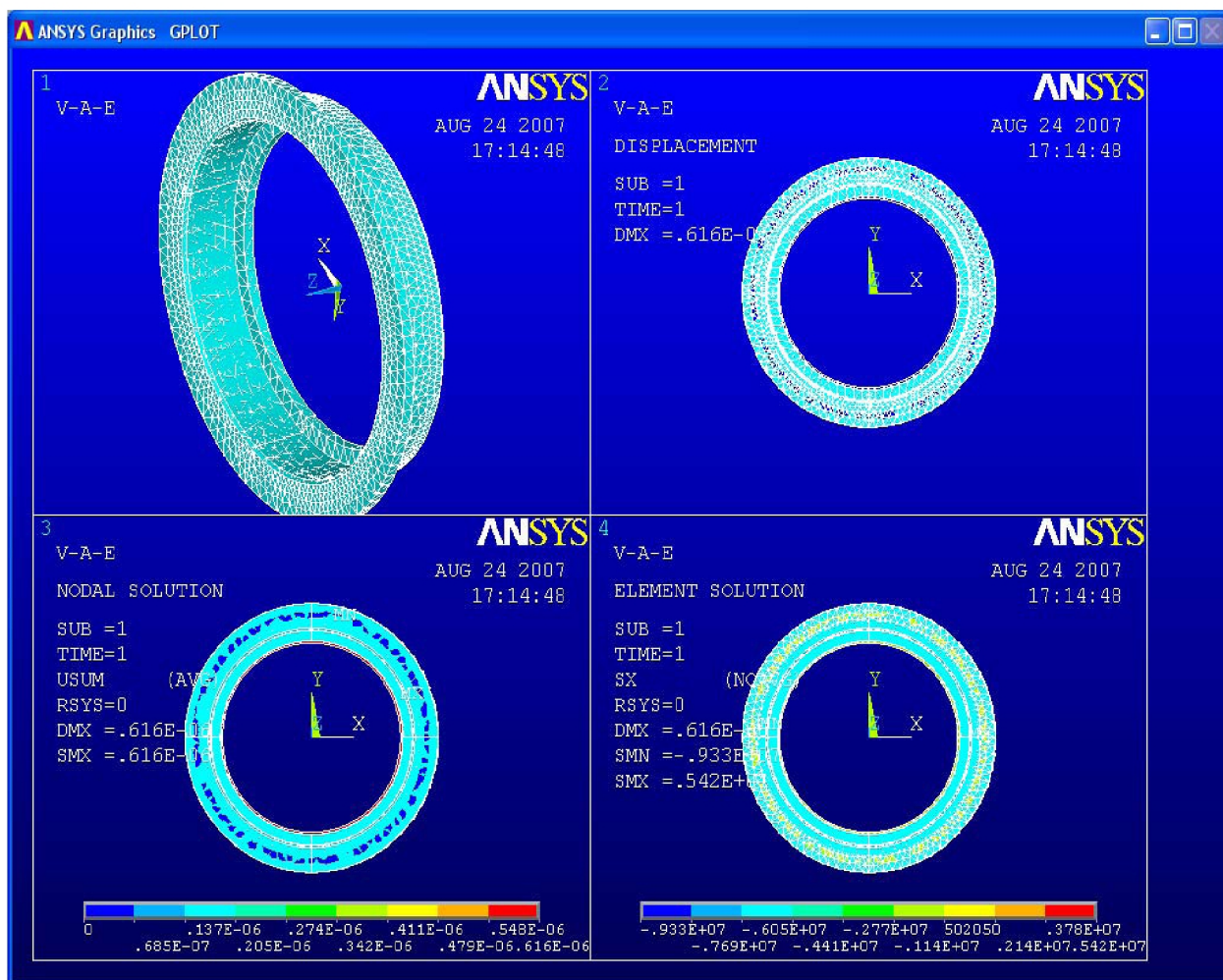


Рис. 3.23. Пример многооконного просмотра результатов расчёта стакана подшипника авиационного редуктора

3.7. Прежде чем запустить ANSYS

Прежде чем начать работать с программой ANSYS, необходимо тщательно продумать постановку задачи и принять некоторые решения. От этого зависит не только время решения задачи, но и достоверность результатов, которые будут получены.

Основные вопросы, на которые необходимо ответить:

1. Какой тип анализа следует выполнять?
2. Какой должна быть модель?
3. Какой использовать тип конечных элементов?

Какой тип анализа следует выполнять?

При выполнении прочностного расчета анализ может быть:

- статическим или динамическим;
- линейным или нелинейным.

Как уже отмечалось выше, статический анализ пригоден для задач, в которых действие сил инерции или процессы рассеяния энергии не оказывают существенного влияния на поведение конструкции. Обычно это бывает при постоянных или медленно изменяющихся нагрузках. Если нагрузки довольно быстро меняются с течением времени, то необходимо проводить динамический анализ. На практике часто используют следующий критерий: если частота изменения нагрузок меньше, чем одна треть от низшей собственной частоты колебаний конструкции, то может быть применим статический анализ.

Линейный анализ означает, что во всех случаях нагружения жесткость конструкции остается неизменной. Причинами, вызывающими нелинейное поведение, являются:

1. Превышение деформаций в конструкции предела упругости (физическая нелинейность).
2. Возникновение больших деформаций, перемещений или поворотов (геометрическая нелинейность).
3. Контактное взаимодействие между телами (контактная задача).

Какой должна быть модель?

Прежде чем начинать строить модель, необходимо решить:

1. Насколько детально должна быть построена модель?
2. Нет ли в модели какой-либо симметрии?
3. Содержит ли модель сингулярность?

Мелкие детали модели, влияние которых на результаты расчета будет незначительным, не должны включаться в модель. Особенно это относится к случаю, где геометрическая модель импортируется из какой-либо CAD системы. Убрать эти мелкие детали необходимо до загрузки модели в ANSYS. Однако для некоторых конструкций мелкие особенности модели, например такие как радиусы округления или отверстия, оказывают существенное влияние на максимальные напряжения и поэтому не должны удаляться из модели.

Некоторые конструкции имеют тот или иной вид симметрии или вообще являются осесимметричными. Любая симметрия должна использоваться при построении модели, так как при этом не только легче создавать модель, но и можно позволить себе построить более точную модель (более детализированную, имеющую лучшую сетку и т.д.). Симметрию можно использовать лишь в том случае, если она есть не только в геометрии, но и в свойствах материалов и граничных условиях.

Существуют следующие виды симметрии:

- Окружная симметрия (осесимметричная задача - axisymmetry). В этом случае достаточно построить только модель сечения, так как вся остальная конструкция получается вращением сечения на 360° вокруг оси симметрии. Нагрузки должны быть также осесимметричными. При этом существенно упрощается моделирование и повышается точность результатов за счет более точной модели и сетки.
- Поворотная симметрия. Вся конструкция может быть получена поворотом повторяющегося сегмента вокруг центральной оси. Моделируется только один повторяющийся сегмент. Нагрузки должны быть также симметричны относительно центральной оси.
- Зеркальная симметрия. Одна половина конструкции является зеркальным отражением другой, то есть существует плоскость симметрии (одна или более). Моделируется только одна из зеркальных половинок. Нагрузки могут быть симметричными и антисимметричными (см. раздел «Задание граничных условий»).
- Циклическая симметрия. Повторяющиеся сегменты расположены вдоль прямой линии. Моделируется только один сегмент. Нагрузки также должны быть циклически симметричными.

В некоторых случаях симметрия может нарушаться какой-либо незначительной деталью. Тогда можно использовать симметрию, проигнорировав эту деталь, или вместе с ней (как будто отверстие есть в каждом секторе). Как повлияет это на результаты решения, зависит от решаемой задачи. Иногда такой компромисс вполне оправдан и позволяет существенно облегчить задачу.

Под сингулярностью в методе конечных элементов понимается зона, где напряжения могут увеличиваться до бесконечности. Такая ситуация возникает при задании сосредоточенных сил (моментов) или закреплений, а также в острых внутренних углах (без

радиуса скругления). В точках сингулярности напряжения никогда не остановят свой рост при измельчении сетки. Сингулярности возникают из-за упрощений при моделировании реальной конструкции (реальные конструкции не имеют сингулярностей).

Как бороться с сингулярностью?

1. Если сингулярность расположена далеко от интересующей области, можно просто игнорировать эту зону при просмотре результатов.
2. Если сингулярность расположена в интересующей расчетчика области, можно:
 - перерешать задачу с добавленным радиусом скругления во внутреннем углу;
 - заменить сосредоточенную силу эквивалентной распределенной нагрузкой;
 - точечное закрепление «распределить» на небольшом участке (задать в нескольких узлах).

Какой использовать тип конечных элементов?

При выборе типа конечных элементов необходимо решить:

1. Будут ли конечные элементы типа балки (Beam), оболочки, (Shell) или тела (Solid 2D или Solid 3D).
2. Использовать линейные или квадратичные конечные элементы.
3. Насколько мелкой должна быть сетка конечных элементов.

ANSYS предлагает несколько категорий конечных элементов. В некоторых задачах можно использовать Beam вместо Shell или Solid, Shell вместо Solid 2D или Shell 3D и т.д., но каждый из этих типов конечных элементов имеет свою область применения.

Балочный конечный элемент (Beam) обычно используется для моделирования растяжения-сжатия, изгиба или кручения длинных тонких конструкций (один размер намного больше двух других), таких как: балки, шпангоуты и стрингеры подкрепленных оболочек, болты и т.д.

Стержневой конечный элемент (Link) в отличие от балочного работает только на растяжение-сжатие. Часто используется для моделирования конструкций ферменного типа. Элемент оболочки (Shell) используется для моделирования тонких искривленных панелей. На практике считают, что оболочкой может считаться конструкция, если ее толщина не менее чем в 10 раз меньше других размеров.

Плоские конечные элементы (Solid 2D) используются для моделирования в плоскости X-Y сечений объемных тел. Все нагрузки также должны находиться в плоскости X-Y. Возможны следующие варианты напряженно-деформированного состояния (НДС):

1. Плоско-напряженное состояние (опция Plane Stress). Напряжения в направлении оси Z равны нулю. Деформации в этом направлении не равны нулю. Можно задать толщину пластины (опция Plane Stress with Thickness). Такой тип НДС обычно реализуется при нагружении плоских пластин в их плоскости, а также в тонких дисках под давлением или центробежной нагрузкой.
2. Плоско-деформированное состояние (опция Plane Strain). Деформации в направлении оси Z равны нулю, напряжения не равны. Такое состояние реализуется в длинных конструкциях с постоянным сечением (например балках).
3. Осесимметричное состояние (опция Axisymmetry). Используется для моделирования сечений конструкций, которые могут быть получены вращением сечения на 360°. Осью симметрии должна быть ось Y глобальной системы координат. Не допускаются отрицательные координаты X. Напряжения σ_x трактуются как радиальные, σ_r - как осевые, σ_z - как окружные. Обычно используется для моделирования сосудов давления, прямых труб и т.д.

Объемные конечные элементы (Solid 3D) могут использоваться для моделирования любых конструкций, где нельзя применить более простые элементы.

Следующий вопрос при выборе типа конечных элементов: что лучше - линейный или квадратичный конечный элемент?

То, что при равном количестве конечных элементов квадратичный конечный элемент (с

дополнительными узлами в серединах сторон) дает более точные результаты, не вызывает сомнения. Но при этом существенно возрастает число узлов модели, а значит число степеней свободы и время решения. Поэтому более важен вопрос, что лучше: большое количество линейных элементов или меньшее - квадратичных? В ряде случаев это зависит от конкретной решаемой задачи, но для большинства случаев меньшее число квадратичных элементов дает лучшие результаты (рис. 3.24 и табл. 3.2.).

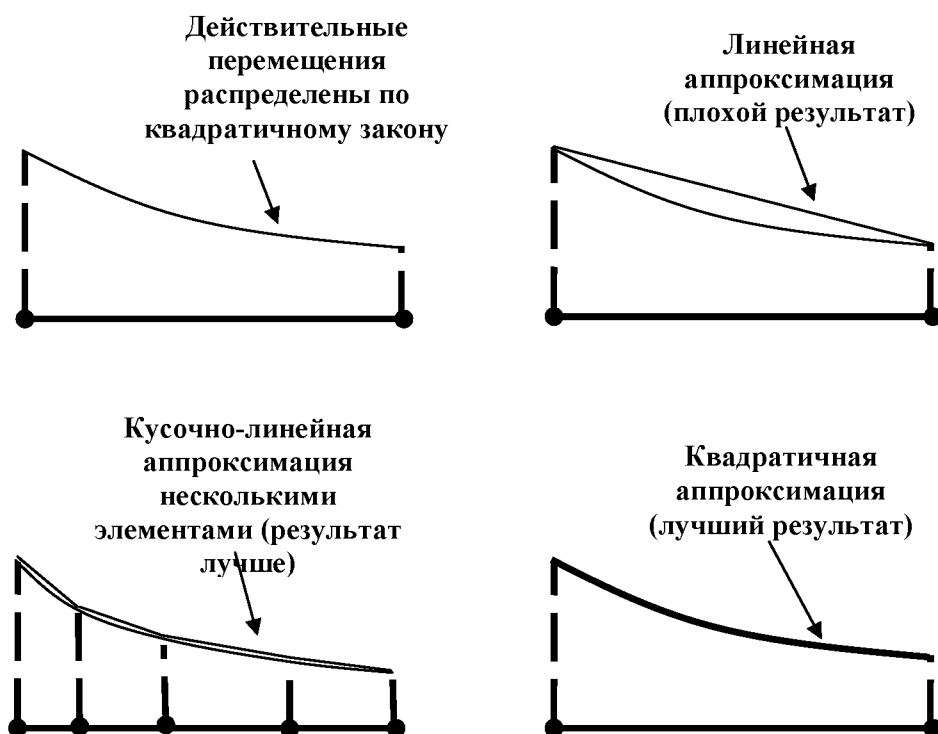


Рис. 3.24 Аппроксимация линейными и квадратичными элементами

Таблица 3.2.

Особенности применения линейных и квадратичных конечных элементов

<u>Линейные элементы</u>	<u>Квадратичные элементы</u>
Чувствительны к искажениям формы конечных элементов	Более точно описывают криволинейные кромки модели. Малочувствительны к искажениям формы элементов
Применяются, если необходимо определить средние (номинальные) напряжения	Рекомендуются для получения высокоточного поля напряжений
Требуется большое число конечных элементов для моделирования областей с высоким градиентом напряжений	Дают более точные результаты по сравнению с линейными элементами при меньшем числе элементов и степеней свободы

Как видно из рисунка и таблицы, различие между линейными и квадратичными элементами может быть существенным, однако для оболочечных элементов это различие, как правило, не так заметно, как для плоских и объемных.

Из теории метода конечных элементов известно, что при увеличении количества конечных элементов результаты решения будут приближаться к точному решению. Однако вместе с этим существенно увеличивается время решения и потребность в компьютерных ресурсах (требуемый объем памяти, место для хранения данных на диске и т.д.). Поэтому на практике часто приходится сталкиваться с выбором: «скорость или точность», т.е. насколько мелкой может быть конечно-элементная сетка, чтобы на конкретном компьютере задача могла быть решена в обозримое время и хватило ресурсов компьютера? Здесь есть несколько рекомендаций:

1. Если нужны точные поля напряжений:
 - необходима мелкая сетка;
 - нельзя игнорировать при моделировании мелкие геометрические особенности (отверстия, фаски и т.д.), если они находятся в интересующей области.
2. Если интересуют в основном деформации и номинальные напряжения:
 - может быть использована относительно грубая сетка;
 - мелкие геометрические особенности (отверстия, фаски и т.д.) могут быть опущены.
3. Если определяются собственные частоты колебаний (модальный анализ):
 - мелкие геометрические особенности (отверстия, фаски и т.д.) могут быть опущены;
 - для нахождения простых (низших) форм колебаний может быть использована относительно грубая сетка;
 - для сложных (высших) форм может потребоваться равномерная, но более мелкая сетка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов/ К. Бате, Е. Вилсон. - М.: Строй – издат, 1982. - 448 с.
2. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы/ Р. Галлагер. – М.: Мир, 1984. - 428 с.
3. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике/ О. Зенкевич. - М.: Мир, 1975. - 541 с.
4. Клебанов, Я.М. Параллелизация нелинейных задач при произвольной диаграмме деформирования/ Я. М. Клебанов, А.Н. Давыдов. // Вестн. СамГТУ. – Самара: СамГТУ, 2000. - 19-28 с.
5. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений /В.А. Постнов, С.А. Дмитриев, Б.К. Елтышев [и д/р.]; под общ. ред. В.А. Постнова. - Л.: Судостроение, 1979. - 288 с.
6. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов/ Д. Норри, Ж. де Фриз. - М: Мир, 1981. - 304 с.
7. Образцов, И.Ф. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов: Учеб. пособие для студентов авиац. спец. вузов/ И.Ф. Образцов, Л.М. Савельев, Х.С. Хазанов. - М.: Высшая шк., 1985. - 392 с.
8. Ортега, Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем/ Дж. Ортега. - М.: Мир, 1991. - 235с.
9. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов/ Л. Сегерлинд. - М.: Мир, 1979. - 392 с.
10. ANSYS Release 7.0. ANSYS Inc. 2002.
11. Introduction to ANSYS 5.6. Training Manual. ANSYS Release 5.6. SAS IP, Inc. 1999.

Учебное издание

Балякин Валерий Борисович
Кожин Андрей Геннадьевич

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА ANSYS
ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ
АВИАЦИОННЫХ РЕДУКТОРОВ**

Учебное пособие

Технический редактор А. И. Д а н и л и н
Редакторская обработка А. В. Я р о с л а в ц е в а
Корректорская обработка В. С. Т е л е п о в а
Доверстка Л. Я. Ч е г о д а е в а

Подписано в печать 9.10.07. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 5,5.
Тираж 120 экз. Заказ . ИП-ж30/2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.