

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

**ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.
ANSYS MECHANICAL APDL**

Практическое руководство

для студентов специальностей
1-31 04 01 «Физика (по направлениям)»,
1-31 04 03 «Физическая электроника»,
1-31 04 08 «Компьютерная физика»,
1-39 03 01 «Электронные системы безопасности»,
1-39 03 02 «Программируемые мобильные системы»,
1-98 01 01 «Компьютерная безопасность (по направлениям)»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2023

УДК 004.94(076)
ББК 32.973.4я73
В24

Авторы:

Ю. В. Никитюк, А. А. Серeda,
Д. Л. Коваленко, А. С. Руденков

Рецензенты:

кандидат технических наук Д. В. Прокопенко,
кандидат физико-математических наук Д. С. Кузьменков

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины».

Введение в технологии компьютерного моделирования.
В24 **ANSYS MECHANICAL APDL** : практическое руководство /
Ю. В. Никитюк [и др.] ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. –
Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2023. – 47 с.
ISBN 978-985-577-949-1

В практическом руководстве рассмотрены основные сведения о комплексе ANSYS MECHANICAL APDL, представлены основные этапы анализа задач в нем при помощи графического интерфейса, приведены необходимые сведения для реализации автоматизированного моделирования с применением языка программирования APDL.

Адресовано студентам специальностей 1-31 04 01 «Физика (по направлениям)», 1-31 04 03 «Физическая электроника», 1-31 04 08 «Компьютерная физика», 1-39 03 01 «Электронные системы безопасности», 1-39 03 02 «Программируемые мобильные системы», 1-98 01 01 «Компьютерная безопасность (по направлениям)».

УДК 004.94(076)
ББК 32.973.4я73

ISBN 978-985-577-949-1

© Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Основные сведения о комплексе ANSYS MECHANICAL APDL...	5
1.1. Организация комплекса.....	5
1.2. База данных комплекса.....	6
1.3. Графический интерфейс пользователя.....	7
1.4. Графическое указание объектов.....	12
1.5. Работа с файлами.....	13
2. Анализ задачи в комплексе ANSYS MECHANICAL APDL.....	15
2.1. Предварительные настройки.....	15
2.2. Построение модели.....	16
2.3. Задание нагрузок и выполнение анализа.....	27
2.4. Постпроцессорная обработка результатов.....	31
3. Автоматизированное моделирование в комплексе ANSYS MECHANICAL APDL.....	35
3.1. Команды комплекса.....	36
3.2. Структура командного файла.....	37
3.3. Элементы программирования.....	38
Литература.....	45

ВВЕДЕНИЕ

Важными навыками, которые должны быть приобретены выпускниками факультета физики и информационных технологий, можно считать следующие: анализ физических закономерностей на основе современных теоретических представлений и использование математических и компьютерных методов; выполнение исследовательской работы в областях, где используются физико-математические методы анализа и компьютерные технологии; разработка физико-математических методов для решения задач в областях техники, экономики и управления; производство расчетов при проектировании стандартных конструкций и компонентов электронных систем безопасности с учетом знаний в области механики материалов и теории машин и механизмов.

Формирование этих навыков тесно связано с использованием компьютерного моделирования для изучения разнообразных физических процессов, происходящих в материалах и изделиях.

В настоящее время ведущие компании мира используют программное обеспечение ANSYS при создании своих наукоемких изделий. ANSYS используется на таких известных предприятиях, как BMW, Boeing, БелАЗ и др. При этом происходит сокращение сроков, снижения себестоимости и повышения качества выпускаемых изделий, уменьшение количества рекламаций и материалоёмкости, сокращение количества натуральных испытаний. ANSYS предлагает рабочую среду с полным набором инструментов для анализа: от подготовки геометрии до подключения дополнительных физических компонентов для еще большей точности расчетов. Интуитивно понятный и настраиваемый пользовательский интерфейс позволяет инженерам любого уровня подготовки быстро получать ответы и решать производственные задачи.

В практическом руководстве рассмотрены основные сведения о комплексе ANSYS MECHANICAL APDL, представлены основные этапы анализа задач в нем при помощи графического интерфейса, приведены необходимые сведения для реализации автоматизированного моделирования с применением языка программирования APDL.

1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПЛЕКСЕ ANSYS MECHANICAL APDL

1.1 Организация комплекса

Комплекс ANSYS состоит из двух основных уровней:

- начальный уровень;
- модульный уровень.

При вызове комплекса открывается начальный уровень. Начальный уровень используется для проведения ряда общих действий в комплексе, таких, как изменения имени задания, очистки базы данных и т. д.

На модульном уровне доступны несколько модулей, каждый из которых предоставляет доступ к различным функциям и командам. Список модулей, их функций и команд, вызывающих вход в модуль, находится в таблице 1.

В общем случае вызов модуля проводится из главного меню ANSYS Main Menu графического интерфейса пользователя (GUI). Например, вызов Main Menu => Preprocessor влечет вход в модуль PREP7. В качестве альтернативы для входа в модуль можно использовать команду, формат которой выглядит как /name, где name является именем модуля.

Для выхода на начальный уровень из модуля следует в экранном меню указать Main Menu Finish или вызвать команду **FINISH** (или **/QUIT**). Имеется возможность перехода из одного модуля в другой без возвращения в начальный уровень. Для этого достаточно указать требуемый модуль или вызвать соответствующую команду.

Для выхода из комплекса ANSYS (и возврата в операционную систему) следует вызвать из выпадающего меню Utility Menu File Exit и далее выбрать кнопку **Exit** в диалоговой панели ANSYS или использовать команду **/EXIT**. По умолчанию комплекс сохраняет модель и нагрузки автоматически и записывает их в файл базы данных Jobname.DB.

Таблица 1 – Модули ANSYS

Модуль	Функция	Вызов из меню	Команда
1	2	3	4
PREP7	Создание модели (построение геометрии, указание материалов и т. д.)	Main Menu => Preprocessor	/PREP7
SOLUTION	Приложение нагрузок и получение расчета МКЭ	Main Menu Solution	/SOLU

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
POST1	Просмотр полученных результатов для указанного момента времени	Main Menu => => General Postproc	/POST1
POST26	Просмотр полученных результатов для указанных точек модели в виде функции времени	Mein Menu => => TimeHist Postpro	/POST26
OPT	Улучшение начальной модели	Main Menu => => Design Opt	/OPT
PDS	Определение влияния разброса и распределения исходных данных на результаты окончательного расчета	Main Menu => Prob Design	/PDS
AUX2	Перевод двоичных файлов в форму, пригодную для чтения	Utility Menu => => File => List => => Binary Files Utility Menu => => List Files => => Binary Files	/AUX2
AUX12	Определение коэффициентов излучения и создание матриц излучения для теплового расчета	Main Menu => => Radiation Matrix	/AUX12
AUX15	Импорт файлов, созданных средствами CAD или другими комплексами МКЭ	Utility Menu => => File => Import	/AUX15
RUNSTAT	Предварительное определение времени расчета (CPU), ширины матрицы жесткости и иных характеристик для расчета	Main Menu => => Run-Time Stats	/RUNST

1.2 База данных комплекса

Комплекс ANSYS MECHANICAL APDL сохраняет все исходные данные (размеры модели, свойства материалов, данные нагрузок и т. п.) и расчетные результаты (перемещения, напряжения, температуры и т. п.) в одной организованной специальным образом базе данных. Главным преимуществом единой базы данных является возможность быстрого и легкого просмотра в текстовом и графическом режимах, изменения и удаления любых указанных данных.

Вне зависимости от используемого модуля работа проводится с одной и той же базой данных. Это позволяет обеспечить прямой доступ к находящейся в базе данных модели и ее нагрузкам в любом месте комплекса. Понятие «прямой доступ» обозначает возможность выбора, просмотра списка и отображения объектов.

Поскольку база данных содержит все исходные данные, ее следует регулярно сохранять в файле. Для этого следует в выпадающем меню указать Utility Menu => File => Save as Jobname.DB или использовать команду **SAVE**. В любом случае база данных будет записана в файл Jobname.DB. При использовании команды **SAVE** возможны следующие опции:

- сохранение только данных модели;
- сохранение данных модели и расчета;
- сохранение данных модели, расчета и препроцессора.

Для указания иного имени файла следует в выпадающем меню указать Utility Menu => File => Save as или использовать требуемые аргументы команды **SAVE**. Любая операция сохранения базы данных предварительно записывает содержимое файла резервной базы данных (если эта база данных уже существует) в файл Jobname.DB. Если файл Jobname.DB уже существует, он будет заменен.

Для восстановления данных из файла базы данных следует выбрать в выпадающем меню Utility Menu => File => Resume Jobname.DB или вызвать команду **RESUME**. В результате будет проводиться чтение файла Jobname.DB. Для указания файла с иным именем следует выбрать в выпадающем меню Utility Menu => File => Resume from или использовать соответствующие аргументы команды **RESUME**.

Сохранение или чтение базы данных допускается в любом месте комплекса ANSYS, включая начальный уровень. Операция чтения заменяет все данные, хранящиеся в памяти в настоящий момент, на данные, сохраненные в файле базы данных. Совместное использование сохранения и чтения данных полезно при необходимости проверки (тестирования) функции или команды.

При построении модели в ряде случаев требуется очистка базы данных и повторный вызов работы с комплексом. Для этого следует вызвать из экранного меню Utility Menu => File Clear & Start New или команду **/CLEAR**. Любой способ очистки обнуляет базу данных, находящуюся в памяти. Очистка базы данных имеет тот же смысл, что выход из комплекса ANSYS и повторный вход в него, но не требует выхода из сеанса.

1.3 Графический интерфейс пользователя

Существует два режима работы в ANSYS MECHANICAL APDL (классический вариант среды ANSYS): **интерактивный** и **командный**. Интерактивный режим позволяет видеть результат каждой проведенной

в комплексе операции. Командный режим позволяет передать командный файл или набор команд, которые будут обработаны комплексом в фоновом режиме.

Наиболее простым способом работы с комплексом ANSYS является использование интерактивной системы меню комплекса, именуемого **графическим интерфейсом пользователя** (Graphical User Interface, или GUI).

Запуск программы производится через последовательность команд Start => Programs => ANSYS => ANSYS Product Launcher. Появляется окно **Product Launcher** (рисунок 1). В этом окне необходимо выбрать рабочую директорию, название работы и др.

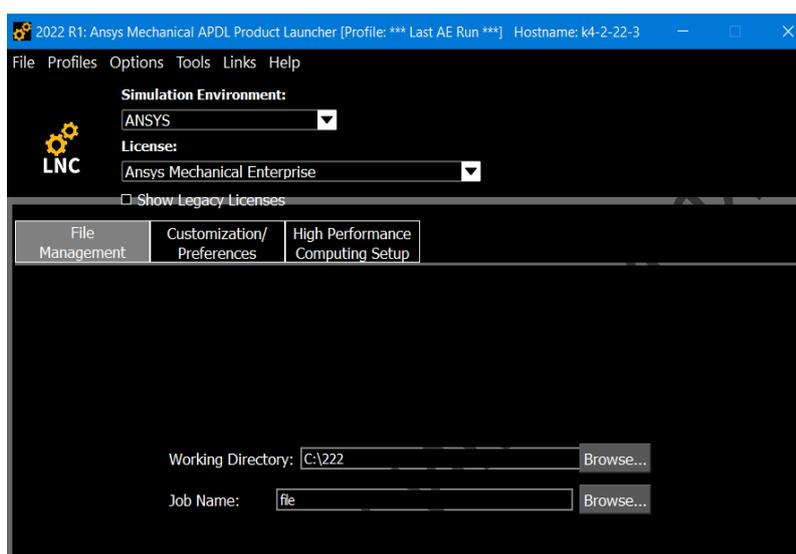


Рисунок 1 – Окно Product Launcher

Для комплекса ANSYS средства ANSYS GUI разделены на несколько областей (окон), как показано на рисунке 2. К ним относятся:

1. **Utility Menu** содержит сервисные функции, применяемые в ходе всего сеанса работы с комплексом ANSYS, как контроль файлов, контроль изображения и параметры. Из данного меню также проводится выход из комплекса ANSYS.

2. **Icon Toolbar Menu** содержит графические кнопки, которые вызывают часто применяемые команды комплекса ANSYS.

3. **Input Window** позволяет проводить непосредственный ввод команд. Все вызванные ранее команды содержатся в выпадающем списке для упрощения просмотра и доступа к ним.

4. **Toolbar** – изменяемая (дополняемая) панель инструментов, содержащая часто применяемые команды и функции комплекса ANSYS. Существует возможность добавления пользовательских кнопок путем создания аббревиатур.

5. **Main Menu** содержит первичные функции комплекса ANSYS, разделенные по модулям (препроцессор, расчет, общий постпроцессор, модуль оптимизации и т. д.).

6. **Graphics Window** – окно графического представления.

7. **Status and Prompt Area** расположено внизу средств GUI, предназначено для просмотра подсказки и просмотра состояния задания. Как правило, содержит подсказку по функциям, использующим графическое указание. При чтении подсказки можно проверить, что подлежащие объекты указываются в установленном порядке. Эта область также содержит статусную информацию (PREP7, SOLU и т. д.).

8. **Output Window** – окно выходных сообщений комплекса. Обычно расположено сзади остальных средств GUI, но при необходимости может быть перенесено на передний план.

Вышеперечисленные средства ANSYS GUI представлены на рисунке 2.

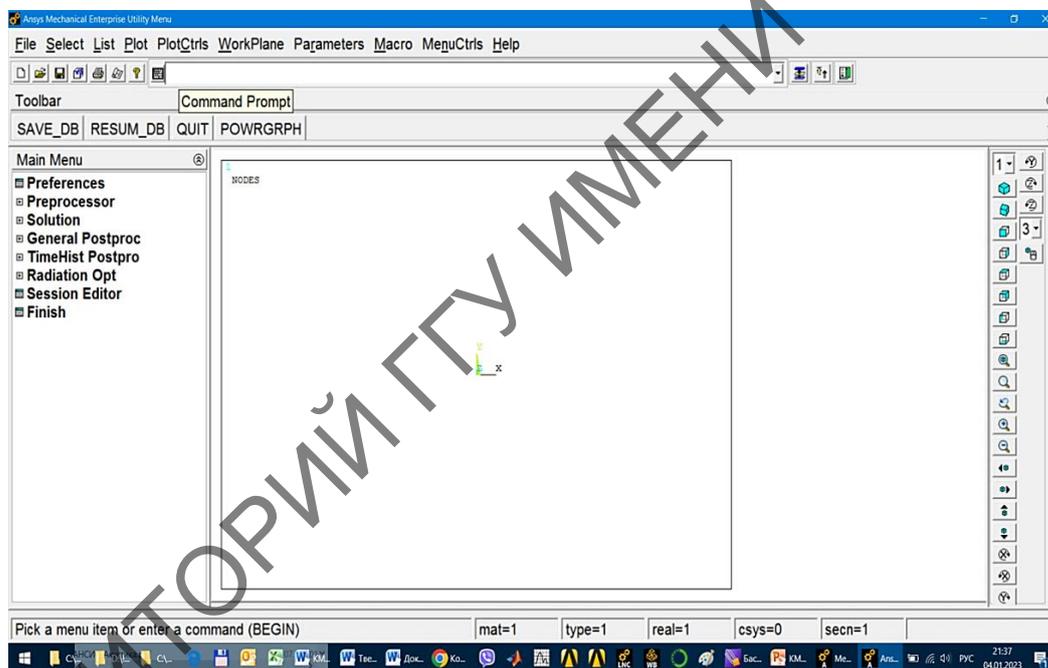


Рисунок 2 – Графический интерфейс пользователя

Выпадающее меню **Utility Menu** содержит такие сервисные функции комплекса ANSYS, как контроль файлов, контроль изображения и параметры. Большинство этих функций могут вызываться в любое время в ходе сеанса работы с комплексом ANSYS.

Каждый раздел меню **Utility Menu** вызывает выпадающий набор пунктов меню, который является каскадным меню или вызывает непосредственное действие. Действия могут сводиться к следующему:

- немедленный вызов функции;
- вызов диалогового окна;
- вызов каскадного меню.

Выпадающее меню **Utility Menu** содержит несколько разделов.

- **File** содержит функции работы с файлами и базами данных, такие, как очистка базы данных, сохранение в файле и чтение из файла. Некоторые из функций раздела **File** применяются только на начальном уровне. Если такая функция вызывается на уровне, отличающемся от начального, появляется диалоговая панель, в которой содержатся запросы перехода в начальный уровень и дальнейшего выполнения функции или отмены функции.

- **Select** содержит функции использования активного набора объектов и создания компонентов.

- **List** позволяет просматривать списки любых объектов, имеющихся в базе данных комплекса ANSYS. Кроме того, можно получить информацию о состоянии различных областей регистрации программы и просмотреть содержимое файлов, имеющихся в компьютере.

- **Plot** позволяет графически просматривать точки, линии, поверхности, объемы, узлы, элементы и иные объекты, которые могут отображаться графически.

- **PlotCtrls** включает функции контроля изображения, стиля и иные характеристики графического отображения.

- **WorkPlane** позволяет вызывать или отключать применение рабочей плоскости и проводить с рабочей плоскостью операции переноса, вращения и иные. В данном разделе меню можно также создавать, удалять и проводить переход к иной системе координат.

- **Parameters** включает функции создания, редактирования и удаления скалярных параметров и массивов параметров.

- **Macro** позволяет вызывать макросы и блоки данных.

- **MenuCtrls** позволяет проводить переключение из стандартного вида комплекса ANSYS в панель инструментов Mechanical Toolbar.

- **Help** вызывает систему помощи ANSYS Help System.

Панель инструментов **Standard Toolbar** содержит набор пиктограмм, вызывающих наиболее часто используемые функции.

Стандартные кнопки и их функции включают:

- **New Analysis** – сохранение и очистка информации текущего расчета и начало нового расчета;

- **Open ANSYS File** – чтение базы данных комплекса ANSYS или исходного файла; операция определяется типом файла;

- **Save Model** – сохранение текущей модели в файле базы данных;

- **Pan-Zoom-Rotate** – вызов диалоговой панели Pan-Zoom-Rotate;
- **Image Capture** – вызов средств сохранения изображения;
- **Report Generator** – вызов средств создания отчета;
- **Context Help** – отображение оглавления справки комплекса ANSYS, хранящейся в формате HTML.

В пиктографическом меню **Icon Toolbar Menu** располагаются графические кнопки, которые вызывают часто применяемые команды: новая задача, открытие файла, сохранение базы данных, управление изображением модели, сохранение графики, создание отчета, помощь.

Командная строка **Input Window** обеспечивает непосредственный вызов команд в текстовом виде. Вызов клавиш клавиатуры **Enter** вызывает исполнение команды. Текст команды заносится в буфер вызванных команд. Буфер вызванных команд содержит все ранее введенные команды. Доступ к буферу вызванных команд обеспечивается нажатием на стрелку, расположенную справа от поля ввода текста. Выпадающий список содержит последовательность вызывавшихся команд. Щелчок левой кнопкой мыши на любой строке в буфере истории переводит команду в поле ввода текста, где ее можно отредактировать и повторно вызвать. Двойной щелчок на любой строке в буфере вызванных команд автоматически приводит к вызову данной команды.

Панель инструментов **Toolbar** состоит из кнопок, вызывающих наиболее часто используемые функции комплекса ANSYS. Ряд кнопок (например, **SAVE_DB** и **RESUM_DB**) являются предварительно определенными. Существует возможность создавать другие кнопки.

Экранное меню **Main Menu** содержит основные функции комплекса ANSYS, например, функции препроцессора, расчета и постпроцессора. Все функции экранного меню являются модульными, то есть соответствуют модулю относительно друг друга. Это значит, что для вызова следующей функции необходимо закончить выполнение предыдущей.

Экранное меню **Main Menu** состоит из нескольких разделов:

- **Preferences** – вызов диалоговой панели, позволяющей изменять средства контроля для контекстного фильтрования разделов меню;
- **Preprocessor** проводит вход в препроцессор (путем вызова команды **/PREP7**) и содержит такие функции препроцессора PREP7, как создание модели, сетки и приложение нагрузок;
- **Solution** проводит вход в модуль расчета SOLUTION (путем вызова команды **/SOLU**) и содержит такие функции модуля SOLUTION, как указание типа расчета, приложение нагрузок, указание опций шагов нагрузки и выполнение расчета;

– **General Postproc** проводит вход в модуль общего постпроцессора (путем вызова команды **/POST1**) и содержит такие функции модуля **POST1**, как просмотр результатов в графическом и текстовом режимах;

– **TimeHist Postpro** проводит вход в модуль повременного постпроцессора (путем вызова команды **/POST26**) и вызывает просмотр результатов средствами **Time History Variable Viewer**. Содержит такие функции модуля **POST26**, как создание и просмотр переменных в текстовом и графическом режимах;

– **Session Editor** вызывает редактор сеанса;

– **Finish** вызывает выход из текущего модуля и переход на начальный уровень путем вызова команды **FINISH**.

Графическое окно **Graphics Window** предназначено для графического отображения и проведения всего указания в графическом режиме. Оно является самым большим из всех окон средств **GUI**.

Выходное окно **Output Window** содержит всю текстовую выходную информацию комплекса: отклики команд, заметки, предупреждения, ошибки и иные сообщения. Оно обычно располагается сзади средств **GUI**, но при необходимости может быть перенесено на передний план.

1.4 Графическое указание объектов

Многие команды комплекса требуют задания в качестве аргументов различных объектов. Например, для построения линии по точкам необходимо указать номера последних. Программа **ANSYS** позволяет выбирать объекты, используемые в качестве аргументов команд, непосредственно на экране дисплея путем их указания с помощью мыши. Для этих целей предусмотрены специальные панели, называемые панелями указания. Они имеют стандартный вид.

Пример такой панели показан на рисунке 3.

При включенной кнопке **Pick** объекты здесь можно указывать при помощи левой кнопки мыши. Другая кнопка **Unpick** применяется для снятия указания. Для переключения между этими операциями можно также воспользоваться правой кнопкой мыши. При указании объектов курсор мыши имеет вид стрелки, направленной вверх, а при снятии указания – вид стрелки, направленной вниз. Для идентификации объектов при их указании здесь используется понятие «горячей» точки. Например, если два объекта являются смежными, то выбирается тот, «горячая» точка которого наиболее близка к курсору мыши. Для поверхностей, объемов и конечных элементов данная точка располагается вблизи их центра. Линии имеют три «горячие» точки – на концах и в

середине. Если «горячие» точки двух или более объектов совпадают, то при их указании появляется панель «Multiple Entities» (совпадающие объекты). При этом необходимо с помощью кнопки **Next** (следующий) или **Prev** (предыдущий) выбрать нужный объект и нажать **OK**. Активизация кнопки **Single** позволяет указывать отдельные объекты. Включение же кнопки **Box**, **Polygon** или **Circle** дает возможность выбора сразу нескольких объектов, находящихся внутри построенного курсором мыши прямоугольника, многоугольника или круга соответственно. Кнопка **Loop** позволяет выбирать замкнутую последовательность линий или поверхностей путем указания лишь одного объекта из этого набора. И наконец, кнопка **Pick All** используется для выбора всех объектов требуемого типа.

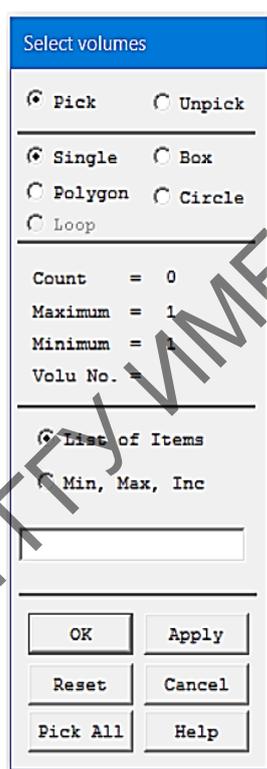


Рисунок 3 – Панель указания

1.5 Работа с файлами

Комплекс при работе создает временные и постоянные файлы. Временные файлы отличаются от постоянных тем, что при нормальном выходе из комплекса временные файлы удаляются автоматически. При аварийном выходе из комплекса временные файлы сохраняются, и некоторые из них следует удалять самому пользователю.

В состав постоянных файлов, создаваемых и применяемых при работе комплекса ANSYS, входят файлы, приведенные в таблице 2.

Название файла (Jobname), как правило, является общим для всех временных и постоянных файлов и указывается при вызове сеанса работы с комплексом.

Файлы имеют имена типа filename.ext, где filename по умолчанию имеет значение jobname, а ext является уникальным расширением, состоящим из двух-четырёх символов, определяющих содержимое файла. При этом jobname является именем, указанным при вызове сеанса работы с комплексом ANSYS (при помощи команды /FILENAME или вызовом последовательности Utility Menu File Change Jobname). Если значение jobname не указывается, по умолчанию применяется имя FILE.

Таблица 2 – Файлы, создаваемые ANSYS

Тип файла	Расширение
Log-файл	Jobname.LOG
Файл ошибок	Jobname.ERR
Файл output	Jobname.OUT
Файл базы данных	Jobname.DB
Резервный файл базы данных	Jobname.DBB
Файл результатов: – механический анализ; – термический анализ; – анализ магнитных полей; – FLOTRAN	Jobname.RST Jobname.RTH Jobname.RMG Jobname.RFL
Файл пошаговой нагрузки	Jobname.SN
Графический файл	Jobname.GRPH
Файл матриц элементов	Jobname.EMAT
Файл данных элементов	Jobname.ELEM
Файл с данными геометрической модели	Jobname.IGES
Файл с данными материалов	Jobname.MP
Файл с координатами узлов	Jobname.NODE
Выходной текстовый файл	Jobname.OUT

В зависимости от использования файлов комплекс записывает их в текстовом (ASCII) или двоичном формате. Например, файлы ERR и LOG являются текстовыми, в то время как файлы DB, EMAT и RST являются двоичными. В общем случае файлы, необходимые для чтения и

редактирования, записываются в текстовом формате, а все остальные – в двоичном формате.

Отдельно остановимся на LOG-файле. При работе с программой, как с помощью графического интерфейса пользователя, так и с помощью команд, ANSYS отражает все действия в LOG-файле. LOG-файл представляет собой записанную историю работы с программой. Файл имеет расширение LOG и имеет формат записи ASCII – его можно просмотреть и любым внешним редактором. Этот файл представляет программу, которую можно исполнить. Для просмотра всего содержимого файла необходимо выполнить Utility Menu => List => Files => Log File. С помощью LOG-файла можно исправить ошибки, допущенные при работе. Для этого необходимо:

- записать LOG-файл с помощью Utility Menu => File => Write DB Log File в файл, которому дать расширение txt (это необходимо для редакции файла);

- открыть сохраненный файл, внести необходимые поправки и сохранить. Этот файл представляет программу, написанную с помощью команд;

- очистить содержимое базы данных ANSYS с помощью Utility Menu => File => Clear & Start New;

- исполнить отредактированную программу с помощью Utility Menu => File => Read Input from.

2 АНАЛИЗ ЗАДАЧИ В КОМПЛЕКСЕ ANSYS MECHANICAL APDL

Анализ любой задачи в комплексе состоит из следующих этапов:

- предварительные настройки;
- построение модели;
- задание нагрузок и выполнение анализа;
- постпроцессорная обработка результатов.

2.1 Предварительные настройки

Присвоение имени файлу базы данных. При выполнении этой операции файлу базы данных и всем сопутствующим файлам присваивается новое имя. Если этого не выполнить, то файлы будут иметь имя по умолчанию file с соответствующим расширением. Для присвоения

имени необходимо выполнить путь в меню графического интерфейса пользователя (ГИП) и ввести свое имя файла: Utility Menu => File => Change Jobname. Можно также воспользоваться соответствующей командой в строке ввода: **/FILENAME,filename**.

Определение заголовка. Для определения заголовка необходимо выполнить путь в меню ГИП: Utility Menu => File => Change Title. При выполнении этой операции в графическом окне появится название заголовка. Для достижения той же цели можно воспользоваться соответствующей командой: **/TITLE,filename**.

Определение единиц измерения. Для перехода к системе единиц СИ необходимо задать команду **/UNITS**. Данная команда недоступна из ГИП и должна непосредственно вводиться в командное окно: **(UNITS, SI**.

2.2 Построение модели

Моделирование объекта – это, как правило, самый трудоемкий этап решения задачи. Моделирование производится в препроцессоре PREP7. На этом этапе исходя из математических моделей создается геометрическая модель объекта, определяются типы используемых конечных элементов, формируется конечно-элементная модель, задаются свойства материала и краевые условия.

Построение геометрической модели. Комплекс имеет возможность применения следующих методов создания геометрических моделей:

- создание геометрических моделей средствами комплекса;
- импорт моделей, созданных средствами CAD.

Ниже приведен краткий обзор способов создания геометрических моделей средствами комплекса.

Создание модели снизу вверх. Точки, определяющие углы и концы ребер модели, являются геометрическими объектами самого низкого уровня. При создании модели сначала создаются точки, которые далее используются для создания геометрических объектов более высокого порядка (то есть линий, поверхностей и объемов). Этот процесс называется созданием модели снизу вверх, или восходящим моделированием.

Создание модели сверху вниз. Комплекс предоставляет возможность создания модели путем использования геометрических объектов, которые полностью определяют создаваемые линии, поверхности и объемы. Поскольку создается примитив, комплекс автоматически формирует все объекты более низкого уровня, связанные с ним. Если моделирование начинается с создания примитивов, такой процесс называется созданием геометрической модели сверху вниз, или нисходящим моделированием.

Пользователь может комбинировать оба метода для создания любой модели.

Использование булевских операций. Имеется возможность формирования геометрической модели, используя пересечение, вычитание и другие булевы операции. Булевы операции позволяют работать непосредственно с геометрическими объектами высокого уровня для создания геометрии сложной формы. В булевых операциях можно использовать объекты, полученные как моделированием сверху вниз, так и снизу вверх.

Системы координат. В комплексе применяются следующие типы координатных систем:

- глобальные и локальные системы координат, используемые для определения местонахождения геометрических объектов (узлов, ключевых точек и т. д.) в пространстве;

- узловая система координат, определяющая направление степеней свободы для каждого узла и ориентацию составляющих вектора результатов в узлах;

- система координат элемента, определяющая ориентацию характеристик материала, зависящих от направления, и компонентов вектора результатов для элемента;

- система координат результатов, используемая для преобразования результатов в узлах или элементах в отдельную систему координат для распечатки листинга, графического вывода на экран или основных операций в постпроцессоре общего назначения.

Рассмотрим более подробно каждую из координатных систем.

Глобальная система координат – это всеобщая или абсолютная система. В программе ANSYS предусмотрено использование трех предопределенных глобальных систем: декартовой, цилиндрической и сферической. Все три системы правосторонние, имеют одно и то же начало и идентифицируются следующим образом:

0 – декартова,

1 – цилиндрическая,

2 – сферическая.

Локальная система координат. Во многих случаях у пользователя возникает необходимость установить собственную систему координат, начало которой не совпадает с началом глобальной системы координат или ориентация которой отличается от ориентации предопределенной глобальной системы.

Локальная система координат может быть декартовой, цилиндрической или сферической. Кроме того, может быть задана тороидальная локальная система координат. Когда локальная система координат определена, она становится активной. При создании локальной системы

ей нужно присвоить идентифицирующий номер, который должен быть больше 10. Локальные системы координат могут быть созданы несколькими способами. Например, задание локальной системы с использованием глобальной декартовой системы координат: Utility Menu => => WorkPlane => Local Coordinate Systems => Create Local CS => AT Specified Loc (рисунок 4).

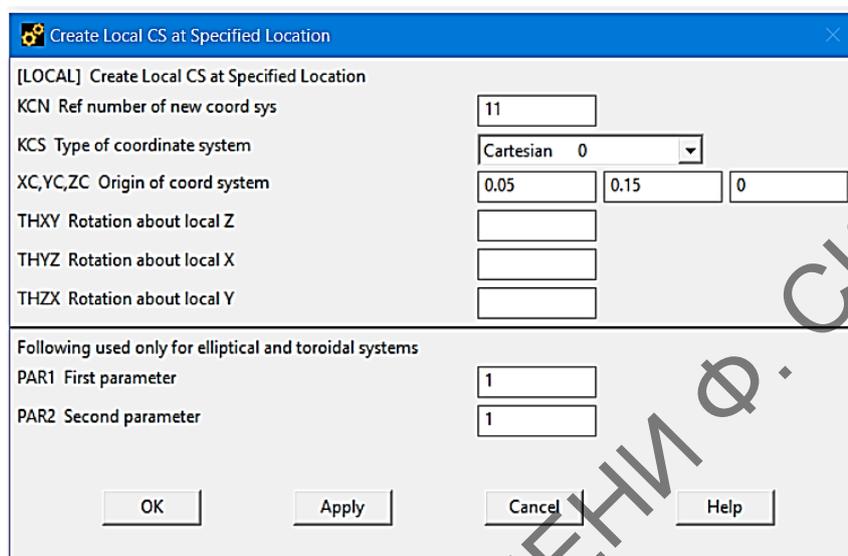


Рисунок 4 – Задание локальной системы с использованием глобальной декартовой системы координат

В диалоговом окне **Create Local CS at Specified Location** нужно указать следующие параметры.

В поле KCN Ref number of new coord sys вводим номер системы координат, который должен быть больше 10. Если уже есть система координат с таким номером, то она будет переопределена.

В поле KCS Type of coordinate system необходимо выбрать тип системы координат (Cartesian 0 – декартова, Cylindrical 1 – цилиндрическая, Spherical 2 – сферическая и Toroidal 3 – тороидальная).

В поле XC, YC, ZC Origin of coord system вводим координаты начала системы координат.

В полях THXY Rotation about local Z, THYZ Rotation about local X, THZX Rotation about local Y вводим значения углов, на которые необходимо повернуть систему относительно осей глобальной декартовой системы координат.

Локальные системы координат можно создавать либо удалять в любой момент работы с программой. Удалить локальную систему координат можно следующим образом: Utility Menu => WorkPlane => Local Coordinate Systems => Delete Local CS.

В диалоговом окне **Delete Local CS** в строке KCN1 Delete coord system from нужно указать номер удаляемой локальной системы координат.

Для просмотра статуса всех глобальных и локальных систем координат выполним следующее: Utility Menu => List => Othebnr => Local Coord Sys.

Систем координат может быть задано столько, сколько требуется, но активной в данный момент может быть только одна. Изначально активной является глобальная декартова система. Вновь введенная система автоматически становится активной. Если нужно активизировать одну из глобальных систем координат или одну из предварительно заданных необходимо проделать следующую операцию: Utility Menu => => Work Plane => Change Active CS to.

В то время как глобальные и локальные системы координат обеспечивают возможность создания геометрических объектов, **узловая система координат** ориентирует направления степеней свобод в каждом узле. Каждый узел имеет свою собственную узловую систему координат, которая по умолчанию параллельна декартовой глобальной системе (независимо от активной системы координат, в которой узел был создан).

Вращение узловой системы координат, в результате которого оси узловой системы координат становятся параллельными соответствующим осям активной системы координат, осуществляется следующим образом: Main Menu => Preprocessor => Create => Nodes => Rotate Node CS => To Active CS или Main Menu => Preprocessor => Move/Modify => => Rotate Node CS => To Active CS.

Поворот узловой системы координат на углы, задаваемые пользователем, осуществляется следующим образом: Main Menu => Preprocessor => => Create => Nodes => Rotate Node CS => By Angles или Main Menu => => Preprocessor => Move/Modify => Rotate Node CS => By Angles.

Просмотр углов поворота узловой системы координат относительно осей глобальной координатной системы: Utility Menu => List => Nodes.

Каждый элемент имеет свою собственную систему координат – **элементную систему координат**, которая определяет направление осей свойств ортотропных материалов, приложенных давлений и результатов (напряжений и деформаций) для этого элемента.

Сначала создается локальная система координат с необходимыми углами поворота относительно осей глобальной системы координат, а затем в атрибутах элементов указывается номер созданной локальной системы координат: Main Menu => Preprocessor => Modeling => => Move/Modify => Elements => Modify Attrib – нажмите кнопку **Pick All** и введите данные (рисунок 5).

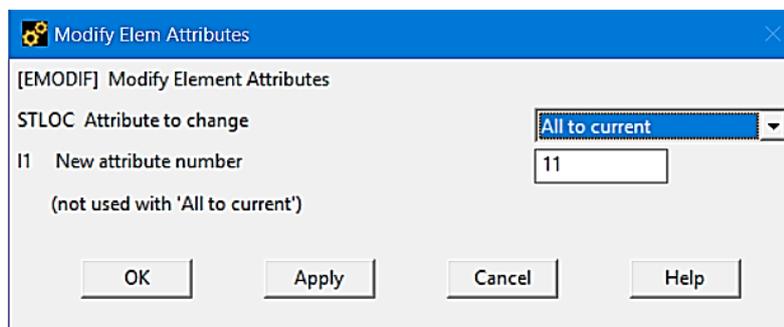


Рисунок 5 – Задание системы координат элементов

Выходные данные (результаты), вычисляемые в ходе решения, хранятся в базе данных и в файле результатов в узловой системе координат, и в элементной системе координат. При представлении результатов они переводятся в активную систему координат результатов (которая является по умолчанию глобальной декартовой системой) для изображения, просмотра в текстовом виде и сохранения в таблицах.

Изменение **системы координат результатов**: Main Menu => => General Postproc => Options for Output. Допустимо изменение активной системы координат результатов на другой ее тип (например, на глобальную цилиндрическую систему, на локальную систему координат или на систему координат результатов).

Рабочая плоскость. Отметим, что хотя курсор является точкой на экране дисплея, в действительности он представляет линию в пространстве, перпендикулярную плоскости экрана. Для того чтобы с помощью курсора можно было задавать местоположение точек, здесь необходимо определить воображаемую плоскость, точка пересечения линии курсора с которой будет давать единственную точку в пространстве. Эта воображаемая плоскость и называется рабочей плоскостью (Working Plane). В программе ANSYS она играет важную роль. Например, построение геометрических примитивов всегда выполняется относительно рабочей плоскости.

По умолчанию рабочая плоскость совпадает с плоскостью XY глобальной декартовой системы координат. Однако с помощью команд, сосредоточенных в подменю Utility Menu => WorkPlane => Align WP with, можно определить новую рабочую плоскость. Например, команда Keypoints позволяет строить рабочую плоскость по трем точкам, которые определяют начало, ось x и плоскость xy.

Для перемещения рабочей плоскости следует воспользоваться командами подменю Utility Menu => WorkPlane => Offset WP to.

При этом начало системы координат рабочей плоскости можно перенести в заданную точку, узел или начало активной системы координат. Кроме того, последовательность Utility Menu => WorkPlane => => Offset WP by Increments позволяет перемещать и поворачивать рабочую плоскость путем задания трех смещений и трех углов поворота относительно осей ее системы координат.

Построение конечно-элементной модели. Для решения задачи в комплексе требуется расчетная (конечно-элементная) модель, причем геометрическая информация в расчетах вообще не используется.

Построение МКЭ-модели – это процесс получения узлов и элементов, адекватно описывающих геометрию тела. Для этих целей в комплексе предусмотрены два метода:

- метод, базирующийся на геометрическом моделировании (solid modeling);

- прямое генерирование (direct generation).

В первом случае сначала описывается геометрия тела, а затем геометрические объекты автоматически разбиваются программой на конечные элементы. При этом имеется возможность управлять размером и формой создаваемых таким образом элементов.

Во втором случае приходится вручную определять положение каждого узла и связи каждого элемента.

Очевидно, что метод, базирующийся на геометрическом моделировании, является более мощным и универсальным, нежели прямое генерирование, и чаще используется на практике. Однако метод прямого генерирования обеспечивает более полный контроль над геометрией и нумерацией каждого узла и элемента. Поэтому иногда возникают ситуации, где данный метод становится более предпочтительным.

Определение типа элемента. Библиотека элементов ANSYS содержит более 100 различных типов конечных элементов. Каждый элемент имеет свое имя, описывающее семейство элементов, необходимых для моделирования соответствующего объекта, и номер. В таблице 2 приведены некоторые из них.

Типом элемента определяются:

- степени свободы элемента, которые влияют и на тип анализа (механический, термический, магнитный, электрический);

- модель объекта (одномерная, двумерная или трехмерная).

Для выбора нужного типа элемента необходимо выполнить путь в меню ГИП: Main Menu => Preprocessor => Element Type => => Add/Edit/Delete => Add или использовать команду в строке ввода: ET,ITYPE,ENAME.

Таблица 2 – Основные типы конечных элементов ANSYS

Имя элемента	Моделирование
LINK	Моделирование ферменных конструкций, тросов, канатов и т. д.
SHELL	Моделирование тонкостенных конструкций
PLANE	Моделирование двумерных задач (плоская задача, плосконапряженное состояние, осесимметричная задача)
SOLID	Моделирование трехмерных объектов
CONTC	Моделирование условий контакта

Приведем в качестве примера некоторые типы элементов доступные для теплового анализа (таблица 3).

Таблица 3 – Типы элементов для теплового анализа в ANSYS

Элемент	Размерность	Вид, характеристика
PLANE35	2D	Треугольник, шесть узлов
PLANE55	2D	Четырехугольник, четыре узла
PLANE77	2D	Четырехугольник, восемь узлов
SOLID70	3D	Блок, восемь узлов
SOLID87	3D	Тетраэдр, десять узлов

Определение опций элемента. У каждого типа элементов обычно необходимо задать опции. Эти опции позволяют управлять различными параметрами элемента.

Например, у элемента SOLID95 следующие опции:

- выбор локальной системы координат, связанной с элементом;
- выбор точек, в которых происходит вычисление данных (например, напряжений) внутри элемента;
- выбор точек, в которых происходит вычисление данных на поверхности элемента;
- правило численного интегрирования для построения.

Более подробно о том, какие опции допускает соответствующий тип элемента, необходимо смотреть в разделе помощи по каждому элементу.

Для выбора нужных опций элемента необходимо выполнить путь в меню ГИП: Main Menu => Preprocessor => Element Type => Add/Edit/Delete => Options или использовать команду в строке ввода: KEYOPT,ITYPE,KNUM,VALUE.

Определение констант элемента. В основном константы задаются для элементов, которые используются для моделирования трехмерных моделей сплошной среды моделями низшей размерности, например, в случае ферменных, балочных и оболочечных элементов.

Константы элемента зависят от типа элемента. Так, например, константы для элемента BEAM3, 2D балочного элемента – это площадь сечения (AREA), момент инерции (IZZ), высота сечения (HEIGHT), константа сдвига (SHEARZ), начальная деформация (ISTRN) и добавленная масса (ADDMAS). Не все элементы требуют определения констант.

Для задания констант элемента необходимо выполнить путь в меню ГИП: Main Menu => Preprocessor => Real Constants => => Add/Edit/Delete или использовать команду в строке ввода: R,NSET,R1,R2,R3,R4,R5,R6.

Генерация сеток конечных элементов. Процедура построения узлов и конечных элементов состоит из следующих основных шагов:

- назначение объектам атрибутов элементов;
- установка параметров управления сеткой конечных элементов;
- генерация сетки элементов.

Можно назначить разные атрибуты элементов различным частям модели. При этом используются соответствующие ссылочные номера, включающие номер материала (MAT), номер набора «реальных» постоянных (REAL), номер типа элементов (TYPE), номер локальной системы координат, применяемой в качестве системы координат элемента (ESYS), и номер сечения (SECNUM). Здесь можно либо назначить атрибуты выбранным геометрическим объектам модели тела (до их разбивки на элементы), либо определить активный набор атрибутов (по умолчанию MAT = 1, REAL = 1, TYPE = 1, SECNUM = 1), который будет использоваться для всех конечных элементов, создаваемых в последующих операциях построения сеток.

Для назначения атрибутов непосредственно геометрическим объектам (точкам, линиям, поверхностям и объемам) применяется один из следующих методов:

Main Menu => Preprocessor => Meshing => Mesh Attributes =>

All Keypoints (всем точкам);

Picked KPs (указанным точкам);

All Lines (всем линиям);

Picked Lines (указанным линиям);

All Areas (всем поверхностям);

Picked Areas (указанным поверхностям);

All Volumes (всем объемам);

Picked Volumes (указанным объемам).

Для определения активного набора атрибутов доступны два варианта:

Main Menu => Preprocessor => Meshing => Mesh Attributes => => Default Attribs;

Main Menu => Preprocessor => Modeling => Create => Elements => Elem Attributes.

Следует отметить, что атрибуты, назначенные геометрическим объектам, подавляют текущие активные атрибуты. При генерации сеток конечных элементов, если объекту назначены атрибуты, именно они будут автоматически присваиваться создаваемым там элементам.

Основная предпосылка МКЭ-расчетов заключается в том, что по мере увеличения количества элементов (плотности сетки) решение сходится к точному. Однако при этом возрастают потребные ресурсы ЭВМ. Здесь необходимо найти баланс между точностью и скоростью решения задачи. Таким образом, при практическом использовании МКЭ часто встает вопрос о том, сколько для получения приемлемой точности следует взять конечных элементов. В отсутствие опыта здесь приходится экспериментировать, начиная с грубой сетки и далее сгущая ее и исследовать сходимость решения.

Необходимо помнить, что МКЭ – приближенный метод, точность которого зависит от правильного выбора типов и размеров конечных элементов. Так, например, более мелкая сетка требуется там, где ожидаются большие градиенты напряжений. В то же время более грубая сетка может применяться в зонах с более или менее постоянными напряжениями, а также в областях, не представляющих особого интереса. В связи с этим пользователь должен предвидеть области концентрации напряжений.

Следует отметить, что форму элементов необходимо задавать лишь для тех типов элементов, которые допускают использование более одной формы.

Например, многие поверхностные элементы могут иметь как треугольную, так и четырехугольную форму, а объемные – как форму тетраэдра, так и гексаэдра.

Размер генерируемых программой конечных элементов определяется путем задания либо длины стороны элемента (Element edge length), либо числа делений линии на элементы (No. of element divisions).

Определение глобального размера элементов:

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

Определение размера элементов вблизи точек:

Main Menu => Preprocessor => Meshing => Size Cntrls => ManualSize => Keypoints => All KPs (Picked KPs).

Определение размера элементов на линиях:

Main Menu => Preprocessor => Meshing => Size Cntrls => ManualSize => Lines => All Lines (Picked Lines).

Перечисленные выше команды можно использовать вместе. При этом для разрешения конфликтных ситуаций здесь имеется определенная иерархия. Например, локальные установки подавляют глобальные. Глобальный размер элементов используется лишь для тех объектов, для которых не определены какие-либо другие параметры разбивки.

Если параметры управления сеткой вообще не заданы, комплекс выбирает размер элементов, исходя из минимального и максимального количества делений, соотношения сторон и, прежде всего, порядка элемента.

Автоматическое разбиение геометрических объектов на конечные элементы осуществляется с помощью команд генерации сеток (Meshing).

Генерация точечных элементов:

Main Menu => Preprocessor => Meshing => Mesh => Keypoints.

Генерация линейных элементов:

Main Menu => Preprocessor => Meshing => Mesh => Lines.

Генерация поверхностных элементов:

Main Menu => Preprocessor => Meshing => Mesh => Areas => => Mapped => 3 or 4 sided,

Main Menu => Preprocessor => Meshing => Mesh => Areas => Free.

Генерация объемных элементов:

Main Menu => Preprocessor => Meshing => Mesh => Volumes => => Mapped => 4 or 6 sided.

Main Menu => Preprocessor => Meshing => Mesh => Volumes => Free.

Здесь следует отметить, что для поверхностей и объемов программа ANSYS использует два типа сеток: свободные (free) и регулярные (mapped).

При этом генерация свободных сеток возможна на любых поверхностях или объемах без ограничений. При разбиении поверхностей свободная сетка может состоять из четырехугольных и треугольных элементов (смешанная сетка) или только из треугольных элементов. Однако при разбиении объемов здесь используются лишь элементы, имеющие форму тетраэдра (смешанная сетка не допускается). Генерация регулярных сеток требует, чтобы поверхности и объемы были «правильными», т. е. удовлетворяли определенным критериям. Так, поверхности должны быть трех- или четырехсторонними, а объемы – шестигранными (гексаэдр), пятигранными (клин, призма) или четырехгранными (тетраэдр). Заданное количество делений на сторонах здесь также должно удовлетворять некоторым критериям. При этом регулярная сетка на поверхностях состоит только из четырехугольных элементов, а в объемах – из шестигранных. Отметим, что регулярная сетка является более экономичной и более удобной при анализе результатов расчета. Однако во многих случаях геометрия модели такова, что

составляющие ее поверхности имеют более четырех сторон, а объемы – более шести граней.

Для преобразования объектов в регулярные здесь может потребоваться один из следующих приемов:

– разделение поверхностей (объемов) на части меньших размеров и более простой формы при помощи булевой операции деления (divide). При этом в качестве режущего инструмента удобно использовать рабочую плоскость, которая легко устанавливается в нужное положение.

– применение операции конкатенации (concatenate) для уменьшения числа сторон (граней) путем «фиктивного» объединения (только в целях разбивки) двух или более линий (поверхностей): Main Menu => Preprocessor => Meshing => Concatenate => Lines (Areas).

Для удобства пользователя все перечисленные выше команды объединены в одной диалоговой панели «Mesh Tools» (рисунок 6), которая появляется при выполнении следующей последовательности команды: Main Menu => Preprocessor => Meshing => Mesh Tools.

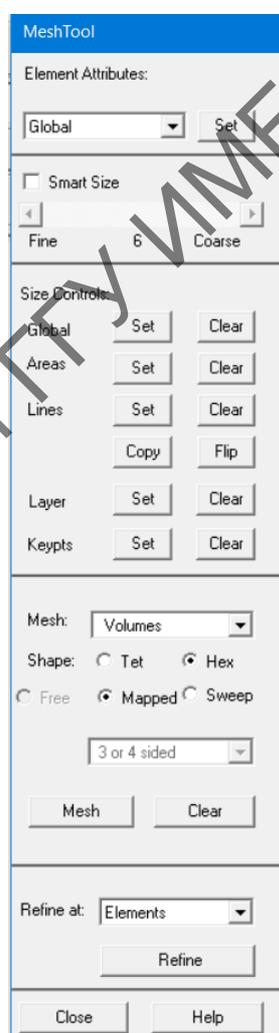


Рисунок 6 – Инструментарий для построения сеток

Определение свойств материала. В зависимости от задачи в ANSYS могут быть заданы следующие свойства материала:

- линейные или нелинейные;
- изотропные, ортотропные и анизотропные;
- зависящие от температуры или независящие.

Для задания свойств материала необходимо выполнить путь в меню ГИП: Main Menu => Preprocessor => Material Props или использовать команду в строке ввода: MP,Lab,MAT,C0,C1,C2,C3,C4.

Команда **MP** позволяет задать свойство, зависящее от температуры, в виде полинома. Полином может быть линейным, квадратичным, кубическим или полиномом четвертого порядка:

$$\text{Свойство} = C0 + C1 \cdot T + C2 \cdot T^2 + C3 \cdot T^3 + C4 \cdot T^4$$

Если задано только C0, то свойство материала будет постоянным; если задается C0 и C1, то свойство материала будет линейно зависеть от температуры и т. д.

Когда задано свойство, зависящее от температуры, указанным выше образом, программа вычисляет полином в дискретных температурных точках с линейной интерполяцией между точками.

Второй способ задания зависящих от температуры свойств заключается в использовании комбинации команд **MPTEMP** и **MPDATA**.

MPTEMP задает серию температур, и **MPDATA** задает соответствующие значения свойства материала. Например, следующие команды определяют зависящую от температуры теплопроводность для материала 1:

```
MPTEMP,1,10,20,30, , ,  
MPDATA,KXX,1,1,1.1,1.2,1.3, , ,
```

2.3 Задание нагрузок и выполнение анализа

Выбор типа анализа и задания спецификации решения. На этом этапе решения задач в комплексе используется блок решения (Solution). Необходимо выбрать тип анализа и задать его опции.

Комплекс позволяет выполнять следующие типы анализов:

- Static – статический анализ (задается по умолчанию);
- Modal – модальный анализ (т. е. расчет частот и форм собственных колебаний);
- Harmonic – гармонический анализ (т. е. расчет вынужденных колебаний конструкции при действии нагрузок, изменяющихся по синусоидальному закону);

- Transient – анализ переходных динамических процессов (как правило, кратковременных, например, ударного характера);
- Spectrum – спектральный анализ (т. е. анализ случайных колебаний);
- Eigen Buckling – анализ начальной устойчивости (линеаризованный подход);
- Substructuring – анализ подконструкций (суперэлементов).

Для выбора типа анализа необходимо выполнить путь в меню ГИП: Main Menu => Preprocessor => Loads => Analysis Type => New Analysis или использовать команду в строке ввода: ANTYPE, Antype, Status.

На этом этапе в зависимости от типа выбранного решения, а также в зависимости от типа задачи определяются следующие параметры:

- выбор метода решения получаемых систем уравнений;
- задание параметров решения (шаг нагрузки, количество шагов, шаг интегрирования, количество определяемых собственных форм и др.);
- задание точности решения;
- задание параметров записи результатов в файл и др.

Опции анализа дают возможность уточнить параметры проводимого расчета. Для задания опций анализа можно воспользоваться универсальной диалоговой панелью «Solution Controls», вызываемой по пути в меню ГИП: Main Menu => Solution => Analysis Type => Sol'n Controls (рисунок 7).

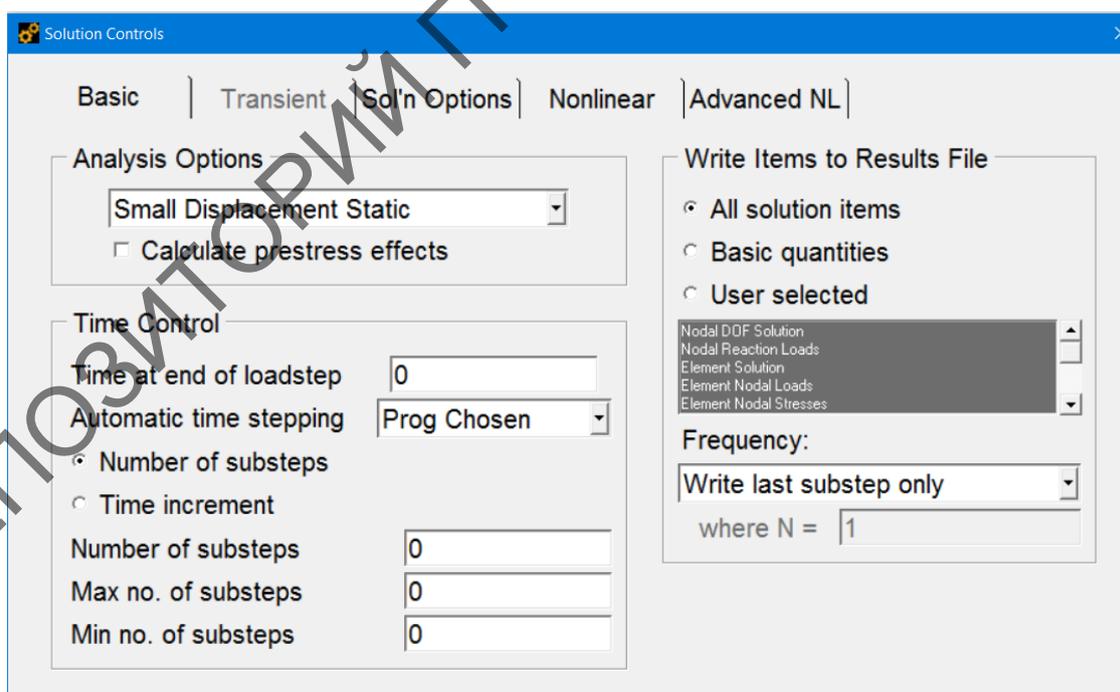


Рисунок 7 – Диалоговая панель «Solution Controls»

Следует отметить, что решение системы линейных алгебраических уравнений может выполняться от долей секунды до нескольких часов в зависимости от размера задачи и характеристик компьютера. Линейный статический расчет требует одного такого решения, а нелинейный или динамический расчет может потребовать десятков, сотен или даже тысяч решений. Поэтому важно правильно выбирать метод решения.

Для решения систем уравнений в комплексе применяют как прямые, так и итерационные методы. Каждый подход обладает определенными преимуществами и недостатками, но чаще всего в настоящее время пользуются все же прямыми методами, основанными на исключении по Гауссу.

Имеющиеся в комплексе методы решения систем уравнений делятся на три группы:

1) прямые: Frontal direct – фронтальный метод, Sparse direct – для разреженных матриц, т. е. содержащих много нулей (выбирается по умолчанию);

2) итерационные: PCG – предобусловленный метод сопряженных градиентов, ICCG – метод сопряженных градиентов с неполным разложением Холецкого, JCG – метод сопряженных градиентов Якоби;

3) для параллельных вычислений: AMG – метод, используемый в многопроцессорных компьютерах, DDS – метод, применяемый при наличии распределенной вычислительной системы.

В большинстве случаев выбираемый по умолчанию метод Sparse direct обеспечивает хорошую надежность и скорость решения. Метод Frontal direct рекомендуется использовать тогда, когда важна надежность или при ограниченной памяти ЭВМ. Отличительной особенностью фронтального метода является то, что он не требует построения полной матрицы жесткости конструкции. При его использовании выполняется формирование только тех уравнений, которые необходимы для исключения очередных неизвестных (степеней свободы). Итерационный метод PCG обеспечивает высокую скорость решения для больших систем, особенно при использовании объемных элементов. Метод ICCG эффективен в задачах мультифизики, а JCG рекомендуется использовать в тех случаях, когда в каждом узле определяется лишь одна степень свободы (как в тепловом анализе).

Приложение нагрузок. Нагрузки в комплексе разделяются на шесть категорий:

- DOF Constraints – ограничения степеней свободы (граничные условия);
- Forces – сосредоточенные силы и моменты;
- Surface Loads – поверхностные нагрузки (например, давление);

- Body Loads – объемные нагрузки (например, температура);
- Inertial Loads – инерционные нагрузки, связанные с массой конструкции (возникают при действии: ускорения свободного падения, перегрузок, угловой скорости и углового ускорения);
- Coupled-field Loads – нагрузки связанных полей (используются для передачи результатов расчета одного анализа в качестве нагрузки для другого анализа).

Большинство из перечисленных выше нагрузок можно прикладывать либо к геометрическим объектам (т. е. к точкам, линиям, поверхностям и объемам), либо непосредственно к конечно-элементной модели (т. е. к узлам и элементам). Первый способ представляется более удобным, поскольку определять нагрузки на геометрических объектах можно как до, так и после разбиения модели на конечные элементы. Кроме того, приложенные таким образом нагрузки не пропадут и при модификации сетки элементов. Следует отметить, что при запуске задачи на счет эти нагрузки будут автоматически переноситься на соответствующие узлы и конечные элементы.

Приведем в качестве примера типы тепловых нагрузок (таблица 4).

Таблица 4 – Типы тепловых нагрузок в ANSYS

Тип нагрузки	Единицы измерения	Семейство команд	Путь в меню
Температура (Temperature)	К	D	Main Menu => Solution => Define Loads => Apply => Thermal 1 => Temperature
Тепловой поток (Heat Flow)	Дж/с	F	Main Menu => Solution => Define Loads => Apply => Thermal => Heat Flow
Конвекция (Convection)	Вт/ К·м ²	SF	Main Menu => Solution => Define Loads => Apply => Thermal => Convection
Плотность теплового потока (Heat Flux)	Дж/с·м ²	SF	Main Menu => Solution => Define Loads => Apply => Thermal => Heat Flux
Энерго-выделение (Heat Generat)	Дж/с·м ³	BF	Main Menu => Solution => Define Loads => Apply => Thermal => Heat Generat

Ввод нагрузок возможен в модуле Solution. Приведем в качестве примера путь в меню ГИП для задания значений температур:

Main Menu => Solution => Loads => Define Loads => Apply => Structural => Temperature =>

- On Keypoints (в точках);
- On Lines (на линиях);
- On Areas (на поверхностях);
- On Nodes (в узлах);
- On Elements (в элементах);
- Uniform Temp (единой для всей модели).

С целью проверки приложенных нагрузок может потребоваться заново отрисовать соответствующие им символы. Это можно сделать путем активизации нужных опций диалоговой панели «Symbols», появляющейся при выборе пункта меню Utility Menu => PlotCtrls => Symbol.

Для вывода списка заданных нагрузок следует воспользоваться пунктами меню Utility Menu => List => Loads.

Запуск задачи на счет. Для запуска задачи на счет используется следующий путь ГИП: Main Menu => Solution => Solve => Current LS. При этом комплекс берет из базы данных информацию по конечно-элементной модели и текущему шагу нагружения и вычисляет решение.

Если после завершения счета, не выходя из блока решения, изменить условия нагружения и снова отправить задачу на решение, то будет получено решение для следующего шага и т. д. Результаты расчетов записываются в файл результатов (Jobname.rst), а также в базу данных. При этом в базе данных может храниться только один набор результатов, тогда как в файле могут быть записаны результаты для всех шагов решения.

Если предварительно с пунктов меню Main Menu => Solution => Load Step Opts => Write LS File записать последовательно шаги нагружения в текстовые файлы (именуемые Jobname.s01, .s02, .s03 и т. д.), то тогда можно будет за один раз получить решения сразу для нескольких шагов по нагрузке: Main Menu => Solution => Solve => From LS Files.

2.4 Постпроцессорная обработка результатов

Как только решение завершено, можно получить доступ к результатам, используя, в зависимости от типа задачи, два постпроцессора – POST1 и POST26.

Постпроцессор POST1 (General Postprocessor – общий постпроцессор) используется для обзора результатов в стационарной задаче или в течение отдельного шага решения в нестационарной задаче. Путь в ГИП: Main Menu => General Postproc или команда **/POST1**.

Постпроцессор POST26 (Time History Postprocessor – временной постпроцессор) используется для обзора результатов, зависящих от

времени. Путь в ГИП: Main Menu => Time Hist Postpro или команда /POST26.

Общий постпроцессор предусматривает следующие виды графического изображения выходных величин:

- Contour Plot – контурное изображение;
- Deformed Shape – изображение деформированного состояния;
- Vector Plot – векторное изображение;
- Path Plot – изображение изменения величины вдоль определенной пользователем траектории;
- Reaction Force Display – изображение сил реакции.

Рассмотрим некоторые из них. Так, контурное изображение используется для многоцветного представления на модели поля выходной величины (например, компонента вектора перемещения, тензора напряжений и т. п.). Здесь доступны следующие команды: Main Menu => => General Postproc => Plot Results => Contour Plot =>

- Nodal Solu (узловое решение);
- Element Solu (элементное решение);
- Elem Table (результаты из таблицы элементов);
- Line Elem Res (результаты линейных элементов).

При этом пункт меню Nodal Solu используется для вычерчивания непрерывных контурных линий.

Строка Element Solu предназначена для вычерчивания контурных линий, которые терпят разрыв на границах элементов. Этой командой обычно изображаются поля производных величин.

Следующий пункт меню Elem Table используется для построения контурных изображений величин, хранящихся в таблице элементов.

На практике при обработке результатов расчета часто приходится строить двумерные графики различных выходных величин. Комплекс позволяет строить такие графики вдоль определенной пользователем траектории. Для создания траектории путем прямого указания лежащих на ней узлов доступен следующий пункт меню: Main Menu => General Postproc => Path Operations => Define Path => By Nodes.

Здесь после указания узлов появляется диалоговая панель (рисунок 8), где в поле Define Path Name необходимо задать имя создаваемой траектории, в поле Number of data sets определяется максимально возможное число выходных величин, отображаемых на траектории, в поле Number of divisions указывается число промежуточных отрезков, создаваемых между каждой парой узлов, определяющих траекторию (чем больше промежуточных точек, тем более гладким получается график).

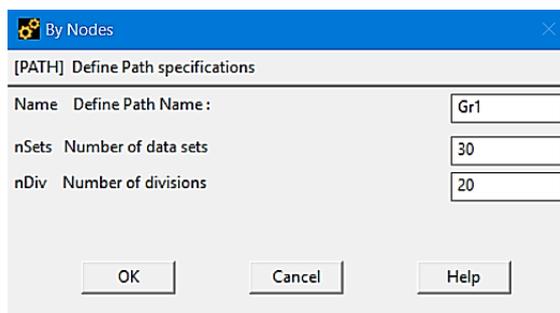


Рисунок 8 – Диалоговая панель определения траектории

Затем следует выбрать выходные данные, предназначенные для отображения вдоль созданной траектории: Main Menu => General Postproc => Path Operations => Map onto Path.

Здесь каждой величине необходимо присвоить имя (нельзя использовать зарезервированные имена XG, YG, ZG и S). После того как интересующая величина привязана к кривой, можно получить зависимость этой переменной от выбранного пути в табличной форме: Main Menu => General Postproc => Path Operations => Plot Path Item => List Path Items или в виде двухмерного графика: Main Menu => General Postproc => Path Operations => Plot Path Item => On Graph.

К выделенным таким образом массивам значения возможно применение ряда математических операций (таких как интегрирование, дифференцирование, умножение, скалярное и векторное произведение).

Представление результатов в постпроцессоре истории нагружения. В общем случае в постпроцессоре истории нагружения все операции вызываются из соответствующей диалоговой панели (рисунок 9), которая появляется автоматически при входе в соответствующий раздел программы.

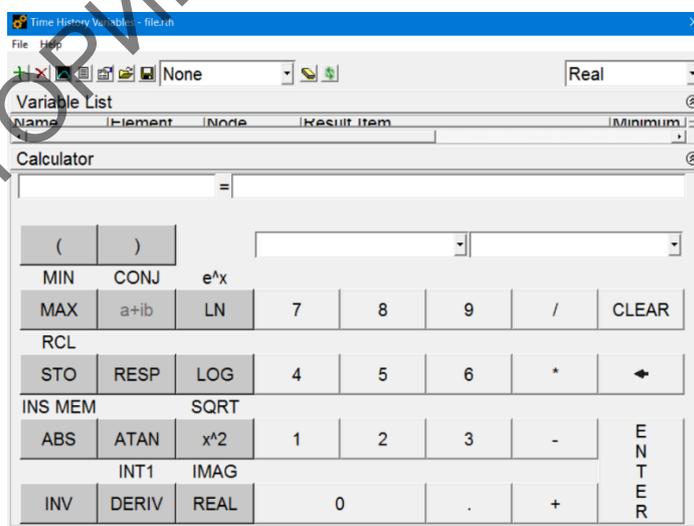


Рисунок 9 – Диалоговая панель для работы с переменными в постпроцессоре истории нагружения

Работа во временном постпроцессоре предполагает определение так называемых переменных (Variables), которые описывают поведение модели в конкретных ее точках в ходе всей истории нагружения, и дальнейшие операции с этими переменными.

Диалоговая панель для работы с переменными включает в себя панель инструментов, список переменных и калькулятор.

В состав панели инструментов входят следующие пиктограммы:

- Add Data – создание новой переменной;
- Delete Data – удаление ранее созданной переменной;
- Graph Data – изображение переменной на экране в виде графика;
- List Data – вывод списка значений переменной в текстовом виде;
- Data Properties – указание свойств переменных;
- Import Data – импорт значений переменной из внешнего файла;
- Export Data – экспорт значений переменной в массив или внешний файл;
- Overlay Data – замена данных;
- Clear Time-History Data – удаление всех переменных;
- Refresh Time-History Data – обновление списка переменных.

Список переменных (Variable List) содержит собственно имена переменных (определяются пользователем), а также номера узлов и элементов, на основе которых были получены данные переменные, тип переменной (перемещение, напряжение и т. п.), минимальное и максимальное значения переменной и признак использования переменной в качестве оси абсцисс при построении графика.

Калькулятор (Calculator) содержит кнопки, позволяющие выполнять различные операции для создания новых переменных на основе существующих. Например, после определения переменной для перемещения при анализе переходного динамического процесса можно вычислить скорость или ускорения путем применения операции дифференцирования по времени.

Для получения новой переменной на базе имеющихся необходимо в верхнем поле калькулятора присвоить ей уникальное имя и в соседнем поле (после знака равенства) ввести соответствующее выражение, используя кнопки калькулятора. При этом выбор существующих переменных осуществляется из второго списка. Ввод новой переменной завершается нажатием кнопки **ENTER**.

3 АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В КОМПЛЕКСЕ ANSYS MECHANICAL APDL

Начиная работать с комплексом, пользователи обычно имеют дело с интерактивным режимом – вся работа ведется через меню. Такой вариант работы позволяет получить доступ к большинству функций и для большинства задач является достаточным. Однако некоторые операции и целые расчеты проще проводить, используя встроенный командный язык. APDL – это аббревиатура для ANSYS Parametric Design Language. APDL – язык программирования, позволяющий создавать параметрические модели и автоматизировать рутинные операции.

Используя APDL, можно:

- вводить размеры, свойства и т. д., с помощью параметров, а не чисел;
- получать информацию из базы модели;
- производить математические операции над параметрами;
- создавать макросы с набором команд;
- создавать параметрические модели.

Большинство операций, которые пользователь выполняет при работе с программой, могут быть заменены командами. Есть два простейших способа знакомства с языком.

Во-первых, при нажатии кнопки **Help** в любом диалоговом окне выводится помощь по данной операции, включая описание соответствующей команды.

Второй способ состоит в том, что во время работы пользователя все команды заносятся в log-файл. Это текстовый файл, который можно посмотреть в любом текстовом редакторе.

По мере работы с программой пользователь может изучать команды, которые он чаще использует. Команды можно передать в программу двумя способами.

Первый подходит для ввода единичных команд – они вводятся в командную строку. Второй – это использование batch-файла. Batch-файл – это командный файл, выполняющийся в пакетном режиме. Этот файл может быть получен на основе log-файла. Чтобы использовать batch-файл, нужно вызвать меню Utility Menu => File => Read Input и указать имя файла, который следует считывать ANSYS для получения входных команд и их параметров. Кроме batch-файла возможна реализация автоматизации моделирования с использованием мас-файла. Мас-файл – это файл с наборами команд и макрокоманд APDL. При за-

пуске макроса используется механизм передачи параметров, позволяющий передать аргументы внутрь макропрограммы. Мас-файл, как и batch-файл, можно создать в любом текстовом редакторе. Для вызова макрофайла необходимо вызвать меню Utility Menu => Macro => Execute Macro, указать имя макро-файла и его входные параметры.

3.1 Команды комплекса

Команды комплекса имеют заранее определенный формат. В общем случае команда состоит из имени команды, стоящего первым в строке, и нескольких полей, содержащих аргументы команды. Например, команда F, прикладывающая сосредоточенную силу к узлу, имеет следующий вид: F,NODE,Lab,VALUE

Для приложения к узлу с номером 376 силы в направлении оси X со значением 2 000 команда F имеет следующий вид: F, 376,FX,2000

Имя команды может быть сокращено до первых четырех символов. Например, **FINISH**, **FINIS** и **FINI** вызывают одни и те же действия.

Аргументы команды могут являться числами или алфавитно-цифровыми метками в зависимости от цели их применения. В примере использования команды F, показанном выше, NODE и VALUE являются числами, а аргумент Lab является алфавитно-цифровой меткой.

Ряд команд (например, /**PREP7**, /**POST1**, **FINISH** и т. д.) аргументов не имеют, в результате чего полная команда состоит только из названия самой команды.

Для написания программы в комплексе используются следующие правила:

- в каждой строке должна быть одна команда;
- максимальное число знаков в одной строке может достигать 640;
- при вызове команды ее аргументы должны располагаться в соответствующих полях. Для пропуска аргументов можно использовать последовательно идущие запятые. В этом случае комплекс ANSYS использует для пропущенных значений значения, применяемые по умолчанию (как указано в описании отдельных команд);
- значения действительных чисел должны находиться в пределах от $\pm 10^{-60}$ до $\pm 10^{60}$. Абсолютное значение целых чисел должно находиться между 0 и 99 999 999;
- комплекс интерпретирует числа, указанные при помощи аргументов Angle, как градусы. Следует обратить внимание, что в комплексе имеются функции, которые могут использовать радианы при использовании команды;

– следующие специальные символы не могут применяться в алфавитно-цифровых аргументах: «!», «@», «#», «\$», «%», «&», «^», «*», «()», «_», «←», «+», «=», «|», «\», «{ }», «[]», «“», «’», «/», «<», «>», «~»;

– в комплексе отсутствует типизация переменных, в связи с этим не требуется описание типов переменных. Все переменные, организуемые пользователем, воспринимаются как действительные;

– для задания действительных чисел используется десятичная точка. Для чисел в экспоненциальной форме можно применять формы записи с E и D. Например, число 25000 может быть записано в форме 25E3 или 25D3;

– комментарии в командной строке записываются, используя символ «!».

Для минимизации объема исходной информации большинство команд имеют значения, применяемые по умолчанию. Существует два типа значений по умолчанию: действие команды по умолчанию и значение аргумента, используемое по умолчанию.

Действие команды по умолчанию – указание действий в случае, если команда не вызывалась. Например, если команда **/FILENAME** не вызывалась, именем файла (jobname) по умолчанию является **FILE**.

Значение аргумента, используемое по умолчанию, – значение, принимаемое для неуказанного аргумента команды. Например, если вызывается команда **N,10** (создание узла с номером 10 с координатами X, Y и Z, в качестве которых стоят пробелы), узел создается в начале системы координат; в этом случае координаты X, Y и Z по умолчанию равны нулю. В описании команд значения аргументов, действующих по умолчанию, обычно оговариваются.

3.2 Структура командного файла

Структура простейшего командного файла будет следующей:

/FILENAME, filename

/TITLE, titlename

/UNITS, units

Блок команд, определяющих переменные, которые используются в программе.

Блок команд, определяющих функции, которые используются в программе.

/PREP7

Блок команд, отвечающих за построение модели (определение типа элемента, определение опций элемента, определение констант элемен-

та, определение свойств материала, создание конечно-элементной модели. Приложение нагрузок).

FINISH

/SOLU

Блок команд, отвечающих за решение (определение типа анализа, спецификация решения, решение задачи).

FINISH

Далее идет постпроцессорная обработка. При этом в зависимости от представления результатов пользуемся одним из двух постпроцессоров.

/POST1

Блок команд общего постпроцессора.

FINISH

/POST26

Блок команд временного постпроцессора.

FINISH

3.3 Элементы программирования

Переменные и массивы в APDL. APDL содержит набор встроенных типов данных и операций, определенных над этими типами. Переменные в терминологии APDL называются *параметрами*. Тип параметра не нужно явно объявлять. Все числовые величины (независимо от их логического смысла – целые или вещественные) сохраняются как вещественные числа двойной точности.

Параметру можно дать любое имя (за некоторым исключением), но оно должно начинаться с буквы, состоять только из букв, цифр и символа подчеркивания и содержать не более 8 символов.

Другие правила и рекомендации по выбору имен параметров состоят в следующем.

Не следует использовать в качестве имен также обычно используемые программой идентификаторы, как:

- метки степеней свободы (TEMP, PRES и т. д.);
- метки, введенные для удобства (ALL, PICK, STAT и т. д.);
- метки, введенные пользователем при создании модели (например, заданные командой ETABLE);
- метки типов массивов (например, CHAR, ARRAY, TABLE и т. д.).

Имена от ARG1 до ARG9 и от AR10 до AR29 зарезервированы за локальными параметрами, которые используются при создании макросов. Использование этих имен не рекомендуется.

Имена параметров не должны совпадать с аббревиатурами, введенными командой ***ABBR**. Параметры, начинающиеся символом подчеркивания, используются графическим интерфейсом пользователя и собственными макросами комплекса. Не рекомендуется использовать такие имена.

Простейшим способом задания параметра является применение команды «=». Формат команды Имя = Значение, где Имя – присвоенное параметру имя, а Значение – числовое или символьное значение параметра. Символьное значение заключается в одинарные кавычки. Между этими кавычками может находиться до 8 буквенных символов. Примерами использования команды «=» являются следующие:

```
ABC=-24
QR=2.07E11
XORY=ABC
SPARM='CASE1'
```

Можно использовать команду ***SET**. Приведенные ниже примеры иллюстрируют ее использование:

```
*SET,ABC,-24
*SET,QR,2.07E11
*SET,XORY,ABC
*SET,SPARM,'CASE1'
```

Те параметры, значения которых не задаются, считаются «бесконечно малыми» и равными 2^{-100} . Например, если параметр А задается как А=В, а параметр В не задан, то параметру А присваивается «бесконечно малое» значение.

Для назначения параметрам значений, содержащихся в базе данных комплекса, используется команда ***GET**.

Команда ***GET** (Utility Menu => Parameters => Get Scalar Data) отыскивает значение элемента из базы данных (узел, элемент, поверхность, и т. д.) и хранит его как определенный пользователем параметр.

Параметры:

par – имя параметра для сохранения результата запроса на чтение свойства. Массив должен быть определен заранее;

entity – указывает тип свойств объекта, которые будут сохранены.

Можно применять следующие ключевые слова для этого параметра (основные):

- ACTIVE – текущий активный компонент;
- AREA – параметры и статистика поверхностей;
- CDSY – параметры и статистика по координатным системам проекта;

– CE – параметры и статистика по определенным в проекте нагрузкам;

– CP – параметры и статистика для парных элементов;

– EDCC – параметры и статистика для контактных объектов модели;

– ELEM – геометрические, физические, механические параметры для выбранного элемента;

– ETYP – номер набора свойств указанного элемента;

– LINE – параметры и статистика линий;

– MPLAB – данные элементов с указанной температурой;

– NODE – параметры и статистика узлов;

– PART – параметры и статистика частей;

– SCTN – геометрические параметры секций;

– SECP – статистика элементов секций;

– SHEL – параметры и статистика оболочек;

– TBFT – параметры и статистика для используемых в проекте наборов свойств материалов;

– VOLU – параметры и статистика для объемных примитивов;

entnum – указывает номер компонента или номер совокупности компонентов (совокупность формируется при использовании команд выбора ANSYS), о которых нужно получить данные;

item1 – имя конкретного элемента;

it1num – число (или метка) для определенного элемента (если определен) item1, для некоторых элементов item1 не требуется it1num;

item2, it2num – вторичный набор описателей элементов (требуется только для специфических команд).

Полный список значений Item1 см. в описании команды ***GET**.

После задания параметров (как задаваемых пользователем, так и используемых программой ANSYS) можно получить их перечень, используя команду ***STATUS**.

Удалить параметры можно: оставляется незаполненным место справа от символа команды «=», например, команда **QR=** удаляет ранее введенный параметр QR. Задание нулевого значения не равносильно удалению скалярного параметра.

Если есть необходимость использовать параметры в другом сеансе ANSYS, можно записать параметры в файл и затем считать (восстановить) этот файл. Для записи параметров в файл, используется команда **PARSAV** (Utility Menu => Parameters => Save Parameters).

Считать параметры из файла можно, используя команду **PARRES** (Utility Menu => Parameters => Restore Parameters).

Кроме обычных скалярных параметров в комплексе, используются параметры-массивы.

Массивы могут иметь разную размерность (1D, 2D, 3D, 4D, 5D). Размерности массивов можно трактовать следующим образом:

– 1D массивы – строковые массивы. A(5) – обращение к пятому элементу строки-массива;

– 2D массивы – массивы из строк и столбцов. A(2,5) – обращение к пятому элементу второй строки;

– 3D массивы – массивы из плоскостей, строк и столбцов. A(4,1,8) – обращение к четвертой плоскости, первой строке, восьмому столбцу;

– 4D массивы – массивы из книг, плоскостей, строк и столбцов. A(3,2,1,6) – обращение к третьей книге, второй плоскости, первой строке, шестому столбцу;

– 5D массивы – массивы из строк, столбцов, страниц, книг и полок. A(1,4,3,2,8) – обращение к первой полке, четвертой книге, третьей странице, второй строке, восьмому столбцу.

ANSYS предусматривает три типа массивов:

– ARRAY. Этот тип подобен массивам ФОРТРАНА. Как с массивами ФОРТРАНА, индексы для строк, столбцов, и плоскостей – это последовательные целые числа, начинающиеся с единицы. Элементы массива могут быть или целыми числами, или вещественными.

– CHAR. Это символьный массив с каждым элементом, состоящим из алфавитно-цифрового значения, не превышающего восемь символов. Индексы для строк, столбцов, и плоскостей – последовательные целые числа, начинающиеся с единицы.

– TABLE. Это специальный тип числового массива, который позволяет ANSYS вычислять значения между этими элементами массива, явно определенными в массиве. Кроме того, можно определить индексы массива для каждой строки, столбца и плоскости. Эти индексы – вещественные числа.

Чтобы задать массив, сначала следует объявить его тип и размер, используя команду ***DIM** (Utility Menu => Parameters => Array Parameters => Define/Edit).

Следующие примеры иллюстрируют применение команды ***DIM**, используемые для определения размерности различных типов массивов:

*DIM,XYZ,ARRAY,12	! тип ARRAY, размерность 12[x1x1]
*DIM,FORCE,TABLE,5	! тип TABLE, размерность 5[x1x1]
*DIM,CPARR1,CHAR,5	! тип CHAR, размерность 5[x1x1]

Для задания массивов используется команда «= \Rightarrow ». Команда «= \Rightarrow » действует аналогично такой же команде для скалярных параметров за исключением того, что теперь задается колонка данных (до десяти величин на каждый символ «= \Rightarrow »).

Например, чтобы задать параметр XYZ размера 12x1, потребуется две команды «= \Rightarrow »:

*XYZ(1)=59.5,42.494,-9.01,-8.98,-8.98,9.01,-30.6,51

*XYZ(9)=-51.9,14.88,10.8,-10.8

Команда ***VEDIT** (Utility Menu \Rightarrow Parameters \Rightarrow Array Parameters \Rightarrow \Rightarrow Define/Edit), доступная только в интерактивном режиме, запускает диалоговое окно ввода данных, которое можно использовать, чтобы редактировать массивы типа ARRAY или TABLE.

Чтобы прочитать массив из файла, используются команда:

***VREAD** (Utility Menu \Rightarrow Parameters \Rightarrow Array Parameters \Rightarrow Read from File).

Как и со скалярными параметрами, есть возможность применения команды ***STATUS** для получения листинга массивов.

Чтобы удалить параметр-массив (числовой или символьный), достаточно оставить пустой правую сторону команды «= \Rightarrow ». Так, например, команда **XYZ(1)=** удаляет параметр-массив XYZ.

Повторение, ветвление и выполнение циклов в APDL. По умолчанию команды комплекса выполняются последовательно, независимо от того, вводятся ли они с помощью клавиатуры или из файла. Средства повторения, ветвления и выполнения цикла, которыми располагает язык APDL, позволяют изменить последовательный порядок исполнения команд:

- повторение предыдущей команды несколько раз;
- ветвление – выход из блока команд и переход к другому при выполнении определенных условий;
- выполнение циклов – организация циклического повторения последовательности команд несколько раз.

Эти средства можно использовать в любом месте программы ANSYS, но особенно они полезны в макрокомандах.

Команда ***REPEAT** используется для повторного исполнения команды при изменении значения любого поля этой команды на постоянную величину.

Например, командами

N,1,0,0,0,,,

*repeat,10,1,1,1,0

генерируется 10 узлов (рисунок 10).

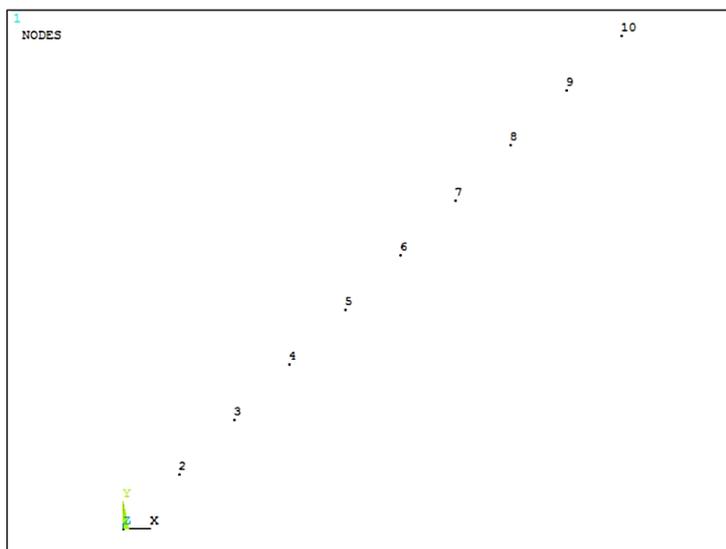


Рисунок 10 – Результат применения команды ***REPEAT**

Ветвление можно реализовать с помощью конструкции условного перехода if-then-else, используя для этого команды ***IF**, ***ELSE**, ***ELSEIF** и ***ENDIF**.

Команда ***IF** имеет следующий синтаксис:

***IF**, VAL1, Oper, VAL2, Base,

где

- VAL1 – первое числовое значение (или числовой параметр) для сравнения;
- Oper – оператор сравнения;
- VAL2 – второе числовое значение (или числовой параметр) для сравнения;
- Base – действие, которое происходит, если условие выполняется.

APDL предлагает несколько операторов сравнения:

- EQ – равно (для VAL1 = VAL2);
- NE – не равно (для VAL1 ≠ VAL2);
- LT – меньше чем (для VAL1 < VAL2);
- GT – больше чем (для VAL1 > VAL2);
- LE – меньше чем или равный (для VAL1 ≤ VAL2);
- GE – больше чем или равный (для VAL1 ≥ VAL2).

При присвоении аргументу Base значение THEN, команда ***IF** становится началом конструкции «если-тогда-иначе».

Конструкция состоит из команды ***IF**, сопровождаемой одной или более дополнительными командами ***ELSEIF**, дополнительной командой ***ELSE** и командой ***ENDIF**, отмечающей конец конструкции.

Следующий пример демонстрирует более сложную структуру, представленную на рисунке 11.

*IF,A,EQ,1,THEN

! Блок 1

*ELSEIF,A,EQ,0

! Блок 2

*ELSEIF,A,EQ,-1

! Блок 3

*ELSE

! Блок 4

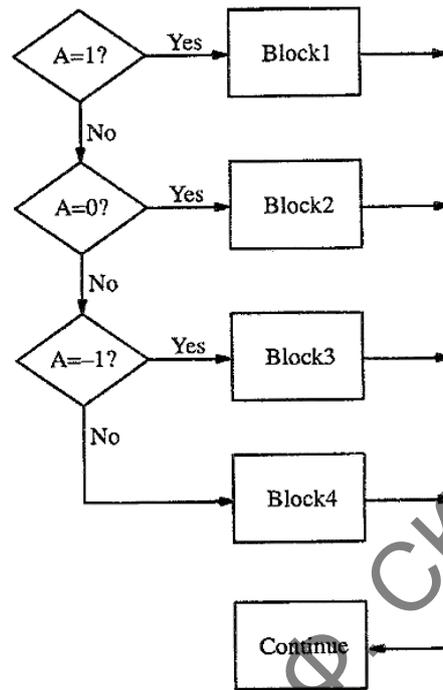


Рисунок 11 – Блок-схема

Обратите внимание, что может быть выполнен только один блок. Если ни одно из условий не имеет значение «истина», то выполняется блок после команды ***ELSE**.

Команда ***DO,par,ival,fval,inc** организует цикл, указывает начало тела цикла.

Параметры:

par – имя скалярного параметра, который используется как счетчик итераций цикла. Нельзя использовать строковые параметры;

ival – начальное значение счетчика;

fval – конечное значение счетчика;

inc – шаг счетчика (по умолчанию единица).

Для всех параметров допускается использовать отрицательные числа. Можно использовать нецелочисленные параметры.

Если $ival > fval$, выполнение цикла прекращается (если указанное имеет место при первом входе в цикл, тело цикла не выполнится ни разу).

Команда ***DO** может быть использована в любом процессоре.

Команда ***ENDDO** указывает на завершение тела цикла. Эта команда парная команде ***DO**. Все команды, расположенные между ***DO–*ENDDO**, образуют тело цикла. Команда ***ENDDO** может быть использована в любом процессоре.

Пример использования блока ***DO – *ENDDO** с применением команды ***IF**:

C1=1 !начальное значение C1

C2=3 !начальное значение C3

!цикл от 1 до 10 с шагом 1, начало тела цикла

***DO,i,1,3,**

C1=C1+1!увеличить C2 на единицу

!если C1 > C2 увеличить C2 на единицу

***IF,C1,GT,C2, THEN**

C2=C2+1!увеличить C2 на 1

***ENDIF**

***ENDDO** !окончание тела цикла

ЛИТЕРАТУРА

1 Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера : практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Шамраева. – М. : Едиториал УРСС, 2021. – 272 с.

2 Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров : справочное пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М. : Машиностроение: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.

3 Басов, К. А. ANSYS в примерах и задачах / К. А. Басов ; под общ. ред. Д. Г. Красковского. – М. : КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.

4 Конюхов, А. В. Основы анализа конструкций в ANSYS / А. В. Конюхов. – Казань : Казанский государственный университет, 2001. – 142 с.

5 Басов, К. А. ANSYS : справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

6 Басов, К. А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2006. – 248 с.

7 Alawadhi, E. M. Finite element simulations using ANSYS / E. M. Alawadhi. – CRC Press, 2009. – 418 p.

8 Moaveni, S. Finite element analysis theory and application with ANSYS, 3/e / S. Moaveni. – Pearson Education India, 2011. – 527 p.

9 Madenci, E. The finite element method and applications in engineering using ANSYS® / E. Madenci, I. Guven. – Springer, 2015. – 663 p.

10 Thompson, M. K. ANSYS mechanical APDL for finite element analysis / M. K. Thompson, J. M. Thompson. – Butterworth-Heinemann, 2017. – 436 p.

11 Stolarski, Tadeusz. Engineering analysis with ANSYS software / Tadeusz Stolarski, Yuji Nakasone, Shigeoka Yoshimoto. – Butterworth-Heinemann, 2018. – 509 p.

12 Компьютерное конечно-элементное моделирование: пособие для студентов специальности 1-40 05 01 «Информационные системы и технологии (по направлениям)» направления специальности 1-40 05 01-01 «Информационные системы и технологии (в проектировании и производстве)»: в 2 ч. / В. В. Напрасников [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – Ч. 1. – 83 с.

13 Автоматизированное моделирование и расчет конструкций в ANSYS: одномерные модели : учебное пособие / О. А. Саченков [и др.]. – Казань : Казан. ун-т, 2019. – 140 с.

14 Жидков, А. В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике» / А. В. Жидков. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2006. – 115 с.

15 Скворцов, Ю. В. Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твердого тела [Электронный ресурс]: интерактивное мультимедийное пособие / Ю. В. Скворцов, С. В. Глушков. – Режим доступа: <http://repo.ssau.ru/bitstream/Uchebnye-izdaniya/Ispolzovanie-MKEpaketa-ANSYS-dlya-resheniya-zadach-mehaniki-deformiruемого-tverdogo-tela-Elektronnyi-resurs-interaktiv-multimed-posobie-72697/1/Скворцов Ю.В. Использование МКЭ-пакета.pdf>. – Дата доступа : 13.09.2023.

16 Шимановский, А. О. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики : учебно.-методическое пособие для студентов технических специальностей / А. О. Шимановский, А. В. Путятю. – Гомель : БелГУТ, 2008. – 61 с.

17 Наседкин, А. В. Конечно-элементное моделирование на основе ANSYS. Программы решения статических задач сопротивления материалов с вариантами индивидуальных заданий / А. В. Наседкин. – Ростов-на-Дону: УПЛ РГУ, 1998. – 44 с.

18 Денисов, М. А. Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование : учебное пособие / М. А. Денисов. – Екатеринбург : УрФУ, 2011. – 149 с.

19 Елисеев, К. В. Вычислительный практикум в современных CAE-системах : учебное пособие / К. В. Елисеев, Т. В. Зиновьева. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 112 с.

20 Маслов, Л. Б. Практикум по курсу вычислительной механики на базе современных программных средств численного анализа (ANSYS) : учебно-методическое пособие / Л. Б. Маслов, Н. А. Сабанеев. – Иваново : ИГЭУ, 2009. – 76с.

21 Работа в САЕ-пакете ANSYS MECHANICAL: конструкционный анализ методом конечных элементов : метод. указания / сост. : А. О. Шкловец, В. С. Мелентьев. – Самара : Изд-во Самарского университета, 2017. – 73 с. : ил.

22 Каменский, А. В. Практическое применение конечно-элементного пакета ANSYS к задачам биомеханики кровеносных сосудов : учебно-методическое пособие для студентов естественных дисциплин / А. В. Каменский, Ю. В. Сальковский. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2005. – 105 с.

23 САПР средств оптимизации : методические рекомендации к лабораторным работам для студентов направления подготовки 23 04 02 «Наземные транспортно-технологические комплексы» дневной и заочной форм обучения / Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Кафедра «Транспортные и технологические машины»; [составитель О. В. Леоненко]. – Могилев : Белорусско-Российский университет, 2019. – 42 с.

24 Солдусова, Е. А. Основные сведения о программном комплексе ANSYS. Геометрическое моделирование : учебно-методическое пособие / Е. А. Солдусова. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 54 с.

25 Введение в технологии компьютерного моделирования : практическое пособие / сост. : Ю. В. Никитюк, А. А. Середа, С. В. Шалушаев. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2019. – 44 с.

26 Шаманин, А. Ю. Методические указания к практическим работам по дисциплине «Прочность корабля». Расчеты конструкций методом конечных элементов в ANSYS / А. Ю. Шаманин. – М. : МГАВТ, 2012. – 77 с.

Производственно-практическое издание

Никитюк Юрий Валерьевич,
Середа Андрей Александрович,
Коваленко Дмитрий Леонидович,
Руденков Александр Сергеевич

**ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.
ANSYS MECHANICAL APDL**

Практическое руководство

Редактор А. А. Банчук
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 23.10.2023. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,8. Уч.-изд. л. 3,1.
Тираж 15 экз. Заказ 547.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.

Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.