

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
**Тольяттинский государственный университет**  
**Кафедра «Автомобили и тракторы»**

**В.Е. Крутолапов**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MSC.PATRAN  
В ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЁТАХ**

**Учебное пособие**

Тольятти 2008

УДК 004.428.2(075.8)

ББК 34.42:32.81

К846

Рецензент:

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобили и тракторы»  
Тольяттинского государственного университета *Л.А. Черепанов.*

**К846** Крутолапов, В.Е. Использование программного пакета MSC.PATRAN в инженерных расчётах : учеб. пособие / В.Е. Крутолапов. – Тольятти : ТГУ, 2008. – 116 с.

В учебном пособии приведены необходимые сведения о работе пре- и постпроцессора MSC.Patran для анализа напряженно-деформированного состояния механической конструкции с использованием MSC.Nastran. Обобщены минимальные необходимые данные о выборе типа конечного элемента, его базового размера, проверки качества конечно-элементной модели, о задании граничных условий и нагрузок.

При подготовке издания использован материал фирменного руководства на английском языке «MSC.Patran 2001.User's Guide for Windows».

Для студентов специальности 190201 «Автомобиле- и тракторостроение».

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© Тольяттинский государственный университет, 2008

© В.Е. Крутолапов, 2008

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время принято считать, что система автоматизированного проектирования машиностроительной продукции (САПР) состоит из ряда составных систем, которые предназначены: для проектирования конструкций САД-системы (Computers-Aided Design); инженерных расчетов САЕ-системы (Computer-Aided Engineering); проектирования и моделирования технологических процессов обработки материалов САМ-системы (Computers-Aided Manufacturing); системы управления процессом разработки проектов-PDM (Product Data Management).

MSC.Patran – это программный продукт, относящийся к САЕ-системам, которые позволяют использовать компьютер для конструирования модели объекта, затем моделировать поведение объекта в условиях действия комплекса нагрузок при заданных граничных условиях, которые отражают условия работы объекта в сложной конструкции.

Обычно САЕ-системы применяют для оптимизации конструкции с целью улучшения характеристики, снижения цены, выявления недостатков конструкции, оценки возможности работы конструкции в сборе с другими деталями. Одно из преимуществ компьютерного проектирования и моделирования заключается в том, что оно позволяет выполнить конструкцию от замысла до «реального» воплощения на компьютере, не создавая прототипы в металле. Это позволяет совершенствовать конструкцию, сокращать время проектирования, снижать цену изделия.

САЕ-процесс начинается с моделирования изделия на компьютере, во многих случаях это изделие уже создано с помощью какой-либо САД-системы. САЕ- и САД-процессы тесно связаны, в САЕ-процессах происходит проверка расчетом характеристик изделия, и затем изделие возвращается на доработку или переработку. После доработки происходит возврат изделия в САЕ-систему, в которой происходит очередная проверка. Таким образом, осуществляется необходимая взаимосвязь между этими системами.

В среде MSC.Patran можно выполнять все указанные действия, использовать ее с другими САД-программами, моделирующими пакетами, или использовать в ней базу данных – объектный код, созданный какой-либо другой САЕ-системой, например ANSYS.

# 1. ОСНОВЫ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Появление и развитие метода конечных элементов связано с развитием вычислительной техники. Теория МКЭ была разработана в начале 60-х годов прошлого века. К концу 60-х и началу 70-х годов достаточно большое количество ученых и программистов работало над разработкой прикладных программ, использующих МКЭ.

Метод конечных элементов (МКЭ) применяется для различных задач механики деформируемого твердого тела, гидро- и газодинамики, электромагнетизма и др. В данном курсе рассматривается МКЭ применительно к решению задач прочности и динамики механических конструкций. Одной из основных задач в данной области является задача определения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций (или более строго – твердого тела) при заданных условиях термомеханического нагружения. Сосредоточим внимание на выводе соотношений и положений МКЭ для решения этой задачи, хотя полученные ниже соотношения МКЭ являются универсальными и с небольшими изменениями могут быть применимы в других областях науки и техники. Конечной задачей определения НДС механической конструкции является определение в каждой точке конструкции напряжений, деформаций и перемещений, возникающих в ней в результате воздействий на конструкцию механических, газо- и гидродинамических, тепловых и других нагрузок в процессе ее реальной работы в составе транспортного средства. При решении задач статической прочности максимальные напряжения являются основой для вычисления запасов прочности и оценки прочности конструкции. При решении задач динамики – напряжения, деформации, перемещения являются функцией времени и здесь проводят исследования вибрационных характеристик конструкций (вычисляют частоты, амплитуды колебаний, амплитудные значения напряжений, деформаций, исследуют резонансные явления).

Рассмотрим более подробно постановку задачи определения НДС деформируемого твердого тела.

Как уже указывалось, при решении задач определения НДС необходимо отыскать поля перемещений, деформаций и напряжений при заданной геометрии, свойствах материалов, нагрузок и граничных условий. Такая постановка задачи называется прямой, и как правило, именно прямая задача решается в практической деятельности в процессе проектирования ТС и других механических конструкций.

Возможна и обратная постановка задачи, когда по известным функциям перемещений, деформаций и напряжений находят нагрузки, воздействующие на конструкцию, которые удовлетворяют заданным функциям.

Как уже отмечалось, для решения задачи НДС методом перемещений необходимо, в первую очередь, определить во всех точках конструкции вектор перемещений, возникающих под действием нагрузок. Другими словами: определить поле перемещений. Так как число точек в теле бесконечно, то число неизвестных также бесконечно. Поэтому решение определяется в виде функций, выраженных через уравнения. Даже для элементарных геометрических тел, находящихся под воздействием простой системы сил (прямоугольная или круглая пластинка, нагруженная сосредоточенной в центре силой или равномерной нагрузкой, цилиндрическая оболочка под действием двух сосредоточенных сил и т.п.), вывод уравнений для определения поля перемещений – это очень сложная задача. И практически невозможно вывести аналитические зависимости для реальных сложных пространственных конструкций.

Метод конечных элементов, по существу, сводится к аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью подобластей (или элементов), имеющих конечное число степеней свободы. Назовем основные этапы при решении задачи с помощью МКЭ.

Главная идея МКЭ заключается в том, что:

1) любая сложная пространственная конструкция может быть разбита воображаемыми поверхностными линиями на элементарной формы объемы (конечные элементы), для которых можно вычислить их жесткостные характеристики на основе их элементарной геометрии и известных свойств материалов;

2) на элементах фиксируется конечное число узлов и считается, что конечные элементы соединяются между собой в этих узлах. Нумеруются узлы и элементы. Эта операция часто называется генерацией конечно-элементной сетки;

3) значения перемещений рассматриваются как неизвестные только в этих узлах. Таким образом, число неизвестных от бесконечности сводится к какому-то определенному числу. Для элементов устанавливаются наперед заданные законы аппроксимации в виде полиномов (линейные, квадратичные и т. д.). После определения перемещений в узлах в пределах любого элемента перемещение может быть определено путем аппроксимации с помощью заданного полинома;

4) на основе элементарной геометрической формы конечных элементов и физических свойств материалов вычисляются матрицы жесткости элементов, и все действующие нагрузки приводятся к узловым;

5) из матриц элементов строятся расширенные матрицы, а затем формируются глобальные матрицы жесткости и сил путем суммирования расширенных матриц элементов. Далее задаются граничные условия;

6) решается система  $[K]\{\delta\} = \{R\}$ , из которой находится вектор перемещений в узлах, где  $[K]$  – матрица жесткости;  $\{\delta\}$  – вектор-столбец перемещений;  $\{R\}$  – вектор внешних сил;

7) по принятым законам аппроксимации определяются перемещения внутри элементов (в интересующих точках);

8) из перемещений, на основе геометрических уравнений, определяются деформации в каждом элементе;

9) из деформаций в каждом элементе, на основе физических уравнений, определяются напряжения.

### 1.1. Напряженно-деформированное состояние плоского треугольного элемента

Рассмотрим плоское напряженное состояние (рис. 1).

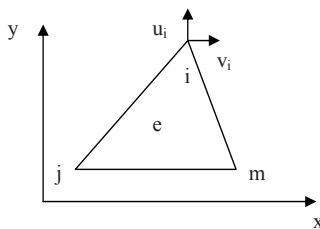


Рис. 1. Общий вид плоского треугольного элемента

Типичный конечный элемент представлен узловыми точками  $i, j, m$ .

Пусть перемещения любой точки внутри элемента задаются вектор-столбцом.

$$\{f\} = [N]\{\delta\}^e = [N_i, N_j, N_m, \dots] \left\{ \begin{array}{c} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_m \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \right\}, \quad [1]$$

где компоненты  $[N]$  являются в общем случае функциями положения, а  $\{\delta\}^e$  представляет собой перемещения узловых точек рассматриваемого элемента. В случае плоского напряженного состояния вектор-столбец

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

содержит горизонтальные и вертикальные перемещения типичной точки внутри элемента, а столбец

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

содержит соответствующие перемещения узла  $i$ .

Функции  $N_i, N_j, N_m$  должны быть выбраны таким образом, чтобы при подстановке координат узлов получались соответствующие узловые перемещения. Очевидно, что в общем случае  $N_i(x_i, y_i) = 1$  (единичная матрица), тогда как  $N_i(x_j, y_j) = N_i(x_m, y_m) = 0$  и так далее, что, в частности, достигается соответствующим выбором линейных относительно  $x$  и  $y$  функций. Функции  $[N]$  называются функциями формы.

Если известны перемещения во всех точках элемента, то в них также можно определить и деформации. Они находятся с помощью соотношения, которое в матричной форме может быть записано:  $\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}$ , где  $[B]$  – матрица связи деформаций и перемещений.

В случае плоского напряженного состояния представляют интерес деформации в плоскости, которые определяются через перемещения:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix}.$$

Матрица  $[B]$  легко может быть получена из соотношения [1].

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

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}),$$

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \varepsilon_x - (\varepsilon_x)_0 &= \frac{1}{E} \sigma_x - \frac{\nu}{E} \sigma_y; \\ \varepsilon_y - (\varepsilon_y)_0 &= -\frac{\nu}{E} \sigma_x + \frac{1}{E} \sigma_y; \\ \gamma_{xy} - (\gamma_{xy})_0 &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}, \end{aligned}$$

отсюда

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

## 1.2. Матрица жесткости конечного элемента

Узловые силы для плоского напряженного состояния записываются в виде

$$\{F_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}.$$

Простейший способ сделать узловые силы статическими, эквивалентными действующим граничным напряжениям состоит в задании произвольного (виртуального) узлового перемещения и приравнивании внешней и внутренней работ, совершаемых различными силами и напряжениями на этом перемещении. Пусть  $d\{\varepsilon\}e$  – виртуальное перемещение



в узле. С помощью соотношений для перемещений и деформаций получим соответственно перемещения и деформации элемента в виде

$$d\{f\} = [N]d\{\delta\}^e \text{ и } d\{\varepsilon\} = [B]d\{\delta\}^e.$$

Работа, совершаемая узловыми силами, равна сумме произведений компонент каждой силы на соответствующее перемещение:

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

Аналогично внутренняя работа напряжений равна:

$$d\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} \text{ или } (d\{\delta\}^e)^T ([B]^T \{\sigma\}).$$

Приравнявая работу внешних сил внутренней, получаемой интегрированием по объему элемента, имеем:

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

Так как это соотношение справедливо для любого виртуального перемещения, коэффициенты в правой и левой частях должны быть равны. После подстановки выражений для деформаций и напряжений получаем:

$$\{F\}^e = \left( \int [B]^T [D][B] dV \right) \{\delta\}^e.$$

Эта зависимость является одной из основных характеристик любого элемента. Матрица жесткости принимает вид

$$[K]^e = \int [B]^T [D][B] dV.$$

Принцип виртуальных перемещений обеспечивает выполнение условий равновесия в определенном состоянии, зависящем от выбранной формы перемещений. Если количество параметров  $\{\delta\}$ , описывающих перемещения неограниченно возрастает, то условия равновесия могут быть удовлетворены.

Принцип виртуальной работы может быть сформулирован в различной форме.

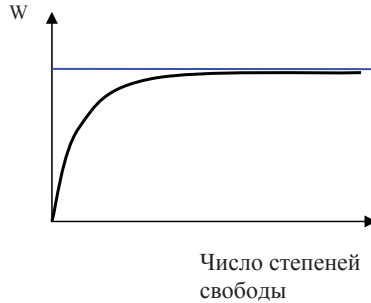
$$\int d\{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV - d\{\delta\}^T [R] = 0.$$

Первый член в этом уравнении соответствует вариации энергии деформации  $U$  конструкции, а второй – вариации потенциальной энергии  $W$  внешней нагрузки. Тогда имеем:

$$d(U + W) = d(\chi) = 0,$$

где  $\chi$  – полная потенциальная энергия. Это означает, что для обеспечения равновесия полная потенциальная энергия должна принимать

стационарное значение. Таким образом, при использовании метода конечных элементов отыскивается минимум полной потенциальной энергии возможных перемещений заданной формы. Чем больше степеней свободы имеет система, тем точнее будет приближенное решение, которое в пределе стремится к точному – или соответствующему точному.



**Рис. 2.** Зависимость точности вычислений от числа степеней свободы

### 1.3. Динамические задачи

Во всех задачах, рассмотренных до сих пор, предполагалось, что параметры не изменяются во времени. Область практических задач, в которых должна быть учтена зависимость от времени, достаточна обширна. Дифференциальное уравнение системы можно записать в матричной форме:

$$[K]\{\delta\} + [C]\frac{\partial}{\partial t}\{\delta\} + [M]\frac{\partial^2}{\partial t^2}\{\delta\} + \{F\} = 0,$$

где  $[K]$  – матрица жесткости;

$[C]$  – матрица демпфирования;

$[M]$  – матрица масс.

*Уравнение собственных форм колебаний*

Если матрица  $[C]$  равна нулю и если внешних возмущений нет, то уравнение принимает вид

$$[K]\{\delta\} + [M]\frac{\partial^2}{\partial t^2}\{\delta\} = 0.$$

Это уравнение имеет вещественное периодическое решение  $\{\delta\} = \{\delta_0\} \cos \omega t$ ; если выполняется условие  $([K] - \omega^2 [M])\{\delta_0\} = 0$ . Последнее равенство возможно только при некоторых значениях  $\omega$ , при которых определитель, заключенный в скобки матрицы, обращается

в нуль. Поскольку этот определитель имеет порядок  $n$  (при размерности  $n \times n$ ), в общем случае существует  $n$  вещественных корней  $\omega^2$ . Они определяют собственные угловые частоты системы, а задача их нахождения представляет собой типичную задачу о собственных значениях.

$$\det[K] - \omega^2[M] = 0.$$

Каждая частота, при которой выполняется данное условие, определяет вектор  $\{\delta_0\}_n$ , величина компонент которого произвольна, а их отношения принимают заданные значения. Такие векторы называют модами системы.

#### **1.4. Процедура решения инженерных задач с использованием метода конечных элементов**

##### **1. Постановка задачи.**

Постановка задачи включает в себя основные допущения, которые делает инженер в процессе идеализации реального объекта, создание эквивалентной расчетной схемы а также сбор необходимой исходной информации:

- 1) данные по материалам;
- 2) геометрические характеристики сечений и размеров;
- 3) сведения по нагрузкам и закреплениям.

##### **2. Разработка конечно-элементной модели.**

Разработка конечно-элементной модели включает в себя следующие этапы:

- 1) создание сетки конечных элементов;
- 2) задание физических параметров материалов, необходимых для расчета;
- 3) задание физических характеристик элементов;
- 4) создание граничных условий расчета (нагрузки и закрепления).

##### **3. Расчет с использованием какого-либо расчетного пакета (Nastran, Marc, LS-Dyna и т.п.).**

##### **4. Анализ результатов расчета.**

##### **5. Модификация модели по результатам расчета (если есть необходимость).**

Разработка КЭМ, анализ результатов и модификация модели обычно производятся с использованием программных пакетов, называемых «пре- и постпроцессорами». Основная задача таких программ – дать

удобный набор инструментов для работы инженера-расчетчика. Это такие программы, как MSC.Patran, Hypermesh, Mentat. Большинство подобных программ работает с геометрией, полученной из других CAD-систем. В процессе работы геометрические объекты (кривые, поверхности, твердые тела) импортируются, упрощаются если это необходимо. Затем производится генерация конечно-элементной сетки в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Возможно создание сетки и в «ручном режиме», когда пользователь последовательно создает узлы, а затем элементы на заданных узлах. Генерация сетки до сих пор остается наиболее трудоемким процессом из всей процедуры расчета. Для разных моделей она может занимать от 80 до 99% всего времени анализа конструкции с помощью метода конечных элементов. Например, разработка КЭМ каркаса кузова легкового автомобиля составляет около 4 человеко-месяцев. Расчет на ЭВМ одного расчетного случая занимает порядка нескольких часов. Для моделей меньшего масштаба соотношение несколько меняется, но пропорции сохраняются. После создания сетки элементы проверяются на правильность геометрической формы: ясно, что некачественная сетка не может дать достаточно правильных результатов, поэтому существуют критерии для проверки качества элементов. Для плоских четырех- и треугольников это:

- соотношение сторон (не должно превышать 1:5);
- искривление в плоскости (углы при вершинах не должны быть меньше 45 и больше 135 градусов для четырехугольников и 30 и 150 – для треугольников);
- искривление из плоскости для четырехугольников (угол между нормальными двух смежных плоскостей, полученных разбиением четырехугольника по диагонали, не должен быть больше 15 градусов);
- количество треугольников не должно быть больше 10% по отношению к общей сумме плоских элементов.

Следующий шаг – проверка внешних и внутренних границ – необходим для избежания несвязанных или «оторванных» частей модели, что может привести к искажению результатов или невозможности проведения расчета (особенно в случае анализа линейной статики). Параметры материала задаются в зависимости от типа расчета, который будет проводиться. Для расчета в линейной постановке необходим модуль упругости и коэффициент Пуассона. Для динамических расчетов требуется также плотность и иногда коэффициент внутренних потерь. Характеристики элементов задаются в зависимости от типа элемента – толщина и материал для плоских элементов, параметры сечения и материал для балочных элементов. Граничные условия задаются в виде набора нагрузок и закреплений. После того как параметры модели определены, создается исходный файл для расчета, который, кроме

модели, содержит дополнительные параметры, указывающие программе, какой тип расчета будет использоваться, какие расчетные случаи будут использованы в процессе расчета, какой вид выходного файла должен быть получен и т. д. Расчетная программа может запускаться на выполнение как из оболочки препроцессора, так и из командной строки терминального режима. После нормального завершения расчета создается файл, содержащий результаты. Тип данных, необходимых для вывода, задается пользователем в исходном файле. Полученные данные используются постпроцессором для визуализации результатов расчета.

## 2. MSC.Nastran – РАСЧЕТНЫЙ ПАКЕТ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Компания MSC.Software специализируется на внедрении компьютерных технологий в инженерные работы с 1963 года. Разработка Nastran началась в 1966 году по заказу NASA США. Система предназначалась для структурного анализа изделий аэрокосмической промышленности. Программа конечно-элементного анализа конструкций MSC.Nastran – это программа общего назначения. Это значит, что MSC.Nastran применим при решении широкого спектра инженерных задач (например, статических задач, динамических процессов, нелинейного поведения конструкций, задач теплопроводности, а также оптимизации), если сравнивать со специальными программами, ориентированными на определенные типы анализа. Программы MSC.Nastran написаны на языке FORTRAN и содержат около миллиона строк. MSC.Nastran работает на разнообразных типах компьютеров с различными операционными системами, от небольших рабочих станций до суперкомпьютеров. Независимо от вычислительной платформы, MSC.Nastran оптимизирован так, чтобы расчеты проходили наиболее эффективно и результаты получались идентичными для всех систем. Выпущено много версий программы MSC.Nastran. Каждая последующая версия содержит значительные улучшения в возможностях анализа и в производительности при выполнении расчета. Помимо того, исправляются многие ошибки из предыдущей версии. Ни одна расчетная программа, при любой сложности, не гарантирована от присутствия ошибок – MacNeal-Schwendler Corporation ведет детальный и часто обновляемый список обнаруженных ошибок, включая предложения, как эти ошибки обойти.

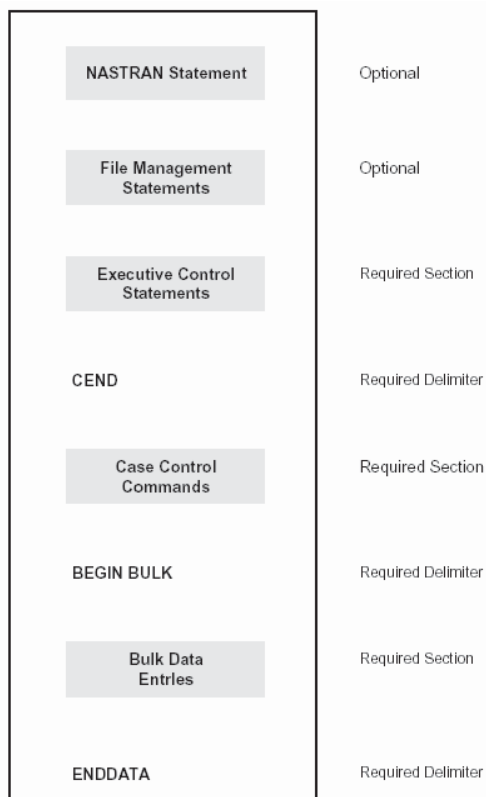
MSC.Nastran состоит из большого количества составляющих его блоков, называемых модулями. Модуль – это объединение написанных на языке FORTRAN подпрограмм, направленных на выполнение конкретных задач: обработку геометрии модели, построение матрицы, задание ограничений, операции с матрицами, вычисление выходных данных, печать решения и т. д. Управление модулями ведется на внутреннем языке, который называется Direct Matrix Abstraction Program (DMAP). Каждый тип анализа из списка MSC.Nastran называется последовательностью решения, и каждая последовательность решения является набором сотен или тысяч команд на языке DMAP. Когда выбрана определенная последовательность решения, то определенный порядок команд DMAP выдает инструкции модулям, необходимым для выполнения заказанного решения. Все это выполняется автоматически, не требуя никаких усилий, кроме выбора последовательности решения.

MSC.Nastran – пакет программ общего назначения для решения инженерных задач методом конечных элементов, который включает в себя:

- линейный статический анализ;
- статический анализ с учетом нелинейности материала и процесса деформирования;
- анализ нестационарных процессов с учетом физической и геометрической нелинейности;
- определение собственных частот и форм колебаний;
- линейный и нелинейный стационарный теплообмен.

## 2.1. Структура входного файла MSC.Nastran

Входной файл состоит из пяти секций (задание трех обязательно) и трех строчных разделителей. Структура входного файла показана ниже.



**Рис. 3.** Схема расположения секций и разделителей во входном файле MSC.Nastran

### 2.1.1. Nastran statement

Определяет параметры использования памяти при расчете.

Задание информации в секции установок (NASTRAN Statement) является необязательным, но, если используется, то всегда располагается в начале входного файла. Эта секция предназначена для того, чтобы изменять определенные параметры работы программы, называемые ячейками системы. К примеру, это могут быть детали организации памяти на обработку задачи, размер блоков данных, параметры формирования блоков данных, специфичные для машины установки, выбор численных методов и др. Секция установок используется в исключительных случаях, и в большинстве случаев нет необходимости в ее использовании.

### 2.1.2. File management section

Управление файлами, работа с базой данных, контроль рестартов.

Секция управления файлами (File Management Statements – FMS) также является необязательной. В первую очередь, она используется, чтобы задать формирование определенных файлов базы данных MSC/Nastran'a и FORTRAN'a, а также использовать файлы из других баз данных MSC/Nastran'a и FORTRAN'a.

Для большинства задач в MSC.Nastran задание информации в секции управления файлами не требуется, поскольку в начале каждой обработки задачи автоматически формируется соответствующая информация по умолчанию.

### 2.1.3. Executive control

Определяет тип решения, системную диагностику, изменяет алгоритм решения, включает пользовательские программы.

Вводимые в секцию управления выполнением задания (Executive Control Statements) данные называются заявками. В первую очередь, эта секция предназначена для задания типа выполняемого анализа – требуется для всех запусков. Также можно ввести идентификатор задания и параметр TIME, устанавливающий максимально разрешенное время на выполнение задания. В конце секции ставится разделитель **CEND**.

### 2.1.4. Case control

Определяет расчетные случаи, параметры и данные для вывода результатов расчета. Вводимые в секцию управления расчетными случаями (Case Control Commands) записи называются командами. Здесь заказывается тип и форма представления выходных данных: силовых факторов, напряжений, перемещений. Командами секции также:



- управляются последовательности данных в следующей секции – исходных данных;
- определяются расчетные случаи, если надо выполнить анализ для нескольких случаев нагружения;
- выбираются для каждого расчетного случая нагрузки и граничные условия из секции исходных данных.

Эта секция всегда следует за секцией управления выполнением задания.

### 2.1.5. Bulk data

Секция содержит основные данные модели: список узлов, элементов, нагрузки, крепления и материалы. Секция исходных данных (Bulk Data Entries) всегда следует за секцией управления расчетными случаями и начинается с разделителя **BEGIN BULK**. В этой секции содержится вся информация, необходимая для описания конечно-элементной модели: геометрия, системы координат, топология, свойства элементов, нагрузки, граничные условия, свойства материалов. В большинстве типов анализа именно эта секция определяет размер входного файла MSC.Nastran. Данные могут вводиться здесь в различной последовательности, но последним должен стоять разделитель **ENDDATA**.

Секции Nastran statement и File management section являются обязательными. Секция Executive control начинается с карты «SOL N», где N – указатель типа решения. Список наиболее используемых типов решений:

- 101 – линейная статика;
- 103 – собственные формы колебаний;
- 105 – анализ устойчивости;
- 106 – нелинейный статический анализ;
- 108 – прямой частотный отклик;
- 109 – прямой анализ переходных процессов во временной области;
- 111 – модальный частотный отклик;
- 112 – модальный анализ переходных процессов;
- 153 – анализ стационарного нелинейного теплообмена;
- 159 – нестационарный теплообмен;
- 200 – оптимизация конструкции.

## 2.2. Библиотека элементов MSC.Nastran

MSC.Nastran содержит обширную библиотеку конечных элементов, позволяющих моделировать разнообразное физическое поведение. В данном обзоре приводится описание конечных элементов, наиболее часто используемых в линейном статическом анализе. Эти

элементы и их имена показаны на следующем рисунке. Символ С в начале имени элемента означает «connection». Элементы подразделяются на структурные и кинематические. Структурные элементы: одномерные, двумерные, трехмерные, скалярные. Одномерные элементы: балка (СВАР, СВЕАМ), стержень (СРОД), пружина (СЕЛАС), демпферы (СВИСК, СДАМП). Двумерные элементы: четырехузловые (СКУАД4) и трехузловые (СТРИА3) элементы оболочки. Трехмерные элементы: СЧЕХА, СПЕНТА, СТЕТРА. Скалярные элементы: элементы массы СОНМ. Кинематические элементы обеспечивают связи внутри модели между узлами по определенному закону (MPC – multi point constraint) – RВАР, RВЕ2, RВЕ3.

- SPRING ELEMENTS (they behave like simple extensional or rotational springs)



- LINE ELEMENTS (they behave like rods, bars, or beams)



- SURFACE ELEMENTS (they behave like membranes or thin plates)



- SOLID ELEMENTS (they behave like bricks or thick plates)



- RIGID BAR (infinitely stiff without causing numerical difficulties in the mathematical model)



### 2.3. Нагрузки и закрепления MSC.Nastran

NASTRAN дает возможность моделировать много типов нагрузок из различных инженерных дисциплин: статические нагрузки, переменные по времени, температурные нагрузки, сейсмические:

- сосредоточенные силы и моменты– ;
- нагрузки, распределенные по длине балок;
- давление на поверхность;
- гравитационная нагрузка;

- нагрузки от заданного ускорения;
- заданные перемещения (натяги).

Силы и моменты, непосредственно приложенные к узлам: FORCE, MOMENT.

Давление и трение на поверхность: PLOAD.

Гравитация: GRAV.

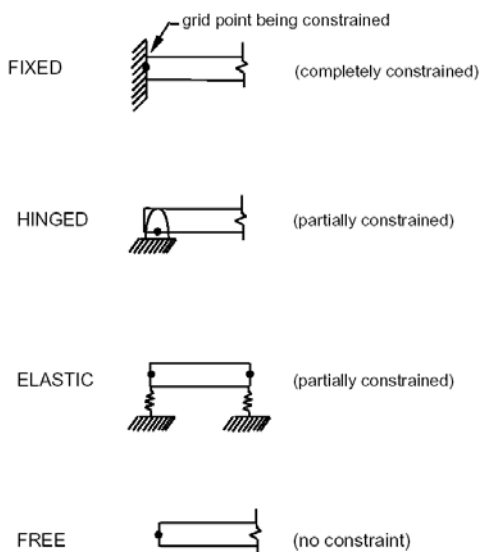
Центробежные силы: RFORCE.

Тепловое расширение: TEMP.

Принудительная деформация растяжения-сжатия для линейных элементов: DEFORM.

Принудительные перемещения в узлах: SPCD, SPC.

Ответом конструкции на приложенные нагрузки являются реакции в точках закрепления конструкции, где наложены ограничения перемещений по определенным степеням свободы. Примеры простых ограничений показаны ниже:



**Рис. 4.** Различные виды закреплений

Закрепления определяются картой SPC, SPC1. В большинстве случаев граничные условия моделируются в MSC.Nastran заданием для соответствующих степеней свободы нулевых перемещений.

Совокупность элементов, списка нагрузок и закреплений составляет расчетную модель.

### **3. MSC.Patran – ПРОГРАММНАЯ СРЕДА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА**

Современные САД-системы снабжаются встроенными расчетными модулями CAE, а CAE-системы пополняются САД-модулями. MSC.Patran является системой, которая позволяет управлять всеми фазами CAE-процесса в одном месте. Это программный продукт, который позволяет построить модель конструкции, моделировать внешние условия работы конструкции, управлять процессом конечно-элементного представления конструкции и ее анализом и интерпретировать полученные при расчете результаты.

В среде MSC.Patran можно выполнять все указанные действия, использовать ее с другими САД-программами, моделирующими пакетами или использовать в ней базу данных – объектный код, созданный какой-либо другой CAE-системой, например MSC.Nastran. Следует отметить пять ключевых особенностей системы MSC.Patran, заключенных в его уникальной структуре, связывающей эти особенности, придающей этому программному продукту большие возможности и универсальность. Прежде всего, интерфейс – это то, что мы видим на экране, когда работаем с системой MSC.Patran. Интерфейс включает меню и линейки инструментов для инструментария и приложений, форму для ввода данных, просмотра геометрических объектов, а также изображения статуса состояния операций. Интерфейс обеспечивает доступ ко всем функциям MSC.Patran.

Инструменты и приложения – это основа системы MSC.Patran. Инструменты позволяют выполнять различные работы в среде MSC.Patran (создавать геометрические объекты, задавать пакеты заданий для решения задач, компилировать результаты анализа, проверять ошибки и сигнализировать об этом). Модули приложения осуществляют большие специализированные задачи, часто вне системы MSC.Patran, помогая сопровождать конечноэлементный анализ и интерпретацию результатов. Важной особенностью инфраструктуры MSC.Patran является интегрированная база данных. Вся информация о модели и ее анализе сосредоточена в базе данных, и таким образом можно всегда сравнивать варианты, изменять их, добавлять и изучать конструктивные изменения объекта. MSC.Patran имеет открытую архитектуру. Это позволяет обмениваться данными с различными программными продуктами, включая САД-системы, конечно-элементные объектные коды других моделирующих программ, базы данных по характеристикам материалов. Базы данных и модели, созданные в одной программной системе, могут быть просто перенесены в MSC.Patran с минимальными затратами

по времени и без потерь данных при конвертировании кодов. MSC.Patran воспринимает модели объектов, созданных в таких мощных CAE-системах как Unigraphics, CATIA, CAD-системах среднего и малого уровня: SolidWorks, SolidEdge, КОМПАС, T-flex, ARIES и др.

### **3.1. Последовательность операций при выполнении расчета методом конечных элементов с использованием MSC.Patran**

Для того чтобы решить инженерную задачу, используя систему MSC.Patran, необходимо выполнить несколько базовых этапов. Каждый из этих этапов выполняется в соответствующих частях системы MSC.Patran.

1. *Создание геометрической модели объекта.* Этот этап включает в себя создание геометрических объектов (поверхности, солиды и т. п.), описывающих расчетную модель. MSC.Patran имеет инструментарий, который помогает пользователю создать модель объекта с его внешними условиями. Используя этот инструментарий, можно быстро создать двух- или трехмерную (2D или 3D) каркасную модель, поверхность или твердотельную модель объекта. С помощью CAD-интерфейса можно импортировать и затем редактировать геометрические модели объектов, созданных с помощью других программных продуктов.

2. *Создание сетки конечных элементов.* На этом этапе используются как автоматические, так и «ручные» методы генерации сетки. MSC.Patran имеет достаточно разнообразные средства для создания как оболочечных, так и твердотельных конечных элементов.

3. *Проверка качества сетки элементов.* Данный этап необходим для исключения ошибок в процессе расчета. В процессе проверки исправляются некачественные элементы, контролируются связи внутри модели.

4. *Создание базы данных по материалам.* MSC.Patran имеет возможность задавать различные типы материалов – линейные, нелинейные, гиперупругие и т. д.

5. *Задание свойств конечных элементов.* На этом этапе определяются физические свойства для определенных групп элементов, необходимые для проведения расчетов.

6. *Создание расчетных случаев.* Формируется набор расчетных случаев, который в дальнейшем будет использоваться для проведения расчета.

7. *Задание граничных условий.* Для каждого расчетного случая создается набор граничных условий, который определяет напряженно-деформированное состояние расчетной модели. Нагрузки задаются в виде сил, моментов, давления и т. п. Закрепления описываются в терминах

степеней свободы или направлений, для которых ограничиваются перемещения определенных узлов, – как в линейном, так и угловом направлениях.

8. *Задание условий, параметров проведения расчета.* На этом этапе определяются: тип решения, специальные параметры, списки необходимых результатов для анализа, тип выходных данных.

9. *Проведение расчета с помощью расчетной программы.* На этом этапе используется какой-либо внешний решатель, например MSC.Nastran.

10. *Импорт результатов.*

11. *Обработка результатов расчета.* На этом этапе используются разнообразные средства визуализации результатов – просмотр деформированного состояния, закраска изолиний равных напряжений, просмотр векторов главных напряжений и т. д.

### 3.2. Блок-схема проведения расчета с использованием MSC.Patran – MSC.Nastran

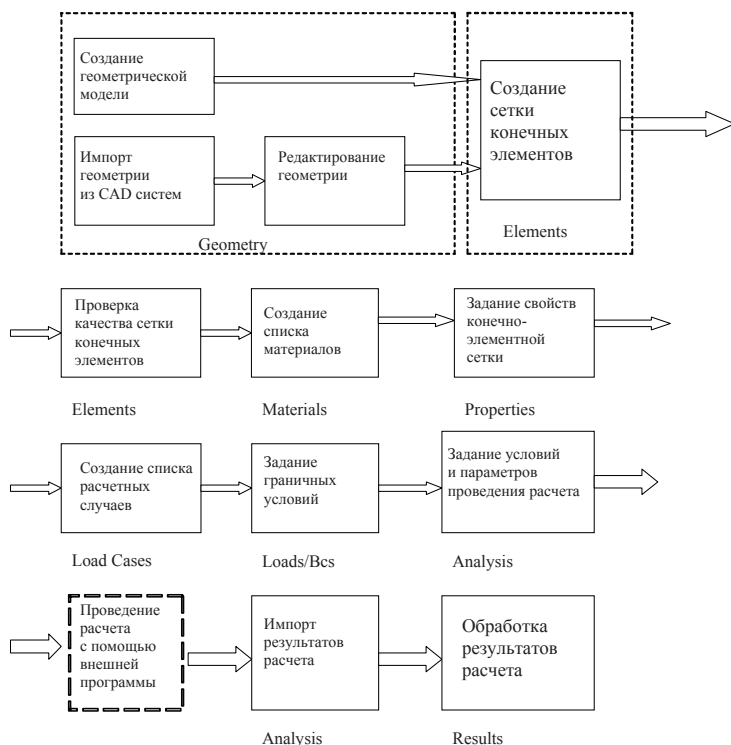


Рис. 5. Блок-схема проведения расчета с использованием MSC.Patran – MSC.Nastran

## 4. ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСА СИСТЕМЫ MSC.Patran

### 4.1. Системное меню

Запуск системы MSC.Patran можно осуществить, используя значок на рабочем столе Windows или используя последовательность: **Start® Programs\MSC®MSC.Patran2004** (Пуск\Программы\MSC® MSC.Patran2004).

На экране появится рабочее окно системы MSC.Patran (рис. 6). В центре рабочее окно имеет пустое графическое поле, в котором будет конструироваться геометрическая модель объекта. Вверху и внизу графического поля находится линейка с меню, линейка инструментов, кнопка для управления этапами выполнения CAE-задания, командная строка и список сообщений и команд при выполнении задания.

*Системное меню* (рис. 7). Каждое командное слово в этом меню имеет ниспадающее меню с дополнительными командами.

При загрузке MSC.Patran доступно единственное командное слово **File**. Другие командные слова становятся доступными, когда открывается база данных решаемой задачи.

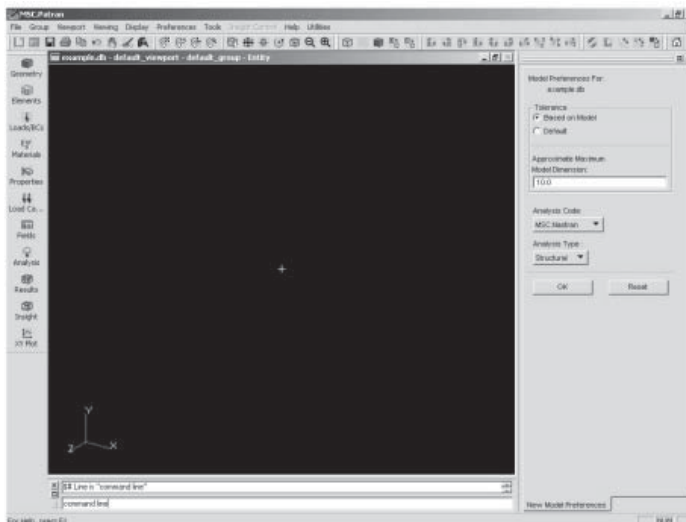


Рис. 6. Рабочее окно MSC.Patran



Рис. 7. Панель системного меню

С помощью меню **File** осуществляется доступ к базам данных, импорт и экспорт файлов, создание копии файлов и выход из текущей сессии (сессией называется непрерывный процесс работы над какой-либо задачей) в системе MSC.Patran. Это меню содержит стандартный набор команд, который имеется во всех пакетах, предназначенных для работы с Windows.

Командное слово **Group** содержит различные опции для организации групп из геометрических элементов (точек, кривых, поверхностей, твердых тел) и конечно-элементных объектов (узлов, элементов, многооточечных связей (MPC)).

Применение групп необходимо при разработке сложных моделей, чтобы было удобно просматривать различные части моделей или их элементы.

Кроме того, необходимо создавать группы частей моделей, выполненных из разнородных материалов, для удобства придания впоследствии этим группам соответствующих материальных свойств. Можно также использовать группы для просмотра результатов решения задачи (например, вывести для просмотра отдельно панели температурного поля и полей напряжений).

Команда **Viewport** – это перемещаемые и изменяемые размеры окна, используемого для показа всей модели или ее частей. Каждое окно содержит один независимый вид стационарной модели и содержит группу параметров, определяющих вид модели. Это меню используется для создания, редактирования, перемещения различных видов модели и ее частей.

Команда **Viewing** содержит различные опции для управления размером и ориентацией модели в окне (**Viewport**). Можно вращать модель, изменять размер, расположение, тип проекции, изменять масштаб, задавать секущую плоскость (**Clipping Plane**), изменять точку расположения наблюдателя, удалять и приближать модель.

Имеются два способа вращения модели для просмотра – вокруг глобальных и вокруг локальных осей. При вращении вокруг глобальных осей вращение происходит относительно точки начала координат. При вращении вокруг локальных осей вращение будет происходить относительно точки, в которой в данный момент находится начало координат этих осей.

Командное слово **Display** имеет меню, которое помогает организовывать и совершенствовать внешний вид элементов модели. С помощью этого меню можно определить, какие элементы нужно показывать и как их показывать. Можно управлять изображением нумерации элементов: стирать и показывать номера.





Рис. 8. Линейка системных функций

Командное слово **Preferences** содержит меню, с помощью которого можно выбрать параметры, которые должны управлять конструированием и появлением модели. Это меню определяет глобальные параметры, которые могут быть изменены для данной прикладной программы, работающей совместно с системой MSC.Patran. Например, можно изменить величину глобального допуска на представление линейных размеров модели.

Командное слово **Tools** имеет меню, которое исполняет необязательные приложения. Если какие-либо приложения не лицензированы, то в меню эти названия выделяются тусклым цветом.

Используя **List option**, можно выполнять следующее:

- можно вывести список узлов по заданному критерию и все элементы, связанные с этими узлами;
- можно получить список выполненных булевых операций;
- можно дополнительно выполнить нанесение конечно-элементной сетки на заданную область уже имеющейся сетки (Mesh on Mesh) и многое другое.

В виде значков (иконок) на линейку инструментов (**Toolbar**, рис. 8) вынесены часто используемые функции из системного меню – по управлению объектами с помощью манипулятора мыши, управлению видом объектов и т.п.

Рассмотрим подробно каждую из этих функций.

**File New** – установка новой базы данных (можно открыть старую базу данных как новую, если необходимо сохранить имя базы и удалить ее содержимое).

**File Open** – открытие старой базы данных.

**File Save** – сохранение каких-либо изменений в вашей базе данных.

**Print** – печать содержимого на экране окна (**Viewport**) или окно с  $x$ - $y$  графиком. Можно печатать один вид (**Viewport**), окно (**Window**) или несколько видов окон.

**Copy to Clipboard** – копирование содержимого вида в буфер обмена данных.

**Undo** – **Apply** или **Ok** кнопки выполняют действия, которые создают, удаляют или модифицируют элементы модели в базе данных. С помощью кнопки **Undo** графическое изображение обновляется, все элементы модели, которые были удалены, как результат последнего нажатия кнопки **Apply** восстанавливаются; какие-либо элементы, которые были модифицированы, восстанавливаются.



Рис. 9. Функции манипулятора мыши

**Abort** – во время выполнения сессии может возникнуть ситуация, когда на какой-либо операции происходит «зацикливание» или потребляется много времени, на что указывает вращение круглого значка с логотипом MSC.Software в правом верхнем углу экрана. Можно подавить выполнение операции, если нажать кнопку **Abort**, при этом на экране появится сообщение «**Do you wanted to abandon (покидать) the operation in progress**» – ответить нужно «да».

**Reset Graphics** – удаление всех выделенных изображений и деформированных форм. Восстанавливается вид в проволочном изображении (видны все ребра объекта). Эта кнопка работает на всех изображениях в режиме ввода элементов (в режиме построения), но только на текущем виде.

**Refresh Graphics** – восстановление всех графических видов.

**Mouse Rotate XY** (рис. 9) – если нажать среднюю кнопку мыши (при трехкнопочном манипуляторе) или одновременно обе кнопки (при двухкнопочной), то можно вращать объект вокруг осей  $y$  и  $x$ .

**Mouse Rotate Z** – вращение вокруг оси  $z$ .

**Mouse Translate XY** – модель можно перемещать в направлении осей  $x$  и  $y$ .

**Mouse Zoom** – модель можно отодвигать или приближать на экране, таким образом, изменяя размер изображения.

#### 4.2. Функции просмотра изображения объекта на экране

Рассмотрим подробнее функции просмотра изображения объекта на экране (рис. 10).

**View Corners** – увеличение фрагмента изображения модели путем заключения просматриваемой области в прямоугольную рамку.

**Fit View** – заключение всего объекта в поле рамки экрана.

**View Center** – размещение модели путем помещения центра рамки изображения (**View Parts**), щелкнув кнопкой мыши в поле экрана.

**Rotation Center** – выбор центра вращения модели для просмотра путем указания точки, узла или экранной позиции.



Рис. 10. Функции просмотра изображения

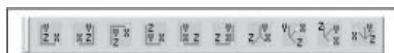


Рис. 11. Функции ориентации объекта

**Model Center** – установка центра вращения в центре указываемого элемента модели.

**Zoom Out** – уменьшение изображения путем приращений с дискретностью два.

**Zoom In** – увеличение изображения с той же дискретностью.

Имеется набор кнопок для установки различных видов изображения объектов (рис. 11), в том числе аксонометрические изображения. Назначения кнопок ясно из изображений осей координат на них. Помимо этого, существует возможность применять различное изображение вида объекта (рис. 12).

**Wire Frame** – изображение модели в «проволочном виде».

**Hidden Line** – изображение модели в режиме, в котором закрытые плоскостями ребра не видны.

**Smooth Shaded** – изображение модели с «закрашенными» плоскостями (как твердое тело).

**Show Labels** – вывод на экран всех меток элементов.

**Hide Labels** – удаление меток элементов с экрана.

**Plot/Erase** (рис. 12) – создание или удаление изображения на экране.

**Label Control** – изображение меток для выбранного элемента модели.

**Point Size** – включение размера изображения точек (от одного до девяти пикселей).

**Node Size** – включение размера изображения узлов (от одного до девяти пикселей).

**Display Lines** – включение изображений толщин линий на модели от 0 до 2.

**Home** – переход на MSC Software's Web страницу, используя ваш браузер.

#### 4.3. Дополнительное меню для выбора элементов геометрических форм

Во многих случаях, когда производится работа с формами различных прикладных задач, появляется дополнительное меню слева от панели формы.



Рис. 12. Функции изображения вида объекта и меню визуализации отдельных объектов



Рис. 13. Линейка выбора объектов

С помощью этого меню можно выбирать объекты прямо на экране, предварительно включив соответствующую кнопку меню. Таким образом, исключается необходимость печатать данные (номера) этих объектов в соответствующие строчки панели приложений.

В системе MSC.Patran имеется 25 различных вариантов линейки выбора для выборки объектов (**Select Menu**).

Появление этих меню на экране зависит от приложений, с которыми осуществляется работа в данное время. Например, если создается новая точка на геометрической модели, то появляется **Point Select Menu**; если необходимо выбрать конечные элементы, которые уже были сгенерированы, то появляется **Element Select Menu**.

Каждое вспомогательное меню показывает серию кнопок с графическим изображением. При передвижении курсора по этим меню появляются подсказки с названиями команд (рис. 13).

На вспомогательных меню доступны следующие команды:

**Toggle Visible Entities Only Selection** — включение либо только видимых объектов, либо видимых и скрытых.

**Polygon Pick** — выбор всех объектов, которые лежат в указанной области (полигоне). Для выбора полигона необходимо нажать левую кнопку мыши в требуемом месте экрана и вести мышь по требуемой площади (при этом будет появляться линия), затем замкнуть полигон, совместив стрелку мыши с начальной точкой и щелкнув левой кнопкой.

**Go to Root Menu** — возврат к первоначально выбранному меню.

**Go to Previous Menu** — возврат к предыдущему меню.

**Any Point** — выбор точки, принадлежащей какому-либо геометрическому элементу или конечному элементу.

**Point** — выбор точки.

**Node** — выбор узла.

**Curve Intersect** — выбор точки пересечения двух кривых.

**Point on Curve** — выбор точки на кривой.

**Any Vertex** — выбрать вершину элемента.


**Pierce** — выбор точки, в которой кривая линия и поверхность пересекаются.

**Pint on Surface** — выбор точки на поверхности.

**Screen Position** — выбор  $x$ -у расположение экрана.

#### 4.4. Выбор большого количества элементов геометрической модели

Имеется два способа выбора элементов на экране: путем рисования мышью границ вокруг выбранных элементов или последовательным указанием каждого выбранного объекта. При этом, если необходимо выбирать некоторое количество объектов с накоплением номеров в какой-либо строке панели приложения, необходимо держать нажатой кнопку **Shift** клавиатуры.

Для выбора первым способом можно использовать два типа линий, организовывающих выбранную площадь (полигон): первый тип линий – это прямоугольная рамка, которая появляется по умолчанию; второй тип линий – это полигон, который рисуется мышью. Второй тип является более гибким для выделения сложных областей. Чтобы использовать этот способ, выбирается  во вспомогательном меню выбора элементов (**Select Menu**).

Затем необходимо перевести курсор мыши в графическую область с изображением модели и щелкнуть левой кнопкой мыши, определив первую точку вершины полигона. Далее щелкать столько раз, сколько необходимо, чтобы указать требуемую область. Для завершения построения полигона необходимо щелкнуть на первую точку вершины, чтобы замкнуть полигон, нужно щелкнуть мышью на кнопку, изображающую полигон.

#### 4.5. Создание базы данных для решения задачи

После запуска системы MSC.Patram необходимо создать новую базу данных или открыть старую. Если база данных уже была создана, то, чтобы ее открыть, необходимо выбрать **File/Open** из главного меню и два раза щелкнуть на имя базы данных.

Если база данных не установлена, то необходимо выполнить следующее:

1. Выбрать **File/New** из главного меню.
2. Задать имя файла для новой базы данных в разделе **Data Base** панели **New Data Base**. MSC.Patran автоматически добавит к имени файла расширение **.db**.
3. Выбрать директорию, в которой база данных будет расположена. Обычно при установке MSC.Patran задают рабочую директорию, в которой MSC.Patran автоматически будет записывать создаваемые базы данных.
4. После нажатия **Ok** или нажатия левой кнопки мыши, создается база данных и на экране появляется графическое окно.

## 4.6. Вид параметров модели

Прежде чем переходить к созданию геометрической модели, необходимо выбрать или, по крайней мере, убедиться в установленном коде для анализа модели (**Analysis Code**), виде анализируемого физического процесса (**Analysis Type**) и глобальном допуске (**Tolerances**) на геометрические размеры модели.

Эти параметры можно увидеть на панели **New Model Preferences**. Эта панель автоматически появляется, когда закрывается панель **New Data Base**. Если эта панель не появляется, то необходимо проверить в панели **New Data Base** установку отметки в окне **Modify Preferences...** (модификация предварительных настроек).

В панели **New Model Preferences** в разделе **Tolerances** (допуск) для **Global Model Tolerance** возможны две установки: **Base on Model** и **Default**. Две точки в модели будут совпадать, если они расположены на расстоянии, равном или меньшем, чем значение параметра **Global Model Tolerance**. При **Base on Model** эта величина определяется как 0,05% от максимального размера модели. По умолчанию **Default** этот размер определяется во временной базе данных и равен 0,005 дюйма.

Выбор кода анализа для пользователя фактически сводится к выбору вычислительной программы, которая в случае работы в системе MSC.Patran должна иметь лицензию на использование (в лабораторных работах будет использован MSC.Nastran).

Тип анализируемого физического процесса может быть: **Structural** (структурный) – задачи, связанные с определением механических напряжений в конструкциях; **Thermal** (температурный) – тепловые задачи; **Fluid Dynamics** – задачи динамики жидкости и газа.

## 4.7. Импорт геометрической модели из других CAD-систем

Во многих случаях для работы в системе MSC.Patran более эффективно использовать геометрическую модель, созданную с помощью других CAD-систем.

Импорт геометрической модели позволяет избежать больших затрат времени на создание модели и обеспечить лучшую точность между CAD-конструкцией и ее моделью. MSC.Patran поддерживает прямой интерфейс со всеми основными CAD-системами: Unigraphics, CADD5, PRO/Engineers, CATIA (CATXPRES) и др.

Многие другие моделирующие пакеты могут поддерживаться через использование ANSI стандартного промышленного протокола IGES (**Initial Graphics Exchange Standard**). Однако нужно отметить, что с помощью этого протокола можно передавать только модели, выполненные с помощью линий и поверхностей, т. е. тонкостенные конструкции.

Для того чтобы импортировать модель, нужно:

1. Выбрать **File/Import** из главного меню MSC.Patran. Появится на экране панель с названием **Import**.
2. В разделе **Object** панели выбрать **Model**. В качестве **Object** может быть использовано **Model** или **Results**.
3. Указать в разделе **Source** (источник) меню CAD-системы, в среде которой выполнена модель.
4. Нажать **Apply** (принять).

В общем случае CAD-модель содержит большее количество данных, чем это нужно для CAE-моделирования модели. MSC.Patran имеет некоторое количество опций для указания данных, которые необходимо импортировать.

При указании типа CAD-пакета появляется несколько дополнительных панелей, с помощью которых можно указать, какие элементы геометрической модели нужно передать в MSC.Patran. Это могут быть линии, поверхности, твердые тела, CAD-слои.

Кроме импорта, можно осуществлять экспорт модели, созданной в системе MSC.Patran, причем это может быть геометрическая и конечно-элементная модель.

Указанные операции возможны, если известно, в каком формате данных записана модель или будет осуществляться ее экспорт.

В настоящее время пакеты проектирования используют в основном два графических ядра – Parasolid и более старое ядро ACIS. Последнее используется в системе ARIES фирмы MSC. В современных пакетах проектирования используется ядро Parasolid, т. к. оно обладает рядом преимуществ по скорости считывания, объему кодов в сохраняемом файле и т.п.

В табл. 1 представлены характеристики используемых форматов данных и CAD-системы, в которых эти форматы используются. Нужно отметить, что в современных CAD- и CAE-системах имеются модули, которые позволяют конвертировать (преобразовывать) форматы данных одного геометрического ядра в другие.

**ACIS** – формат файлов геометрического ядра твердотельного моделирования фирмы Spatial Technology Inc.

**Parasolid** – формат файлов для геометрического ядра твердотельного моделирования Parasolid фирмы Electronic Data Systems Corporation. Расширение файлов: **.x\_t** – текст, текстовый тип; **.x\_b** – Binary, двоичный тип.

**IGES (Initial Graphics Exchange Specification)** – исходный стандарт обмена графическими данными (США). **STEP (Standart for the Exchange of Product Model Data)** – стандарт для обмена данными модели. **AP203 (Application Protocol 203)** – протокол приложения для твердотельных объектов.

*Импорт и экспорт геометрии*

Формат файлов	Расширение в имени файла	CAD-системы	Импорт в MSC.Patran	Экспорт из системы моделей MSC.Patran
ACIS	*.sat	AutoCad	sat, ACIS 4.2	*.sat, ACIS 4.2
Parasolid	*.x_t, *.x_b	SolidWorks, Unigraphics	x_t, Parasolid 10	*.x_t, Parasolid 10
IGES	*.igs, *.iges		.igs (требуется символика поверхностей)	
STEP	*.stp, *.step		stp AP203, AP214	*.stp (поверхности не экспортируются)

**4.8. Меню для выполнения прикладных задач в системе MSC.Patran****Рис. 14.** Меню для выполнения прикладных задач

Это меню выполнено в виде ряда кнопок (рис. 14), которые помогают выполнять специальные задания, относящиеся к построению модели, подготовке ее для решения задач, выводу результатов и их представлению в графической форме. Каждая кнопка обозначает раздел, который содержит ниспадающее меню: панель для задания **Action** (требуемого действия), **Object** (объекта), **Method** (метода) и **Properties** (ряда свойств) для выполнения заданного метода.

Функции, выполняемые кнопками:

**Geometry** – создание и редактирование геометрии модели;

**Elements** – создание и редактирование конечно-элементной сетки;

**Loads/BCs** – приложение нагрузок к модели (**Loads**) и создание граничных условий модели (**Boundary Conditions**);

**Materials** – определение свойств материала моделей;

**Load cases** – определение списка нагрузок, прикладываемых к данной модели;



- Field** – задание изменений (вариаций) в свойствах и материалах;
- Analysis** – задание параметров решаемой задачи, представление в программе-вычислителе базы данных для решения задачи, считывание результатов решения (файла результатов);
- Results** – функции представления результатов решения задачи;
- Insight** – расширенные функции представления результатов решения задачи;
- XY Plot** – построение различных зависимостей в координатах  $y$ - $z$ .

## 5. РАЗРАБОТКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ MSC.PATRAN

Компьютерное моделирование геометрии объектов имеет ряд целей. САД-модели могут сохраняться как копии чертежей для производства, являться источником технических иллюстраций и использоваться как основание для покупки или поставки составляющих ее деталей.

В системе MSC.Patran все геометрические особенности моделирования направлены на создание комплексной конечно-элементной модели (**FEA Model**). Конечно-элементная модель (КЭМ) будет завершённой, если включает, конечно-элементное представление геометрии и задание нагрузок, граничных условий, свойств материала и свойств элементов. Завершённая КЭМ — это то, что пересылается в программу анализа как входные данные.

Создание геометрической модели облегчается использованием одной из мощных особенностей системы MSC.Patran — автоматического генерирования сетки конечных элементов. Однако, выгоднее работать с геометрической моделью, т. к. проще задавать нагрузки, граничные условия, свойства элементов и свойства материалов напрямую, используя геометрические области модели, а не КЭ. Геометрическая модель позволяет применять различную разбивку на КЭ или изменять ее геометрические параметры без изменения мест приложения нагрузок и граничных условий.

При разработке конечно-элементной модели можно гибко сочетать разработку геометрической модели и КЭ модели. Можно создать какую-либо часть геометрической модели и, разбив ее на КЭ, получить конечно-элементную модель, а затем продолжать разработку следующих частей.

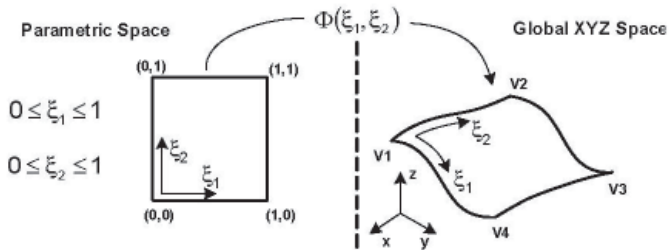
### 5.1. Основные концепции и определения

В системе MSC.Patran используется концепция параметрического пространства для упрощения вычислительных операций внутри программы.

В параметрическом пространстве кривая определяется в терминах только одной параметрической оси  $\xi_1$ . Поверхность определяется в терминах двух осей  $\xi_1$  и  $\xi_2$ , а твердое тело — в терминах трех параметрических осей  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$ . Каждый объект определяется размером параметрических осей, в которых он определен. Следовательно, координаты вдоль этих осей всегда имеют диапазон изменения от 0 до 1.

Можно использовать параметрическое пространство как мощную моделирующую концепцию. Во многих практических применениях

с помощью форм (панелей) в MSC.Patran и PCL функций можно создавать параметрические величины, которые предпочтительней глобальных XYZ величин. Например, можно кривую поверхность в пространстве определить одной третью точек в параметрическом пространстве, не задавая всего комплекта размеров в реальном пространстве. Несмотря на это, в прикладных формах (панелях) системы MSC.Patran предпочитают работать с величинами реальных координатных осей, а не с  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ .

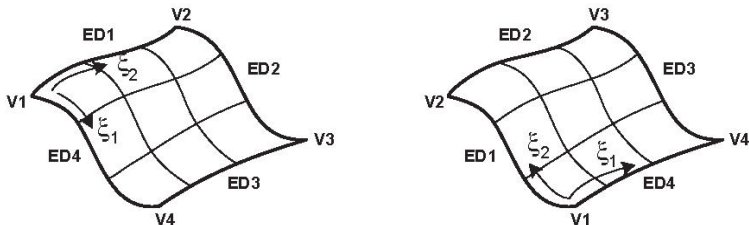


**Рис. 15.** Преобразование поверхности из параметрического пространства в пространство глобальной системы координат XYZ

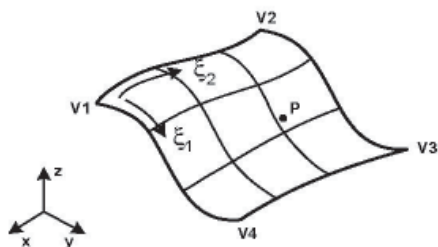
Для ограниченной кривой, поверхности, твердого тела, которые конструируются в системе MSC.Patran, программа наследует уникальную отображающую функцию ( $\Phi$ ), которая преобразует параметрические координаты объекта в более привычные трехмерные *хуэ* координаты (рис. 15).

Расположение и ориентация параметрических осей определяется математическим свойством пространства – связностью. Параметрические оси  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  имеют индивидуальную ориентацию и помещаются на каждой, поверхности и твердом теле. Например, на рис. 16 две поверхности идентичны по виду, но имеют различную связность.

Для кривых имеется два возможных определения связности. Для четырехсторонней поверхности имеются восемь возможных определений связности.



**Рис. 16.** Две возможные связности для поверхности



**Рис. 17.** Определение точки на поверхности параметрическими координатами

Твердое тело имеет шесть поверхностей, следовательно, в общем имеется 24 определения связности, т. е. три направления в каждой из восьми вершин.

В системе MSC.Patran при построении геометрических объектов могут быть выбраны следующие геометрические объекты в качестве строительных блоков:

- точка;
- кривая;
- поверхность (имеются следующие ее типы – бипараметрическая, общая триммированная<sup>1</sup>, простая триммированная, композитная триммированная, обыкновенная композитная триммированная) (рис. 18);
- твердое тело.

В системе MSC.Patran все точки – непараметризованные объекты и располагаются в пространстве координат XYZ. Их можно использовать для построения сложных геометрических объектов или использовать самостоятельно в качестве конечных элементов с помещенной в них массой (рис. 17).

Кривая – это однопараметрический объект. Кривая может использоваться как одномерный элемент (**1D**, в качестве стержня или балки) или быть применена для создания геометрических объектов (конструкций). Кривая имеет параметрическую переменную, которая используется для описания расположения одной точки на кривой.

В системе MSC.Patran различают простые и сложные поверхности. Простая поверхность – это правильная поверхность, ограниченная тремя или четырьмя областями (регионами). В параметрических терминах простая поверхность – это двумерный набор точек в трехмерном пространстве координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Каждая точка на поверхности может быть расположена заданием координат  $\xi_1$  и  $\xi_2$ .

<sup>1</sup> Триммированная поверхность – это поверхность, имеющая не более четырех ребер (trim – приводить в порядок)

Сложная поверхность может иметь больше четырех ребер и иметь также внутренние отверстия и контуры (рис. 18).

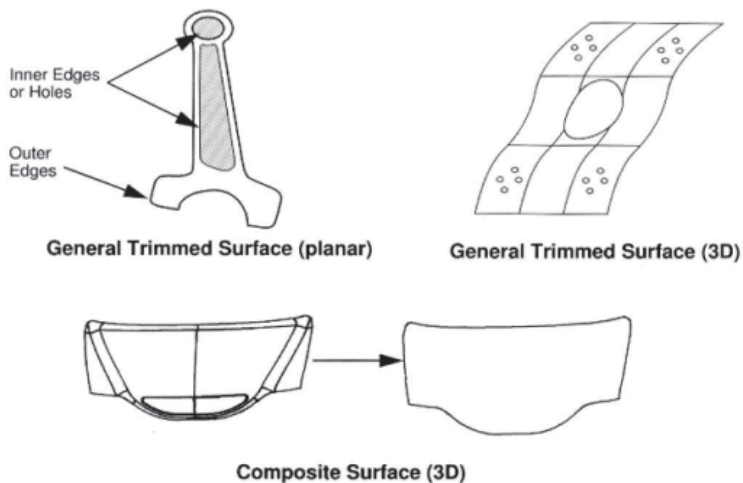


Рис. 18. Примеры триммированных поверхностей

Каждая триммированная поверхность имеет невидимую, связанную с ней родительскую поверхность, которая определена ее параметризацией и кривизной. Имеется несколько типов сложных поверхностей: триммированные поверхности могут быть планарными (расположенными в двумерной плоскости) или трехмерными (**3D**); композитными – соединяющими несколько поверхностей в одну, определенную заданными границами.

MSC.Patran поддерживает простые трехпараметрические твердые тела (**Solids**) и сложные твердые тела, представленные границами:

- простые твердые тела могут иметь от 4 до 6 поверхностей с не внутренними пустотами или отверстиями. Большинство твердых тел (**Solids**) создаются как трехпараметрические. В терминах параметризации каждое твердое тело – это трехмерный набор точек в пространстве глобальной координатной системы *xyz*. Для любой заданной точки в твердом теле можно указать три параметрические координаты  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$ , величины которых находятся в диапазоне от 0 до 1 внутри твердого тела (рис. 19);

- сложное, образованное границами твердое тело (**B-rep Solid**) формируется из произвольного числа поверхностей, которые определяют полностью закрытый объем. **B-rep** твердое тело может включать пустоты и отверстия, при этом только внешние поверхности или плоскости (**B-rep Solid**) параметризованы, но не внутренние (рис. 20).

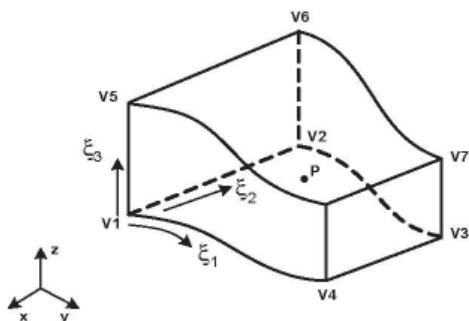
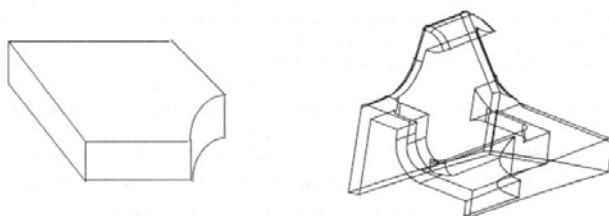


Рис. 19. Пример простого трехпараметрического твердого тела (Solid)



General Boundary Representation Solids

Рис. 20. Пример B-rep твердого тела

В системе MSC.Patran для конструирования геометрических моделей широко используются векторы (**Vectors**) и плоскости (**Planes**).

В моделирующих операциях, таких как перемещение геометрических элементов между двумя точками, векторы определяются начальной и конечной точками. Можно задавать векторы, многократно используя опции **Create/Vectors**.

Плоскости частично используются в симметричных операциях, таких как создание зеркального образа геометрических компонент. Плоскости можно создавать с помощью опций **Create/Plane**.

## 5.2. Координатные системы и оси координат

В операциях моделирования широко используются координатные системы, которые задаются ссылками на оси координат.

В системе MSC.Patran в каждой базе данных автоматически устанавливается глобальная прямоугольная координатная система (**Cartesian**).

Начало координат показывается белым плюсом в графической области экрана. Глобальные оси в нижней левой части экрана показывают ориентацию глобальных осей координат.

В дополнение к глобальной координатной системе можно создавать собственные локальные координатные системы. Например, если необходимо создать цилиндр, перпендикулярный к кривой поверхности, то наиболее легко это сделать в цилиндрической координатной системе.

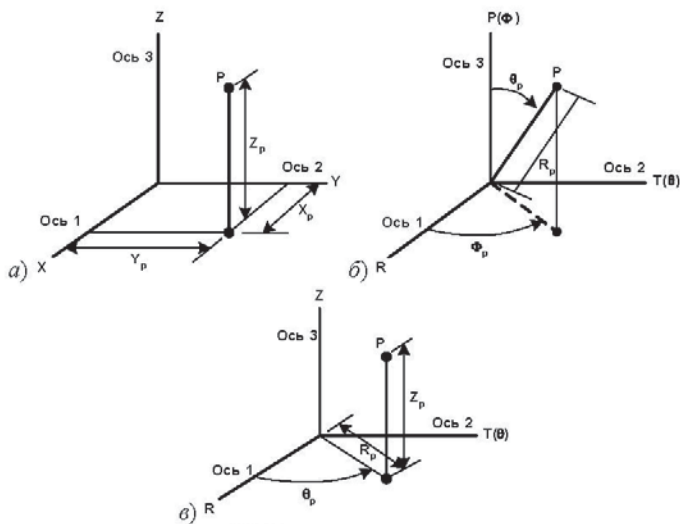
В разделе **Geometry** опция **Create/Coord** позволяет создавать три типа локальных координатных систем:

- прямоугольную (**Cartesian System**);
- цилиндрическую (**Cylindrical System**), с осями в радиальном, угловом и по образующей цилиндра направлениях;
- сферическую (**Spherical System**), которая описывает координаты по радиусу и двум главным углам.

На рис. 21 изображены координатные системы с обозначениями осей.

Угловые координаты в цилиндрической и сферической координатных системах ( $\Theta$  и  $\Phi$ ) всегда выражаются в градусах.

После создания конечно-элементной модели координатные системы позволяют устанавливать главные направления, в которых показываются результаты анализа.



**Рис. 21.** Координатные системы:  
а) прямоугольная (X,Y,Z); б) сферическая (R,  $\Theta$ ,  $\Phi$ );  
в) цилиндрическая (R,  $\Theta$ , Z)

### 5.3. Создание геометрических элементов

Для разработки геометрической модели объекта необходимо использовать кнопку **Geometry** из меню приложения.

При появлении панели **Geometry** необходимо в разделах **Action**, **Object** и **Method** выбрать соответствующие позиции в ниспадающих меню.

Раздел **Action** определяет то, что необходимо выполнить. В этом разделе могут быть использованы три категории: **Create** (создать), **Modify** (изменить), **Verify** (проверить).

При выполнении **Create** используются следующие операции:

**Create** – создает точки, кривые, поверхности, твердые тела, панели, векторы и координатные оси, которые определяются вводимыми данными или путем выбора указателем мыши.

**Transform** – создаются дополнительные объекты путем дублирования уже имеющихся геометрических элементов в новую область пространства. Для этого можно использовать **Offset** (смещение), **Rotations** (вращение), **Scaling** (масштабирование), **Mirroring** (зеркальное отражение относительно оси) и т. д.

При модификации (**Modify**) используются следующие операции:

**Edit** – изменяет геометрические объекты для улучшения конструкции модели или коррекции ошибок. Для чего используется дробление больших объектов на группы меньших и удаление дублирующих точек.

**Delete** – удаляет объекты из базы данных и с экрана.

**Associate/Disassociate** – объединение/разъединение связываемых элементов, таких как поверхность и тангенциальная кривая. При этом они «сцепляются» вместе.

При оценке качества геометрии (**Verify**) используются следующие операции:

**Verify** – идентифицируются проблемные зоны на модели, которые могут быть затем скорректированы. Это могут быть зазоры между смежными ребрами, пропущенные поверхности.

**Show** – показывается информация (в виде списка) о геометрических объектах. Для точек это могут быть координаты расположения и идентификационные номера (**ID**) узлов.

В поле **Object** определяется тип геометрии, например, при **Create** определяется тип геометрии, которую необходимо создать. Это могут быть точка, кривая, поверхность (простая и сложная), твердое тело (простое и сложное), вектор (одномерная кривая, имеющая направление и величину), система координат (прямоугольная, цилиндрическая, сферическая).



В поле **Method** задается то, как **Action** (действие) будет выполняться для получения результата. В системе MSC.Patran разработано большое количество методов создания геометрических объектов, названия которых приведены в табл. 2 (в ней выделены наиболее употребляемые при выполнении лабораторных работ). Ниже дано описание некоторых методов.

**Extract** – создание точек или кривых на указанных кривых в параметрической координатной плоскости.

**Interpolate** – создание одной или более точек между двумя указанными точечными расположениями, которые упорядочены или нет и размещены в отдалении.

**Intersect** – создание точек в месте пересечений каких-либо следующих параметрических примитивов: **Curve/Curve**, **Curve/Surface**, **Curve/Plane**, **Vector/Curve**, **Vector/Surf**, **Vector/Plane**.

**Offset** – создание точек на указанной кривой.

**Pierce** – создание точки, расположенной на пересечении или на «пронизывании» кривой поверхности, или **Solid Face**.

**Trimmed Face** – упорядочивание (создание правильной) поверхности.

**Fit** – создание кривой, которая проходит через набор точечных областей, базирующихся на **Least Squares Fit**.

**Manifold** – создание кривой на поверхности или грани твердого тела, которая расположена между двумя или более точечными расположениями.

**Project** – создание геометрических объектов методом проектирования исходных объектов по указанному направлению.

**PWL** – создание соприкасающихся кривых между двумя или более точками.

**Tan Curve** – создание кривой, которая тангенциальна к двум кривым или ребрам.

**Tan Point** – создание кривой от точечного расположения к тангенциальной точке на кривой. **XYZ** – создание точки, кривой или твердого тела по вектору с координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

**Compose** – создание поверхностей из плоскостей. **Uncompose** – создание поверхности на плоскости.

**Match** – создание поверхности, которая топологически конгруэнтна с одной или двумя указанными поверхностями.

**Ruled** – создание поверхности, которая образуется между двумя установленными кривыми и ребрами.

**Trimmed** – создание поверхности, которая состоит из внешне соединяемых кривой контура и факультативно из внутренне соединенного кривого контура.

**Vertex** – создание поверхности по четырём точкам.

## Основные функции создания геометрических объектов

GEOMETRY								
Action								
Create	Delete	Edit	Show	Transform	Verify	Associate	Dissociate	Renumber
Object								
	Point	Curve	Surface	Solid	Coord	Plane	Vector	
	X Y Z	Point	Curve	Surface	3 Point	Point-Vector	Magnitude	
	Arc Center	Arc 3 Point	Composite	B-rep	Axis	Vector-Norm	Intersect	
	Extract	Chain	Decomposite	Decompose	Euler	Curve-Norm	Normal	
	Interpolate	Conic	Edge	Face	Normal	Plane-Norm	Product	
	Intersect	Extract	Extract	Vertex	2 Vector	Interpolate	2 Point	
	Offset	Fillet	Fillet	X Y Z	View Vector	Least Squares		
	Pierce	Fit	Match	Extrude		Offset		
	Project	Intersect	Trimmed	Glide		Surface Tangent		
		Manifold	Vertex	Normal				
		Normal	X Y Z	Revolve		3 Points		
		Project	Extrude					
		PWL	Glide					
		Spline	Normal					
		Tan Curve	Revolve					
		Tan Point	Mesh					
		X Y Z						
		Involute						
		Revolve						
		2D Normal						
		2D Circle						
		2D Arc Angles						
		2D Arc 2 Point						
		2D Arc 3 Point						

**Extrude** – создание поверхности или ребра, которые вытягиваются по вектору или масштабируются, либо вращаются.

**Glide** – создание поверхности или твердого тела, которые формируются по указанному направлению кривой, ребром или плоскостью, скольжением вдоль одной или более базовых кривых или ребер.

### 5.3.1. Создание триммированных поверхностей

Выбрать **Create/Surface/Trimmed** в меню приложения в разделе **Geometry**. В этой панели необходимо определить поверхность, указать ограничивающие ее кривые, которые служат для организации закрытого контура, и те, которые определяют внутренние отверстия или контуры. Эта форма позволяет указывать родительскую поверхность, из которой получается триммированная.

Можно создать замкнутые контуры, которые формируют внешние границы поверхности и внутренние контуры тремя способами:

1) **Create/Curve/Chain** (соединять) будет подсказывать создание замкнутого контура из набора установленных кривых, которые соединены концами друг с другом. Эта операция создаст новую, единую кривую и укажет на удаление первоначальных (образующих) кривых. **Auto-Chain** опция будет осуществлять все визуально, показывая процесс создания соединяемых вместе кривых;

2) кнопка **Auto-Chain** на панели **Create/Surface/Trimmed** разрешает создавать внешние и внутренние контуры из установленного набора кривых, соединенных от конца к концу. Эта операция создает новую замкнутую кривую с удалением первоначальных кривых;

3) некоторые опции, такие как **Create/Curve/2D Circle** и **Create/Curve/Conic** (когда формируется закрытый эллипс), создают закрытые кривые и используют их напрямую в качестве контуров при создании триммированных поверхностей.

Опция **Create/Surface/Composite** позволяет создавать единую композитную поверхность из смежных планарных поверхностей. Эта опция удобна для создания единой, разбиваемой на конечные элементы поверхности из областей с комплексом граничных ребер или многих смежных областей.

### 5.3.2. Создание B-rep твердого тела

Твердое тело, **Boundary Representation (B-rep)**, определяется поверхностями, которые являются границами этого твердого тела. Эти твердые тела могут иметь произвольное число граничных поверхностей, но при условии, что они охватывают замкнутый твердотельный объем (объем, внутри которого имеется вещество). Подобные твердые тела строятся с помощью опций **Create/Solid/B-rep** в меню **Geometry**.

Однако прежде чем использовать эту опцию, необходимо, чтобы поверхности, являющиеся границами, были уже созданы или импортированы.

Перед началом работы следует иметь в виду некоторые общие рекомендации:

- необходимо удостовериться, что все поверхности топологически конгруэнтны (т. е. все они имеют общие ребра и вершины). В том случае, если поверхностные ребра не выстроены в линию, необходимо применить опцию **Edit/Surface/Sew** (сшить) или **Edit/Surface/Match** (подгонять, подгонять под пару), чтобы выровнять смежные поверхности;

- в случае импортированной модели из CAD-системы, необходимо убедиться, что допуск модели (**Tolerance**) находится внутри величины допуска, принятой для базы данных;

- используйте **Verify/Surface/Boundary** (границы) из меню **Geometry**, чтобы убедиться в том, что не имеется отверстий, вызванных пропущенными поверхностями в вашей модели; в противном случае можно сжать поверхности по направлению их центров, используя **Geometric Shrink** опцию в меню **Dis-play/Geometry** для утилит(**Utility Menu**), чтобы образовать их индивидуальные границы.

После этого необходимо проверить **B-rep** твердое тело по следующим критериям:

- группа поверхностей, которая будет определять **B-rep Solid** должна полностью замыкать объем;

- поверхности должны быть топологически конгруэнтны, т. е. смежные поверхности должны иметь общее ребро. (В настоящее время можно создавать **B-rep Solid** только с внешней оболочкой, без внутренней!)

#### 5.4. Обработка импортированных CAD-моделей

Во многих случаях можно импортировать модель в систему MSC. Partran и не подвергать ее никакой обработке. Но при дальнейшей работе может возникнуть ситуация, когда из-за мелких деталей в импортированной модели (например, отверстий под болты) количество элементов и узлов может быть большим, что увеличивает время решения задачи. В этом случае нужно использовать инженерное решение, чтобы определить, какие особенности модели менее важны, а какие должны быть учтены для повышения точности.

Для упрощения модели следует использовать следующие рекомендации:

- при создании CAD-модели, планируйте использование различных средств для выделения или отделения группы элементов, которые при анализе модели в САЕ-системе могут быть удалены;

- употребляйте фильтрующие опции, чтобы ограничить использование определенных типов элементов. Например, использовать только твердотельные элементы или кривые, чтобы перестроить модель

в системе MSC.Partran. Фильтрующие опции находятся в дополнительной форме под **Import** формой;

- применяйте CAD-геометрию как базу для конструирования простой геометрической модели, предназначенной для анализа в среде MSC.Partran. Для этого используйте вершины, кривые и ограничивающие поверхности исходной CAD-модели для дальнейшего использования в среде MSC.Partran;

- во многих случаях большие поверхности или твердые тела образованы несколькими малыми областями, объединенными в одно целое. Можно выбрать **Create/Surface/Trimmed** или **Create/Solid/B-rep**, чтобы упростить сложную геометрию, базируясь на внешних ребрах и поверхностях;

- в случае множества смежных элементов можно применить их сжатие с помощью **Create/Surface/Composite** (композитные поверхности).

#### *Добавление пропущенных поверхностей*

Твердотельная CAD-модель может не иметь закрытых **3D** твердых тел для выполнения чертежей или видового представления модели. Следовательно, чтобы определить пропущенные поверхности, необходимо использовать **Verity/Surface/Boundary**.

При использовании этой опции необходимо учитывать следующие рекомендации:

- для случая, когда область будет ограничиваться регулярным количеством ребер (3 или 4), выберите в **Geometry Create/Surface/Edge** (ребро), чтобы заполнить в пропущенных поверхностях ребра путем указания ребер в смежных поверхностях;

- когда область ограничена более чем четырьмя сторонами, необходимо выбрать в разделе **Geometry** опцию **Create/Surface/Trimmed**. В этом случае необходимо сначала создать композитную кривую, представленную внешними границами, используя **Create/Curve/Chain** или кнопку **AutoChain** в **Create/Surface/Trimmed**. В противоположность этому можно разбить область на несколько простых бипараметрических поверхностей.

## 5.5. Проверка созданных геометрических моделей

Когда разрабатывается или импортируется геометрическая модель, то необходимо заботиться о том, чтобы геометрическая модель отвечала требованиям, которые предъявляет конечно-элементный анализ. Рассмотрим некоторые требования, которые предъявляются в этой связи к геометрическому моделированию, и способы проверки на соответствие этим требованиям.

### 5.5.1. Обеспечение топологической конгруэнтности

Топологическая конгруэнтность – необходимое условие для создания правильной конечно-элементной модели, которое гарантирует то, что все области геометрической модели будут иметь элементы, связанные друг с другом во время создания конечных элементов.

Для того чтобы обеспечить топологическую конгруэнтность, необходимо следующее:

- смежные области геометрической модели должны иметь общие границы и вершины;
- геометрические компоненты должны формировать замкнутые поверхности или твердотельные области;
- не должно быть перекрытия между смежными областями.

На рис. 22 показан пример конгруэнтной геометрии. Когда ребра смежных геометрических областей конгруэнтны (т. е. совпадают точно), их ячейки сетки имеют определенное количество узлов вдоль общих ребер. Узлы (**Nodes**) вдоль общих ребер совпадают, т. е. они выстроены в ряд и расположены друг против друга вдоль общих границ. Это обеспечивает совпадение пар узлов в угловых точках или вершинах.

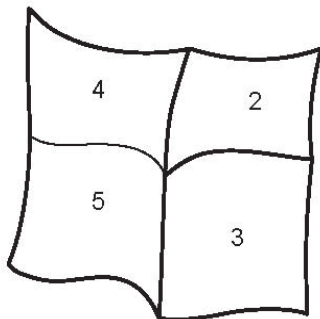


Рис. 22. Пример конгруэнтной геометрии

В течение процесса «эквивалентности», во время создания сетки конечных элементов, пары совпадающих узлов вдоль границ геометрических областей «сшиваются» вместе. Таким образом отдельные области геометрической модели формируют один соединенный элемент, который готов к анализу.

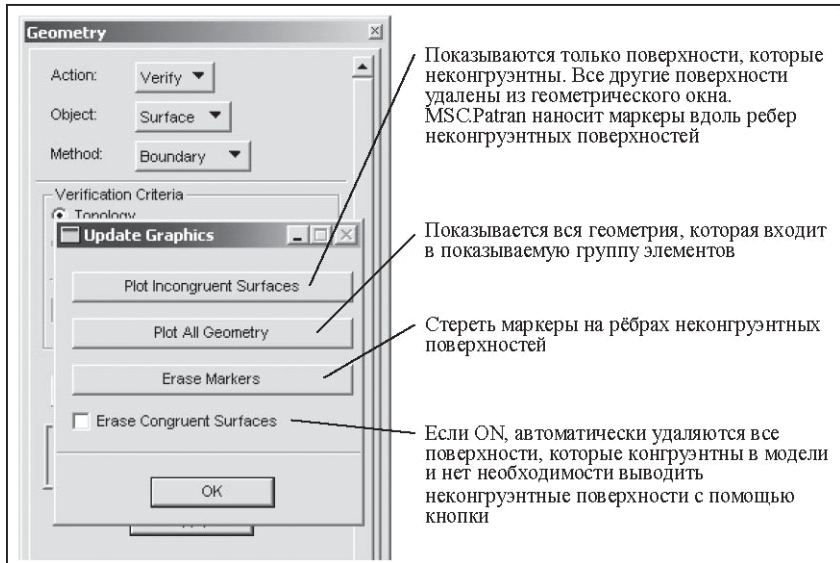


Рис. 23. Функция проверки сшивки поверхностей

### 5.5.2. Выявление неконгруэнтных областей

В меню **Geometry** выбирая **Verify/Surface/Boundary** и **Verify/Solid/B-rep**, можно определить области модели, где имеется топологическая неконгруэнтность. Необходимо выполнить **Update Graphics** (обновить графическое изображение), после того как нажмете кнопку **Apply** в панели **Geometry**. Эта панель позволяет показать на экране неконгруэнтные поверхности среди модели. На рис. 24 показаны эти панели с соответствующими пояснениями.

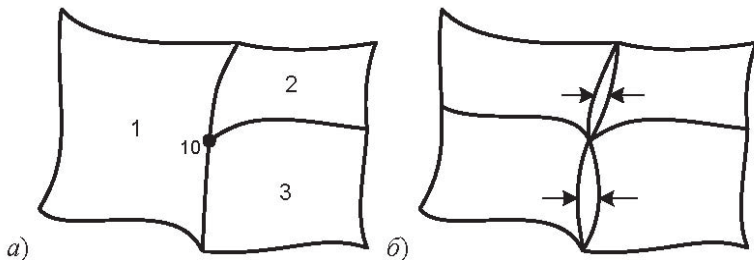


Рис. 24. Примеры «несшитых» поверхностей:  
 а) ребра общие, а вершина 10 – нет; б) вершины общие, ребра – нет

### 5.5.3. Исправление неконгруэнтности

На рис. 24 показаны примеры неконгруэнтных поверхностей.

Можно получить совмещение сетки для левой поверхности, если на ребре области 1 поместится точно два элемента как в областях 2 и 3, и область сетки элементов однородна. В этом случае узлы могут быть совмещены. Однако если эта поверхность затем будет покрыта новой сеткой, например, при использовании специального способа нанесения сетки (**Mesh Seed**), примененного к одному из внешних граничных ребер, то может быть получена сетка, узлы которой не смогут быть совмещены.

Если, точка 10 находится не точно в центре ребра, нанесенная на области 1, 2 и 3 сетка, вероятно, не может иметь совмещенных узлов. Без совмещения узлов эти области остаются независимыми и несоединенными. Для того чтобы сделать эту поверхность конгруэнтной, выберите одно из указанных действий:

- **Edit/Surface/Break** – укажите разламываемую поверхность 1 в точке 10;
- **Edit/Surface/Edge Match** (выравнивание по ребру) – указать опцию **Surface-Point** (точка на поверхности).

Поверхность на правой стороне рис. 24 показывает зазоры между двумя парами поверхностей, которые больше, чем допуск на представляемую геометрию. Это означает, что при нанесении сетки, которая делит поверхности на пары, вдоль сторон, имеющих зазор, совпадения узлов быть не может. Чтобы сделать эти поверхности конгруэнтными, можно выполнить одно из следующих действий:

- **Create/Surface/Match** (выравнивание);
- **Edit/Surface/Edge Match** (редактирование поверхности выравниванием по ребру).

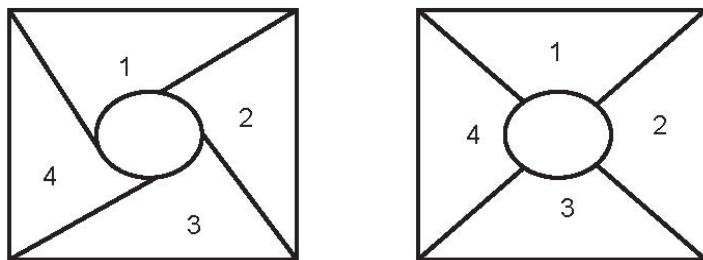


Рис. 25. Поверхности с острыми и с углами больше 45°



#### 5.5.4. Устранение малых углов в узлах поверхностей

Во многих случаях при нанесении сетки невозможно удержать внутренние углы сетки поверхностей от  $45^\circ$  и более. Причина в том, что поверхности сетки имеют прямоугольную форму, а форма элементов определяется всецело формой поверхности, на которую наносится сетка. На рис. 25 показаны поверхности с острыми углами элементов и оптимальные элементы.

#### 5.5.5. Проверка и выравнивание нормалей к поверхностям

Направление вектора внешней нормали к поверхности является важным условием для задания данных, необходимых для расчета, а именно: нагрузки, граничных условий и свойств элементов. Необходимо пытаться сохранить направление нормалей всех поверхностей модели.

Для того чтобы показать на экране расположение векторов нормалей, необходимо использовать в **Geometry** форму **Edit/Surface/Reverse** (изменить направление), чтобы реверсировать или выстроить нормали для группы поверхностей. Эта форма имеет кнопку, обозначенную как **Draw Normal Vectors**, которая показывает положение направления векторов нормалей к указанным поверхностям.

Можно использовать альтернативную форму, чтобы показать направление этих нормалей: **Show/Surface/Attributes**.

Можно проверять расположение нормалей косвенным методом при конструировании поверхностей путем вывода на экран параметрических направлений поверхностей (см. рис. 26, направления координат  $\xi_1$  и  $\xi_2$ ). Для этого в главном меню нужно выбрать **Display/Geometry**, включить **Show Parametric Direction** (показать параметрическое направление) и нажать **Apply**. Эти направления будут видны как линии около параметрического начала, обозначенные через 1 и 2. Нормаль к поверхности может быть определена по указанным направлениям линий, используя известное «правило правой руки» — поместите правую ладонь так, чтобы пальцы сжимались в кулак от оси 1 к оси 2, тогда большой палец покажет направление нормали.

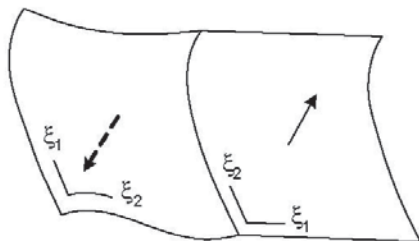


Рис. 26. Противоположное расположение нормалей к поверхностям

Для того чтобы изменить направление нормали к поверхности, используйте форму **Edit/Surface/Reverse**. Эта форма разрешает выбрать одну или более поверхностей и изменить направления их нормалей, изменяя параметрические направления C1 и C2.

*Использование разделения сложной модели на геометрические области (**Regions**)*

За пределами базовых критериев в системе MSC.Patran широко используется создание отдельных геометрических областей для облегчения нанесения конечно-элементной сетки, назначения материала и свойств конечным элементам. Кроме этого, содержатся средства для облегчения задания нагрузок и граничных условий.

В системе MSC.Patran имеются средства для преобразования геометрических моделей, чтобы упростить последующий анализ, например, опции для деления сложной геометрии на множество областей, для работы во многих координатных системах; использование таких операций, как пересечение (**Intersection**) и проецирование (**Projection**).

## 6. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. СОЗДАНИЕ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Система MSC.Patran предназначена для создания конечно-элементных моделей из представленной геометрической модели или с помощью прямых конечно-элементных операций. Обычно более распространенным является первый способ, однако в некоторых случаях второй способ является предпочтительным.

Уравнения, необходимые для определения поведения полной модели, часто очень сложные и становятся не практичными для их решения.

Метод конечных элементов решает эти задачи путем разделения комплексной модели на группы объединенных конечных элементов — малых соединенных между собой кусков, обычно представляемых сеткой элементов. Эти элементы в конечно-элементной модели имеют одинаковую геометрическую форму и могут быть представлены в качестве прямоугольников, треугольников и четырехугольников. Они содержат узлы, соединяющие их друг с другом. Конечным элементам назначают геометрические свойства и свойства материала моделируемого объекта.

Модель разделена на конечные элементы и компьютерная программа, используя эффективные расчетные уравнения и методы, вычисляет поведение индивидуальных элементов, учитывая взаимосвязь смежных элементов и их свойства.

Во многих задачах по анализу конструкций каждый элемент представляется как множество упругих элементов. Упругие элементы соединены в угловых точках — узлах, чтобы обеспечивать их взаимосвязь для представления поведения модели как целой конструкции.

### 6.1. Возможности конечно-элементного моделирования

Система MSC.Patran содержит ряд возможностей для создания правильных конечно-элементных моделей, используя ряд автоматических операций. Для некоторых моделей может быть достаточным даже использование одной такой операции, как объединение сетки областей конечных элементов в одну область.

В системе MSC.Patran имеются следующие возможности для конечно-элементного моделирования (КЭМ):

- различные способы нанесения сетки конечных элементов (**Mesh Seeding Tools**) для управления плотностью сетки на выбранных областях модели;
- несколько развитых способов автоматического нанесения сеток;
- возможности соединения сеток на смежных областях модели (**Equivalencing**);

- инструментарий для проверки (**Verify**) качества и точности конечно-элементной модели;
- возможности для прямого ввода и редактирования данных конечно-элементной модели.

Эти инструменты помогают минимизировать усилия пользователя для достижения наиболее важной цели – понимания поведения геометрической модели – в то же время предоставляя много возможностей для контроля этого процесса (если необходимо).

## 6.2. Основные концепции и определения

Конечные элементы сами по себе обладают своей топологией (т. е. формой) и своими свойствами. Например, элементы, используемые для создания сетки конечных элементов на поверхности, могут быть составлены из прямоугольников или треугольников. Подобно этому, один элемент может быть стальной пластиной, моделирующей структурные свойства, а другой может быть представлен воздушной массой при акустическом анализе конструкции.

Обе формы и их свойства зависят от вычислительной программы, которая используется вместе с системой MSC.Patran и задается в его разделе для предварительной настройки (**Analysis Preference**).

На стадии использования системы MSC.Patran, в которой создается конечно-элементная модель с использованием раздела **Finite Elements**, элементы определяются полностью в терминах своей топологии. Другие свойства, такие как материал, задаются потом в соответствующих формах.

Топология элементов, применяемая в системе MSC.Patran, описана в табл. 3. В системе MSC.Patran применяются четыре основных способа создания (генерирования) сетки для конечных элементов: **IsoMesh**, **PaverMesh**, **AutoTetMesh** и **2-1/2D Meshing**.

Выбор правильного способа для нанесения сетки должен основываться на геометрической форме, топологии модели, анализе задачи и цели, инженерных традициях и «чутье пользователя».

### **IsoMesh** (равномерная сетка)

При этом подходе создаются элементы среди областей простой геометрической формы путем равномерного нанесения сетки.

Некоторые основные особенности этого подхода:

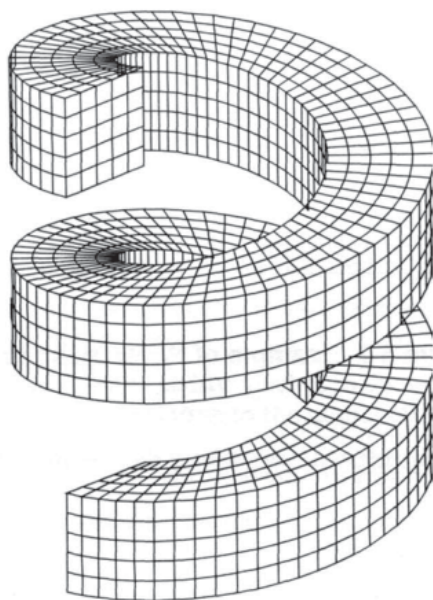
- необходимы равномерные и правильные формы области поверхности или твердотельных элементов. Области поверхностей должны иметь три или четыре стороны, в то время как твердотельная область может иметь пять или шесть граней. По умолчанию создается

согласование элементов в каждом направлении, основанное на таком известном аппарате, как **Global Edge Length** (глобальная длина ребра). Плотность элементов и расстояние между ними может изменяться путем применения методов нанесения сетки (**Mesh Seed**), которые часто используются для создания различной плотности элементов на противоположных ребрах или гранях области;

– могут создаваться **Quad**- или **Tria**-элементы на поверхности областей модели или прямоугольные элементы (**Brick**) в областях для твердотельных элементов;

– для так называемых «выродившихся областей» трехгранной или клиновидной формы твердых тел, в которых одно ребро на грани отсутствует, подходит генерация **Tria**- или **Wedge**-элементов, созданных на выродившихся точке или ребре;

– **IsoMesh** – единственный подход для автоматического нанесения сетки из прямоугольных элементов (**Brick**) на какую-либо область (рис. 27).










**Рис. 27.** Применение генератора сетки **IsoMesh**

**Paver** («мостильщик», заполнение сеткой нерегулярной области)

Эта техника автоматического нанесения сетки элементов, которая может использоваться в любых областях произвольной формы.

## Элементы и области их применения

Форма элементов	Для моделирования каких элементов применяется	Конфигурация элементов и техника нанесения сетки элементов
<b>Point</b> (точка)	 Сосредоточенная масса в точке, жёсткость или демпфер, прикрепленный к земле (к жёсткому основанию)	
<b>Bar</b> (стержень)	 Используется в случае, когда жёсткость изменяется в одном направлении по прямой линии	<b>Isomesh, Bar 1, 2 и 4*</b>
<b>Tria</b> (треугольник)	 Используется, когда напряжённое состояние (stress state) изменяется в двух направлениях и является постоянным в третьем, или один размер площади очень мал по сравнению с двумя другими	<b>Isomesh и Paver, Tria 3, 4, 6, 7, 9, 13</b>
<b>Quad</b> (прямоугольник)		<b>Isomesh и Paver, Quad 4, 5, 8, 9, 12, 16</b>
<b>Tet</b> (пирамида)	 Применяется, когда напряжённое состояние изменяется во всех трёх направлениях и все области модели сопоставимы по величине. В системе MSC.Patran допускается изменение расположения узлов для каждого из этих элементов.	<b>Isomesh, Tet 4, 5, 10, 11, 14, 15, 16 и 40</b>
<b>Wedge</b> (клин)		<b>Isomesh, Wedge 6, 7, 15, 16, 20, 21, 24 и 52</b>
<b>Hex</b> (куб)		<b>Isomesh, Hex 8, 9, 20, 21, 26, 27, 32 и 64</b>
Примечание: * – цифры указывают на возможное количество узлов в элементе		

В отличие от **IsoMesh** подхода, **Paver** создает сетку элементов путем первоначального нанесения на границы поверхности точек будущей сетки, а затем с помощью этих границ создается сетка внутри поверхности.

Основные особенности этого подхода:

- этот подход действителен только для поверхностей;
- его можно использовать, чтобы создавать сетку для **Quad**- и **Tria**-элементов; **Quad** – сетка может содержать несколько треугольников согласно сущности этого подхода;
- метод **Mesh Seed** или параметр **Global Edge Length** используется для управления плотностью элементов;

– метод **Paver** приспособлен к связанной геометрии, такой как кривая лежащая на поверхности, которая может быть связана с поверхностью с помощью опций **Associate/Curve/Surface** в меню **Geometry**. Если такая кривая имеет сетку, расположенную на ней с помощью метода **Mesh Seed**, то **Paver** обеспечит нанесение сетки, которая проходит через размеченные точки;

– на смежные области можно наносить сетку элементов либо методом **Paver**, либо **IsoMesh**, учитывая плотность нанесения сетки на смежную область (рис. 28).

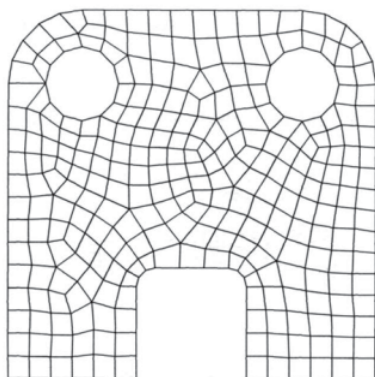


Рис. 28. Применение генератора сетки **Paver**

### **Auto TetMesh** (автоматическое нанесение сетки на **3D** область модели)

Подход **Auto TetMesh** представляет автоматический способ нанесения сетки на произвольную по форме геометрическую область. С помощью этого способа создается трехмерная сетка для элементов треугольной пирамиды (4-узловой твердый элемент – **Solid**) на замкнутой твердотельной геометрической области, включая твердые тела и регулярные твердотельные области. Некоторые основные его особенности:

- метод подходит для сложной твердотельной области с минимальными вводными пользователем данными;
- нанесение трехмерной сетки для **Tet**-элементов (**Tetmeshing**) – это наиболее приемлемый метод как для **B-rep** твердых тел, так и для моделей, импортированных из CAD-систем;
- нанесение сетки, базирующейся на учете базовой кривизны, позволяет получать высококачественную сетку в областях со сложной кривизной. Можно задавать плотность сетки в областях с высокой кривизной по отношению к глобальному размеру элемента;

– нанесение сетки **Proximity-based** обеспечивает высококачественную сетку, исходя из толщины тонкостенной области модели (рис. 29).

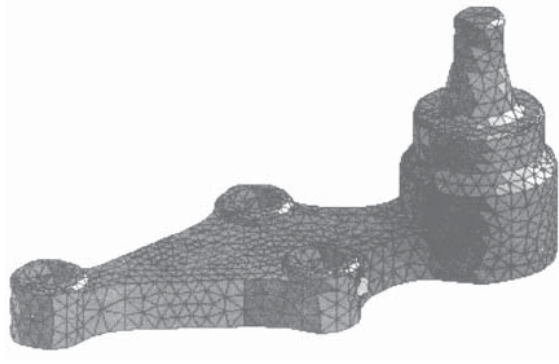


Рис. 29. Использование генератора сетки **Proximity-based**

### **2-1/2D Meshing** (создание сетки **3D** путем преобразования **2D**)

Плоская **2D** сетка может быть трансформирована для того, чтобы создать **3D** сетку для твердотельного элемента, используя затем операции: «движение по направлению» (**Sweep**) и «выталкивание (штамповка)» (**Extrude**).

Основные особенности данного метода:

- направление и плотность элементов в операции **Sweep** и направление штамповки (**Extrude**) могут быть заданы в соответствии с преобразованием от **2D** к **3D**;
- метод производит элементы, которые не ассоциированы с какой-либо родительской геометрией, что предотвращает последующее перенесение нагрузок, граничных условий и свойств из уже обозначенных геометрических областей (рис. 30).

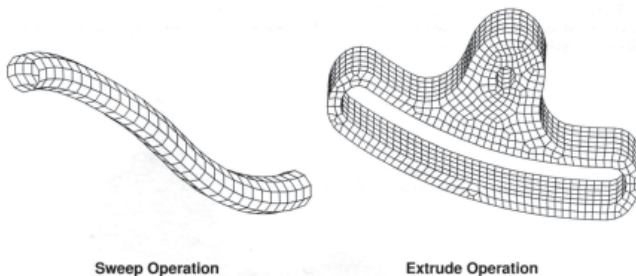


Рис. 30. Использование **2-1/2D Meshing**



### 6.3. Плотность сетки конечных элементов, ее получение и анализ

Для генерации сетки необходимо задавать размеры элементов, используемых для каждой области геометрической модели. Например, можно увеличивать количество элементов в области с высокими напряжениями или температурой, чтобы получить большую точность результатов, и снижать количество элементов в менее критичной области – для того чтобы уменьшить время решения задачи.

Имеется несколько возможностей для управления размером сетки элементов и ее плотностью, включая равномерное нанесение сетки (**Mesh Seeds**), уплотнение сетки и уплотнение сетки смежных областей.

Это сочетание возможностей позволяет быстро нанести сетку на геометрическую модель, в то же время обеспечивая высокую степень контроля, которая невозможна при автоматическом способе нанесения сетки элементов.

Когда в системе MSC.Patran создается сетка элементов, то плотность сетки вдоль каждого ребра выбирается в соответствии со следующими главными предпочтениями:

- равномерное нанесение сетки (**Mesh Seeds**);
- плотность сетки смежных областей (**Adjacent Mesher**);
- принятая глобальная длина ребра (**Global Edge Length**).

**Mesh Seeds** – при этом указываются явно точки вдоль ребра модели, в которых будут расположены узлы. Расположение точек может быть равномерным или изменяться по линейному закону в направлении к какому-либо концу, или обоим концам, или центру ребра. Можно задать индивидуальное расположение сетки вдоль ребра. Это создается с помощью **Create/Mesh/Seeds** опции в разделе **Finite Elements**, в котором включены такие опции, как **Uniform** (равномерно), **Bias** (с заданием формы), **Curve Based** (по базовой кривой), **Tabular** (таблично) (рис. 31).

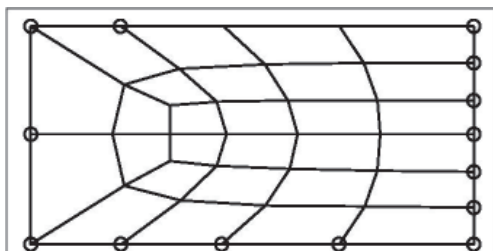


Рис. 31. Использование Mesh Seeds

Подобно другим особенностям системы MSC.Patran конечно-элементная сетка в этом способе может быть переопределена, используя последующие **Create option**, или удалена, используя **Delete/MeshSeeds**.

**Adjacent Meshes** — когда сетка элементов наносится на геометрическую область; плотность сетки, созданная вдоль ребра, будет использоваться в нанесении сетки в других смежных областях, в которых это ребро является общим.

Дополнительно в системе MSC.Patran используется концепция **Mesh Paths** — «траекторий сетки», чтобы разделить на подобласти большую геометрическую область, когда используется подход **IsoMesh**.

В этом случае происходит проектирование сетки с выполненной плотностью на противоположное ребро смежной области до тех пор, пока она не достигнет конца «пути». На рис. 32 показано направление перемещения сетки с указанной плотностью и как это отражается на сетке всей модели.

**Global Edge Length.** В панели **Create/Mesh** содержится параметр, называемый глобальной длиной ребра, который определяет среднюю длину ребра элемента.

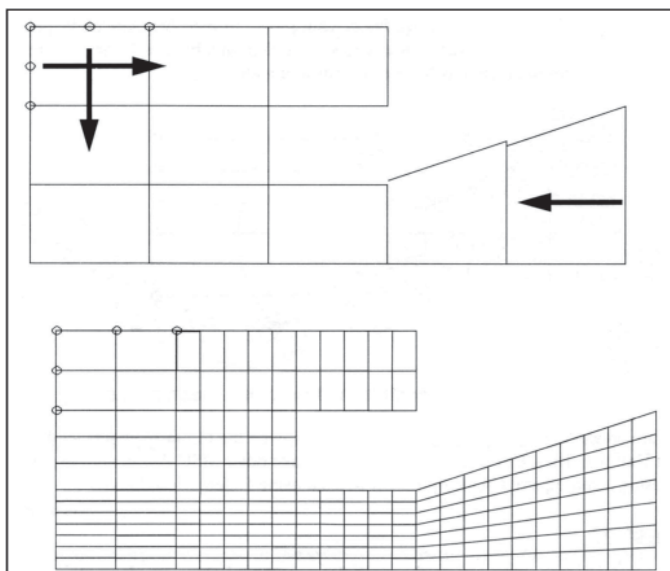


Рис. 32. Направление перемещения сетки

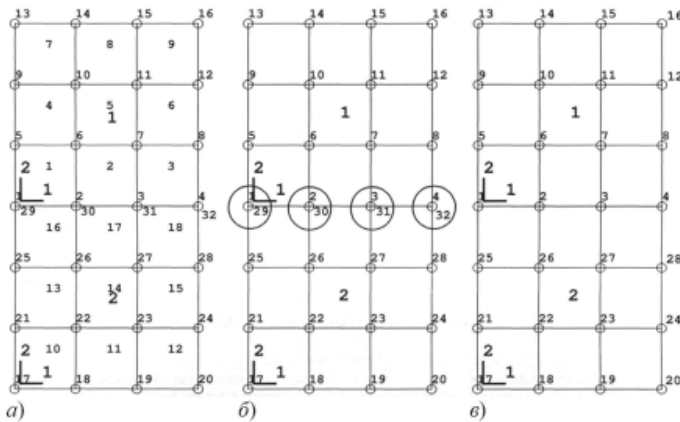
Когда не имеется других ограничений на размер сетки элементов, таких как **Mesh Seeds** или **Adjacent Meshes**, для определения размера сетки элементов используется **Global Edge Length**. После нанесения сетки конечных элементов необходимо провести две операции, связанные с сокращением размеров матрицы. **Equivalencing** (приведение к эквивалентности). Много геометрических моделей состоит из множества областей,

имеющих общие границы. Нанесение сетки элементов в системе MSC.Patran всегда выполняется на одной области сразу, даже когда в соответствующей форме панели для нанесения сетки элементов выбрано много геометрических областей.

Это означает, что по умолчанию элементы одной области не соединены с элементами другой области и нет взаимодействия между узлами. Для того чтобы быстро скорректировать это, в системе MSC.Patran имеется средство известное как **Equivalencing** – приведение к эквивалентности, чтобы соединить вместе узлы, принадлежащие к целой геометрической модели. Это осуществляется через **Equivalence** в панели **Finite Elements**.

Это действие должно быть полностью выполнено перед первым запуском конечно-элементной модели на расчет. Игнорирование этого обычно приводит к неправильным результатам расчета. Например, несоединенные области свободно «отлетают» в пространстве при анализе конструкции. В системе MSC.Patran нет автоматического сообщения о том, что некоторые области модели не соединены с остальной частью.

Операция **Equivalencing** сама по себе очень прямолинейна; каждый узел проверяется на близкое взаимное расположение в области заданной величины зоны допуска (**Tolerance**). Если два или более узлов окажутся в зоне заданного допуска, то они объединяются в один с присвоением ему меньшего номера из объединяемых узлов. Если к узлам с большим номером были присвоены какие-либо свойства или нагрузки, то произойдет автоматическое изменение этого номера узла на меньший (рис. 33).



**Рис. 33.** Последовательность выполнения операции Equivalencing: а) до выполнения; б) во время выполнения; в) после выполнения

**Optimizing** (*оптимизация*). Не имеет значения, как именно конечно-элементная модель создана – либо путем нанесения сетки, либо прямым моделированием конечно-элементных операций. Имеется короткая «безболезненная» операция, которая может значительно ускорить решение задачи. Эта операция, известная как оптимизация, просто перенумеровывает все узлы и элементы, чтобы сократить время выполнения решения задачи.

При выполнении вычислений члены уравнения от каждого конечного элемента объединяются, чтобы сформировать симметричную матрицу, которая является разреженной, т. к. содержит много нулевых членов. При решении матричных уравнений необходимо выполнить операцию обращения матрицы и во многих вычислительных программах конечно-элементного анализа; время выполнения этой операции зависит от ширины ленты матрицы. Ширина ленты матрицы – это максимальная ширина не нулевых элементов вдоль диагонали матрицы. На рис. 34 показано, как эта ширина выглядит физически в матричном уравнении.

В других вычислительных программах принимается критерий «волнового фронта», который базируется на количестве активных столбцов в строке матрицы. Путем перенумерации узлов элемента строки и столбцы матрицы могут быть перенумерованы, сокращая таким образом ширину ленты или волновой фронт, оптимизируя время решения. В системе MSC.Patran в панели **Finite Elements** находится команда **Optimize**, выполняющая оптимизацию тремя методами: **Cuthill-McKee**, **Gbbs-Pool-Stk** или обоими. Подробно смотреть Part4 of the MSC.Patran Reference Manual.

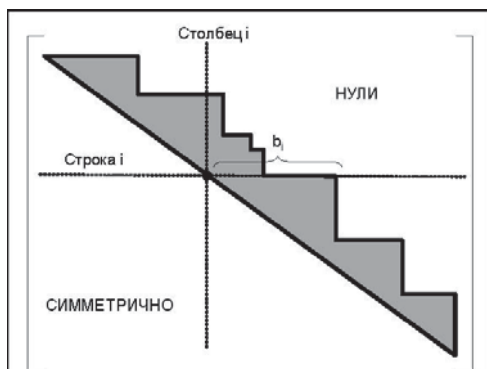


Рис. 34. Разреженная симметричная матрица:  
 $b_i$  – полуширина ленты матрицы

## 6.4. Разработка конечно-элементной модели

Для того чтобы создать конечно-элементную сетку, система MSC. Patran имеет элементы различной формы с разными конфигурациями узлов и различные методы автоматического нанесения сетки элементов на геометрическую модель.

Форма **Finite Elements** имеет ряд комбинаций **Action/Object/Type**, которые создают, модифицируют, подготавливают конечно-элементную модель, облегчая получение обособленных результатов решения задачи.

Доступ к конечно-элементным операциям можно осуществить с помощью формы **Finite Element** через главное меню **Main Form**.

После появления на экране этой формы необходимо выбрать **Action** (действие), **Object** (объект) и **Type** (тип объекта). Позиции формы разнообразны и зависят от того, какое меню выбрано.

Рассмотрим, какие **Action** (действия) могут быть выбраны в панели **Finite Elements**.

### **Create Actions**

**Create** — генерация сеток с помощью автоматических методов: равномерные сетки с изменяемой плотностью; индивидуальное создание элементов, узлов и дополнительных объектов.

**Transform** — создание узлов и элементов путем переноса (**Translate**), вращения (**Rotating**) и зеркального отображения (**Mirroring**).

**Sweep** — создание новых элементов путем перемещения группы уже имеющихся элементов вдоль одного из 10 типов направляющих (таких как дуга — **Arc**), путем выдавливания (**Extrude**), путем скольжения (выглаживания, **Glide**), **Glide-Guide** и по нормали (**Normal**).

**Sweep** может преобразовывать поверхность (**2D**) из сетки элементов в твердотельные элементы (**3D**) путем перемещения ее вдоль нормали, перпендикулярной к поверхности.

### **Modify Actions**

**Modify** — модификация одного или более атрибутов таких объектов, как узлы, элементы и многоточечные закрепления (**Multipoint Constraints**), или сокращенно — **MPCs**. Эти действия могут включать перенумерацию узлов и элементов, «расщепление» одного в два и более элементов. Можно также оптимизировать и модифицировать форму элемента улучшением сетки элементов.

**Delete** — удаление таких объектов из модели, как узлы, элементы и сетки элементов.

**Renumber** – изменение идентификационных номеров (**ID**) элементов или узлов.

**Associate/Disassociate** – модификация узлов и элементов так, что они связываются и, наоборот, отсоединяются от геометрической структуры (модели). Для того чтобы прикладывать нагрузки, граничные условия и свойства напрямую к геометрическим элементам, элементы и узлы конечно-элементной модели должны быть связаны с геометрией.

### ***Qualify Actions (Выполнение проверки модели)***

**Verify** – проводится проверка качества цифровых данных конечно-элементной модели, включая проверку искажения элементов, образование дублей и нумерации (задания **ID**) узла или элемента.

**Equivalence** – улучшение конечно-элементной модели путем удаления дубликатов узлов, совпадающих или расположенных в пределах размера допуска (**Equivalencing Tolerance Distance**).

**Optimize** – минимизация процессорного времени, памяти и дискового пространства, необходимого для решения и размещения матрицы жесткости и ее порций путем перенумерации узлов или элементов модели.

Метод оптимизации переменный и зависит от модели, типа и используемого объектного кода модели.

**Show** – показывается различная информация о конечно-элементных объектах. Например, для выбранных групп элементов показ координатных систем, **IDs**, нагрузок и граничных условий, **ID** номеров свойств материала, свойств материала, свойств элементов, действующих результатов.

В качестве объектов используются элементы, относящиеся к сетке элементов, одиночные узлы и конечные элементы.

### ***Objects (Объекты)***

**Mesh** – конечно-элементный метод анализа требует, чтобы анализируемая модель была разделена на материальные внутренне взаимодействующие «кусочки» – конечные элементы, которые описываются отдельными уравнениями. Набор этих внутренне соединенных элементов относится к конечно-элементной сетке (**Mesh**).

**Mesh Seed** – это метод, в котором определяются точки, которые явно заданы вдоль ребра модели, чтобы указать, где будут расположены узлы. Расположение узлов может быть равномерным, указано их индивидуальное расположение или они могут располагаться с переменным расстоянием между ними с началом от конца, начала или центра ребра.

**Mesh Control** – при использовании какого-либо автоматического нанесения сетки элементов разрешается указывать отдельную глобальную

длину ребра для выбранных поверхностей. Эта опция позволяет создавать сетку с перемещением без привязанности к одной поверхности.

**Node** – узел является конечно-элементным эквивалентом вершины (**Vertex**) в геометрической модели. Узлы являются соединительными точками между смежными элементами.

**Element** – это один дискретный элемент конечно-элементной сетки. Он может иметь несколько стандартных форм, таких как прямоугольник и треугольная пирамида, и иметь различное количество узловых точек вдоль его ребер.

**MPC (Multipoint Constraint) – MPCs** – это заменитель для конечных элементов, который можно использовать для моделирования определенных физических элементов, таких как жесткие связи, шарниры (вращательные, универсальные и т.п.), ползунные механизмы и др. **MPCs** трактуется как элемент в системе MSC.Patran. Они изображаются линиями между узлами на экране.

**Superelement** – этот объект используется только для MSC.Nastran, обозначает группу нескольких элементов и выступает как большой (комплексный) элемент.

**DOF (Degree Of Freedom) List – DOF** список используется только для ANSYS или ANSYS 5.

Нанесение сетки конечных элементов может выполняться по-разному. Для обозначения способа выполнения задается **Type** (тип), который зависит от выбранного **Object**.

Приведем несколько примеров.

Рассмотрим три простых способа конечно-элементного моделирования:

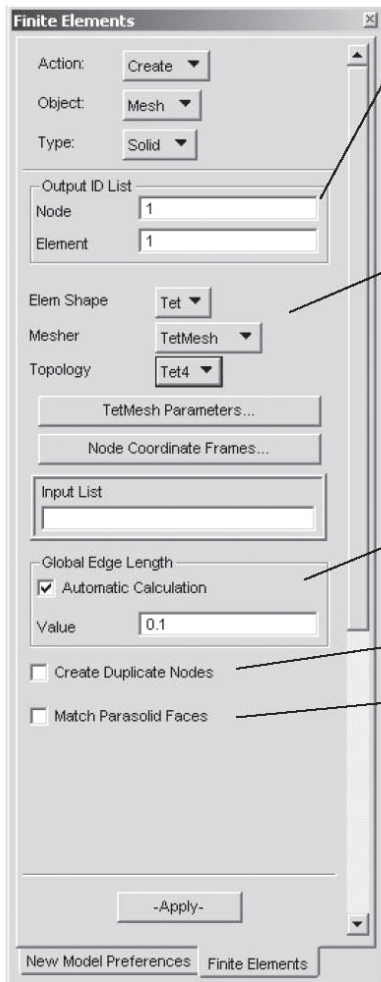
1. **Creat/Mesh/Solid**: автоматическое нанесение сетки на сложные модели. Используются элементы типа **Tet** с топологией **Tet4** (рис. 35).

2. **IsoMesh Parameters** – подформа для задания параметров сетки (рис. 36).

3. **Create/Mesh Seed/ Two-Way Bias**. На рис. 35 показана панель системы MSC.Patran для создания сетки элементов по первому способу.

Форма (панель на рис. 36) появляется, когда выбрана кнопка **IsoMesh Parameters**.

Следующий способ создания сетки элементов с помощью формы **Create/Mesh Seed/Two Way Bias** (рис. 37), при этом происходит заполнение сеткой элементов с предварительной разметкой таких геометрических фигур, как кривая, ребро поверхности или твердое тело, прямыми сегментами с симметричной неравномерной длиной. Обычно указывается общее количество элементов с заданным отношением длины элементов **L2/L1** или значением длин **L2** и **L1**.



**Список ID номеров узлов и элементов**  
 Назначается необязательный список ID номеров для нового набора узлов и элементов. Если не назначать, ID величины будут назначаться последовательно, начиная с показанного в строке номера узла и элемента

**Опции конечного элемента**  
 Выбирается тип конечного элемента, метод нанесения сетки КЭ, топология конечного элемента

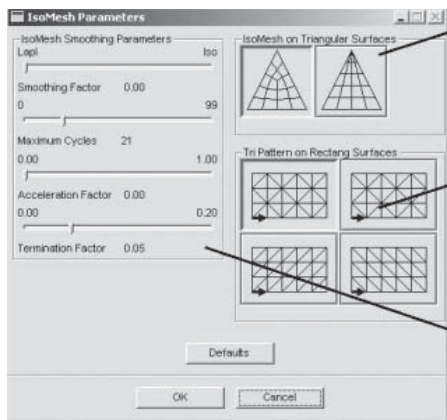
**Глобальная длина ребра**  
 Указывается действительная величина, назначенная по умолчанию для данной сетки

Включается при необходимости создания дубликатов узлов

Соединяет примыкающие поверхности деталей, выполненных как сборки в CAD системах с ядром Parasolid

**Рис. 35.** Панель Finite Elements MSC.Patran – автоматическая генерация сетки



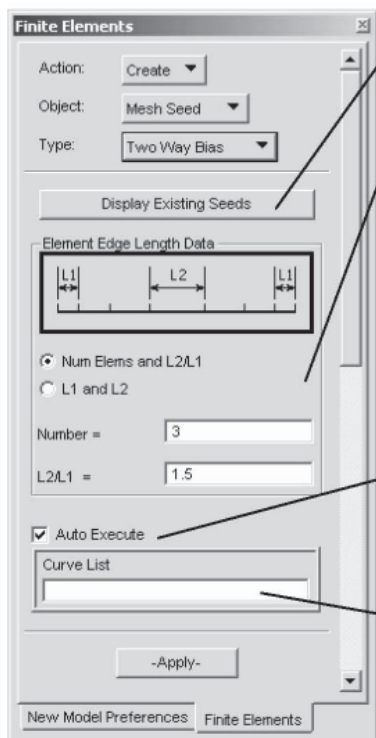


Выбрать из двух возможных типов шаблонов сетки элементов для выродившихся поверхностей или твердых тел.

Выбрать из четырёх возможных треугольных сеток шаблонов для поверхностей или твёрдых тел с углами, равными 90 градусам.

Эти параметры управляют процессом генерации сетки элементов – как будут создаваться переходы между областями с различным количеством элементов.

Рис. 36. Панель IsoMesh Parameters



Показать существующее распределение узлов.

Чтобы определить распределение узлов вдоль границы поверхности, необходимо выбрать либо Num Elems and L2/L1, либо L1 and L2. Если выбран первый вариант, то необходимо ввести количество элементов и отношение длин ребер элементов L1/L2. Если выбран второй вариант, то необходимо ввести длины ребер элементов L1 и L2 для начала и середины выбранного объекта (кривая или граница поверхности).

Включенная кнопка возле Auto Execute означает автоматическое выполнение после заполнения всех полей.

Определяется список геометрических объектов (кривые, границы поверхностей или ребра твердых тел), для которых будут применены выбранные параметры распределения узлов.

Рис. 37. Панель Finite Elements – создание распределения узлов вдоль направления

## 6.5. Прямое моделирование конечных элементов

Значительное большинство конечно-элементных моделей осуществляется сегодня через операции геометрического моделирования, создается одна и большее число геометрических частей модели и затем генерируется сетка элементов.

В других случаях бывает легче работать напрямую с самими узлами и элементами. Такие случаи включают:

- модифицированные сетки элементов, считываемые из программ анализа или вычислительных программ, таких как MSC.Nastran (раздел **Bulk Data File** в тексте исходного файла для MSC.Nastran);
- конечно-элементные модели, в которых сетка элементов создана путем применения внешних программных средств без основной геометрической модели;
- измененные специфические элементы, которые неудачно прошли проверку.

Предпочтение конечно-элементной модели может быть отдано с точки зрения времени моделирования и присвоения свойств. Когда свойства назначаются напрямую геометрическим элементам, конечно-элементная сетка потом может быть изменена, без необходимости переопределять эти свойства. Если свойства назначаются напрямую узлам или элементам, и если основная сетка элементов изменяется, необходимо их заново вводить.

В системе MSC.Patran имеются следующие средства для прямого конечно-элементного моделирования:

- операции, создающие узлы, элементы, **MPCs (Multi-Point Constraints)** и суперэлементы;
- операции, создающие узлы и элементы путем операций трансформирования, вращения и зеркального отображения уже имеющихся узлов и элементов;
- операции с помощью **Sweep**, создающие сложные элементы, путем перемещения простого элемента по пути, описанному в разделе 2.1 для генерации сетки элемента;
- модифицирующие операции, которые сглаживают существующую сетку, редактируя элементы и узловы номера или величины их атрибутов, разделяя имеющиеся **Bar-, Quad-** или **Tria-**элементы или модифицируя **MPC-**атрибуты.

## 6.6. Проверка конечно-элементной модели

Существует такое понятие, как совершенная конечно-элементная модель, которое исключает тривиальные случаи – одноэлементные модели.

Каждая конечно-элементная модель создается для предсказания поведения модели в реальных условиях. Точность модели может изменяться в зависимости от того, какие элементы в ней используются. Очень важна проверка точности конечно-элементной модели для выявления повторяющихся элементов, не соединенных в группы частей элементов (**unequivalence**).

MSC.Patran имеет некоторое количество операций, позволяющих проверять конечно-элементную модель. Осуществляются они путем задания **Verify Action** в панели **Finite Elements**.

При проверке сначала тестируется геометрическая форма элементов.

1. **Aspect ratio** – вычисляется специальный коэффициент, оценивающий соотношение противоположных ребер элементов, плоскостей или главных направлений в плоскостях или твердых телах. Например, в **Quad**-элементе этот коэффициент определяет соотношение длины к ширине. Для нормальных условий конечный элемент имеет большую точность, если этот коэффициент приближается к единице.

2. **Warp** – мера коробления плоских элементов – это степень отклонения угловой точки в **Quad**-элементе от плоскости его расположения.

3. **Skew** – мера смещения – это угловое отклонение от прямоугольной формы углов в плоскости элементов.

4. **Taper** – мера конусности – это геометрическое отклонение от прямоугольной формы в **Quad**-элементах.

5. Угол ребра – это мера, которая измеряет максимальное отклонение угла между плоскостями твердотельного элемента (**Solid**).

6. Так же, как описано в п. 1–5, оценивается искажение поверхностей по короблению, скошенности, конусности.

7. **Twist** – мера кривизны – это измерение изгиба между противоположными плоскостями твердотельных элементов, таких как **Wedge**, **Hex**.

Другие тесты для элементов:

1. Проверка границ для элементов со свободными ребрами не смежных элементов. Этот тест важен для проверки не соединенных в группы элементов модели.

2. Проверка дубликатов элементов, присоединенных к одному узлу.

3. Для пластин из одиночных элементов (**Shell**-элементы) осуществляется проверка на согласование нормалей между элементами (**Normals check**).

4. Проверка **Jakobian Ration** (отношения Якобиана) – базируется на максимальном отклонении и минимальной величине каждого элемента в определителе Якобиана (**Jakobian Zero test**).

5. Идентификационный цветовой код элемента базируется на их **ID**-номерах. Это полезный тест для визуальной оценки числового диапазона элементов и порядка моделирования.

Другие тесты включают смещение узлов от средней плоскости для элементов высоких порядков, суперэлементных границ и изображений контурных линий, базирующихся на **ID**-величинах узлов.

Для многих этих тестов можно задать границы величин или процент количества элементов, которые не должны выходить за эти границы. Во многих случаях результаты проверки на экране выделяются цветом. Элементы, не входящие в заданный допуск, выделяются обычно красным цветом.

Правильная установка величины допуска становится материалом для экспериментов с частными типами элементов. Например, линейный треугольный элемент может быть очень чувствительным к искажению, в то время как квадратичный треугольный элемент (элемент, у которого ребра представлены квадратичными параболами) может давать хорошие результаты даже с достаточно высокой степенью искажения. В то же время, используя консервативные величины, можно увеличить качество конечно-элементной сетки, что может сократить затраты времени для проверки и модификации модели.

Когда тест определил некачественные элементы, то необходимо воспользоваться следующими опциями:

1. Изменение сетки модели.

Замена сетки элементов другой часто является лучшим способом сохранить время, особенно когда новая сетка элементов незначительно изменяет время анализа. В случае, когда некоторые элементы имеют плохой коэффициент **Aspect Ratio**, нанесение другой сетки с другой плотностью по наибольшему ребру может быстро решить эту проблему.

Для того чтобы создать другую сетку элементов, необходимо:

– удалить первоначальную сетку путем **Delete/Mesh** на панели **Finite Elements**;

– создать новую сетку элементов путем **Create/Mesh**, указав ряд соответствующих опций, рассмотренных выше.

2. Модификация одиночных элементов.

Для некоторых проверочных тестов, включающих **Quad**-элементы, **MSC.Patran** обладает автоматическими способами для модернизации элементов, которые выходят за допуск. Например, когда **Quad**-элементы имеют плохой **Aspect Ratio**, имеются опции для автоматического деления их на меньшие элементы в их угловых точках.

Альтернативно можно напрямую выполнить операции создания и модификации конечно-элементной модели (см. раздел «Прямое моделирование конечных элементов»)

#### *Проверка заданного допуска*

MSC.Patran не делает изменений в проверяемой модели, базируясь на результатах проверочных тестов. Эти результаты предназначены как руководство для дальнейших действий, которые помогут улучшить точность решения в заданной области модели. Следовательно, можно увеличить величину допуска, когда используются элементы высоких порядков или когда дефектные элементы расположены в некритичной области модели.

Комплексность многих сеток элементов вкупе с ограниченными визуальными возможностями означает, что невозможно увидеть искажения на модели. Например, дубликаты элементов часто видятся как один элемент, и искаженные элементы могут быть не видны среди плотной комплексной сетки элементов.

## 7. ЗАДАНИЕ СВОЙСТВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ, НАГРУЗОК И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

### 7.1. Задание материалов в базе данных MSC.Patran

В системе MSC.Patran материал задается как именованная группа свойств, относящаяся к материалу, которая необходима для индивидуального анализа конечно-элементной модели.

Свойства материала дают системе MSC.Patran информацию о том, из чего сделана модель (сталь, композит и т.п.), определяют атрибуты (свойства) этого материала: плотность, жесткость, модуль эластичности, коэффициент Пуассона и т. п.

В системе имеется несколько прикладных панелей для материала, которые позволяют создавать, модифицировать, показывать и удалять материал.

Каждая задача и объектный код расчетной программы имеет разную группу материалов. Свойства материала зависят от ряда факторов:

- типа анализа (структурного или теплового);
- объектного кода расчетной программы (MSC.Nastran, MSC.DYTRAN, MSC.MARC, ANSYS и т.п.);
- способа ввода свойств материала из внутренней библиотеки или внешней;
- выбора определенных базовых характеристик (таких как тип материала, одна или более характеристик, составляющих модель материала);
- в некоторых случаях – типа элемента, которому назначается материал.

Когда задаются только свойства материала – это еще не назначение свойств элементам модели. Только, когда свойства элемента созданы, имеется материал, – только тогда осуществляется связь с моделью. Свойства элемента относятся как к модели, так и к материалу.

После того как материалы определены и отнесены к модели, можно выбрать графическое окно материальных свойств **View Part**, которое включает ху график выбранных свойств. Можно также просмотреть график упругих свойств или матрицу податливости как результат задания свойств материала.

#### 7.1.1. Основные концепции и определения

В системе MSC.Patran имеется ряд типов моделей материала и методов, с помощью которых можно задавать свойства этих материалов.

MSC.Patran использует пять однородных (**Homogeneous**) типов материала, которые выбираются как **Object** на прикладной форме, относящейся к материалам.

### 7.1.2. Типы эластичных материалов

**Isotropic** (изотропный) – свойства одинаковы во всех направлениях (имеются две постоянные, определяющие упругие свойства материала:  $E$  и  $G$ ).

**2D Orthotropic** (плоский ортотропный) – свойства переменны в главных направлениях (шесть постоянных, определяющих упругие свойства материала).

**3D Orthotropic** (объемный ортотропный) – свойства переменны в главных направлениях (девять упругих постоянных и задаются матрицей свойств).

**2D Anisotropic** (плоский анизотропный) – свойства изменяются в произвольных направлениях (шесть упругих постоянных).

**3D Anisotropic** (объемный анизотропный) – свойства изменяются в произвольных направлениях (21 упругая постоянная).

### 7.1.3. Типы композитных материалов

В дополнение к однородным материалам можно задавать композитные материалы, которые базируются на «расслаивании» однородного материала, используя один из нескольких методов. Композиты – это сложные материалы, и MSC.Patran предоставляет для них несколько подформ для задания свойств материалов.

Для того чтобы задать композитный материал, необходимо определить однородные материалы, которые формируют слои, толщины каждого слоя, угловую ориентацию слоев относительно стандартных осей координат используемой модели. Ориентация особенно важна для ортотропных и анизотропных материалов, чьи свойства изменяются в разных направлениях.

Для композитных материалов используются четыре метода их конструирования (табл. 4). Два из них содержат более чем одно направление: существуют пять подметодов **Halpin-Tsai** и два подметода **Short Fiber**.

### 7.1.4. Стандартные модели (Constitutive Models)

В структурном анализе стандартные модели описываются зависимостью «напряжения в функции деформации», которая определяет свойства материала используемого в модели.

Примеры стандартных моделей:

**Упруго-линейный (Linearelastic)**: материал деформируется пропорционально прикладываемой силе и возвращается к своей первоначальной форме, когда нагрузка снимается. В простейшем случае этот тип материала может быть определен двумя коэффициентами:

1) модулем Юнга ( $E$ ), который устанавливает зависимость между напряжениями и деформациями,

2) коэффициентом Пуассона, который определяет деформации в различных ортогональных направлениях.

*Эластопластичный:* у этого материала зависимость «напряжение-деформация» линейно растет (эластичность), достигая определенного уровня напряжения, и затем не превышает его (пластика).

Можно определять много моделей для одного материала (таких как эластичная, пластичная, с ползучестью). Прежде чем начинать анализ, можно конфигурировать модели как **Active** (активные) и **Inactive** (неактивные). Можно использовать простую эластичную модель для проверочного расчета, сделав неактивными все другие сложные модели.

Таблица 4

*Методы конструирования композитных материалов*

Метод	Видоизменение	Алгоритм	Назначение к применению
1. <b>Laminate</b> (сложный)	Includes a choice of stacking sequence for structural analyses	Классическая теория слоев	Слоистые пластины и твердые тела
2. <b>Rules Of Mixtures</b> (правила перешивания)	Не определена	Объемно-весовое усреднение	Объемные композиты со сложными фазами, произвольной ориентации и произвольными объемными включениями (фракциями)
3. <b>Halpin-Tsai</b>	1. Непрерывное волокно ( <b>Fiber</b> ) 2. Дискретное волокно 3. Непрерывная лента 4. <b>Particulate.</b> (специфический)	<b>Halpin-Tsai</b> уравнения	Двухфазные композиты
4. <b>Short Fiber</b> (коротковолокнистый)	1. <b>1D</b> -композит 2. <b>2D</b> -композит	Интегрирование по методу Монте-Карло в комбинации с объемно-весовым усреднением	Коротковолокнистые композиты, чье расположение описывается распределением Гаусса или поверхностным



### 7.1.5. Определение свойства материала

После выбора типа модели, чтобы лучше отразить его поведение, нужно построить модель материала путем указания его соответствующих свойств.

Для того чтобы ввести величины свойств материала, можно использовать форму **Material Property**.

Поля свойств материала (**Material Property Fields**) – это поля таблицы в системе MSC.Patran, которые используются, чтобы описывать зависимости одной величины от другой. Можно использовать таблицы для многих применений, включая определение переменных свойств материала. Материалы могут изменять свои свойства в функции температуры, деформации, времени или частоты, и для описания этого можно использовать таблицы. В таблицы можно вводить цифровые данные.

Можно создавать таблицы, которые определяют распределение каких-либо свойств в отношении комбинаций температуры, деформаций или относительных деформаций. Материалы остаются в базе данных, пока их специально не удаляют. Можно использовать **Show Action** на панели **Materials**, чтобы просматривать в табличной форме или в виде *x-y*-зависимости свойства материала в функции температуры, деформации или относительных деформаций. Можно также показать общую жесткость и матрицу податливости.

### 7.1.6. Задание свойств моделей материалов

Модель материала – это группа свойств материала, которая описывает, из чего модель сделана и какие дополнительные свойства присущи материалу (плотность, жесткость и т. д.). Как только материал для модели определен, нужно использовать приложение **Element Properties**, чтобы назначить его какой-либо области модели объекта.

**Materials** – приложение – это та панель, в которой определяются материалы для анализируемой модели. Имеется большое количество опций для создания и модификации моделей материала.

Для того чтобы создать модель материала, необходимо в главном меню нажать на кнопку **Materials**, затем выбрать **Action**, **Object** и **Method** в ниспадающих меню на этой панели. Используя **Action**, можно создавать, модифицировать и удалять модели материалов.

В разделе **Action** можно задавать следующие операции:

**Create** – осуществляется ввод данных, описывающих свойства, и назначаются элементы конечно-элементной модели.

**Modify** – выполняются какие-либо изменения для **Existing Materials Property Data** (установленных свойств материала).

**Delete** – удаляются свойства материала из базы данных.

**Show** – показывается таблица со свойствами материала.

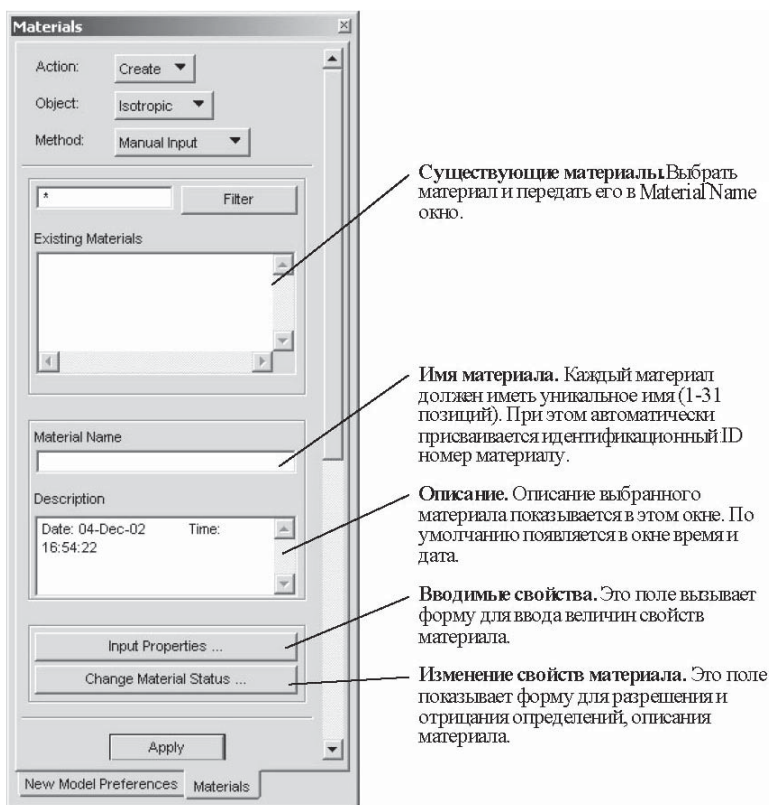
В разделе **Object** задаются типы материальных моделей, которые доступны в программе. Типы моделей и их описание подробно рассмотрены в разделе 4.

В разделе **Methods** определяется, как создается модель материала. Можно использовать один из двух способов:

1. **Manual Input** (ручной ввод) в разделе **Input Options**. Уже введенный материал можно использовать как шаблон для создания нового материала.

2. **Externally Defined** (внешнее определение) — для определения и назначения материалов вводится только имя. Материал задается внешним файлом. **Input Options** не требуются.

Пример панели для задания материала представлен на рис. 38. Большинство форм для ввода параметров материала подобны той, что показана на рис. 39.



**Рис. 38.** Панель **Materials** — создание, модификация набора материалов в базе данных MSC.Patran



**Учрежденная модель.** Выбирается учреждения модель в раскрываемом окне. Материал может иметь несколько учрежденных моделей.

**Значения свойств материала.** Вводится величины, необходимые для определения материала модели. Действительная форма для материала зависит от использования расчетной программы и типа материалов.

**Текущие учрежденные модели.** Установленные учрежденные модели и их статус (т. е. активны или неактивны). После того как это форма заполнена и записана кнопка Apply, появляются новые сообщения.

**Рис. 39.** Панель Input Options – ввод данных вновь создаваемого или модифицируемого материала

Для определения более чем одной учрежденной модели материала необходимо несколько раз вызывать эту форму и нажимать **Apply** каждый раз.

### 7.1.7. Статус учрежденной модели

Один материал может иметь несколько учрежденных моделей, таких как эластичная и неэластичная модель. Учрежденная модель, используемая в анализе, определяется статусом модели. Установленные и учрежденные модели материала появляются либо в **Active** (активном), либо в **Inactive** (неактивном) списке в окне текущего статуса. Выбор названия модели в любом списке окна автоматически перемещает его в другое окно.

### 7.1.8. Проверка модели материала

Независимо от того, как вводились свойства материала – вручную или из внешнего источника, имеется возможность проверить окончательную модель материала, прежде чем выполнять расчет конечно-элементной модели.

На панели **Materials** необходимо при заданном типе материала в разделе **Method** выбрать **Tabular** (табличный) и указать в окне **Existing Materials** название модели материала. По умолчанию на экране появится

панель **Input Options**, показывающая свойства материала. При выборе **Show Material Compliance...** (показать податливость материала) на экране появится панель, на которой будет таблица, называемая **Material Stiffness Matrix** (матрица жесткости материала).

## 7.2. Моделирование нагрузок

Наибольшее количество задач по анализу конструкций сводится к решению задач, которые моделируют поведение конструкции под действием внешних воздействий. Это могут быть силы, моменты сил, давление, температура, возможные магнитные поля. В терминологии анализа все эти воздействия называются нагрузками.

Также большое количество моделей имеет определенные условия, которыми задаются ограничения их поведения. Например, конец консольной балки закреплен в стене или адиабатические условия в тепловых задачах. Эти ограничения рассматриваются в качестве граничных условий. В дальнейшем нагрузки и закрепления часто сокращенно будут обозначаться как **LBCs**.

Имеется некоторое сходство в действии обеих этих величин. Нагрузки и закрепления приложены обычно к какой-либо части модели, и эти величины могут фактически действовать как нагрузки и как ограничения.

Характер нагрузок и граничных условий определяется характером решаемой задачи, а способы задания их в системе MSC.Patran зависят от типа вычислительной программы, используемой в данный момент с MSC.Patran, например MSC.Nastran или MSC.Dytran.

Нагрузки и граничные условия могут прикладываться как к геометрическим, так и к конечно-элементным объектам в базе данных MSC.Patran.

Отдельная модель может иметь много различных вариантов нагрузок и закреплений или серию нагрузок, приложенных в различное время и изменяющихся по частоте. Эта гибкость задания нагрузок позволяет пользователю получать ответ на разного вида одного и того же вопроса: «Что будет, если...?», используя одну и ту же конечно-элементную модель конструкции.

В системе MSC.Patran различные индивидуальные варианты нагрузок и закреплений группируются в наборы, называемые **Load Cases**, которые, по существу, определяют расчетные случаи.

В дополнение к не изменяющимся во времени и пространстве нагрузкам, приложенным к какой-либо области модели, можно задавать переменные по этим параметрам нагрузки. Эти изменяющиеся нагрузки задаются с помощью **Fields** (таблиц).

### 7.2.1. Варианты нагрузок, включаемые в блоки (Load Cases)

В системе MSC.Patran нагрузки и граничные условия трактуются как единый тип данных, которые отнесены к части геометрической или конечно-элементной модели. Эти данные зависят от типа анализа — вида решаемой задачи. Предварительная установка типа решаемых задач (**The Analysis Preference**) определяет опции, которые будут доступны при применении формы Loads/BCs в системе MSC.Patran.

Каждый из этих типов программ имеет свои собственные типы нагрузок и граничных условий, базирующихся на способностях программы, при использовании в тандеме с программой MSC.Patran.

Несмотря на это, имеются несколько базовых видов нагрузок и граничных условий, которые являются общими для наиболее употребительных программ анализа.

При решении задач структурного анализа конструкций обычно пытаются определить частотный отклик или устойчивость конструкции модели на физические нагрузки или структурное специфическое поведение. Некоторые из нагрузок и граничных условий, которые приняты в модели, могут включать силу, давление, скорость, инерционные нагрузки, перемещение, температуру и контактное взаимодействие.

При решении тепловых задач, которые определяют отклик модели и ее материалов на условия нагрева, включают нагрузки и граничные условия в виде тепловых источников, теплового потока, конвекции, радиации.

Необходимо отметить, что величины температуры, которые часто формируют выходные данные теплового анализа, могут быть впоследствии использованы в качестве нагрузок в других типах анализа, таких как структурный анализ. Использование выходных величин в качестве нагрузок поддерживается в MSC.Patran посредством таблиц, известных как конечно-элементные поля (**FEM fields**). Нагрузки и граничные условия при моделировании течения жидкости используют такие физические данные, как поля скоростей, давления, температуры.

#### *Блоки нагрузок (Load Cases)*

**Load Cases** содержит нагрузки и граничные условия, используемые при решении одного варианта задачи. Например, один нагрузочный блок может представлять нагрузки и граничные условия для каждого момента времени при решении задачи во временной области или один из вариантов нагрузок для решения статической задачи.

В блоке нагрузок могут быть заключены комплексные нагрузки для выполнения анализа одной модели или несколько вариантов нагрузок для анализа той же модели.

### **Fields** таблицы (числовые поля)

Одна из особенностей системы MSC.Patran заключается в том, что могут быть заданы таблицы, которые описывают изменение величин анализируемых свойств, включая нагрузки и граничные условия модели, свойства материала, свойства элементов.

Однажды определив набор таблиц, можно легко выбрать их как величины на дополнительной форме **Input Data** для **LBCs**, вместо того чтобы вводить постоянно. Система MSC.Patran может представлять список таблиц, которые доступны тогда, когда указывается соответствующее окно для ввода данных.

Существует четыре главных типа таблиц:

1. **Spatial Fields**. Это наиболее общий тип таблицы, описывающий свойства, которые изменяются по пространству модели. Это могут быть линейно изменяющиеся источники тепла, давление, изменяющееся квадратично поперек границ, или дискретно заданные свойства материала. Эти таблицы создают табулированием или используют математические выражения, описывающие пространственное распределение свойств.

2. **FEM Fields**. Эти таблицы базируются на предыдущих результатах анализа. Хорошим примером является использование результатов теплового расчета конструкции для определения тепловых нагрузок в прочностном расчете. Для того чтобы создать **FEM Field**, необходимо вывести на дисплей требуемые результаты теплового расчета, затем выделить на экране необходимые свойства и поместить их в таблицу.

3. **Time – Dependent Field**. Для решения задач во временной области, в которых используются нагрузки и граничные условия, зависящие от времени, или частотно-зависимые нагрузки, изменяющиеся с каждым шагом расчета, задаются математическими зависимостями или задаются таблично. Они помещаются в блок нагрузок, зависящий от времени или частоты.

4. **Material – Dependent Field**. Таблицы со свойствами материала могут иметь зависимость своих свойств от температуры и частоты.

В системе MSC.Patran информация о нагрузках и граничных условиях задается **LBC**-вариантом, который должен иметь свое имя, тип решаемой задачи (прочностная, тепловая, динамика жидкости), нагрузку или граничные условия, например, давление, перемещение, тепло или «впрыск» жидкости, **LBC**-варианты могут иметь либо статические, либо динамические нагрузки и граничные условия.

Нагрузки и граничные условия могут задаваться на геометрические или конечные элементы в разделе **Select Application Region**. Панель **Load Cases** для задания нагрузок построена так, что можно собирать номера блоков нагрузок и граничных условий в группе. Если не задан

вариант нагрузок, то все **LBC**-блоки заключаются в вариант нагрузок под именем **Default**.

Таким образом, чтобы создать нагрузки и граничные условия, которые изменяются во времени и пространстве, необходимо использовать **Fields** (таблицы). Сначала нужно создать таблицу, которая описывает изменения свойств, затем делать ссылку, когда задается **LBC**-блок.

### *Задание граничных условий (Loads/BCs)*

Используя эту панель, можно создавать, изменять, показывать диапазон нагрузок и граничных данных, определяющих нагрузку и закрепления.

Чтобы вызвать эту панель, необходимо в главном меню выбрать **Loads/BCs**, после чего появляется панель под названием **Load/Boundary Conditions**. В панели можно выбирать **Action, Object, Type** из ниспадающих меню. Содержимое нижней части этой панели зависит от типа таблицы данных.

#### **Возможные варианты основных разделов этой панели:**

##### **Actions**

**Create** – создает новый вариант в прочностном, тепловом расчете или расчете динамики жидкости;

**Modify** – изменяет какие-либо свойства или характеристики варианта;

**Delete** – удаляет выбранные варианты нагрузок из базы данных;

**Show Tabular** – показывает варианты данных в табличной форме;

**Plot Contours** – черчение контуров, показывает изображение контуров одинаковых свойств выбранных данных на модели;

**Plot Markers** – можно выборочно включать изображение маркеров для каждого варианта **Loads/BCs**, включая **ON** и **OFF** из этой формы. Когда создаются нагрузки и граничные условия для области модели, они автоматически показываются с маркерами. Маркеры могут быть в виде стрелок, окружностей, квадратов и т.п.

##### **Objects**

Содержание этого раздела зависит от типа применяемой задачи и типа применяемого расчетного пакета. Рассмотрим содержимое этого пакета для MSC.Nastran.

**Structural** – типы вариантов нагрузок: **Displacement** (перемещение), **Force** (сила), **Pressure** (давление), **Temperature** (температура), **Inertial Load** (инерционная нагрузка), **Initial Displacement** (начальное перемещение), **Initial Velocity** (начальная скорость), **Velocity** (скорость), **Acceleration** (ускорение), **Voltage** (электрическое напряжение).

**Thermal** – температура: **Convection** (конвенция), **Heat Flux** (тепловой поток), **Heat Source** (тепловой источник), **Initial Temperature**

(начальная температура), **Volumetric Heat** (объемный тепловой поток), **Pressure** (давление), **Mass Flow** (поток массы), **View factors** (факторы вида), **Voltage** (напряжение).

**Fluid Dynamics (CFD)** – динамика жидкости: **Inflow** (впуск), **Outflow** (выпуск), **Solid Wall** (твердая перегородка), **Symmetry**, **Volumetric Heat** (объемный нагрев), **Total Heat Load** (полное тепловое нагружение).

**Types** – в этом разделе выбирается тип объекта, к которому созданная нагрузка будет приложена, т. е. указываются элементы или их узлы.

**Nodal** – нагрузки и граничные условия, которые были созданы, будут связаны с узлами конечно-элементной модели. Например, если определены граничные условия по перемещениям в какой-либо области геометрической модели, MSC.Patran создаст соответственно граничные условия по перемещениям, которые будут приложены к каждому узлу этой геометрической области.

**Element Uniform** – нагрузки и граничные условия связаны с элементами конечно-элементной модели, и эти **LBCs** распределены равномерно (**Uniform**) по сторонам элементов.

**Element Variable** – нагрузки и граничные условия связаны с элементами модели, и **LBCs** изменяются относительно каждого элемента.

Пример показывает создание граничных условий по перемещениям с именем **DISP1**.

После выполнения последовательности **Action/Object/Type** в панели имеются несколько дополнительных полей для ввода, которые показаны на рис. 40.

Пример ввода данных и выбор панели для указания области приложения **LBC** представлен на рис. 41.

После выбора данных в этом окне необходимо нажать **Ok**, чтобы введенные данные попали в базу данных задачи.

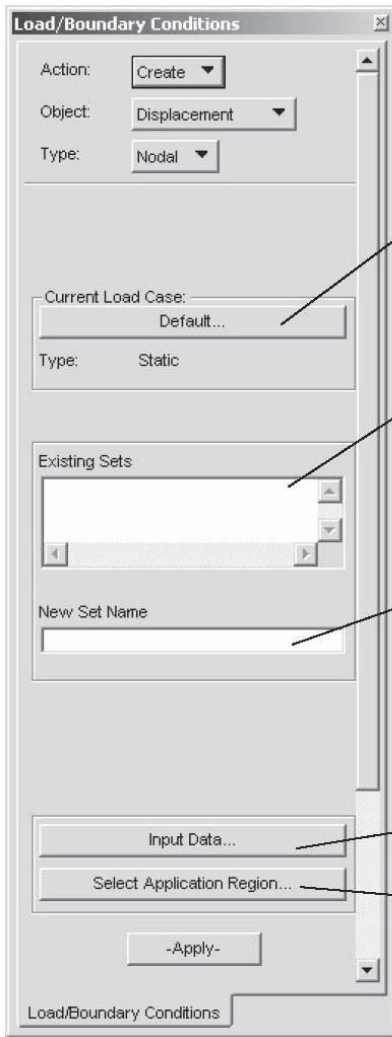
### *Блоки нагрузок (**Load Cases**)*

Нагрузочные блоки способны комбинировать большое число вариантов индивидуальных нагрузок в один связанный блок для применения его в модели. Каждый блок нагрузок имеет свое уникальное описывающее имя.

Информация по нагрузкам из блока первоначально сохраняется в базе данных (пока не стертой). Ее можно изменять (**Modify**) в любое время.

Даже если не созданы блоки нагрузок и граничных условий, они будут по умолчанию помещены в текущий блок, называемый **Default**.





**Current Load Case** – определение текущего расчетного случая, выбирается из списка существующих (созданных с помощью функции Load Case).

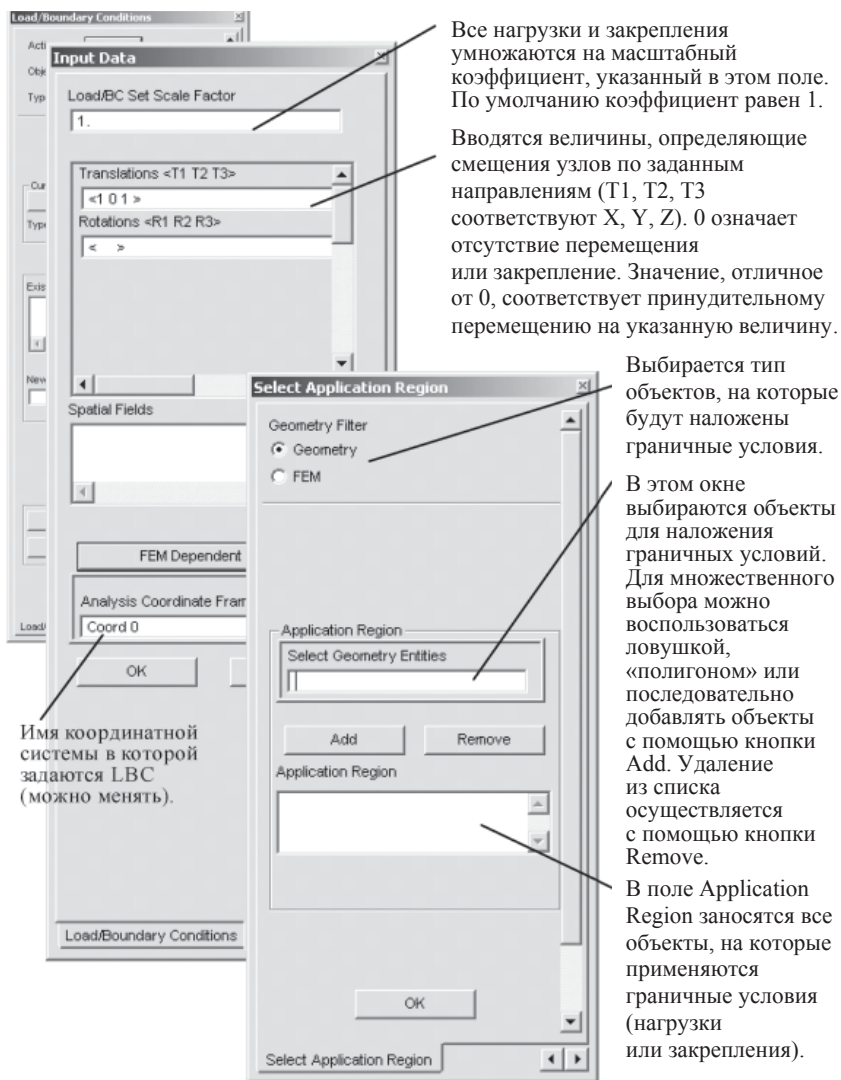
**Existing Sets.** В этом окне указываются все существующие наборы данных (для выбранного объекта).

**New Set Name.** Набирается новое имя набора (уникальная комбинация, состоящая из латинских букв и цифр).

**Input Data.** Показывает форму для указания соответствующих данных для выбранного типа нагрузки или закрепления.

**Select Application Region.** Показывает форму для выбора объектов, на которые будут приложены те или иные нагрузки или закрепления.

**Рис. 40.** Панель Load/Doundary Conditions – создание, модификация данных по нагрузкам и закреплениям в базе данных MSC.Patran

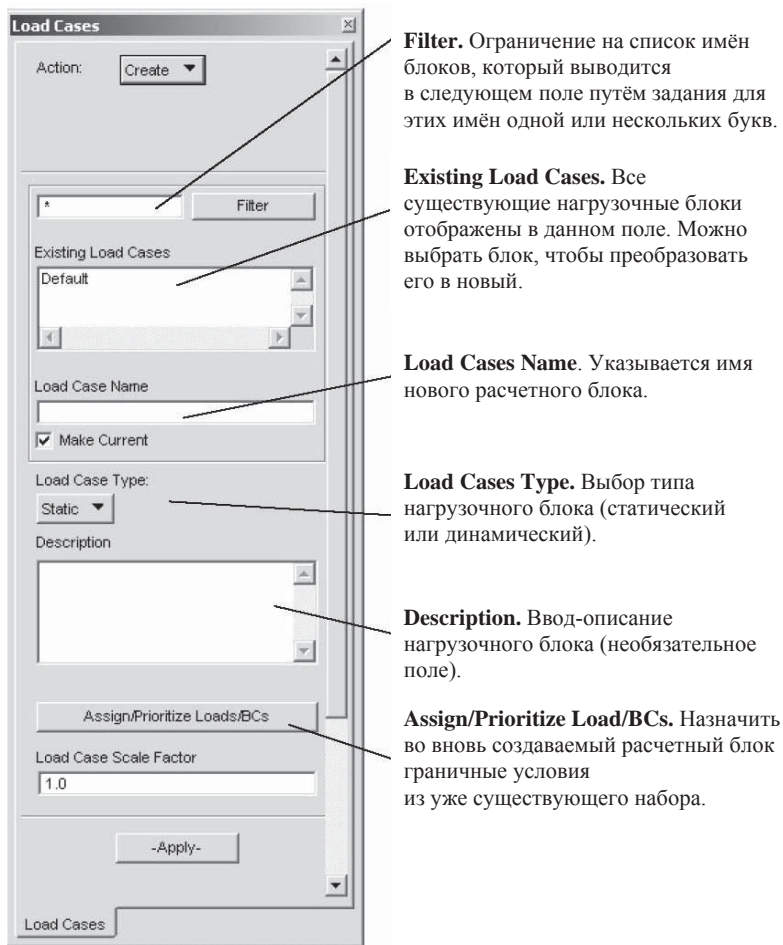


**Рис. 41.** Панели ввода данных об амплитуде и месте приложения нагрузок и закреплений в базе данных MSC.Patran

Если создан специальный блок нагрузок и он задан как текущий (т. е. исполняемый с заданной задачей), тогда все последующие **LBCs** будут помещаться в этот блок до тех пор, пока он будет являться текущим.

Блок нагрузок, в которых нет учрежденных (созданных, но не представленных в варианте исполняемого расчета) вариантов нагрузок и граничных условий, имеющих компоненты, зависящие от времени, называются статическими нагрузочными блоками, в противном случае — динамическими нагрузочными блоками.

Чтобы использовать **Load Cases**, нужно в главном меню выбрать эту опцию, появится панель, на которой имеется только одна опция **Action** (рис. 42), все другие панели появляются в зависимости от того, что выбрано в **Action**.



**Рис. 42.** Панель Load Cases — создание, модификация вариантов расчетных случаев в базе данных MSC.Patran

Можно выбрать следующие действия в панели **Load Cases**:

1. **Create** – создается новый блок нагрузок или удаляется, модифицируется уже установленный блок.

2. **Modify** – модифицируется уже существующий блок путем изменения имени, типа описания, включая **Loads/BCs**-варианты, можно также изменить описание текущего блока нагрузок.

3. **Delete** – удаляется блок нагрузок из базы данных. Если требуется, можно также удалить **Loads/BCs**-варианты, связанные с удаленными нагрузочными блоками.

4. **Show** – показывается информация относительно всех нагрузочных блоков в базе данных. Для каждого **Load Case** (блока нагрузок) показывается имя, тип, описание и список назначенных вариантов нагрузок (**Loads/BCs Set**). Отмечается, какой из блоков нагрузок является рабочим и «текущим».

5. **Assign/Prioritize/Load/BCs** – назначается частный вариант нагрузок в нагрузочный блок, разрешение потенциальных конфликтов между **Load/BCs** вариантов среди данного блока нагрузок, назначение масштабных факторов нагрузочному блоку и нагрузочным вариантам в нагрузочном блоке.

В панели можно изменять операции (**Action**), которые создают новые блоки нагрузок, удаляют и модифицируют их. Можно учреждать новый блок нагрузок как рабочий блок. Все вновь созданные варианты **LBCs** помещаются в текущий рабочий блок нагрузок.

В некоторых анализируемых моделях частично вводимые опции для свойств элементов, материалов, нагрузок и граничных условий непостоянны, они изменяются как функции размеров пространства, времени, температуры или других переменных. В таких ситуациях используются таблицы. Примером может служить вариант пластины, в которой изменяется толщина, действует пульсирующее давление, и ее материал имеет свойства, зависящие от температуры или от напряжений.

Структура применяемых таблиц гибкая и обобщенная. Можно создавать таблицы из рассчитанных данных (таблиц), математических выражений, записанных по правилам языка **PCL** или из скалярно-векторных результатов, полученных с конечных элементов рассчитанной модели.

Таблицы, применяемые в системе MSC.Patran, снабжены интуитивными формами, которые можно создавать и модифицировать. Таблица, которая необходима и уже создана, выбирается в базе данных как одна из заданных прикладных форм.

Для того чтобы использовать таблицы, необходимо в главном меню выбрать **Fields**.

В ниспадающем меню выбрать **Action, Object** и **Method**. Содержание появляющихся в дальнейшем панелей зависит от выбора в меню **Action**. В этом меню можно выбрать следующие варианты:

1. **Create** – создается новая таблица, в которой могут быть пространственные поля, свойства материала. Можно создавать новую таблицу на основе старой. Большинство таблиц выполняется на основе табулирования данных или **PCL**-функций.

2. **Show** – показываются все табличные варианты данных в табличном формате.

3. **Modify** – модифицируется содержимое существующей таблицы.

4. **Delete** – удаляется выбранная таблица. Типы таблиц обычно задаются с помощью раздела **Object** на панели **Field**:

**Spatial** – пространственные таблицы обычно определяют давление или температуру в **LBC**-варианте, которая изменяется в пространстве по поверхности объекта.

Можно использовать это для определения свойств элементов, таких как толщина. Также можно определить перемещение и другие нагрузки. Пространственные поля могут быть выражены скалярными величинами или векторами. Можно указывать применяемые области в каком-либо реальном или параметрическом пространстве одного, двух или трех измерений. Можно использовать несколько таблиц в одно и то же время.

**Non-Spatial** – непространственные таблицы задают нагрузки и граничные условия, зависящие от времени (частоты), или свойства материалов, зависящие от частоты.

**Material Property** – эти таблицы выбираются в форме **Input Options** для задания свойств материалов в форме модулей и т. д. Эти таблицы могут быть одно-, двух- или трехмерными с независимыми переменными, в качестве которых могут задаваться температура, деформация, относительная деформация, время или частота (по одной или в комбинации).

Для ввода данных в таблице используются методы, которые приведены в разделе **Methods**.

**PCL Function** – используется **PCL** выражение для вычисления табличных значений;

**Tabular Input** – извлечение данных из таблицы для определения табличных значений;

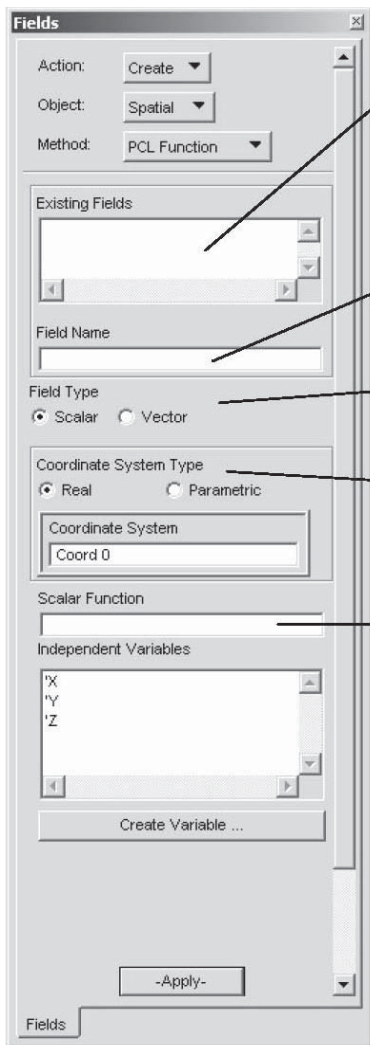
**General Field** – можно использовать эту опцию, чтобы создать числовое поле для какого-либо типа **Object**. Числовые данные описываются математической функцией, составленной на языке **PCL**.

**FEM-FEM** – числовые поля, связанные с конечно-элементной моделью. Используя этот метод, можно по карте данных из одного варианта расчета создать **LBCs** для другого рабочего варианта расчета.

### Пример формирования числовых полей (таблиц)

Рассмотрим панель, с помощью которой можно создать скалярную или векторную пространственную функцию в реальном или параметрическом пространстве, используя PCL-выражение или функцию PCL, уже содержащуюся в системе MSC.Patran.

Сначала необходимо в панели **Fields** задать **Create/Spatial/PCL Function** (рис. 43).



**Existing Fields.** В данном окне указаны имена существующих полей. Выбрав из списка, можно создать новое поле на основе существующего.

**Field Name.** Поле используется для ввода нового или модификации существующего.

**Field Type.** Выбирается один из двух типов – векторный или скалярный.

**Coordinate System Type.** Выбирается тип Real, если поле задается в пространстве  $x, y, z$ , или Parametric, если поле определяется в параметрических координатах.

**Scalar Function.** Вводится функция PCL, определяющая таблицу.

Рис. 43. Панель Fields – создание, модификация таблиц в базе данных MSC.Patran

Выполнив **Apply**, создают таблицу, затем система будет ожидать ввода нового имени таблицы, которое появится в поле ввода **ExistingFields**.

### *Проверка модели нагрузок и граничных условий (LBC Model)*


Ошибки в нагрузках и граничных условиях представляются одними из наиболее коварных, которые могут быть в анализируемой модели, кроме того, они потенциально наиболее серьезны. Например, вариант нагрузок, обозначенный на модели, может выглядеть так же, как в 10 раз большая величина, которая вызовет серьезные различия в результатах решения.

Аналогично, граничные условия, приложенные к некоторому количеству разрозненных конечных элементов, могут изображаться так же, как если бы они были приложены к одному ребру геометрической модели.

Эти обстоятельства требуют перед решением задачи практического подхода к анализу нагрузок и грамотного задания условий. Имеются два простых пути для проверки нагрузки и граничных условий, которые прилагаются к модели:

- 1) визуальная проверка, используя графическое изображение для проверки нагрузок и граничных условий, приложенных к модели;
- 2) численный контроль, в котором производится проверка действительных величин, используемых для нагрузок и граничных условий в табулированной или отчетной формах.

Как обсуждалось ранее, в меню **Loads/BCs** предоставляется два главных способа графического изображения **LBC**-данных на модели: изображение маркеров и изображение контуров равных уровней нагрузок. Первый способ выполняется автоматически в большинстве случаев моделирования нагрузки и граничных условий. Всякий раз, когда создаются или модифицируются **LBC**-данные, маркеры изображаются на модели по умолчанию. Эти символы кодируются цветом и формой, соответствующих заданным **Loads/BCs**. Эти символы становятся постоянной частью изображения до тех пор, пока не будут явно удалены.

Меню **Display  Loads/BCs/EI.Props** (рис. 44) может быть использовано для управления включением, выключением, изменением цвета или изображением этих символов.

В дополнение можно принять **Show on FEM**, включив изображение **LBC**-данных только для конечных элементов, даже если они первоначально были приложены к геометрии.

Это может представлять важную дополнительную форму визуальной проверки, потому что символы, изображенные на геометрической модели, только показывают линию, определяемую в **Display/Geometry**-меню.

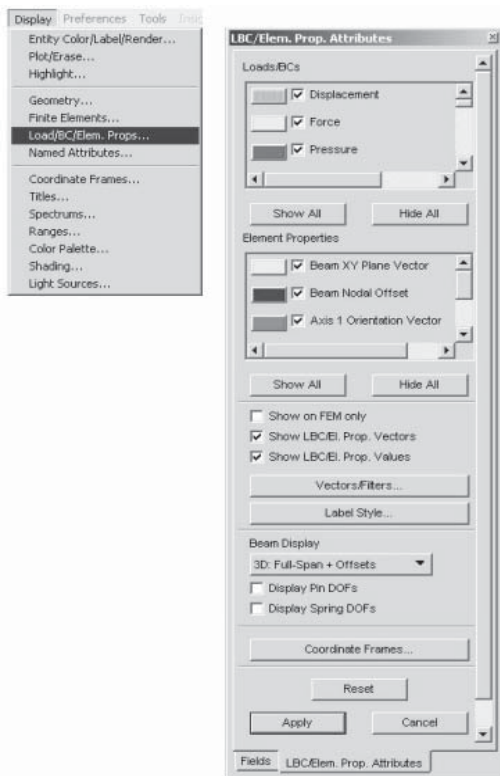


Рис. 44. Меню Display – LBC/Elem. Prop. Attributes

Включением **Show FEM Only** вызываются символы, которые изображаются на каждом узле или элементе конечно-элементной модели, которая более точно показывает, как программа анализа будет воспринимать нагрузки и граничные условия.

Для скалярных величин в качестве альтернативной формы изображения используется **Plot Contours Action** – для изображения цветного граничного контура (**Fringe**) величин нагрузок, имеющих одинаковые значения на поверхности модели. Иногда эти линии называют линиями равного уровня величин. Скалярные величины могут быть действительно скалярными величинами (такие как температура) или быть скалярными компонентами векторных величин (такой как  $x$ -составляющая приложенной силы).

Спектр величин и цветовая кодировка для этих контуров будет перекрывать диапазон величин по умолчанию, но он может быть модифицирован, используя меню **Display/Spectrums**. Когда не нужно больше



показывать изображения контуров, то, выбрав кнопку **Reset Graphics** на панели меню **Plot Contours**, можно убрать изображение.

Для того чтобы проверить числовые значения нагрузок и граничных условий, можно использовать **Show Tabular Action** на панели **Loads/BCs**, чтобы создать список – таблицу, показывающую данные для рабочего блока нагрузок.

Для того чтобы просмотреть другие варианты нагрузок, необходимо сделать этот вариант нагрузок рабочим (используя **Load/BCs** и **Load Cases**).

Другая, более важная, форма проверки – это, не делая ничего с программой, внимательно оценить данные расчета по программе в отношении того, что можно получить в реальном объекте.

Если анализируемые результаты кажутся большими или меньшими, чем ожидалось, то сначала нужно найти противоречие в величинах нагрузок и граничных условий. Вместе с проверкой других величин, таких как материал, свойства элементов, соответствующая проверка нагрузок и граничных условий помогает создать запас доверия к точности процесса моделирования.

## 8. КОНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ СВОЙСТВА

В главном меню имеется раздел **Properties**, который предназначен для работы со свойствами элементов: создание, модификация, удаление, просмотр вариантов свойств, связанных с индивидуальными типами элементов, назначение этих свойств геометрическим или конечно-элементным категориям модели.

Имеется несколько типов элементов: **Shell** (оболочка), **Beam** (балка), **Rod** (стержень), **Spring** (пружина). Например, для оболочки в качестве ее свойства задается толщина стойки, для пружины (упругого элемента) задается коэффициент жесткости, для балки – площадь и форма поперечного сечения. Материалы также являются свойствами элементов и назначаются через установленные варианты свойств элементов модели.

Для разных типов задач или расчетных пакетов при задании свойств элементов используются опции, которые предназначены для этих задач или пакетов. Поэтому необходимо обратиться к документации соответствующего пакета, чтобы выяснить особенности назначения свойств элементам.

В опциях часто используются специальные названия для обозначения элементов с сочетанием свойств. Например, в MSC.Nastran наиболее часто используемым элементом является **Standard Homogeneous Plate** (пластина со стандартными однородными свойствами). Этот элемент является комбинацией опций: **2D**, **Shell**, **Standard Homogeneous** и **Quad 4** топологии.

Рассмотрим несколько важных положений и функций, которые используются в свойствах элементов в MSC.Patran.

### 8.1. Типы элементов

Типы элементов помогают определить физические характеристики модели.

При анализе конструкций с помощью MSC.Nastran (структурный анализ) используются элементы, типы которых перечислены в табл. 5.

Из таблицы можно заключить, что двумерный (**2D**) плоский элемент (**Plane Element**) может быть оболочкой, изгибаемой панелью, двумерным твердым элементом, мембраной или сдвигаемой панелью. Каждый из этих типов элементов может быть сконструирован на основе одинаковой топологии элемента (прямоугольная или треугольная форма (**Quad**, **Tria Shape**) с разным расположением узлов), но они принимают соответствующие свойства, когда указывается тип элемента и его атрибуты (определения).

Типы элементов, использующихся при анализе конструкций

Размерность	Тип элемента
<b>0D</b> (точка – <b>point</b> )	Масса, заземленные жесткость и демпфер ( <b>mass, grounded spring, damper</b> )
<b>1D</b> (линия – <b>line</b> )	Балка ( <b>Beam</b> ), стержень ( <b>rod</b> ), упругость ( <b>spring</b> ), демпфер ( <b>damper</b> ), «зазор» ( <b>gap</b> ), <b>1D Mass</b>
<b>2D</b> (плоскость – <b>plane</b> )	Оболочка ( <b>shell</b> ), изгибаемая панель ( <b>bending panel</b> ), двумерное твердое тело ( <b>2D-solid</b> ), мембрана ( <b>membrane</b> ), сдвигаемая панель ( <b>shear panel</b> )
<b>3D</b> (объем – <b>volume</b> )	Твердое тело ( <b>solid</b> )

Атрибуты имеют важное значение, т. к. они отличаются характеристиками, которые показывают соответствие структуры условиям нагружения, например, будут ли напряжения или деформации соответствовать плоскому напряженному состоянию или сколько степеней свободы будет в конструкции.

## 8.2. Моделирование балочных элементов и библиотека балочных элементов MSC.Nastran

Моделирование конструкций сочетаниями балочных элементов может быть более сложной процедурой, чем моделирование с использованием оболочек (**Shell**), пластин (**Plane**) или твердых тел (**Solid**).

Сначала необходимо определить изгибную жесткость, жесткости на растяжение и кручение, которые могут быть комплексными функциями поперечных сечений. Затем необходимо определить ориентацию поперечного сечения в пространстве и, если центр тяжести поперечного сечения смещен от двух узлов, определяющих балочный элемент, то это смещение необходимо задать напрямую. В системе MSC.Patran имеется ряд инструментов, упрощающих указанные аспекты моделирования.

Чтобы облегчить моделирование балочных структур, в системе MSC.Nastran имеется специальная библиотека этих элементов, которая расширяет имеющиеся в MSC.Patran базовые свойства элементов. Библиотека элементов – это наиболее простой способ определения свойств для стандартных поперечных сечений балок. Они включают специальные функции для двутавровых балок, трубопроводов, трубчатых балок и т.п.

Опции для двумерных элементов

Размер	Тип	Опция 1	Опция 2	Топология
2D	Shell (оболочка)	1. <b>Homogeneous</b> 2. <b>Laminate</b> (слоистый) 3. <b>Equivalent Selections</b> (эквивалентные сечения)	<b>Standard, Revised</b> (исправленный), <b>P-element</b> <b>Standard, Revised</b> <b>Standard, Revised, P-element</b>	<b>Quad</b> и <b>Tria</b> с измененным числом узлов
	<b>Bending Panel</b> (избираемая панель)	<b>Standard, Revised, P-element</b>		<b>Quad</b> и <b>Tria</b> с измененным числом узлов
	<b>2D-Solid</b>	1. <b>Axisymmetric</b> (осесимметричный) 2. <b>Plane Strain</b> (растянутая панель)	<b>Standard, Revised</b>	<b>Quad</b> и <b>Tria</b> с измененным числом узлов
	<b>Mebrane</b> (мембрана)	<b>Standard, Revised</b>		то же
	<b>Shear Panel</b> (панель, работающая на сдвиг)			то же

Рассмотрим список возможных комбинаций опций для двумерных элементов, применяемых в MSC.Nastran (табл. 6).

Для того чтобы назначить набор свойств элементам, из которых построена модель, необходимо использовать **Application Region** на панели **Element Properties**. Можно указать **Application Region** как набор одного или более **FEM** или геометрических элементов. Можно напечатать имена этих элементов или выбрать их на изображении модели на экране.

Свойства, назначенные на геометрические объекты, будут переопределены после разбивки на конечные элементы. Если на модели изменялась сетка конечных элементов, свойства, назначенные на **FEM**-элементы, должны быть вновь заданы. В случае если используется другой расчетный пакет, то свойства элементов должны быть модифицированы,

т. е. подобран ближайший равносильный по свойствам тип элемента. Свойства элементов – это информация, которую требует используемый расчетный пакет. Она включает такие параметры, как толщину, коэффициент жесткости, площадь, степени свободы, смещения, направления, массу, имя материала и т.п.

Каждое свойство – это специальный формат данных. Существует девять форматов свойств: **Integer** (целые), **Real Scalar** (действительный скалярный), **Real Scalar List** (список действительных скаляров), **Vector** (вектор), **Material Name** (имя материала), **Character String** (знаковая строка), **Node** (узел), **Coordinate Frame** (система координат), **Nodal Field Name** (имя списка узлов). Каждое свойство классифицируется как одно из этих форматов.

Каждый вариант свойств элемента имеет назначенное имя и номер. Имя назначается пользователем и может иметь значение от одного до 31 символа. Число в системе MSC.Patran присваивается последовательно. Для того чтобы увидеть номера свойств, необходимо выполнить опцию **Show/Marker Plot**.

Числовые поля **Field** или таблицы – это скалярные или векторные свойства, которые являются функциями не более трех переменных.

Имя числового поля имеет префикс  $f$  и может определять таблицу или **PCL**-выражение. Примером может быть распределение толщины пластины. Поля обычно определяют распределенные свойства, которые изменяются по пространству элемента или элементов.

В приложении **Element Properties** действие **Show** позволяет выбирать маркеры для отображения областей, скалярных областей, табулированных областей для просмотра свойств, которые были назначены областям модели.

Если выбрать **Show/Marker Plot**, то можно увидеть маркеры, графические символы, которые обеспечивают видимую обратную связь относительно расположения, величины и направления показа свойств элемента.

Для того чтобы удалить их с экрана, необходимо выключить **General Marker display** в меню **Display/Functional Assignments menu** и нажать на иконку **Broom** (метла), чтобы очистить экран.

Для того чтобы увидеть свойства элементов в виде графических границ (**Fringe Plot**), необходимо выбрать **Show/Scalar Plot**.

Чтобы убрать изображение с экрана, нужно войти в меню **Display/Finity Types** и изменить **Render Style** (перевод стиля) на **Wireframe** (каркас) или щелкнуть по кнопке **Broom** (метла), чтобы очистить экран.

Другой способ просмотра изображения свойств элементов в модели – это изображение таблицы, в которой выводится список элементов с выбранными свойствами в текущем изображении модели на экране

или изображение списка со следующими столбцами: **Set Name(s)**, **Property Type**, **Value**. Чтобы выполнить это, необходимо воспользоваться **Show/Tabular Plot**.

### 8.3. Задание свойств элементам

Тип конечного элемента, которому присваиваются свойства, задается через панель **Elements Properties**, затем эти свойства присваиваются областям модели, которые могут быть выражены как геометрические или как конечно-элементные. Тип выбираемого конечного элемента базируется на размерности модели и представлений о ее поведении как моделируемой конструкции. Дополнительные свойства описываются атрибутами, которые задают толщину пластины (коэффициент жесткости упругого элемента, площадь бруска элемента, материал и т. д.).

Свойства элемента группируются в набор свойств (**Set**), который имеет отдельное имя и назначается для одного расчетного пакета, типа решаемой задачи, типа элемента, например, **MSC.Nastran/Structural/Shell**. Свойства элемента, которые изменяются, задаются с помощью числовых полей (**Fields**).

Доступ к панелям свойств осуществляется через главное меню. После появления панели под названием **Elements Properties** (рис. 45), необходимо в ней указать **Action**, **Dimension** (размерность элемента), **Type** (тип элемента).

Рассмотрим возможные варианты разделов:

#### **Actions**

**Create** – ввести свойства элементов и назначить их выбранным **FEM** или геометрическим элементам;

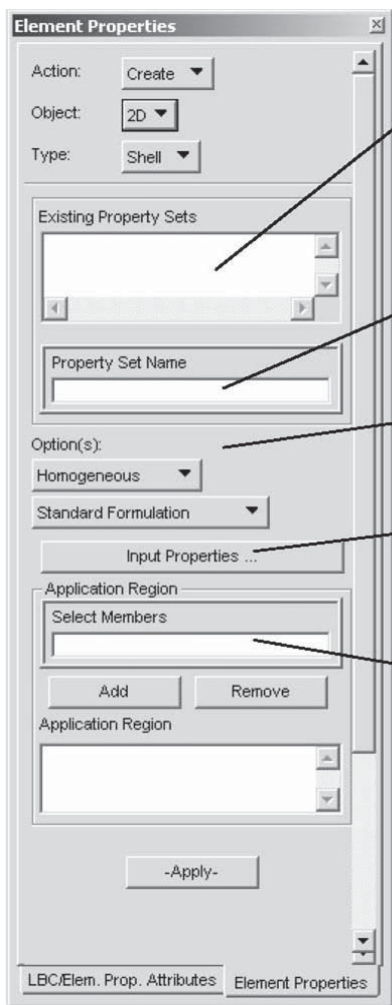
**Modify** – выполнить требуемые изменения в установленных вариантах свойств;

**Delete** – удалить варианты свойств из базы данных;

**Show** – показывать список **FEM** или геометрических элементов с назначенными свойствами. Создать скалярное векторное изображение или изображение маркеров (значков), соответствующих выбранным свойствам;

**Dimension and Types** (размерность и типы): **0D** (точечные элементы) – **Mass**, **Grounded Spring**, **Grounded Damper**;

**1D** (линейные элементы) – **Beam**, **Rod**, **Spring**, **Damper**, **Gap**, **1D Mass**; **2D** (плоские элементы) – **Shell**, **Bending Panel**, **2D-Solid**, **Membrane**, **Shear Panel**; **3D** (объемные элементы) – **Solid (Standard или P-element)**. На рис. 45 показана панель опций для ввода дополнительных данных для элемента (**Quad 4**).



**Existing Property Sets.** Список существующих наборов свойств.

**Property Set Name.** Указывается новое имя или модифицируется уже существующее.

**Options.** Поле дополнительных опций свойств. Данное поле зависит как от типа расчетной программы, так и от вида свойств.

**Input Properties.** Кнопка, отвечающая за вызов дополнительного меню, в котором указываются все необходимые параметры для выбранного типа свойств (см. рис. 46).

**Select Members.** Данное поле предназначено для выбора объектов, на которые будут приложены свойства. После того как объекты выбраны, их необходимо перенести в поле Application Region с помощью кнопки Add.

**Рис. 45.** Панель Element Properties – создание, модификация набора свойств конечно-элементной сетки в базе данных MSC.Patran

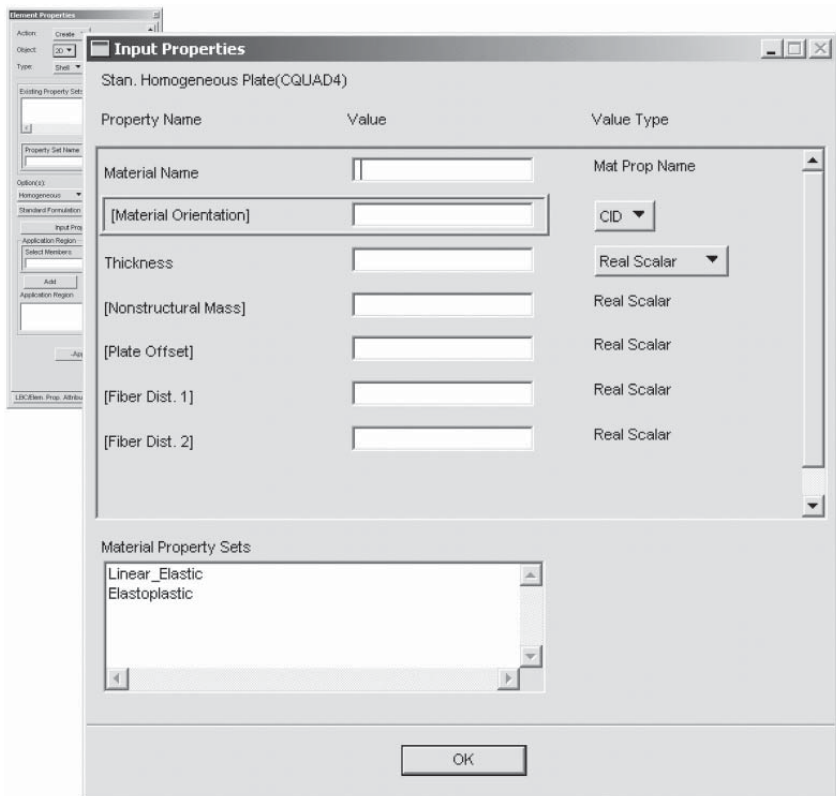


Рис. 46. Панель Input Properties – ввод данных для выбранного типа элемента



## 9. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ В СИСТЕМЕ MSC.PATRAN-NASTRAN

Система MSC.Patran предоставляет пользователю возможности пре- и постпроцессора при использовании различных пакетов вычислительных программ для анализа модели и генерации результатов. Фирма MSC.Software предоставляет патентованные прикладные модули (**Application Modulus**) и также интерфейсы (**Preference interfaces**) для нескольких популярных вычислительных программ (ABAQUS, ANSYS и т.п.). В дополнение к этому MSC.Patran предоставляет пользователю возможность создавать собственные интерфейсы, соответствующие типу решаемой задачи, с помощью пользовательского инструментария языка **PCL (Patran Custom Language)**.

Если имеется модель с завершенным геометрическим построением, заданными свойствами, то необходимо выбрать вычислительную программу и быть готовым выполнить ряд настроек, чтобы представить модель для расчета и генерации результатов.

Кратко перечислим действия, которые необходимо выполнить при представлении модели для расчета.

1. Выбрать вычислительный пакет, в среде которого будет выполняться задача, т. е. MSC.Nastran, MSC.Dytran, ANSYS и т.п.
2. Определить тип решаемой задачи (статический, динамический расчет или какой-либо другой).
3. Выбрать последовательность нагрузочных блоков (**Load Cases**).
4. Выбрать требуемые данные для вывода.
5. Выполнить решение задачи.
6. Считать результаты решения в MSC.Patran или прикрепить (**Attach**) файлы результатов для обработки постпроцессором.

Рассмотрим содержание вычислительных программ, используемых системой MSC.Patran напрямую:

– MSC.Nastran представляет большие возможности для выполнения различных задач анализа и оптимизации линейных и нелинейных систем, а также для решения тепловых задач. MSC.Nastran представляет широкий диапазон типов задач для анализа механических напряжений, вибраций, динамики, нелинейностей, акустики, аэроупругости, теплопередачи в различных конструкциях и их механических компонентах;

– MSC.Advanced FEA представляет повышенные возможности для решения нелинейных прочностных и тепловых задач, которые включают нелинейности во многих местах модели и сложные модели материалов. Эта программа способна эффективно решать исключительно большие задачи;

– MSC.Partran FEA представляет основные возможности для решения линейных и нелинейных тепловых задач и задач прочности и устойчивости конструкций. В этом случае не требуется применение программы MSC.Nastran. Имеется несколько специальных программ, которые также хорошо взаимодействуют с системой MSC.Partran.

– MSC.Termal представляет возможности для решения больших тепловых задач, вводя в рассмотрение такие процессы, как теплопередачу, конвекцию, радиацию и нагревание;

– MSC.Dytran позволяет решать задачи с высоконелинейными, быстропротекающими динамическими процессами, характеризуемыми большими искажениями структуры, или задачи взаимодействия жидкости с конструкцией;

– MSC.Fatigue – это мощный пакет для оценки усталостной прочности, который предоставляет проверенные искусством усталостного проектирования методики, которые могут быть использованы для оптимизации работы конструкции в эксплуатации еще на стадии проектирования;

– MSC.Droptest позволяет определить деформации и другие дефекты, которые могут появиться в результате падения изделия с разной высоты на поверхности с разными характеристиками.

## 9.1. Основные типы задач

Создание базы данных для модели начинается на стадии использования препроцессора, в среде которого выбираются используемая вычислительная программа и тип решаемой задачи, например – структурный анализ. В будущем выбираются конкретная задача и внешние условия, соответствующие этой задаче.

Тип решаемой задачи – это часть используемой вычислительной программы, которая предназначена для вычисления конкретных характеристик, соответствующих ему.

Например, если в решении будет использована вычислительная программа MSC.Nastran, то необходимо выбрать еще конкретную решаемую задачу из предоставленных этой системой: статический расчет конструкции (линейный), статический расчет конструкции (нелинейный), модальный анализ (вычисление частот и форм собственных колебаний), расчет устойчивости конструкции, вычисление комплексных частот и форм колебаний, вычисление амплитудно-частотных характеристик конструкций (**Frequency Response**), вычисление переходных и установившихся характеристик в функции времени для нелинейной системы (**Nonlinear Transient**).

Разные типы задач исследуют разные характеристики модели и часто требуют разных типов нагрузок и начальных условий. Каждый тип задач использует соответствующую этой задаче систему уравнений для получения результатов решения. Результаты решения должны быть затем преобразованы в форму, воспринимаемую системой MSC.Patran, для того чтобы затем использоваться в пост-процессоре.

В системе MSC.Patran имеется ряд панелей для вывода результатов в требуемой форме.

## 9.2. Настройка расчетного пакета, проведение расчетов

Различные расчетные пакеты, типы решаемых проблем и задач требуют разных вариантов форм элементов, конфигурации узлов, свойств материалов, свойств элементов, нагрузок и граничных условий. Когда база данных модели представляется для решения в каком-либо расчетном пакете, то MSC.Patran позволяет выбрать только те опции, которые поддерживаются выбранным расчетным пакетом. Если произвести переопределение на другой расчетный пакет, то после этого потребуются переопределение многих частей модели.

После того как закончено построение конечно-элементной модели (под этим подразумевается также задание граничных условий и нагрузок), нужно использовать панель **Analysis** для задания параметров решения и его начала.

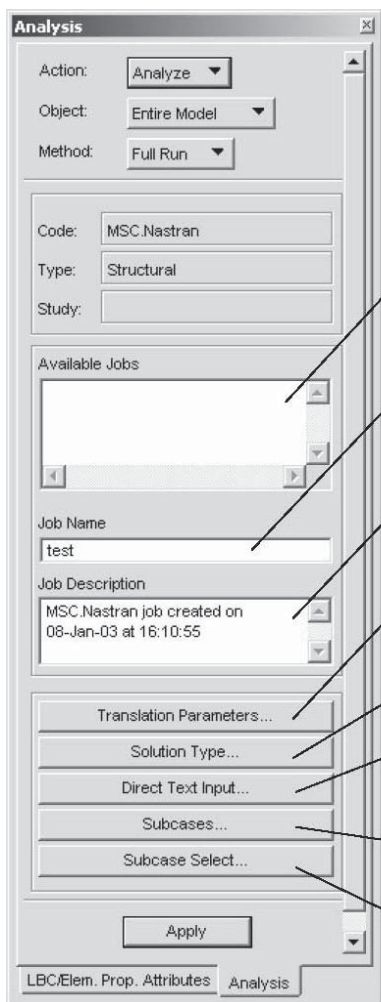
Панель **Analysis** (рис. 47) построена по известному принципу – в ней присутствуют разделы **Action, Object, Method**.

**Action** – этот раздел зависит от принятой расчетной программы. В типичном случае в этом разделе можно выбрать **Analysis, Read Results, Read Input**. При анализе выбирается только **Analysis**.

**Object** – предназначен для указания, какая часть модели будет включена в анализ – целая (**Entire Model**) или установленная группа элементов (**Current Group**). В большинстве случаев выбирается целая модель.

**Methods** – в этой панели указывается, насколько полно будет выполняться анализ. Можно указать: **Full Run** (создание исходного файла для проведения расчета и проведение расчета), **Check Run** (проверочный запуск), **Analysis Deck** (создание исходного файла для проведения расчета), **Model Only** (проверка модели).

При выборе **Full Run** выполняется требуемая трансляция и расчетная программа запускается для решения задачи.



**Available Jobs.** Список доступных задач для решения.

**Job Name.** Поле, в котором определяется имя задачи, т.е. наименование выходного файла.

**Job Description.** Поле, в котором описывается задача (необязательное).

**Translation Parameters.** Кнопка для вызова дополнительной формы, в которой выбираются параметры трансляции информации (в частности тип выходного файла после расчета).

**Solution Type.** Кнопка выбора необходимого типа решения.

**Direct Text Input.** Показывается форма для ввода произвольной информации в исходный файл для расчета.

**Subcase Create.** Показывается форма для создания расчетного случая в выходном файле.

**Subcase Select.** Показывается форма для выбора одного или нескольких расчетных случаев, которые будут принимать участие в расчете.

**Рис. 47.** Панель Analysis – подготовка модели к расчету и импорт результатов

Выбор типа задачи осуществляется в панели (рис. 48) после нажатия кнопки на панели **Solution Type** (рис. 47).

### 9.3. Запуск решения задачи

Эта процедура зависит от того, какой модуль выбран для анализа, какая используется вычислительная программа, какой тип анализа производится. На все эти вопросы нужно ответить в огромном количестве форм, которые появляются на экране при запуске задачи.



Рис. 48. Выбор типа расчета

Имеется несколько сценариев для выполнения анализа с MSC. Nastran. Каждый сценарий иллюстрирует, как запускается решение, базирующееся на типе задачи и нагрузочных блоках.

1. Для того чтобы запустить линейный статический расчет с одним нагрузочным блоком, можно просто нажать на кнопку **Apply**. Автоматически по умолчанию будет выполняться выбор параметров.

Для выбора других типов задач или множественных нагрузочных вариантов, необходимо пройти несколько низкоуровневых форм.

2. Для того чтобы запустить линейный статический расчет при нескольких нагрузочных блоках, необходимо открыть форму **Subcase Select** и выбрать **Subcases** (подблоки) с теми же самыми именами, которые пользователь определил в **Load Case** для включения в выполняемое задание (решение – **job**).

Для того чтобы изменить такие параметры **Subcase**, как **Output Request** (запрос на вывод), необходимо войти в форму **Subcase Create**, выбрать **Subcase** и принять соответствующую форму вывода, т. е. сделать изменение в **Output Request**. Затем нажать кнопку **Apply**, чтобы запустить решение.

3. Чтобы выбрать тип решения, отличающийся от статического расчета, сначала нужно вызвать форму **Solution Type** и выполнить

соответствующее изменение типа задачи. Затем можно войти в **Solution Parameters** – форму из формы **Solution Type**, чтобы изменить параметры, которые действуют на общий анализ.

**Subcase** создается автоматически для каждого заданного блока нагрузок (**Load Case**). Можно выбрать их в **Subcase Select**-форме или модифицировать их в **Subcase Select**-форме. Термины **Load Case** или **Subcase** чередующиеся. Затем нажимается кнопка **Apply** для запуска решения.

На рис. 47 представлена панель, в которой показаны формы и под-формы, описанные выше.

Когда модуль, предназначенный для решения с помощью MSC. Nastran, запустился, то в строке сообщений (**History Area**) главной панели MSC.Patran появляются сообщения о выполнении анализа. Если возникли проблемы в течение анализа (например, недостаточно оперативной памяти), то появляются сообщения об ошибке красным цветом в строке сообщений и в отдельном окне диагностических сообщений на экране дисплея.

Когда анализ будет завершен, то в строке сообщений появится уведомление об этом.

После завершения решения задачи необходимо считать файлы с результатами обратно в MSC.Patran. Это зависит от типа вычислительной программы, которая была применена.

При использовании MSC.Nastran в разделе **Action** можно выбрать **Read Output 2** или **Attach XDB** (по умолчанию).

В разделе **Objects** указывается то, что возвращается: **Results Entities, Mode Data** или то и другое. Для ввода результатов указывается первое.

В разделе **Methods** определяется: результаты будут считываться или прикрепляться (**Attach**). В большинстве случаев выбирается **Local**.

#### 9.4. Проверка результатов анализа

Различные расчетные программы имеют свои специфические приемы проверки результатов анализа, которые обычно описываются в соответствующих руководствах.

Приведем некоторые общие указания о том, что нужно искать, чтобы обеспечить качество результатов анализа.

1. Сообщения об ошибках. Каждый расчетный пакет предоставляет свои собственные сообщения об ошибках, возникших в процессе решения задачи, и рекомендации об их устранении. Например, для **Nastran Analysis Manager** модуль выполняет обширные рекомендации об условиях возникших ошибок. Производится оценка точности

численного решения конечно-элементной модели, обозначенная как функция **Epsilon**. Если величина **Epsilon** меньше, чем  $10^{-9}$ , то это считается допустимым.

2. Сходимость результатов – **Convergence**. При решении задачи должны быть получены согласующиеся результаты по прошествии приемлемого времени решения. Если при решении задачи не достигнуты согласующиеся результаты после некоторого количества итераций, то возникает задача поиска пользователем неправильной настройки параметров решения или ошибочной области решения.

3. Большие градиенты в результатах. Если возникли большие изменения в перемещениях или напряжениях в малой области модели, то необходимо перейти к более подробной сетке конечных элементов в этой области.

4. Согласование данных модели с реальными результатами. Если имеются результаты испытаний прототипа или реального изделия, то необходимо произвести сравнение этих результатов с полученными на модели.

5. Согласование полученных результатов с ожидаемыми. При решении задач часто можно предполагать вероятные результаты, ожидая более точного определения предела, при котором произойдет отказ конструкции. И если результаты анализа конструкции значительно отличаются от ожидаемых, то, возможно, возникла ошибка в модели или при настройке параметров решения задачи.

Для того чтобы разрешить перечисленные ошибки, необходимо вернуться к модели и переоценить выбор модели и методы построения.

Можно указать несколько наиболее часто встречающихся ошибок:

- пропущены элементы;
- жесткий элемент соседствует с гибким;
- неправильно моделируется **Beam/Plate**, **Beam/Solid**, **Plate/Solid** соединения;
- неправильно моделируются смещения геометрических осей сечений балок (**Offset Beams**);
- сетка элементов недостаточно точно разделяет избранные элементы в ключевой области, к которой прикладывается нагрузка.

## 9.5. Изображение результатов вычислений

Результаты конечно-элементного анализа обычно имеют цифровую форму, например, значения напряжений или деформаций в каждой узловой точке модели. Однако очень трудно получить реальное представление о том, как модель ведет себя, смотря на колонки цифр на бумаге.

В CAD-системах предусмотрена возможность изображения результатов (с помощью компьютерной графики, анимации и других инструментов для практически широкого круга людей), которые дают наглядное представление о реальном поведении модели.

В системе MSC.Patran с помощью средств **Results Application** используется двухуровневое приближение к такому типу изображения результатов с помощью постпроцессора:

- наиболее общие результаты изображаются и «оживляются» с помощью единственного легко используемого меню, требующего выбора результатов и техники изображения;
- другие меню опций предоставляют широкий диапазон изображений и техники вывода результатов и управления атрибутами изображения.

В дополнение к **Results Application** имеется такое известное средство, как **Insight**, которое помогает интерактивно видеть поведение модели в трехмерной области и преходящей форме. Особое преимущество системы MSC.Patran заключается в возможности работать с большими, комплексными моделями и результатами их анализа, а **Insight** использует многие последние достижения из техники трехмерного научного представления результатов для их быстрой и комплексной оценки. Эти способности **Insight** позволяют создавать, пересылать и управлять множественными «инструментами», которые помогают исследовать поведение областей модели так же хорошо, как «оживляя» их во времени.

Интерактивное изображение результатов представляет связь между конечно-элементным анализом и инженерной интуицией разработчика. Просматривая результаты в виде деформированных форм, моделирования движения модели, просматривая цифровые результаты, разработчик получает стимул проверять или улучшать конструкцию.

Анализируемые результаты могут быть представлены в трех формах: скалярной, векторной или в виде тензорных величин.

Скалярные результаты включают в себя единственную переменную, такую как температуру в точке. Скалярными результатами также могут быть компоненты многомерных величин, таких как  $x$ -компоненты вектора перемещений или амплитуды напряжений в точке. Скалярные величины могут изображаться с помощью техники цветового кодирования граничных величин в заданном диапазоне или использоваться как переменные в графике  $x$  в функции  $y$ .

Векторные результаты — это трехмерные величины, связанные с компонентами координатной системы, другими словами — результаты, которые распределены в пространстве. Векторные результаты могут включать переменные, такие как перемещения, напряжения или



величины электромагнитных полей. Пространственные векторные результаты, такие как перемещения, могут быть показаны, используя деформированную форму изображения, которая преувеличивает перемещения, приложенные к модели, или в виде маркерного изображения символов, соответствующих векторной величине в каждой точке модели.

Тензорные результаты могут рассматриваться как «вектор векторов», и обычно это имеет место, когда существует внутренняя зависимость между векторными величинами. Хорошим примером тензорной величины в структурном анализе является напряжение сдвига, например, с компонентами, относящимися к индивидуальным или парным комбинациям по каждому из главных направлений координат.

Тензорные величины состоят из девяти величин в каждой дискретной точке модели и могут быть показаны в виде маркерного изображения или в **Insight** они показывают направления обтекания линиями, проходящими через тензорное поле. Действительная тензорная величина также может быть изображена.

Величины результатов группируются в так называемые блоки результатов – **Result Cases**, содержащие все данные для одного шага анализа. Эти шаги, например, могут состоять из отдельной статической нагрузки и блока граничных условий или могут быть представлены результатами в отдельной временной или частотной точке. Не имеет значения, какой источник результатов анализа используется, MSC.Patran обычно показывает один или более блоков результатов в меню результатов.

Вид результатов выбирается на основе использованного типа анализа и полученных результатов.

Для скалярного изображения векторных величин, таких как напряжение или перемещение, дополнительное поле панели позволяет выбрать компоненты этих результатов, например, эквивалентные напряжения или  $x$ -компоненту.

## 9.6. Графическое изображение результатов

Числовые результаты можно изображать тремя основными способами.

**Fringe Plot.** Эти изображения подобны топографической карте, в которой используется цвет для изображения величин скалярных результатов на поверхности модели. Каждый цвет представляет один диапазон величин, и границы между цветными областями изображаются, как линия постоянного уровня величины в каждой границе диапазона.

**Deformed Shape Plots.** Это изображение используется для задач, в которых имеется деформирование модели, а деформированная форма показывает ее в деформируемом положении.

По умолчанию используется масштабирование изображения для лучшего представления формы деформирования. Масштабный фактор может умножаться на величину действительного перемещения либо масштабировать максимальные перемещения в зависимости от размера экрана.

**Animation of Fringe And/Or Deformed Shape.** Когда выбирается опция **Animate**, анимационное изображение выполняется так, что **fringe**-изображение изменяется от нуля (обычно белый цвет) до его полной цветной величины, и в соответствии с этим деформирование модели происходит от нуля до наибольшего деформируемого состояния.

**Postprocessing Results** (процесс изображения результатов).

В системе MSC.Patran панель **Results** предоставляет пользователю управление мощными графическими возможностями для изображения величин результатов различными способами.

Для максимальной гибкости результаты могут быть рассортированы, масштабированы, скомбинированы, профильтрованы, вырезаны или удалены.

В панели имеются два раздела **Action** и **Object**.

**Action** имеет пять возможных позиции:

- 1) **Create** – создает новое изображение результатов;
- 2) **Use Templates** – создает новое изображение на основе образца (template);
- 3) **Modify** – выполняет изменения, требуемые для создаваемого изображения;
- 4) **Post** – показывает или снимает изображение с экрана;
- 5) **Delete** – удаляет изображение из базы данных.

**Objects** имеет одиннадцать возможных позиций:

- 1) **Quick Plot** – быстрое деформирование или изображение по умолчанию;
- 2) **Deformation** – показывает модель в деформированном положении;
- 3) **Fringe** – представляет величины результатов решения задачи в виде цветных областей с контурными границами, соответствующими числовым значениям;
- 4) **Marker** – символично представляет векторные и тензорные изображения с цветной шкалой;
- 5) **Cursor** – выдает справку по результатам в указанных объектах (узлах или элементах);
- 6) **Contour** – прорисовывает изолинии выбранного результата (напряжения, перемещения и т. д.);
- 7) **Graph** – строит x-, y-график как функцию различных величин;
- 8) **Report** – выводит выбранные результаты в текстовый файл;

- 9) **Results** – создает новые комбинации результатов методом сложения, вычитания из набора уже существующих результатов.  
 10) **Animation** – создает «анимации» различных типов результатов;  
 11) **Freebody** – строит диаграммы, изображающие узловые силы, полученные в MSC.Nastran.

Пример основной панели для вывода результатов представлен на рис. 49. Эта панель используется для оперативного вывода результата и создания изображения, при этом используется опция **Quick Plot**. Выбор **Fringe Result** создает изображение с цветовой кодировкой уровня величин. Для изображения скалярных компонентов векторных и тензорных величин необходимо воспользоваться дополнительными опциями.

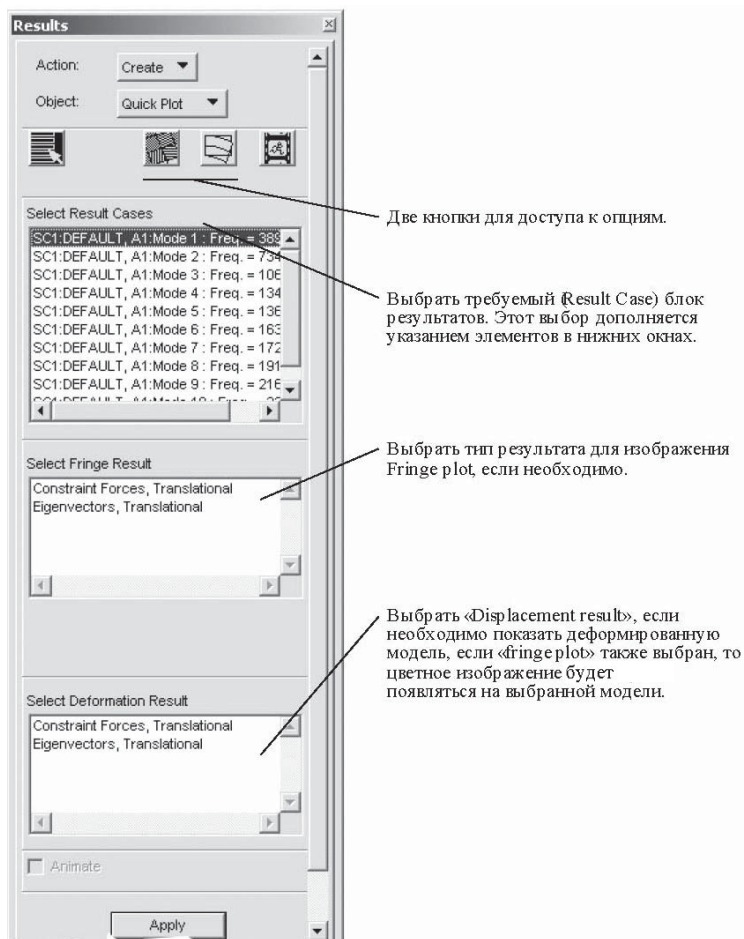
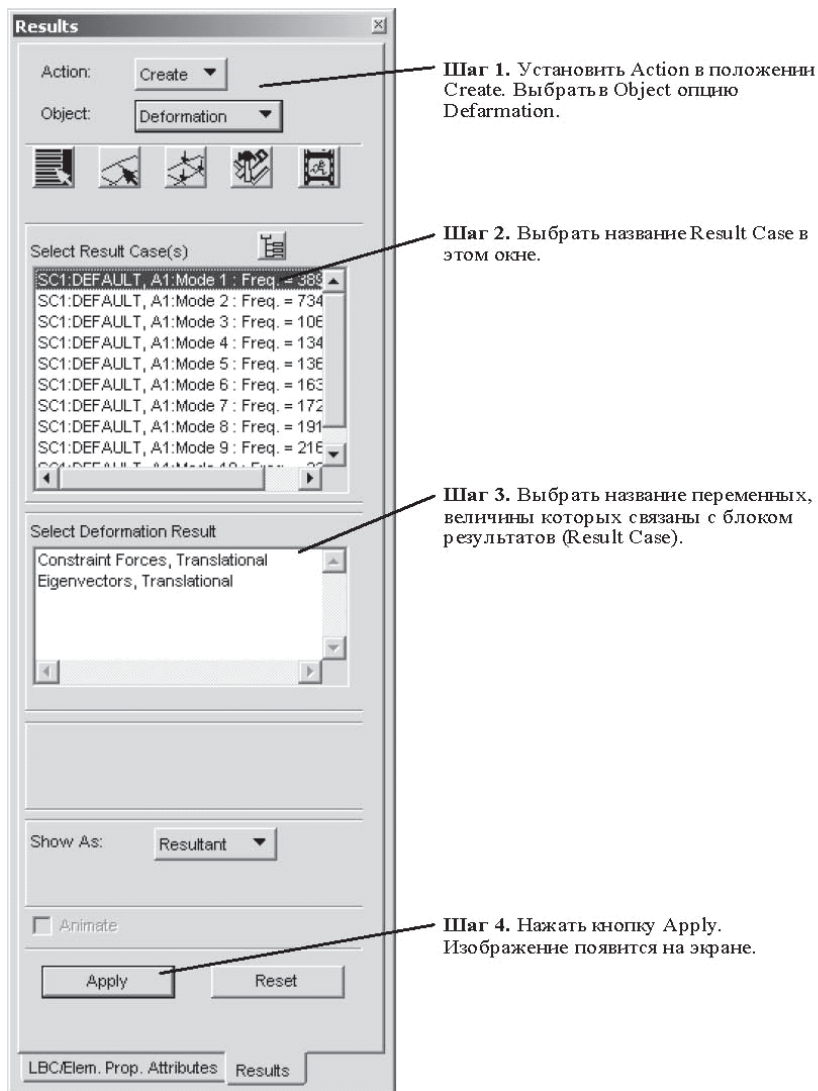


Рис. 49. Панель Results – отображение результатов расчетов

Имеется много путей для изображения и интерпретации результатов анализа. Кроме **Quick Plot**, имеются другие, позволяющие управлять данными, типом изображения и т. д. Эти дополнительные опции устанавливаются в поле **Object**. Для примера приведена панель Results с опцией **Deformation** (рис. 50).



**Рис. 50.** Панель Results – визуализация деформированного состояния конструкции

## 9.7. Использование других опций для изображения результатов

Перечислим последовательность действий для создания изображений модели с выводом на экран результатов в различных формах.

1. Установить **Action** в положение **Create**.
2. Выбрать **Plot** или **Result Type**, используя одну из опций, описанных ниже.
3. Выбрать тип результатов.
4. Модифицировать источник получения результатов, атрибуты дисплея, **Plot** или **Animation**, если необходимо.
5. Нажать **Apply**, чтобы получить изображение.

Кроме **Quick Plot**-опций имеются другие опции:

– **Deformation** – показывает деформированную форму модели с полной настройкой атрибутов управляющих масштабов (**Scaling Factor**), стилем изображения (**Rendering Style**);

– **Fringe** – создает цветное изображение с полным управлением атрибутами;

– **Marker** – используется для векторных и тензорных величин, таких как напряжение, напряжение сдвига, таблицы переменных. Маркерное изображение позволяет показывать величины переменных в форме масштабируемых символов. Эти величины могут изображаться в узлах или центрах масс элементов, а также в глобальной или местной координатных системах;

– **Graph** – большинство скалярных величин переменных задачи могут быть использованы для построения  $x$ - $y$ -графиков в функции времени, частоты и других величин. Отдельно можно, используя **XY Plot**-меню, оформить изображение осей координат, названия графиков, их стиль изображения;

– **Animation** – эта форма позволяет «оживлять» такие изображения, как **Fringe**, или деформируемую форму модели;

– **Report** – числовые результаты могут быть выведены в файл для печати или для ввода в другие приложения;

– **Results** – это форма позволяет получать новые блоки результатов из блоков результатов, уже имеющихся в базе данных, или создавать демонстрационные результаты, которые позволяют исследовать полученные данные без дополнительного анализа. Эти методы включают нахождение максимума, минимума, суммы, среднего значения и создание **PCL**-функций;

– **Freebody** – эта опция создает диаграмму нагрузок и реакций, свободную от объекта.

Многие опции, использованные при создании изображений, запускаются с помощью кнопок. Назначение некоторых из них пояснено ниже.

**Select Results.** Эти опции позволяют выбрать, какой формы результаты будут изображаться (скалярные, векторные или тензорные) и какие компоненты будут использованы для изображения векторных и тензорных данных.

**Target Entities.** Эти опции позволяют фильтровать результаты, основываясь на диапазонах величин или атрибутах: свойства материала, типы элементов, свойства элементов, номера элементов.

**Display Attributes.** Изменение параметров изображения: ширина линий, стиль, масштабный фактор.

**Plot Options.** Вариант опций для каждого частного типа изображения. Например, **Plot Options** для **Create/Fringe** для управления свойствами, такими как преобразование координат, определение результатов, экстраполирование.

**Animation Options.** Управление атрибутами анимации: количеством кадров, показывая интерполяции.



– **Select Results.**



– **Target Entities.**



– **Display Attributes**



– **Plot Options.**



– **Animation Options.**

Кроме этих опций, имеются опции в главном меню, которые включают: **Ranges.** Меню **Display/Ranges** позволяет контролировать диапазон спектра цветов для изображения результатов.

**Spectrums.** Меню **Display/Spectrums** позволяет указывать цвета для изображения результатов на экране. Множественные спектры могут быть сохранены и их можно использовать впоследствии. По умолчанию спектр состоит из «холодного» цвета (такого как «голубой») для изображения малых величин и «горячего» цвета (такого как «красный») для больших величин. Можно изменить изображение величин по желанию пользователя.

### *Инструментарий Insight*

Возможности **Insight** в системе MSC.Patran представлены комплексным изображением трехмерных структур. По сравнению с панелью **Result**, которая предназначена для генерации индивидуальных изображений результатов, **Insight** предназначена для интерактивного исследования этих результатов путем создания, передачи управления множеством инструментов, каждый из которых предоставляет разные пути просмотра результатов решения задачи.

Имеется 13 инструментов, доступных в **Insight**:

**Isosurface** — это поверхности, показывающие величины результатов расчета, по **3D**-модели распределения. Имеются две возможные формы представления этого в **Insight**-поверхности результатов могут рассматриваться как трехмерная аналогия контуров или как **Fringe**-изображения; обе формы изображают поверхность постоянных уровней каких-либо величин для скалярных результатов **3D**-модели.

Координатные поверхности, по существу, являются плоскостями, разрезающими модель на слои через регулярные интервалы, по которым **fringe**-результаты могут быть оценены.

**Streamlines** (линии обтекания) показывает траектории векторного поля.

**Stream Surfaces** — поверхности, созданные вдоль траектории векторного поля.

**Threshold** (предел) — представление изоповерхностей, которые также скрепляют порции модели выше и ниже средней величины, представляя их как средние для того, чтобы показать внутреннее состояние модели.

**Fringe** — цветное изображение уровней каких-либо величин по поверхности модели.

**Contour plot** — контурное (проволочное) представление однообразной информации, содержащейся во **fringe**-представлении с цветной кодировкой линий, показывающих расположение постоянных величин для скалярных результатов в каком-либо диапазоне. Главное преимущество этого представления — это контурное изображение с возможностью комбинирования его с другим **Insight**-инструментарием.

**Elements** — изображение величин результатов на элементах с цветной кодировкой уровней величин. Это изображение может показывать несогласованность результатов по элементам, а также усредненные величины в центрах тяжести этих элементов.

**Tensor** — изображает символы для тензорных величин.

**Vector** — показывает символы, соответствующие векторным величинам.

**Marker** — цветное изображение скалярных величин в соответствии с цветным кодированием.

**Value** – показывает текстовое изображение скалярных, векторных и тензорных величин в выбранных точках модели.

**Deformation** – создает деформированное изображение модели.

**Cursor** – определяет выводимые результаты мышью на изображении модели на экране и показывает их на экране в виде таблицы.



## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич ; пер. с англ. — М. : МИР, 1975. — 541 с.
2. MSC.Patran 2001. User's Guide for Windows

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	3
<b>1. ОСНОВЫ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ</b>	4
1.1. Напряженно-деформированное состояние плоского треугольного элемента	6
1.2. Матрица жесткости конечного элемента	8
1.3. Динамические задачи	10
1.4. Процедура решения инженерных задач с использованием метода конечных элементов	11
<b>2. MSC.Nastran – РАСЧЕТНЫЙ ПАКЕТ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ</b>	14
2.1. Структура входного файла MSC.Nastran	15
2.2. Библиотека элементов MSC.Nastran	17
2.3. Нагрузки и закрепления MSC.Nastran	18
<b>3. MSC.Patran – ПРОГРАММНАЯ СРЕДА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ     КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ И ОБРАБОТКИ     РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА</b>	20
3.1. Последовательность операций при выполнении расчета методом конечных элементов с использованием MSC.Patran	21
3.2. Блок-схема проведения расчета с использованием MSC.Patran – MSC.Nastran	22
<b>4. ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСА СИСТЕМЫ MSC.Patran</b>	23
4.1. Системное меню	23
4.2. Функции просмотра изображения объекта на экране	26
4.3. Дополнительное меню для выбора элементов геометрических форм	27
4.4. Выбор большого количества элементов геометрической модели	29
4.5. Создание базы данных для решения задачи	29
4.6. Вид параметров модели	30
4.7. Импорт геометрической модели из других CAD-систем	30
4.8. Меню для выполнения прикладных задач в системе MSC.Patran	32
<b>5. РАЗРАБОТКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ     В СРЕДЕ MSC.Patran</b>	34
5.1. Основные концепции и определения	34
5.2. Координатные системы и оси координат	38
5.3. Создание геометрических элементов	40
5.4. Обработка импортированных CAD-моделей	44
5.5. Проверка созданных геометрических моделей	45

6. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. СОЗДАНИЕ СЕТКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	51
6.1. Возможности конечно-элементного моделирования	51
6.2. Основные концепции и определения	52
6.3. Плотность сетки конечных элементов, ее получение и анализ	57
6.4. Разработка конечно-элементной модели	61
6.5. Прямое моделирование конечных элементов	66
6.6. Проверка конечно-элементной модели	67
7. ЗАДАНИЕ СВОЙСТВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ, НАГРУЗОК И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ	70
7.1. Задание материалов в базе данных MSC.Patran	70
7.2. Моделирование нагрузок	76
8. КОНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ СВОЙСТВА	90
8.1. Типы элементов	90
8.2. Моделирование балочных элементов и библиотека балочных элементов MSC.Nastran	91
8.3. Задание свойств элементам	94
9. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ В СИСТЕМЕ MSC.PATRAN-NASTRAN	97
9.1. Основные типы задач	98
9.2. Настройка расчетного пакета, проведение расчетов	99
9.3. Запуск решения задачи	100
9.4. Проверка результатов анализа	102
9.5. Изображение результатов вычислений	103
9.6. Графическое изображение результатов	105
9.7. Использование других опций для изображения результатов	109
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	113

Учебное издание

*Виталий Евгеньевич КРУТОЛАПОВ*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MSC.PATRAN  
В ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЁТАХ

Учебное пособие

Редакторы: *В.С. Павлова, Ю.М. Сидорова*  
Технический редактор *З.М. Малявина*  
Компьютерная вёрстка *И.И. Шишкиной*  
Дизайн обложки *И.И. Шишкиной*

Подписано в печать 06.06.2008. Формат 60x84/16.  
Печать оперативная. Усл. п. л. 7,25. Уч.-изд. л. 6,74.  
Тираж 200 экз. Заказ № 1-29-08.

Тольяттинский государственный университет  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14