

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

**Анализ прочности элементов авиационных
конструкций с помощью CAE-системы
MSC.Patran-Nastran**

Интерактивное мультимедийное пособие
в системе дистанционного обучения «Moodle»

УДК 539.4
ББК 32.973
С 427

Автор-составитель: **Скворцов Юрий Васильевич, Глушков Сергей Валериевич**

Редакторская обработка Ю. В. Скворцов
Компьютерная вёрстка Ю. В. Скворцов
Довёрстка С. В. Глушков

Анализ прочности элементов авиационных конструкций с помощью САЕ-системы MSC.Patran-Nastran [Электронный ресурс] : интерактив. мультимед. пособие в системе дистанц. обучения «Moodle» / Ю. В. Скворцов, С. В. Глушков; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (6,1 Мбайта). – Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В пособии изложены основы метода конечных элементов, сведения о графическом интерфейсе пользователя САЕ-системы MSC.Patran-Nastran, методы создания геометрической модели и сетки конечных элементов. Представлено также большое количество примеров расчёта различных элементов авиационных конструкций в виде лабораторных работ с подробным пошаговым описанием.

Настоящее пособие предназначено для использования студентами специальности 160100.65 «Самолёто- и вертолётостроение» при выполнении курсовых и дипломных проектов на 5 и 6 курсе в 10...12 семестрах и для студентов направления 151600.62 «Прикладная механика», изучающих дисциплину «Конечно-элементное моделирование конструкций» на 3 и 4 курсах в 6 и 7 семестрах.

Оно может быть использовано также при выполнении курсовых и дипломных проектов на 5 и 6 курсах в 10...12 семестрах студентами специальности 160400.65 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов». Подготовлено на кафедре космического машиностроения СГАУ.

1 ВВЕДЕНИЕ В МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1.1 Основные соотношения

В практике прочностных расчетов используют как аналитические, так и численные методы. Первые базируются на математических методах решения краевых задач, обычно сложных и трудоемких. Они применяются, как правило, к телам простой конфигурации и зачастую оказываются бессильными, если требуется найти распределение напряжений в сложной реальной конструкции.

Численные (или вычислительные) методы позволяют свести получение численного значения решения к последовательности арифметических операций над численными значениями входных данных, и поэтому хорошо приспособлены к расчетам на ЭВМ. Они не ограничены ни формой тел, ни способом приложения нагрузки. Существует много различных численных методов, пригодных для эффективного решения тех или иных частных задач. Начиная с конца 60-х годов прошлого столетия, предпочтение все больше отдается методу конечных элементов как наиболее гибкому и универсальному.

Метод конечных элементов (МКЭ), получивший в последние годы широкое развитие, представляет собой приближенный метод решения разнообразных задач математической физики. В задачах механики деформируемого твердого тела МКЭ позволяет распространить известные принципы расчета дискретных систем (таких как фермы, рамы) на случай непрерывных тел и сложных конструкций. В настоящее время МКЭ является основным расчетным инструментом для исследования прочности разнообразных конструкций.

Суть данного метода заключается в следующем. Рассмотрим непрерывное тело, нагруженное произвольным образом. Сеткой секущих поверхностей мысленно разобьем тело на отдельные подобласти (рисунок 1.1). Полученные подобласти имеют хотя и малые, но все же конечные размеры, откуда и происходит название «конечные элементы».

На границах между отдельными элементами выбираются некоторые точки – узлы. Перемещения узлов в направлении координатных осей (а иногда и угловые перемещения) принимаются в качестве основных неизвестных.

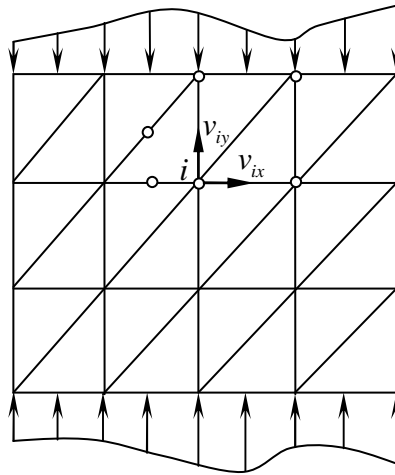


Рисунок 1.1 – Разбивка тела сеткой секущих поверхностей

В МКЭ, прежде всего, встает вопрос о том, как найти перемещения (а, следовательно, деформации и напряжения) внутри каждого конечного элемента, зная перемещения принадлежащих ему узлов. Для сплошного тела эта задача решается приближенно, если сделать те или иные предположения о характере поля перемещений в элементе. Точнее, необходимо выбрать некоторую совокупность функций, которые позволяют аппроксимировать поле перемещений внутри конечного элемента по известным узловым перемещениям. Выбор таких аппроксимирующих функций является одним из наиболее ответственных и важных этапов в МКЭ. В матричных обозначениях это означает существование равенства

$$[u] = [\alpha][v^e], \quad (1.1)$$

где $[u]$ – матрица-столбец перемещений в направлении координатных осей произвольной точки внутри элемента; $[v^e]$ – матрица-столбец узловых перемещений элемента “e”; $[\alpha]$ – прямоугольная матрица, элементами которой являются некоторые функции координат (аппроксимирующие функции).

Например, для плоского элемента (рисунок 1.2) данные матрицы будут иметь следующую структуру:

$$[u] = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix}; \quad [\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \end{bmatrix}; \quad [v^e] = \{v_i \mid v_j \mid \dots \mid v_m\},$$

причем $[v_r] = \begin{bmatrix} v_{rx} \\ v_{ry} \end{bmatrix} \quad (r = i, j, \dots, m).$

Здесь и далее фигурные скобки обозначают матрицу-столбец, а штриховые линии означают, что элементами матрицы являются подматрицы.

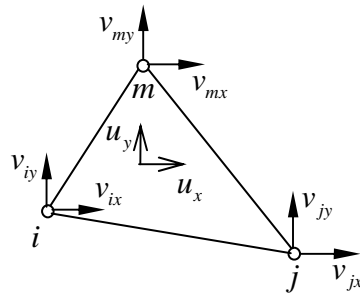


Рисунок 1.2 – Плоский треугольный элемент

Если такой выбор сделан, то напряженно-деформированное состояние (НДС) будет однозначно определяться узловыми перемещениями:

$$[\varepsilon] = [\beta][v^e]; \quad [\sigma] = [\kappa][\beta][v^e], \quad (1.2)$$

где $[\varepsilon] = \{\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{xy}\}$ – матрица-столбец деформаций; $[\sigma] = \{\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{xy}\}$ – матрица-столбец напряжений; $[\beta]$ – прямоугольная матрица, получаемая с использованием геометрических соотношений Коши; $[\kappa]$ – квадратная матрица упругих постоянных материала, получаемая с помощью закона Гука.

Например, для случая плоского напряженного состояния

$$[\beta] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \alpha_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \alpha_y}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_x}{\partial y} \end{bmatrix}; \quad [\kappa] = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}.$$

Здесь E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Таким образом, при известной матрице аппроксимирующих функций $[\alpha]$ напряженное и деформированное состояние конечного элемента однозначно определяется узловыми перемещениями $[v^e]$. Поэтому под конечным элементом следует понимать не просто некоторую малую область тела, а область тела в совокупности с заданными в ней аппроксимирующими функциями.

Вторая трудность возникает при объединении конечных элементов в единую систему. Если мы выделим конечный элемент, то на его границах будут возникать распределенные силы (рисунок 1.3). Эти силы в МКЭ заменяются эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми силами.

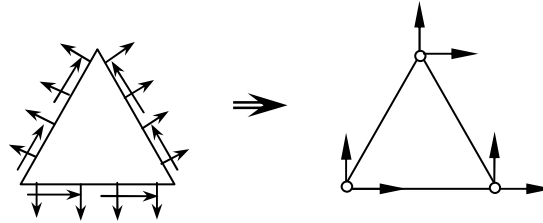


Рисунок 1.3 – Замена распределенных сил эквивалентными узловыми

Внешние поверхностные и объемные нагрузки также заменяются эквивалентными им в энергетическом смысле сосредоточенными силами, действующими в узлах.

Используя вариационный принцип возможных перемещений, можно получить выражение для матрицы жесткости конечного элемента:

$$[K^e] = \int_{\tau^e} [\beta]^T [\kappa] [\beta] d\tau, \quad (1.3)$$

где интегрирование выполняется по объему элемента.

Учитывая блочную структуру матрицы узловых перемещений $[v^e]$, матрицу жесткости также можно представить в блочном виде

$$[K^e] = \begin{bmatrix} K_{ii}^e & K_{ij}^e & \dots & K_{im}^e \\ K_{ji}^e & K_{jj}^e & \dots & K_{jm}^e \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{mi}^e & K_{mj}^e & \dots & K_{mm}^e \end{bmatrix}.$$

Следует отметить, что размер матрицы жесткости определяется произведением числа узлов на число степеней свободы (перемещений) в каждом из них. Например, для изображенного на рисунке 1.2 элемента матрица жесткости будет иметь размер 6×6 .

Выполнив дискретизацию упругого тела, можно теперь составить уравнения равновесия узлов и прийти к системе уравнений относительно перемещений

$$[K][v] = [P], \quad (1.4)$$

где $[v] = \{v_1 \mid v_2 \mid \dots \mid v_n\}$ – матрица-столбец узловых перемещений (n – общее число узлов при принятой схеме дискретизации); $[P] = \{P_1 \mid P_2 \mid \dots \mid P_n\}$ – матрица столбец внешних (сосредоточенных и эквивалентных) узловых сил; $[K]$ – матрица жесткости всего тела (или конструкции), которая может быть представлена также в блочном виде

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix}.$$

Матрица жесткости конструкции формируется из матриц жесткости отдельных элементов по следующему правилу:

- 1) $[K_{ij}] = 0$, если узлы i и j не относятся к одному конечному элементу;
- 2) $[K_{ij}] = \sum_e [K_{ij}^e]$, где суммирование производится по тем конечным элементам, которые одновременно содержат узлы i и j ;
- 3) $[K_{ii}] = \sum_e [K_{ii}^e]$, где суммирование производится по всем конечным элементам, сходящимся в узле i .

Если конструкция не закреплена, то непосредственно из уравнения (1.4) перемещения найти нельзя, так как матрица жесткости всей конструкции $[K]$ является вырожденной. Поэтому при расчете свободной системы ее нужно предварительно закрепить минимально необходимым числом правильно ориентированных связей, т.е. устранить возможность ее перемещения как жесткого целого.

В системе уравнений (1.4) вычеркивая строки и столбцы, соответствующие известным нулевым перемещениям (в направлении наложенных связей), приходим к матричному уравнению

$$[K_{\alpha\alpha}][v_\alpha] = [P_\alpha], \quad (1.5)$$

решение которого дает матрицу неизвестных узловых перемещений

$$[v_\alpha] = [K_{\alpha\alpha}]^{-1}[P_\alpha].$$

Здесь $[K_{\alpha\alpha}]$ так называемая сокращенная матрица жесткости конструкции.

После определения узловых перемещений можно вычислить напряжения в каждом конечном элементе.

1.2 Основные типы конечных элементов

Для решения задач механики деформируемого твердого тела используются линейные элементы (представляемые линиями), поверхностные элементы (описываемые поверхностями) и объемные элементы (задаваемые объемами).

1.2.1 Линейные элементы

Линейные элементы можно разделить на два основных вида – одноосные стержневые, работающие лишь на растяжение-сжатие (или на кручение) вдоль своей оси, и балочные, способные в общем случае воспринимать все виды нагрузок (растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение).

Одноосные элементы показаны на рисунке 1.4. В каждом узле здесь задаются только поступательные перемещения (или только углы поворота). При этом элементы первого порядка содержат два узла и имеют прямолинейную форму, а элементы второго порядка – три узла и могут иметь криволинейную форму. Конечные элементы данного типа используются для моделирования стержневых систем (например, ферменных конструкций), а также подкрепляющих ребер жесткости (например, стрингеров, поясов лонжеронов и т.п.).

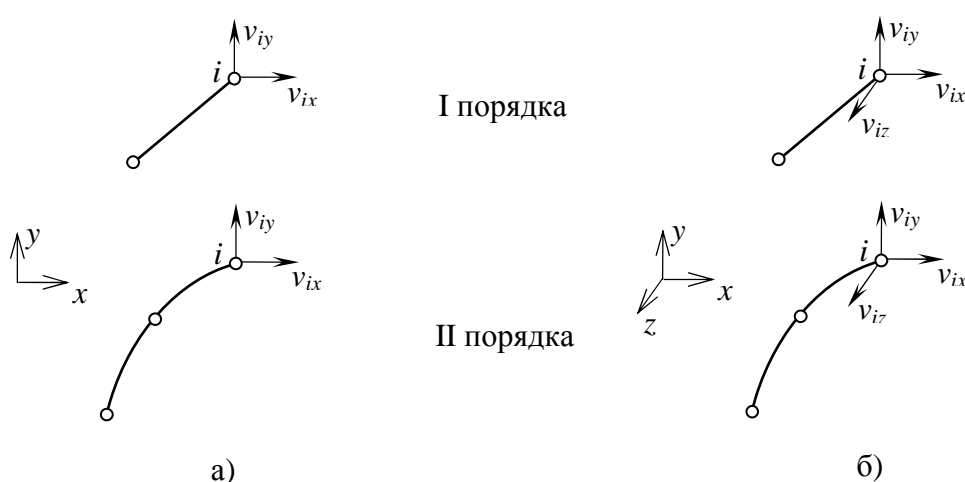


Рисунок 1.4 – Двухмерные (а) и трехмерные (б) одноосные элементы

Следует отметить, что при равном количестве элементов конечные элементы второго порядка дают большую точность вычислений, так как они

более точно воспроизводят криволинейную геометрию модели и имеют более точные функции формы (аппроксимирующие функции).

В отличие от предыдущего случая в узлах балочных элементов имеются как поступательные, так и угловые перемещения (рисунок 1.5). Они применяются для моделирования различных стержневых систем (например, балок и рам), а также мощных подкрепляющих ребер жесткости (например, лонжеронов, шпангоутов и т.п.).

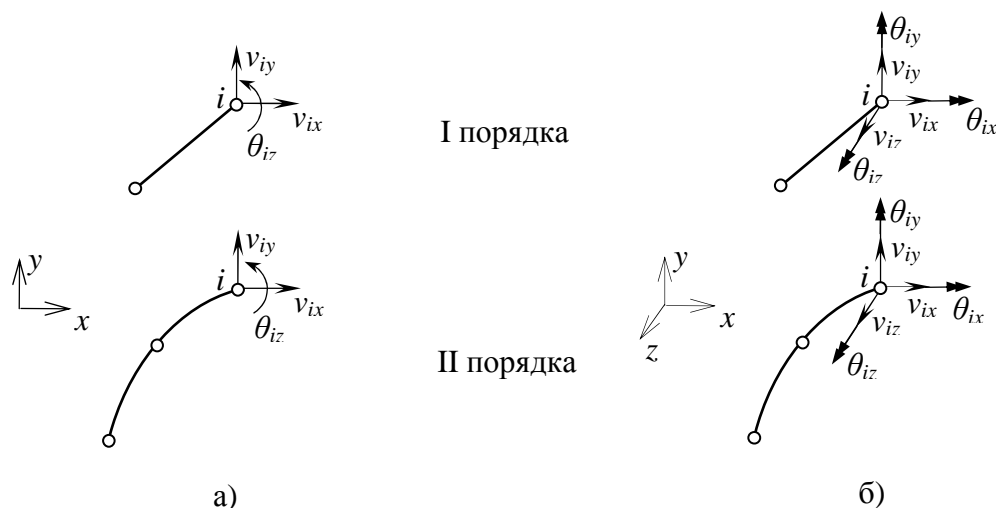


Рисунок 1.5 – Двухмерные (а) и трехмерные (б) балочные элементы

1.2.2 Поверхностные элементы

Поверхностные элементы могут иметь как треугольную, так и четырехугольную форму. В элементах первого порядка узлы располагаются в вершинах, а в элементах второго порядка вводятся еще дополнительные узлы на сторонах, причем последние могут иметь криволинейную форму.

Следует отметить, что двухмерные поверхностные элементы, называемые плоскими, используются при решении плоской задачи теории упругости, а также для моделирования осесимметричных тел. В их узлах определены лишь поступательные перемещения в направлении двух координатных осей (рисунок 1.6).

Трехмерные поверхностные элементы называются оболочечными. Они применяются для моделирования как оболочек, так и пластин. В их узлах помимо смещений в направлении трех координатных осей задаются также углы поворота нормали относительно этих осей (рисунок 1.7).

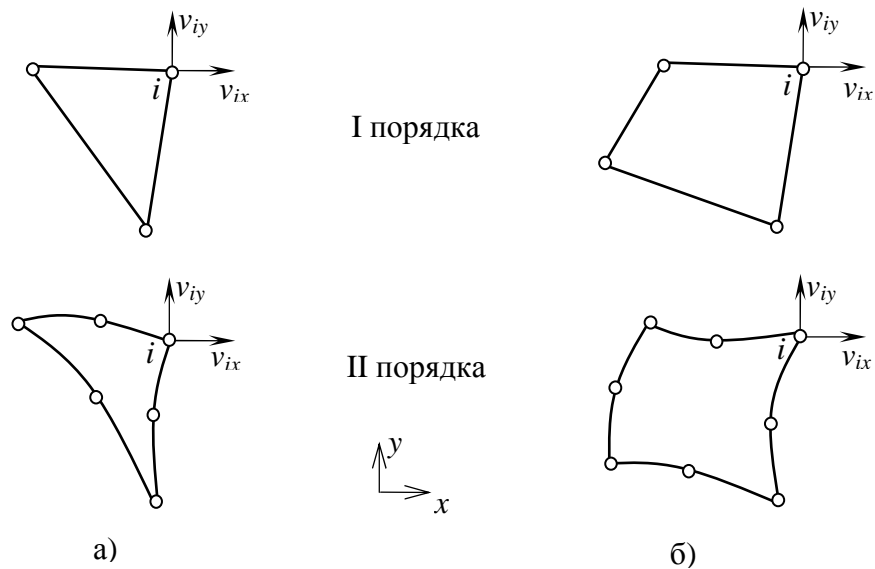


Рисунок 1.6 – Треугольные (а) и четырехугольные (б) плоские элементы

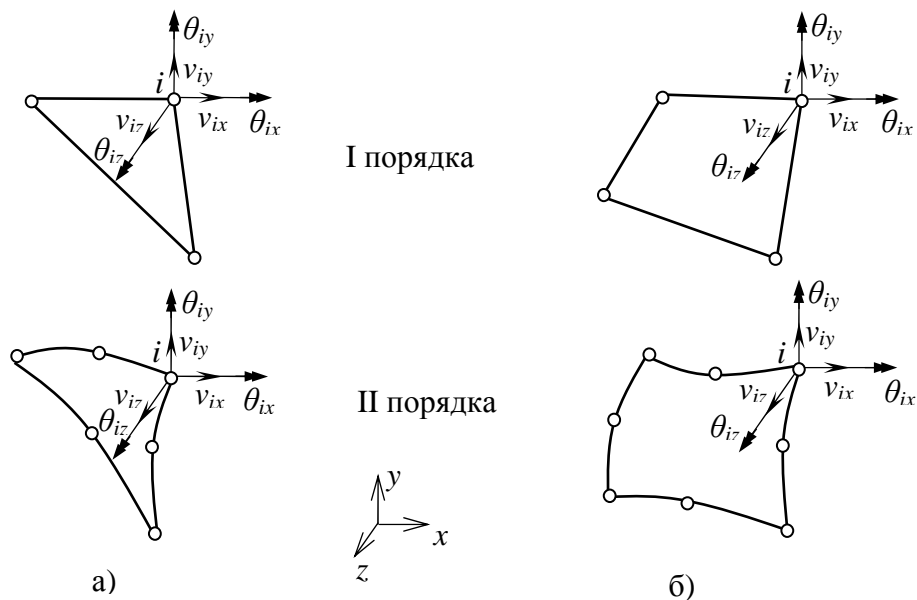


Рисунок 1.7 – Треугольные (а) и четырехугольные (б) оболочечные элементы

1.2.3 Объемные элементы

Объемные элементы применяются для моделирования трехмерных деталей, узлов и элементов конструкций. Наибольшее распространение получили шестигранные элементы (в форме гексаэдра) и четырехгранные (в форме тетраэдра). При этом элементы первого порядка имеют прямолинейные стороны и узлы в вершинах, а элементы второго порядка, содержащие дополнительные узлы на сторонах, могут иметь криволинейную форму. В узлах

объемных элементов задаются только поступательные перемещения (рисунок 1.8).

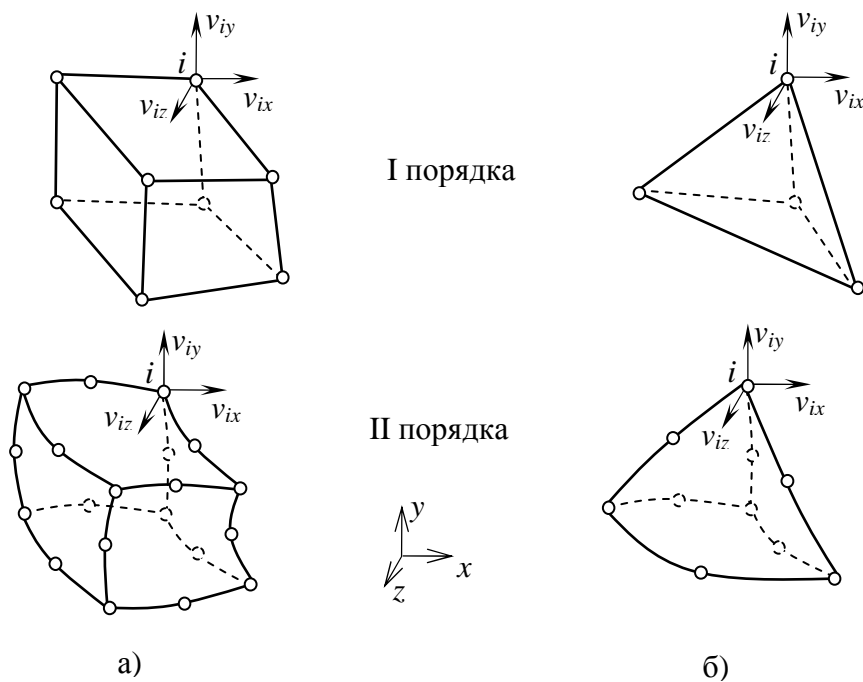


Рисунок 1.8 – Шестигранные (а) и четырехгранные (б) объемные элементы

Вопросы по теме 1

1) МКЭ является аналитическим или численным, точным или приближенным методом?

1. Численным приближенным.
2. Численным точным.
3. Аналитическим приближенным.
4. Аналитическим точным.

2) Откуда происходит название «конечный элемент»?

1. Элемент имеет конечные размеры.
2. Элемент содержит конечное число степеней свободы.
3. В элементе имеется конечное число узлов.
4. Модель состоит из конечного числа элементов.

3) Какие величины в МКЭ выбираются в качестве основных неизвестных?

1. Перемещения узлов.
2. Деформации элементов.
3. Напряжения в узлах.
4. Узловые силы.

4) Как определяются перемещения внутри конечного элемента по известным перемещениям принадлежащих ему узлов?

1. Приближенно путем выбора аппроксимирующих функций.
2. С использованием кинематических гипотез.
3. С помощью вариационных принципов.
4. На основе методов строительной механики и теории упругости.

5) Какой этап в МКЭ является одним из наиболее важных и ответственных?

1. Выбор аппроксимирующих функций.
2. Определение узловых перемещений.
3. Вычисление напряжений.
4. Построение матрицы жесткости элемента.
5. Формирование матрицы жесткости конструкции.

6) Как называется матрица $[\alpha]$?

1. Матрица аппроксимирующих функций.
2. Матрица экстраполирующих функций.

3. Матрица весовых коэффициентов.
4. Матрица дифференциальных операторов.

7) Какие величины связывает матрица $[\alpha]$?

1. Перемещения произвольной точки элемента с его узловыми перемещениями.
2. Деформации с перемещениями узлов элемента.
3. Напряжения с деформациями.
4. Узловые силы с узловыми перемещениями.

8) Какие величины связывает матрица $[\beta]$?

1. Перемещения произвольной точки элемента с его узловыми перемещениями.
2. Деформации с перемещениями узлов элемента.
3. Напряжения с деформациями.
4. Узловые силы с узловыми перемещениями.

9) Какие соотношения используются при вычислении матрицы $[\beta]$?

1. Геометрические соотношения Коши.
2. Дифференциальные уравнения равновесия.
3. Физические соотношения (закон Гука).
4. Статические граничные условия.
5. Кинематические граничные условия.

10) Что следует понимать под конечным элементом?

1. Малую область тела в совокупности с заданными в ней аппроксимирующими функциями.
2. Малую область тела, имеющую треугольную или четырехугольную форму.
3. Малую область тела, имеющую форму гексаэдра или тетраэдра.
4. Бесконечно малую область тела.

11) Чем при объединении конечных элементов в единую систему заменяются распределенные силы, возникающие на границах элементов?

1. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми силами.
2. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми силами.
3. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми перемещениями.
4. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми перемещениями.

12) Чем в МКЭ заменяются внешние поверхностные нагрузки?

1. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми силами.
2. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми силами.
3. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми перемещениями.
4. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми перемещениями.

13) Чем в МКЭ заменяются внешние объемные нагрузки?

1. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми силами.
2. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми силами.
3. Эквивалентными им в энергетическом смысле узловыми перемещениями.
4. Эквивалентными им в статическом смысле узловыми перемещениями.

14) Какой вариационный принцип используется при выводе выражения для матрицы жесткости конечного элемента?

1. Принцип возможных перемещений.
2. Принцип стационарности кинетической энергии.
3. Принцип стационарности дополнительной работы.
4. Принцип возможных сил.

15) Какие величины связывает матрица жесткости?

1. Узловые силы с узловыми перемещениями.
2. Напряжения с узловыми перемещениями.
3. Напряжения с узловыми силами.
4. Поверхностные и объемные нагрузки с узловыми силами.

16) Какие физические условия используются при выводе правила формирования матрицы жесткости конструкции из матриц жесткости отдельных элементов?

1. Уравнения равновесия узлов.
2. Уравнения равновесия элементов.
3. Уравнения равновесия тела.
4. Дифференциальные уравнения равновесия.

17) Как выполняется суммирование при формировании подматрицы

$$[K_{ij}] = \sum_e [K_{ij}^e]?$$

1. По элементам, которые одновременно содержат узлы i и j .
2. По элементам, которые содержат узел i или j .
3. По элементам, которые не содержат узлы i и j .
4. По всем конечным элементам.

18) Как в МКЭ производится расчет свободных (незакрепленных) плоских систем?

1. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее одну связь.
2. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее две связи.
3. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее три связи.
4. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее четыре связи.

19) Как в МКЭ производится расчет свободных (незакрепленных) пространственных систем?

1. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее одну связь.
2. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее три связи.
3. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее шесть связей.
4. Конструкцию необходимо предварительно закрепить, наложив на нее девять связей.

20) Как называется матрица $[K_{\alpha\alpha}]$?

1. Сокращенная матрица жесткости конструкции.
2. Полная матрица жесткости конструкции.
3. Обобщенная матрица жесткости конструкции.
4. Приведенная матрица жесткости конструкции.

21) Как работает одноосный стержневой элемент?

1. На растяжение-сжатие или кручение.
2. На растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение.
3. На изгиб в двух плоскостях.
4. На растяжение-сжатие и кручение.

22) Как работает балочный элемент?

1. На растяжение-сжатие или кручение.

2. На растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение.
3. На изгиб в двух плоскостях.
4. На растяжение-сжатие и кручение.

23) Для моделирования каких конструкций (или конструктивных элементов) используются одноосные стержневые элементы?

1. Ферменных конструкций, стрингеров, поясов лонжеронов.
2. Балок, рам, лонжеронов, шпангоутов.
3. Плоских и осесимметричных тел.
4. Тонких пластин, тонкостенных оболочек.
5. Массивных тел.

24) Для моделирования каких конструкций (или конструктивных элементов) используются балочные элементы?

1. Ферменных конструкций, стрингеров, поясов лонжеронов.
2. Балок, рам, лонжеронов, шпангоутов.
3. Плоских и осесимметричных тел.
4. Тонких пластин, тонкостенных оболочек.
5. Массивных тел.

25) Для моделирования каких конструкций (или конструктивных элементов) используются двухмерные поверхностные элементы?

1. Ферменных конструкций, стрингеров, поясов лонжеронов.
2. Балок, рам, лонжеронов, шпангоутов.
3. Плоских и осесимметричных тел.
4. Тонких пластин, тонкостенных оболочек.
5. Массивных тел.

26) Для моделирования каких конструкций (или конструктивных элементов) используются трехмерные поверхностные элементы?

1. Ферменных конструкций, стрингеров, поясов лонжеронов.
2. Балок, рам, лонжеронов, шпангоутов.
3. Плоских и осесимметричных тел.
4. Тонких пластин, тонкостенных оболочек.
5. Массивных тел.

27) Для моделирования каких конструкций (или конструктивных элементов) используются объемные элементы?

1. Ферменных конструкций, стрингеров, поясов лонжеронов.
2. Балок, рам, лонжеронов, шпангоутов.

3. Плоских и осесимметричных тел.
4. Тонких пластин, тонкостенных оболочек.
5. Массивных тел.

28) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного стержневого элемента первого порядка?

1. 2×2 .
2. 3×3 .
3. 4×4 .
4. 5×5 .
5. 6×6 .

29) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного стержневого элемента второго порядка?

1. 4×4 .
2. 6×6 .
3. 8×8 .
4. 10×10 .
5. 12×12 .

30) Какой размер имеет матрица жесткости трехмерного стержневого элемента первого порядка?

1. 4×4 .
2. 6×6 .
3. 8×8 .
4. 10×10 .
5. 12×12 .

31) Какой размер имеет матрица жесткости трехмерного стержневого элемента второго порядка?

1. 6×6 .
2. 8×8 .
3. 9×9 .
4. 10×10 .
5. 12×12 .

32) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного балочного элемента первого порядка?

1. 4×4 .
2. 6×6 .

3. 8x8.
4. 10x10.
5. 12x12.

33) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного балочного элемента второго порядка?

1. 6x6.
2. 8x8.
3. 9x9.
4. 10x10.
5. 12x12.

34) Какой размер имеет матрица жесткости трехмерного балочного элемента первого порядка?

1. 8x8.
2. 10x10.
3. 12x12.
4. 14x14.
5. 16x16.

35) Какой размер имеет матрица жесткости трехмерного балочного элемента второго порядка?

1. 12x12.
2. 14x14.
3. 16x16.
4. 18x18.
5. 20x20.

36) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного поверхностного треугольного элемента первого порядка?

1. 6x6.
2. 7x7.
3. 8x8.
4. 9x9.
5. 10x10.

37) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного поверхностного треугольного элемента второго порядка?

1. 10x10.
2. 12x12.

3. 14x14.
4. 16x16.
5. 18x18.

38) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного поверхностного четырехугольного элемента первого порядка?

1. 6x6.
2. 7x7.
3. 8x8.
4. 9x9.
5. 10x10.

39) Какой размер имеет матрица жесткости двухмерного поверхностного четырехугольного элемента второго порядка?

1. 10x10.
2. 12x12.
3. 14x14.
4. 16x16.
5. 18x18.

40) Какой размер имеет матрица жесткости треугольного оболочечного элемента первого порядка?

1. 12x12.
2. 15x15.
3. 18x18.
4. 20x20.
5. 24x24.

41) Какой размер имеет матрица жесткости треугольного оболочечного элемента второго порядка?

1. 24x24.
2. 36x36.
3. 40x40.
4. 48x48.
5. 52x52.

42) Какой размер имеет матрица жесткости четырехугольного оболочечного элемента первого порядка?

1. 14x14.
2. 18x18.

3. 24x24.
4. 28x28.
5. 32x32.

43) Какой размер имеет матрица жесткости четырехугольного оболочечного элемента второго порядка?

1. 30x30.
2. 36x36.
3. 42x42.
4. 48x48.
5. 54x54.

44) Какой размер имеет матрица жесткости четырехгранного объемного элемента первого порядка?

1. 12x12.
2. 18x18.
3. 24x24.
4. 28x28.
5. 32x32.

45) Какой размер имеет матрица жесткости четырехгранного объемного элемента второго порядка?

1. 28x28.
2. 30x30.
3. 42x42.
4. 48x48.
5. 54x54.

46) Какой размер имеет матрица жесткости шестигранного объемного элемента первого порядка?

1. 12x12.
2. 18x18.
3. 24x24.
4. 28x28.
5. 32x32.

47) Какой размер имеет матрица жесткости шестигранного объемного элемента второго порядка?

1. 28x28.
2. 30x30.

3. 42x42.
4. 54x54.
5. 60x60.

48) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости плоской фермы, содержащей 10 узлов, если число наложенных связей равно 4?

1. 10x10.
2. 16x16.
3. 20x20.
4. 26x26.
5. 34x34.

49) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости пространственной фермы, содержащей 20 узлов, если число наложенных связей равно 10?

1. 20x20.
2. 30x30.
3. 42x42.
4. 50x50.
5. 64x64.

50) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости плоской рамы, содержащей 6 узлов, если число наложенных связей равно 3?

1. 15x15.
2. 18x18.
3. 21x21.
4. 26x26.
5. 34x34.

51) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости пространственной рамы, содержащей 12 узлов, если число наложенных связей равно 6?

1. 42x42.
2. 48x48.
3. 54x54.
4. 66x66.
5. 72x72.

52) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости оболочечной модели, содержащей 30 узлов, если число наложенных связей равно 10?

1. 80x80.
2. 125x125.
3. 144x144.
4. 150x150.
5. 170x170.

53) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости плоского тела, содержащего 40 узлов, если число наложенных связей равно 15?

1. 25x25.
2. 65x65.
3. 85x85.
4. 100x100.
5. 115x115.

54) Какой размер имеет сокращенная матрица жесткости трехмерного тела, содержащего 60 узлов, если число наложенных связей равно 20?

1. 60x60.
2. 90x90.
3. 130x130.
4. 160x160.
5. 180x180.

2 РЕАЛИЗАЦИЯ МКЭ В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ

2.1 Системы инженерного анализа

МКЭ полностью ориентирован на использование ЭВМ. Это обусловлено необходимостью выполнения большого количества однотипных операций. Однако есть два важных этапа расчета, плохо поддающихся автоматизации и требующих больших затрат ручного труда. Это, во-первых, подготовка и ввод исходных данных и, во-вторых, обработка и анализ результатов расчета.

В настоящее время создано достаточно много программных продуктов, реализующих МКЭ. Они называются МКЭ-пакетами и относятся к классу систем инженерного анализа, или CAE-систем (Computer Aided Engineering).

Самые мощные МКЭ-пакеты (называемые тяжелыми или универсальными) позволяют решать линейные и нелинейные, статические и динамические задачи анализа конструкций, а также задачи усталостной прочности, теплопроводности и термоупругости, механики жидкости и электромагнетизма и т.д. Их библиотеки конечных элементов насчитывают более сотни разнообразных типов элементов, что позволяет моделировать практически любые конструкции.

Для преодоления трудностей, связанных с вводом исходных данных и представлением результатов расчета, рассматриваемые пакеты имеют мощные препроцессоры и постпроцессоры, широко использующие графические возможности компьютера. Препроцессоры позволяют вводить исходные данные в интерактивном (диалоговом) режиме. При этом сначала с помощью геометрических примитивов, а также с использованием команд генерации геометрических объектов строится модель тела, называемая геометрической или твердотельной (рисунок 2.1), и затем выполняется автоматическое разбиение модели на конечные элементы (рисунок 2.2). Использование стандартных форматов здесь позволяет строить модель в одной программе, а затем использовать ее в другой. Это очень важно, так как можно взять уже готовую геометрическую модель, построенную, например, в системе автоматизированного проектирования, или CAD-системе (Computer Aided Design), что существенно экономит время.



Рисунок 2.1 – Геометрическая модель кожуха насоса

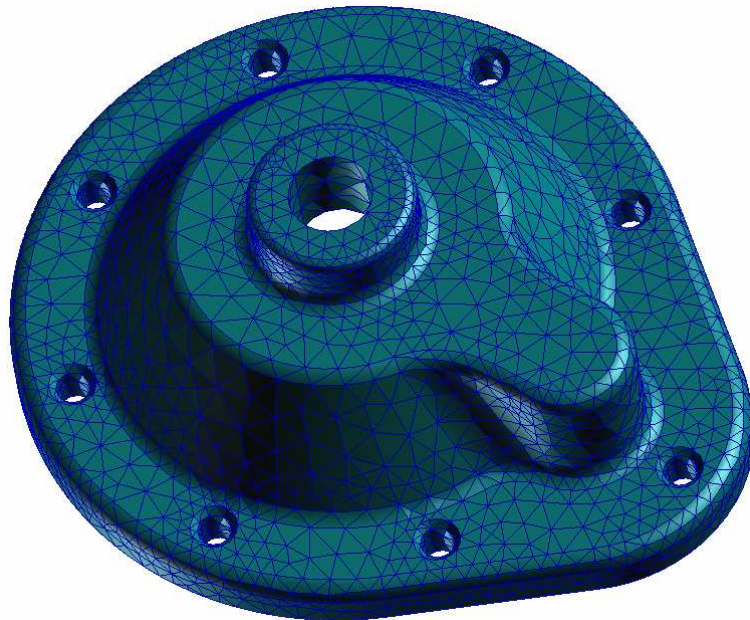


Рисунок 2.2 – Конечно-элементная модель кожуха насоса

Простейшим способом представления результатов МКЭ-анализа является вывод на печать перемещений и напряжений в характерных точках (например, в узлах). При этом объем выводимой информации часто оказывается настолько большим, что даже простой ее просмотр требует значительного времени. Постпроцессоры обеспечивают выдачу результатов в удобной для практического использования форме. Это может быть визуализация (или анимация) деформированного состояния, многоцветное представление полей деформаций и напряжений (рисунок 2.3), представление данных полей с по-

мощью изоповерхностей, построение графиков интересующих нас величин (рисунок 2.4) и т.д.

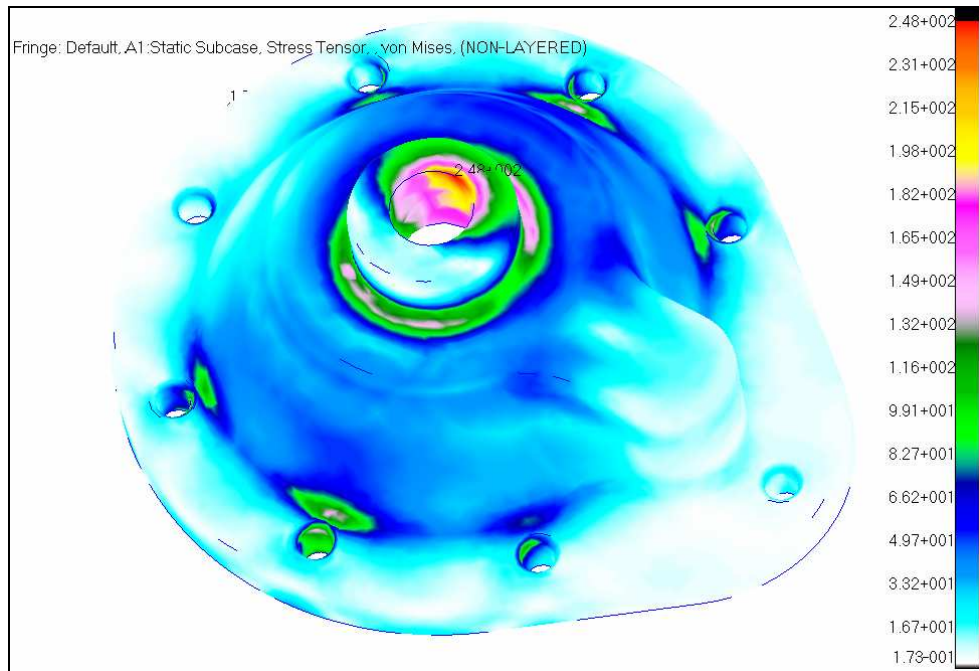


Рисунок 2.3 – Многоцветное представление поля напряжений по Мизесу

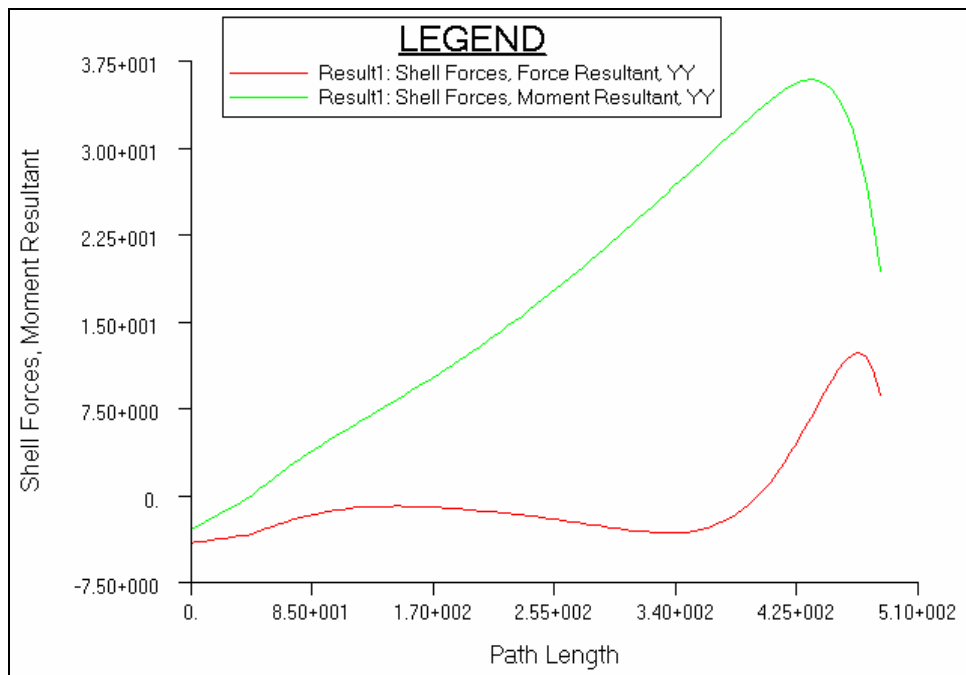


Рисунок 2.4 – Построение двухмерных графиков

Следует отметить, что в настоящее время среди систем инженерного анализа наиболее широко используемыми в мире являются программные продукты корпорации MSC.Software (MacNeal-Schwendler Corporation). MSC

основана в 1963 году. В 1965 году, выиграв тендер, она начала разработку МКЭ-системы NASTRAN для Национального комитета США по авиации и космическим исследованиям NASA (NAsa STRuctural Analysis – анализ конструкций для NASA). В 1972 году был создан главный продукт фирмы – решатель MSC.Nastran. Это универсальный тяжелый МКЭ-пакет. Сейчас данная система стала фактически мировым стандартом сертификации для аэрокосмических предприятий. В 1978 году для программы MSC.Nastran американской фирмой PDA Engineering был разработан пре- и постпроцессор PATRAN (PATches for NASTRAN – дополнения для NASTRAN), которая в 1994 году вошла в состав корпорации MSC.

В настоящее время создание хорошего конкурентно способного изделия невозможно без использования компьютерных технологий виртуальной разработки изделий VPD (Virtual Product Development). VPD-технологии являются самым верхним, самым современным, качественно новым уровнем в области систем инженерного анализа.

Корпорация MSC.Software предлагает широкий спектр VPD-систем, обмен данными между которыми существенно облегчен. Геометрическая информация здесь легко передается из одной системы в другую, и результаты одного из этапов работ являются исходными данными для другого. Такая тесная интеграция дает возможность применения междисциплинарного подхода.

Основными программными продуктами корпорации MSC.Software являются:

- MSC.Patran – интегрирующая универсальная среда для систем инженерного анализа и моделирования (пре- и постпроцессор);
- MSC.Nastran – основной МКЭ-решатель;
- MSC.Marc – МКЭ-решатель для комплексного нелинейного анализа конструкций с учетом сложных трехмерных контактов, больших пластических и упругих деформаций, сложных моделей материалов;
- MSC.Dytran – МКЭ-решатель для анализа быстропротекающих процессов ударного характера и разрушения конструкций;
- MSC.Super Form – программа для моделирования технологических процессов обработки металлов давлением на основе решателя MSC.Marc;
- MSC.Super Forge – тоже, но на основе решателя MSC.Dytran;
- MSC.Fatigue – система анализа долговечности, усталости, ресурса, появления и роста трещин и оптимизация конструкций по долговечности;

- MSC.Adams – программа для виртуального моделирования и анализа динамики машин и механизмов;
- MSC.Actran – МКЭ-решатель для анализа распространения акустических волн;
- MSC.visual Nastran for Windows – автономная МКЭ-система, имеющая свой встроенный пре- и постпроцессор Femap;
- MSC.Sim Designer for CATIA – программа для выполнения прочностных расчетов непосредственно в среде системы автоматизированного проектирования CATIA на основе возможностей базовых функций решателей Nastran, Marc и Adams.

Необходимо подчеркнуть, что VPD-технологии – это создание высокоточных компьютерных моделей изделий на основе применения нескольких десятков глубоко интегрированных CAE-систем. Стоимость покупки совокупности таких систем составляет десятки миллионов долларов. Такие затраты вызывают проблемы даже у ведущих мировых фирм.

Предлагаемая корпорацией MSC.Software система лицензирования и поставки MSC.Master Key делает доступными для небольших предприятий с ограниченным бюджетом самые современные VPD-технологии. Ее суть заключается в том, что в рамках любого MSC VPD-контракта поставляется весь основной комплекс систем, включающий более сотни программ. Каждая программа требует для запуска определенного числа жетонов. Система лицензирования лишь отслеживает, чтобы в текущий момент времени цена работающих программ в жетонах не превышала общего числа купленных жетонов.

Следует отметить, что наряду с пакетом MSC.Nastran система ANSYS (разработанная американской фирмой ANSYS, Inc, основанной в 1970 году) входит в число лидирующих универсальных тяжелых МКЭ-комплексов уже более 30 лет. Начало развитию данной программы положил ученый с мировым именем Dr. John Swanson. Ее базовой отраслью является атомная энергетика. В отличие от Nastran система ANSYS имеет свой встроенный графический пре- и постпроцессор. Отличительными особенностями ANSYS являются уникальные возможности решения связанных многодисциплинарных задач (multiphysics), объединяющих прочность, теплофизику, электромагнетизм и гидрогазодинамику в рамках одной программы и модели. Кроме того, система ANSYS первой среди МКЭ-пакетов получила сертификат серии ISO 9001.

Многоцелевые функции комплекса ANSYS обеспечиваются наличием в нем многочисленного семейства отдельных специализированных программ, имеющих много общих функций, однако математическое обеспечение которых рассчитано на решение отдельных классов задач. Основными программами здесь являются:

- ANSYS/Multiphysics – программа для широкого круга инженерных дисциплин, позволяющая проводить расчеты в области прочности, распространения тепла, механики жидкости и газа, электромагнетизма, а также решать связанные задачи;
- ANSYS/Mechanical – программа для выполнения проектных разработок, анализа и автоматизации, позволяющая решать сложные задачи прочности конструкций, теплопередачи и акустики (является подмножеством ANSYS/Multiphysics);
- ANSYS/Structural – программа, позволяющая выполнять сложный прочностной анализ конструкций с учетом разнообразных нелинейных эффектов (является подмножеством ANSYS/Mechanical);
- ANSYS/Thermal – это отдельная программа, выделенная из пакета ANSYS/Mechanical, для решения тепловых стационарных и нестационарных задач;
- ANSYS/LS-DYNA – программа для анализа высоконелинейных и быстропротекающих процессов в задачах прочности конструкций;
- ANSYS/ED – учебная версия программы ANSYS/Multiphysics, имеющая ограничения по размеру расчетной модели.

В заключение особо следует отметить МКЭ-пакеты, предназначенные для анализа высоконелинейных и быстропротекающих процессов в задачах механики твердого и жидкого тел. К таковым системам в первую очередь следует отнести программу LS-DYNA, первая версия которой была выпущена в 1976 году корпорацией LSTC (Livermore Software Technology Corp.). Данная программа была первой в своей области и послужила основой для всех современных пакетов высоконелинейного анализа, оставаясь на лидирующих позициях до сегодняшнего дня. Другой системой такого типа является MSC.Dytran. Эти пакеты позволяют решать сложнейшие задачи, такие как столкновение конструкций с разрушением (например, краш-тесты, т.е. соударение автомобиля с препятствием), попадание птицы в авиадвигатель, обрыв лопатки, взрывы, штамповка металла, пробивание снарядом конструк-

ции и т.д. Данные пакеты опираются на самые современные достижения науки. Здесь используется Лагранжево-Эйлеровый алгоритм пространственно-временной дискретизации, что позволяет описывать взаимодействие жидкости или газа с деформируемым телом. При этом применяется явная схема интегрирования по времени, которая существенно уменьшает время счета.

К рассматриваемому классу программных средств можно отнести также МКЭ-пакет ABAQUS, который имеет два решателя: общего назначения (Standard) и явный (Explicit), предназначенный для анализа высоконелинейных переходных динамических процессов. Данная система разработана одноименной компанией (ABAQUS Inc.), основанной в 1978 году. Ее базовой отраслью является ядерная промышленность.

Существует мнение, что о МКЭ-пакете следует судить по тому, как в нем реализован алгоритм решения контактных задач. В этом плане ABAQUS, наряду с Marc и ANSYS, занимает лидирующее место в мире.

2.2 Задание единиц измерения величин при работе с МКЭ-пакетами

Отметим, что универсальные МКЭ-пакеты, такие как MSC.Patran-Nastran и ANSYS, не контролируют единицы измерения величин и не выполняют их преобразование. Пользователь сам должен позаботиться о том, в каких единицах следует задавать исходные данные и в каких единицах будут выводиться результаты расчета.

Здесь можно предложить следующий подход. Введем обозначения: $\langle l \rangle$ – единица длины; $\langle F \rangle$ – единица силы; $\langle t \rangle$ – единица времени; $\langle p \rangle$ – единица давления; $\langle E \rangle$ – единица модуля упругости; $\langle \sigma \rangle$ – единица напряжения; $\langle u \rangle$ – единица перемещения; $\langle v \rangle$ – единица скорости; $\langle a \rangle$ – единица ускорения; $\langle m \rangle$ – единица массы; $\langle \rho \rangle$ – единица плотности; $\langle \rho g \rangle$ – единица удельного веса.

При работе с МКЭ-пакетом удобно в качестве основных единиц выбрать единицы длины $\langle l \rangle$, силы $\langle F \rangle$ и времени $\langle t \rangle$. При этом остальные единицы будут производными, они выражаются через основные как

$$\langle p \rangle = \langle E \rangle = \langle \sigma \rangle = \frac{\langle F \rangle}{\langle l \rangle^2}; \quad \langle u \rangle = \langle l \rangle; \quad \langle v \rangle = \frac{\langle l \rangle}{\langle t \rangle}; \quad \langle a \rangle = \frac{\langle l \rangle}{\langle t \rangle^2};$$

$$\langle m \rangle = \frac{\langle F \rangle}{\langle a \rangle} = \frac{\langle F \rangle}{\langle l \rangle} \cdot \langle t \rangle^2; \quad \langle \rho \rangle = \frac{\langle m \rangle}{\langle l \rangle^3} = \frac{\langle F \rangle}{\langle l \rangle^4} \cdot \langle t \rangle^2; \quad \langle \rho g \rangle = \frac{\langle m \rangle}{\langle l \rangle^3} \cdot \langle a \rangle = \frac{\langle F \rangle}{\langle l \rangle^3}.$$

Единица массы здесь определяется согласно второму закону Ньютона.

Рассмотрим два примера задания единиц измерений величин.

Пример 1: Рекомендуемые единицы в статических задачах.

Основные единицы:

$$\langle l \rangle = \text{мм}; \quad \langle F \rangle = \text{Н}; \quad \langle t \rangle = \text{с}.$$

Производные единицы:

$$\langle p \rangle = \langle E \rangle = \langle \sigma \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} = \text{МПа}; \quad \langle u \rangle = \text{мм}; \quad \langle v \rangle = \frac{\text{мм}}{\text{с}}; \quad \langle a \rangle = \frac{\text{мм}}{\text{с}^2};$$

$$\langle m \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{мм}} \cdot \text{с}^2 = \text{т}; \quad \langle \rho \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{мм}^4} \cdot \text{с}^2 = \frac{\text{т}}{\text{мм}^3}; \quad \langle \rho g \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{мм}^3}.$$

При определении нагрузки от собственного веса можно плотность задать в $\text{кг}/\text{мм}^3$, а ускорение свободного падения в $\text{м}/\text{с}^2$, тогда

$$\langle \rho g \rangle = \frac{\text{кг}}{\text{мм}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{мм}^3}.$$

Пример 2: Рекомендуемые единицы в динамических задачах.

Основные единицы:

$$\langle l \rangle = \text{м}; \quad \langle F \rangle = \text{Н}; \quad \langle t \rangle = \text{с}.$$

Производные единицы:

$$\langle p \rangle = \langle E \rangle = \langle \sigma \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}; \quad \langle u \rangle = \text{м}; \quad \langle v \rangle = \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad \langle a \rangle = \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

$$\langle m \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot \text{с}^2 = \text{кг}; \quad \langle \rho \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{м}^4} \cdot \text{с}^2 = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \langle \rho g \rangle = \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}.$$

Вопросы по теме 2

- 1) Какие этапы МКЭ-расчета плохо поддаются автоматизации и требуют больших затрат ручного труда?
 1. Подготовка и ввод исходных данных.
 2. Вычисление матриц жесткости конечных элементов.
 3. Формирование матрицы жесткости конструкции.
 4. Решение системы уравнений равновесия и определение узловых перемещений.
 5. Вычисление напряжений в конечных элементах.
 6. Обработка и анализ результатов расчета.

- 2) К какому классу программных продуктов относятся МКЭ-пакеты?
 1. К системам инженерного анализа.
 2. К системам автоматизированного проектирования.
 3. К системам автоматизированного производства.
 4. К CAE-системам.
 5. К CAD-системам.
 6. К CAM-системам.

- 3) Что такое CAE-система?
 1. Система инженерного анализа.
 2. Система автоматизированного проектирования.
 3. Система автоматизированного производства.
 4. Автоматизированная система управления производством.

- 4) Что такое CAD-система?
 1. Система инженерного анализа.
 2. Система автоматизированного проектирования.
 3. Система автоматизированного производства.
 4. Автоматизированная система управления производством.

- 5) Каково назначение препроцессора?
 1. Ввод исходных данных в интерактивном режиме.
 2. Формирование разрешающей системы уравнений МКЭ.
 3. Решение системы уравнений равновесия МКЭ и определение узловых перемещений.
 4. Вычисление напряжений в элементах по найденным узловым перемещениям.
 5. Представление результатов расчета в удобной для практического использования форме.

- 6) Каково назначение постпроцессора?
1. Ввод исходных данных в интерактивном режиме.
 2. Формирование разрешающей системы уравнений МКЭ.
 3. Решение системы уравнений равновесия МКЭ и определение узловых перемещений.
 4. Вычисление напряжений в элементах по найденным узловым перемещениям.
 5. Представление результатов расчета в удобной для практического использования форме.
- 7) Что является базовой отраслью МКЭ-пакета NASTRAN?
1. Аэрокосмическая промышленность.
 2. Атомная энергетика.
 3. Ядерная промышленность.
 4. Машиностроение.
 5. Автомобилестроение.
 6. Радиоэлектроника.
- 8) Что является базовой отраслью МКЭ-пакета ANSYS?
1. Аэрокосмическая промышленность.
 2. Атомная энергетика.
 3. Ядерная промышленность.
 4. Машиностроение.
 5. Автомобилестроение.
 6. Радиоэлектроника.
- 9) Что является базовой отраслью МКЭ-пакета ABAQUS?
1. Аэрокосмическая промышленность.
 2. Атомная энергетика.
 3. Ядерная промышленность.
 4. Машиностроение.
 5. Автомобилестроение.
 6. Радиоэлектроника.
- 10) Какие из перечисленных ниже программ реализуют МКЭ?
1. MSC.Patran.
 2. MSC.Nastran.
 3. ANSYS.
 4. ABAQUS.
 5. MSC.Marc.
 6. MSC.Fatigue.
 7. MSC.Adams.

11) Какие из перечисленных ниже программ являются универсальными тяжелыми МКЭ-пакетами?

1. MSC.Nastran.
2. ANSYS.
3. MSC.Marc.
4. MSC.Dytran.
5. MSC.Super Form.
6. LS-DYNA.

12) Какие из перечисленных ниже программ предназначены для анализа высоконелинейных и быстропротекающих процессов ударного характера?

1. MSC.Nastran.
2. ANSYS.
3. ABAQUS/Explicit.
4. LS-DYNA.
5. MSC.Marc.
6. MSC.Dytran.

13) Какие из перечисленных ниже программ специально предназначены для моделирования процессов обработки металлов давлением?

1. MSC.Super Forge.
2. MSC.Super Form.
3. ANSYS.
4. ABAQUS/Standard.
5. MSC.Fatigue.
6. MSC.Adams.

14) Какие из перечисленных ниже программ наиболее эффективны для решения сложных контактных задач?

1. MSC.Nastran.
2. ANSYS.
3. ABAQUS.
4. LS-DYNA.
5. MSC.Marc.
6. MSC.Dytran.

15) Какие из перечисленных ниже программ выполняют функции пре- и постпроцессора для систем инженерного анализа?

1. MSC.Patran.
2. MSC.Nastran.
3. MSC.Marc.
4. MSC.Dytran.
5. MSC.Actran.
6. Femap.

16) Какие из перечисленных ниже программ имеют встроенный пре- и постпроцессор?

1. MSC.Nastran.
2. ANSYS.
3. ABAQUS.
4. MSC.visual Nastran for Windows.

17) Какие из перечисленных ниже программ позволяют решать линейные и нелинейные статические и динамические задачи анализа прочности конструкций?

1. MSC.Nastran.
2. ANSYS/Mechanical.
3. ANSYS/Thermal.
4. ABAQUS/Standard.
5. MSC.Adams.

18) Чем пакет ANSYS выгодно отличается от программы MSC.Nastran?

1. Наличием встроенного пре- и постпроцессора.
2. Возможностью решения связанных многодисциплинарных задач.
3. Возможностью решения сложных контактных задач.
4. Возможностью решения геометрически и физически нелинейных задач.
5. Возможностью анализа переходных динамических процессов.

19) Что такое VPD-технологии?

1. Компьютерные технологии виртуальной разработки изделий.
2. Компьютерные технологии автоматизированного производства.
3. Компьютерные технологии оптимизации конструкций.
4. Компьютерные технологии управления производством.
5. Компьютерные технологии математического моделирования.

20) Каково назначение VPD-технологий?

1. Создание высокоточных компьютерных моделей изделий.
2. Обеспечение высокоточного процесса изготовления изделий.
3. Эффективное управление производством.
4. Научная организация труда.
5. Управление качеством.

21) В каких единицах следует задавать массу, если в качестве единицы длины выбираются миллиметры, а силы – ньютоны?

1. В граммах.
2. В килограммах.
3. В центнерах.
4. В тоннах.
5. В фунтах.

22) В каких единицах следует задавать массу, если в качестве единицы длины выбираются метры, а силы – ньютоны?

1. В граммах.
2. В килограммах.
3. В центнерах.
4. В тоннах.
5. В фунтах.

23) В каких единицах следует задавать давление, если в качестве единицы длины выбираются миллиметры, а силы – ньютоны?

1. В паскалях.
2. В мегапаскалях.
3. В гигапаскалях.
4. В атмосферах.
5. В барах.
6. В миллиметрах ртутного столба.
7. В фунтах на квадратный дюйм.

24) В каких единицах следует задавать давление, если в качестве единицы длины выбираются метры, а силы – ньютоны?

1. В паскалях.
2. В мегапаскалях.
3. В гигапаскалях.
4. В атмосферах.
5. В барах.
6. В миллиметрах ртутного столба.
7. В фунтах на квадратный дюйм.

25) В каких единицах следует задавать модуль упругости, если в качестве единицы длины выбираются миллиметры, а силы – ньютоны?

1. В паскалях.
2. В мегапаскалях.
3. В гигапаскалях.
4. В атмосферах.
5. В барах.
6. В миллиметрах ртутного столба.
7. В фунтах на квадратный дюйм.

26) В каких единицах следует задавать модуль упругости, если в качестве единицы длины выбираются метры, а силы – ньютоны?

1. В паскалях.
2. В мегапаскалях.
3. В гигапаскалях.
4. В атмосферах.
5. В барах.
6. В миллиметрах ртутного столба.
7. В фунтах на квадратный дюйм.

3 ОСНОВЫ РАБОТЫ С MSC.PATRAN-NASTRAN

3.1 Общая характеристика системы MSC.Patran-Nastran

MSC.Patran-Nastran относится к классу CAE-систем, т.е. систем инженерного анализа. Ее первый компонент, MSC.Patran, представляет собой интегрирующую среду систем моделирования, анализа, проектирования и оценки результатов, необходимых для исследования работоспособности изделий на стадиях проектирования, производства и эксплуатации.

Программа MSC.Patran с помощью полностью управляемого графического интерфейса и интегрированной справочной системы позволяет достаточно легко решать задачи по созданию расчетной модели и обработке результатов. Кроме того, расширенные средства встроенного в программу языка PCL (Patran Command Language) позволяют адаптировать функциональные возможности программы к конкретным требованиям пользователя.

Программа MSC.Patran имеет открытую архитектуру и обеспечивает прямой доступ к наиболее популярным в мире CAD-системам, таким как CATIA, Pro/ENGINEER, Unigraphics, CADD5, EUCLID 3. Она включает в себя специальные методы и функции для контроля CAD-геометрии и преобразования ее к расчетной модели. Данная программа также имеет обширный набор собственных функций для создания и модификации геометрических моделей.

Для систем анализа (МКЭ-решателей) программа MSC.Patran играет роль пре- и постпроцессора. С помощью соответствующих настроек она обеспечивает на уровне лучших мировых стандартов подготовку модели и обработку результатов практически для любой расчетной системы. Интерфейсы для наиболее популярных систем анализа (таких как MSC.Nastran, MSC.Dytran LS-DYNA, ANSYS и др.) можно приобрести в корпорации MSC.Software, а для других систем – у их производителей. Мощные возможности языка PCL также позволяют пользователям включать свои системы анализа в среду MSC.Patran.

Второй компонент, MSC.Nastran, представляет собой в чистом виде МКЭ-решатель (т.е. систему анализа). Он обеспечивает полный набор расчетов, включая расчет напряженно-деформированного состояния, частот и форм собственных колебаний, анализ устойчивости, решение задач теплопередачи, исследование установившихся и неустойчивых процессов, акустических явлений, нелинейных статических процессов, нелинейных пере-

ходных динамических процессов, расчет критических частот и вибраций роторных машин, анализ частотных характеристик при воздействии случайных нагрузок, спектральный анализ и исследование аэроупругости. Предусмотрена также возможность моделирования практически всех типов материалов, включая композитные и гиперупругие. Расширенные средства данной программы включают технологию суперэлементов, модальный синтез и макроязык DMAP для создания пользовательских приложений.

Наряду с расчетом конструкций MSC.Nastran может использоваться и для оптимизации проектов. На основе возможностей автоматического рестарта в данной программе можно проводить сложные многошаговые исследования работы конструкций как при изменении условий нагружения, так и при переходе от одного вида анализа к другому.

Основу MSC.Nastran составляют отработанная технология элементов и надежные численные методы. Данная программа позволяет одновременно применять в одной и той же модели h-(иерархические) и p-(полиномиальные) элементы. H-элементы – это обычные элементы изопараметрического типа. В отличие от них p-элементы, имеющие супервысокий порядок аппроксимации, хорошо отражают криволинейную геометрию конструкции и обеспечивают высокую точность при детальном расчете напряжений. Они автоматически адаптируются к желаемому уровню точности.

В заключение отметим, что работа в среде MSC.Patran-Nastran обычно выполняется по следующей схеме:

- 1) построение и/или импорт геометрии (например, из CAD-системы);
- 2) выбор системы анализа (в данном случае MSC.Nastran);
- 3) создание конечно-элементной модели (т.е. модели для анализа):
 - генерация конечно-элементной сетки;
 - определение свойств материалов;
 - определение свойств элементов;
 - задание граничных условий и нагрузки;
- 4) выполнение анализа (т.е. запуск решателя MSC.Nastran);
- 5) оценка результатов расчета.

3.2 Графический интерфейс пользователя

При работе с МКЭ-системой пользователь в основном имеет дело с программой, выполняющей функции пре- и постпроцессора (т.е. в нашем

случае с MSC.Patran). Главное окно программы MSC.Patran представлено на рисунке 3.1.

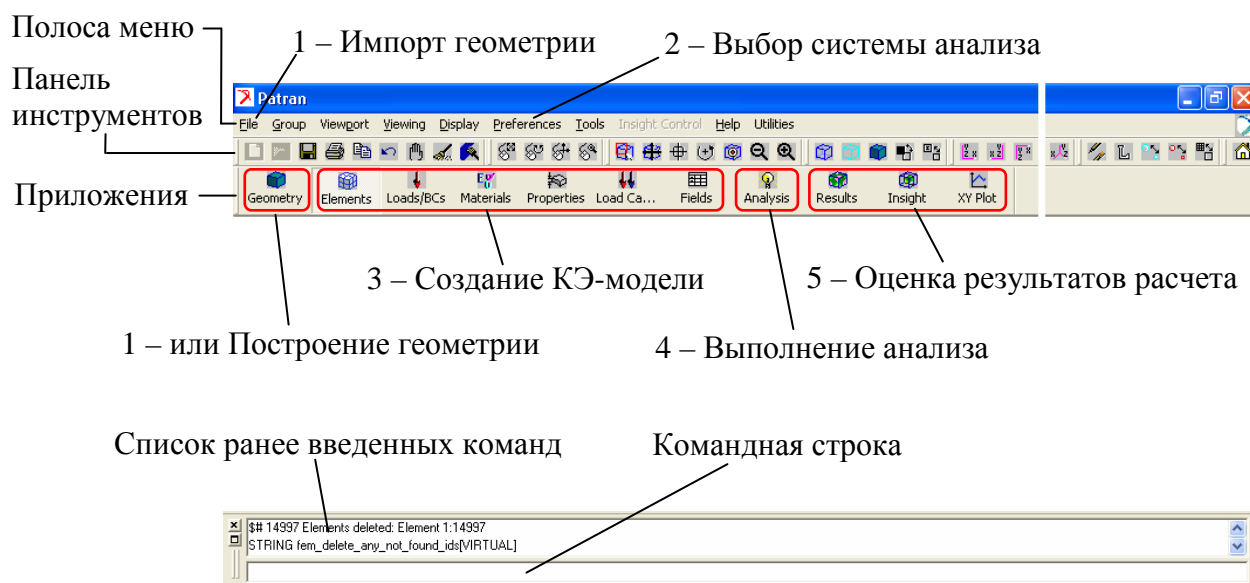











Рисунок 3.1 – Главное окно программы MSC.Patran

Команды полосы меню предназначены для изменения глобальных установок. Здесь в меню «File» в основном сосредоточены команды для работы с различными файлами и базами данных. Меню «Group» содержит команды, предназначенные для объединения геометрических и конечно-элементных объектов модели в группы и работы с ними. Меню «Viewport» используется для создания, редактирования, перемещения и настройки графических окон, где изображаются отдельные объекты модели либо вся модель целиком. Команды меню «Viewing» позволяют управлять размером и ориентацией модели в графическом окне. Меню «Display» помогает организовать удобное взаимное отображение объектов модели на экране. С помощью меню «Preferences» устанавливаются параметры, управляющие процессом построения модели. В меню «Tools» содержатся специальные приложения, а также дополнительные средства, требующие отдельных лицензий. Меню «Help» позволяет обращаться к различным разделам справочной документации (для получения контекстной помощи можно также воспользоваться клавишей *F1*). И наконец, меню «Utilities» предназначено для запуска разработанных пользователем подпрограмм.





Приложения используются для ввода определенных частей модели (т.е. геометрии, нагрузок, граничных условий и т.д.). В каждый момент времени

может быть выбрано лишь одно приложение. При этом каждому приложению соответствует появляющаяся справа диалоговая панель, предназначенная для ввода исходных данных и задания определенных параметров.

Панель инструментов обеспечивает быстрый доступ к наиболее часто используемым командам (таким как изменение проекции изображения, перемещение и/или вращение модели, приближение определенной части модели, включение/выключение нумерации объектов и т.д.). Она содержит кнопки с иконками, которые разбиты на несколько групп. В первую группу включены так называемые системные команды:








-  (*File New*) – создание файла базы данных для новой задачи;
-  (*File Open*) – открытие файла существующей базы данных;
-  (*File Save*) – сохранение базы данных;
-  (*Print*) – печать содержимого графического окна;
-  (*Copy to Clipboard*) – копирование содержимого графического окна в буфер обмена данных;
-  (*Undo*) – отмена действия последней команды, выполненной в результате нажатия кнопки *-Apply-* или *-OK-* с черточками;
-  (*Abort*) – прерывание работы команды в процессе ее выполнения;
-  (*Reset graphics*) – переустановка изображения модели к виду, определенному по умолчанию;
-  (*Refresh graphics*) – восстановление всех графических видов.

Во вторую группу помещены кнопки для изменения динамического режима (т.е. перемещения и вращения модели с помощью мыши):






-  (*Mouse rotate XY*) – средняя кнопка мыши управляет вращением модели вокруг осей X и Y ;
-  (*Mouse rotate Z*) – средняя кнопка мыши управляет вращением модели вокруг оси Z ;
-  (*Mouse translate XY*) – средняя кнопка мыши управляет перемещением модели вдоль осей X и Y ;
-  (*Mouse zoom*) – средняя кнопка мыши позволяет приближать или отодвигать изображение модели.

В двухкнопочной мыши для выполнения перечисленных выше действий следует одновременно нажать обе кнопки.

Третья группа содержит команды для управления масштабом и расположением модели в графическом окне:





-  (*View corners*) – увеличение фрагмента изображения модели путем выделения его мышью;
-  (*Fit view*) – установка подходящего масштаба, так чтобы модель целиком помещалась в графическом окне;
-  (*View Center*) – перемещение модели путем указания нового центра вида;
-  (*Rotation center*) – выбор центра динамического вращения (по умолчанию он находится в центре изображения модели);
-  (*Model center*) – установка центра вращения в центре отображенных объектов;
-  (*Zoom out*) – уменьшение масштаба в два раза;
-  (*Zoom in*) – увеличение масштаба в два раза.


В четвертой группе располагаются команды, которые управляют способами отображения модели в графическом окне:

-  (*Wire frame*) – изображение модели в прозрачном (проволочном) виде;
-  (*Hidden line*) – изображение модели с удалением невидимых линий;
-  (*Smooth shaded*) – изображение модели с закрашенными гранями и тенями от регулируемого источника света;
-  (*Exchange Back/White*) – изменение цвета фона графического окна (черный ↔ белый);
-  (*Cycle Show Labels*) – включение/выключение нумерации объектов.


Пятую группу составляют кнопки predetermined проекций, назначение которых понятно из иконок, где изображены соответствующие положения осей координат. По умолчанию установлен фронтальный вид, т.е. на плоскость X-Y.

Шестая группа содержит команды, позволяющие менять изображение объектов:

-  (*Plot/Erase*) – вызов диалоговой панели, с помощью которой можно включать или отключать отображение объектов в графическом окне;
-  (*Label Control*) – вызов диалоговой панели, где можно включать или отключать отображение номеров для различных типов объектов;
-  (*Point size*) – изменение размера изображения точек (от одного до девяти пикселей);
-  (*Node size*) – изменение размера изображения узлов (от одного до девяти пикселей);

 (*Display lines*) – включение/отключение режима отображения на поверхностях промежуточных линий (используемых для визуализации внутренней геометрии поверхностей).

Действия, выполненные в рамках одной сессии (сеанса работы), могут быть просмотрены в списке ранее введенных команд. Командная строка позволяет вводить с помощью клавиатуры PCL-команды.

Следует обратить внимание еще на значок с логотипом корпорации MSC.Software , который располагается в правом верхнем углу главного окна MSC.Patran. Это индикатор работы программы. Если глобус не вращается, то MSC.Patran находится в режиме ожидания ввода команд пользователя. Вращающийся глобус с синей границей означает, что программа выполняет действие, которое можно остановить с помощью кнопки прерывания *Abort*. И наконец, красная граница сигнализирует о том, что выполняется действие, которое нельзя прервать.

Начинать работу с программой MSC.Patran необходимо с меню «File». Здесь можно найти следующие команды:

- *New...* – создание новой пустой базы данных (здесь необходимо задать имя задачи);
- *Open...* – открытие созданной ранее базы данных;
- *Close* – закрытие текущей базы данных (не выходя из программы);
- *Save* – сохранение базы данных;
- *Save a Copy...* – сохранение базы данных под другим именем;
- *Utilities>Revert* – возвращение к старой копии базы данных (при этом все изменения, внесенные в базу данных во время текущего сеанса работы, игнорируются);
- *Quit* – завершение сеанса работы с программой (база данных сохраняется автоматически).

Суффикс «...» здесь и далее означает, что соответствующая команда требует ввода дополнительных параметров.

Следует отметить, что при создании новой базы данных автоматически появляется диалоговая панель «New Model Preference» (начальные установки для новой модели), показанная на рисунке 3.2. Здесь необходимо задать точность геометрического моделирования (*Tolerance*), выбрать систему анализа (*Analysis Code*) и тип анализа (*Analysis Type*).

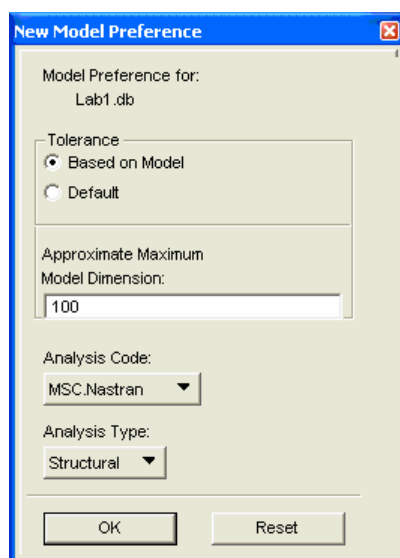


Рисунок 3.2 – Ввод начальных установок

Точность можно задать либо по умолчанию (опция «Default»), либо на основе модели (опция «Based on Model»). В первом случае точность полагается равной 0,005 единицы длины. В пределах этого размера геометрические объекты будут считаться совпадающими. Во втором – указывается наибольший (габаритный) размер модели. При этом точность будет составлять 0,05% от введенного значения.

В дальнейшем мы будем использовать лишь одну систему анализа – MSC.Nastran и будем рассматривать только один тип анализа – Structural (решение задач механики деформируемого твердого тела).

3.3 Файлы

Программа MSC.Patran создает следующие файлы (model_name – заданное пользователем имя задачи):

- model_name.db – файл базы данных (достаточно большой двоичный файл, создаваемый один на модель);
- model_name.db.bkup – старая копия базы данных (создается только при включении опции возвращения «Enable Revert Operation» в диалоговой панели, вызываемой командой *Preferences>Global*);
- patran.ses.number – сессионный файл, содержащий команды, введенные за время одного сеанса работы (небольшой текстовый файл; number – порядковый номер сеанса работы);
- model_name.db.jou – журнальный файл, создаваемый один на модель и содержащий все команды, введенные при ее построении (небольшой тек-

стовый файл; в соединении с командой *File>Utilities>Rebuild* может использоваться для воссоздания модели при утрате базы данных в результате системного сбоя или ошибок пользователя);

- *model_name.bdf* – входной файл, содержащий исходные данные для решателя MSC.Nastran (текстовый файл, создаваемый в процессе экспортирования модели для расчета).

Программа MSC.Nastran по окончании счета создает следующие файлы:

- *model_name.op2* – выходной двоичный файл, содержащий данные по модели и результаты расчета (загружается в MSC.Patran для анализа, обработки и документирования результатов);

- *model_name.xdb* – выходной двоичный файл, содержащий только результаты расчета (в отличие от предыдущего файла он не копируется в базу данных; при просмотре результатов MSC.Patran производит чтение непосредственно из этого файла, что позволяет экономить память);

- *model_name.f06* – текстовый файл, содержащий информационные сообщения, сообщения об ошибках и некоторые результаты расчета (используется для анализа возникающих ошибок и контроля прохождения процесса решения задачи);

- *model_name.f04* – текстовый файл, содержащий характеристику исполнения программы и список выполненных модулей.

Вопросы по теме 3

- 1) Что представляет собой программа MSC.Patran?
 1. Интегрирующую среду для систем моделирования, анализа, проектирования и оценки результатов.
 2. МКЭ-решатель.
 3. Препроцессор.
 4. Постпроцессор.
 5. Систему автоматизированного проектирования.

- 2) Что представляет собой программа MSC.Nastran?
 1. Интегрирующую среду для систем моделирования, анализа, проектирования и оценки результатов.
 2. МКЭ-решатель.
 3. Препроцессор.
 4. Постпроцессор.
 5. Систему автоматизированного проектирования.

- 3) Что такое PCL?
 1. Язык программирования в среде MSC.Patran.
 2. Макроязык программы MSC.Nastran для создания пользовательских приложений.
 3. Графический интерфейс пользователя.
 4. Пакетный режим.
 5. Система помощи.

- 4) Что такое DMAP?
 1. Язык программирования в среде MSC.Patran.
 2. Макроязык программы MSC.Nastran для создания пользовательских приложений.
 3. Графический интерфейс пользователя.
 4. Пакетный режим.
 5. Система помощи.

- 5) Какие конечные элементы позволяет одновременно использовать в одной модели программа MSC.Nastran?
 1. Н-элементы.
 2. Р-элементы.
 3. R-элементы.
 4. Q-элементы.
 5. G-элементы.
 6. D-элементы.

6) Что включает в себя этап создания модели для анализа?

1. Генерацию конечно-элементных сеток.
2. Определение свойств материалов.
3. Определение свойств элементов.
4. Задание граничных условий и нагрузки.
5. Построение геометрической модели.
6. Импорт геометрической модели.
7. Выполнение анализа.
8. Оценку результатов расчета.

7) В каком меню содержатся команды для работы с графическими окнами?

1. File.
2. Group.
3. Viewport.
4. Viewing.
5. Display.
6. Preferences.
7. Tools.
8. Utilities.

8) В каком меню содержатся команды, позволяющие управлять размером и ориентацией модели в графическом окне?

1. File.
2. Group.
3. Viewport.
4. Viewing.
5. Display.
6. Preferences.
7. Tools.
8. Utilities.

9) В каком меню содержатся команды, помогающие организовать удобное взаимное отображение объектов модели на экране?

1. File.
2. Group.
3. Viewport.
4. Viewing.
5. Display.
6. Preferences.
7. Tools.
8. Utilities.

10) С помощью какого меню устанавливаются параметры, управляющие процессом построения модели?

1. File.
2. Group.
3. Viewport.
4. Viewing.
5. Display.
6. Preferences.
7. Tools.
8. Utilities.

11) В каком меню содержатся специальные приложения?

1. File.
2. Group.
3. Viewport.
4. Viewing.
5. Display.
6. Preferences.
7. Tools.
8. Utilities.

12) Какое меню предназначено для запуска подпрограмм пользователя?

1. File.
2. Group.
3. Viewport.
4. Viewing.
5. Display.
6. Preferences.
7. Tools.
8. Utilities.

13) Какая кнопка панели инструментов используется для изображения модели в «проволочном» виде?

1. Wire frame.
2. Hidden line.
3. Smooth shaded.
4. Display lines.
5. Plot/Erase.
6. Fit view.

14) Какая кнопка панели инструментов используется для изображения модели с удалением невидимых линий?

1. Wire frame.
2. Hidden line.
3. Smooth shaded.
4. Display lines.
5. Plot/Erase.
6. Fit view.

15) Какая кнопка панели инструментов используется для изображения модели с закрашенными гранями?

1. Wire frame.
2. Hidden line.
3. Smooth shaded.
4. Display lines.
5. Plot/Erase.
6. Fit view.

16) Какая кнопка панели инструментов используется для включения/выключения режима отображения на поверхностях промежуточных линий?

1. Wire frame.
2. Hidden line.
3. Smooth shaded.
4. Display lines.
5. Plot/Erase.
6. Fit view.

17) С помощью какой кнопки панели инструментов устанавливается подходящий масштаб?

1. Fit view.
2. View corners.
3. View Center.
4. Model center.
5. Rotating center.
6. Mouse zoom.

18) С помощью какой кнопки панели инструментов можно увеличить фрагмент изображения модели путем выделения его мышью?

1. Fit view.
2. View corners.

3. View Center.
4. Model center.
5. Rotating center.
6. Mouse zoom.

19) Что входит в состав главного окна программы MSC.Patran?

1. Полоса меню.
2. Панель инструментов.
3. Приложения.
4. Список ранее введенных команд.
5. Командная строка.
6. Графическое окно.
7. Диалоговая панель приложения.

20) Для чего используются приложения?

1. Для ввода определенных частей модели.
2. Для настройки графических окон.
3. Для управления изображением модели в графическом окне.
4. Для работы с файлами и базами данных.
5. Для импорта геометрии.

21) Какой вид имеет индикатор работы программы, когда MSC.Patran находится в режиме ожидания ввода команд пользователя?

1. Невращающегося глобуса.
2. Вращающегося глобуса с зеленой границей.
3. Вращающегося глобуса с синей границей.
4. Вращающегося глобуса с красной границей.
5. Вращающегося глобуса с желтой границей.
6. Вращающегося глобуса с черной границей.
7. Зеленого прямоугольника.

22) Какой вид имеет индикатор работы программы, когда MSC.Patran выполняет действие, которое можно прервать?

1. Невращающегося глобуса.
2. Вращающегося глобуса с зеленой границей.
3. Вращающегося глобуса с синей границей.
4. Вращающегося глобуса с красной границей.
5. Вращающегося глобуса с желтой границей.
6. Вращающегося глобуса с черной границей.
7. Зеленого прямоугольника.

23) Какой вид имеет индикатор работы программы, когда MSC.Patran выполняет действие, которое нельзя прервать?

1. Невращающегося глобуса.
2. Вращающегося глобуса с зеленой границей.
3. Вращающегося глобуса с синей границей.
4. Вращающегося глобуса с красной границей.
5. Вращающегося глобуса с желтой границей.
6. Вращающегося глобуса с черной границей.
7. Зеленого прямоугольника.

24) Что такое точность геометрического моделирования?

1. Малый размер, в пределах которого геометрические объекты считаются совпадающими.
2. Габаритный размер модели.
3. Наименьшее расстояние между геометрическими объектами.
4. Наименьший размер геометрических объектов.
5. Наибольший размер геометрических объектов.

25) Какие из перечисленных ниже файлов создаются программой MSC.Patran?

1. model_name.db
2. model_name.db.bkup
3. model_name.db.jou
4. model_name.bdf
5. model_name.op2
6. model_name.xdb
7. model_name.f06
8. model_name.f04

26) Какие из перечисленных ниже файлов создаются программой MSC.Nastran?

1. model_name.db
2. model_name.db.bkup
3. model_name.db.jou
4. model_name.bdf
5. model_name.op2
6. model_name.xdb
7. model_name.f06
8. model_name.f04

27) Какой файл содержит исходные данные для решателя MSC.Nastran?

1. model_name.db
2. model_name.db.bkup
3. model_name.db.jou
4. model_name.bdf
5. model_name.op2
6. model_name.xdb
7. model_name.f06
8. model_name.f04

28) Какой файл может использоваться для воссоздания модели при утрате базы данных?

1. model_name.db
2. model_name.db.bkup
3. model_name.db.jou
4. model_name.bdf
5. model_name.op2
6. model_name.xdb
7. model_name.f06
8. model_name.f04

29) Какие из перечисленных ниже файлов являются текстовыми?

1. model_name.db
2. model_name.db.bkup
3. model_name.db.jou
4. model_name.bdf
5. model_name.op2
6. model_name.xdb
7. model_name.f06
8. model_name.f04

30) Какие из перечисленных ниже файлов являются двоичными?

1. model_name.db
2. model_name.db.bkup
3. model_name.db.jou
4. model_name.bdf
5. model_name.op2
6. model_name.xdb
7. model_name.f06
8. model_name.f04

31) Какой файл используется для анализа возникающих ошибок?

1. model_name.db
2. model_name.db.bkup
3. model_name.db.jou
4. model_name.bdf
5. model_name.op2
6. model_name.xdb
7. model_name.f06
8. model_name.f04

32) Какие файлы содержат полный набор результатов расчета?

1. model_name.db
2. model_name.db.bkup
3. model_name.db.jou
4. model_name.bdf
5. model_name.op2
6. model_name.xdb
7. model_name.f06
8. model_name.f04

4 ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

4.1 Геометрические объекты

Рассмотрим строительные блоки, из которых составляется модель тела. Простейшим геометрическим объектом является точка (Point). Точки изображаются бирюзовым (cyan) цветом и задаются своими координатами в трехмерном пространстве. Они являются составной частью всех остальных геометрических объектов. При построении кривых, поверхностей и объемов MSC.Patran создает точки автоматически. Поэтому нет необходимости всегда начинать моделирование с ввода точек.

Кривая (Curve) представляет собой одномерный параметрический объект. Они изображаются желтым цветом. Кривая характеризуется двумя концевыми точками P1, P2 и безразмерной параметрической координатой ξ_1 , которая изменяется от 0 в точке P1 до 1 в точке P2 (рисунок 4.1). В программе MSC.Patran может быть сгенерировано множество типов кривых, включая прямые линии, конические кривые, сплайны и т.д.

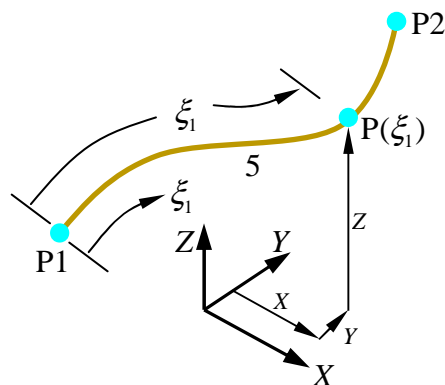


Рисунок 4.1 – Кривая

Поверхность (Surface) – это двумерный параметрический объект. Простые поверхности изображаются зеленым цветом, а общего вида, т.е. вырезанные (trimmed) из простых, – пурпурным (magenta). Поверхность характеризуется системой граничных кривых, началом и двумя параметрическими координатами ξ_1 и ξ_2 . Для визуализации внутренней геометрии можно задать режим отображения промежуточных линий (по умолчанию их две в каждом направлении).

Простая поверхность имеет три или четыре кромки, причем трехсторонняя поверхность является вырожденной. Параметрические координаты здесь изменяются от 0 до 1 (рисунок 4.2,а).

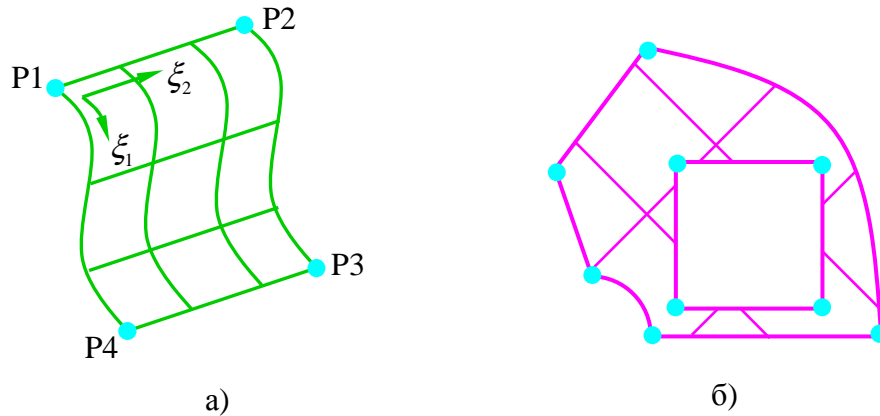


Рисунок 4.2 – Простая поверхность (а) и поверхность общего вида (б)

Поверхность общего вида может иметь более четырех кромок, при этом она может содержать внутренние границы (отверстия), как показано на рисунке 4.2,б. Каждая trimmed-поверхность имеет свою родительскую поверхность, определяющую ее параметризацию и кривизну.

Объем, или тело, (Solid) характеризуется системой граничных поверхностей и может быть простым (параметрическим) или сложным (непараметрическим). Параметрические объемы изображаются синим цветом. Они имеют от четырех до шести граней и три параметрические координаты ξ_1 , ξ_2 и ξ_3 , причем четырех- и пятигранные объемы являются вырожденными. Параметрические координаты здесь изменяются от 0 до 1 (рисунок 4.3).

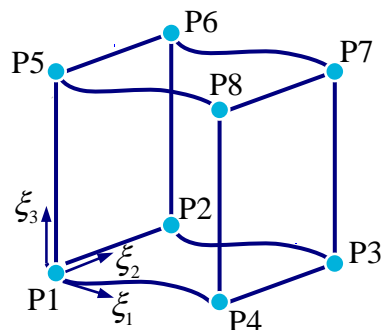


Рисунок 4.3 – Параметрический объем

Непараметрические тела описываются произвольным числом граней, образующих замкнутый объем, и могут содержать внутренние пустоты. Они рисуются белым цветом. В качестве границ здесь могут использоваться любые поверхности, представимые внутри программы MSC.Patran. Поэтому такие тела называют B-rep (boundary representation – представление границ).

Кроме того, в программе MSC.Patran имеются еще бесконечные плоскости (Planes) и векторы (Vectors), которые используются для выполнения некоторых геометрических операций. Вектор определяется длиной, направлением и началом. Плоскость задается нормальным к ней вектором и лежащей на ней точкой (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Условное изображение плоскости и вектора

4.2 Импорт геометрии

Во многих случаях более эффективным является использование существующей CAD-геометрии, нежели построение новой. Программа MSC.Patran позволяет импортировать геометрическую (твердотельную) модель из всех основных CAD-систем: CATIA, Pro/ENGINEER, Unigraphics, CADD5 5, EUCLID 3. Совместимость с другими программами обеспечивается посредством нейтрального файла формата IGES.

Для импорта модели необходимо в полосе меню выбрать последовательность *File>Import...* и в появившейся диалоговой панели задать источник «Source» (например, одну из CAD-систем) и имя импортируемого файла. При этом с помощью кнопки *...Options* можно установить фильтр, что позволяет импортировать не всю модель, а лишь ее часть.

Следует отметить, что здесь имеется возможность импорта входного файла решателя MSC.Nastran и даже файла базы данных MSC.Patran. В последнем случае в качестве источника необходимо выбрать «MSC.Patran DB». Такая возможность позволяет обмениваться информацией между различными базами данных.

4.3 Построение геометрической модели

В программе MSC.Patran геометрическая модель тела строится с использованием следующих возможностей:

- создание геометрических объектов (Create);
- редактирование имеющейся геометрии (Edit);
- построение относительно существующей геометрии (Extrude);
- создание копий существующей геометрии (Transform).


Все необходимые для этого команды сосредоточены в приложении «Geometry» (геометрия). Верхняя часть появляющейся здесь справа диалоговой панели представлена на рисунке 4.5. Отметим, что по умолчанию панели приложений пристыкованы к главному окну. Для их отсоединения необходимо нажать кнопку . Для возвращения в исходное состояние следует дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на заголовке панели.



Рисунок 4.5 – Верхние части пристыкованной (а) и отсоединенной (б) диалоговой панели приложения «Geometry»

В поле «Action» (действие) определяется тип операции над геометрическими объектами: Create – создать; Delete – удалить; Edit – редактировать; Show – показать; Transform – преобразовать; Verify – проверить; Associate – связать; Disassociate – разъединить; Renumber – перенумеровать.

В поле «Object» указывается тип объекта: Point – точка; Curve – кривая; Surface – поверхность; Solid – объем (тело); Coord – система координат; Plane – плоскость; Vector – вектор.

В поле «Method» (метод) задается способ выполнения установленного ранее действия. Этим методов достаточно много, и они различны для разных типов объектов.

4.3.1 Точки

При построении точек (действие Create) доступны следующие методы:

- XYZ – строит точку по трем координатам либо в существующем узле, вершине или другой точке;
- Arc Center – создает точку в центре кривизны дуги;
- Extract – создает точку на существующей кривой или поверхности путем задания параметрических координат;
- Interpolate – строит несколько точек между двумя заданными точками или на существующей кривой, используя равномерный или неравномерный шаг;
- Intersect – создает точку в месте пересечения таких пар объектов, как кривая-кривая, кривая-поверхность, кривая-плоскость, вектор-кривая, вектор-поверхность, вектор-плоскость;
- Offset – строит точку на существующей кривой, отстоящую на некотором расстоянии от заданной точки, лежащей на этой кривой;
- Pierce – создает точку в месте пересечения кривой (или кромки) с поверхностью (или гранью);
- Project – проецирует точку (или точки) на поверхность (или грань) в направлении заданного вектора.

Например, при использовании первого метода диалоговая панель принимает вид, как показано на рисунке 4.6.

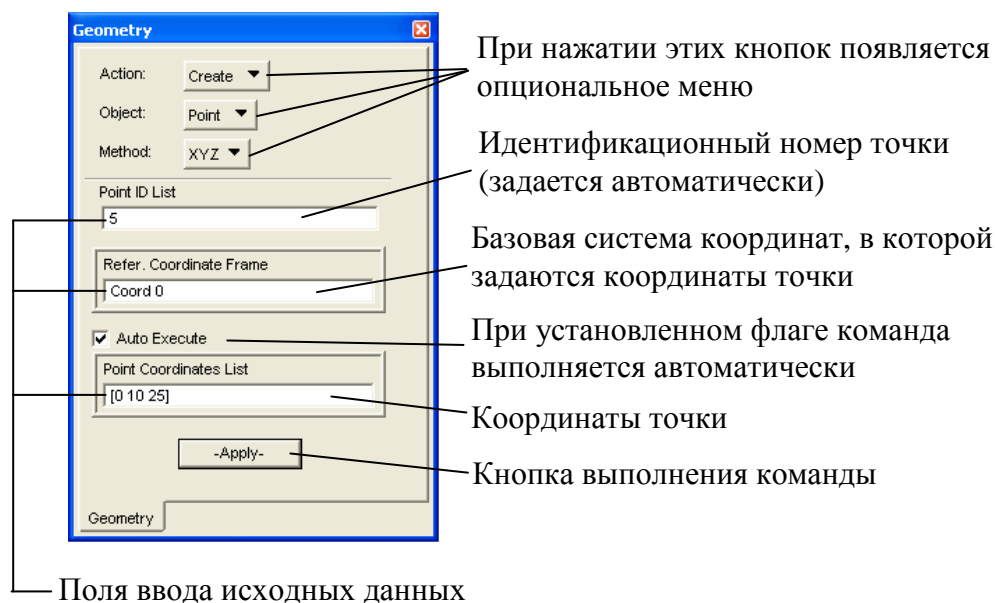



Рисунок 4.6 – Ввод точки методом XYZ

Следует отметить, что каждый геометрический объект (включая системы координат) имеет свой идентификационный номер. Для ссылки в области ввода исходных данных на геометрические объекты используется следующий синтаксис:

- Point 1 2 3 – ссылка на точки 1, 2 и 3 (в качестве разделителя здесь кроме пробела можно использовать запятую и косую черту);
- Curve 1:9:2 – ссылка на кривые с 1 по 9 с шагом 2 (т.е. на кривые 1, 3, 5, 7 и 9);
- Surface 3.1 – означают ссылку на объект, связанный с объектом более высокого порядка (т.е. в нашем случае ссылку на кромку 1 поверхности 3, что аналогично ссылке на кривую);
- Coord 0.2 – ссылка на ось 2 (т.е. ось Y) глобальной декартовой системы координат, имеющей номер 0;
- Solid 1:10.2 – комбинированная ссылка на грань 2 объемов с 1 по 10;
- [0 10 25] – квадратные скобки означают определение координат (т.е. ссылку на точку с координатами $x = 0$, $y = 10$, $z = 25$);
- [1,zp5,3] – при задании отдельных компонент можно ссылаться на существующие объекты (здесь y -координата равна z -координате точки 5);
- [1,2,`-64.0/20.0`] – при вводе отдельных компонент допустимы математические операции;
- <1,1,1> – угловые скобки определяют вектор (в данном случае компоненты вектора равны $x = 1$, $y = 1$, $z = 1$);
- {Point 1 [9 2 7]} – фигурные скобки обозначают ось системы координат (здесь ось идет от точки 1 до точки с координатами $x = 9$, $y = 2$, $z = 7$).

Вводить исходные данные можно либо с помощью клавиатуры, либо манипулятором «мышь» (т.е. используя графический выбор). При графическом способе выбора объектов, прежде всего, необходимо активизировать соответствующую область ввода исходных данных диалоговой панели. Затем нужно подвести курсор к нужному геометрическому объекту и нажать левую кнопку мыши. При коллективном выборе предварительно требуется нажать (и удерживать) клавишу *Shift*. Для отмены выбора используется правая кнопка мыши. Для выбора множества рядом расположенных объектов можно воспользоваться зоной выбора в виде прямоугольника или полигона (многоугольника). В первом случае необходимо установить курсор в графическом

окне, нажать левую кнопку мыши и, не отпуская ее, растянуть прямоугольник до требуемого размера (рисунок 4.7,а). Для задания полигона следует воспользоваться клавишей *Ctrl* или одноименной кнопкой  пиктографического меню выбора. При этом вершины полигона указываются щелчком левой кнопки мыши, а последняя – двойным щелчком (рисунок 4.7,б).

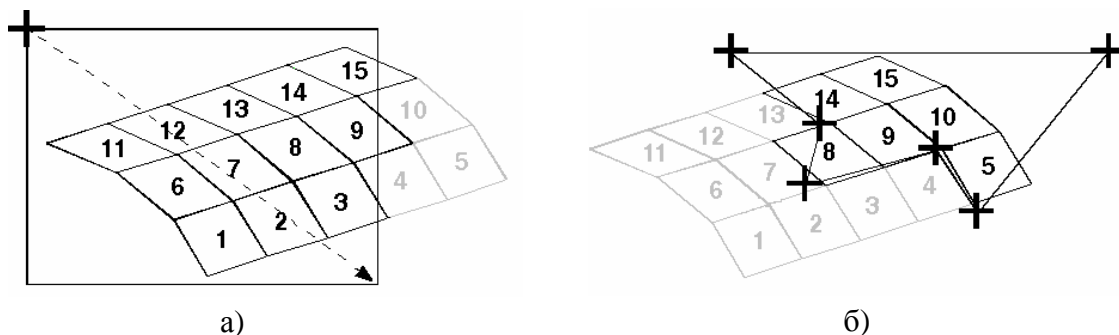


Рисунок 4.7 – Зона выбора в виде прямоугольника (а) и полигона (б)

Интерпретация выбора здесь зависит от глобальных установок (команда *Preferences>Picking*). Если установлена опция «Enclose entire entity», то выбираются лишь объекты, целиком попадающие в зону выбора. При задании опции «Enclose any portion of entity» выбираются и не полностью попавшие в эту зону объекты. И наконец, опция «Enclose centroid» означает, что объект считается выбранным, если его центр тяжести попадает в зону выбора.

При выборе геометрических объектов можно установить фильтр. Для этих целей используется пиктографическое меню выбора, появляющееся автоматически рядом с диалоговой панелью приложения. Оно зависит от приложения, которое в данный момент активно, и от типа объекта. При выборе точек данное меню имеет вид, представленный на рисунке 4.8.

При выборе действия Show (показать) доступны следующие методы:

- Location – показывает координаты точки в заданной системе координат;
- Distance – показывает расстояние между двумя точками;
- Nodes – показывает узлы, связанные с выбранными точками.

Для действия Transform (преобразовать) возможны такие методы, как:

- Translate – перемещает объект вдоль заданного вектора;
- Rotate – вращает объект вокруг определенной оси на заданный угол;

- Scale – масштабирует объект путем задания множителей для отдельных координат;
- Mirror – создает зеркальное (симметричное) отображение объекта относительно заданной плоскости;
- Mcoord – перемещает объект из одной системы координат в другую с теми же координатами;
- Pivot – вращает объект в плоскости путем задания точки вращения и двух конечных точек;
- Position – объект, преобразованный к системе назначенных позиционных точек, будет сохранять свое относительное положение, определенное в системе исходных позиционных точек;
- Vsum – векторная сумма координат двух систем существующих объектов используется для построения нового объекта;
- Mscale – одновременно перемещает, масштабирует, вращает и/или искривляет существующий объект.

Следует отметить, что эти же методы используются для преобразования и других геометрических объектов.

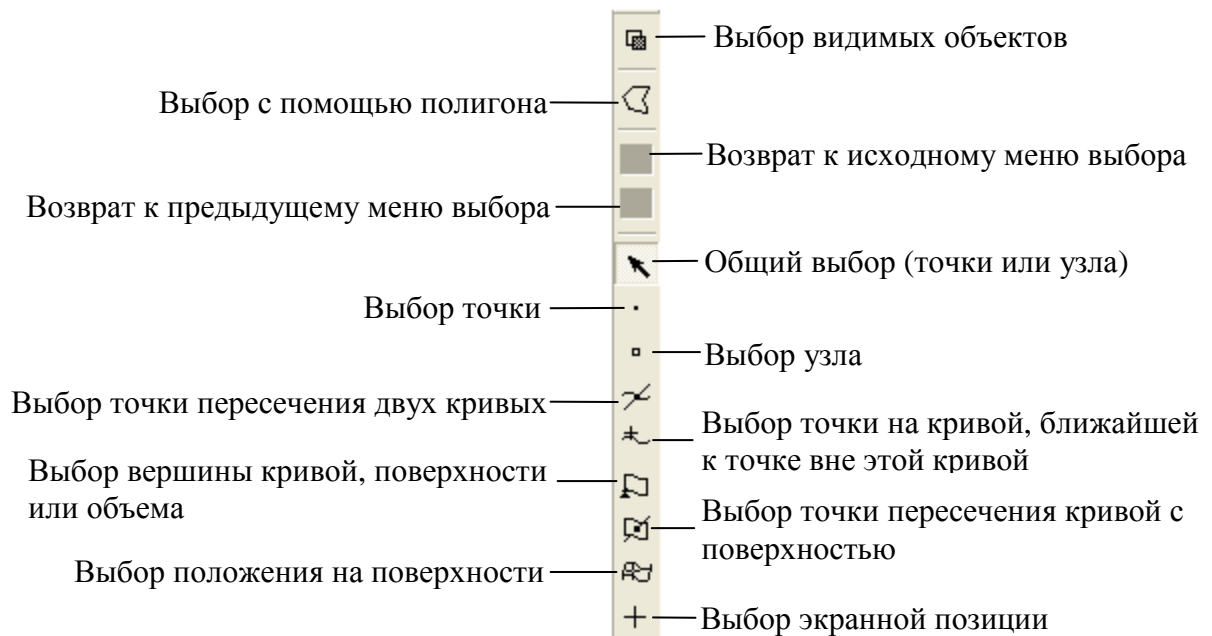


Рисунок 4.8 – Пиктографическое меню выбора для точек

И наконец, действие Associate (связать) позволяет привязать точки к геометрии кривых или поверхностей. Для корректного выполнения этой операции точка должна лежать на кривой или поверхности в пределах заданной

точности геометрического моделирования. Такие присоединенные точки позволяют управлять процессом генерации конечно-элементных сеток, поскольку в них обязательно образуются узлы.

4.3.2 Кривые

Рассмотрим методы, используемые для построения кривых:

- Point – строит параметрическую линию, проходящую через две, три или четыре точки;
- Arc3Point – строит дугу окружности, проходящую через три точки;
- Chain – формирует составную кривую из существующих кривых, соединяя их по концам;
- Conic – строит коническую кривую в форме параболы, гиперболы или эллипса;
- Extract – строит кривую на поверхности (или грани) путем задания параметрических координат или указания кромки;
- Fillet – строит дугу скругления между двумя кривыми (или кромками);
- Fit – используя параметрическую аппроксимацию по методу наименьших квадратов, проводит кривую, приблизительно проходящую через заданное множество точек;
- Intersect – строит кривую в месте пересечения двух поверхностей (или граней), двух плоскостей или поверхности и плоскости;
- Manifold – строит кривую на поверхности (или грани) между двумя или более точками, принадлежащими этой поверхности;
- Normal – из заданной точки опускает перпендикуляр на существующую кривую (или кромку);
- Offset – строит кривую, отстоящую на некотором расстоянии в заданном направлении от существующей линии;
- Project – проецирует кривую (или кривые) на поверхность (или грань) в направлении заданного вектора;
- PWL – по заданным точкам строит ломаную линию;
- Spline – по заданным точкам строит сплайн-кривую, имеющую непрерывную первую производную;
- TanCurve – строит прямую линию, касательную к двум существующим кривым;

- TanPoint – из заданной точки строит касательную к существующей кривой;
- XYZ – определяет линию путем задания начальной точки и вектора;
- Involute – строит эвольвенту (полезна для построения зубьев шестерен);
- Revolve – строит кривую вращением точки вокруг заданной оси;
- 2D Normal – на заданной плоскости строит линию, перпендикулярную к существующей кривой;
- 2D Circle – на заданной плоскости строит окружность;
- 2D ArcAngles – на заданной плоскости строит дугу окружности, начало и конец которой определяются углами;
- 2D Arc2Point – на заданной плоскости строит дугу окружности по двум конечным точкам и центру кривизны (или радиусу);
- 2D Arc2Point – на заданной плоскости строит дугу окружности, проходящую через три точки.

Рассмотрим действие некоторых команд. На рисунке 4.9 иллюстрируется процесс построения на поверхности 7 кривой, проходящей через две точки 1 и 2.

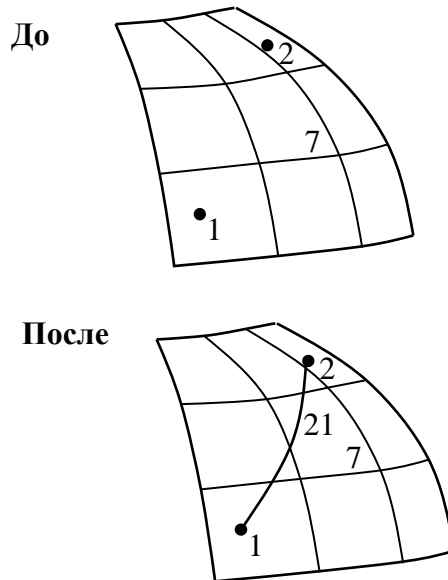
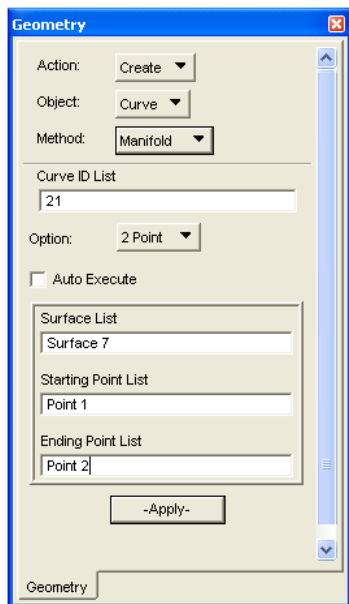


Рисунок 4.9 – Построение кривой на поверхности

Построение прямой линии, проходящей через точку 25 и касательной к кривой 9, представлено на рисунке 4.10. Поскольку здесь включена опция

«Trim Original Curves» (подрезать исходные кривые), MSC.Patran удаляет часть кривой 9 от точки касания до ее конца.

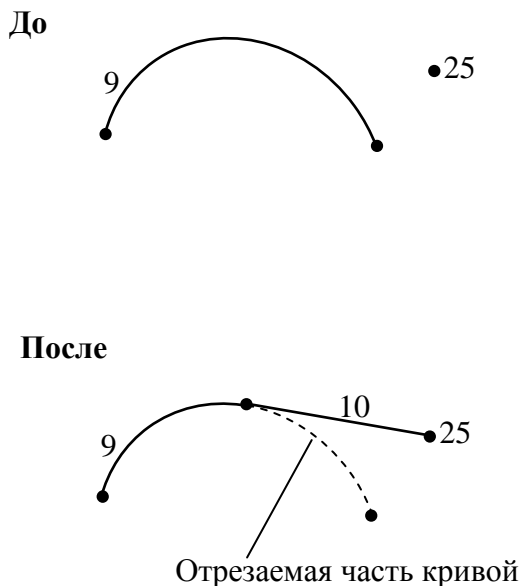
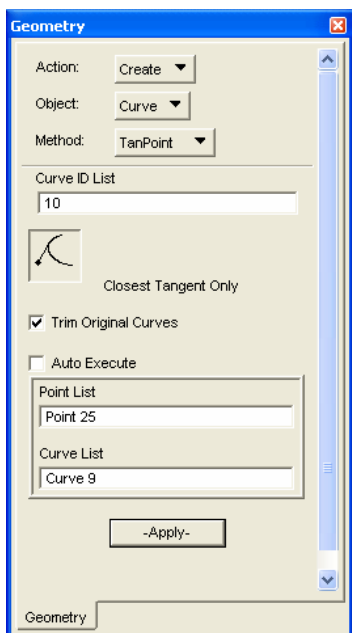


Рисунок 4.10 – Построение касательной к кривой

Для формирования составной кривой путем соединения по концам линий с 3 по 10 (рисунок 4.11) необходимо воспользоваться методом Chain (цепь). Для удаления составляющих (т.е. кривых с 3 по 10) здесь нужно включить флаг «Delete Constituent Curves». Для управления процессом построения составной кривой в интерактивном режиме следует нажать кнопку *Auto Chain....*

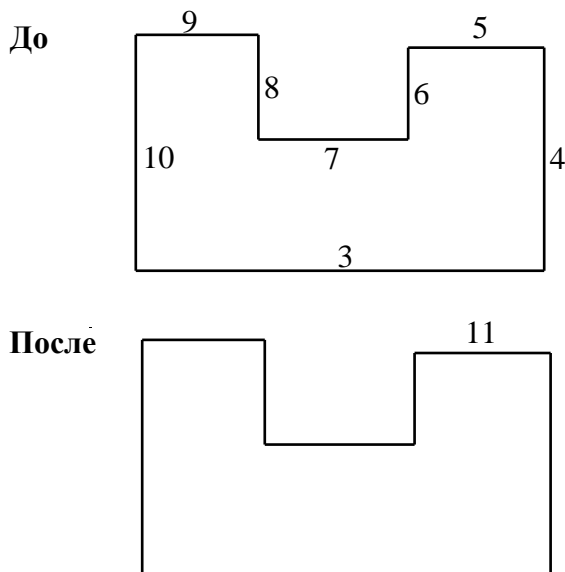
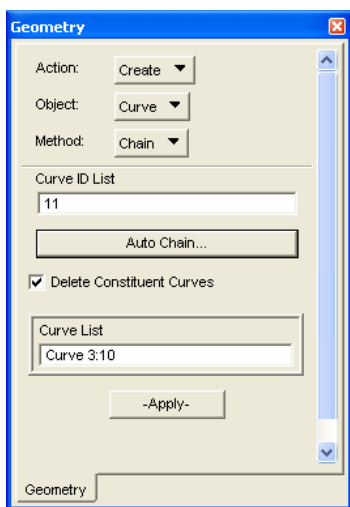








Рисунок 4.11 – Формирование составной кривой

Пиктографическое меню выбора для кривых содержит следующие кнопки:

-  – выбор кривой или кромки;
-  – выбор кривой;
-  – выбор кромки поверхности или объема;
-  – определение кривой по двум заданным точкам;
-  – определение сегмента кривой;
-  – определение кривой в месте пересечения двух поверхностей.

Приведем методы действия Edit (редактировать):

- Break – делит кривую на части в местах, определенных точками или параметрической координатой;
- Blend – преобразует две или более существующих кривых так, чтобы на границах была непрерывна первая производная;
- Disassemble – делит на части составную кривую, образованную методом Chain;
- Extend – продлевает кривую на любом ее конце прямой линией, направленной по касательной, (или используя иные приемы);
- Merge – заменяет несколько последовательно соединенных кривых гладкой линией (или системой линий), форма которой будет соответствовать геометрии исходных кривых в пределах задаваемой точности;
- Refit – заменяет существующую линию, имеющую сложное математическое описание, системой кривых третьего порядка;
- Reverse – изменяет направление параметрической координаты;
- Trim – отрезает часть кривой от указанного на ней положения до ее конца.

В заключение перечислим методы действия Show (показать):

- Attribute – показывает тип геометрии, длину, начальную и конечную точки кривой;
- Arc – выдает краткую информацию о всех дугах, имеющихся в базе данных;
- Angles – показывает угол между двумя кривыми (или кромками);
- Length Range – показывает атрибуты для тех кривых, длина которых попадает в заданный диапазон;

- Node – выдает список узлов, связанных с выбранной кривой (или кромкой).

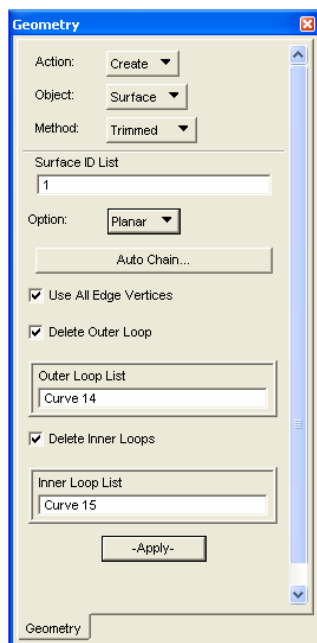
4.3.3 Поверхности

Для построения поверхностей доступны следующие команды:

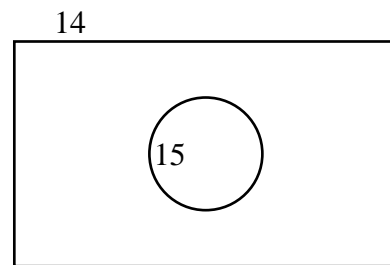
- Curve – строит поверхность, проходящую через две или более кривых (которые не должны иметь общих точек);
- Composite – объединяет множество связанных между собой поверхностей в одну;
- Decompose – на существующей поверхности (или грани) строит простую четырехстороннюю поверхность путем указания всех вершин;
- Edge – строит простую трех- или четырехстороннюю поверхность путем указания кривых, образующих замкнутый контур;
- Extract – строит поверхность в объеме путем задания параметрических координат или указания грани;
- Fillet – строит поверхность скругления третьего порядка между двумя существующими поверхностями (или гранями);
- Match – строит поверхности третьего порядка с общей границей по двум смежным топологически неконгруэнтным поверхностям (т.е. имеющим совпадающие вершины и несовпадающие кромки);
- Offset – строит поверхность, отстоящую на некотором расстоянии в заданном направлении от существующей поверхности;
- Ruled – проводит линейчатую поверхность между двумя направляющими кривыми;
- Trimmed – создает поверхность общего вида путем определения внешней и внутренних границ, лежащих на родительской поверхности;
- Vertex – определяет простую поверхность по ее вершинам;
- XYZ – строит прямоугольную поверхность путем описания ее диагонали;
- Extrude – вытягивает в заданном направлении существующую кривую (или кромку) в поверхность, позволяя одновременно ее масштабировать и вращать;
- Glide – строит поверхность скольжением базовой кривой вдоль одной или двух направляющих линий;

- Normal – строит поверхность, которая определяется базовой кривой (или кромкой) и отступом от этой линии в направлении кривизны;
- Revolve – строит поверхность вращением кривой вокруг заданной оси;
- Mesh – создает поверхность по сетке конечных элементов;
- Midsurface – строит срединные поверхности, делящие объемы пополам по толщине.

В качестве примера рассмотрим построение сложных многосвязанных (trimmed) поверхностей. Такие поверхности должны иметь одну внешнюю границу и могут иметь несколько внутренних. Для определения этих замкнутых границ-кромки здесь следует предварительно воспользоваться командой Chain. Пусть границы уже определены и требуется построить плоскую trimmed-поверхность. Данный пример представлен на рисунке 4.12.



До



После

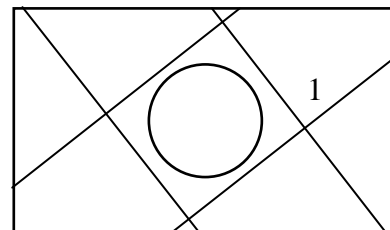






Рисунок 4.12 – Построение плоской trimmed-поверхности

При редактировании поверхностей (действие Edit) доступны следующие команды-методы:







- Break – делит поверхность на части с помощью кривой, плоскости, параметрических координат и т.д.;
- Blend – преобразует две или более существующих поверхностей так, чтобы вдоль границ была непрерывна первая производная;

- Disassemble – по сложной trimmed-поверхности строит простую родительскую поверхность с такой же кривизной, как и у исходной поверхности;
- Edge – позволяет редактировать кромки поверхностей;
- Edge Match – подгоняет кромки смежных поверхностей так, чтобы они совпали;
- Extend – продлевает поверхность, используя различные приемы (до пересечения с другой поверхностью, до заданной плоскости, до точки и т.д.);
- Refit – заменяет существующую поверхность, имеющую сложное математическое описание, системой простых поверхностей третьего порядка (новые поверхности будут соответствовать исходной в пределах задаваемой точности);
- Reverse – изменяет направление параметрических координат;
- Sew – для сшивки модели последовательно выполняет команды Edit/Point/Equivalence и Edit/Surface/Edge Match;
- Subtract – вычитает одну поверхность из другой;
- Trim – отрезает выступающую часть trimmed-поверхности вдоль указанной кромки;
- Add Fillet – скругляет угол в указанной вершине поверхности;
- Add Hole – вырезает в поверхности круглое отверстие;
- Remove Hole – удаляет отверстие в поверхности;
- Add Vertex – добавляет новую вершину в любой точке границы поверхности;
- Remove Vertex – удаляет любую вершину trimmed-поверхности.

Пиктографическое меню выбора для поверхностей содержит следующие кнопки:

-  – выбор поверхности или грани;
-  – выбор поверхности;
-  – выбор грани объема;
-  – определение поверхности по двум заданным кривым.

Как отмечалось ранее, методы преобразования поверхностей аналогичны методам преобразования точек и кривых. Рассмотрим здесь более подробно зеркальное (симметричное) отображение. Пусть требуется получить зеркальное отображение двух поверхностей, как показано на рисунке 4.13.

Плоскость зеркала здесь можно определять тремя способами: 1) по трем точкам (пиктограмма ); 2) с помощью оси любой системы координат, перпендикулярной плоскости (пиктограммы , , , ); 3) с помощью вектора нормали (пиктограмма ). В нашем случае плоскость зеркала перпендикулярна оси Y и отстоит (Offset) от координатной плоскости на 5 единиц длины. Если требуется удалить исходные поверхности, то следует включить опцию «Delete Original Surfaces».

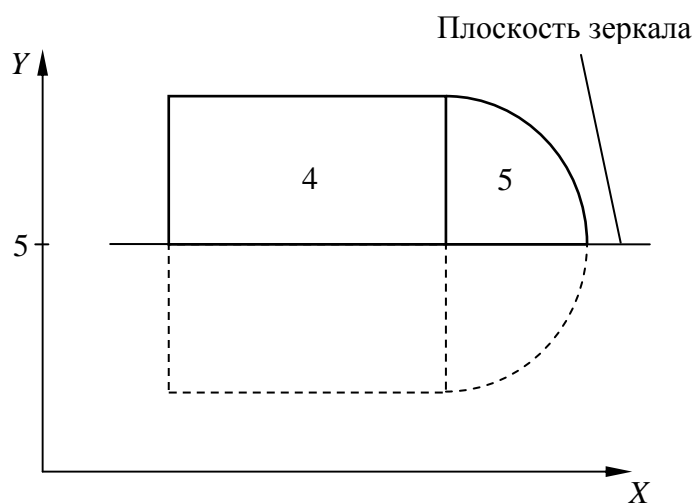
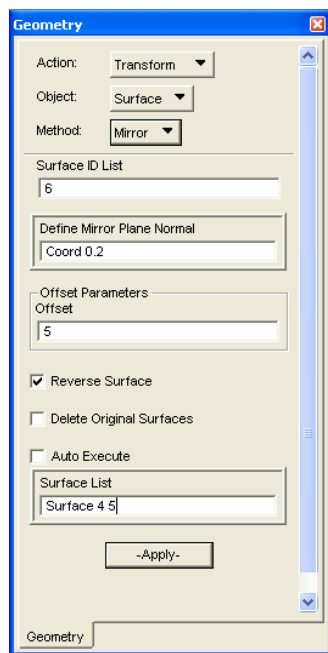


Рисунок 4.13 – Построение зеркального отображения двух поверхностей

4.3.4 Объемы

Методы построения объемов:

- Primitive – строит трехмерный примитив в виде параллелепипеда, цилиндра, конуса, шара или тора, позволяя одновременно выполнять булевы операции объединения, вычитания и пересечения;
- Surface – строит объем, проходящий через две или более поверхностей (которые не должны иметь общих точек);
- B-rep – создает тело с представимыми границами путем определения полного списка топологически конгруэнтных поверхностей, образующих замкнутый объем;
- Decompose – строит объем в существующем теле путем указания вершин на двух его противоположных гранях;

- Face – строит пяти- или шестигранный объем путем определения всех его граней;
- Vertex – строит объем по его вершинам;
- XYZ – строит прямоугольный объем путем описания его диагонали;
- Extrude – вытягивает в заданном направлении существующую поверхность (или грань) в объем, позволяя одновременно ее масштабировать и вращать;
- Glide – строит объем скольжением базовой поверхности вдоль направляющих линий;
- Normal – строит объем, который определяется базовой поверхностью (или гранью) и отступом от этой поверхности в направлении кривизны;
- Revolve – строит объем вращением поверхности вокруг заданной оси.

Для объемов пиктографическое меню выбора содержит следующие кнопки:



– выбор объема;



– определение объема по двум заданным поверхностям.

В заключение перечислим методы редактирования объемов:

- Break – делит объем на части с помощью поверхности, плоскости, параметрических координат и т.д.;
- Blend – преобразует два или более существующих объемов так, чтобы вдоль границ была непрерывна первая производная;
- Disassemble – разбивает B-гер объем на исходные поверхности, используемые при его построении;
- Refit – заменяет существующий объем, имеющий сложное математическое описание, системой простых объемов третьего порядка (новые объемы будут соответствовать исходному в пределах задаваемой точности);
- Reverse – изменяет направление параметрических координат;
- Boolean – выполняет булеву операцию объединения (Add), вычитания (Subtract) или пересечения (Intersect);
- Edge Blend – создает фаски или скругления кромок постоянного радиуса;
- Imprint – оставляет отпечаток (след) одного объема на другом;

- Shell – с указанных граней вырезает из объема полость для получения оболочки заданной толщины.

4.3.5 Системы координат

В программе MSC.Patran автоматически определяется лишь одна система координат с номером 0. Она является глобальной прямоугольной (т.е. декартовой). В графическом окне начало данной системы координат изображается белым крестиком, причем для удобства работы направление ее осей показывается в левом нижнем углу.

В дополнение к глобальной системе координат можно создать свои собственные локальные системы. Они могут быть следующих трех типов:

- Cartesian – прямоугольная (X, Y, Z) ;
- Cylindrical – цилиндрическая (R, θ, Z) ;
- Spherical – сферическая (R, θ, φ) .

Угловые координаты цилиндрической и сферической систем координат θ и φ в графическом окне обозначаются буквами T и P соответственно (рисунок 4.14).

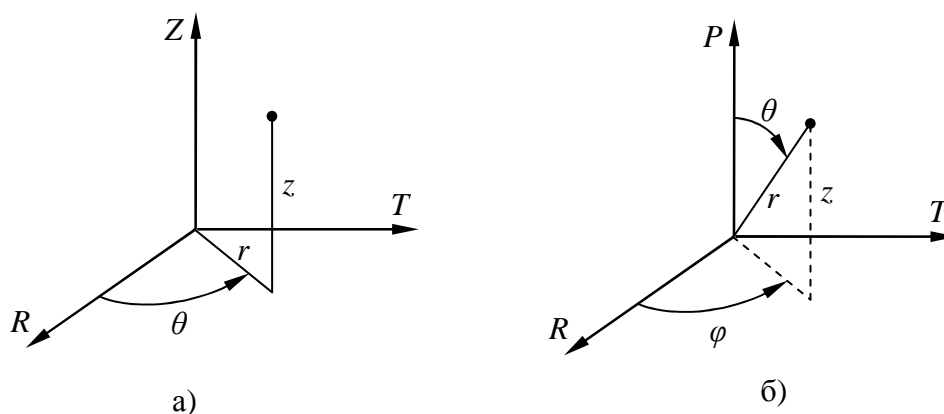


Рисунок 4.14 – Цилиндрическая (а) и сферическая (б) системы координат

В командах MSC.Patran вне зависимости от типа системы координат оси обозначаются 1, 2 и 3 (например, ось 2 цилиндрической системы координат является фактически осью θ , ось 3 сферической системы координат представляет собой ось φ и т.д.).

Для построения локальных систем координат предусмотрены следующие методы:

- 3Point – строит систему координат путем определения начала, точки на оси 3 и точки в плоскости 1-3;
- Axis – строит систему координат путем определения начала и точек на двух любых ее осях;
- Euler – система координат определяется тремя последовательными поворотами относительно осей существующей системы координат;
- Normal – строит систему координат, начало которой помещается в точку, принадлежащую поверхности, а ось 3 направляется по нормали к этой поверхности;
- 2Vector – система координат определяется началом и двумя векторами, направленными по двум ее осям;
- View Vector – строит систему координат с использованием эйлеровых углов текущей ориентации модели в графическом окне.

Действие команды Normal представлено на рисунке 4.15. Здесь ось 3 совпадает с нормалью к поверхности, а ось 1 – с направлением параметрической координаты ξ_1 (по умолчанию) или ξ_2 .

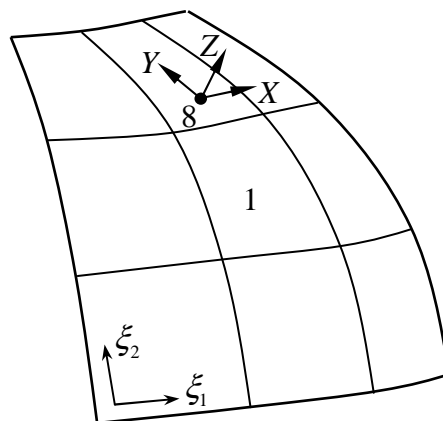
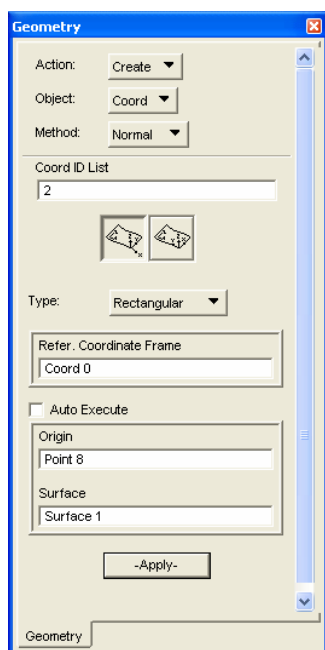


Рисунок 4.15 – Построение системы координат, связанной с поверхностью

4.3.6 Плоскости

Для построения плоскостей используются следующие методы:

- Point-Vector – плоскость определяется лежащей на ней точкой и нормальным к ней вектором;
- Vector Normal – строит плоскость путем задания ее нормали;
- Curve Normal – строит плоскость, перпендикулярную к кривой в заданной точке;
- Plane Normal – строит плоскость, перпендикулярную к существующей плоскости;
- Interpolate – вдоль кривой строит множество нормальных к ней плоскостей в местах, определенных заданным критерием;
- Least Square – проводит плоскость в центре выбранного объекта или группы объектов, используя метод наименьших квадратов;
- Offset – строит плоскость путем задания отступа от существующей плоскости;
- Surface Tangent – строит плоскость, касательную к поверхности в заданной точке;
- 3Point – строит плоскость по трем точкам.

4.3.7 Векторы

Перечислим методы, используемые для построения векторов:

- Magnitude – строит вектор путем задания длины, направления и начала;
- Interpolate – вдоль кривой строит множество касательных к ней векторов в местах, определенных заданным критерием;
- Intersect – определяет вектор пересечением двух плоскостей;
- Normal – строит вектор, нормальный к плоскости, поверхности или грани элемента;
- Product – строит вектор, соответствующий векторному произведению двух других векторов;
- 2 Point – строит вектор по двум точкам.

Вопросы по теме 4

- 1) Каким цветом в программе MSC.Patran изображаются точки?
 1. Бирюзовым (cyan).
 2. Желтым.
 3. Зеленым.
 4. Пурпурным (magenta).
 5. Синим.
 6. Белым.

- 2) Каким цветом в программе MSC.Patran изображаются кривые?
 1. Бирюзовым (cyan).
 2. Желтым.
 3. Зеленым.
 4. Пурпурным (magenta).
 5. Синим.
 6. Белым.

- 3) Каким цветом в программе MSC.Patran изображаются простые поверхности?
 1. Бирюзовым (cyan).
 2. Желтым.
 3. Зеленым.
 4. Пурпурным (magenta).
 5. Синим.
 6. Белым.

- 4) Каким цветом в программе MSC.Patran изображаются поверхности общего вида?
 1. Бирюзовым (cyan).
 2. Желтым.
 3. Зеленым.
 4. Пурпурным (magenta).
 5. Синим.
 6. Белым.

- 5) Каким цветом в программе MSC.Patran изображаются trimmed-поверхности?
 1. Бирюзовым (cyan).
 2. Желтым.
 3. Зеленым.
 4. Пурпурным (magenta).
 5. Синим.

6. Белым.

6) Каким цветом в программе MSC.Patran изображаются простые (параметрические) объемы?

1. Бирюзовым (cyan).
2. Желтым.
3. Зеленым.
4. Пурпурным (magenta).
5. Синим.
6. Белым.

7) Каким цветом в программе MSC.Patran изображаются сложные (непараметрические) объемы?

1. Бирюзовым (cyan).
2. Желтым.
3. Зеленым.
4. Пурпурным (magenta).
5. Синим.
6. Белым.

8) Каким цветом в программе MSC.Patran изображаются B-rep тела?

1. Бирюзовым (cyan).
2. Желтым.
3. Зеленым.
4. Пурпурным (magenta).
5. Синим.
6. Белым.

9) Какие файлы позволяет импортировать программа MSC.Patran?

1. Файлы основных CAD-систем.
2. Нейтральный файл формата IGES.
3. Входной файл решателя MSC.Nastran.
4. Файл базы данных MSC.Patran.
5. Файл результатов расчета решателя MSC.Nastran.
6. Файл результатов расчета программы ANSYS.

10) Какой метод предназначен для построения точки на существующей кривой или поверхности путем задания параметрических координат?

1. XYZ.
2. Extract.
3. Interpolate.
4. Intersect.
5. Offset.

6. Pierce.

11) Какими методами можно построить точку в месте пересечения кривой с поверхностью?

1. XYZ.
2. Extract.
3. Interpolate.
4. Intersect.
5. Offset.
6. Pierce.

12) Что означают квадратные скобки в поле ввода исходных данных?

1. Ввод координат точки.
2. Ввод компонент вектора.
3. Ввод оси системы координат.
4. Задание плоскости.
5. Ссылку на объект, связанный с объектом более высокого порядка.

13) Что означают угловые скобки в поле ввода исходных данных?

1. Ввод координат точки.
2. Ввод компонент вектора.
3. Ввод оси системы координат.
4. Задание плоскости.
5. Ссылку на объект, связанный с объектом более высокого порядка.

14) Что означают фигурные скобки в поле ввода исходных данных?

1. Ввод координат точки.
2. Ввод компонент вектора.
3. Ввод оси системы координат.
4. Задание плоскости.
5. Ссылку на объект, связанный с объектом более высокого порядка.

15) Что означает разделительная точка между номерами объектов в поле ввода исходных данных?

1. Ввод координат точки.
2. Ввод компонент вектора.
3. Ввод оси системы координат.
4. Задание плоскости.
5. Ссылку на объект, связанный с объектом более высокого порядка.

16) Какой метод позволяет перемещать объект из одной системы координат в другую с теми же координатами?

1. Translate.
2. Rotate.
3. Scale.
4. Mirror.
5. Mcoord.
6. Pivot.
7. Position.
8. Vsum.
9. Mscale.

17) Какой метод позволяет создавать зеркальное отображение объекта?

1. Translate.
2. Rotate.
3. Scale.
4. Mirror.
5. Mcoord.
6. Pivot.
7. Position.
8. Vsum.
9. Mscale.

18) Какой метод позволяет одновременно перемещать, масштабировать, вращать и/или искривлять объект?

1. Translate.
2. Rotate.
3. Scale.
4. Mirror.
5. Mcoord.
6. Pivot.
7. Position.
8. Vsum.
9. Mscale.

19) Какой метод используется для построения кривой на поверхности между двумя точками, принадлежащими этой поверхности?

1. Chain.
2. Extract.
3. Fillet.
4. Fit.

5. Manifold.
6. PWL.
7. Spline.

20) Какой метод позволяет по заданным точкам построить ломаную линию?

1. Chain.
2. Extract.
3. Fillet.
4. Fit.
5. Manifold.
6. PWL.
7. Spline.

21) Какой метод используется для формирования составной кривой?

1. Chain.
2. Extract.
3. Fillet.
4. Fit.
5. Manifold.
6. PWL.
7. Spline.

22) Какой метод используется для построения дуги скругления между двумя кривыми?

1. Chain.
2. Extract.
3. Fillet.
4. Fit.
5. Manifold.
6. PWL.
7. Spline.

23) Какой метод используется для преобразования смежных объектов так, чтобы на границах была непрерывна первая производная?

1. Break.
2. Blend.
3. Extend.
4. Merge.
5. Refit.
6. Trim.
7. Edge Match.

24) Какой метод позволяет продлевать кривую или поверхность?

1. Break.
2. Blend.
3. Extend.
4. Merge.
5. Refit.
6. Trim.
7. Edge Match.

25) Какой метод позволяет отрезать часть кривой или выступающую часть поверхности?

1. Break.
2. Blend.
3. Extend.
4. Merge.
5. Refit.
6. Trim.
7. Edge Match.

26) Какой метод предназначен для построения поверхности общего вида?

1. Extract.
2. Match.
3. Ruled.
4. Trimmed.
5. Extrude.
6. Glide.

27) Какой метод предназначен для построения поверхности (или объема) вытягиваем кривой (или поверхности) в заданном направлении?

1. Extract.
2. Match.
3. Ruled.
4. Trimmed.
5. Extrude.
6. Glide.

28) Какой метод предназначен для построения поверхности (или объема) скольжением базовой кривой (или поверхности) вдоль направляющих линий?

1. Extract.
2. Match.
3. Ruled.
4. Trimmed.
5. Extrude.
6. Glide.

29) Какой метод позволяет подгонять кромки смежных поверхностей так, чтобы они совпали?

1. Blend.
2. Edge.
3. Edge Match.
4. Extend.
5. Refit.
6. Trim.

30) Какой метод предназначен для построения тела с представимыми границами?

1. Primitive.
2. Surface.
3. B-rep.
4. Decompose.
5. Face.
6. Vertex.
7. Normal.

31) Какой метод предназначен для построения простого объема путем определения всех его граней?

1. Primitive.
2. Surface.
3. B-rep.
4. Decompose.
5. Face.
6. Vertex.
7. Normal.

32) Какой метод позволяет создавать фаски и скругления кромок?

1. Break.
2. Blend.
3. Refit.
4. Boolean.
5. Edge Blend.

6. Impirit.
7. Shell.

33) Какой метод позволяет оставлять отпечаток (след) одного объема на другом?

1. Break.
2. Blend.
3. Refit.
4. Boolean.
5. Edge Bland.
6. Impirit.
7. Shell.

34) Какой метод позволяет строить локальную систему координат путем задания трех последовательных поворотов относительно осей существующей системы координат?

1. 3Point.
2. Axis.
3. Euler.
4. Normal.
5. 2Vector.
6. View Vector.

35) Какой метод позволяет строить вдоль кривой множество нормальных к ней плоскостей в местах, определенных заданным критерием?

1. Point-Vector.
2. Vector Normal.
3. Curve Normal.
4. Plane Normal.
5. Interpolate.
6. Least Square.

5 БИБЛИОТЕКА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОГРАММЫ MSC.NASTRAN

Рассмотрим основные типы конечных элементов, которые наиболее часто используются для решения задач механики деформируемого твердого тела.

5.1 Линейные элементы

5.1.1 CROD

CROD – стержень, работающий лишь на растяжение-сжатие и кручение (т.е. обладающий только осевой и крутильной жесткостями). Он имеет два узла G1 и G2. Ось x_e системы координат данного элемента направляется от первого узла ко второму (рисунок 5.1). В каждом узле в местной системе координат здесь определены две степени свободы – поступательная T_x и вращательная R_x .

CROD используется для моделирования стержневых систем (например, ферменных конструкций), а также подкрепляющих ребер жесткости (например, стрингеров, поясов лонжеронов и т.д.).

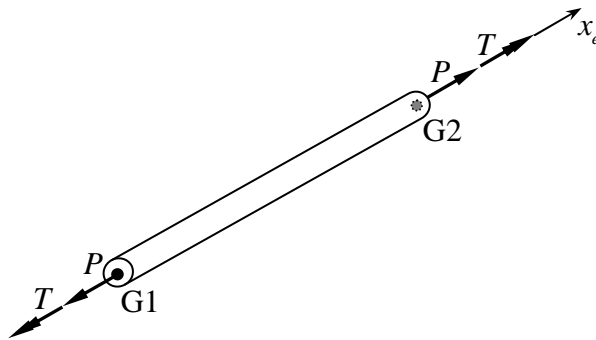


Рисунок 5.1 – Узловые силы и моменты элемента CROD

Геометрическими характеристиками для этого элемента являются:

- A – площадь поперечного сечения;
- J – момент инерции на кручение (неполярный момент);
- C – коэффициент для определения максимальных касательных напряжений при кручении:

$$\tau_{\max} = C \frac{M_{\theta}}{J},$$

где M_{θ} – крутящий момент.

Кроме того, для элемента CROD, как и для многих других, можно задать погонную неконструкционную массу.

5.1.2 СВАР

СВАР – простой балочный элемент, построенный в предположении, что ось центров сдвига совпадает с нейтральной осью. Он воспринимает в общем случае все виды нагрузок (растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение). Данный элемент имеет два узла GA, GB и является прямолинейным, причем геометрические характеристики постоянны вдоль оси балки. В каждом узле здесь определяются шесть степеней свободы – три поступательных T_x, T_y, T_z и три вращательных R_x, R_y, R_z . При этом не учитывается деформация сечений.

СВАР используется для моделирования различных стержневых систем, в основном работающих на изгиб (например, балок и рам), а также мощных подкрепляющих ребер жесткости (например, лонжеронов, шпангоутов и т.д.).

Первая ось x_e системы координат данного элемента совпадает с продольной осью балки, проходящей через центры тяжести сечений. Ось y_e лежит в плоскости, определяемой осью x_e и вектором ориентации \vec{v} . Ось z_e перпендикулярна осям x_e, y_e и образует с ними правую систему координат (рисунок 5.2). При этом узлы GA и GB могут отстоять (иметь эксцентриситеты) от оси x_e , что полезно при моделировании, например, подкрепленных панелей.

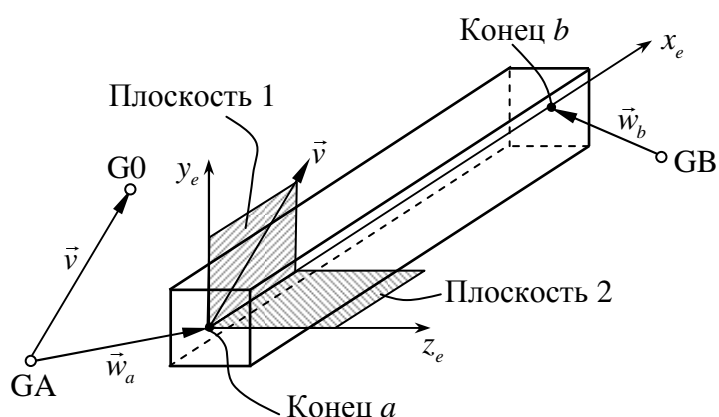


Рисунок 5.2 – Система координат элемента СВАР

Исходными данными здесь являются:

- X_1, X_2, X_3 – компоненты вектора ориентации \vec{v} в системе координат для перемещений узла GA;

- $G0$ – номер узла, используемого для альтернативного определения вектора ориентации \vec{v} . При этом \vec{v} направляется от узла GA к $G0$, а затем переносится в конец a балки;

- PA, PB – флаги шарниров (pin-флаги) для концов a и b , используемые при моделировании различных шарниров для устранения связи между узлом и выбранной степенью свободы балки. Степени свободы здесь определяются в системе координат элемента. При этом балка должна иметь ненулевую жесткость в направлении освобождаемой степени свободы. Например, если $PA = 4$, то должен быть задан момент инерции на кручение J ;

- $W1A, W2A, W3A, W1B, W2B, W3B$ – компоненты векторов эксцентриситетов \vec{w}_a и \vec{w}_b в системе координат для перемещений узлов GA и GB ;

- A – площадь поперечного сечения балки;

- $I1, I2, I12$ – моменты инерции $I_{zz_e}, I_{yy_e}, I_{zy_e}$ соответственно;

- J – момент инерции на кручение;

- $K1, K2$ – коэффициенты сдвига в плоскостях 1 и 2 соответственно. Жесткости поперечного сдвига на единицу длины в плоскостях 1 и 2 определяются как $K1 \cdot A \cdot G$ и $K2 \cdot A \cdot G$, где G – модуль сдвига. По умолчанию коэффициенты сдвига принимают бесконечно большие значения, что соответствует классической гипотезе плоских сечений Бернулли-Эйлера, предполагающей отсутствие деформаций поперечного сдвига;

- $C1, C2, D1, D2, E1, E2, F1, F2$ – y_e - и z_e -координаты четырех точек на концах балки, в которых будут вычисляться напряжения.

Следует отметить, что для данного элемента характеристики поперечного сечения можно задавать путем указания размеров predetermined типов сечений (их всего 18).

Положительные направления узловых сил и моментов для рассматриваемого элемента показаны на рисунке 5.3.

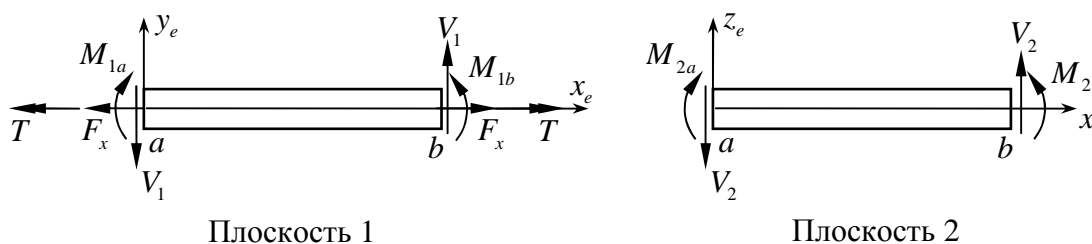


Рисунок 5.3 – Правило знаков для узловых сил и моментов

5.1.3 СВЕАМ

СВЕАМ – балочный элемент общего вида. В отличие от предыдущего случая здесь учитывается несовпадение оси центров сдвига с нейтральной осью. Считается, что ось x_e системы координат элемента проходит через центры сдвига сечений. При этом положение нейтральной оси определяется заданием y_e - и z_e -координат. В каждом узле данного элемента помимо шести основных степеней свободы определяется еще одна – депланация сечения.

СВЕАМ позволяет моделировать балки с изменяющимися вдоль оси геометрическими характеристиками сечения. Эти характеристики можно задавать максимум для десяти сечений балки, включая концевые. Для балок постоянного поперечного сечения допускается его неоднородность (т.е. изменение материала), что часто используется для моделирования композитных стержней.

Следует отметить, что данный элемент строится на базе кинематической модели Тимошенко, учитывающей в первом приближении деформации поперечного сдвига. При этом коэффициенты сдвига $K1$ и $K2$ здесь определяются отношением эффективной площади сечения при сдвиге в соответствующей плоскости к общей площади поперечного сечения. Для пренебрежения деформацией поперечного сдвига (т.е. для перехода к балочной теории Бернулли-Эйлера) необходимо положить $K1 = K2 = 0$. По умолчанию они равны единице.

5.2 Поверхностные элементы

5.2.1 CQUAD4

CQUAD4 – изопараметрический четырехугольный элемент пластины с мембранной и изгибной жесткостями или элемент плоской деформации. Это наиболее часто используемый элемент для моделирования тонких пластин и оболочек, а также при решении плоской задачи теории упругости (пластичности). Он имеет четыре узла $G1$, $G2$, $G3$ и $G4$, которые для получения достоверного решения должны лежать в одной плоскости. Все внутренние углы должны быть меньше 180° . Его система координат определяется так, как показано на рисунке 5.4. При этом ось x_e направляется от узла $G1$ к $G2$, деля пополам угол $\beta + \gamma$. Ось y_e перпендикулярна оси x_e и лежит в плоскости элемента (положительное направление – от $G1$ к $G4$). Ось z_e перпендикулярна плоскости элемента; ее положительное направление определяется по пра-

вилу правой руки при направлении обхода от G1 к G4. Другими словами, она проводится так, чтобы получилась правая система координат.

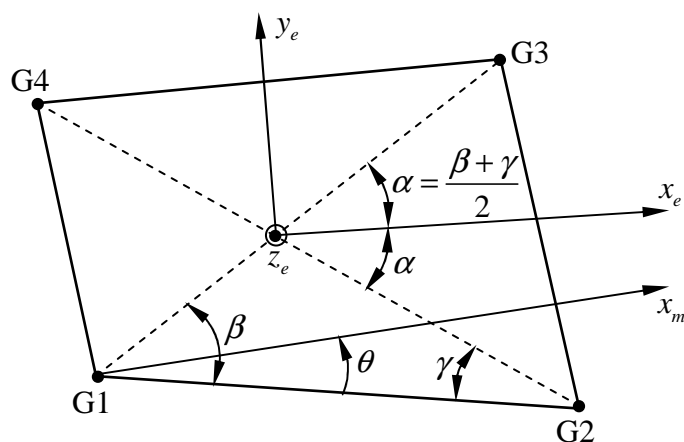


Рисунок 5.4 – Геометрия элемента CQUAD4

Исходными данными здесь являются:

- ТНЕТА – угол ориентации свойств материала θ , отсчитываемый от стороны элемента G1-G2 (см. рисунок 5.4);
- МСІD – идентификационный номер системы координат, используемой для альтернативного задания системы координат материала. В этом случае ось x_m определяется как проекция оси x системы координат МСІD на плоскость элемента (рисунок 5.5);
- ZOFFS – эксцентриситет, т.е. расстояние от узловой поверхности до отсчетной (как правило срединной) плоскости элемента. Положительное значение данной величины соответствует тому, что отсчетная плоскость отстоит от узловой поверхности на расстоянии ZOFFS в положительном направлении оси z_e (рисунок 5.6);
- T1, T2, T3, T4 – значения толщины в узлах элемента.

Следует отметить, что для изотропного материала параметры ТНЕТА и МСІD игнорируются.

Для данного элемента можно независимо друг от друга задавать мембранную, изгибную и сдвиговую жесткости, что полезно при моделировании, например, трехслойных и рифленых пластин и оболочек. Материал здесь может быть многослойным композитным.

Напряжения вычисляются на расстояниях Z1 и Z2 от отсчетной плоскости элемента. Для однородной пластины (оболочки) отсчетной является

срединная плоскость, и по умолчанию Z1 и Z2 соответствуют наружным поверхностям пластины (т.е. $Z1, Z2 = \pm \text{толщина}/2$).

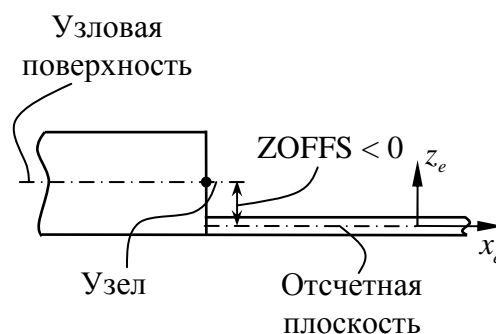
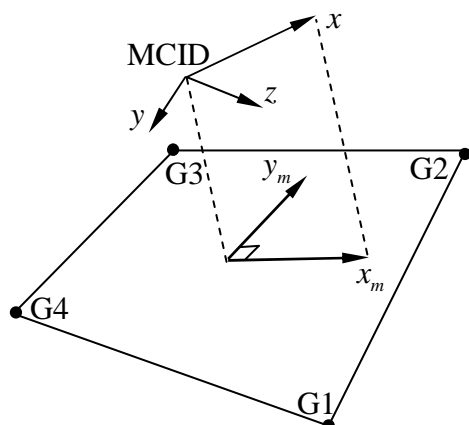


Рисунок 5.5 – Альтернативное задание системы координат материала **Рисунок 5.6 – Задание эксцентриситета**

5.2.2 CTRIA3

CTRIA3 – изопараметрический треугольный элемент пластины с мембранной и изгибной жесткостями или элемент плоской деформации. Данный элемент имеет три узла G1, G2 и G3, и его система координат определяется порядком их перечисления (рисунок 5.7). Ось x_e идет от первого узла ко второму. Ось y_e перпендикулярна x_e и направляется в сторону третьего узла. Ось z_e проводится так, чтобы получилась правая система координат.

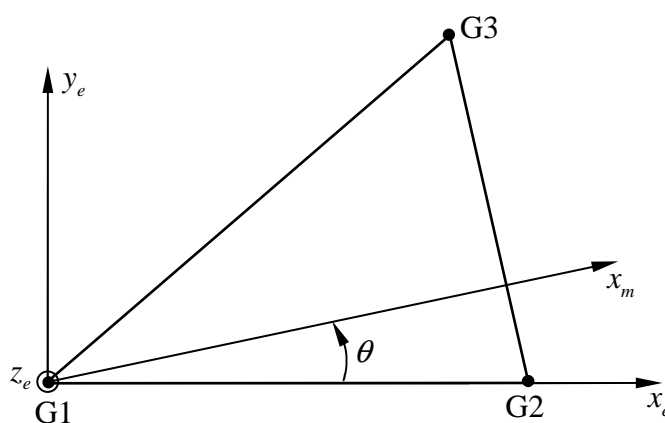


Рисунок 5.7 – Геометрия элемента CTRIA3

Отметим, что элементы CTRIA3 обладают излишней мембранной жесткостью. Поэтому их следует использовать вдали от критических зон в мес-

тах стыковки сеток разной плотности или при моделировании нерегулярных граничных областей.

В остальном данный элемент аналогичен предыдущему.

5.2.3 CQUAD8

CQUAD8 – изопараметрический криволинейный четырехугольный элемент оболочки или элемент плоской деформации. Это элемент второго порядка, имеющий восемь узлов (рисунок 5.8). Угол ориентации свойств материала θ здесь отсчитывается от ξ -линии ($\eta = \text{const}$).

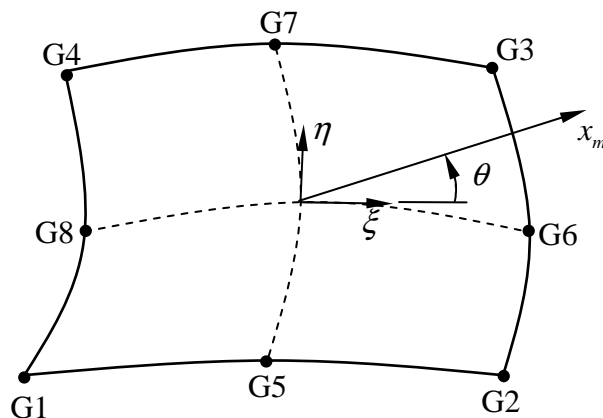


Рисунок 5.8 – Геометрия элемента CQUAD8

Данный элемент обладает всеми возможностями элементов CQUAD4 и STRIA3. Кроме того, CQUAD8 позволяет более точно моделировать криволинейные поверхности при одинаковом числе степеней свободы.

5.2.4 CSHEAR

CSHEAR – элемент сдвиговой панели. Он используется для моделирования тонкостенных конструкций, преимущественно работающих на сдвиг (например, стенок лонжеронов и нервюр). Данный элемент имеет четырехугольную форму и четыре узла (рисунок 5.9).

Помимо свойств материала и толщины панели T здесь можно задать следующие величины:

- $F1$ – эффективный множитель для осевой жесткости подкрепляющих стержней, расположенных вдоль сторон 1-2 и 3-4;
- $F2$ – эффективный множитель для осевой жесткости подкрепляющих стержней, расположенных вдоль сторон 2-3 и 1-4.

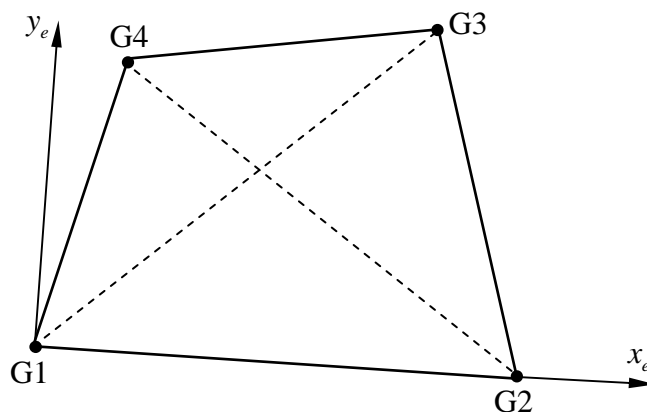


Рисунок 5.9 – Геометрия элемента CSHEAR

Необязательные параметры $F1$ и $F2$ используются для моделирования эффективной жесткости панели путем введения стержней по периметру элемента. При этом если $F1 \leq 1,01$, то площадь каждого из стержней на сторонах 1-2 и 3-4 принимается равной $0,5 \cdot F1 \cdot T \cdot W1$ (где $W1$ – средняя ширина панели). Таким образом, при $F1 = 1$ жесткости стержней будут соответствовать мембранной жесткости панели. Если $F1 > 1,01$, то данная площадь вычисляется как $0,5 \cdot F1 \cdot T^2$. Аналогично находятся площади и для стержней на сторонах 2-3 и 1-4.

5.2.5 CTRIAX6

CTRIAX6 – изопараметрический осесимметричный элемент треугольной формы, используемый для моделирования сечений тел вращения при осесимметричном нагружении. Это элемент второго порядка с шестью узлами, причем промежуточные узлы $G2$, $G4$ и $G6$ могут быть удалены (рисунок 5.10).

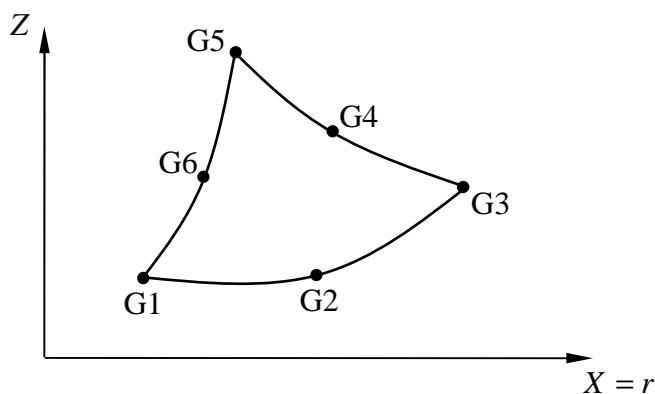


Рисунок 5.10 – Геометрия элемента CTRIAX6

Моделирование здесь следует проводить в плоскости XZ глобальной декартовой системы координат. При этом ось Z должна являться осью симметрии, а X – радиальной осью (отрицательные значения координаты X не допускаются).

Следует отметить, что осесимметричные элементы представляют полную модель (для 360°). Поэтому, например, при задании погонной кольцевой нагрузки q следует вводить полное значение силы $2\pi r q$ (где r – радиус окружности, по которой действует погонная нагрузка).

5.3 Объемные элементы

5.3.1 СНЕХА

СНЕХА – изопараметрический шестигранный элемент трехмерного тела. В большинстве случаев для моделирования трехмерных изотропных и анизотропных деталей, узлов и элементов конструкций рекомендуется использовать именно этот конечный элемент. Точность данного элемента падает с увеличением степени его скошенности, а также при преобладании изгибных деформаций. Однако во всех других случаях он имеет лучшие характеристики по сравнению с прочими объемными элементами.

СНЕХА может содержать от 8 до 20 узлов в зависимости от того, имеются ли промежуточные узлы на сторонах или нет (рисунок 5.11). Как известно, в узлах объемных элементов определены только поступательные перемещения.

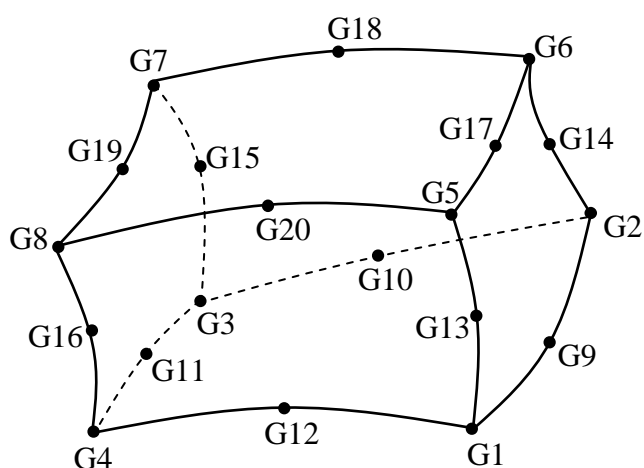


Рисунок 5.11 – Геометрия элемента СНЕХА

Для анизотропного материала здесь необходимо задать идентификационный номер системы координат материала. Кроме того, можно изменить установленную по умолчанию схему интегрирования. Следует отметить, что схема интегрирования по умолчанию задается из тех соображений, чтобы свести к минимуму сдвиговое и мембранное (связанное с эффектом Пуассона) запираания. В большинстве случаев ее не рекомендуется менять.

5.3.2 СТЕТРА

СТЕТРА – изопараметрический объемный элемент, имеющий форму тетраэдра. Он содержит от 4 до 10 узлов и в основном аналогичен предыдущему. Узлы на сторонах с G5 по G10 являются необязательными (рисунок 5.12).

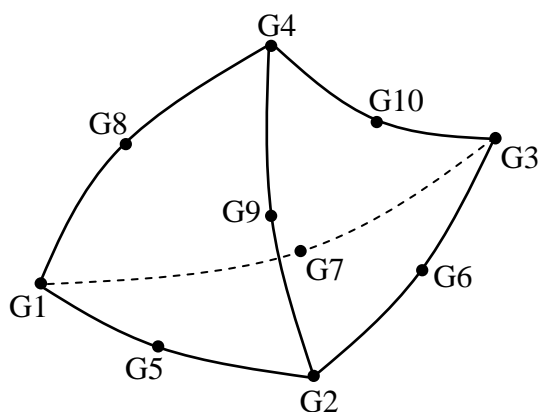


Рисунок 5.12 – Геометрия элемента СТЕТРА

Вопросы по теме 5

1) Какие из перечисленных ниже элементов библиотеки MSC.Nastran относятся к классу линейных?

1. CROD.
2. CBAR.
3. CBEAM.
4. CQUAD4.
5. CTRIA3.
6. CQUAD8.
7. CSHEAR.
8. CTRIAX6.
9. CHEXA.
10. CTETRA.

2) Какие из перечисленных ниже элементов библиотеки MSC.Nastran относятся к классу поверхностных?

1. CROD.
2. CBAR.
3. CBEAM.
4. CQUAD4.
5. CTRIA3.
6. CQUAD8.
7. CSHEAR.
8. CTRIAX6.
9. CHEXA.
10. CTETRA.

3) Какие из перечисленных ниже элементов библиотеки MSC.Nastran относятся к классу объемных?

1. CROD.
2. CBAR.
3. CBEAM.
4. CQUAD4.
5. CTRIA3.
6. CQUAD8.
7. CSHEAR.
8. CTRIAX6.
9. CHEXA.
10. CTETRA.

4) Какие из перечисленных ниже элементов библиотеки MSC.Nastran используются для решения плоской задачи теории упругости?

1. CROD.
2. CBAR.
3. CBEAM.
4. CQUAD4.
5. CTRIA3.
6. CQUAD8.
7. CSHEAR.
8. CTRIAX6.
9. CHEXA.
10. CTETRA.

5) Какой из перечисленных ниже элементов библиотеки MSC.Nastran используется для моделирования тел вращения?

1. CROD.
2. CBAR.
3. CBEAM.
4. CQUAD4.
5. CTRIA3.
6. CQUAD8.
7. CSHEAR.
8. CTRIAX6.
9. CHEXA.
10. CTETRA.

6) Что такое CROD?

1. Стержень, работающий лишь на растяжение-сжатие и кручение.
2. Стержень, работающий лишь на растяжение-сжатие.
3. Стержень, работающий лишь на кручение.
4. Простой балочный элемент.
5. Балочный элемент общего вида.

7) Что такое CBAR?

1. Стержень, работающий лишь на растяжение-сжатие и кручение.
2. Стержень, работающий лишь на растяжение-сжатие.
3. Стержень, работающий лишь на кручение.
4. Простой балочный элемент.
5. Балочный элемент общего вида.

8) Что такое CBEAM?

1. Стержень, работающий лишь на растяжение-сжатие и кручение.
2. Стержень, работающий лишь на растяжение-сжатие.
3. Стержень, работающий лишь на кручение.
4. Простой балочный элемент.
5. Балочный элемент общего вида.

9) Какие геометрические характеристики можно задавать для элемента CROD?

1. Площадь поперечного сечения.
2. Момент инерции на кручение.
3. Коэффициент для определения касательных напряжений при кручении.
4. Полярный момент инерции.
5. Коэффициент сдвига.
6. Эксцентриситеты узлов.

10) Сколько степеней свободы в местной системе координат имеет элемент CROD?

1. Одну.
2. Две.
3. Три.
4. Четыре.
5. Пять.
6. Шесть.

11) Какое основное предположение лежит в основе построения простого балочного элемента?

1. Ось центров сдвига совпадает с нейтральной осью.
2. Нейтральная ось проходит через центры тяжести сечений.
3. Узлы лежат на нейтральной оси.
4. Узлы лежат на оси центров сдвига.
5. Отсутствует закрученность сечений.

12) Как определяется система координат простого балочного элемента?

1. С помощью вектора эксцентриситета.
2. При помощи вектора ориентации.
3. С использованием pin-флагов.
4. Путем задания нормальной плоскости.

13) Что определяет ось, проходящая через центры тяжести сечений, и вектор ориентации в простом балочном элементе?

1. Плоскость, в которой лежит ось x системы координат элемента.
2. Плоскость, в которой лежит ось y системы координат элемента.
3. Плоскость, в которой лежит ось z системы координат элемента.
4. Плоскость для задания векторов эксцентриситетов.
5. Плоскость для задания флагов шарниров.

14) Для чего используются pin-флаги?

1. Для устранения связи между узлом и выбранной степенью свободы балки при моделировании шарниров.
2. Для определения системы координат балочного элемента.
3. Для задания смещений узлов от оси балки.
4. Для задания внеузловой нагрузки.

15) Для чего используются векторы эксцентриситетов?

1. Для устранения связи между узлом и выбранной степенью свободы балки при моделировании шарниров.
2. Для определения системы координат балочного элемента.
3. Для задания смещений узлов от оси балки.
4. Для задания внеузловой нагрузки.

16) Чем отличается балочный элемент общего вида от простого балочного элемента?

1. Учетом несовпадения оси центров сдвига с нейтральной осью.
2. Возможностью моделирования балки переменного сечения.
3. Учетом депланации.
4. Возможностью задания флагов шарниров.
5. Возможностью задания эксцентриситетов.

17) Как направляется ось x_e в балочном элементе общего вида?

1. Вдоль оси, проходящей через центры тяжести сечений.
2. Вдоль оси, проходящей через центры сдвига сечений.
3. Вдоль нейтральной оси.
4. Вдоль оси симметрии.
5. Перпендикулярно оси балки.

18) На базе какой кинематической модели строится балочный элемент общего вида?

1. Тимошенко.
2. Бернулли-Эйлера.
3. Плоских сечений.
4. Кирхгофа.
5. Кирхгофа-Лява.

19) Сколько степеней свободы определяется в каждом узле простого балочного элемента?

1. Три.

2. Четыре.
3. Пять.
4. Шесть.
5. Семь.
6. Восемь.

20) Сколько степеней свободы определяется в каждом узле балочного элемента общего вида?

1. Три.
2. Четыре.
3. Пять.
4. Шесть.
5. Семь.
6. Восемь.

21) Какой элемент наиболее часто используется для моделирования тонких пластин и оболочек в программе MSC.Nastran?

1. CQUAD4.
2. CTRIA3.
3. CQUAD8.
4. CSHEAR.
5. CTRIAX6.

22) Какой элемент рекомендуется использовать для моделирования тонкостенных конструкций, преимущественно работающих на сдвиг?

1. CQUAD4.
2. CTRIA3.
3. CQUAD8.
4. CSHEAR.
5. CTRIAX6.

23) Какой элемент имеет лучшие характеристики по сравнению с другими объемными элементами?

1. CHEXA.
2. CPENTA.
3. CTETRA.
4. CTRIAX6.
5. CBAR

24) Каким условиям должна удовлетворять осесимметричная модель, построенная с использованием элемента CTRIAX6?

1. Ось X должна быть осью вращения.
2. Ось Y должна быть осью вращения.
3. Ось Z должна быть осью вращения.
4. Ось X должна быть радиальной осью.
5. Ось Y должна быть радиальной осью.
6. Ось Z должна быть радиальной осью.

25) Сколько узлов может содержать элемент СНЕХА?

1. От 4 до 10.
2. От 8 до 20.
3. От 6 до 12.
4. От 8 до 24.
5. От 5 до 11.
6. От 10 до 28.

26) Сколько узлов может содержать элемент СТЕТРА?

1. От 4 до 10.
2. От 8 до 20.
3. От 6 до 12.
4. От 8 до 24.
5. От 5 до 11.
6. От 10 до 28.

6 ГЕНЕРАЦИЯ СЕТОК КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

6.1 Основные понятия и определения

Генерация конечно-элементной сетки – это процесс получения узлов и их последующего соединения для определения элементов. Конечные элементы могут иметь разную топологию и свойства. Для построения сеток достаточно знать лишь топологию. Она определяется формой и порядком элементов (числом узлов). На рисунке 6.1 представлены доступные в программе MSC.Patran формы конечных элементов.

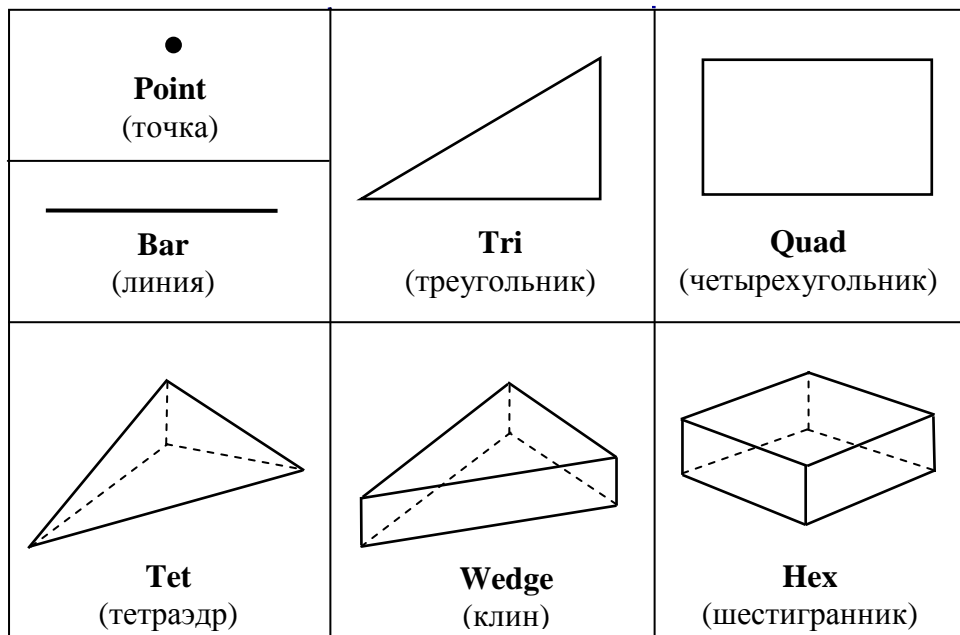


Рисунок 6.1 – Формы конечных элементов

Для решения задач механики деформируемого твердого тела обычно применяются элементы первого порядка с линейной аппроксимацией перемещений либо второго порядка с квадратической функцией формы. В первом случае узлы располагаются лишь в вершинах, во втором – имеются еще дополнительные промежуточные узлы на сторонах. Таким образом, порядок элементов может определяться количеством принадлежащих им узлов.

MSC.Patran обеспечивает пользователя удобными средствами для реализации процесса получения узлов и конечных элементов. Генерация сеток может выполняться непосредственно на построенных ранее геометрических объектах. Она состоит из двух задач: 1) определение топологии и размера элементов; 2) задание областей для разбиения.

Следует отметить, что в программе MSC.Patran имеется несколько алгоритмов генерации конечно-элементных сеток:

- IsoMesh (mapped mesher) – генератор регулярных изосеток, используемый для разбиения параметрических объектов:
 - всех кривых (желтые);
 - трех- или четырех сторонних поверхностей (зеленые);
 - пяти- или шестигранных объемов (синие);
- Paver (free mesher) – генератор свободных сложных сеток, используемый для разбиения всех типов поверхностей:
 - N-сторонних многосвязанных trimmed-поверхностей (пурпурные);
 - трех- или четырех сторонних поверхностей (зеленые);
- TetMesh (auto Tet mesher)– автоматический генератор сложных сеток из тетраэдральных элементов, используемый для разбиения любых объемов:
 - B-рег объемов произвольной формы (белые);
 - пяти- или шестигранных объемов (синие);
- Sweep mesher – генератор сеток, вытягиваемых из базовых элементов.

Каждый из представленных выше алгоритмов является высокоавтоматизированным и обеспечивает высокую степень контроля пользователем. Для задания плотности и сгущения сеток здесь широко используются так называемые Mesh Seeds (опорные точки сетки).

В заключение следует отметить, что топология сетки задается приложением «Elements» (элементы), а физические и геометрические свойства полученных таким образом элементов определяются приложением «Properties» (свойства).

6.2 Генератор сеток IsoMesh

При разбиении простых поверхностей или объемов на конечные элементы IsoMesh-генератор предварительно делит поверхности или грани на группы параллельно кромкам. Они задают пути разбиения, которые используются для определения числа элементов на кромках (рисунок 6.2). Число элементов на кромках, через которые проложен путь разбиения, остается неизменным. Оно в первую очередь зависит от установленных опорных точек Mesh Seeds, затем от примыкающих топологически конгруэнтных областей, покрытых сеткой, и наконец, от заданной глобальной длины стороны элемен-

та (Global Edge Length). В последнем случае число элементов на кромках вдоль пути разбиения определяется отношением длины самой большой кромки к глобальной длине стороны элемента. Пример построения изосетки представлен на рисунке 6.3.

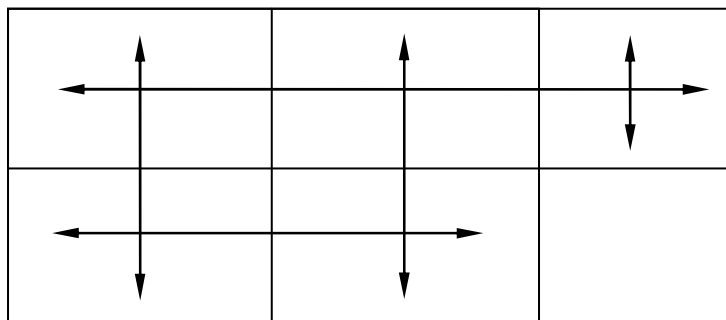


Рисунок 6.2 – Пути разбиения

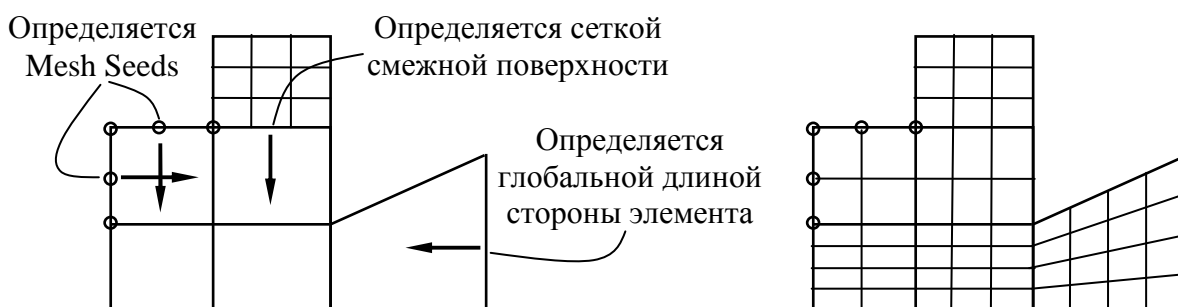


Рисунок 6.3 – Пример построения изосетки

6.3 Генератор сеток Paver

Генератор Paver (мостить) используется для разбиения на элементы любых поверхностей (рисунок 6.4). Он стартует на границах и постепенно продвигается вовнутрь. При этом Mesh Seeds контролируют процесс генерации элементов вдоль кривых, на которых они установлены (рисунок 6.5).

В отличие от предыдущего случая генератор Paver распознает «твердую» геометрию (т.е. точки и кривые, связанные с поверхностью) и обязательно создает там узлы (рисунок 6.6). На связанных с поверхностью кривых можно задавать Mesh Seeds, что позволяет управлять сеткой во внутренних областях.

Следует отметить, что оба рассмотренных выше генератора позволяют строить смешанные сетки, содержащие элементы как четырехугольной, так и

треугольной формы. Это происходит том в случае, когда число элементов вдоль периметра является нечетным.

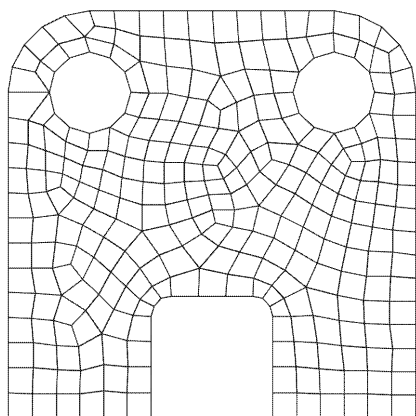


Рисунок 6.4 – Сетка, построенная методом Paver

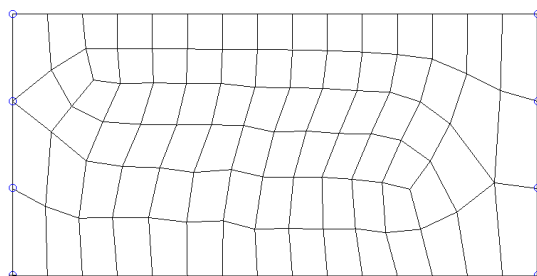


Рисунок 6.5 – Paver-сетка на простой поверхности при задании Mesh Seeds

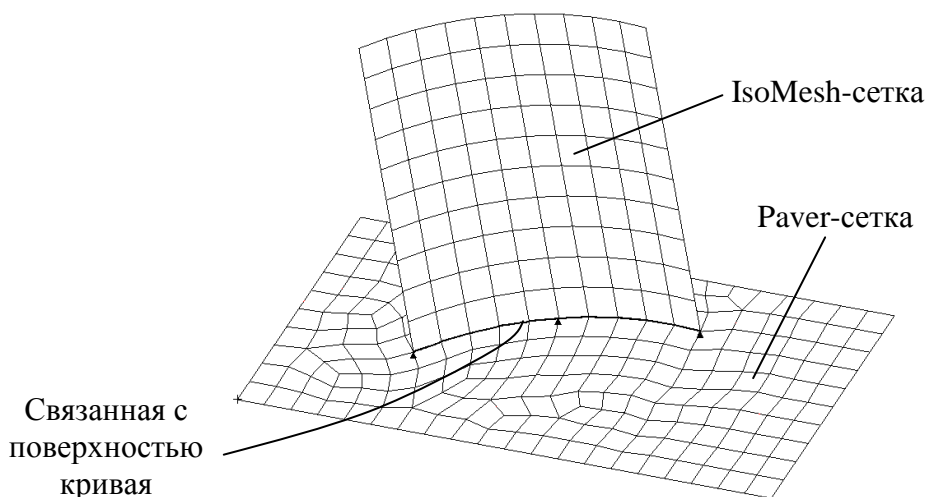


Рисунок 6.6 – Учет «твердой» геометрии

6.4 Генератор сеток TetMesh

TetMesh – это высокоавтоматизированный метод создания сеток из элементов тетраэдральной формы в произвольных объемах, не требующий большого участия пользователя. Он дает возможность строить достаточно качественные сетки в B-гер телах, импортированных из большинства САД-систем (рисунок 6.7). Размер создаваемых здесь элементов в основном определяется глобальной длиной стороны элемента. Однако можно включить опцию контроля кривизны, позволяющую строить более детальные сетки в сильно искривленных местах, либо опцию создания более грубой сетки во внутренних областях объема.

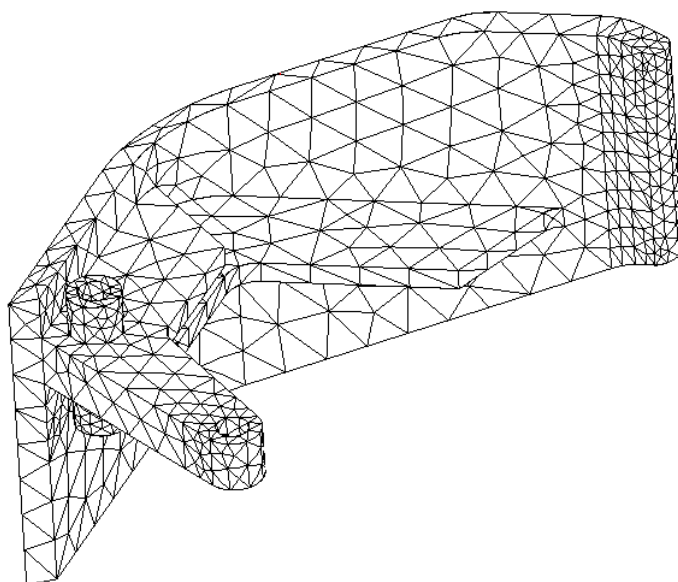


Рисунок 6.7 – Сетка из тетраэдральных элементов

6.5 Генератор сеток Sweep Mesher

Данный метод позволяет вытягиванием элементов более низкого порядка (или узлов) на заданное расстояние строить элементы более высокого порядка. Например, поверхностные четырехугольные элементы Quad можно вытянуть в объемные шестигранные Hex (рисунок 6.8). При этом имеется несколько приемов вытягивания (Extrude – вытягивание в заданном направлении; Glide – вытягивание скольжением вдоль направляющих кривых и т.д.), что позволяет получать достаточно сложную конфигурацию (рисунок 6.9).

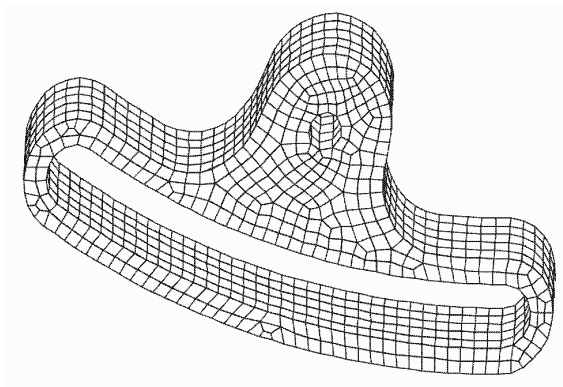


Рисунок 6.8 – Вытягивание сетки в заданном направлении

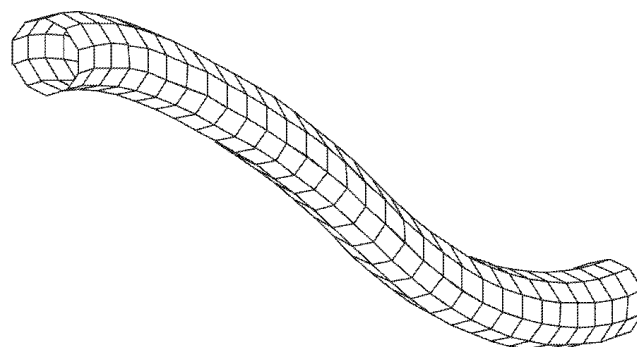


Рисунок 6.9 – Вытягивание сетки скольжением вдоль направляющих линий

Следует отметить, что сетка, построенная вытягиванием, не имеет связи с геометрическими объектами. Поэтому в данном случае свойства, гра-

нические условия и нагрузки необходимо прикладывать непосредственно к узлам и конечным элементам.

6.6 Задание опорных точек сетки

Опорные точки сетки (Mesh Seeds) устанавливаются на кривых или кромках. Они определяют положения узлов сетки, и, следовательно, используются для контроля над количеством и размером генерируемых в дальнейшем элементов.

В программе MSC.Patran имеются различные методы для задания опорных точек:

- Uniform seed bias – равномерное расположение;
- Non-uniform seed bias – неравномерное расположение;
- Curve based seeding – расположение, основанное на кривой;
- Tabular – табличное задание;
- PCL function – задание с помощью функций командного языка PCL.

Для задания Mesh Seeds необходимо выбрать приложение «Elements». Случаи неравномерного расположения опорных точек при изменении в одном и двух направлениях рассмотрены на рисунках 6.10 и 6.11 соответственно. Смысл входных параметров здесь понятен из эскизов, изображенных на диалоговых панелях.

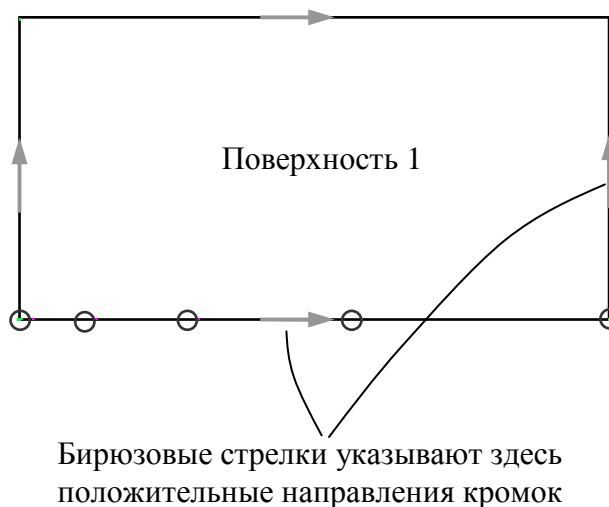
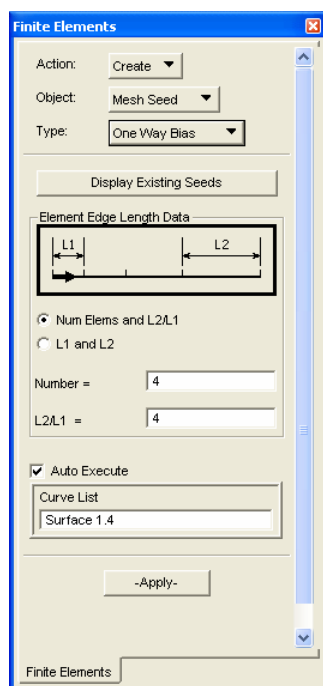
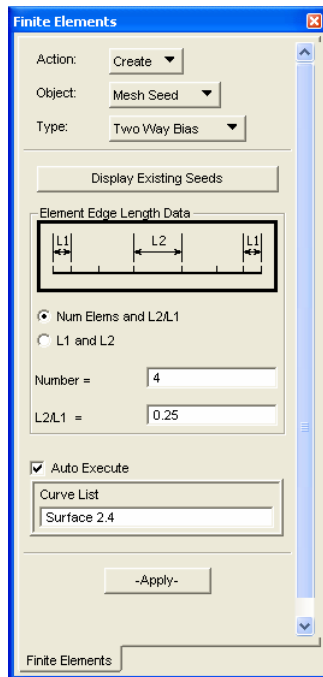


Рисунок 6.10 – Изменение в одном направлении



Отношение размеров сетки = 0.25 (или -4)

Рисунок 6.11 – Изменение в двух направлениях

При расположении Mesh Seeds, основанном на кривой, сгущение сетки происходит в местах наибольшего искривления линии (рисунок 6.12). Здесь задается максимально допустимое значение для ошибки кривизны.

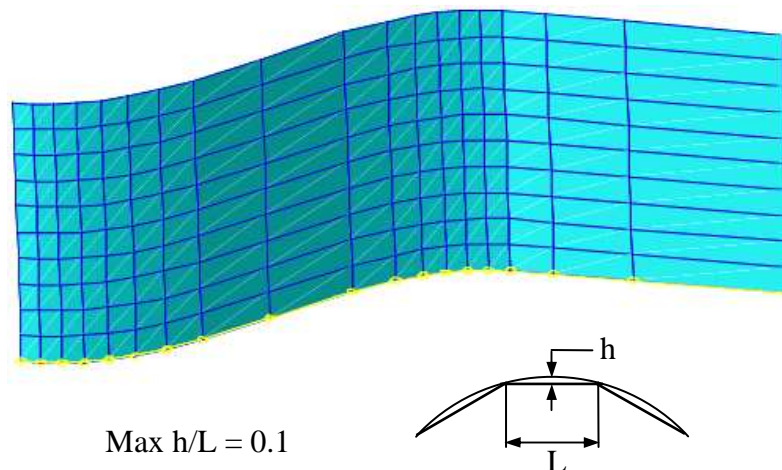


Рисунок 6.12 – Расположение, основанное на кривой

6.7 Построение сеток на кривых

Здесь также используется приложение «Elements». Для генерации сетки необходимо определить лишь топологию и размер элементов. Ориентация

элементов, геометрические характеристики сечения, флаги шарниров, эксцентриситеты, формулировка и т.д. задаются в приложении «Properties».

Пример ввода данных для разбиения кривых на элементы представлен на рисунке 6.13. Здесь топология Bar2 означает, что при построении сетки будут использоваться линейные элементы с двумя узлами. Кнопка *Node Coordinate Frames...* позволяет определить локальные системы координат для анализа (Analysis Coordinate Frame) и базовые системы координат для определения положения узлов (Refer. Coordinate Frame). В списке «Curve List» указываются подлежащие разбиению кривые (или кромки). Глобальный размер длины стороны элемента устанавливается программой автоматически и приводится в разделе «Global Edge Length». Его можно изменить, для чего следует убрать флаг «Automatic Calculation» (автоматическое вычисление) и в поле «Value» ввести новое значение. С помощью кнопки *Select Existing Prop...* можно вновь создаваемым элементам назначить определенные ранее физические и геометрические свойства. Кроме того, кнопка *Create New Property...* позволяет задать (с использованием приложения «Properties») и присвоить элементам новые свойства.

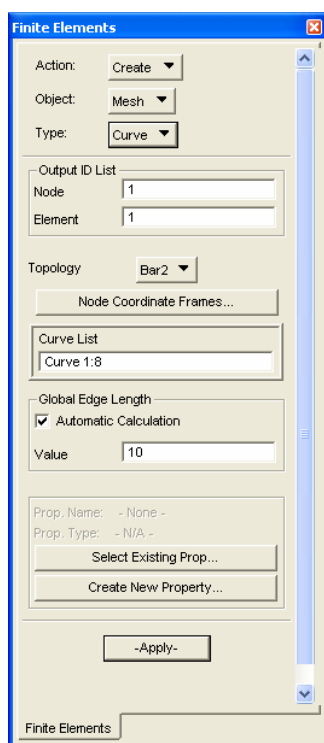


Рисунок 6.13 – Построение сеток на кривых

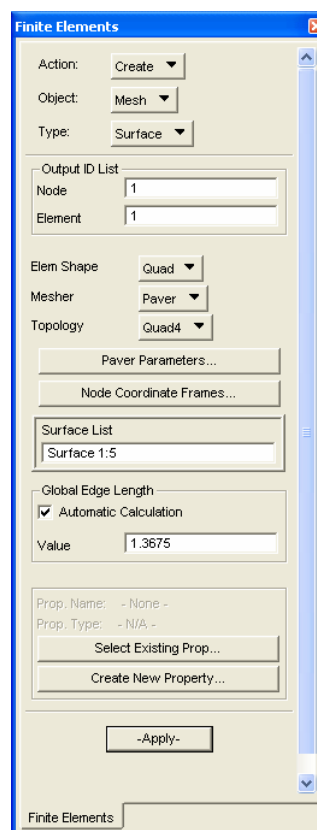


Рисунок 6.14 – Построение сеток на поверхностях

6.8 Построение сеток на поверхностях

Напомним, что здесь имеются два генератора сеток. IsoMesh-генератор можно использовать только для простых поверхностей, а Paver-генератор применим для любых поверхностей. В этом случае также для построения сетки необходимо определить лишь топологию и размер элементов, а остальные величины такие, как толщина, ориентация материала, формулировка и т.д., задаются в приложении «Properties».

Пример ввода данных для разбиения поверхностей на элементы представлен на рисунке 6.14. Здесь в поле «Elem Shape» выбирается форма элементов (Tri – треугольник или Quad – четырехугольник), в поле «Mesher» – генератор сеток (IsoMesh или Paver) и в поле «Topology» – топология (форма плюс количество узлов). Следует отметить, что указанная топология должна соответствовать имеющимся в библиотеке программы MSC.Nastran элементам. При выборе IsoMesh-генератора с помощью кнопки *IsoMesh Parameters...* можно выбрать образец сетки и изменить установленные по умолчанию параметры сглаживания, что требуется для сопряжения разных сеток. Для второго генератора кнопка *Paver Parameters...* позволяет управлять размером элементов во внутренних областях, учитывать кривизну для построения более детальных сеток вблизи сильно искривленных границ, использовать треугольные элементы в сетке из четырехугольных элементов для генерации минимального числа конечных элементов.

6.9 Построение сеток в объемах

Для объемов также имеются два способа построения сеток. IsoMesh-генератор можно использовать только для простых параметрических объемов, а TetMesh-генератор применим для любых объемов.

Форма диалоговой панели для построения сеток в объемах представлена на рисунке 6.15. При использовании TetMesh-генератора здесь можно с помощью кнопки *TetMesh Parameters...* изменить установленные по умолчанию параметры контроля над процессом генерации сетки. Так, при включении опции «Internal Coarsening» во внутренних областях объема будет создаваться более грубая сетка, нежели вблизи границ. Активизация опции «Collapse Short Edges» позволяет стягивать в точку короткие стороны. Включение же флага «Curvature Check» дает возможность задать максимально допустимое значение для ошибки кривизны для построения более детальных сеток в сильно искривленных местах.

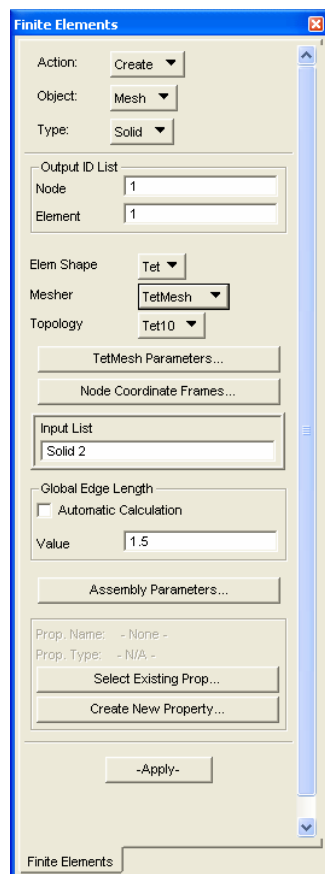


Рисунок 6.15 – Построение сеток в объемах

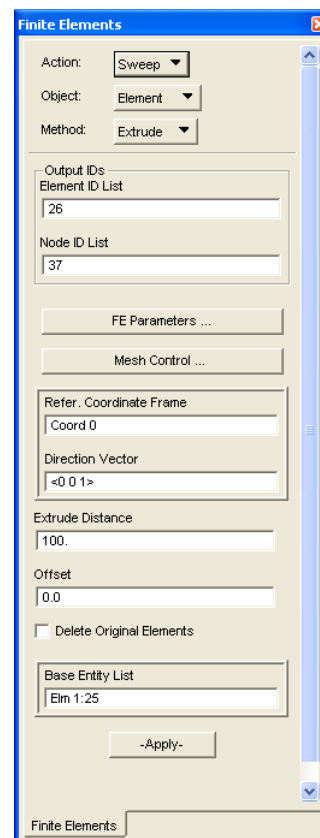


Рисунок 6.16 – Построение сеток вытягиванием

6.10 Построение сеток вытягиванием

Данный метод используется для тел, имеющих постоянное поперечное сечение. Пример диалоговой панели для построения сетки вытягиванием в заданном направлении приведен на рисунке 6.16. Здесь в поле «Direction Vector» в качестве направления вытягивания выбирается ось Z глобальной декартовой системы координат (Coord 0). Параметр «Extrude Distance» определяет длину вытягивания (или толщину). В поле «Offsets» задается отступ от базовой сетки, формируемой элементами из списка «Base Entity List». С помощью кнопки *Mesh Control...* можно указать число элементов по толщине. При этом имеется возможность генерации неоднородной в направлении вытягивания сетки.

6.11 Сшивка конечно-элементной модели

В процессе разбиения геометрической модели на конечные элементы программа MSC.Patran строит на геометрических объектах не связанные между собой сетки. При этом конечно-элементная модель не будет единой, по-

сколькx ее отдельные части могут свободно перемещаться относительно друг друга. Поэтому перед первым запуском задачи на счет, как правило, необходимо сшить модель, т.е. связать конечные элементы по узлам. Очевидно, что в простых случаях, когда модель представляется одним геометрическим объектом, данная операция не требуется.

Отметим, что если границы смежных геометрических объектов являются топологически конгруэнтными (т.е. полностью идентичными), то MSC.Patran автоматически на них создает совпадающие в пространстве узлы. Такие совпадающие узлы можно легко объединить и тем самым сшить модель.

Для реализации данной операции следует выбрать действие Equivalence (эквивалентность) приложения «Elements», которое может распространяться на всю модель (All), выбранную группу или указанный список узлов (рисунок 6.17). В результате выполнения операции сшивки объединяются в один те узлы, которые совпадают в пределах куба (метод Tolerance Cube) или сферы (метод Tolerance Sphere) с размерами, определяемыми точностью сшивки в поле «Equivalencing Tolerance». Особо необходимо обратить внимание на поле «Node to be excluded» (узлы, исключаемые из операции сшивки). Как правило, здесь ничего указывать не следует за исключением специальных случаев, таких как контактные задачи, моделирование трещин и т.п.

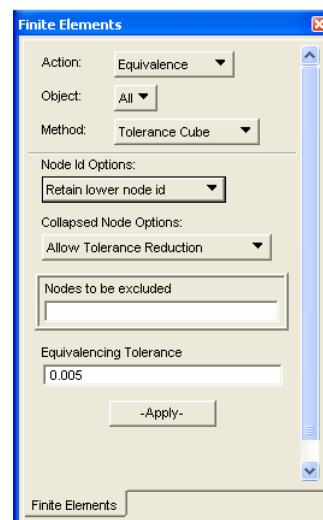


Рисунок 6.17 – Сшивка модели

6.12 Проверка качества сетки

Следует отметить, что наиболее точные результаты получаются в том случае, когда элементы имеют правильную форму, т.е. форму квадрата, равностороннего треугольника, куба и т.д. Однако в большинстве случаев элементы имеют какие-либо отклонения от правильной формы. Главное, чтобы эти отклонения не превышали некоторых предельных значений. Известно, что результаты расчетов сильно искажаются, если отношение сторон элемента будет больше пяти, если угол между сторонами элемента будет меньше 30° и т.д. Контролировать эти параметры можно с помощью действия Verify (проверить).

Например, для определения элементов с отношением сторон (Aspect Ratio) больше пяти в диалоговой панели приложения «Elements» необходимо ввести данные, как показано на рисунке 6.18. При этом «плохие» элементы будут изображаться красным цветом.

Кроме того, здесь для проверки выполнения операции сшивки можно отобразить на экране свободные (т.е. несшитые) кромки или грани (рисунок 6.19).

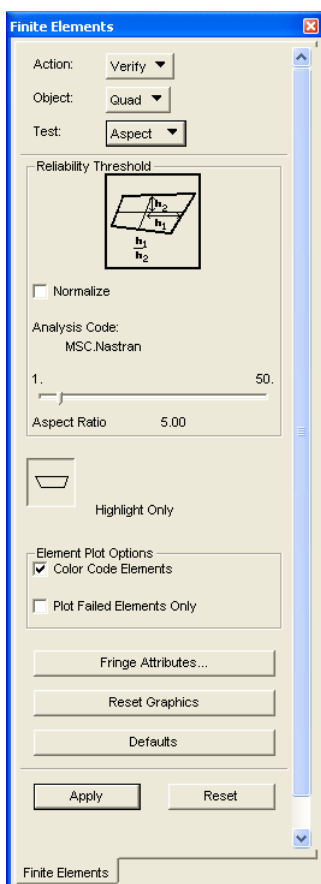
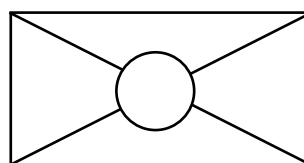
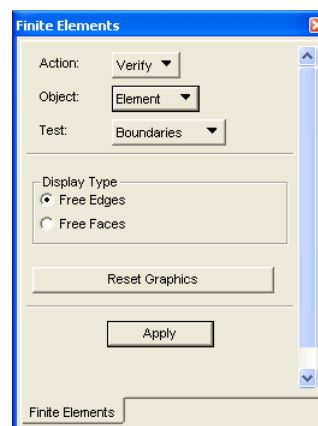
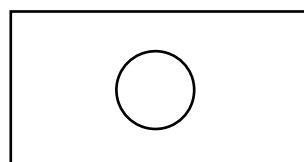


Рисунок 6.18 – Проверка отношения сторон элементов



До сшивки



После сшивки

Рисунок 6.19 – Проверка выполнения операции сшивки

6.13 Редактирование сетки

Программа MSC.Patran обеспечивает пользователя инструментами для редактирования как элементов, так и узлов (действие Modify). Для элементов можно изменить идентификационный номер (ID), топологию (Type) и связность (Connectivity). Для узлов можно изменить номер (ID), систему координат для анализа (Analysis Coordinate Frame), базовую систему координат (Refer. Coordinate Frame) и положение (Location).

На рисунке 6.20 представлен пример изменения положения узла. Здесь в поле «Node List» указывается список перемещаемых узлов, а в поле «New Node Locations» задаются их новые положения путем ввода глобальных декартовых координат (в квадратных скобках) либо списка узлов или точек.

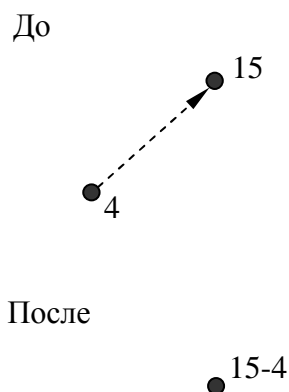
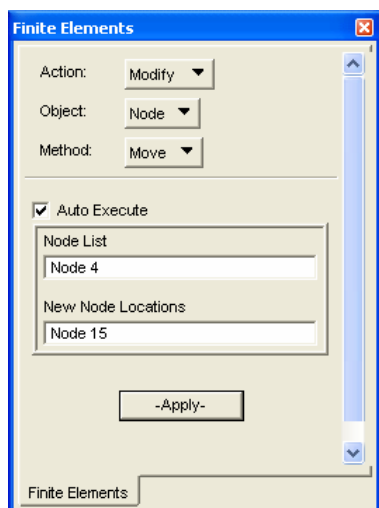


Рисунок 6.20 – Изменение положения узла

Данный подход полезен, например, для совмещения узлов, расположенных на совпадающих, но топологически неконгруэнтных границах (рисунок 6.21).

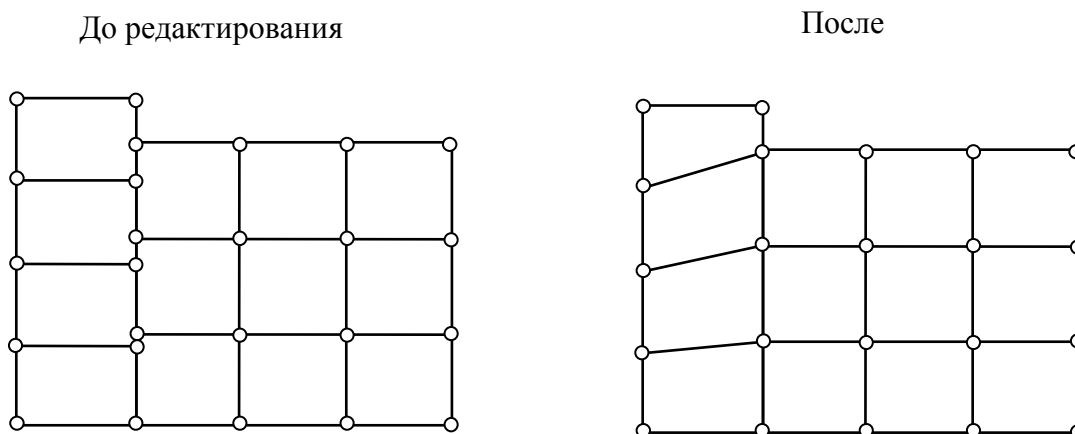


Рисунок 6.21 – Совмещение узлов на границах

Вопросы по теме 6

- 1) Чем определяется топология элементов в программе MSC.Patran?
 1. Формой.
 2. Числом узлов.
 3. Формулировкой.
 4. Геометрическими свойствами.
 5. Физическими свойствами.
 6. Размером.

- 2) Какие формы конечных элементов доступны в программе MSC.Patran?
 1. Point.
 2. Bar.
 3. Tri.
 4. Quad.
 5. Tet.
 6. Wedge.
 7. Hex.
 8. Line.
 9. Penta.
 10. Surface.
 11. Volume.

- 3) Какие алгоритмы генерации сеток имеются в программе MSC.Patran?
 1. IsoMesh.
 2. Paver.
 3. TetMesh.
 4. Sweep mesher.
 5. QuadMesh.
 6. HexMesh.
 7. Mesh Seeds.
 8. Auto.

- 4) Что такое Mesh Seeds?
 1. Опорные точки сетки.
 2. Плотность сетки.
 3. Сгущение сетки.
 4. Размер элементов сетки.
 5. Построение сетки методом вытягивания.

- 5) Какое приложение используется для задания топологии сетки?

1. Elements.
2. Meshing.
3. Topology.
4. Properties.
5. Fields.
6. Loads/BCs.
7. Geometry.

6) Для разбиения каких геометрических объектов используется IsoMesh-генератор?

1. Всех кривых.
2. Трех- или четырехсторонних поверхностей.
3. Пяти- или шестигранных объемов.
4. N-сторонних многосвязанных trimmed-поверхностей.
5. В-гер объемов произвольной формы.

7) Для разбиения каких геометрических объектов используется Paver-генератор?

1. Всех кривых.
2. Трех- или четырехсторонних поверхностей.
3. Пяти- или шестигранных объемов.
4. N-сторонних многосвязанных trimmed-поверхностей.
5. В-гер объемов произвольной формы.

8) Для разбиения каких геометрических объектов используется TetMesh-генератор?

1. Всех кривых.
2. Трех- или четырехсторонних поверхностей.
3. Пяти- или шестигранных объемов.
4. N-сторонних многосвязанных trimmed-поверхностей.
5. В-гер объемов произвольной формы.

9) Что такое IsoMesh mesher?

1. Генератор регулярных сеток, используемый для разбиения параметрических объектов.
2. Генератор свободных сложных сеток, используемый для разбиения любых поверхностей.
3. Автоматический генератор сложных сеток из тетраэдральных элементов.
4. Генератор сеток, вытягиваемых из базовых элементов.

10) Что такое Paver mesher?

1. Генератор регулярных сеток, используемый для разбиения параметрических объектов.
2. Генератор свободных сложных сеток, используемый для разбиения любых поверхностей.
3. Автоматический генератор сложных сеток из тетраэдральных элементов.
4. Генератор сеток, вытягиваемых из базовых элементов.

11) Что такое TetMesh mesher?

1. Генератор регулярных сеток, используемый для разбиения параметрических объектов.
2. Генератор свободных сложных сеток, используемый для разбиения любых поверхностей.
3. Автоматический генератор сложных сеток из тетраэдральных элементов.
4. Генератор сеток, вытягиваемых из базовых элементов.

12) Что такое Sweep mesher?

1. Генератор регулярных сеток, используемый для разбиения параметрических объектов.
2. Генератор свободных сложных сеток, используемый для разбиения любых поверхностей.
3. Автоматический генератор сложных сеток из тетраэдральных элементов.
4. Генератор сеток, вытягиваемых из базовых элементов.

13) От чего в первую очередь зависит число элементов на кромках вдоль пути разбиения при построении изосетки?

1. От установленных опорных точек Mesh Seeds.
2. От примыкающих топологически конгруэнтных областей, покрытых сеткой.
3. От заданной глобальной длины стороны элемента.
4. От длины самой большой кромки.
5. От длины самой короткой кромки.

14) Чем отличается Paver-генератор от IsoMesh-генератора?

1. Возможностью разбиения на элементы любых поверхностей.
2. Возможностью разбиения на элементы любых объемов.
3. Учетом «твердой» геометрии.
4. Возможностью построения смешанных сеток.
5. Отсутствием возможности разбиения поверхностей.
6. Отсутствием возможности разбиения объемов.

15) Чем отличается TetMesh-генератор от IsoMesh-генератора?

1. Возможностью разбиения на элементы любых поверхностей.
2. Возможностью разбиения на элементы любых объемов.
3. Учетом твердой геометрии.
4. Возможностью построения смешанных сеток.
5. Отсутствием возможности разбиения поверхностей.
6. Отсутствием возможности разбиения объемов.
7. Использованием элементов только тетраэдральной формы.

16) В элементы какой формы вытягиваются узлы при помощи Sweep-генератора?

1. Point.
2. Bar.
3. Tri.
4. Quad.
5. Tet.
6. Wedge.
7. Hex.

17) В элементы какой формы вытягиваются элементы Bar при помощи Sweep-генератора?

1. Point.
2. Bar.
3. Tri.
4. Quad.
5. Tet.
6. Wedge.
7. Hex.

18) В элементы какой формы вытягиваются элементы Quad при помощи Sweep-генератора?

1. Point.
2. Bar.
3. Tri.
4. Quad.
5. Tet.
6. Wedge.
7. Hex.

19) В элементы какой формы вытягиваются элементы Tri при помощи Sweep-генератора?

1. Point.

2. Bar.
3. Tri.
4. Quad.
5. Tet.
6. Wedge.
7. Hex.

20) Где устанавливаются Mesh Seeds?

1. В точках.
2. На кривых.
3. На кромках.
4. На поверхностях.
5. На гранях.
6. В объемах.

21) Для чего используются Mesh Seeds?

1. Для задания плотности сетки.
2. Для задания сгущения сетки.
3. Для учета «твердой» геометрии.
4. Для разбиения кривых на элементы.
5. Для задания топологии элементов.

22) Какие генераторы можно использовать при построении сеток на поверхностях?

1. IsoMesh.
2. Paver.
3. TetMesh.
4. Sweep.

23) Какие генераторы можно использовать при построении сеток в объемах?

1. IsoMesh.
2. Paver.
3. TetMesh.
4. Sweep.

24) Чем отличается построение сетки методом Sweep от других алгоритмов генерации сеток?

1. Отсутствием связи с какими-либо геометрическими объектами.
2. Возможностью создания сложной конфигурации.
3. Учетом «твердой» геометрии.

4. Возможность разбиения любых геометрических объектов.
5. Учетом опорных точек.

25) Для чего используется действие Equivalence?

1. Для сшивки конечно-элементной модели.
2. Для склеивания геометрической модели.
3. Для совмещения смежных кромок.
4. Для совмещения узлов на границах.

26) Что происходит в результате выполнения операции сшивки?

1. Объединяются узлы, совпадающие в пределах задаваемой точности.
2. Объединяются кромки, совпадающие в пределах задаваемой точности.
3. Объединяются грани, совпадающие в пределах задаваемой точности.
4. Совмещаются узлы на смежных топологически неконгруэнтных кромках.

27) В каких случаях при выборе действия Equivalence используется поле «Node to be excluded»?

1. Для указания узлов, подлежащих сшивке.
2. При решении контактных задач.
3. При моделировании трещин.
4. При решении нелинейных задач.
5. При анализе переходных динамических процессов.

28) Что можно изменить для элементов при выборе действия Modify?

1. Идентификационный номер.
2. Топологию.
3. Связность.
4. Систему координат для анализа.
5. Базовую систему координат.
6. Положение.

29) Что можно изменить для узлов при выборе действия Modify?

1. Идентификационный номер.
2. Топологию.
3. Связность.
4. Систему координат для анализа.
5. Базовую систему координат.

6. Положение.

30) При помощи какого действия приложения «Elements» можно определить «плохие» элементы?

1. Verify.
2. Show.
3. Equivalence.
4. Modify.
5. Plot Markers.
6. Plot Contours.

31) При помощи какого действия приложения «Elements» можно отобразить свободные (несшитые) кромки или грани?

1. Verify.
2. Show.
3. Equivalence.
4. Modify.
5. Plot Markers.
6. Plot Contours.

7 ГРУППЫ, СПИСКИ И ПОЛЯ

7.1 Работа с группами

При создании новой базы данных автоматически создается также группа с именем `default_group`. Программа MSC.Patran позволяет создавать любое количество групп. При этом они становятся постоянными членами базы данных (т.е. не удаляются при завершении сеанса работы). Такой подход дает возможность, например, разделить геометрические и конечно-элементные объекты по разным группам, что бывает удобным при моделировании и обработке результатов расчета. Кроме того, при построении большой модели полезно с помощью групп разбить ее на отдельные части.

Следует отметить, что в каждый момент времени только одна группа может быть текущей (`current`). Ее имя приводится в заголовке графического окна. В эту группу помещаются все вновь создаваемые геометрические и конечно-элементные объекты. Объекты могут принадлежать одновременно нескольким группам.

Целевой (`target`) называется та группа, с которой будет выполняться какое-либо действие. Например, преобразование объектов осуществляется из целевой группы в текущую. Редактирование также проводится целевой группы.

И наконец, группа, изображаемая в графическом окне, называется «посланной» (`posted`). Отметим, что группа может быть послана в несколько окон, и несколько групп может изображаться в одном окне. Текущая группа всегда отображается в графическом окне, т.е. является посланной.

Для выполнения каких-либо действий с группами следует выбрать в полосе меню позицию «Group». При этом появляется выпадающее меню, содержащее следующие команды:

- **Create** – создает новую группу. Здесь необходимо задать имя группы и, если требуется, добавить выбранные объекты. Отметим, что нагрузки, граничные условия, системы координат, поля, случаи нагружения и результаты расчета не могут быть членами группы;
- **Post** – посылает группу в графическое окно. При этом можно выбрать сразу несколько групп (при смежном выборе используется клавиша *Shift*, при несмежном – *Ctrl*);

- **Modify** – модифицирует целевую группу. Здесь можно изменить имя группы, добавить или удалить объекты и т.д.;
- **Move/Copy** – перемещает или копирует выбранные объекты из одной группы в другую;
- **Set Current** – делает группу текущей и отображает ее в текущем графическом окне;
- **Transform** – преобразует объекты целевой группы и переносит их в текущую. При этом используются те же методы преобразования, что и для геометрических объектов;
- **Delete** – удаляет любую группу за исключением текущей. Здесь удаляется только имя группы, а не сами объекты.

7.2 Работа со списками

При построении модели, а также в процессе обработки результатов расчета часто возникает необходимость работы не со всеми объектами, а лишь с некоторыми из них, выбранными по определенному критерию. Для этих целей используются так называемые списки (*list*).

Создать список можно с помощью следующей команды полосы меню: *Tools>List>Create*. При этом в качестве критерия отбора объектов в список могут использоваться:

- атрибуты (такие как положение объекта, значение результата, назначенные свойства);
- связи с другими объектами (такими как точки, кривые, элементы, группы и т.п.).

Следует отметить, что списки не хранятся в базе данных (т.е. при выходе из программы они пропадут), но могут быть добавлены в группу. Можно создать только два списка, обозначаемых буквами *A* и *B*. Можно также построить временный список *C* путем выполнения булевых операций над списками *A* и *B*.

Рассмотрим пример создания двух списков. Пусть в список *A* необходимо поместить все узлы со значением координаты $x = 18 \pm 1,0$ мм, а в список *B* – все элементы, связанные с этими узлами. Как показано на рисунке 7.1, при создании первого списка в качестве критерия отбора следует использовать значение координаты (*Coord Value*), т.е. атрибут (метод *Attribute*), а второго – связи с узлами (метод *Association*). Отметим, что если список исполь-

зуется в качестве входных данных (как в нашем случае), его имя следует взять в апострофы.

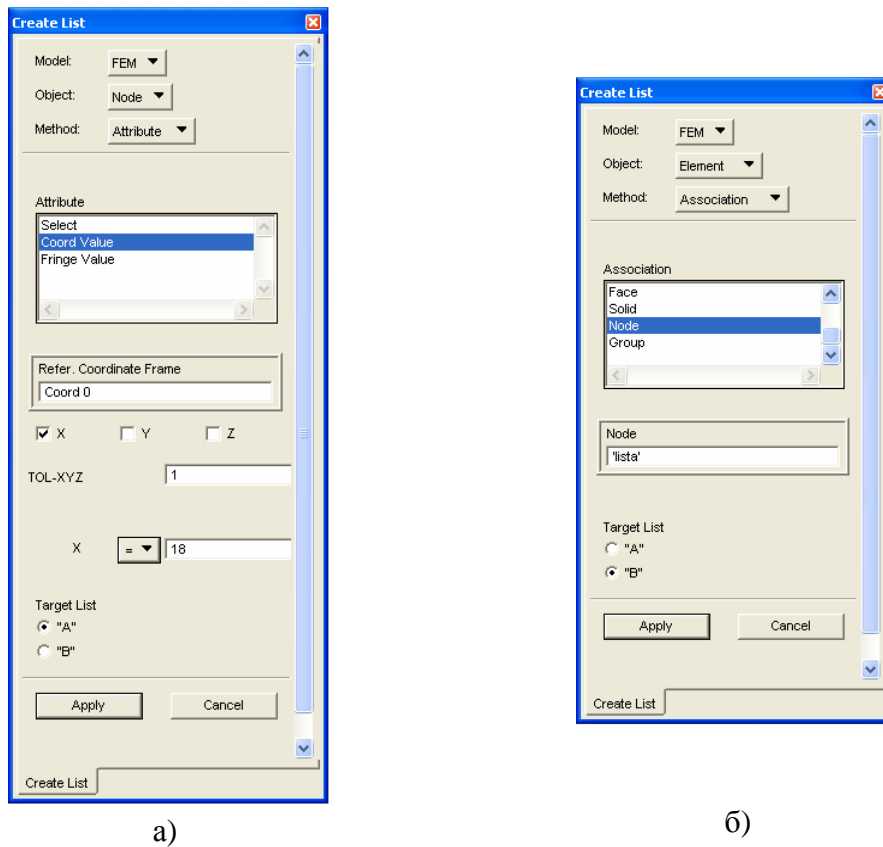


Рисунок 7.1 – Создание списка узлов (а) и списка элементов, связанных с этими узлами (б)

Созданный список можно добавить в группу (кнопка *Add to Group* на панели списка) или удалить из группы (кнопка *Remove From Group*). Кроме того, со списками *A* и *B* можно выполнить одну из следующих булевых операций (команда *Tools>List>Boolean*):

- операция пересечения (находит общие члены в обоих списках);
- операция сложения (объединения) двух списков;
- операции вычитания одного списка из другого.

Рассмотрим второй пример. Пусть требуется найти конечные элементы, имеющие следующие значения результатов: напряжения по Мизесу > 200 МПа; температура $> 300^\circ$. Порядок действий здесь следующий:

- 1) отобразить в графическом окне поле напряжений по Мизесу;
- 2) создать список *A*, содержащий элементы, в которых напряжения по Мизесу превышают 200 МПа:

«Model»: FEM (конечно-элементная модель)

«Object»: Element

«Method»: Attribute

«Attribute»: Fringe Value (значение заливки)

«TOL-FRI»: 1 (точность)

$F > 200$

«Target List»: A (целевой список)

3) отобразить в графическом окне поле температур;

4) создать список *B*, содержащий элементы с температурой, превышающей 300° (в отличие от предыдущего случая здесь следует установить $F > 300$ и в качестве целевого – выбрать список *B*);

5) выполнить булеву операцию пересечения двух списков.

В результате выполнения этих действий список *C* будет содержать конечные элементы, удовлетворяющие данному критерию. Этот список можно добавить к группе, удалить из группы, поместить на место списка *A* или *B* (Replace *A* или *B*).

7.3 Ввод полей

7.3.1 Типы полей

В программе MSC.Patran поля используются для задания изменения нагрузок, граничных условий, свойств материалов и элементов. Имеются три типа полей: 1) пространственные (Spatial); 2) свойств материалов (Material Properties); 3) непространственные (Non Spatial).

Пространственные поля описывают изменение параметров в зависимости от физических координат (например, X, Y, Z), параметрических координат (например, ξ_1, ξ_2), результатов анализа и определенных пользователем комбинаций допустимых независимых переменных. С помощью такого поля можно описать, например, переменную толщину пластины (рисунок 7.2).

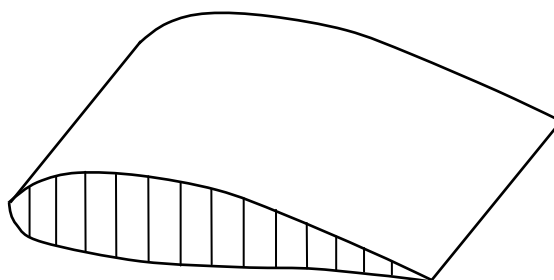


Рисунок 7.2 – Переменная толщина пластины

Поля свойств материалов описывают изменение свойств в зависимости от температуры (temperature), деформации (strain), скорости деформации (strain rate), времени (time), частоты (frequency) и определенных пользователем комбинаций допустимых независимых переменных.

Непространственные поля описывают изменение параметров в зависимости от времени (time), частоты (frequency), перемещения (displacement), скорости (velocity) и определенных пользователем комбинаций допустимых независимых переменных.

Для ввода полей имеется отдельное приложение «Fields». Для каждого типа полей существует несколько различных методов ввода. Для пространственных полей таковыми являются:

- PCL Function – ввод с помощью функций языка PCL;
- Tabular Input – табличный ввод;
- General – общий ввод;
- FEM – ввод с использованием результатов МКЭ-анализа;

Для полей свойств материалов и непространственных полей доступны лишь два метода: Tabular Input и General.

7.3.2 Построение пространственных полей

Рассмотрим сначала ввод с использованием функций языка PCL. Здесь PCL-выражения могут определяться с тремя пространственными переменными. Для прямоугольной системы координат таковыми являются X, Y, Z; для цилиндрической – R, T, Z; для сферической – R, T, P; для параметрической – C1, C2, C3. Отметим, что в PCL-выражениях все перечисленные выше переменные следует писать только заглавными буквами, причем перед ними необходимо ставить еще и апостроф. Например,

математическое выражение	PCL-выражение
$0,1x + 0,35y^2$.1*'X+.35*'Y**2
$10,2\xi_1 - 20,8\xi_2$	10.2*'C1-20.8*'C2

Перечислим все математические функции языка PCL:

SIND(angle); SINR(angle); ASIND(n); ASINR(n); COSD(angle); COSR(angle); ACOSD(n); ACOSR(n); TAND(angle); TANR(angle); ATAND(n); ATANR(n); ATAN2D(y, x); ATAN2R(y, x); SQRT(n); LN(n); EXP(n); LOG(n); ABS(n); SIGN(n); NINT(n); MAX(n1, n2, ...); MIN(n1, n2, ...).

Здесь последняя буква R означает, что угол задается в радианах, а D – в градусах. Поскольку переменные T и P цилиндрической и сферической систем координат определяются в радианах, следует использовать SINR('T), COSR('P) и т.д.

В качестве примера опишем с помощью пространственного поля изменение толщины цилиндрической оболочки в окружном направлении. Соответствующие данные представлены на рисунке 7.3. В области ввода «Field Name» создаваемому полю присваивается имя (оно должно быть уникальным). Сама функция записывается в области ввода «Scalar Function», причем переменные удобно выбирать из расположенного ниже списка. Здесь предполагается, что предварительно была определена цилиндрическая система координат с номером 1.

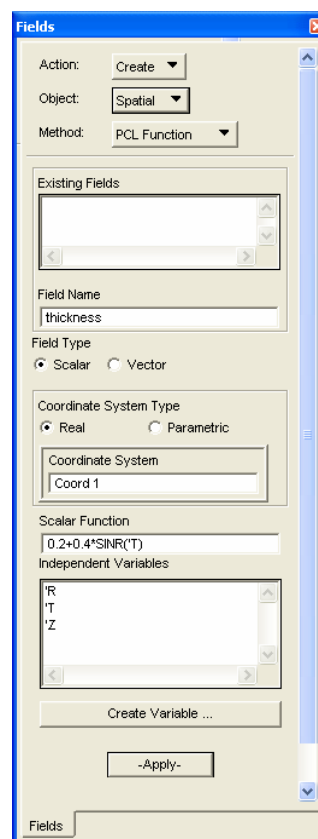
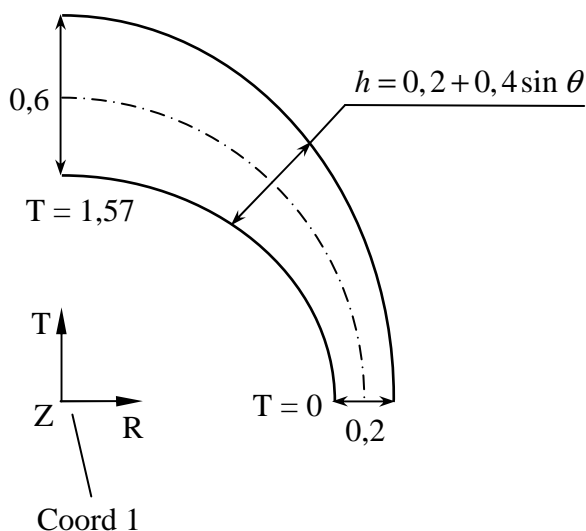


Рисунок 7.3 – Описание изменения толщины цилиндрической оболочки

Следует отметить, что пространственное поле может быть либо скалярным (Scalar), либо векторным (Vector). Во втором случае в отличие от первого необходимо задавать PCL-выражения для трех компонент вектора. При этом здесь можно использовать как физические действительные (Real) координаты, так и параметрические (Parametric). Параметрические координаты

ты имеющихся геометрических объектов можно отобразить на экране дисплея путем включения флага «Show Parametric Direction» в диалоговой панели, вызываемой из полосы меню командой *Display>Geometry*.

Рассмотрим табличный ввод пространственного поля с использованием параметрических координат. Зададим, например, кусочно-линейное изменение толщины пластины, определяемой поверхностью 1 (рисунок 7.4). Здесь необходимо сначала выбрать параметрическую систему координат и указать соответствующий геометрический объект (т.е. поверхность 1). Поскольку опция «Endpoints Only» используется для ввода линейного поля путем задания значений в угловых точках, ее следует отключить. Далее в разделе «Active Independent Variables» нужно активизировать первые две переменные и нажать кнопку *Input Data*. При этом появляется дополнительное окно. Для ввода значения здесь необходимо мышью указать нужную ячейку таблицы, в области «Input Data» набрать соответствующее число и нажать клавишу *Enter*.

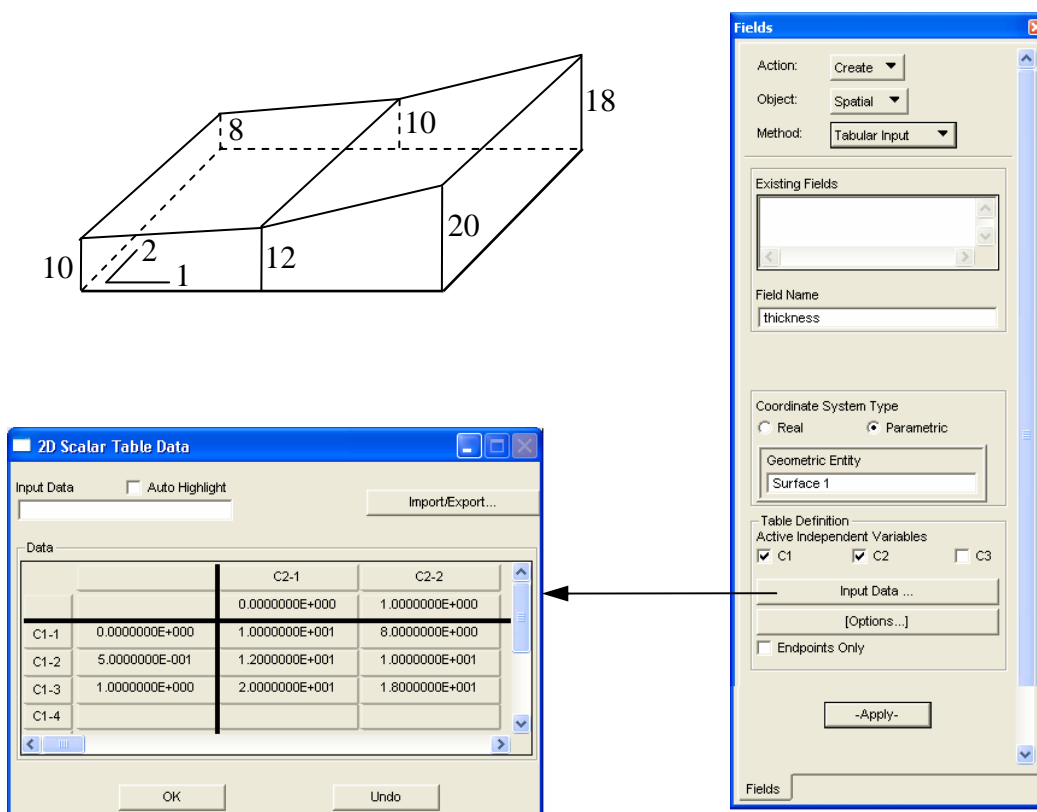


Рисунок 7.4 – Описание кусочно-линейного изменения толщины пластины

В заключение рассмотрим задание пространственных полей методом FEM. В этом случае отображаемые на экране дисплея результаты МКЭ-анализа можно использовать в качестве исходных данных для построения

поля. Такой подход обычно применяется для нанесения данных одного анализа на другой (например, полученное с помощью теплового анализа распределение температур можно использовать в качестве исходных данных для решения задач механики деформируемого твердого тела) или одной сетки на другую (так называемый глобально-локальный анализ). Суть глобально-локального анализа состоит в том, что для исследования локальной прочности в некоторой области конструкции ее рассматривают отдельно, разбив густой сеткой и задав в качестве граничных условий перемещения или усилия, найденные в глобальном анализе.

Существуют две формулировки FEM-полей: *Discrete* – дискретная, определяющая значения для заданного списка узлов и элементов; *Continuous* – непрерывная, использующая интерполяцию для определения значений в произвольных точках внутри рассматриваемой области.

Имеются также два типа FEM-полей: скалярные и векторные. При этом скалярные поля строятся из давления и температуры, а векторные – из перемещений и сил.

7.3.3 Построение полей свойств материалов

Для полей свойств материалов используются следующие обозначения независимых переменных: T – температура; e – деформация; $e\dot{r}$ – скорость деформации; t – время; f – частота. До ввода исходных данных пользователь должен активизировать хотя бы одну из этих переменных. На рисунке 7.5 приведен пример ввода модуля упругости как функции температуры и деформации.

7.3.4 Построение непространственных полей

Ограничимся здесь рассмотрением лишь зависящих от времени полей, которые часто используются в динамическом анализе для описания изменения во времени нагрузок и граничных условий. Значения при этом можно вводить либо непосредственно в таблицу, либо с помощью PCL-выражений (рисунок 7.6). В последнем случае после нажатия кнопки *Apply* таблица заполняется автоматически.

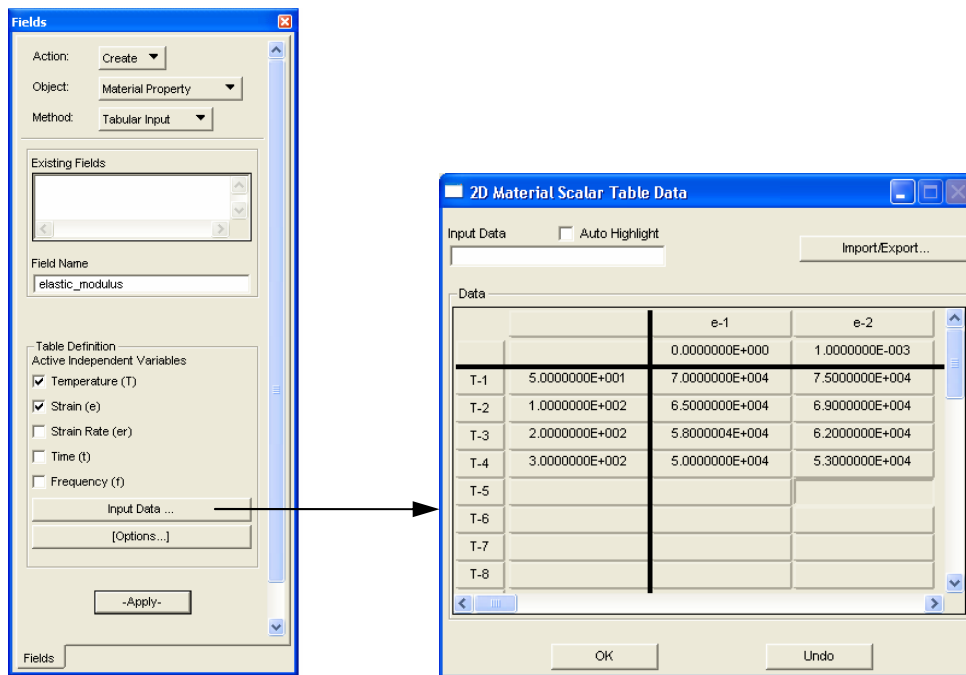


Рисунок 7.5 – Описание зависимости модуля упругости от температуры и деформации

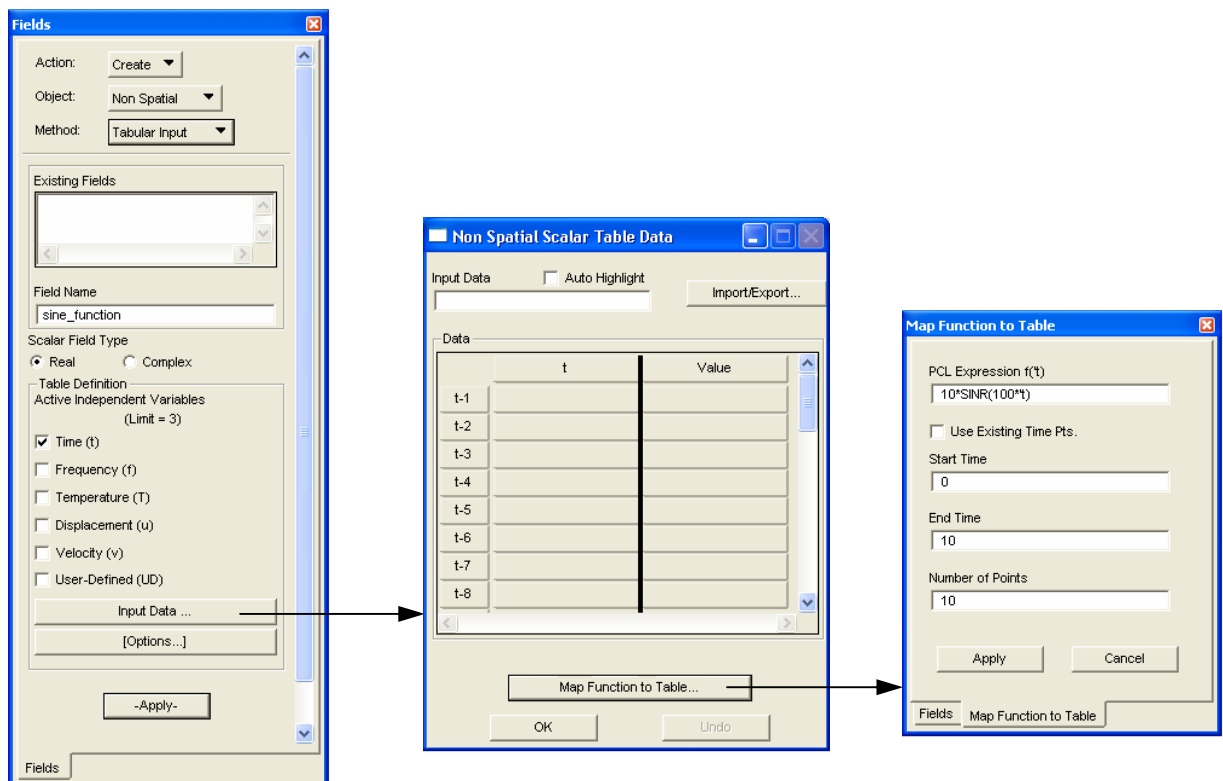


Рисунок 7.6 – Определение зависящего от времени поля

7.3.5 Демонстрация полей

Введенное поле можно для проверки отобразить на экране дисплея в виде двухмерного графика (действие Show). Здесь должна быть выбрана одна независимая переменная, для которой необходимо указать диапазон изменения и число точек на графике (рисунок 7.7).

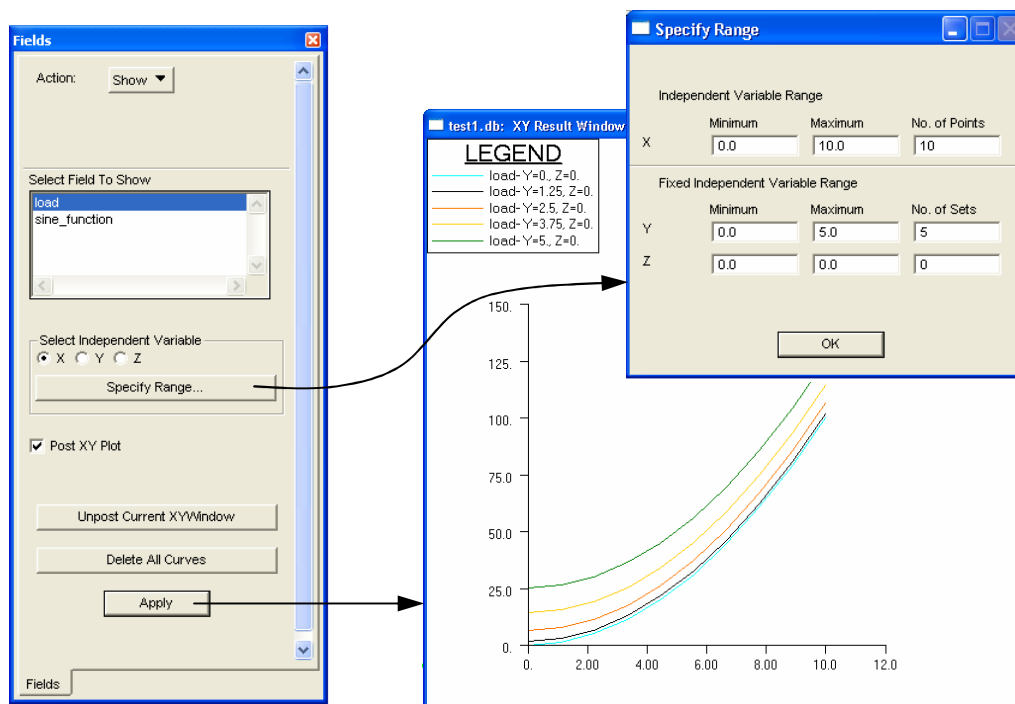


Рисунок 7.7 – Построение двухмерных графиков поля

Для закрытия окна с графиком следует воспользоваться кнопкой *Unpost Current XYWindow*.

Вопросы по теме 7

- 1) Какие объекты могут быть членами группы?
 1. Точки, кривые, поверхности и объемы.
 2. Узлы и конечные элементы.
 3. Нагрузки и граничные условия.
 4. Системы координат.
 5. Поля.
 6. Случаи нагружения.
 7. Результаты расчета.

- 2) Какая группа называется Current?
 1. Группа, в которую помещаются все вновь создаваемые геометрические и конечно-элементные объекты.
 2. Группа, с которой будет выполняться какое-либо действие.
 3. Группа, изображаемая в графическом окне.
 4. Группа, содержащая только геометрические объекты.
 5. Группа, содержащая только конечно-элементные объекты.

- 3) Какая группа называется Target?
 1. Группа, в которую помещаются все вновь создаваемые геометрические и конечно-элементные объекты.
 2. Группа, с которой будет выполняться какое-либо действие.
 3. Группа, изображаемая в графическом окне.
 4. Группа, содержащая только геометрические объекты.
 5. Группа, содержащая только конечно-элементные объекты.

- 4) Какая группа называется Posted?
 1. Группа, в которую помещаются все вновь создаваемые геометрические и конечно-элементные объекты.
 2. Группа, с которой будет выполняться какое-либо действие.
 3. Группа, изображаемая в графическом окне.
 4. Группа, содержащая только геометрические объекты.
 5. Группа, содержащая только конечно-элементные объекты.

- 5) Какая группа создается программой автоматически?
 1. default_group.
 2. new_group.
 3. current_group.
 4. target_group.
 5. posted_group.
 6. created_group.

- 6) Сколько групп можно создать в программе MSC.Patran?

1. Одну.
2. Две.
3. Три.
4. Четыре.
5. Пять.
6. Любое количество.

7) Для чего используются списки в программе MSC.Patran?

1. Для отбора объектов по определенному критерию.
2. Для текстового представления результатов расчета.
3. Для просмотра исходных данных.
4. Для подготовки отчета.

8) Что может использоваться в качестве критерия отбора объектов в список?

1. Атрибуты.
2. Связи с другими объектами.
3. Способы изображения в графическом окне.
4. Случаи нагружения.
5. Типы решения.

9) Сколько постоянных списков можно создать в программе MSC.Patran?

1. Один.
2. Два.
3. Три.
4. Четыре.
5. Пять.
6. Любое количество.

10) Сколько временных списков можно создать в программе MSC.Patran?

1. Один.
2. Два.
3. Три.
4. Четыре.
5. Пять.
6. Любое количество.

11) Какие булевы операции можно выполнять со списками?

1. Пересечение.
2. Сложение.
3. Вычитание.

4. Деление.
5. Расчленение.
6. Склеивание.

12) Для чего используются поля в программе MSC.Patran?

1. Для задания изменения нагрузок и граничных условий.
2. Для задания изменения свойств материалов.
3. Для задания изменения свойств элементов.
4. Для задания изменения координат геометрических объектов.
5. Для задания изменения координат конечно-элементных объектов.

13) Сколько типов полей имеются в программе MSC.Patran?

1. Один.
2. Два.
3. Три.
4. Четыре.
5. Пять.

14) Какие типы полей имеются в программе MSC.Patran?

1. Пространственные.
2. Непространственные.
3. Свойств материалов.
4. Свойств элементов.
5. Зависящие от времени.
6. Двухмерные.
7. Одномерные.

15) В зависимости от каких переменных описывают изменение параметров пространственные поля?

1. Физических координат.
2. Параметрических координат.
3. Результатов анализа.
4. Температуры.
5. Деформации.
6. Скорости деформации.
7. Времени.
8. Частоты.
9. Перемещения.
10. Скорости.

16) В зависимости от каких переменных описывают изменение параметров непространственные поля?

1. Физических координат.

2. Параметрических координат.
3. Результаты анализа.
4. Температуры.
5. Деформации.
6. Скорости деформации.
7. Времени.
8. Частоты.
9. Перемещения.
10. Скорости.

17) В зависимости от каких переменных описывают изменение параметров поля свойств материалов?

1. Физических координат.
2. Параметрических координат.
3. Результаты анализа.
4. Температуры.
5. Деформации.
6. Скорости деформации.
7. Времени.
8. Частоты.
9. Перемещения.
10. Скорости.

18) Какие методы ввода существуют для пространственных полей?

1. PCL Function.
2. Tabular Input.
3. General.
4. FEM.

19) Какие методы ввода существуют для непространственных полей?

1. PCL Function.
2. Tabular Input.
3. General.
4. FEM.

20) Какие методы ввода существуют для полей свойств материалов?

1. PCL Function.
2. Tabular Input.
3. General.
4. FEM.

21) Как выглядит PCL-запись математического выражения $5,3z + 2,5\cos\theta$?

1. $5.3 * 'Z + 2.5 * \text{COSR}('T)$
2. $5.3 * 'Z + 2.5 * \text{COS}('T)$
3. $5.3 * 'Z + 2.5 * \text{COSD}('T)$
4. $5.3 * 'Z' + 2.5 * \text{COSR}('T')$
5. $5.3 * 'Z' + 2.5 * \text{COS}('T')$
6. $5.3 * 'Z' + 2.5 * \text{COSD}('T')$
7. $5.3 * Z + 2.5 * \text{COSR}(T)$
8. $5.3 * Z + 2.5 * \text{COS}(T)$
9. $5.3 * Z + 2.5 * \text{COSD}(T)$

22) Как выглядит PCL-запись математического выражения $0,25\xi_1 - 0,5\xi_2$?

1. $.25 * 'C1 - .5 * 'C2$
2. $0.25 * C1 - 0.5 * C2$
3. $.25 * 'C1' - .5 * 'C2'$
4. $0.25C1 - 0.5C2$
5. $.25 * 'X - .5 * 'Y$
6. $0.25 * X - 0.5 * Y$
7. $.25 * 'X' - .5 * 'Y'$
8. $0.25X - 0.5Y$

23) Как выглядит PCL-запись математического выражения $3,2x^2 + 4,8y^3$?

1. $3.2 * 'X ** 2 + 4.8 * 'Y ** 3$
2. $3.2 * X ** 2 + 4.8 * Y ** 3$
3. $3.2 * 'X' ** 2 + 4.8 * 'Y' ** 3$
4. $3.2 * 'X ^ 2 + 4.8 * 'Y ^ 3$
5. $3.2 * X ^ 2 + 4.8 * Y ^ 3$
6. $3.2 * 'X' ^ 2 + 4.8 * 'Y' ^ 3$
7. $3.2 * X ^ 2 + 4.8 * Y ^ 3$
8. $3.2X ^ 2 + 4.8Y ^ 3$
9. $3.2 * 'X' ^ 2 + 4.8 * 'Y' ^ 3$

24) С помощью какого поля можно описать переменную толщину пластины?

1. Spatial.
2. Non Spatial.
3. Material Properties.
4. Element Properties.
5. Time Dependent.

6. Static.

25) С помощью какого поля можно описать изменение нагрузки во времени?

1. Spatial.
2. Non Spatial.
3. Material Properties.
4. Element Properties.
5. Time Dependent.
6. Static.

26) С помощью какого поля можно описать зависимость модуля упругости от температуры?

1. Spatial.
2. Non Spatial.
3. Material Properties.
4. Element Properties.
5. Time Dependent.
6. Static.

27) Что используется в качестве исходных данных при построении пространственных полей методом FEM?

1. Отображаемые на экране дисплея результаты МКЭ-анализа.
2. Конечно-элементные объекты.
3. Координаты узлов.
4. Связи элементов.
5. Список результатов решения.

28) Для чего используются пространственные поля, построенные методом FEM?

1. Для нанесения результатов одного анализа на другой.
2. Для нанесения данных одной сетки на другую.
3. Для описания изменения нагрузки во времени в динамическом анализе.
4. Для выполнения теплового анализа.
5. Для решения нелинейных задач.

8 НАГРУЗКИ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

8.1 Случаи нагружения

Случаи нагружения используются для объединения в единое целое различных систем нагрузок и граничных условий, одновременно прикладываемых к модели. Программа MSC.Patran для одной модели допускает задание сразу нескольких случаев нагружения, которые могут быть либо статическими (Static), либо зависящими от времени (Time Dependent). Каждый случай нагружения должен иметь свое уникальное имя (не более 31 символа без пробела). По умолчанию определяется лишь один случай нагружения с именем Default, причем статического типа.

Следует отметить, что при линейном статическом анализе определение нескольких случаев нагружения позволяет за одно решение получить результаты для нескольких вариантов нагружения и закрепления конструкции. При нелинейном статическом анализе такой подход обычно используется для задания сложного непропорционального нагружения. Здесь можно сначала приложить одну систему нагрузок, затем другую, выполнить разгрузку и т.д.

Для работы со случаями нагружения используется приложение «Load Cases» (рисунок 8.1), где доступны следующие действия (Action): Create – создать; Show – показать; Modify – модифицировать; Delete – удалить.

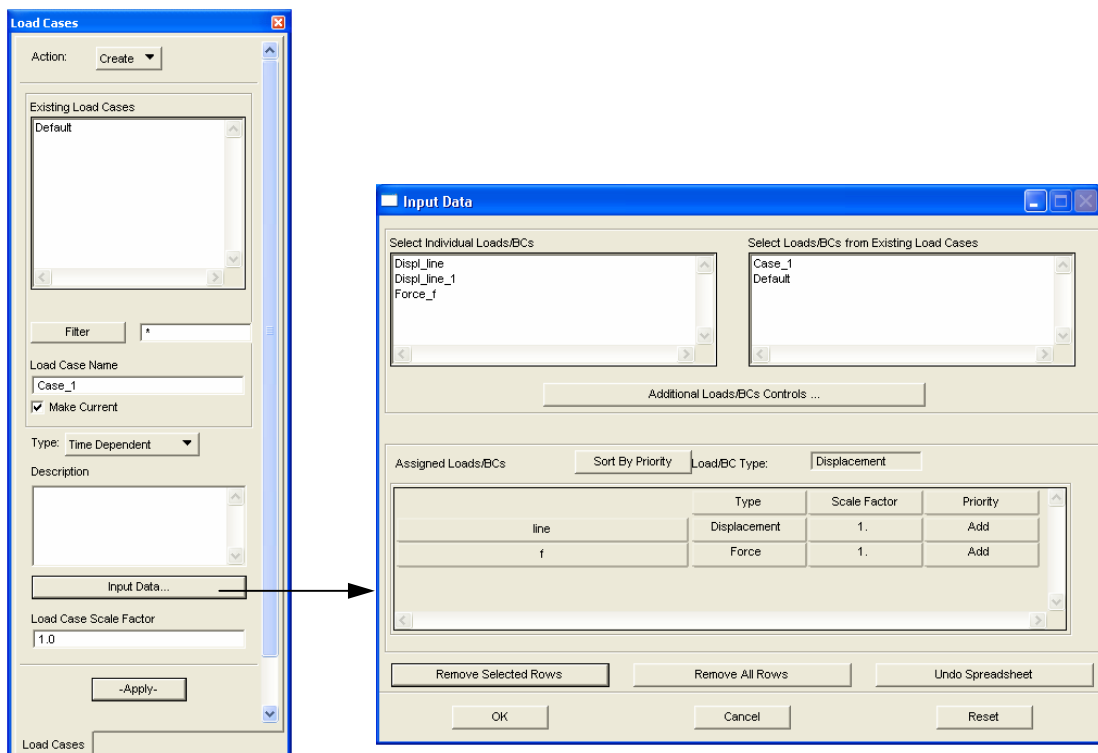


Рисунок 8.1 – Задание случая нагружения

Если установлен флаг «Make Current», задаваемый случай нагружения становится текущим. При этом все вновь вводимые системы нагрузок и граничных условий будут автоматически включаться в него.

С помощью кнопки *Input Data* для определяемого случая нагружения можно назначить существующие системы нагрузок и граничных условий, установить для них приоритеты для разрешения противоречий, возникающих при их приложении к модели, и наконец, ввести для них масштабирующие множители. Приоритетом по умолчанию является сложение (Add), т.е. если для одного и того же объекта задано несколько значений, то они будут складываться.

В поле «Load Case Scale Factor» задается общий масштабирующий множитель для всего случая в целом. При этом окончательное значение масштабирующего коэффициента для каждой системы нагрузок и граничных условий здесь определяется путем умножения коэффициента этой системы на общий множитель.

8.2 Задание нагрузок и граничных условий

Целью большинства решаемых методом конечных элементов задач является определение отклика модели на некоторое внешнее воздействие (например, силы, давления, магнитного поля и т.д.). Эти воздействия называются нагрузками. Кроме того, большинство моделей подчиняются некоторым ограничивающим их поведение условиям (например, в консольном стержне один его конец жестко заземлен). Такие ограничения называются граничными условиями.

В программе MSC.Patran нагрузки и граничные условия объединяются под общим названием «Loads/Boundary Conditions», поскольку в этих понятиях есть много общего. Так, например, приложенное нулевое перемещение представляет собой граничное условие, а ненулевое – является еще и нагрузкой.

Нагрузки и граничные условия зависят от выбранной системы анализа (т.е. решателя). Они могут прикладываться как к геометрии, так и к конечно-элементным объектам. Важно то, что эти данные не связываются напрямую с конечно-элементной моделью. Поэтому одна модель может содержать несколько вариантов нагрузок и граничных условий, прикладываемых в разное время. Такой подход позволяет моделировать поведение модели при разных воздействиях.

Следует отметить, что зависящие от времени нагрузки должны определяться для случаев нагружения, также зависящих от времени. Для нагрузок и граничных условий можно задавать масштабирующие множители. Кроме того, можно импортировать результаты из предыдущего анализа, что удобно при глобально-локальном подходе, а также при использовании результатов теплового анализа в качестве температурной нагрузки для моделей механики деформируемого твердого тела.

Для задания нагрузок и граничных условий применяется приложение «Loads/BCs». Здесь доступны следующие действия (Action): Create – создать; Show Tabular – показать в виде таблицы; Plot Contours – показать на модели в виде многоцветного поля (заливки); Plot Markers – отобразить значки; Modify – модифицировать; Delete – удалить.

При решении задач механики деформируемого твердого тела можно задавать следующие виды нагрузок и граничных условий (Object): Displacement – перемещение; Force – сила; Pressure – давление; Temperature – температура; Inertial Load – инерционная нагрузка; Initial Displacement – начальное перемещение; Initial Velocity – начальная скорость; Velocity – скорость; Acceleration – ускорение; Distributed Load – распределенная нагрузка; Total load – интегральное задание распределенной нагрузки; Contact – контакт.

И наконец, перечислим способы задания нагрузок и граничных условий (Type): Nodal – узловой; Element Uniform – однородный в элементах; Element Variable – переменный в элементах. В первом случае нагрузки и граничные условия связываются с узлами, а в двух других – с конечными элементами.

При задании системы нагрузок или граничных условий (рисунок 8.2) необходимо:

- выбрать вид условия (т.е. объект);
- выбрать подходящий случай нагружения;
- в поле «New Set Name» ввести имя для вновь определяемой системы (не более 31 символа без пробелов);
- если требуется, указать тип целевых элементов (1D – линейные; 2D – поверхностные; 3D – объемные);
- ввести соответствующие данные (кнопка *Input Data*);
- выбрать область приложения (кнопка *Select Application Region*);

- для завершения ввода нажать кнопку *-Apply-*, после чего (если нет каких-либо ошибок ввода данных) новая система нагрузок или граничных условий должна появиться в списке существующих систем «Existing Sets».

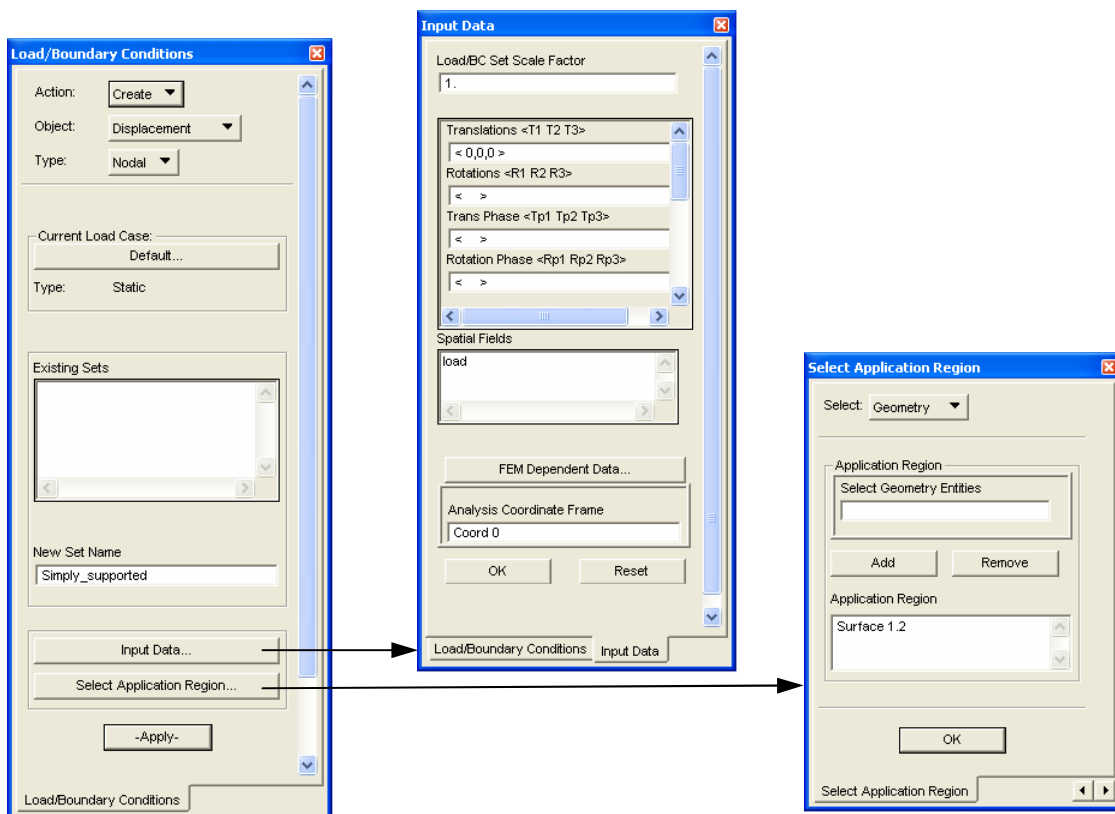


Рисунок 8.2 – Задание граничных условий

Следует отметить, что при задании граничных условий (перемещений) для поступательных перемещений (Translations) и углов поворота (Rotations) используется следующий синтаксис:

- нет значения = свободное перемещение
- 0 = закрепленная степень свободы
- отличное от нуля число = заданное значение перемещения

Например, запись $\langle 0,.,0 \rangle$ в поле ввода «Translations» означает, что $u_x = u_z = 0$, а u_y – свободно.

При отображении на экране дисплея закреплений (или заданных перемещений) для поступательных перемещений используется одинарная пространственная стрелка, а для углов поворота – двойная.

Как отмечалось ранее, нагрузки и граничные условия можно прикладывать к конечно-элементной модели (FEM) или к геометрическим объектам (Geometry). В последнем случае программа MSC.Patran автоматически свя-

зывает заданные условия нагружения и закрепления с соответствующими узлами и элементами. Поле ввода «Select Geometry Entities» и кнопка *Add* диалоговой панели «Select Application Region» используются для выбора различных областей приложения на модели.

Рассмотрим подробнее задание граничных условий симметрии. Здесь для узлов, расположенных в плоскостях симметрии, необходимо закрепить поступательное перемещение в направлении, перпендикулярном этой плоскости, и два угла поворота относительно осей, параллельных данной плоскости. На рисунок 8.3 представлен пример задания (в прямоугольной и цилиндрической системах координат) условий симметрии по границам моделируемой части цилиндрической оболочки.

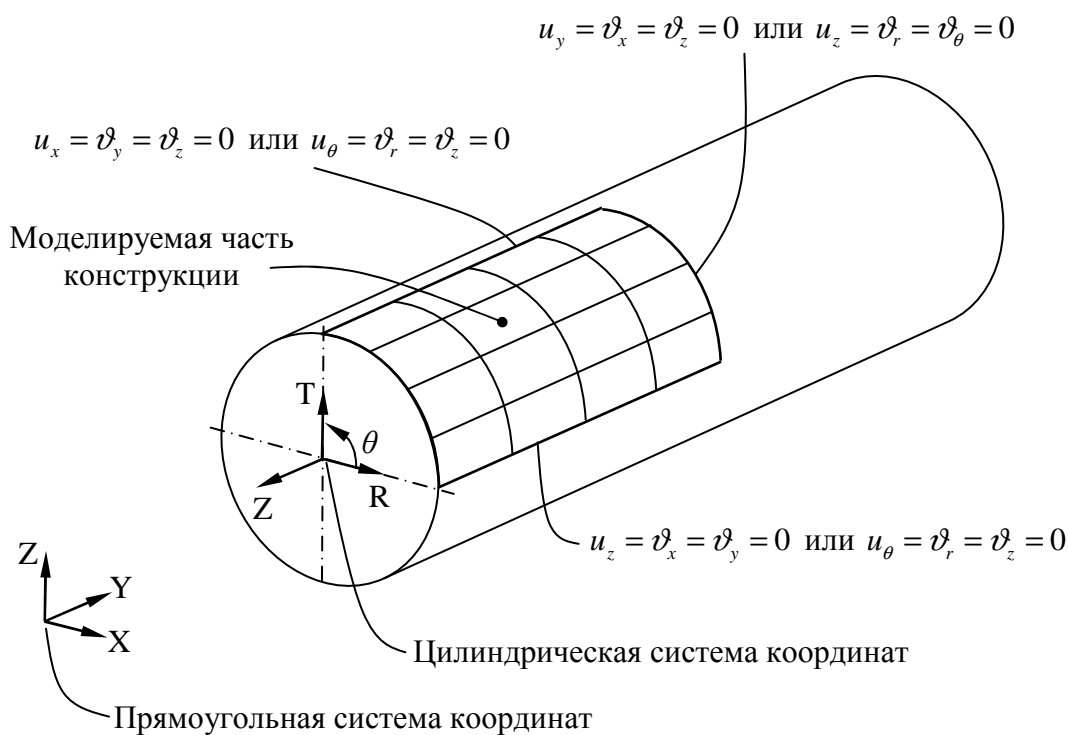


Рисунок 8.3 – Задание граничных условий симметрии

Отметим, что нагрузки и граничные условия всегда интерпретируются относительно системы координат, используемой для анализа (Analysis Coordinate Frame).

Рассмотрим теперь случай задания нагрузки в виде неравномерного давления, определяемого с помощью пространственного поля. Пусть давление изменяется в окружном направлении по закону косинуса $0,2 \cos \theta$. Прежде всего, здесь необходимо определить цилиндрическую систему координат.

Затем в этой системе координат следует задать скалярное пространственное поле, используя метод PCL-функций:

$$0.2 * \text{COSR}('T).$$

Назовем данное поле, например, `cosine_variation`. После этого можно вводить нагрузку, для чего следует выбрать приложение «Loads/BCs». Пример ввода данных представлен на рисунке 8.4.

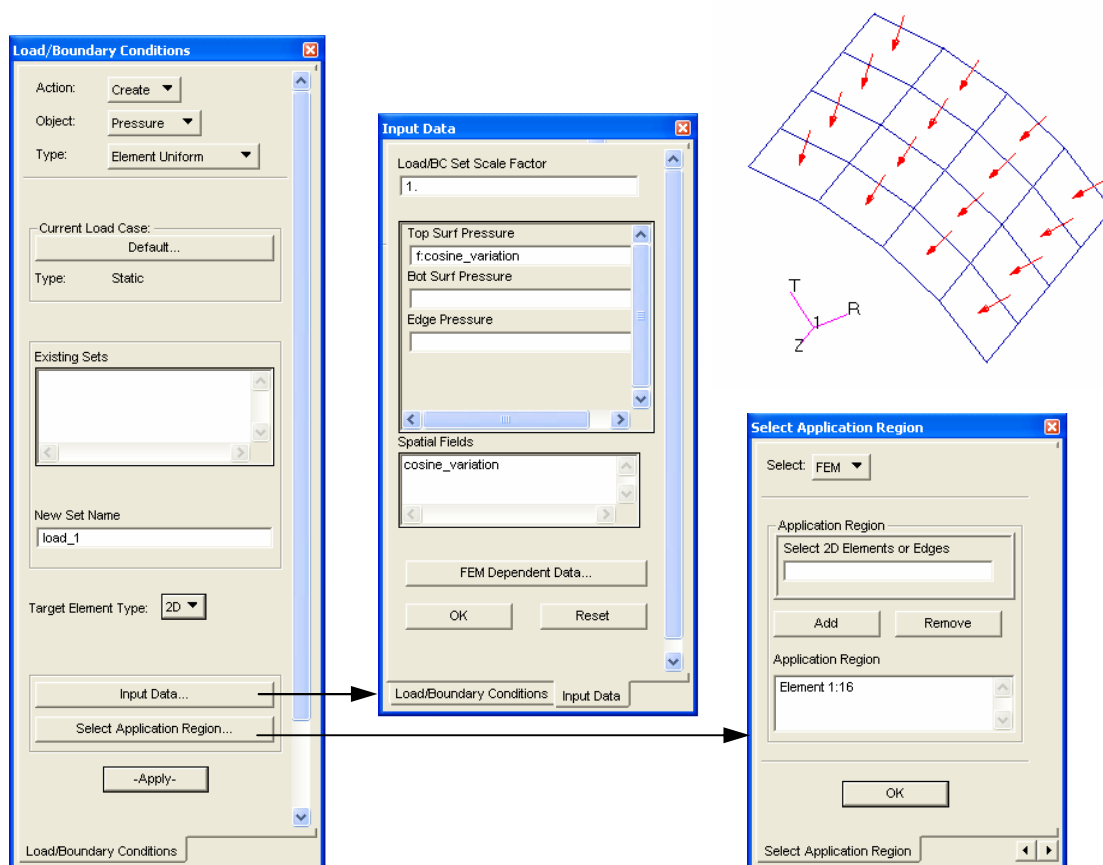


Рисунок 8.4 – Задание неравномерного давления

В заключение рассмотрим пример задания зависящей от времени нагрузки. Пусть давление изменяется во времени по закону синуса (рисунок 8.5). В этом случае план действий следующий:

- 1) создать зависящее от времени поле. Напомним, что это частный случай непространственного поля. Назовем его, например, `sine_function`;
- 2) определить зависящий от времени случай нагружения. Для этих целей используется приложение «Load Cases»:

«Action»: Create

«Load Case Name»: `time_vary`

«Type»: Time Dependent

3) задать нагрузку. Запускаем приложение «Loads/BCs» и вводим данные согласно рисунку 8.6.

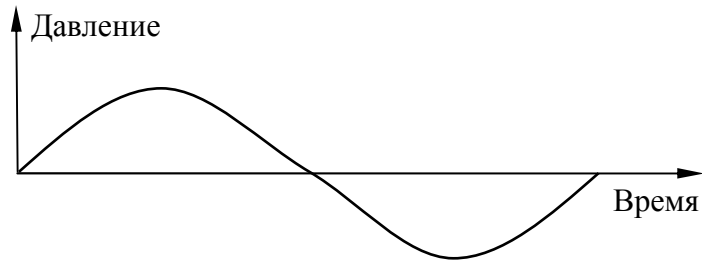


Рисунок 8.5 – Изменение давления во времени

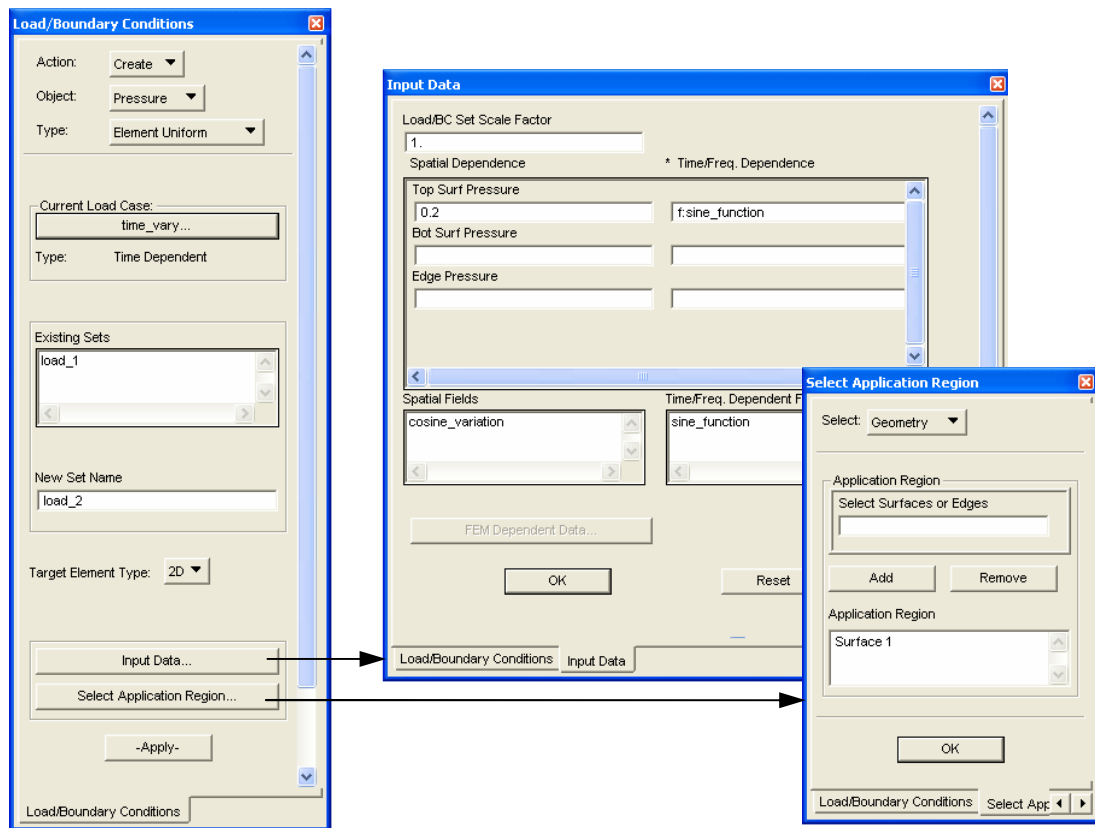


Рисунок 8.6 – Задание зависящей от времени нагрузки

В этом случае диалоговая панель для ввода данных «Input Data» будет содержать два столбца, причем первый — предназначен для описания изменения нагрузки в пространстве, а второй — во времени.

Вопросы по теме 8

1) Для чего используются случаи нагружения в программе MSC.Patran?

1. Для объединения различных систем нагрузок и граничных условий, одновременно прикладываемых к модели.
2. Для ввода нагрузок.
3. Для задания граничных условий.
4. Для выбора различных областей приложения нагрузок и граничных условий.

2) Какие типы случаев нагружения имеются в программе MSC.Patran?

1. Static.
2. Time Dependent.
3. Time Independent.
4. Dynamic.
5. Transient.
6. Nonlinear.

3) Что позволяет определение нескольких случаев нагружения при линейном статическом анализе?

1. За одно решение получить результаты для нескольких вариантов нагружения и закрепления конструкции.
2. Моделировать сложное непропорциональное нагружение.
3. Одновременно прикладывать различные системы нагрузок и граничных условий.
4. Задавать приоритеты.

4) Что позволяет определение нескольких случаев нагружения при нелинейном статическом анализе?

1. За одно решение получить результаты для нескольких вариантов нагружения и закрепления конструкции.
2. Моделировать сложное непропорциональное нагружение.
3. Одновременно прикладывать различные системы нагрузок и граничных условий.
4. Задавать приоритеты.

5) Для чего назначаются приоритеты при определении случаев нагружения?

1. Для разрешения противоречий, возникающих при одновременном приложении к модели различных систем нагрузок и граничных условий.

2. Для задания последовательности приложения нагрузок и граничных условий.
 3. Для моделирования сложного непропорционального нагружения.
 4. Для задания последовательности получения решений.
- 6) Какое приложение используется для задания случаев нагружения?
1. Geometry.
 2. Elements.
 3. Loads/BCs.
 4. Properties.
 5. Load Cases.
 6. Fields.
 7. Analysis.
- 7) Какое приложение используется для задания нагрузок?
1. Geometry.
 2. Elements.
 3. Loads/BCs.
 4. Properties.
 5. Load Cases.
 6. Fields.
 7. Analysis.
- 8) Какое приложение используется для задания граничных условий?
1. Geometry.
 2. Elements.
 3. Loads/BCs.
 4. Properties.
 5. Load Cases.
 6. Fields.
 7. Analysis.
- 9) Для случаев нагружения какого типа следует определять зависящие от времени нагрузки?
1. Static.
 2. Time Dependent.
 3. Time Independent.
 4. Dynamic.
 5. Transient.
 6. Nonlinear.
- 10) Что следует выбрать в качестве объекта при задании граничных условий?

1. Displacement.
2. Force.
3. Temperature.
4. Inertial Load.
5. Initial Displacement.
6. Initial Velocity.

11) Закреплению какой степени свободы соответствует запись $\langle 0, \rangle$ в поле ввода «Translations»?

1. Перемещения вдоль оси X.
2. Перемещения вдоль оси Y.
3. Перемещения вдоль оси Z.
4. Угла поворота относительно оси X.
5. Угла поворота относительно оси Y.
6. Угла поворота относительно оси Z.

12) Закреплению какой степени свободы соответствует запись $\langle , 0 \rangle$ в поле ввода «Translations»?

1. Перемещения вдоль оси X.
2. Перемещения вдоль оси Y.
3. Перемещения вдоль оси Z.
4. Угла поворота относительно оси X.
5. Угла поворота относительно оси Y.
6. Угла поворота относительно оси Z.

13) Закреплению какой степени свободы соответствует запись $\langle , , 0 \rangle$ в поле ввода «Translations»?

1. Перемещения вдоль оси X.
2. Перемещения вдоль оси Y.
3. Перемещения вдоль оси Z.
4. Угла поворота относительно оси X.
5. Угла поворота относительно оси Y.
6. Угла поворота относительно оси Z.

14) Закреплению какой степени свободы соответствует запись $\langle 0, \rangle$ в поле ввода «Rotations»?

1. Перемещения вдоль оси X.
2. Перемещения вдоль оси Y.
3. Перемещения вдоль оси Z.
4. Угла поворота относительно оси X.
5. Угла поворота относительно оси Y.
6. Угла поворота относительно оси Z.

15) Закреплению какой степени свободы соответствует запись $\langle \cdot, 0 \rangle$ в поле ввода «Rotations»?

1. Перемещения вдоль оси X.
2. Перемещения вдоль оси Y.
3. Перемещения вдоль оси Z.
4. Угла поворота относительно оси X.
5. Угла поворота относительно оси Y.
6. Угла поворота относительно оси Z.

16) Закреплению какой степени свободы соответствует запись $\langle \cdot, \cdot, 0 \rangle$ в поле ввода «Rotations»?

1. Перемещения вдоль оси X.
2. Перемещения вдоль оси Y.
3. Перемещения вдоль оси Z.
4. Угла поворота относительно оси X.
5. Угла поворота относительно оси Y.
6. Угла поворота относительно оси Z.

17) Какие перемещения следует закрепить для узлов, расположенных в плоскости симметрии, перпендикулярной оси X?

1. Перемещение вдоль оси X.
2. Перемещение вдоль оси Y.
3. Перемещение вдоль оси Z.
4. Угол поворота относительно оси X.
5. Угол поворота относительно оси Y.
6. Угол поворота относительно оси Z.

18) Какие перемещения следует закрепить для узлов, расположенных в плоскости симметрии, перпендикулярной оси Y?

1. Перемещение вдоль оси X.
2. Перемещение вдоль оси Y.
3. Перемещение вдоль оси Z.
4. Угол поворота относительно оси X.
5. Угол поворота относительно оси Y.
6. Угол поворота относительно оси Z.

19) Какие перемещения следует закрепить для узлов, расположенных в плоскости симметрии, перпендикулярной оси Z?

1. Перемещение вдоль оси X.
2. Перемещение вдоль оси Y.
3. Перемещение вдоль оси Z.
4. Угол поворота относительно оси X.

5. Угол поворота относительно оси Y .
6. Угол поворота относительно оси Z .

20) Какие перемещения следует закрепить для узлов, расположенных в плоскости симметрии, параллельной координатной плоскости XY ?

1. Перемещение вдоль оси X .
2. Перемещение вдоль оси Y .
3. Перемещение вдоль оси Z .
4. Угол поворота относительно оси X .
5. Угол поворота относительно оси Y .
6. Угол поворота относительно оси Z .

21) Какие перемещения следует закрепить для узлов, расположенных в плоскости симметрии, параллельной координатной плоскости YZ ?

1. Перемещение вдоль оси X .
2. Перемещение вдоль оси Y .
3. Перемещение вдоль оси Z .
4. Угол поворота относительно оси X .
5. Угол поворота относительно оси Y .
6. Угол поворота относительно оси Z .

22) Какие перемещения следует закрепить для узлов, расположенных в плоскости симметрии, параллельной координатной плоскости ZX ?

1. Перемещение вдоль оси X .
2. Перемещение вдоль оси Y .
3. Перемещение вдоль оси Z .
4. Угол поворота относительно оси X .
5. Угол поворота относительно оси Y .
6. Угол поворота относительно оси Z .

23) Относительно какой системы координат интерпретируются нагрузки?

1. Системы координат для анализа.
2. Базовой системы координат.
3. Глобальной декартовой системы координат.
4. Системы координат элемента.
5. Локальной системы координат.
6. Параметрической системы координат.

24) Относительно какой системы координат интерпретируются граничные условия?

1. Системы координат для анализа.

2. Базовой системы координат.
3. Глобальной декартовой системы координат.
4. Системы координат элемента.
5. Локальной системы координат.
6. Параметрической системы координат.

25) Какое следует использовать поле для задания нагрузки в виде неравномерного давления?

1. Скалярное пространственное.
2. Векторное пространственное.
3. Скалярное непространственное.
4. Векторное непространственное.

26) Какое следует использовать поле для задания неравномерной температурной нагрузки?

1. Скалярное пространственное.
2. Векторное пространственное.
3. Скалярное непространственное.
4. Векторное непространственное.

27) Для чего используется диалоговая панель «Select Application Region»?

1. Для выбора областей приложения нагрузок.
2. Для выбора областей приложения граничных условий.
3. Для выбора подходящего случая нагружения.
4. Для ввода нагрузок.
5. Для ввода граничных условий.

9 СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ

9.1 Построение моделей материалов

В программе MSC.Patran каждая модель материала, содержащая отдельные свойства, имеет свое уникальное имя (не более 31 символа без пробелов). При этом она может содержать несколько моделей состояния (constitutive), т.е. свойства упругости, пластичности и ползучести объединяются в одной модели материала под одним именем.

Следует отметить, что требуемые свойства материала зависят от типа проводимого анализа и выбранной системы анализа (т.е. решателя).

Напомним, что свойства материала могут определяться как функции температуры, деформации, скорости деформации, времени и/или частоты. Для этих целей используются соответствующие поля (приложение «Fields»).

Перечислим поддерживаемые программой MSC.Patran типы однородных упругих материалов:

- Isotropic – изотропный материал (требуются две независимые упругие постоянные, полностью характеризующие его свойства, например, E и μ);
- 2d Orthotropic – двухмерный ортотропный материал (шесть упругих постоянных);
- 3d Orthotropic – трехмерный ортотропный материал (девять упругих постоянных);
- 2d Anisotropic – двухмерный анизотропный материал (шесть упругих постоянных);
- 3d Anisotropic – трехмерный анизотропный материал (21 упругая постоянная).

Кроме того, располагая моделями однородных материалов, можно с их помощью строить различные модели неоднородных композиционных материалов. При этом имеются несколько методов задания композитов (Composites):

- Laminate – слоистый композит с определенной структурой последовательности укладки слоев;
- Rule of Mixtures – определение характеристик произвольного (многофазного) композита с использованием правила смесей, согласно которому вклад компонента пропорционален его объемной доле;

- Halpin-Tsai – пять моделей двухфазных композитов Халпина-Цая;
- Short Fiber (1D или 2D) – модели композита со случайным распределением коротких волокон в одном или двух направлениях.

Для задания свойств материалов используется приложение «Materials». На рисунке 9.1 представлен ручной ввод (Manual Input) характеристик однородного изотропного материала, которому назначается имя steel.

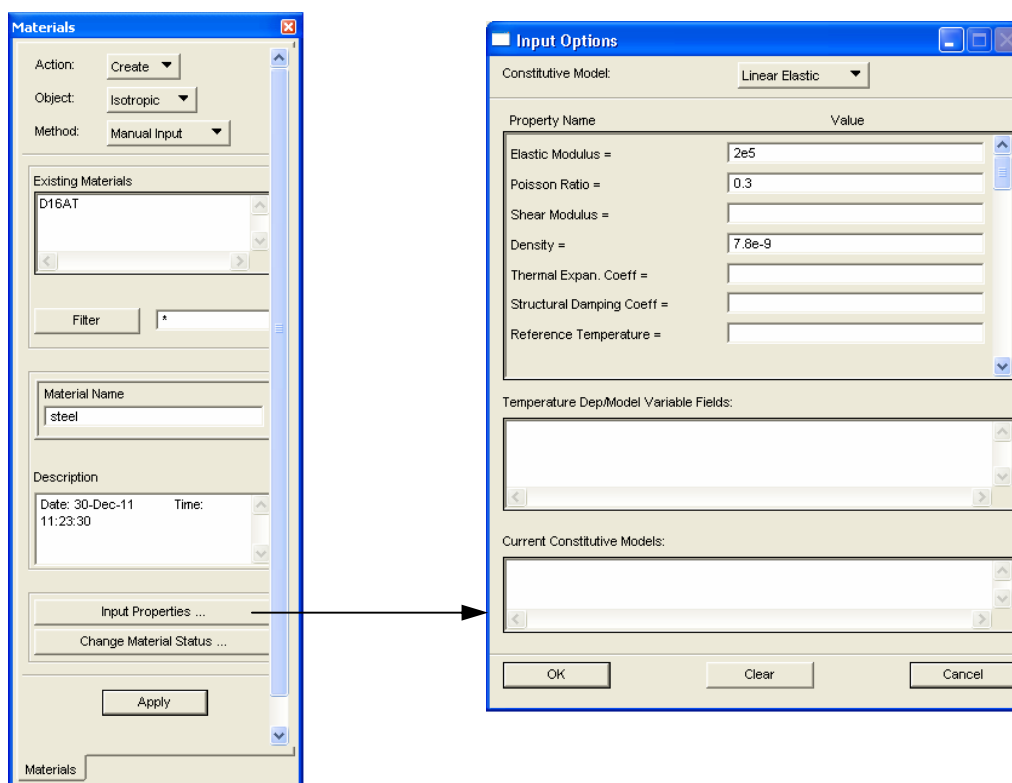


Рисунок 9.1 – Ввод свойств упругого материала

При вводе свойств материала (кнопка *Input Properties*), прежде всего, необходимо в раскрывающемся меню «Constitutive Model» выбрать соответствующую модель состояния: Linear Elastic – линейно-упругая; Non-Linear Elastic – нелинейно-упругая; Elastoplastic – упругопластическая; Creep – ползучесть. От этого зависит вид диалоговой панели «Input Options». Если область ввода значения некоторого свойства материала допускает использования полей, то внизу появляется список введенных ранее полей свойств материалов, из которого можно выбрать нужное поле.

Как видно (см. рисунок 9.1), для линейно-упругого изотропного материала имеются три области ввода упругих постоянных: Elastic Modulus – модуль упругости E ; Poisson Ratio – коэффициент Пуассона μ ; Shear Modulus –

модуль сдвига G . Однако независимыми здесь являются только две величины, поскольку они связаны соотношением

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}.$$

Поэтому вводить следует только два значения: E и μ , E и G или μ и G .

Отметим, что вновь созданная модель состояния материала по умолчанию становится активной. Однако любую модель состояния можно отключить или снова сделать активной. Для этих целей применяется кнопка *Change Material Status*.

В качестве примера рассмотрим ввод изотропного упругопластического материала со следующими характеристиками (рисунок 9.2): $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$; предел текучести $\sigma_T = 480$ МПа; касательный модуль (или модуль упрочнения) $E_T = 4 \cdot 10^3$ МПа.

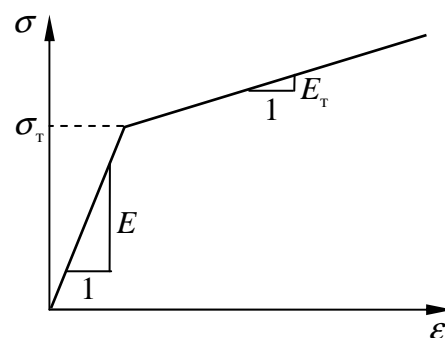


Рисунок 9.2 – Билинейная диаграмма деформирования

Отметим, что модуль пластичности H (Hardening Slope), определяемый тангенсом угла наклона зависимости $\sigma - \epsilon_p$ (где ϵ_p – пластическая деформация), связан с E_T соотношением

$$H = \frac{E_T}{1 - \frac{E_T}{E}} = 4,08 \cdot 10^3 \text{ МПа.}$$

Для ввода свойств материала здесь необходимо выполнить следующие шаги:

- 1) задать имя материала (например, steel);
- 2) выбрать линейно-упругую модель состояния (Linear Elastic). Отметим, что этот и следующие два шага являются обязательными, несмотря на то, что в конечном итоге нам требуется задать упругопластический материал;
- 3) ввести упругие свойства (E и μ) и нажать *OK*;
- 4) для завершения ввода линейно-упругой модели состояния нажать кнопку *Apply*;
- 5) выбрать упругопластическую модель состояния (Elastoplastic);
- 6) ввести свойства, определяющие нелинейную часть кривой $\sigma - \epsilon$ (H и σ_T), как показано на рисунке 9.3, *OK*;

7) завершить ввод упругопластической модели состоянием нажатием кнопки *Apply*.

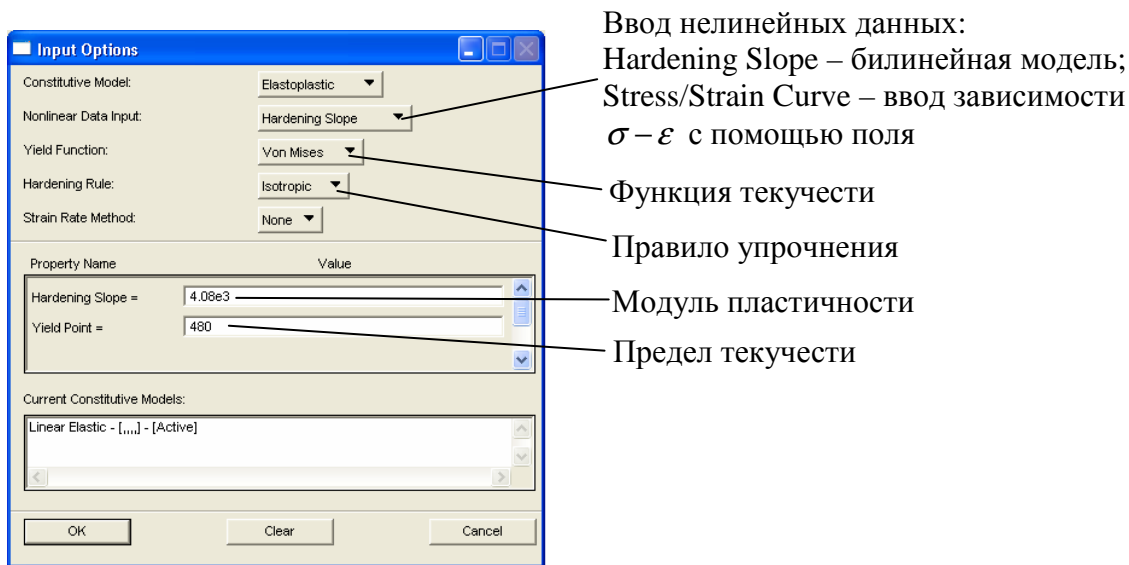


Рисунок 9.3 – Ввод пластических свойств

Рассмотрим далее порядок действий для построения модели композиционного материала. Пусть, например, требуется задать 5-слойный композит (рисунок 9.4) со следующими характеристиками:

– свойства материала слоя

$$E_{11} = 16 \cdot 10^4 \text{ МПа}; E_{22} = 7 \cdot 10^3 \text{ МПа};$$

$$\mu_{12} = 0,25; G_{12} = G_{13} = 4,7 \cdot 10^3 \text{ МПа};$$

$$G_{23} = 4 \cdot 10^3 \text{ МПа};$$

– толщины слоев (мм)

$$0,1 / 0,125 / 0,1 / 0,125 / 0,1;$$

– углы ориентации слоев (град)

$$0 / 90 / 0 / 90 / 0.$$

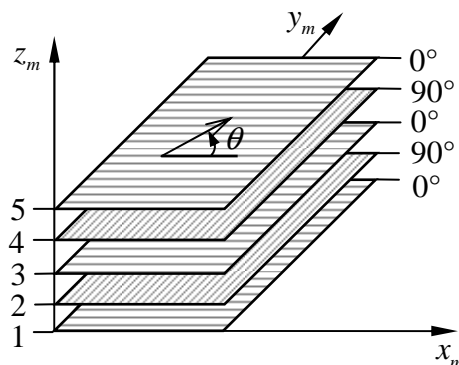


Рисунок 9.4 – Структура укладки слоев

Основные шаги здесь представлены на рисунках 9.5 и 9.6.

При формировании модели неоднородного слоистого композита обычно считается, что он состоит из квазиоднородных слоев, свойства которых известны. Поэтому предварительно требуется определить однородный (как правило, ортотропный) материал для каждого слоя, входящего в пакет.

Следует также напомнить, что в программе MSC.Nastran угол ориентации слоя θ отсчитывается от оси x_m системы координат материала.

1. Построение модели материала слоя (двухмерного ортотропного)

2. Ввод свойств двухмерного ортотропного материала

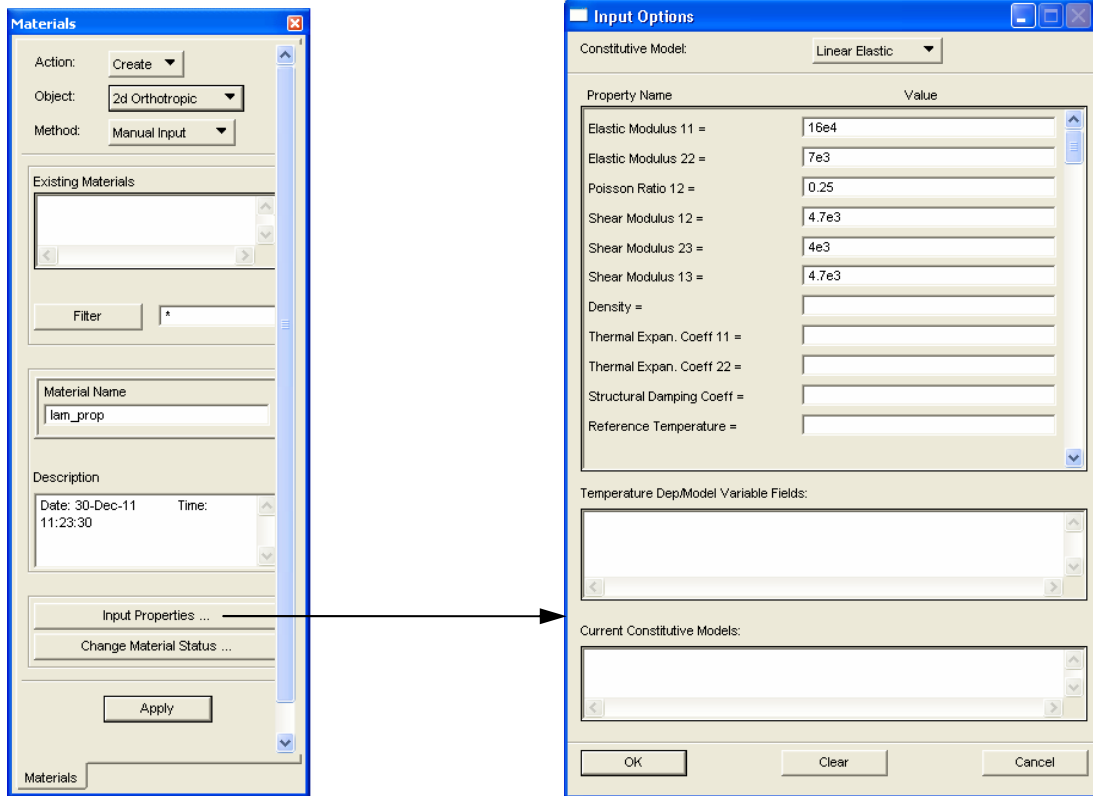


Рисунок 9.5 – Предварительное определение однородного материала

3. Построение модели композиционного материала

4. Определение материала, толщины и ориентации каждого из слоев пакета

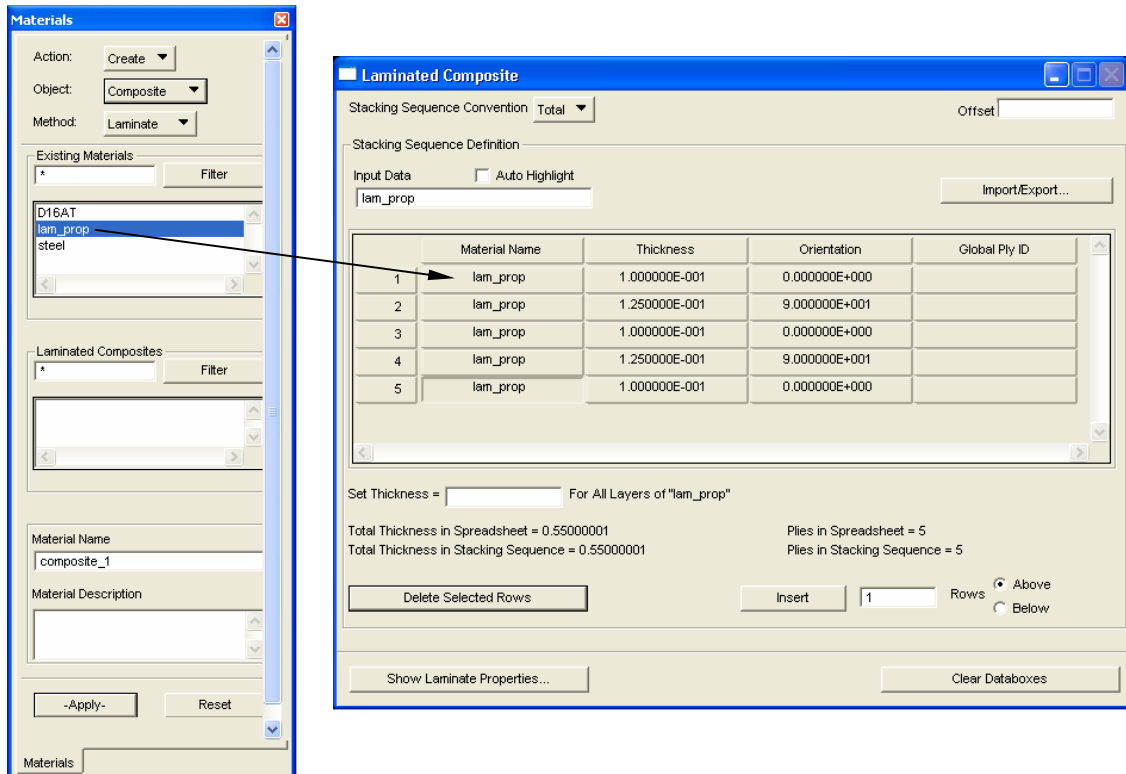


Рисунок 9.6 – Формирование неоднородного слоистого материала

В заключение отметим, что кроме ручного ввода свойств материалов программа MSC.Patran позволяет выбирать нужные материалы из банков данных MSC.Mvision. Для этих целей используется метод Material Selector. Кроме того, с помощью метода Externally Defined (внешне определенный) можно задавать материал, указав лишь его имя. При этом предполагается, что свойства материала будут определены в другой программе. При вводе физических свойств конечных элементов на такой материал можно ссылаться, как на любой другой с заданными характеристиками.

9.2 Задание свойств элементов

Для задания свойств конечных элементов используется приложение «Properties». Здесь можно определить тип элемента, его формулировку, геометрические характеристики поперечного сечения, материал, неконструкционную массу и т.п. При этом свойства элементов могут изменяться в пространстве. Данные изменения описываются с помощью пространственных полей. Свойства могут быть связаны как с геометрическими объектами (Geometry), так и с конечно-элементной моделью (FEM). При этом если свойства связаны с геометрией, то при изменении сетки они будут прикладываться к новым элементам.

Следует отметить, что форма ввода свойств зависит от выбранной системы анализа и типа конечного элемента.

При задании свойств элементов необходимо:

1) выбрать мерность элемента:

- 0D – точечные;
- 1D – линейные;
- 2D – поверхностные;
- 3D – объемные;

2) задать тип элемента:

- 0D: Mass – сосредоточенная масса; Grounded Spring – опора в виде пружины; Grounded Damper – опора в виде вязкого демпфера;
- 1D: Beam – балка; Rod – стержень; Spring – пружина; Damper – вязкий демпфер; Gap – зазор; 1D Mass – погонная масса;
- 2D: Shell – оболочка; Bending Panel – изгибная панель; 2D Solid – двухмерное тело; Membrane – мембрана; Shear Panel – сдвиговая панель;
- 3D: Solid – трехмерное тело;

- 3) ввести имя набора свойств;
 - 4) если требуется, изменить установленные по умолчанию опции элемента. Так, например, для элемента оболочки имеются две основные опции. Первая определяет тип сечения: Homogeneous – однородное; Laminate – слоистое; Equivalent Section – эквивалентное сечение (позволяющее задавать независимо друг от друга мембранную, изгибную и сдвиговую жесткости). Вторая позволяет выбрать формулировку: Standard Formulation – стандартная формулировка; Revised Formulation – уточненная формулировка (добавлена фиктивная жесткость в направлении вращения нормали вокруг своей оси); P-Formulation – p-формулировка;
 - 5) ввести свойства (кнопка *Input Properties*);
 - 6) выбрать область приложения (кнопка *Select Application Region*).
- Здесь для выбора между геометрическими и конечно-элементными объектами следует воспользоваться пиктографическим меню выбора, которое появляется автоматически рядом с панелью приложения.

Пример задания свойств элементов оболочки приведен на рисунке 9.7.

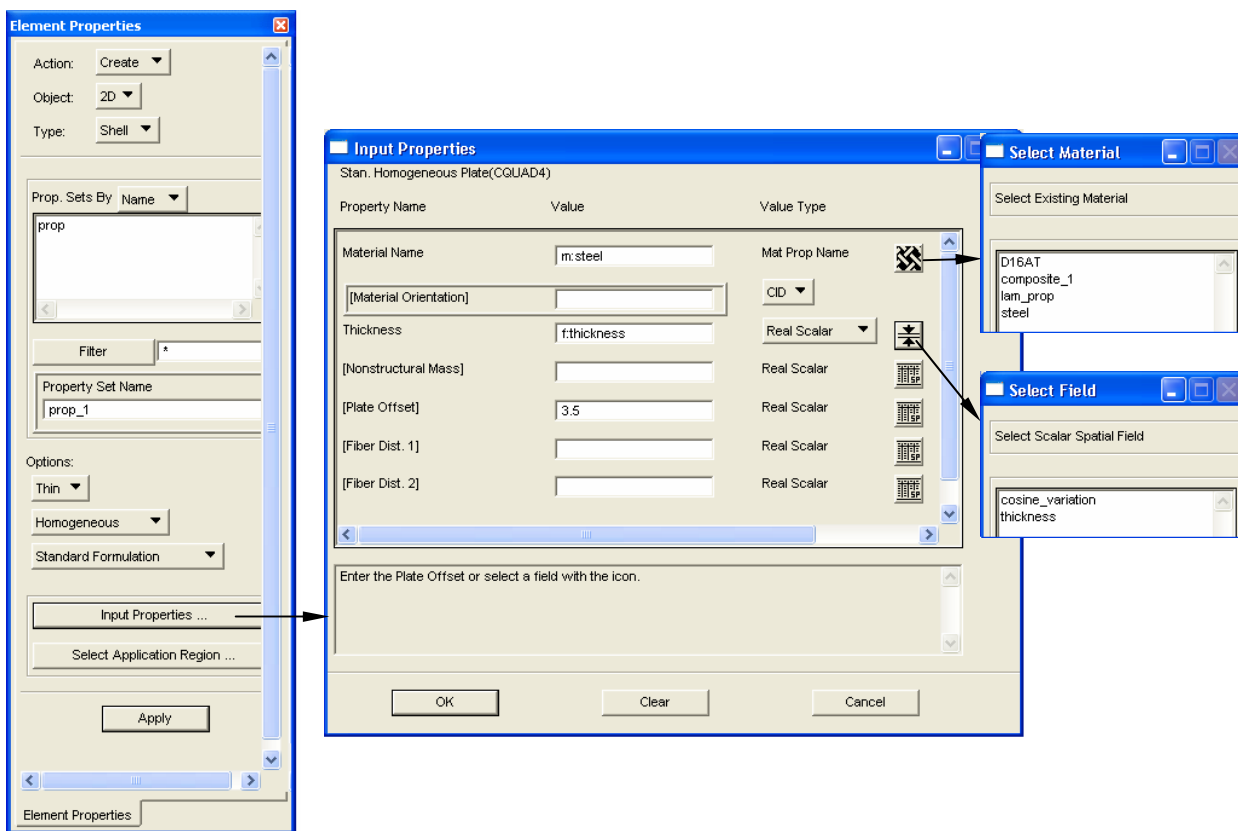




Рисунок 9.7 – Ввод свойств оболочечных элементов

В диалоговой панели «Input Properties» необязательные свойства (которые не всегда требуются, и их можно не вводить) указаны в квадратных скобках. Материал здесь можно выбрать из списка существующих моделей материалов, который появляется при нажатии расположенной справа кнопки  (к имени материала добавляется префикс m:). Если для описания изменения толщины оболочки используется пространственное поле, то его также можно выбрать из списка введенных ранее полей, отображаемого на экране с помощью кнопки  (к имени поля добавляется префикс f:).

Следует отметить, что наиболее сложными с точки зрения задания свойств являются балочные элементы. Основные трудности здесь возникают при вычислении геометрических характеристик поперечного сечения. Для облегчения данной задачи в программе MSC.Patran имеется так называемая библиотека балок, запускаемая из полосы меню командой *Tools>Beam Library* (рисунок 9.8).

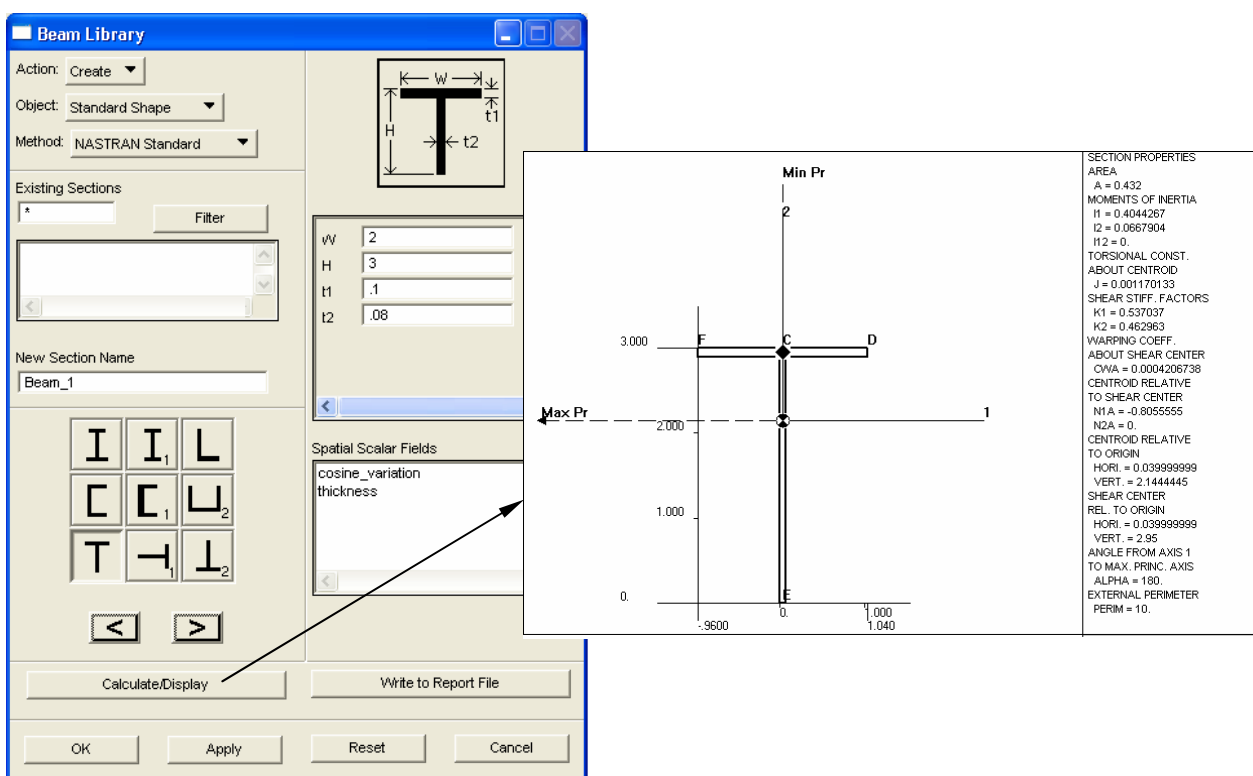


Рисунок 9.8 – Библиотека балок

При использовании данного инструмента достаточно выбрать стандартную форму поперечного сечения и задать необходимые размеры или по точкам построить свое произвольное сечение (которое может быть многосвя-

занным). При этом программа MSC.Patran вычислит все геометрические характеристики, требуемые для конкретной системы анализа.

Следует отметить, что при использовании в качестве решателя программы MSC.Nastran ось 1 сечения соответствует оси z_e системы координат балочного элемента, а ось 2 – y_e . Таким образом, вектор ориентации \vec{v} здесь определяет направление оси 2 поперечного сечения. Буквами C, D, E и F (см. рисунок 9.8) обозначены точки сечения, в которых будут вычисляться напряжения.

Пример задания свойств балочных элементов приведен на рисунке 9.9.

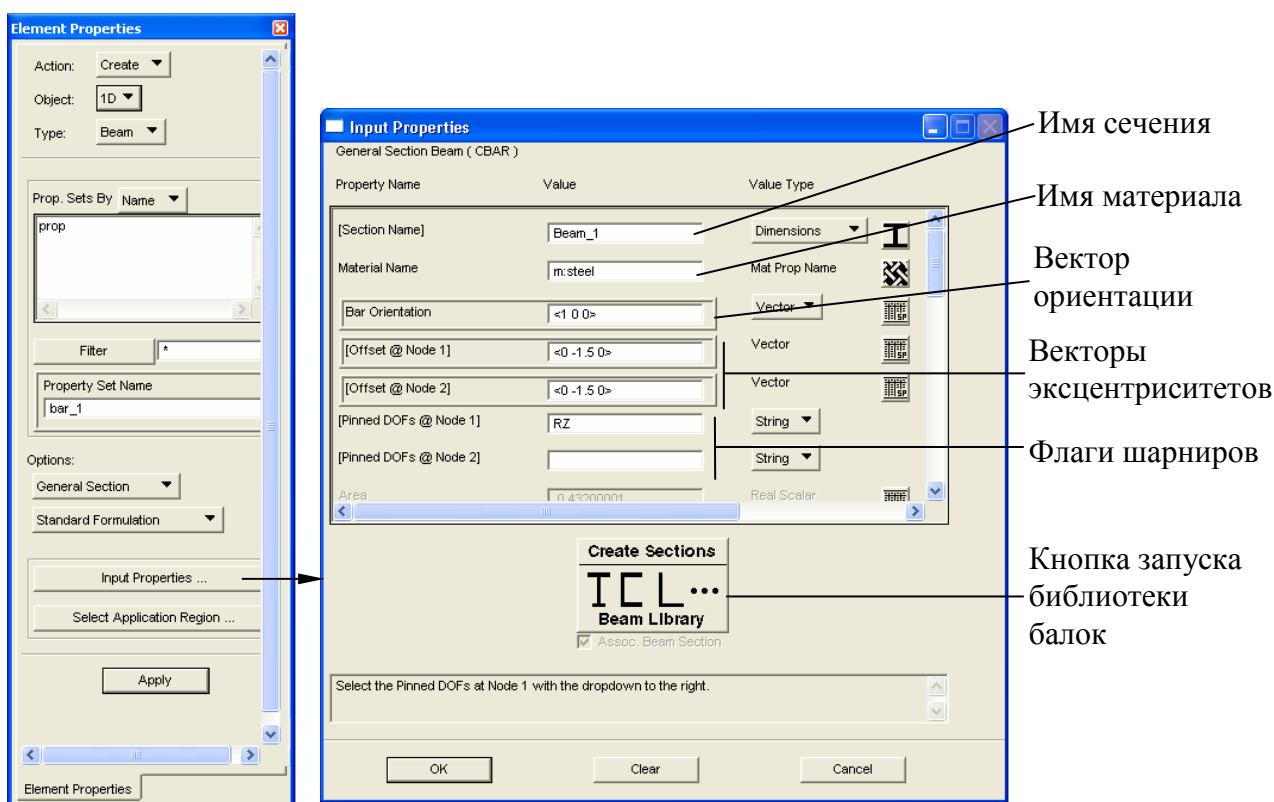


Рисунок 9.9 – Ввод свойств балочных элементов

По умолчанию компоненты векторов ориентации и эксцентриситетов задаются в глобальной декартовой системе координат. Однако с помощью записи $\langle v1 v2 v3 Coord n \rangle$ можно использовать любую локальную систему координат (где n – ее номер). Флаги шарниров всегда определяются в системе координат элемента.

Следует отметить, что доступ к библиотеке балок здесь возможен непосредственно из диалоговой панели «Input Properties».

Проверить правильность задания ориентации балочных элементов и эксцентриситетов в том случае, когда для определения поперечного сечения использовалась библиотека балок, можно с помощью команды полосы меню *Display>Load/BC/Elem. Props*, выбирая для изображения балочных элементов (Beam Display) опцию «3D: FullSpan+Offsets».

В заключение отметим, что после ввода свойств конечных элементов можно с помощью команды полосы меню *Tools>Mass Properties* вывести на экран дисплея массовые характеристики как для всей конструкции, так и для ее части, помещенной в отдельную группу. Здесь показываются общая масса, объем, центр тяжести, главные и центральные оси инерции и т.д.

Вопросы по теме 9

- 1) Какой материал называется однородным?
 1. Материал, свойства которого одинаковы во всех его точках.
 2. Материал, свойства которого являются функциями координат.
 3. Материал, упругие свойства которого одинаковы по всем направлениям.
 4. Материал, упругие свойства которого различны в разных направлениях.
 5. Материал, упругие свойства которого идентичны в любых двух направлениях, симметричных относительно некоторой плоскости.
 6. Материал, обладающий тремя взаимно перпендикулярными плоскостями упругой симметрии.

- 2) Какой материал называется неоднородным?
 1. Материал, свойства которого одинаковы во всех его точках.
 2. Материал, свойства которого являются функциями координат.
 3. Материал, упругие свойства которого одинаковы по всем направлениям.
 4. Материал, упругие свойства которого различны в разных направлениях.
 5. Материал, упругие свойства которого идентичны в любых двух направлениях, симметричных относительно некоторой плоскости.
 6. Материал, обладающий тремя взаимно перпендикулярными плоскостями упругой симметрии.

- 3) Какой материал называется изотропным?
 1. Материал, свойства которого одинаковы во всех его точках.
 2. Материал, свойства которого являются функциями координат.
 3. Материал, упругие свойства которого одинаковы по всем направлениям.
 4. Материал, упругие свойства которого различны в разных направлениях.
 5. Материал, упругие свойства которого идентичны в любых двух направлениях, симметричных относительно некоторой плоскости.
 6. Материал, обладающий тремя взаимно перпендикулярными плоскостями упругой симметрии.

- 4) Какой материал называется ортотропным?
 1. Материал, свойства которого одинаковы во всех его точках.
 2. Материал, свойства которого являются функциями координат.

3. Материал, упругие свойства которого одинаковы по всем направлениям.
4. Материал, упругие свойства которого различны в разных направлениях.
5. Материал, упругие свойства которого идентичны в любых двух направлениях, симметричных относительно некоторой плоскости.
6. Материал, обладающий тремя взаимно перпендикулярными плоскостями упругой симметрии.

5) Какой материал называется анизотропным?

1. Материал, свойства которого одинаковы во всех его точках.
2. Материал, свойства которого являются функциями координат.
3. Материал, упругие свойства которого одинаковы по всем направлениям.
4. Материал, упругие свойства которого различны в разных направлениях.
5. Материал, упругие свойства которого идентичны в любых двух направлениях, симметричных относительно некоторой плоскости.
6. Материал, обладающий тремя взаимно перпендикулярными плоскостями упругой симметрии.

б) Сколько независимых постоянных полностью характеризуют упругие свойства изотропного материала?

1. Две.
2. Три.
3. Четыре.
4. Шесть.
5. Девять.
6. Шестнадцать.
7. Двадцать одна.
8. Тридцать шесть.

7) Сколько независимых постоянных полностью характеризуют упругие свойства двухмерного ортотропного материала?

1. Две.
2. Три.
3. Четыре.
4. Шесть.
5. Девять.
6. Шестнадцать.
7. Двадцать одна.
8. Тридцать шесть.

8) Сколько независимых постоянных полностью характеризуют упругие свойства трехмерного ортотропного материала?

1. Две.
2. Три.
3. Четыре.
4. Шесть.
5. Девять.
6. Шестнадцать.
7. Двадцать одна.
8. Тридцать шесть.

9) Сколько независимых постоянных полностью характеризуют упругие свойства двухмерного анизотропного материала?

1. Две.
2. Три.
3. Четыре.
4. Шесть.
5. Девять.
6. Шестнадцать.
7. Двадцать одна.
8. Тридцать шесть.

10) Сколько независимых постоянных полностью характеризуют упругие свойства трехмерного анизотропного материала?

1. Две.
2. Три.
3. Четыре.
4. Шесть.
5. Девять.
6. Шестнадцать.
7. Двадцать одна.
8. Тридцать шесть.

11) Как строятся модели неоднородных композиционных материалов в программе MSC.Patran?

1. С использованием моделей однородных материалов.
2. Путем задания свойств отдельных компонентов.
3. Путем задания матрицы жесткости материала.
4. При помощи геометрического моделирования материала.

12) Какой метод используется для задания слоистых композитов?

1. Laminate.

2. Rule of Mixtures.
3. Halpin-Tsai.
4. Short Fiber.
5. Composite.
6. Manual Input.

13) Что такое «Constitutive Model»?

1. Модель состояния материала.
2. Конститутивная модель материала.
3. Учрежденная модель материала.
4. Модель однородного материала.
5. Модель неоднородного материала.

14) Какие модели состояния материала доступны в программе MSC.Patran?

1. Упругая.
2. Линейно-упругая.
3. Нелинейно-упругая.
4. Упругопластическая.
5. Линейная упругопластическая.
6. Нелинейная упругопластическая.
7. Ползучесть.
8. Линейная ползучесть.
9. Нелинейная ползучесть.

15) Какие свойства необходимы для построения модели упругопластического материала с билинейной диаграммой деформирования?

1. Модуль упругости.
2. Коэффициент Пуассона.
3. Касательный модуль.
4. Модуль пластичности.
5. Предел текучести.
6. Предел прочности.
7. Относительное удлинение при разрыве.

16) Какое приложение используется для задания свойств конечных элементов?

1. Geometry.
2. Elements.
3. Materials.
4. Load/BCs.
5. Properties.
6. Load Cases.

7. Fields.

17) Какие типы точечных элементов доступны в программе MSC.Patran?

1. Mass.
2. Grounded Spring.
3. Grounded Damper.
4. Beam.
5. Rod.
6. Spring.
7. Damper.
8. Gap.
9. Shell.
10. Bending Panel.

18) Какие типы линейных элементов доступны в программе MSC.Patran?

1. Mass.
2. Grounded Spring.
3. Grounded Damper.
4. Beam.
5. Rod.
6. Spring.
7. Damper.
8. Gap.
9. 1D Mass.
10. Shell.
11. Bending Panel.

19) Какие типы поверхностных элементов доступны в программе MSC.Patran?

1. Mass.
2. Grounded Spring.
3. Beam.
4. Rod.
5. Spring.
6. Gap.
7. Shell.
8. Bending Panel.
9. 2D Solid.
10. Membrane.
11. Shear Panel.
12. Solid.

20) Какие типы объемных элементов доступны в программе MSC.Patran?

1. Mass.
2. Grounded Spring.
3. Beam.
4. Rod.
5. Spring.
6. Gap.
7. Shell.
8. Bending Panel.
9. 2D Solid.
10. Membrane.
11. Solid.

21) Какие значения доступны для опции, определяющей тип сечения оболочки?

1. Homogeneous.
2. Laminate.
3. Equivalent Section.
4. Standard.
5. Revised.

22) При каком значении опции, определяющей тип сечения оболочки, можно задавать независимо друг от друга мембранную, изгибную и сдвиговую жесткости?

1. Homogeneous.
2. Laminate.
3. Equivalent Section.
4. Standard.
5. Revised.

23) Как в диалоговой панели «Input Properties» указываются обязательные свойства?

1. Без скобок и кавычек.
2. В круглых скобках.
3. В квадратных скобках.
4. В фигурных скобках.
5. В кавычках.

24) Как в диалоговой панели «Input Properties» указываются необязательные свойства?

1. Без скобок и кавычек.
2. В круглых скобках.
3. В квадратных скобках.
4. В фигурных скобках.
5. В кавычках.

25) В каких системах координат можно задавать компоненты вектора ориентации в программе MSC.Patran?

1. В глобальной декартовой системе координат.
2. В любой локальной системе координат.
3. В системе координат элемента.
4. В узловой системе координат.
5. В системе координат для анализа.

26) В каких системах координат можно задавать компоненты векторов эксцентриситетов в программе MSC.Patran?

1. В глобальной декартовой системе координат.
2. В любой локальной системе координат.
3. В системе координат элемента.
4. В узловой системе координат.
5. В системе координат для анализа.

27) В каких системах координат можно задавать флаги шарниров в программе MSC.Patran?

1. В глобальной декартовой системе координат.
2. В любой локальной системе координат.
3. В системе координат элемента.
4. В узловой системе координат.
5. В системе координат для анализа.

10 ВЫПОЛНЕНИЕ АНАЛИЗА И ПРОСМОТР РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

10.1 Запуск задачи на счет

Для запуска сформированной задачи на счет используется действие *Analyze* приложения «Analysis» (рисунок 10.1). В случае выполнения простейшего линейного статического анализа с одним расчетным случаем здесь можно просто нажать кнопку *Apply*, ничего не меняя. Однако для выбора другого типа решения или для реализации нескольких расчетных случаев следует изменить установленные по умолчанию параметры анализа.

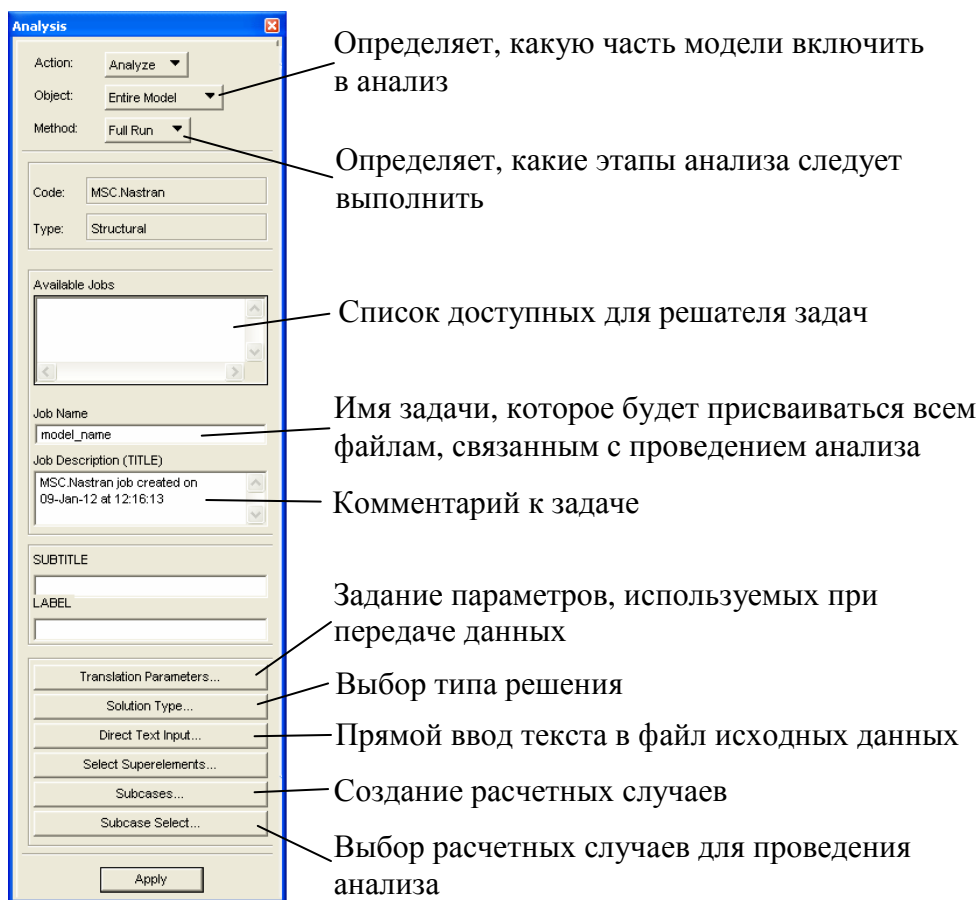


Рисунок 10.1 – Задание параметров анализа

Отметим, что для анализа с помощью раскрывающегося меню «Object» можно выбрать всю модель (Entire Model) или ее часть, которая находится в отдельной группе (Selected Group). По умолчанию выполняется полный анализ (Full Run). Однако при помощи меню «Method» можно произвести проверочный запуск (Check Run), создать только файл, содержащий все исход-

ные данные для проведения анализа (Analysis Desk) или лишь данные по модели (Model Only).

При выборе типа решения (кнопка *Solution Type*) доступны следующие варианты:

- Linear Static – линейный статический анализ;
- Nonlinear Static – нелинейный статический анализ;
- Normal Modes – расчет частот и форм собственных колебаний;
- Buckling – анализ начальной устойчивости;
- Complex Eigenvalue – вычисление комплексных собственных значений (например, при учете сил трения);
- Frequency Response – частотный анализ динамической реакции конструкции на периодическое или близкое к нему и достаточно длительное воздействие внешних факторов;
- Transient Response – анализ динамических переходных процессов (как правило, кратковременных);
- Nonlinear Transient – анализ нелинейных динамических переходных процессов.

Следует отметить, что расчетные случаи (Subcases) создаются автоматически для каждого случая нагружения (Load Case). Для создания новых расчетных случаев или для редактирования существующих необходимо воспользоваться кнопкой *Subcases*. При этом появляется дополнительная диалоговая панель, где для выбранного расчетного случая можно задать параметры (кнопка *Subcase Parameters*). Например, в нелинейном анализе можно указать число шагов по нагрузке, при расчете собственных колебаний можно указать, сколько частот необходимо вычислить и т.д. Можно также выбрать метод решения. Кроме того, с помощью панели «Output Requests» (запросы по выводу) можно выбрать выходные величины, которые будут помещаться в файл результатов расчета.

И наконец, кнопка *Subcase Select* используется для выбора расчетных случаев для включения их в задание на расчет.

После нажатия кнопки *Apply* в основной панели приложения «Analysis» на базе построенной модели формируется файл исходных данных и запускается решатель (в нашем случае MSC.Nastran). По окончании счета выдается звуковой сигнал.

10.2 Передача результатов расчета в среду MSC.Patran

Следует напомнить, что после выполнения анализа программа MSC.Nastran записывает результаты расчета в двоичный файл `model_name.xdb` или `model_name.op2` (где `model_name` – назначенное пользователем имя задачи). Для получения доступа к результатам необходимо выбрать действие `Access Results` приложения «Analysis» (рисунок 10.2).

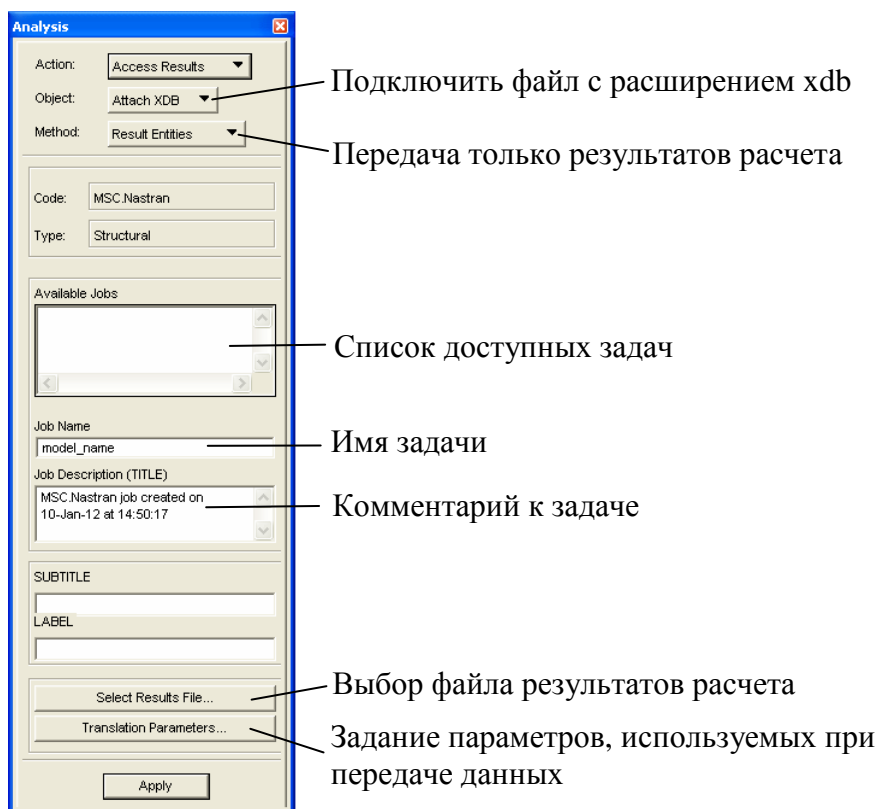


Рисунок 10.2 – Получение доступа к результатам

По умолчанию MSC.Patran ищет файл с расширением `xdb`. Однако если результаты расчета записаны в файл с расширением `op2`, то для чтения этого файла в качестве объекта в раскрывающемся меню «Object» здесь следует выбрать пункт `Read Output2`. С помощью меню «Method» можно передавать только результаты (`Result Entities`), только данные по конечно-элементной модели (`Model Data`) или и то и другое (`Both`). И наконец, для выбора файла результатов расчета следует воспользоваться кнопкой *Select Results File*.

В случае обнаружения решателем MSC.Nastran ошибок в конечно-элементной модели файл результатов расчета обычно не содержит выходных данных либо вообще не создается. При этом сообщения об ошибках помещаются в текстовый файл `model_name.f06`.

10.3 Средства просмотра результатов расчета

Для представления в среде MSC.Patran результатов расчета в форме, удобной для практического использования, применяется приложение «Results». Оно позволяет отображать на экране дисплея различными способами не только скалярные выходные величины, но также векторные и тензорные.

В одной и той же базе данных могут храниться результаты различных вариантов расчетов. Для этих целей применяются разные случаи результатов (Result Cases). При этом результаты линейного статического анализа по каждому случаю нагружения целиком помещаются в один случай результатов. При нелинейном анализе для каждого шага по нагрузке организуется свой отдельный случай результатов. Аналогично в динамическом анализе для каждого временного шага создается также отдельный случай результатов.

Перечислим основные способы изображения результатов (Object):

- Quick Plot – быстрый и самый простой способ изображения деформированного состояния модели, многоцветного представления полей результатов и анимации (устанавливается по умолчанию);
 - Deformation – изображение деформированного состояния модели;
 - Fringe – многоцветное представление полей результатов;
 - Marker (Scalar, Vector или Tensor) – изображение скалярных, векторных или тензорных выходных величин с использованием цветных символов;
 - Cursor – вывод значений результатов в местах, указанных курсором мыши;
 - Contour – изображение полей результатов в виде изолиний;
 - Isosurface – изображение трехмерных полей результатов в виде изоповерхностей;
 - Graph – построение ху-графиков выходных величин в зависимости от глобальных переменных, других величин результатов, расстояния, вдоль определенных пользователем геометрических объектов или произвольного пути;
 - Animation – анимация деформированного состояния и многоцветного представления полей результатов;
 - Report – составление отформатированного текстового отчета.

Рассмотрим сначала простейший способ изображения результатов, обладающий в принципе всеми основными возможностями постпроцессора (рисунок 10.3).

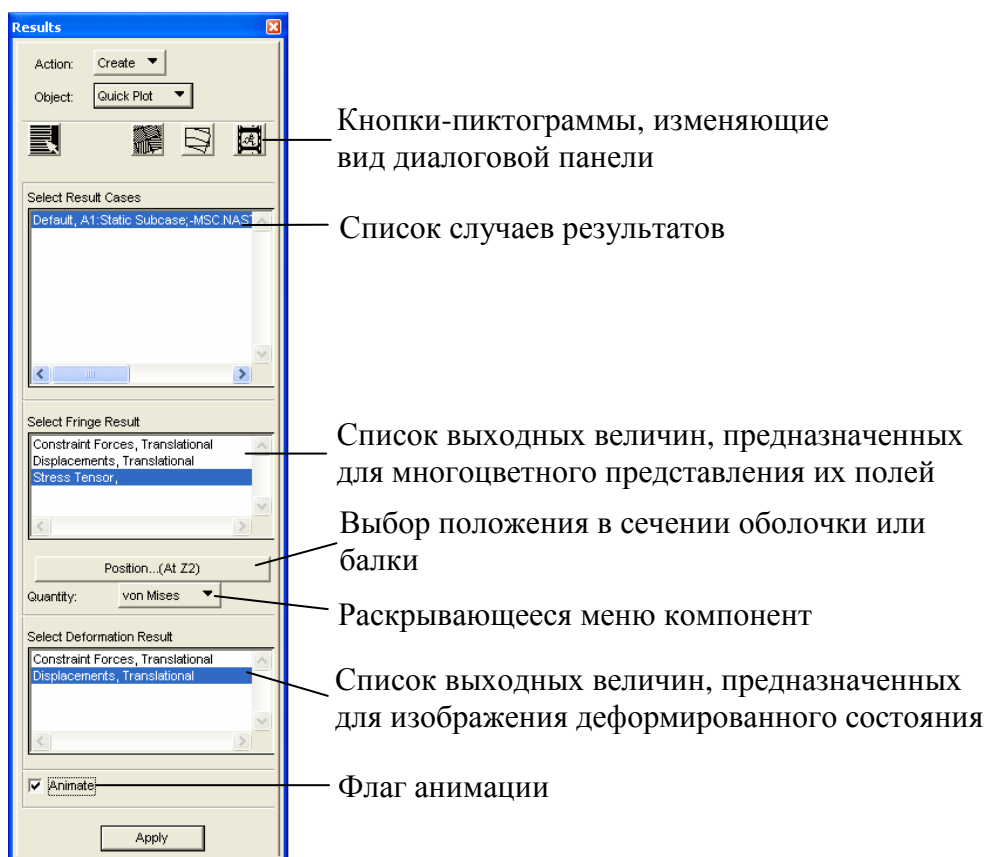


Рисунок 10.3 – Простейший способ изображения результатов

Здесь необходимо выполнить следующие действия:

- 1) выбрать случай результатов (Select Result Cases);
- 2) выбрать величину для многоцветного изображения ее изменения по модели (Select Fringe Result), например, Stress Tensor – тензор напряжений. Если эта величина не является скалярной, то для нее следует указать компоненту (Quantity). Так, для тензора напряжений здесь доступны следующие компоненты:

- Von Mises – напряжение по Мизесу (т.е. эквивалентное напряжение по теории прочности энергии формоизменения)

$$\sigma_{\text{Mises}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)};$$

- X Component, Y Component, ..., ZX Component – компоненты напряжений $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \dots, \sigma_{zx}$;
- Max Principal, Mid Principal, Min Principal – главные напряжения $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$;
- Hydrostatic – гидростатическое напряжение $\sigma_0 = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) / 3$;

- 1st Invariant, 2nd Invariant, 3rd Invariant – инварианты тензора напряжений I_1, I_2, I_3 ;
- Tresca – напряжение Треска (т.е. эквивалентное напряжение по теории прочности наибольших касательных напряжений)


$$\sigma_{\text{Tresca}} = \sigma_1 - \sigma_3;$$

- Max Shear – максимальное касательное напряжение;
- Octahedral – октаэдрическое напряжение. На октаэдрической площадке, равнонаклоненной к трем главным осям, нормальное напряжение равно σ_0 , а касательное (называемое октаэдрическим) –


$$\tau_0 = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_{\text{Mises}};$$


3) и/или выбрать результаты для изображения деформированного состояния (Select Deformation Result). Обычно здесь выбирают перемещения (Displacements);

- 4) если требуется, установить флаг анимации;
- 5) нажать кнопку *Apply*.


Следует отметить, что кнопка-пиктограмма в виде киноленты  (Animation Options) обеспечивает быстрый доступ к диалоговой панели управления анимацией. Здесь можно выбрать метод анимации (Modal – создает кадры путем умножения результатов на коэффициент, изменяющийся в диапазоне от -1 до 1; Ramped – использует коэффициент от 0 до 1), графику (2D – двухмерная; 3D – трехмерная, позволяющая вращать модель в процессе анимации; Preview – предварительный просмотр; VRML, MPEG – создание видеофайла соответствующего формата), задать число кадров (Number of Frames). Очевидно, чем больше кадров, тем плавнее анимация (по умолчанию их восемь).


Способы изображения результатов Deformation и Fringe по сравнению с рассмотренным выше обладают большими возможностями управления изображением. Для этих целей используются кнопки-пиктограммы, изменяющие вид диалоговых панелей:

 (Select Results) – устанавливает вид для выбора результатов (задается по умолчанию);

 (Target Entities) – устанавливает вид для выбора целевых объектов, на которых будут отображаться результаты. Данный выбор базируется на: Current Viewport – текущем графическом окне (по умолчанию); Nodes – уз-

лах; Elements – элементах; Groups – группах; Materials – материалах; Properties – свойствах элементов; Types – типах элементов;

 (Display Attributes) – устанавливает вид для задания атрибутов изображения (т.е. стиля, цвета и толщины линий, дискретного или плавного изображения полей, теней, заголовка и т.д.);

 (Plot Options) – устанавливает вид для задания опций вычерчивания, которые управляют преобразованием координат, выбором слоя, коэффициентом масштабирования, установкой фильтра, методом и областью осреднения, методом экстраполяции, сохранением текущего изображения для последующего использования.

Следует отметить, что в программе MSC.Patran результаты можно выводить в разных системах координат. При этом для опции преобразования координат (Coordinate Transformation) доступны следующие значения:

- As Is – как есть (результаты представляются в системе координат решателя без преобразования);
 - CID – указываемая локальная система координат;
 - Projected CID – проекция оси указываемой системы координат на элемент;
 - Global – глобальная декартова система координат;
 - Default – по умолчанию (результаты хранятся в системе координат решателя);
 - Material – система координат материала (только для поверхностных элементов);
 - Element IJK – система координат элемента.

Экстраполяция (Extrapolation) здесь используется для вычисления результатов в узлах конечного элемента по результатам, найденным в некоторых точках внутри элемента (обычно в точках интегрирования). Рассмотрим существующие в данной программе методы экстраполяции:

- Shape Fn. – для экстраполяции результатов на узлы элемента используется функция формы, как показано на рисунке 10.4 (рекомендуемый метод);
- Average – результаты сначала осредняются внутри элемента, а затем назначаются каждому из его узлов;

- Centroid – в узлах элемента принимается значение, вычисленное в его центре тяжести;
- Min – используется наименьшее из значений результата в точках интегрирования;
- Max – используется наибольшее из значений результата в точках интегрирования.

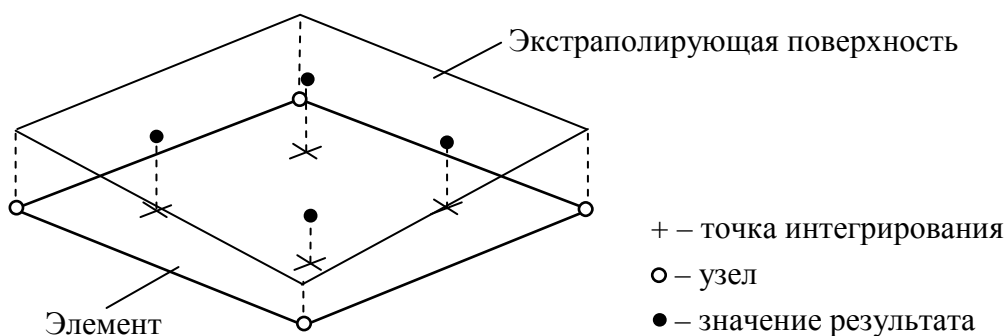


Рисунок 10.4 – Использование функции формы

Большой интерес здесь также представляет вопрос, связанный с осреднением результатов в общих узлах соседних элементов (рисунок 10.5). Определение осреднения (Averaging Definition) предполагает задание области (Domain) и метода (Method). Область осреднения задается следующими параметрами:

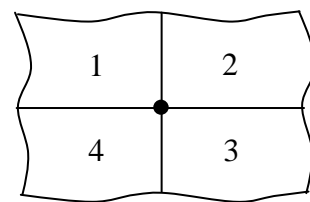


Рисунок 10.5 – Общий узел

- All Entities – при вычислении среднего значения результата в узле учитываются все конечные элементы, сходящиеся в этом узле;
- None – результаты не осредняются в узле;
- Material, Property, Element Type, Target Entities – результаты осредняются в узле, если сходящиеся в нем элементы имеют одинаковый материал, свойства, тип или являются частью целевых объектов, заданных пользователем.


Перечислим доступные методы осреднения:

- Derive/Average – в том случае, когда требуется отобразить поле инварианта результата (например, напряжения по Мизесу), сначала выполняется вычисление его значений в точках интегрирования, а затем их экстраполяция и осреднение в узлах;

- Average/Derive – сначала компоненты выходной величины экстраполируются на узлы, затем выполняется их осреднение, после чего по средним узловым значениям компонент вычисляется требуемый инвариант;
- Difference – вычисляется величина абсолютной разности между наибольшим и наименьшим значениями результата в узле (используется для оценки качества сетки);
- Sum – вычисляется сумма всех значений в узле.


Рассмотрим далее вопрос, связанный с анимацией динамического переходного процесса. Анимация здесь выполняется по отношению к любой глобальной переменной, такой как время, случай нагружения, частота и т.п. При этом порядок действий следующий:

1) в диалоговой панели приложения «Results» в качестве способа изображения результатов выбрать Deformation (рисунок 10.6);

2) в разделе «Select Result Cases» выбрать сразу несколько случаев результатов, соответствующих разным моментам времени. Для раскрытия списка случаев результатов здесь следует отжать кнопку  (View Subcases);

3) в разделе «Select deformation Results» выбрать Displacements, Translational (поступательные перемещения);

4) установить флаг анимации;

5) нажав последнюю кнопку-пиктограмму с кинолентой , установить вид для задания опций анимации;

6) в раскрывающемся меню «Animation Method» (метод анимации) выбрать Global Variable (глобальная переменная);

7) в списке глобальных переменных «Select Global Variable» указать time (время);

8) в поле «Number of Frames» задать требуемое число кадров;

9) нажать кнопку *Apply*. Скорость анимации здесь регулируется бегунком «Animation Speed»;

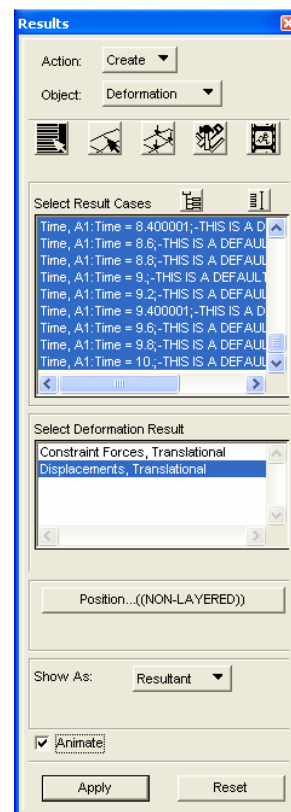


Рисунок 10.6 – Анимация переходного процесса

10) для завершения процесса анимации нажать одну из кнопок раздела «Stop Animation and ...».

Следует отметить, что программа MSC.Patran позволяет с помощью сочетания Create/Results создавать новые случаи результатов путем комбинирования или модификации существующих. Кроме того, по результатам расчетов можно строить различные диаграммы свободного тела (сочетание Create/Freebody). Здесь можно увидеть, например, внешние силы, реакции и внутренние силы, уравнивающие часть конструкции и т.п.

В заключение отметим, что кроме стандартного постпроцессора, запускаемого приложением «Results», программа MSC.Patran содержит более мощный постпроцессор «Insight», использующий новейшие 3D-технологии для быстрой визуализации многомерных результатов. В отличие от приложения «Results», отображающего отдельные результаты, он предназначен для их совместной оценки.

Еще здесь можно отметить приложение «XY Plot», применяемое для построения произвольных двумерных графиков. При этом исходные данные можно либо читать из файла, либо вводить вручную с помощью клавиатуры.

Вопросы по теме 10

1) Какое приложение используется для запуска задачи на счет?

1. Geometry.
2. Elements.
3. Loads/BCs.
4. Properties.
5. Load Cases.
6. Fields.
7. Analysis.
8. Results.
9. Insight.
10. XY Plot.

2) Какое приложение используется для передачи результатов расчета в среду MSC.Patran?

1. Geometry.
2. Elements.
3. Loads/BCs.
4. Properties.
5. Load Cases.
6. Fields.
7. Analysis.
8. Results.
9. Insight.
10. XY Plot.

3) Какой тип решения используется для расчета собственных колебаний конструкций?

1. Linear Static.
2. Nonlinear Static.
3. Normal Modes.
4. Buckling.
5. Complex Eigenvalue.
6. Frequency Response.
7. Transient Response.

4) Какой тип решения используется для анализа начальной устойчивости?

1. Linear Static.
2. Nonlinear Static.
3. Normal Modes.
4. Buckling.

5. Complex Eigenvalue.
6. Frequency Response.
7. Transient Response.

5) Какой тип решения используется для гармонического анализа?

1. Linear Static.
2. Nonlinear Static.
3. Normal Modes.
4. Buckling.
5. Complex Eigenvalue.
6. Frequency Response.
7. Transient Response.

6) Какой тип решения используется для анализа переходных процессов?

1. Linear Static.
2. Nonlinear Static.
3. Normal Modes.
4. Buckling.
5. Complex Eigenvalue.
6. Frequency Response.
7. Transient Response.

7) Какая последовательность нажатия кнопок позволяет задавать параметры расчетного случая?

1. Subcases>Subcase Parameters.
2. Subcases>Output Requests.
3. Solution Type>Solution Parameters.
4. Solution Type>Output Options.
5. Translation Parameters>Select Method.

8) Какая последовательность нажатия кнопок позволяет выбирать метод решения?

1. Subcases>Subcase Parameters.
2. Subcases>Output Requests.
3. Solution Type>Solution Parameters.
4. Solution Type>Output Options.
5. Translation Parameters>Select Method.

9) Какая последовательность нажатия кнопок позволяет выбирать требуемые выходные величины?

1. Subcases>Subcase Parameters.
2. Subcases>Output Requests.

3. Solution Type>Solution Parameters.
4. Solution Type>Output Options.
5. Translation Parameters>Select Method.

10) Какой метод используется по умолчанию при запуске задачи на счет?

1. Full Run.
2. Check Run.
3. Analysis Desk.
4. Model Only.
5. Restart.

11) Какой метод позволяет формировать файл исходных данных для решателя без запуска задачи на счет?

1. Full Run.
2. Check Run.
3. Analysis Desk.
4. Model Only.
5. Restart.

12) Файл с каким расширением ищет по умолчанию MSC.Patran при передаче результатов расчета?

1. db.
2. xdb.
3. op2.
4. f04.
5. f06.
6. bdf.
7. dat.
8. res.

13) Какие способы изображения результатов используются для многоцветного представления полей выходных величин?

1. Quick Plot.
2. Deformation.
3. Fringe.
4. Marker.
5. Cursor.
6. Graph.
7. Report.

14) Какие способы изображения результатов используются для представления деформированного состояния?

1. Quick Plot.
2. Deformation.
3. Fringe.
4. Marker.
5. Cursor.
6. Graph.
7. Report.

15) Какой способ изображения результатов используются для составления отформатированного текстового отчета?

1. Quick Plot.
2. Deformation.
3. Fringe.
4. Marker.
5. Cursor.
6. Graph.
7. Report.

16) Какой способ изображения результатов используются для символического представления скалярных, векторных и тензорных выходных величин?

1. Quick Plot.
2. Deformation.
3. Fringe.
4. Marker.
5. Cursor.
6. Graph.
7. Report.

17) Какой способ изображения результатов установлен по умолчанию?

1. Quick Plot.
2. Deformation.
3. Fringe.
4. Marker.
5. Cursor.
6. Graph.
7. Report.

18) Что такое Von Mises?

1. Эквивалентное напряжение по теории прочности энергии формоизменения.
2. Эквивалентное напряжение по теории прочности наибольших касательных напряжений.

3. Главное напряжение.
4. Нормальное напряжение на площадке, равнонаклоненной к трем главным осям.
5. Касательное напряжение на площадке, равнонаклоненной к трем главным осям.

19) Что такое Principal?

1. Эквивалентное напряжение по теории прочности энергии формоизменения.
2. Эквивалентное напряжение по теории прочности наибольших касательных напряжений.
3. Главное напряжение.
4. Нормальное напряжение на площадке, равнонаклоненной к трем главным осям.
5. Касательное напряжение на площадке, равнонаклоненной к трем главным осям.

20) Что такое Hydrostatic?

1. Эквивалентное напряжение по теории прочности энергии формоизменения.
2. Эквивалентное напряжение по теории прочности наибольших касательных напряжений.
3. Главное напряжение.
4. Нормальное напряжение на площадке, равнонаклоненной к трем главным осям.
5. Касательное напряжение на площадке, равнонаклоненной к трем главным осям.

21) Что такое Tresca?

1. Эквивалентное напряжение по теории прочности энергии формоизменения.
2. Эквивалентное напряжение по теории прочности наибольших касательных напряжений.
3. Главное напряжение.
4. Нормальное напряжение на площадке, равнонаклоненной к трем главным осям.
5. Касательное напряжение на площадке, равнонаклоненной к трем главным осям.

22) Что такое Octahedral?

1. Эквивалентное напряжение по теории прочности энергии формоизменения.
2. Эквивалентное напряжение по теории прочности наибольших касательных напряжений.

3. Главное напряжение.
4. Нормальное напряжение на площадке, равнонаклоненной к трем главным осям.
5. Касательное напряжение на площадке, равнонаклоненной к трем главным осям.

23) Для чего используется экстраполяция?

1. Для вычисления результатов в узлах конечного элемента по результатам, найденным в точках интегрирования.
2. Для осреднения результатов в общих узлах соседних элементов.
3. Для отображения поля инвариантной величины.
4. Для преобразования координат.

24) Какой метод экстраполяции является рекомендуемым в программе MSC.Patran?

1. Shape Fn.
2. Average.
3. Centroid.
4. Min.
5. Max.

25) Какой метод осреднения используется для оценки качества сетки?

1. Derive/Average.
2. Average/Derive.
3. Difference.
4. Sum.

26) Какой метод используется для анимации динамического переходного процесса?

1. Global Variable.
2. Modal.
3. Ramped.
4. Time/Frequency.

27) Какое приложение используется для запуска нестандартного постпроцессора?

1. Geometry.
2. Elements.
3. Loads/BCs.
4. Properties.
5. Load Cases.

6. Fields.
7. Analysis.
8. Results.
9. Insight.
10. XY Plot.

11 ВЫБОР РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

11.1 Двухмерные задачи

11.1.1 Плоская задача

Существует широкий класс важных в практическом отношении задач, в которых перемещения, деформации и напряжения зависят лишь от двух координат (например, x и y). Этот класс задач под общим названием «плоская задача теории упругости» подразделяется на плоскую деформацию и обобщенное плоское напряженное состояние.

Если в процессе нагружения все точки тела перемещаются только параллельно одной плоскости (плоскости xu , например), то соответствующее деформированное состояние называется плоской деформацией. Таким образом, в случае плоской деформации для перемещений имеем $u_x = u_x(x, y)$, $u_y = u_y(x, y)$, $u_z = 0$. В соответствии с уравнениями Коши деформации $\varepsilon_{zz}, \varepsilon_{yz}$ и ε_{zx} оказываются равными нулю, а из закона Гука вытекает, что касательные напряжения σ_{yz} и σ_{zx} также равны нулю. Остальные компоненты деформации и напряжения являются функциями только координат x и y .

Примером здесь может служить тело, помещенное между двумя абсолютно жесткими плитами, расстояние между которыми остается неизменным, и сжимаемое силами, параллельными плоскостям плит (рисунок 11.1,а). В таких же условиях работает длинное призматическое или цилиндрическое тело при действии нагрузки, перпендикулярной оси тела и постоянной вдоль нее. Близкими к этому случаю являются задачи о плотине (рисунок 11.1,б), тоннеле метрополитена и т.д.

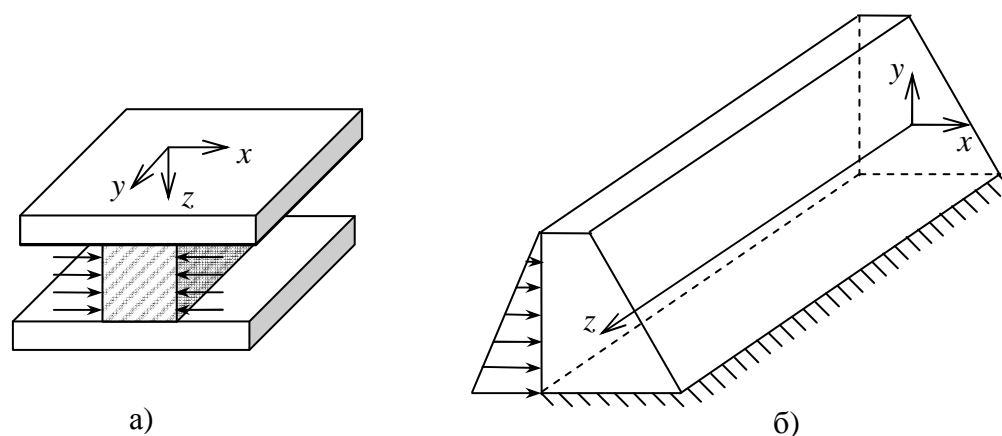


Рисунок 11.1 – Примеры плоской деформации

Если, далее, тонкая пластина, параллельная плоскости xu , нагружена объемными и по контуру поверхностными силами, параллельными ее плоскости и равномерно распределенными по толщине (рисунок 11.2), то имеем дело с обобщенным плоским напряженным состоянием. В этом случае можно пренебречь компонентами напряжения σ_{zz}, σ_{yz} и σ_{zx} , а σ_{xx}, σ_{yy} и σ_{xy} считать постоянными по толщине:

$$\sigma_{zz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0;$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xx}(x, y); \quad \sigma_{yy} = \sigma_{yy}(x, y); \quad \sigma_{xy} = \sigma_{xy}(x, y).$$

Из закона Гука следует, что при обобщенном плоском напряженном состоянии деформации сдвига $\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0$, а остальные компоненты деформации представляются как функции только координат x и y .

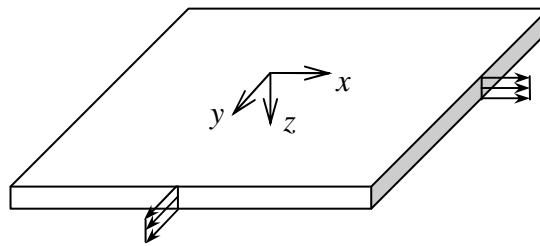


Рисунок 11.2 – Пример обобщенного плоского напряженного состояния

Выпишем основные уравнения теории упругости применительно к плоской задаче. Из трех дифференциальных уравнений равновесия остается два. В отсутствие объемных сил они имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0 \quad (11.1)$$

или в матричной записи

$$\frac{\partial [\sigma_x]}{\partial x} + \frac{\partial [\sigma_y]}{\partial y} = 0,$$

где $[\sigma_x] = \{\sigma_{xx} \ \sigma_{yx}\}$; $[\sigma_y] = \{\sigma_{xy} \ \sigma_{yy}\}$.

Из уравнений Коши остается только три соотношения:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}. \quad (11.2)$$

Эти соотношения можно также записать в матричной форме

$$[\varepsilon] = [L][u],$$

где $[\varepsilon] = \{\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{xy}\}$; $[u] = \{u_x \ u_y\}$.

$$[L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}. \quad (11.3)$$

Как известно, закон Гука можно представить в форме $[\varepsilon] = [\Phi][\sigma]$ или $[\sigma] = [\kappa][\varepsilon]$, где $[\sigma] = \{\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{xy}\}$. При этом для обобщенного плоского напряженного состояния имеем

$$[\Phi] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & 0 \\ -\mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix}; \quad (11.4)$$

$$[\kappa] = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}. \quad (11.5)$$

Здесь E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

Для плоской деформации выражения для матриц $[\Phi]$ и $[\kappa]$ получаются из (11.4) и (11.5) с помощью замены

$$E \rightarrow E' = \frac{E}{1-\mu^2}; \quad \mu \rightarrow \mu' = \frac{\mu}{1-\mu}.$$

Отметим, что в случае плоской деформации нормальное напряжение σ_{zz} отлично от нуля, но оно не имеет самостоятельного значения, поскольку выражается через σ_{xx} и σ_{yy} по формуле

$$\sigma_{zz} = \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}).$$

Точно так же в обобщенном плоском напряженном состоянии деформация $\varepsilon_{zz} \neq 0$, но может быть найдена через ε_{xx} и ε_{yy} :

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\mu}{1-\mu}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}).$$

Эти соотношения вытекают из закона Гука.

Таким образом, с учетом замены E и μ на E' и μ' при решении задач о плоской деформации и обобщенном плоском напряженном состоянии можно пользоваться одними и теми же уравнениями и объединить обе задачи в одну – плоскую задачу теории упругости.

11.2 Осесимметричная задача

Осесимметричное тело (или тело вращения) получается вращением плоской фигуры относительно некоторой оси, называемой осью вращения или центральной осью. Здесь удобно ввести цилиндрическую систему координат r, θ, z (рисунок 11.3).

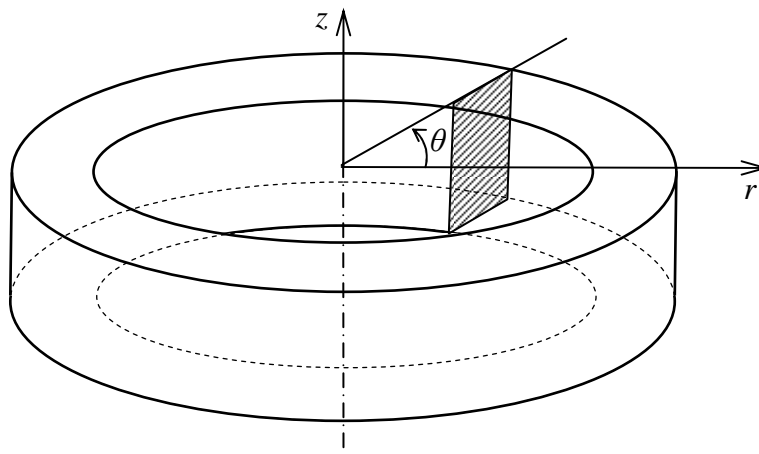


Рисунок 11.3 – Осесимметричное тело

Если нагрузка и граничные условия также симметричны относительно оси вращения тела, то его напряженно-деформированное состояние (НДС) не будет зависеть от окружной координаты θ , и все поперечные сечения будут находиться в одинаковых условиях. В этом случае вместо всего тела можно рассматривать лишь одно его сечение, т.е. свести трехмерную задачу теории упругости к двумерной, что существенно упрощает решение.

При таком деформировании окружные перемещения u_θ равны нулю, а радиальные и осевые перемещения будут являться функциями только двух координат: $u_r = u_r(r, z)$; $u_z = u_z(r, z)$.

Из трех дифференциальных уравнений равновесия здесь так же, как и в случае плоской задачи, остается лишь два:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} = 0. \quad (11.6)$$

Геометрические соотношения Коши имеют вид

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_{rz} = \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z}. \quad (11.7)$$

При этом сдвиговые деформации $\varepsilon_{r\theta}$ и $\varepsilon_{\theta z}$, а также соответствующие им касательные напряжения $\sigma_{r\theta}$ и $\sigma_{\theta z}$ тождественно равны нулю. Следует отметить, что окружные деформации $\varepsilon_{\theta\theta}$ и напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ здесь могут иметь немаловажное значение.

Если нагрузка не является осесимметричной, то ее можно разложить в ряд Фурье на гармонические составляющие. Полное решение в данном случае находится как суперпозиция отдельных решений для каждой составляющей. Очевидно, что такой подход справедлив только для линейных задач.

11.2 Стержневые системы

11.2.1 Расчетные схемы стержневых конструкций

В любой конструкции, как правило, имеются элементы, которые не участвуют в силовой работе. Если подобные элементы исключить, то получим силовую схему. Для того чтобы упростить расчет, обычно отбрасывают второстепенные элементы, оставляя лишь наиболее существенные. В результате получают расчетную схему. Итак, расчетной схемой называется упрощенное изображение действительной конструкции, которое фигурирует в процессе расчета. Для одной и той же конструкции можно использовать различные расчетные схемы.

Рассмотрим конструкцию, состоящую из стержней, соединенных по концам (рисунок 11.4,а). Стержни обычно крепятся заклепками, болтами или сваркой. Для данной стержневой системы можно предположить, что узлы жесткие, т.е. в качестве расчетной схемы взять раму (рисунок 11.4,б). Это более близко к истине, но расчет будет достаточно трудоемким (рассматриваемая рама будет девять раз статически неопределимой).

Если все стержни заменить их осями и предположить, что в узлах они пересекаются в одной точке и соединяются посредством идеальных шарни-

ров, то мы приходим к расчетной схеме в виде фермы (рисунок 11.4,в). Под действием внешних сил (которые считаются приложенными в узлах) в стержнях фермы возникают только осевые силы. При этом рассматриваемая система будет статически определимой и расчет существенно упрощается.

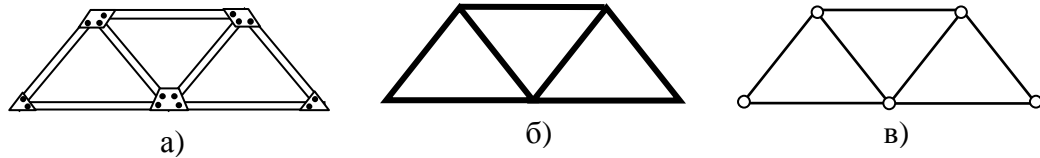


Рисунок 11.4 – Стержневая конструкция и ее расчетные схемы

На выбор расчетной схемы здесь влияет соотношение между длиной стержня и его поперечными размерами. Для длинных тонких стержней расчетная схема в виде фермы дает вполне удовлетворительные результаты.

Следует отметить, что для проектировочных расчетов обычно применяют более грубые расчетные схемы, а для поверочных – более точные.

11.2.2 Ферменный и балочный элементы

Для конечно-элементного моделирования ферм используется одноосный стержневой элемент (или ферменный элемент). Ферменным элементом называется прямолинейный стержень, который присоединяется к другим конструктивным элементам посредством идеальных шарниров. Если к нему не приложены поперечные силы, то он будет испытывать лишь растяжение или сжатие.

Матрица жесткости такого элемента наиболее просто записывается в местной системе координат \bar{x} , связанной с продольной осью стержня (рисунок 11.5):

$$[\bar{K}] = \frac{EF}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11.8)$$

где E – модуль упругости; F – площадь поперечного сечения стержня; l – длина элемента.

В общей системе координат x, y, z , в которой задана вся конструкция, матрица жесткости ферменного элемента находится как

$$[K^e] = \frac{EF}{l} \begin{bmatrix} d & -d \\ -d & d \end{bmatrix}, \quad (11.9)$$

где $[d] = [\lambda_0]^T [\lambda_0]$ – подматрица размером 3×3 ; $[\lambda_0] = [\lambda_{xx} \ \lambda_{xy} \ \lambda_{xz}]$ – матрица-строка направляющих косинусов, причем

$$\lambda_{xx} = \frac{x_j - x_i}{l}; \quad \lambda_{xy} = \frac{y_j - y_i}{l}; \quad \lambda_{xz} = \frac{z_j - z_i}{l}.$$

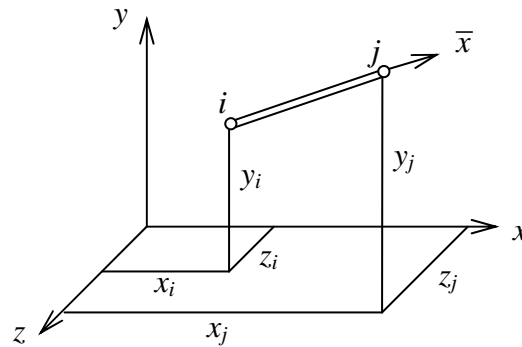


Рисунок 11.5 – Ферменный элемент

Таким образом, ферменный элемент однозначно определяется двумя узлами, площадью поперечного сечения стержня и модулем упругости материала. В узлах здесь задаются только поступательные перемещения.

Для моделирования балок и рам используется балочный элемент. Балочным элементом называется прямолинейный брус, способный воспринимать в общем случае все виды нагрузок (растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях и кручение). В каждом из двух узлов здесь рассматривается по шесть перемещений (три линейных и три угловых) и соответствующие им силовые факторы.

Наиболее просто матрица жесткости такого элемента записывается в местной системе координат, когда ось \bar{x} совпадает с продольной осью стержня, а оси \bar{y} и \bar{z} – с главными центральными осями его поперечного сечения. В этом случае узловые силы и перемещения распадаются на четыре группы, которые можно рассматривать независимо друг от друга. При соответствующем расположении сил и перемещений матрицу жесткости балочного элемента в местной системе координат можно представить в блочно-диагональном виде

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} \bar{K}_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{K}_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{K}_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{K}_d \end{bmatrix}, \quad (11.10)$$

где $[\bar{K}_a]$ – подматрица, характеризующая работу на растяжение-сжатие (размер 2×2); $[\bar{K}_b]$ и $[\bar{K}_c]$ – подматрицы, описывающие изгиб в плоскостях $\bar{x}\bar{y}$ и $\bar{x}\bar{z}$ соответственно (размер каждой 4×4); $[\bar{K}_d]$ – подматрица, определяющая работу на кручение (размер 2×2).

Очевидно, что $[\bar{K}_a]$ полностью совпадает с матрицей жесткости ферменного элемента в местной системе координат (см. формулу (11.8)).

Как известно, широко используемая на практике техническая теория изгиба балки базируется на гипотезе плоских сечений Бернулли-Эйлера, согласно которой плоские до деформации поперечные сечения балки остаются после деформации плоскими и ортогональными к изогнутой оси. Очевидно, что эта гипотеза не учитывает деформации поперечного сдвига и применима для достаточно длинных балок.

Используя данную кинематическую модель, можно получить

$$[\bar{K}_b] = \frac{EI_{\bar{z}}}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix}, \quad (11.11)$$

где $I_{\bar{z}}$ – момент инерции поперечного сечения относительно оси \bar{z} . При этом аппроксимация прогибов здесь осуществляется при помощи полинома третьей степени.

На практике также достаточно часто используется другая кинематическая модель, основанная на гипотезе Тимошенко, согласно которой плоские до деформации поперечные сечения балки остаются после деформации плоскими, но не обязательно ортогональными к изогнутой оси. Такой подход позволяет в первом приближении учесть деформации поперечного сдвига (они считаются постоянными по сечению). Аппроксимация линейных и угловых перемещений здесь выполняется независимо, что дает возможность строить изопараметрические элементы различных порядков.

Подматрицу $[\bar{K}_c]$ можно получить из $[\bar{K}_b]$, меняя знаки во втором и четвертом столбцах, а также во второй и четвертой строках, соответствующих моментам и углам поворота. Кроме того, вместо $I_{\bar{z}}$ следует подставить $I_{\bar{y}}$ (момент инерции поперечного сечения относительно оси \bar{y}).

И наконец, рассматривая кручение бруса, находим

$$[\bar{K}_d] = \frac{GJ}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11.12)$$

где G – модуль сдвига; J – момент инерции на кручение (константа Сен-Венана).

Здесь также требуется преобразование матрицы жесткости к общей системе координат.

Таким образом, балочный элемент однозначно определяется двумя узлами, площадью поперечного сечения, моментами инерции сечения относительно двух главных центральных осей, моментом инерции на кручение и свойствами материала.

Следует отметить, что при решении трехмерных задач здесь возникают трудности, связанные с ориентацией сечения бруса (т.е. осей \bar{y} и \bar{z}).

11.3 Тонкостенные конструкции

Тонкостенные конструкции получили широкое применение, особенно при создании летательных аппаратов. Точный расчет подобных конструкций на базе объемных моделей представляет весьма сложную задачу с большим числом неизвестных. Однако, учитывая, что толщина здесь намного меньше двух других размеров, решение задачи можно упростить.

В данном случае три измерения являются неравноправными. Поэтому следует попытаться отделить нормальную координату и свести трехмерные уравнения к двумерным, т.е. к уравнениям, включающим только две независимые переменные. Это можно сделать как формально математически, так и путем привлечения некоторых физических гипотез. В результате получают различные расчетные схемы: оболочка, пластина (изгибная панель), мембрана (безмоментная оболочка), сдвиговая панель.

Оболочкой называется тело, ограниченное двумя криволинейными поверхностями, расстояние между которыми мало по сравнению с прочими размерами. Геометрическое место точек, равноудаленных от обеих поверхностей, называется срединной поверхностью.

Оболочка в общем случае может работать на растяжение-сжатие и сдвиг в плоскостях, касательных к срединной поверхности, а также на изгиб и кручение.

Пластиной называется призматическое или цилиндрическое тело, высота которого мала по сравнению с размерами в плане. При расчете пластин обычно принимают допущение о недеформируемости срединной плоскости, т.е. учитывают только работу на изгиб и кручение. Очевидно, что пластина является частным случаем более общей расчетной схемы – оболочки.

В теории пластин и оболочек простейшей и наиболее широко используемой является гипотеза прямых нормалей Кирхгофа-Лява, согласно которой любой прямолинейный элемент, нормальный до деформации к срединной поверхности, остается прямолинейным, нормальным к деформированной срединной поверхности и сохраняет свою длину. Характерной особенностью данной гипотезы является то, что она не учитывает деформации поперечного сдвига и поэтому применима для расчета достаточно тонких пластин и оболочек. Понятие «тонкая» зависит от типа задачи. Но, вообще говоря, характерный размер пластины (или оболочки) должен, по крайней мере, в десять раз превышать ее толщину.

Другой кинематической моделью является гипотеза о независимом повороте нормали, согласно которой любой прямолинейный элемент, нормальный до деформации к срединной поверхности, при деформировании не искривляется, но в общем случае не остается нормальным к деформированной срединной поверхности. Ее называют гипотезой типа Тимошенко (или Миндлина-Рейсснера). Она позволяет в первом приближении учитывать деформации поперечного сдвига и поэтому применима к расчету умеренно толстых пластин и оболочек, а также композитных конструкций, обладающих достаточно высокой сдвиговой (межслоевой) податливостью.

Обе представленные выше гипотезы приводят к линейному распределению по толщине тангенциальных перемещений, а, следовательно, и напряжений в слоях, параллельных срединной поверхности (рисунок 11.6,а и б).

В МКЭ для определения деформированного состояния конечного элемента оболочки (или пластины) необходимо выполнить аппроксимацию перемещений срединной поверхности и углов поворота нормали через узловые перемещения. При использовании классической гипотезы Кирхгофа-Лява аппроксимации подлежат только перемещения срединной поверхности, а углы поворота нормали выражаются через производные от этих перемещений.

Такой подход наталкивается на серьезные трудности, связанные с необходимостью обеспечить непрерывность поля перемещений, т.е. совместность конечных элементов. Применение же несовместных элементов не позволяет контролировать точность расчета.

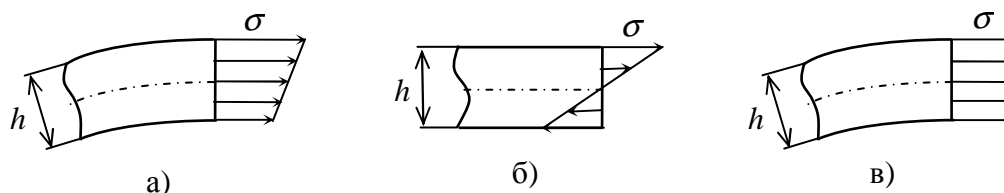


Рисунок 11.6 – Распределение напряжений по толщине оболочки (а), пластины (б) и мембраны (в)

Отмеченные трудности можно обойти, если воспользоваться независимой аппроксимацией перемещений и углов поворота нормали (т.е. гипотезой типа Тимошенко). Благодаря этому удастся построить семейства конечных элементов изопараметрического типа, пригодных для расчета пластин и оболочек произвольной конфигурации.

Следует отметить, что изопараметрическими называются элементы, в которых аппроксимация перемещений и геометрии осуществляется с помощью одних и тех же соотношений.

В отличие от пластин оболочки за счет кривизны работают главным образом на растяжение-сжатие, а не на изгиб и кручение, что позволяет более выгодно использовать материал.

В инженерных расчетах довольно часто встречаются задачи, в которых напряжения практически не изменяются по толщине (рисунок 1, в). Напряжения в этом случае не создают моментов, и поэтому такое напряженное состояние называют безмоментным. При создании несущих тонкостенных конструкций всегда стремятся обеспечить их работу в основном как безмоментных оболочек (или мембран). В данном случае они получаются наиболее легкими. Таким образом, мембрана – это также частный случай оболочки, когда ее изгибная жесткость полагается равной нулю.

Следует отметить, что тонкостенные конструкции без подкрепляющих ребер жесткости (поясов), как правило, не используются. Следовательно, часто возникает потребность в учете этих подкреплений. Для их моделирования в МКЭ обычно применяют одноосные стреежневые (ферменные) элемен-

ты. Когда пояса обладают достаточно высокой изгибной и крутильной жесткостью, используют также и балочные элементы.

Если пояса мощные, а оболочка (обшивка) тонкая, то можно пренебречь ее работой на растяжение-сжатие и считать, что она работает только на сдвиг. Таким образом, приходим к расчетной схеме в виде сдвиговой панели. Очевидно, что сдвиговая панель является частным случаем мембраны.

11.4 Использование объемных моделей

Как отмечалось ранее, для одной и той же конструкции можно использовать различные расчетные схемы. Рассмотрим в качестве примера трубопроводную систему. Для нее простейшей расчетной схемой является балочная модель. Она относится к классу линейных, поскольку здесь геометрия трубопровода представляется его осевой линией.

Следующей по сложности расчетной схемой трубопровода является оболочечная модель. В этом случае геометрия трубы описывается ее срединной (цилиндрической) поверхностью.

И наконец, самой сложной (детальной) расчетной схемой является объемная модель, когда труба рассматривается как трехмерное тело.

Следует отметить, что при переходе от балочной модели к оболочечной, а также от последней к объемной число степеней свободы (т.е. количество неизвестных перемещений) возрастает практически на порядок.

Таким образом, объемная модель с одной стороны является самой точной, самой подробной расчетной схемой, а с другой – она зачастую предъявляет чрезмерно высокие требования к ресурсам компьютера. Кроме того, при использовании объемной модели практически единственным способом изображения результатов расчета является многоцветное представление поля выходной величины, что затрудняет их анализ.

Обычно объемные модели используются для конструкций, которые в виду особенностей геометрии, материалов, нагружения или требуемых результатов не могут анализироваться при помощи более простых расчетных схем. Они также часто применяются, когда геометрия импортируется из САД-систем и преобразование модели в плоскую, балочную или оболочечную требует слишком много времени.

11.5 Практические рекомендации и некоторые замечания

- Реальные конструкции не содержат сингулярностей. Они возникают при упрощении модели. Сингулярности – это участки конечно-элементной модели, где напряжения неограниченны. Причинами их появления являются:
 - точечная нагрузка (например, сосредоточенные силы и моменты);
 - точечное закрепление (сила реакции ведет себя подобно сосредоточенной силе);
 - угол с нулевым радиусом скругления.

В окрестности сингулярности по мере сгущения сетки значение напряжения увеличивается без верхних ограничений (если не учитывать пластичность). Следует отметить, что указанные выше причины не приводят к появлению сингулярностей при моделировании стержневых конструкций одноосными (ферменными) и балочными элементами.

- Если сингулярности отдалены от наиболее важных зон, их можно просто игнорировать при анализе результатов расчета. Например, перед отображением на экране дисплея поля напряжений здесь можно удалить из активного набора соответствующие элементы.

- Если же сингулярности расположены в интересующей зоне, следует скорректировать модель:

- заменить точечную силу эквивалентным давлением;
- «разнести» точечное закрепление на группу узлов;
- ввести скругления углов.

- При высоких требованиях к точности вычисления напряжений необходимо использовать подробную (мелкую) разбивку с детальным моделированием интересующих зон конструкции. Любые упрощения модели могут привести к большим погрешностям. Здесь обязательно должна быть проверена сходимость решения по напряжениям.

- Если интерес представляют лишь перемещения или номинальные напряжения, то можно использовать сравнительно грубую сетку. Незначительные детали геометрии здесь могут быть опущены.

- При выполнении модального анализа или анализа общей устойчивости также можно опустить мелкие детали. Низшие формы колебаний можно отследить на достаточно грубой сетке. Сложные формы колебаний могут потребовать равномерной, сравнительно мелкой разбивки.

- Всегда следует проверять решение на приемлемость и логичность. Здесь необходимо дать ответы на следующие вопросы:

- Прежде всего, убедитесь, правильны ли перемещения? Напряжения являются результатами уже «второй очереди».
- Сходятся ли результаты МКЭ-анализа с «ручными» расчетами или с экспериментом?
- Уравновешивают ли силы реакции приложенные нагрузки?
- Где обнаружены максимальные напряжения? Если это область сингулярности, то данные значения, вообще говоря, бессмысленны.
- Адекватна ли разбивка?
 - Если перемещения являются достаточно большими (т.е. соизмеримыми с размерами тела) или напряжения превысили предел текучести, то либо неправильно задана нагрузка, либо следует выполнить уже нелинейный анализ.

Вопросы по теме 11

1) Какие виды напряженно-деформированных состояний относятся к плоской задаче теории упругости?

1. Плоская деформация.
2. Обобщенное плоское напряженное состояние.
3. Обобщенное плоское деформированное состояние.
4. Осесимметричное напряженно-деформированное состояние.
5. Антиплоская деформация.
6. Кручение круглых стержней.

2) Какие из перечисленных ниже задач являются примером плоской деформации?

1. Задача о плотине.
2. Задача о тоннеле метрополитена.
3. Длинное призматическое или цилиндрическое тело при действии нагрузки, перпендикулярной оси тела и постоянной вдоль нее.
4. Тело, помещенное между двумя абсолютно жесткими плитами, расстояние между которыми остается неизменным, и сжимаемое силами, параллельными плоскостям плит.
5. Тонкая пластина, нагруженная по контуру силами, параллельными ее плоскости и равномерно распределенными по толщине.
6. Тонкая пластина под действием равномерного поперечного давления.

3) Какие из перечисленных ниже задач являются примером обобщенного плоского напряженного состояния?

1. Задача о плотине.
2. Задача о тоннеле метрополитена.
3. Длинное призматическое или цилиндрическое тело при действии нагрузки, перпендикулярной оси тела и постоянной вдоль нее.
4. Тело, помещенное между двумя абсолютно жесткими плитами, расстояние между которыми остается неизменным, и сжимаемое силами, параллельными плоскостям плит.
5. Тонкая пластина, нагруженная по контуру силами, параллельными ее плоскости и постоянными по толщине.
6. Тонкая пластина под действием постоянного поперечного давления.

4) Какое деформированное состояние называется плоской деформацией?

1. Когда перемещение точек тела происходит параллельно одной плоскости.
2. Когда отличны от нуля лишь перемещения, перпендикулярные одной плоскости.

3. Когда равны нулю деформации в одной плоскости.
 4. Когда отличны от нуля лишь деформации, перпендикулярные одной плоскости.
 5. Когда все сдвиговые деформации равны нулю.
- 5) Сколько дифференциальных уравнений равновесия в плоской задаче теории упругости?
1. Одно.
 2. Два.
 3. Три.
 4. Четыре.
 5. Пять.
 6. Шесть.
- 6) Сколько дифференциальных уравнений равновесия в осесимметричной задаче теории упругости?
1. Одно.
 2. Два.
 3. Три.
 4. Четыре.
 5. Пять.
 6. Шесть.
- 7) Сколько геометрических соотношений Коши в плоской задаче теории упругости?
1. Одно.
 2. Два.
 3. Три.
 4. Четыре.
 5. Пять.
 6. Шесть.
- 8) Сколько геометрических соотношений Коши в осесимметричной задаче теории упругости?
1. Одно.
 2. Два.
 3. Три.
 4. Четыре.
 5. Пять.
 6. Шесть.
- 9) Какие компоненты тензора деформации равны нулю в случае плоской деформации?
1. X-компонент.
 2. Y-компонент.
 3. Z-компонент.
 4. XY-компонент.

5. YZ-компонент.

6. ZX-компонент.

10) Какие компоненты тензора напряжений равны нулю в случае плоской деформации?

1. X-компонент.

2. Y-компонент.

3. Z-компонент.

4. XY-компонент.

5. YZ-компонент.

6. ZX-компонент.

11) Какие компоненты тензора деформации равны нулю в случае обобщенного плоского напряженного состояния?

1. X-компонент.

2. Y-компонент.

3. Z-компонент.

4. XY-компонент.

5. YZ-компонент.

6. ZX-компонент.

12) Какие компоненты тензора напряжений равны нулю в случае обобщенного плоского напряженного состояния?

1. X-компонент.

2. Y-компонент.

3. Z-компонент.

4. XY-компонент.

5. YZ-компонент.

6. ZX-компонент.

13) Какие компоненты тензора деформации равны нулю в случае осесимметричного напряженно-деформированного состояния?

1. X-компонент.

2. Y-компонент.

3. Z-компонент.

4. XY-компонент.

5. YZ-компонент.

6. ZX-компонент.

14) Какие компоненты тензора напряжений равны нулю в случае осесимметричного напряженно-деформированного состояния?

1. X-компонент.

2. Y-компонент.

3. Z-компонент.

4. XY-компонент.

5. YZ-компонент.

6. ZX-компонент.

15) Что называется силовой схемой конструкции?

1. Упрощенное изображение конструкции, которое фигурирует в расчете.
2. Конструкция после исключения элементов, которые не участвуют в силовой работе.
3. Конечно-элементная модель.
4. Геометрическая модель.

16) Что называется расчетной схемой?

1. Упрощенное изображение конструкции, которое фигурирует в расчете.
2. Конструкция после исключения элементов, которые не участвуют в силовой работе.
3. Конечно-элементная модель.
4. Геометрическая модель.

17) Какие расчетные схемы обычно выбираются для стержневых конструкций?

1. Ферма.
2. Рама.
3. Пластина.
4. Оболочка.
5. Сдвиговая панель.
6. Тело вращения.

18) Какая расчетная схема стержневой конструкции является наиболее простой?

1. Ферма.
2. Рама.
3. Пластина.
4. Оболочка.
5. Сдвиговая панель.
6. Тело вращения.

19) Какие силовые факторы возникают в сечениях стержней фермы?

1. Осевая сила.
2. Перерезывающие силы.
3. Изгибающие моменты.
4. Крутящий момент.

20) Какие силовые факторы возникают в сечениях стержней рамы?

1. Осевая сила.
2. Перерезывающие силы.
3. Изгибающие моменты.

4. Крутящий момент.

21) Что называется ферменным элементом?

1. Прямолинейный стержень, который присоединяется к другим элементам посредством идеальных шарниров.
2. Прямолинейный брус, способный воспринимать все виды нагрузок.
3. Прямолинейный стержень, работающий только на кручение.
4. Прямолинейный брус, работающий только на изгиб.

22) Что называется балочным элементом?

1. Прямолинейный стержень, который присоединяется к другим элементам посредством идеальных шарниров.
2. Прямолинейный брус, способный воспринимать все виды нагрузок.
3. Прямолинейный стержень, работающий только на кручение.
4. Прямолинейный брус, работающий только на изгиб.

23) Какими данными однозначно определяется ферменный элемент?

1. Двумя узлами.
2. Площадью поперечного сечения.
3. Моментами инерции сечения относительно двух его главных центральных осей.
4. Моментом инерции на кручение.
5. Свойствами материала.
6. Центробежным моментом инерции сечения.
7. Полярным моментом инерции сечения.

24) Какими данными однозначно определяется балочный элемент?

1. Двумя узлами.
2. Площадью поперечного сечения.
3. Моментами инерции сечения относительно двух его главных центральных осей.
4. Моментом инерции на кручение.
5. Свойствами материала.
6. Центробежным моментом инерции сечения.
7. Полярным моментом инерции сечения.

25) Какие расчетные схемы обычно выбираются для тонкостенных конструкций?

1. Ферма.
2. Рама.
3. Оболочка.
4. Пластина.
5. Мембрана.
6. Сдвиговая панель.

7. Тело вращения.

26) Какая расчетная схема тонкостенной конструкции является наиболее общей?

1. Оболочка.
2. Пластина.
3. Мембрана.
4. Сдвиговая панель.

27) Какая расчетная схема тонкостенной конструкции является наиболее простой?

1. Оболочка.
2. Пластина.
3. Мембрана.
4. Сдвиговая панель.

28) Какие физические гипотезы используются в теории пластин и оболочек для сведения трехмерной задачи к двухмерной?

1. Прямых нормалей.
2. О независимом повороте нормали.
3. О недеформируемости срединной поверхности.
4. Плоских сечений.
5. О плоском законе распределения осевых деформаций.

29) Какие гипотезы учитывают деформации поперечного сдвига?

1. Кирхгофа-Лява.
2. Типа Тимошенко.
3. Миндлина-Рейсснера.
4. О недеформируемости срединной плоскости.
5. О ненадавливании слоев друг на друга.

30) Как работает оболочка?

1. На растяжение-сжатие в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
2. На сдвиг в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
3. На изгиб.
4. На кручение.

31) Как работает пластина, если принимается допущение о недеформируемости срединной плоскости?

1. На растяжение-сжатие в своей плоскости.
2. На сдвиг в своей плоскости.
3. На изгиб.
4. На кручение.

32) Как работает мембрана?

1. На растяжение-сжатие в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
2. На сдвиг в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
3. На изгиб.
4. На кручение.

33) Как работает сдвиговая панель?

1. На растяжение-сжатие в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
2. На сдвиг в плоскостях, касательных к срединной поверхности.
3. На изгиб.
4. На кручение.

34) Во сколько раз характерный размер должен превышать толщину, чтобы пластину (или) оболочку можно было считать тонкой?

1. В три раза.
2. В пять раз.
3. В десять раз.
4. В пятьдесят раз.
5. В сто раз.

35) В чем суть гипотезы Кирхгофа-Лява?

1. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, остается прямолинейным, нормальным к деформируемой срединной поверхности и сохраняет свою длину.
2. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, не искривляется, но в общем случае не остается нормальным к деформируемой срединной поверхности.
3. Точки, лежащие на срединной поверхности, перемещаются перпендикулярно этой поверхности.
4. Отсутствует надавливание между слоями.
5. Напряжения постоянны по толщине.

36) В чем суть гипотезы типа Тимошенко?

1. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, остается прямолинейным, нормальным к деформируемой срединной поверхности и сохраняет свою длину.
2. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, не искривляется, но в общем случае не остается нормальным к деформируемой срединной поверхности.
3. Точки, лежащие на срединной поверхности, перемещаются перпендикулярно этой поверхности.
4. Отсутствует надавливание между слоями.
5. Напряжения постоянны по толщине.

37) В чем суть гипотезы Миндлина-Рейсснера?

1. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, остается прямолинейным, нормальным к деформируемой срединной поверхности и сохраняет свою длину.
2. Любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, не искривляется, но в общем случае не остается нормальным к деформируемой срединной поверхности.
3. Точки, лежащие на срединной поверхности, перемещаются перпендикулярно этой поверхности.
4. Отсутствует надавливание между слоями.
5. Напряжения считаются постоянными по толщине.

38) Как по-другому называется гипотеза прямых нормалей?

1. Кирхгофа-Лява.
2. Типа Тимошенко.
3. Миндлина-Рейсснера.
4. Бернулли-Эйлера.
5. Ньютона-Рафсона.

39) Как по-другому может называться гипотеза о независимом повороте нормали?

1. Кирхгофа-Лява.
2. Типа Тимошенко.
3. Миндлина-Рейсснера.
4. Бернулли-Эйлера.
5. Ньютона-Рафсона.

40) Какие конечные элементы называются совместными?

1. Обеспечивающие непрерывность поля перемещений.
2. Обеспечивающие непрерывность поля деформаций.
3. Обеспечивающие непрерывность поля напряжений.
4. Если аппроксимация перемещений и геометрии осуществляется с помощью одних и тех же соотношений.
5. Когда углы поворота нормали выражаются через производные от перемещений срединной поверхности.

41) Какие конечные элементы называются изопараметрическими?

1. Обеспечивающие непрерывность поля перемещений.
2. Обеспечивающие непрерывность поля деформаций.
3. Обеспечивающие непрерывность поля напряжений.
4. Если аппроксимация перемещений и геометрии осуществляется с помощью одних и тех же соотношений.
5. Когда углы поворота нормали выражаются через производные от перемещений срединной поверхности.

42) Каковы преимущества объемной модели как расчетной схемы?

1. Высокая точность идеализации геометрии.

2. Возможность использования импортированной из CAD-систем геометрии при минимальной доработке.
 3. Пониженные требования к ресурсам компьютера.
 4. Простота анализа результатов расчета.
- 43) Каковы недостатки объемной модели как расчетной схемы?
1. Невысокая точность идеализации геометрии.
 2. Невозможность использования импортированной из CAD-систем геометрии.
 3. Чрезмерно высокие требования к ресурсам компьютера.
 4. Сложность анализа результатов расчета.
- 44) Как ведут себя напряжения в области сингулярности при сгущении сетки?
1. Увеличиваются неограниченно.
 2. Уменьшаются неограниченно.
 3. Увеличиваются вплоть до некоторого предела.
 4. Уменьшаются вплоть до некоторого предела.
 5. Остаются неизменными.
- 45) В каких случаях возникает сингулярность напряжений?
1. При наличии сосредоточенных сил и/или точечных закреплений в объемной модели.
 2. При наличии сосредоточенных сил и/или точечных закреплений в оболочечной модели.
 3. При наличии сосредоточенных сил и/или точечных закреплений в стержневой модели.
 4. При наличии углов с нулевым радиусом скругления в объемной модели.
 5. При наличии углов с нулевым радиусом скругления в оболочечной модели.
 6. При наличии углов с нулевым радиусом скругления в стержневой модели.
- 46) Какими способами можно избавиться от сингулярностей?
1. Заменить сосредоточенную силу эквивалентным давлением.
 2. Разнести точечное закрепление на группу узлов.
 3. Ввести скругления углов.
 4. Сгустить сетку.
 5. Добавить в модель фиктивные стержневые элементы с нулевой площадью поперечного сечения.
- 47) В каких случаях можно использовать относительно грубую сетку?
1. Когда интерес представляют лишь перемещения.
 2. Когда интерес представляют лишь номинальные напряжения.
 3. При определении низших форм колебаний.

4. При определении высших форм колебаний.
5. При анализе общей устойчивости.
6. При анализе местной устойчивости.

12 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

«Исследование напряженно-деформированного состояния прямоугольной пластины с отверстием при одноосном растяжении»

Исходные данные: геометрия пластины показана на рисунке 12.1; толщина пластины 2 мм; материал – сталь 20кп (модуль упругости $2,12 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 295 МПа); погонная нагрузка 160 Н/мм.

Допущение: ввиду малости толщины пластины можно считать, что здесь имеет место обобщенное плоское напряженное состояние, т.е. можно ограничиться решением плоской задачи теории упругости.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние пластины и исследовать концентрацию напряжений, обусловленную отверстием.

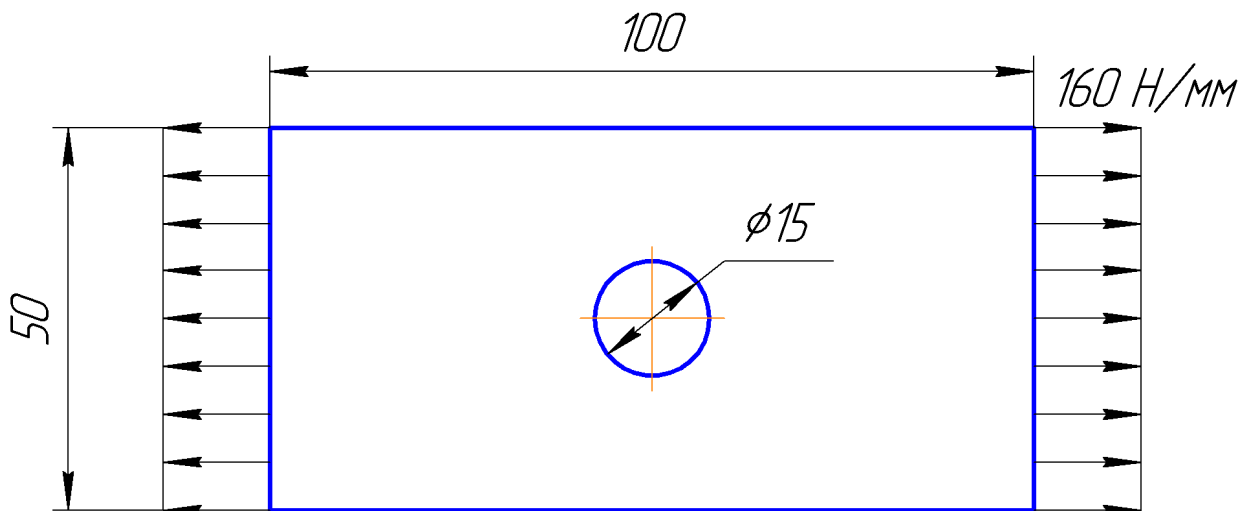


Рисунок 12.1 – Геометрия пластины

Как известно, плоская задача теории упругости имеет два вида: плоская деформация и обобщенное плоское напряженное состояние. Однако в программе MSC.Nastran реализован только первый из них. Следует отметить, что решения задач о плоской деформации и обобщенном плоском напряженном состоянии в принципе проводятся с помощью одних и тех же уравнений. Отличие состоит лишь в применении разных упругих постоянных. В случае обобщенного плоского напряженного состояния используются обычные мо-

дугу упругости E и коэффициент Пуассона μ , а при плоской деформации – E' и μ' , где

$$E' = \frac{E}{1 - \mu^2}; \quad \mu' = \frac{\mu}{1 - \mu}.$$

Отсюда можно получить обратные соотношения:

$$E = E' \frac{1 + 2\mu'}{(1 + \mu')^2}; \quad \mu = \frac{\mu'}{1 + \mu'}.$$

Таким образом, в нашем случае при решении задачи о плоской деформации можно получить результаты для обобщенного плоского напряженного состояния, приняв $E' = 2,12 \cdot 10^5$ МПа и $\mu' = 0,3$. Это будет выполняться, если при задании свойств материала ввести следующие значения:

$$E = 2,12 \cdot 10^5 \frac{1 + 2 \cdot 0,3}{(1 + 0,3)^2} = 2,0071 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$\mu = \frac{0,3}{1 + 0,3} = 0,23077.$$

Благодаря двойной симметрии конструкции и нагрузки здесь можно ограничиться рассмотрением четверти пластины. Начало системы координат поместим в центр отверстия и будем исследовать часть пластины, лежащую в первом квадранте (рисунок 12.2).

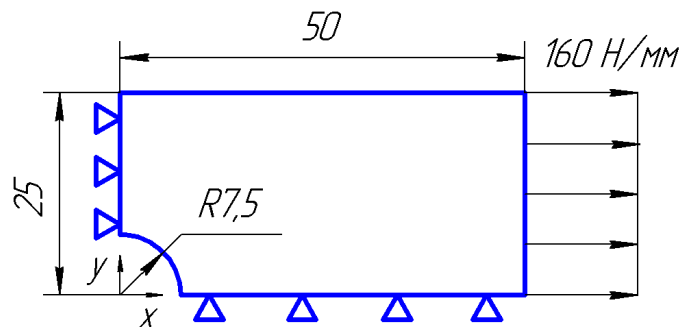


Рисунок 12.2 – Расчетная схема задачи

Данную модель можно построить различными способами. Рассмотрим один из них, связанный с генерацией вырезаемой (trimmed) поверхности.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных.

В полосе меню выбираем команду *File>New*.

В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab1.db, *OK*.

2. Задать начальные установки.

В автоматически появляющейся справа диалоговой панели «New Model Preference» меняем только точность геометрического моделирования. При этом в разделе «Tolerance» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 50 (в мм), как показано на рисунке 12.3. Для принятия начальных установок нажимаем кнопку *OK*.

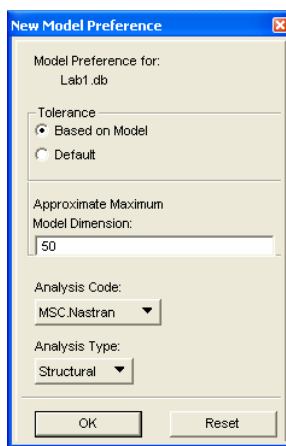


Рисунок 12.3 – Ввод начальных установок

3. Построить точки согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	Ввод
1	0	0	[0 0 0]
2	7,5	0	[7.5 0 0]
3	50	0	[50 0 0]
4	50	25	[50 25 0]
5	0	25	[0 25 0]
6	0	7,5	[0 7.5 0]

Выбираем приложение «Geometry», нажав соответствующую кнопку главного окна программы. При этом справа появляется диалоговая панель, которая при первом входе в данное приложение имеет вид, показанный на рисунке 12.4. В противном случае в выпадающем меню «Action» (действие) следует выбрать «Create» (создать), в меню «Object» (объект) – Point (точка) и в меню «Method» (метод) – XYZ (по трем координатам).

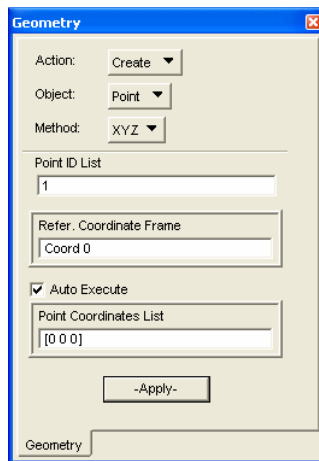



Рисунок 12.4 – Ввод координат точек

Номер точки в поле «Point ID List» здесь можно не задавать, поскольку он назначается программой автоматически. При этом создаваемая точка получит минимально возможный номер. Поскольку точек еще нет, первая получит номер 1, вторая – 2 и т.д.


В поле «Refer. Coordinate Frame» указывается базовая система координат, относительно которой интерпретируются вводимые значения. По умолчанию в качестве таковой выбирается глобальная декартова система координат, имеющая номер 0.

При установленном флаге «Auto Execute» при определенных условиях (например, при графическом указании объектов либо, когда ввод с клавиатуры завершается нажатием *Enter*) команда будет выполняться автоматически после ввода всех необходимых данных.

На начальных этапах работы в среде MSC.Patran рекомендуется отключать опцию «Auto Execute». В противном случае неопытному пользователю сложно понять, была выполнена команда или нет.

В поле «Point Coordinate List» последовательно вводим координаты точек в квадратных скобках, как показано в последнем столбце таблицы (в качестве разделителя помимо пробела можно использовать запятую). Каждый ввод завершаем нажатием кнопки *-Apply-*. Черточки здесь означают, что данную команду можно отменить с помощью кнопки отката  (Undo) панели инструментов.

4. Для удобства графического указания включить отображение ссылочных номеров геометрических объектов.

Воспользуемся кнопкой  (Label Control) панели инструментов. При этом ниже появляется дополнительная панель (рисунок 12.5), где следует нажать вторую слева кнопку.

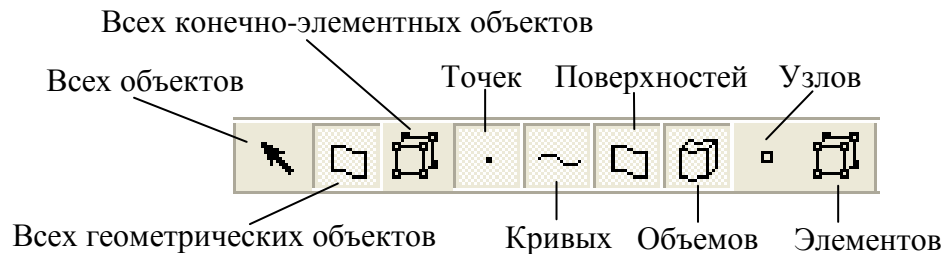


Рисунок 12.5 – Включение нумерации

5. Построить линии, представляющие границы модели.

Сначала для построения прямой линии по двум концевым точкам в выпадающих меню приложения «Geometry» выбираем сочетание Create/Curve/Point (рисунок 12.6).

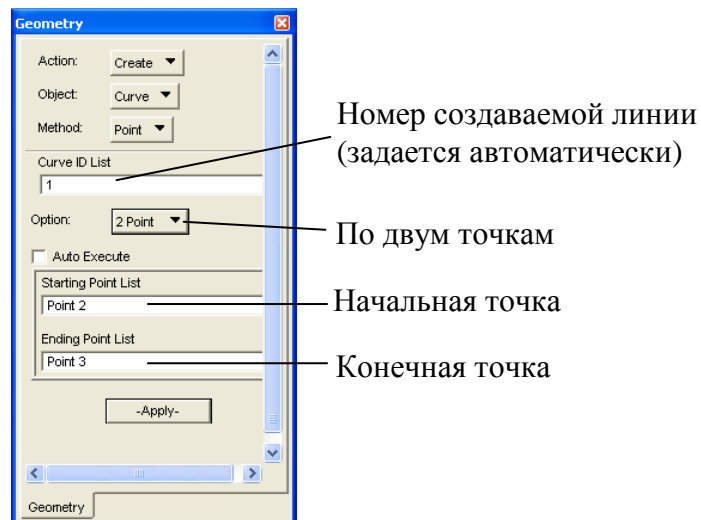


Рисунок 12.6 – Построение прямой линии

По умолчанию здесь установлена опция 2 Point (по двум точкам), которая нас устраивает.

Щелчком левой кнопки мыши помещаем текстовый курсор в поле «Starting Point List» и в графическом окне также при помощи левой кнопки мыши указываем точку 2. В данном поле должна появиться запись Point 2.

Точно так же активизируем область ввода «Ending Point List» и указываем точку 3. При этом появляется запись Point 3.

Если снят флаг «Auto Execute», то для завершения операции нажимаем кнопку *-Apply-*.

Аналогично строим прямые линии между точками 3 и 4, 4 и 5, 5 и 6.

Далее для построения дуги окружности по двум концевым точкам на заданной плоскости в выпадающих меню приложения «Geometry» выбираем сочетание Create/Curve/2D Arc2Point (рисунок 12.7).

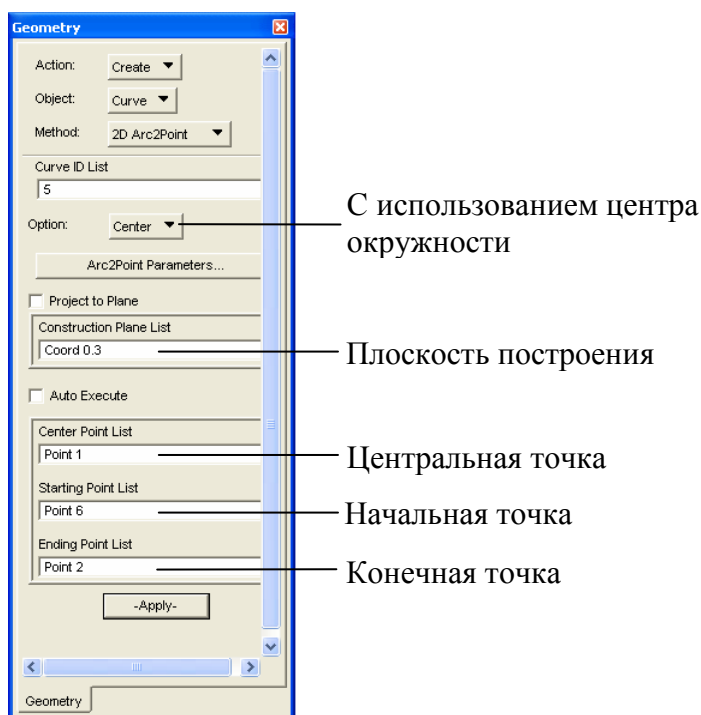


Рисунок 12.7 – Построение дуги окружности

По умолчанию здесь установлена опция Center (с использованием центра окружности).

Запись Coord 0.3 поле «Coordinate Plane List» означает, что плоскость построения перпендикулярна оси Z глобальной декартовой системы координат.

Активизируем поле «Center Point List» и в графическом окне указываем точку 1, аналогично для поля «Starting Point List» указываем точку 6, а для поля «Ending Point List» – точку 2. Для завершения ввода (при отключенной опции автоматического выполнения) нажимаем кнопку *-Apply-*.

Получаемое при этом в графическом окне изображение показано на рисунке 12.8.



Рисунок 12.8 – Точки и линии с нумерацией

6. Объединить в одну линии, образующие внешний контур модели.
Для формирования составной кривой используем сочетание Create/
Curve/Chain (рисунок 12.9).

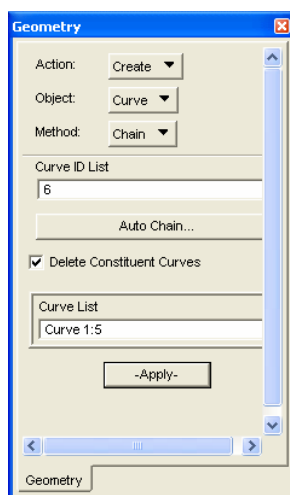


Рисунок 12.9 – Формирование составной кривой

Активизируем поле «Curve List» и указываем в графическом окне сразу все кривые, растягивая (при нажатой левой кнопки мыши) прямоугольник выбора так, чтобы он охватил модель целиком. В данном поле должна появиться запись Curve 1:5, означающая ссылку на кривые с 1 по 5.

Нажимаем *-Apply-*.

На вопрос «Do you wish to delete the original curves?» (Вы хотите удалить исходные кривые?), который появляется при установленном флаге «Delete Constituent Curves», отвечаем нажатием кнопки *Yes* (да).

7. Построить плоскую trimmed-поверхность.
Напомним, что trimmed-поверхность – это сложная поверхность, вырезаемая из простой. Она имеет более четырех кромок и может содержать отверстия.

Для построения такой поверхности выбираем сочетание Create/Surface/Trimmed (рисунок 12.10).

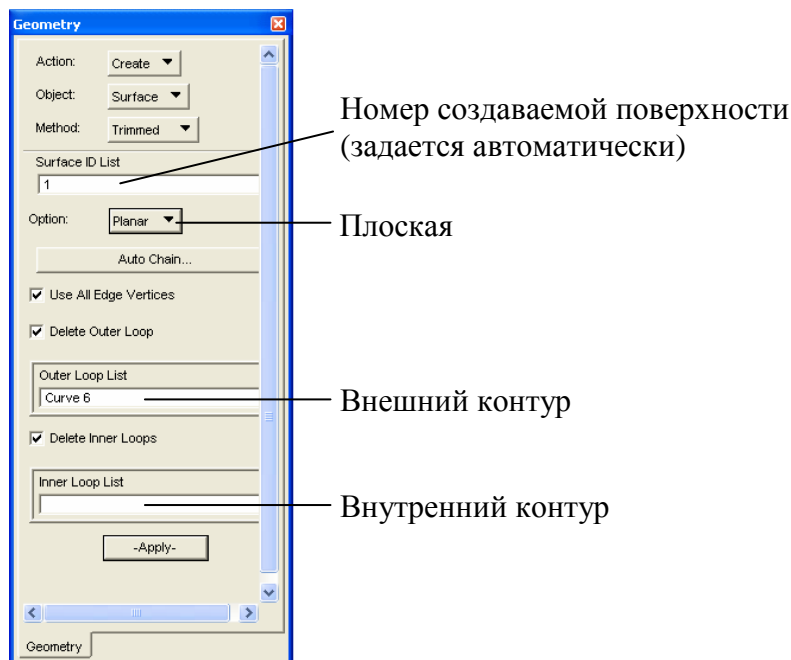



Рисунок 12.10 – Построение trimmed-поверхности

Для построения плоской поверхности в выпадающем меню «Option» выбираем пункт Planar (плоская).

Далее активизируем поле «Outer Loop List» и указываем внешнюю границу, т.е. единственную кривую 6.

После нажатия кнопки *Apply* здесь также появляется вопрос: Вы хотите удалить исходные кривые? Нажимаем *Yes*.

Для включения режима отображения промежуточных линий воспользуемся кнопкой  панели инструментов.


8. Задать опорные точки сетки.

Выбираем приложение «Elements».

Сначала для задания равномерного расположения опорных точек сетки используем сочетанием Create/Mesh Seed/Uniform (рисунок 12.11,а).

Здесь можно задавать либо число элементов вдоль кривой (опция «Number of Elements»), либо размер элементов (опция «Element Length (L)'). Указываем первый параметр.

Вводим число элементов: Number = 12.

Активизируем поле «Curve List», в появляющемся рядом пиктографическом меню устанавливаем фильтр  (выбор кромки) и указываем кром-

ку на контуре отверстия. При этом после нажатия кнопки *-Apply-* или сразу (если установлен флаг «Auto Execute») появятся желтые кружочки, обозначающие опорные точки.

Напомним, что запись Surface 1.5 означает ссылку на кромку 5 поверхности 1.

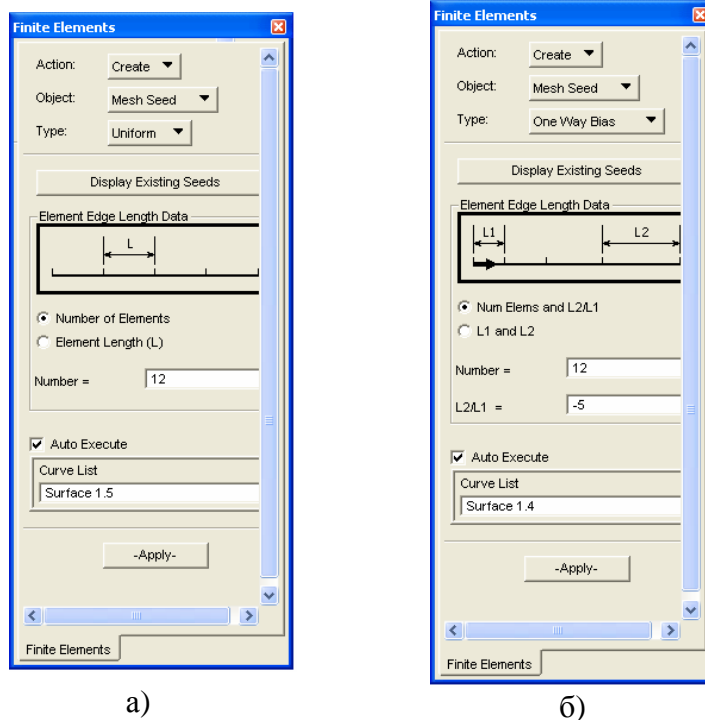


Рисунок 12.11 – Задание опорных точек

Для сгущения сетки в области концентрации напряжений воспользуемся случаем неравномерного расположения Mesh Seeds при изменении в одном направлении – сочетание Create/Mesh Seed/One Way Bias (рисунок 12.11,б).

Указываем опцию «Num Elems and L2/L1» (число элементов и отношение длины стороны элемента в конце линии к соответствующему размеру в начале линии).

Вводим число элементов и отношение длин: Number = 12; L2/L1 = -5 (где число 5 со знаком минус означает 1/5 или 0.2). Следует отметить, что положительные направления кромок здесь указываются бирюзовыми стрелками.

Активизируем поле «Curve List» и указываем левую кромку, *Apply*.

9. Разбить поверхность на конечные элементы.

Для генерации сетки в том же приложении устанавливаем сочетание Create/Mesh/Surface (рисунок 12.12).

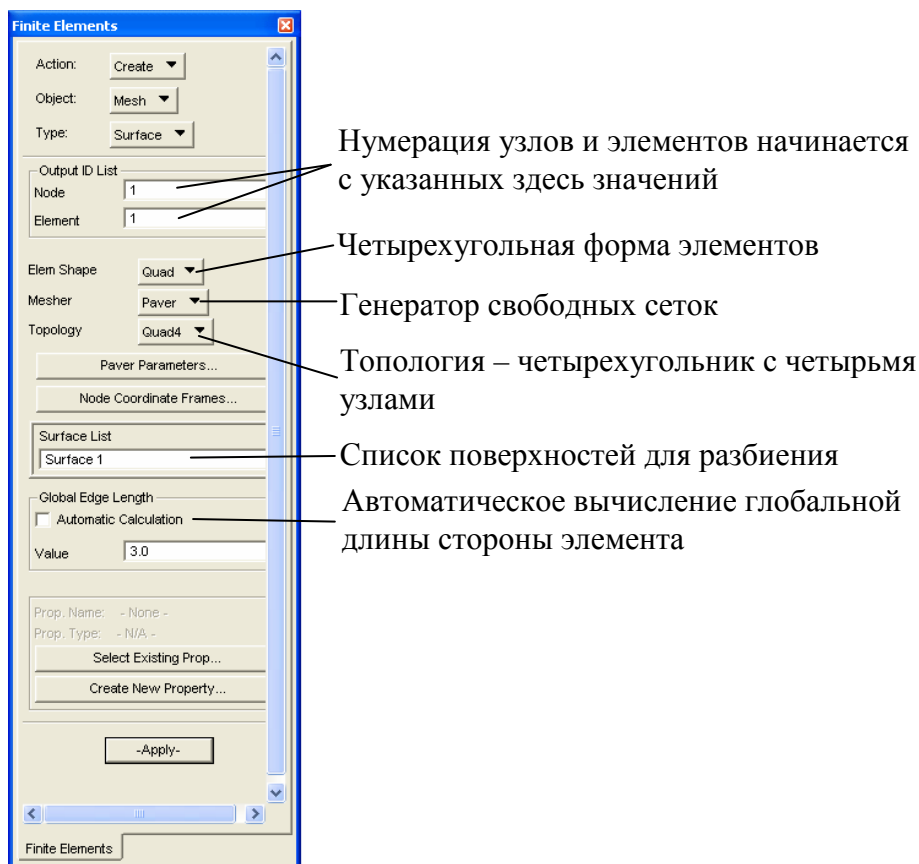


Рисунок 12.12 – Генерация сетки

В выпадающем меню «Elem Shape» (форма элементов) выбираем пункт Quad (четырехугольная). Поскольку построенная выше поверхность содержит более четырех кромок, т.е. является сложной, в меню «Mesher» (генератор сеток) указываем значение Paver (алгоритм построения свободных сеток на любых поверхностях). И наконец, в меню «Topology» (топология) выбираем Quad4 (четырехугольник с четырьмя узлами).

Активизируем поле «Surface List» и в графическом окне указываем поверхность 1.

В разделе «Global Edge Length» отключаем опцию автоматического вычисления глобальной длины стороны элемента и в поле «Value» вводим значение 3 (в мм).

Полученная после нажатия кнопки *-Apply-* разбивка представлена на рисунке 12.13.

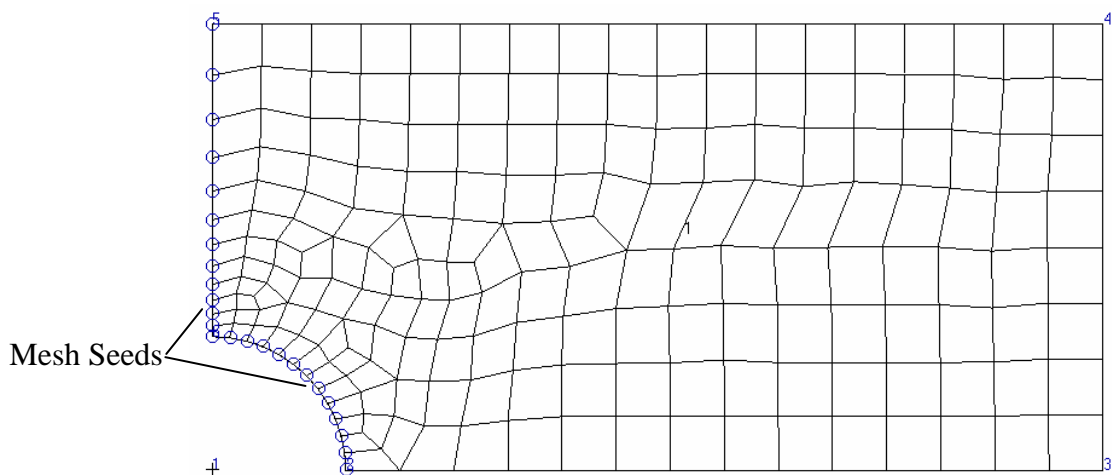


Рисунок 12.13 – Свободная сетка элементов

10. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «Materials». В верхней части появляющейся при этом диалоговой панели для ручного ввода свойств изотропного материала выбираем сочетание Create/Isotropic/Manual Input.

В поле «Material Name» вводим имя материала, например steel20.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* (ввод свойств). При этом появляется дополнительное окно, где по умолчанию установлена линейно-упругая модель состояния (Linear Elastic).

В соответствующие поля вводим:

«Elastic Modulus» = $2.0071e5$ (модуль упругости в МПа)

«Poisson Ratio» = 0.23077 (коэффициент Пуассона)

ОК.

В конце нажимаем кнопку *Apply*. При этом вновь созданная модель материала должна появиться в списке существующих материалов «Existing Materials».


11. Определить свойства элементов.

Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств плоских элементов устанавливаем сочетание Create/2D/2D Solid.


В поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например plane.

Установленные по умолчанию опции Plane Strain (плоская деформация) и Standard Formulation (стандартная формулировка) нас устраивают.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* (ввод свойств). При этом появляется дополнительное окно, где будет выбран стандартный элемент плоской деформации CQUAD4. В нашем случае здесь необходимо указать лишь материал.

С этой целью нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем steel20, после чего в поле «Material Name» должна появиться запись m:steel20. *OK*.

Затем для выбора области приложения введенных свойств нажимаем кнопку *Select Application Region*. Здесь также появляется дополнительное окно.

Активизируем поле «Select Members», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (поверхность или грань) и указываем поверхность 1. Должна появиться запись Surface 1.

После этого обязательно сначала нажимаем кнопку *Add* для добавления выбранной поверхности в область приложения (Application Region), затем *OK*.

Завершаем процесс задания свойств элементов нажатием кнопки *Apply*, причем вновь созданный набор свойств элементов должен появиться в списке существующих наборов «Prop. Sets».

12. Задать граничные условия.


Как видно из рисунка 12.2, граничные условия для рассматриваемой задачи представляют собой условия симметрии на линиях отсечения моделируемой части пластины. Для плоской задачи условия симметрии на линии задаются в виде запрета поступательных перемещений в направлении, перпендикулярном этой линии.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений устанавливаем сочетание Create/Displacement/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например sym_bot.

Нажимаем кнопку *Input Data* (ввод данных) и в поле «Translations» (поступательные перемещения) вводим $<, 0, >$, что соответствует запрету перемещений в направлении оси Y . *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кривая или кромка) и указываем нижнюю кромку поверхности. Здесь должна появиться запись Surface 1.1.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*. Имя sym_bot должно появиться в списке «Existing Sets».

Аналогично задаем условия симметрии и на левой кромке. Данному набору необходимо присвоить другое имя, например `sym_left`.

При вводе свойств для фиксации перемещений вдоль оси *X* следует записать `<0,, >`.

Не забудьте выбрать область приложения.

Следует отметить, что граничные условия изображаются пространственными стрелками, причем рядом указывается номер закрепленной степени свободы.

13. Приложить нагрузку.

В рассматриваемой задаче нагружение пластины осуществляется погонными силами интенсивностью 160 Н/мм, распределенными по коротким сторонам (см. рисунок 12.1).

В пакете MSC.Patran-Nastran распределенную нагрузку для плоской задачи следует задавать в виде давления, приложенного к соответствующей линии. При этом величина давления определяется отношением интенсивности погонной нагрузки к толщине пластины:

$$p = \frac{160}{2} = 80 \text{ МПа.}$$


В том же приложении выбираем сочетание `Create/Pressure/Element Uniform`.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например `load`.

В качестве типа целевых элементов выбираем поверхностные, т.е. «Target Element Type»: `2D`.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Edge Pressure» (давление на кромке) вводим значение `-80` (положительное давление направлено к поверхности и вызывает сжатие, а в нашем случае необходимо задать растяжение, поэтому мы вводим отрицательное число). *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: `Geometry`.

Активизируем поле «Select Surfaces or Edges», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кромка) и указываем правую кромку поверхности. Здесь должна появиться запись `Surface 1.2`.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*. Имя `load` должно появиться в списке «Existing Sets».

Приложенная нагрузка, а также граничные условия показаны на рисунке 12.14.

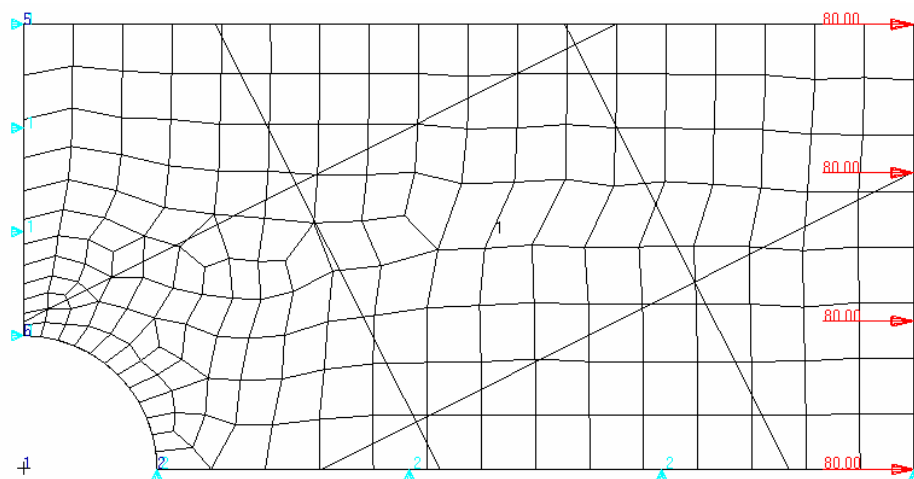


Рисунок 12.14 – Граничные условия и нагрузка

На этом завершается процесс создания расчетной модели.

14. Сохранить базу данных.

В полосе меню выбираем *File>Save*. В результате выполнения этой команды введенные данные по модели записываются в файл *Lab1.db*.

15. Запустить задачу на счет.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание *Analyze/Entire Model/Full Run*.

В нашем случае необходимо выполнить простейший (линейный статический) анализ с одним расчетным случаем. Поэтому просто нажимаем *Apply*, ничего не меняя.

При этом формируется файл исходных данных *Lab1.bdf* и в случае правильной настройки автоматически запускается решатель *MSC.Nastran*.

По окончании счета выдается звуковой сигнал.

16. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы *MSC.Patran*.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab1.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

Процесс присоединения файла результатов начинается и заканчивается соответственно следующими сообщениями в списке введенных команд:

`$# *** Begin: Attach Result File ***`

`$# *** End: Attach Result File ***`

Если второе сообщение не появляется либо файла lab1.xdb вообще нет, то скорее всего в модели имеется ошибка. Напомним, что сообщения об ошибках (Fatal Error) записываются в текстовый файл lab1.f06, который можно открыть с помощью любого тестового редактора.

17. Изобразить поле напряжений σ_{xx} на деформированном состоянии пластины.

Для рассматриваемой задачи интерес представляет распределение нормальных напряжений, действующих на площадках, перпендикулярных оси X.

Выбираем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание Create/Quick Plot.

В списке «Select Result Cases» должен находиться один случай результатов. Если данный список пустой, то либо вы не присоединили файл результатов расчета, либо в модели ошибка (см. файл lab1.f06). Выберем этот случай результатов, что приведет к заполнению двух нижних списков.


В списке «Select Fringe Result» в качестве величины для многоцветного представления ее поля указываем Stress Tensor (тензор напряжений).


Поскольку данная величина не является скалярной, ниже в выпадающем меню «Quantity» выбираем компоненту X Component.

Далее в списке «Select Deformation Result» в качестве результата для изображения деформированного состояния модели указываем строку Displacement, Translational (поступательные перемещения).

Установим флаг «Animate» для включения анимации.

Следует отметить, что с помощью кнопок-пиктограмм, расположенных в верхней части диалоговой панели, можно менять ее вид.

Так, вторая кнопка  (Fringe Attributes) устанавливает вид для настройки многоцветного представления поля. Здесь можно изменить палитру и стиль заливки, вывести на экран название выходной величины и ее экстремальные значения.

Третья кнопка  (Deform Attributes) устанавливает вид для настройки изображения деформированного состояния модели. При этом можно выбрать цвет и толщину линий отображения деформированного и недеформированного состояний модели, изменить масштаб для перемещений.

Нажимаем кнопку-пиктограмму *Deform Attributes*.

Под установленным флагом «Show Undeformed» (показать недеформированное состояние) для опции «Render Style» (стиль отображения недеформированного состояния) выбираем значение Free Edge (свободные кромки). В этом случае будут изображаться только исходные границы тела.

И наконец, нажимаем кнопку *Apply*.

Некоторое время займет формирование видео файла, после чего в графическом окне будет представлена анимация деформированного состояния с наложенным на него полем напряжений σ_{xx} . Кроме того, появится дополнительная панель «Animation Control».

Скорость анимации здесь регулируется бегунком «Animation Speed».

В случае необходимости изменения опций здесь следует временно прервать процесс анимации, установив флаг «Pause Animation».

Для полного завершения процесса анимации необходимо нажать одну из кнопок раздела «Stop Animation and ...».

Нажимаем *No Graphics Refresh* (не восстанавливать изображение). При этом результаты расчета останутся на экране (рисунке 12.15). Здесь справа располагается легенда, где каждый цвет соответствует определенному уровню напряжений.

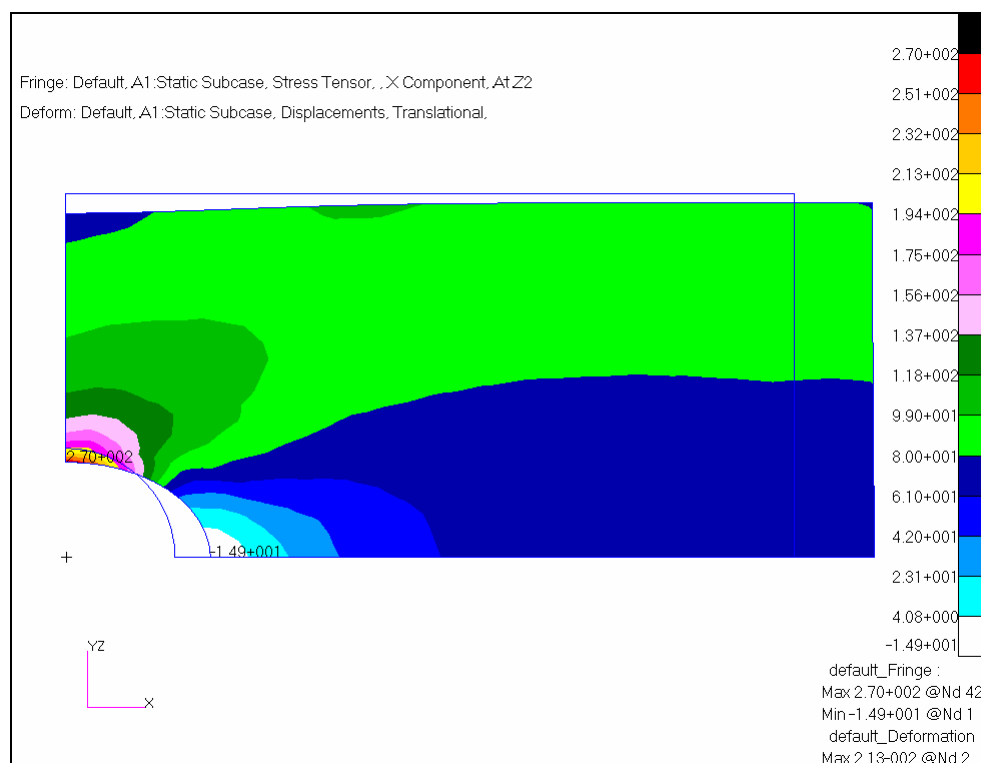



Рисунок 12.15 – Изображение поля напряжений (в МПа) на деформированном состоянии пластины

Для удаления результатов с экрана нажимаем кнопку  панели инструментов.


18. Построить эпюру напряжений σ_{xx} в среднем сечении.

Для построения двумерного графика в том же приложении устанавливаем сочетание *Create/Graph/Y vs X*.

В списке «*Select Result Cases*» указываем единственный случай результатов.

В списке «*Select Y Results*» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем *Stress Tensor* (тензор напряжений). Ниже в выпадающем меню «*Quantity*» указываем компоненту *X Component*.


В меню «*X*» за ось абсцисс принимаем *Path Length* (длину траектории).

Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

В выпадающем меню «*Addtl. Display Control*» (дополнительное управление изображением) выбираем *Curves* (кривые).

Активизируем поле выбора определяющих траекторию кривых «*Select Path Curves*» и в графическом окне указываем левую кромку. Должна появиться запись *Surface 1.4*.

В поле «*Points Per Segment*» (число точек на сегмент) вводим число 20.

Далее с помощью кнопки  устанавливаем вид для задания опций вычерчивания.

Для вывода результатов в глобальной декартовой системе координат в выпадающем меню «*Coordinate Transformation*» (преобразование координат) выбираем пункт *Global*.

После нажатия кнопки *Apply* в отдельном окне появляется график (рисунок 12.16). Ось абсцисс здесь представляет собой расстояние, отсчитываемое вдоль созданной траектории.

Отметим, что для удаления окна с графиком следует установить сочетание *Delete/Plots* и в списке «*Existing Plot Types*» выбрать *GRA_default_Graph, Apply*.

Вычислим коэффициент концентрации напряжений как отношение максимального напряжения σ_{\max} к номинальным напряжениям, равным приложенному давлению p :

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{p} = \frac{270}{80} = 3,375.$$

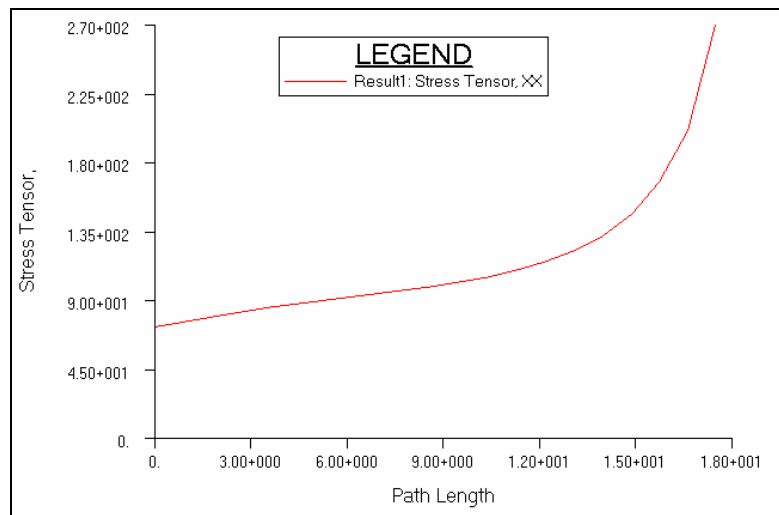


Рисунок 12.16 – Эпюра напряжений σ_{xx} (в МПа) вдоль левой кромки

Известно, что коэффициент концентрации для бесконечно широкой пластины равен 3, а для пластины конечной ширины (как в нашем случае) может быть больше.

Проверить точность полученного МКЭ-решения можно путем исследования его сходимости. Для этого необходимо выполнить расчет с более мелкой сеткой и сравнить полученный результат (например, по максимальному напряжению) с предыдущим.

19. Выйти из программы: *File > Quit*.

Замечание: Для отчета по лабораторной работе используется журнальный файл Lab1.db.jou, который создается автоматически.

13 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

«Решение плоской фермы»

Исходные данные: геометрия ферменной конструкции показана на рисунке 13.1; стержни круглого сечения 22x4 соединены сваркой в узлах; материал стержней – сталь 45 (модуль упругости $2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 360 МПа).

Допущение: поскольку конструкция состоит из длинных тонких стержней, работающих в основном на растяжение-сжатие, для нее можно использовать расчетную схему в виде фермы, предполагающую шарнирное соединение стержней в узлах.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние фермы; построить диаграмму осевых сил в стержнях; найти перемещение точки приложения нагрузки.

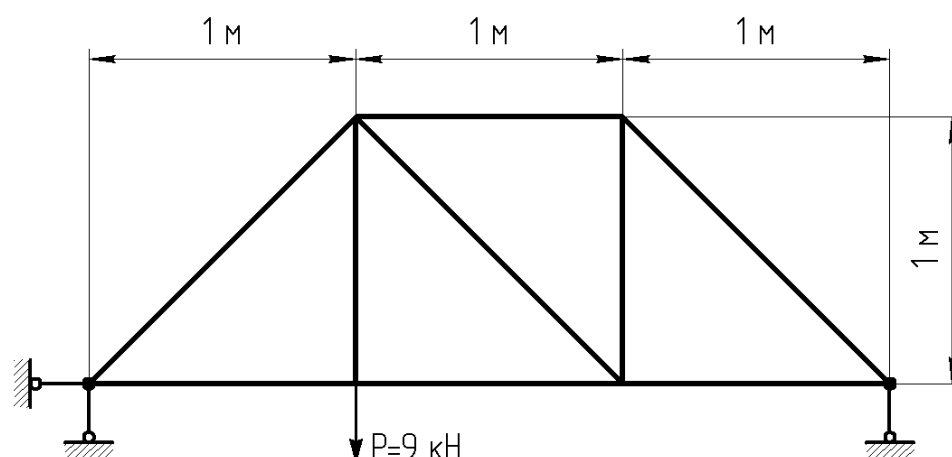


Рисунок 13.1 – Схема стержневой конструкции

Начало системы координат поместим в левую нижнюю точку. Пронумеруем узлы фермы, как показано на рисунке 13.2.

Следует отметить, что рассматриваемая ферма является статически определимой, она легко решается методом вырезания узлов. При определении осевых сил здесь несущественно, из какого материала изготовлены стержни и какова их площадь поперечного сечения. Эти параметры важны только для статически неопределимых систем, а также для нахождения перемещений. Однако МКЭ в любых случаях требует их задания. Поскольку по условию

задачи необходимо определить кроме осевых сил еще и перемещения, вычислим действительную площадь поперечного сечения стержней:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} (1 - \alpha^2) = \frac{\pi \cdot 22^2}{4} (1 - 0,636^2) = 226,2 \text{ мм}^2,$$

где

$$\alpha = \frac{D - 2t}{D} = \frac{22 - 2 \cdot 4}{22} = 0,636.$$

Здесь $D = 22 \text{ мм}$ – наружный диаметр стержня; $t = 4 \text{ мм}$ – толщина стенки.

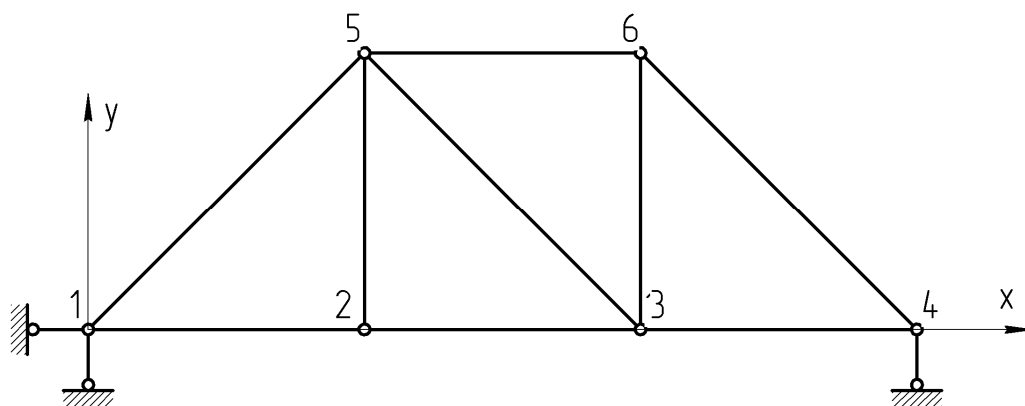


Рисунок 13.2 – Ферма с номерами узлов

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных.

В полосе меню выбираем команду *File>New*.

В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab2.db, *OK*.

2. Задать начальные установки.


В автоматически появляющейся справа диалоговой панели «New Model Preference» в разделе «Tolerance» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 3000 (в мм), *OK*.

3. Построить точки согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	Ввод
1	0	0	[0 0 0]
2	1000	0	[1000 0 0]
3	2000	0	[2000 0 0]
4	3000	0	[3000 0 0]
5	1000	1000	[1000 1000 0]
6	2000	1000	[2000 1000 0]

Выбираем приложение «Geometry» и в выпадающих меню «Action», «Create», «Object» для ввода точек по их координатам устанавливаем сочетание Create/Point/XYZ.

В поле «Point Coordinate List» последовательно вводим координаты точек в квадратных скобках, как показано в последнем столбце таблицы. Каждый ввод завершаем нажатием кнопки *-Apply-*.

С помощью кнопки  панели инструментов включаем отображение ссылочных номеров геометрических объектов.

4. Соединить точки прямыми линиями.

Для построения прямой линии по двум конечным точкам в том же приложении выбираем сочетание Create/Curve/Point.

Используем устанавливаемую по умолчанию опцию 2 Point (по двум точкам).

Щелчком левой кнопки мыши помещаем текстовый курсор в поле «Starting Point List» (начальная точка или точки) и в графическом окне также при помощи левой кнопки мыши указываем точку 1. В данном поле должна появиться запись Point 1.

Точно так же активизируем область ввода «Ending Point List» (конечная точка или точки) и указываем точку 2. При этом появляется запись Point 2. Если снят флаг «Auto Execute», то для завершения операции нажимаем кнопку *-Apply-*.

Аналогично строим прямые линии между точками 2-3, 3-4, 4-6, 6-5, 5-1, 2-5, 3-6, 3-5 (см. рисунок 13.2).

5. На геометрическую модель нанести сетку конечных элементов.

Для генерации сетки на линиях выбираем приложение «Elements» и устанавливаем сочетание Create/Mesh/Curve.

В качестве топологии элемента указываем Bar2 (линейный двухузловой).

Активизируем поле «Curve List» и в графическом окне указываем все кривые, используя зону выбора в виде прямоугольника. Должна появиться запись Curve 1:9.

Поскольку в дальнейшем мы будем использовать стержневые (ферменные) элементы, здесь на каждой линии обязательно должно быть по одному элементу. В противном случае данная система превратится в механизм, так как в местах соединения ферменных элементов автоматически задаются шарниры. При этом узел, содержащий только два стержня, лежащих на одной прямой, нарушает геометрическую неизменяемость системы, по-

сколькo он может получить бесконечно малое перемещение в направлении, перпендикулярном этим стержням, без деформации конструкции.

Учитывая это, в разделе «Global Edge Length» отключаем опцию автоматического вычисления глобальной длины стороны элемента и в поле «Value» вводим значение, превышающее размер самого длинного стержня, например 2000 (в мм).

В конце нажимаем *-Apply-*.

Вместо отображения номеров геометрических объектов включаем нумерацию конечно-элементных объектов.

Можно заметить, что в каждой точке соединения ферменных элементов содержится не один, а сразу несколько узлов. Их необходимо объединить.

6. Сшить конечно-элементную модель.

В том же приложении устанавливаем сочетание Equivalence/All/Tolerance Cube.

Нажимаем *Apply*. При этом места сшивки модели обводятся кружочками.

Отметим, что в поле «Nodes to be excluded» (узлы, исключаемые из процесса сшивки) ничего указывать не следует.

Теперь можно видеть, что в каждой точке содержится только один узел, т.е. модель является единой.

7. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «Materials». В верхней части появляющейся при этом диалоговой панели для ручного ввода свойств изотропного материала выбираем сочетание Create/Isotropic/Manual Input.

В поле «Material Name» вводим имя материала, например steel45.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* (ввод свойств). При этом появляется дополнительное окно, где по умолчанию установлена линейно-упругая модель состояния (Linear Elastic).

В соответствующие поля вводим:

«Elastic Modulus» = 2e5 (модуль упругости в МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

В конце нажимаем кнопку *Apply*. При этом вновь созданная модель материала должна появиться в списке существующих материалов «Existing Materials».


8. Определить свойства элементов.

Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств линейных стержневых элементов устанавливаем сочетание Create/1D/Rod.

В поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например truss.


Установленные по умолчанию опции General Section (сечение общего вида) и Standard Formulation (стандартная формулировка) нас устраивают.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* (ввод свойств). При этом появляется дополнительное окно, где будет выбран стержневой элемент общего сечения CROD.

Нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем steel45, после чего в поле «Material Name» должна появиться запись m:steel45.

В поле «Area» (площадь поперечного сечения) вводим значение 226.2 (в мм²). *OK*.

Затем для выбора области приложения введенных свойств нажимаем кнопку *Select Application Region*. Здесь также появляется дополнительное окно.

Активизируем поле «Select Members», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кривая или кромка) и указываем все кривые, пользуясь зоной выбора в виде прямоугольника. Должна появиться запись Curve 1:9.

После этого обязательно сначала нажимаем кнопку *Add* для добавления выбранной поверхности в область приложения (Application Region), затем *OK*.

Завершаем процесс задания свойств элементов нажатием кнопки *Apply*, причем вновь созданный набор свойств элементов должен появиться в списке существующих наборов «Prop. Sets».


9. Задать граничные условия.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений устанавливаем сочетание Create/Displacement/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например left.

Нажимаем кнопку *Input Data* (ввод данных) и в поле «Translations» (попутательные перемещения) вводим <0,0, >, что соответствует запрету перемещений в направлении осей *X* и *Y*. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем нижнюю левую точку. В данном месте помимо точки 1 (Point 1) располагаются еще и вершины двух кривых (Curve 1.1 и Curve 6.2). В появляющемся здесь автоматически окне «Selection Choices» можно выбрать любой из этих объектов.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*. Имя left должно появиться в списке «Existing Sets».

Аналогично задаем граничные условия и в правой точке. Данному набору необходимо присвоить другое имя, например right.

При вводе свойств для фиксации перемещений вдоль оси *Y* следует записать $\langle ,0, \rangle$.

Несмотря на то, что элемент CROD является трехмерным, при решении плоской фермы программа MSC.Nastran автоматически фиксирует перемещения всех узлов из ее плоскости.


10. Приложить нагрузку.

В том же приложении выбираем сочетание Create/Force/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например load.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Force» для задания силы, действующей против оси *Y*, вводим следующие компоненты (в Н): $\langle 0 -9000 0 \rangle$.
OK.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем точку, где приложена сила (см. рисунок 13.2). В окне «Selection Choices» здесь можно выбрать любой объект.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*. Имя load должно появиться в списке «Existing Sets».

11. Сохранить базу данных.

В полосе меню выбираем *File>Save*. В результате выполнения этой команды введенные данные по модели записываются в файл Lab2.db.

12. Запустить задачу на счет.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание *Analyze/Entire Model/Full Run*.

Для дополнительного вывода усилий в стержнях следует модифицировать расчетный случай. С этой целью нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем Default. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Далее нажимаем кнопку *Output Request* (запросы по выводу).

В верхнем списке «Select Result Type» указываем строку Element Forces (силы в элементах). *OK*.

Затем последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И наконец, собственно для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

При этом формируется файл исходных данных Lab2.bdf и в случае правильной настройки автоматически запускается решатель MSC.Nastran.

По окончании счета выдается звуковой сигнал.

13. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание Access Results/Attach XDB/Result Entities.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл lab2.xdb, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

14. Показать в векторном виде осевые силы, действующие в стержнях фермы.

Выбираем приложение «Results» и устанавливаем сочетание Create/Marker/Vector.

В списке «Select Result Cases» должен находиться один случай результатов. Если данный список пустой, то либо вы не присоединили файл результатов расчета, либо в модели ошибка (см. файл lab2.f06). Выберем этот случай результатов.

В списке «Select Vector Result» в качестве величины для векторного изображения указываем Bar Forces, Translational (силы в стержнях).

В выпадающем меню «Show As» (показать как) выбираем позицию Resultant (равнодействующая).

С помощью кнопки-пиктограммы  устанавливаем вид для выбора целевых объектов, на которых будут отображаться результаты.

В выпадающем меню «Target Entity» выбираем строку Elements и для поля «Select Elements» указываем все элементы. Должна появиться запись Elm 1:9.

После нажатия кнопки *Apply* формируется изображение, как показано на рисунке 13.3. При этом стрелка, направленная от первого узла элемента ко второму, обозначает растягивающую силу. В противном случае – сжимающую силу.

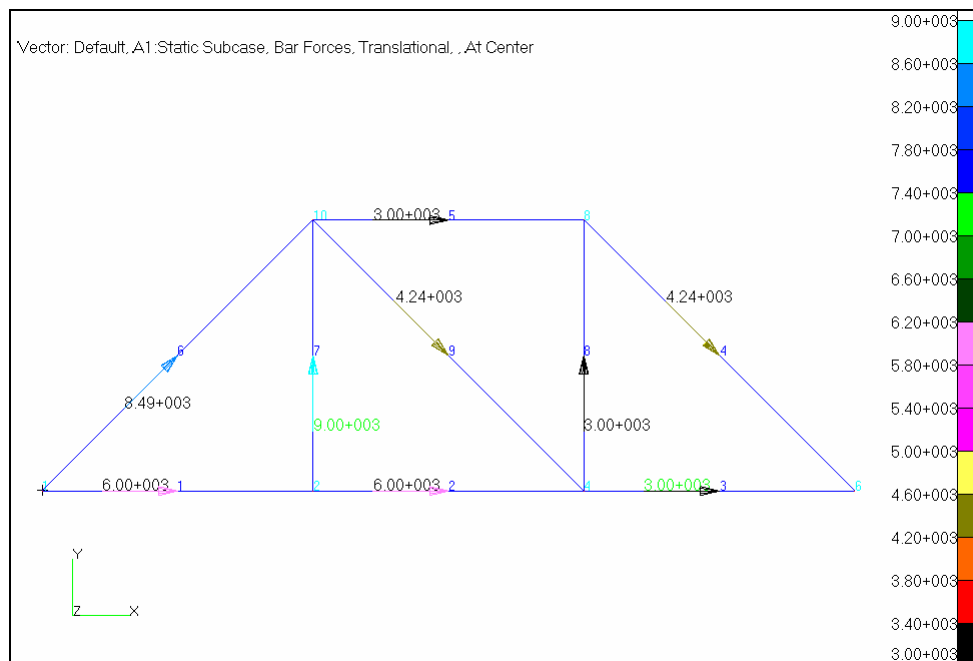


Рисунок 13.3 – Осевые силы в стержнях


15. Изобразить деформированное состояние фермы.

В том же приложении используем сочетание *Create/Deformation*.

В списке «*Select Deformation Result*» в качестве результата для изображения деформированного состояния модели указываем строку *Displacement, Translational* (поступательные перемещения).

Нажимаем *Apply*.

Видно, что максимальное перемещение возникает в точке приложения нагрузки и составляет 0,828 мм.

Отметим, что для изображения полей напряжений или осевых сил здесь следует воспользоваться способом представления результатов *Fringe* (заливка). При этом необходимо отключить опцию осреднения результатов в узлах, для чего нужно с помощью кнопки-пиктограммы  изменить вид диалоговой панели и в разделе «*Averaging Definition*» установить «*Domain*»: *None*.

16. Вывести список осевых сил.

Для формирования тестового отчета устанавливаем сочетание *Create/Report/Append File*.

В списке «Select Report Result» указываем Bar Forces, Translational (силы в стержнях).

В списке «Select Quantities» выбираем компоненту X Component.

С помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

В поле «File Name» вводим новое имя файла отчета, например Lab2.rpt.

Нажимаем *Apply*.

Файл Lab2.rpt записывается в рабочую папку пользователя. Он будет содержать следующий текст:

```
-Entity ID--X Component--
      1      6000.000000
      2      6000.000000
      3      3000.000000
      4     -4242.640625
      5     -3000.000000
      6     -8485.281250
      7      9000.000000
      8      3000.000000
      9     -4242.640625
```

В первом столбце здесь указываются номера элементов, а во втором – осевые силы (в Н).

В этот же файл можно добавить, например, реакции в опорах, для чего следует в списке «Select Report Result» указать Constraint Forces, Translational. В списке «Select Quantities» здесь придется выбрать уже две компоненты X Component и Y Component.

17. Выйти из программы: *File>Quit*.

Замечание: Для фермы предварительное построение геометрической модели, вообще говоря, не облегчает процесс создания конечно-элементной модели, поскольку ее узлы совпадают с узлами фермы, а каждый стержень является отдельным конечным элементом. Здесь более предпочтительным представляется метод прямого генерирования конечно-элементных объектов.

14 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

«Расчет пространственной рамы»

Исходные данные: геометрия рамы показана на рисунке 14.1; стержни имеют двутавровый профиль (высота профиля 100 мм; ширина полок 55 мм; толщина стенки 4,1 мм; толщина полок 5,7 мм); материал стержней – сталь Стбсп (модуль упругости $2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 325 МПа). На каждом участке стенка двутаврового профиля располагается в вертикальной плоскости.

Допущение: жесткое соединение узлов рамы предполагает работу стержней на растяжение-сжатие, изгиб и кручение.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние рамы; построить эпюры сил и моментов в стержнях рамы; найти максимальное перемещение.

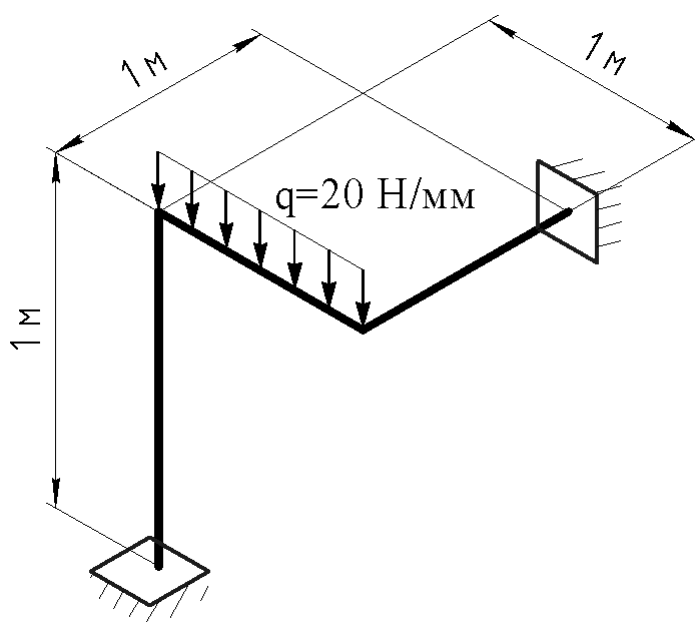


Рисунок 14.1 – Схема конструкции

Начало системы координат поместим в левую нижнюю точку; пронумеруем все точки рамы, как показано на рисунке 14.2.

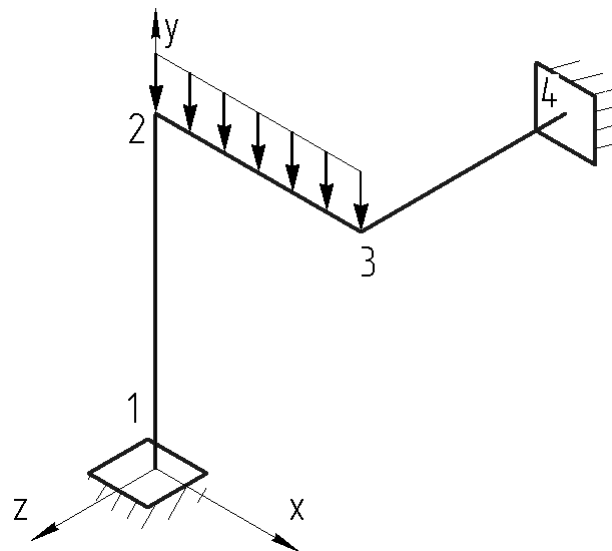


Рисунок 14.2 – Рама с номерами точек


Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.


1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных: *File>New*.
В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab3.db, *OK*.
2. Задать начальные установки.
В автоматически появляющейся справа диалоговой панели «New Model Preference» в разделе «Tolerance» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 1000 (в мм), *OK*.
3. Построить точки согласно следующей таблице:

Номер точки	x, мм	y, мм	z, мм	Ввод
1	0	0	0	[0 0 0]
2	0	1000	0	[0 1000 0]
3	1000	1000	0	[1000 1000 0]
4	1000	1000	-1000	[1000 1000 -1000]

Выбираем приложение «Geometry» и в выпадающих меню «Action», «Create», «Object» для ввода точек по их координатам устанавливаем сочетание Create/Point/XYZ.

В поле «Point Coordinate List» последовательно вводим координаты точек в квадратных скобках, как показано в последнем столбце таблицы. Каждый ввод завершаем нажатием кнопки *Apply*.

С помощью кнопки  панели инструментов включаем отображение ссылочных номеров геометрических объектов.

Нажатием кнопки  (Iso 1 View) панели инструментов устанавливаем изометрическую проекцию.

4. Соединить точки прямыми линиями.

Для построения прямой линии по двум конечным точкам в том же приложении выбираем сочетание Create/Curve/Point.

Используем устанавливаемую по умолчанию опцию 2 Point (по двум точкам).

Щелчком левой кнопки мыши помещаем текстовый курсор в поле «Starting Point List» (начальная точка или точки) и в графическом окне также при помощи левой кнопки мыши указываем точку 1. В данном поле должна появиться запись Point 1.

Точно так же активизируем область ввода «Ending Point List» (конечная точка или точки) и указываем точку 2. При этом появляется запись Point 2. Если снят флаг «Auto Execute», то для завершения операции нажимаем кнопку *-Apply-*.

Аналогично строим прямые линии между точками 2-3 и 3-4 (см. рисунок 14.2).

5. На геометрическую модель нанести сетку конечных элементов.


Для генерации сетки на линиях выбираем приложение «Elements» и устанавливаем сочетание Create/Mesh/Curve.

В качестве топологии элемента указываем Bar2 (линейный двухузловой).

Активизируем поле «Curve List» и в графическом окне указываем все кривые, используя зону выбора в виде прямоугольника. Должна появиться запись Curve 1:3.

При установленном флаге «Automatic Calculation» раздела «Global Edge Length» автоматически рассчитывается глобальная длина стороны элемента и приводится в поле «Value». Размер элемента 100 мм нас вполне устраивает.

В конце нажимаем *-Apply-*.

Увидеть построенные элементы можно путем включения нумерации конечно-элементных объектов либо путем увеличения размера изображения узлов (кнопка  панели инструментов).

6. Сшить конечно-элементную модель.

В том же приложении устанавливаем сочетание Equivalence/All/Tolerance Cube.

Нажимаем *Apply*. При этом места сшивки модели обводятся кружочками.

Отметим, что в поле «Nodes to be excluded» (узлы, исключаемые из процесса сшивки) ничего указывать не следует.

7. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «Materials». В верхней части появляющейся при этом диалоговой панели для ручного ввода свойств изотропного материала выбираем сочетание Create/Isotropic/Manual Input.

В поле «Material Name» вводим имя материала, например steel6.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* (ввод свойств). При этом появляется дополнительное окно, где по умолчанию установлена линейно-упругая модель состояния (Linear Elastic).

В соответствующие поля вводим:

«Elastic Modulus» = $2e5$ (модуль упругости в МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

В конце нажимаем кнопку *Apply*.

8. Определить поперечное сечение для балочных элементов.

В полосе меню выбираем команду *Tools>Beam Library*.

В поле «New Section Name» вводим имя вновь создаваемого сечения, например dvutavr.

Ниже нажимаем первую кнопку с изображением двутаврового сечения.

В соответствующие поля вводим:

H: 100 (высота профиля, мм)

W1: 55 (ширина нижней полки, мм)

W2: 55 (ширина верхней полки, мм)

t: 4.1 (толщина стенки, мм)

t1: 5.7 (толщина нижней полки, мм)

t2: 5.7 (толщина верхней полки, мм)

Для предварительного просмотра введенного сечения воспользуемся кнопкой *Calculate/Display* (рисунок 14.3). При этом справа будут отображаться рассчитанные программой геометрические характеристики сечения.

Следует отметить, что буквами *C*, *D*, *E* и *F* здесь обозначены точки сечения, в которых будут вычисляться напряжения.

Завершаем ввод сечения кнопкой *OK*.

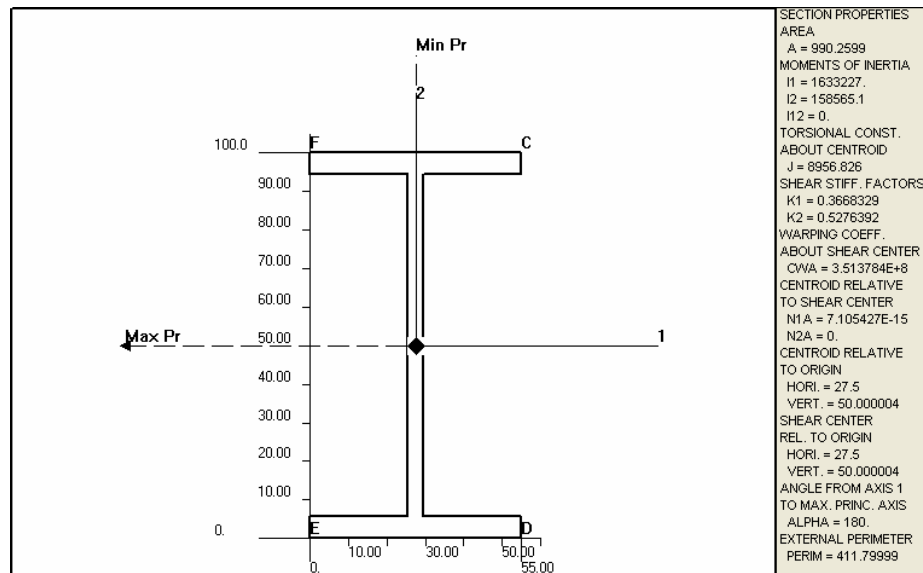


Рисунок 14.3 – Двутавровое сечение

9. Задать свойства элементов.



Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств линейных балочных элементов устанавливаем сочетание Create/1D/Beam.

В поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например beam_1. Следует отметить, что тип балочного элемента здесь задается путем выбора опций:

- General Section – простой балочный элемент CBAR произвольного сечения общего вида (задается по умолчанию);
- Curved w/General Section – криволинейный балочный элемент CBEND сечения общего вида;
- Curved w/Pipe Section – криволинейный балочный элемент CBEND трубного сечения;
- Lumped Section – балочный элемент CBEAM/PBCOMP с сечением в виде набора сосредоточенных площадей (применяется для моделирования пучков волокон композиционных материалов);
- Tapered Section – балочный элемент CBEAM переменного сечения;
- General Section (CBEAM) – балочный элемент CBEAM постоянного сечения общего вида.

В нашем случае, поскольку сечение имеет две оси симметрии (и, следовательно, центр сдвига совпадает с центром тяжести), можно использовать установленную по умолчанию опцию General Section, т.е. простой балочный элемент CBAR.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties*. При этом появляется дополнительное окно для задания свойств элемента СВАР.

Последовательно нажимаем кнопки ,  и из автоматически появляющихся списков существующий сечений и материалов соответственно выбираем *dvutavr* и *steel6*.


Обязательным параметром здесь также является ориентация балки (поле «Bar Orientation»). Ее можно задавать путем ввода либо вектора ориентации \vec{v} , либо дополнительного узла G0 (см. описание по конечным элементам). В первом случае в столбце «Value Type» (тип значения) напротив поля «Bar Orientation» следует выбрать значение *Vector* (вектор), а во втором – *Node Id* (номер узла).

Будем задавать вектор ориентации \vec{v} . Напомним, что он совместно с осью балки определяет плоскость, где лежит ось y_e (или ось 2 сечения, показанного на рисунке 14.3).

В поле «Bar Orientation» вводим компоненты вектора в угловых скобках: $\langle -1 \ 0 \ 0 \rangle$ (ось y_e направляется против оси X глобальной декартовой системы координат).

Закрываем окно ввода свойств кнопкой *OK*.

Для выбора области приложения введенных свойств нажимаем кнопку *Select Application Region*. Здесь также появляется дополнительное окно.

Активизируем поле «Select Members», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кривая или кромка) и указываем кривую 1.

После этого обязательно сначала нажимаем кнопку *Add* для добавления выбранной поверхности в область приложения (*Application Region*), затем *OK*.

Завершаем процесс задания свойств элементов нажатием кнопки *Apply*.

Для определения второго набора свойств в поле «Property Set Name» вводим другое имя, например *beam_2*.

Опять нажимаем кнопку *Input Properties*.

Выбираем то же сечение и тот же материал, однако для вектора ориентации задаем $\langle 0 \ 1 \ 0 \rangle$ (ось y_e направляется по оси Y глобальной декартовой системы координат).

В качестве области приложения указываем кривые 2 и 3. Напомним, что при коллективном выборе используется клавиша *Shift*.

Получаемая при этом ориентация систем координат балочных элементов показана на рисунке 14.4.

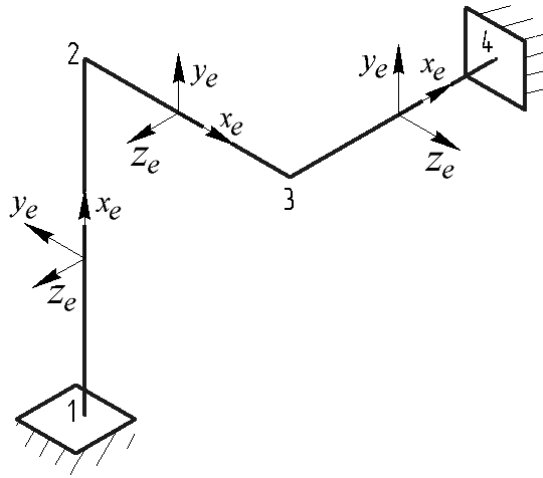


Рисунок 14.4 – Ориентация систем координат элементов

10. Проверить правильность ориентации сечений балочных элементов.

Для отображения балочных элементов в виде трехмерного тела (т.е. с поперечными сечениями) выберем в полосе меню команду *Display>Load/BC/Elem. Props.*

В выпадающем меню «Beam Display» указываем опцию *3D:FullSpan+Offsets.*

После нажатия *Apply* должно появиться изображение, как показано на рисунке 14.5.

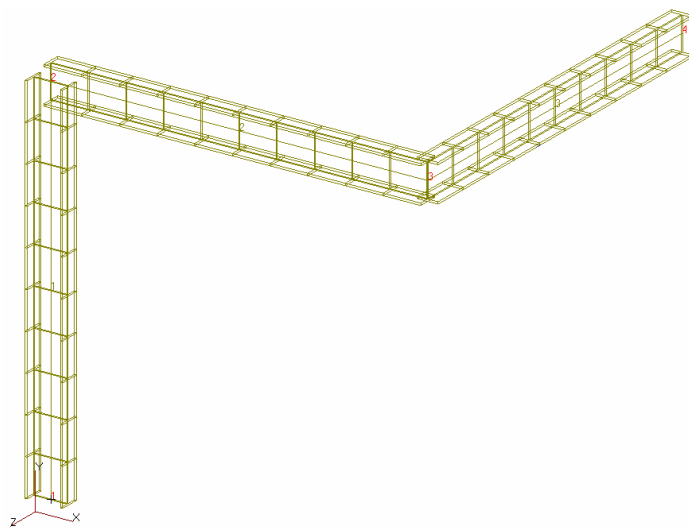


Рисунок 14.5 – Изображение балочных элементов с сечениями

11. Задать граничные условия.


Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений устанавливаем сочетание Create/Displacement/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например fixed.

Нажимаем кнопку *Input Data* (ввод данных).

В полях «Translations» (поступательные перемещения) и «Rotations» (углы поворота) вводим $\langle 0,0,0 \rangle$, что соответствует закреплению всех степеней свободы. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов используем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина), указываем точку 1 (см. рисунок 14.2) и в окне «Selection Choices» выделяем Point 1.

Затем, удерживая нажатой клавишу *Shift*, указываем точку 4 и в окне «Selection Choices» выделяем Point 4. В поле «Select Geometry Entities» должна появиться запись Point 1 4.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

12. Приложить нагрузку.

В том же приложении для определения распределенной нагрузки в заданной системе координат выбираем сочетание Create/CID Distributed/Element Uniform.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например load.

В качестве целевых элементов (Target Element Type) выбираем линейные (1D).

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Distr Force» для задания погонной силы, действующей против оси *Y* глобальной декартовой системы координат, вводим следующие компоненты (в Н/мм): $\langle 0 -20 0 \rangle$. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов используем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities» и указываем кривую 2, где приложена нагрузка (см. рисунок 14.2).

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

13. Сохранить базу данных.

В полосе меню выбираем *File>Save*. В результате выполнения этой команды введенные данные по модели записываются в файл Lab3.db.

14. Запустить задачу на счет.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание Analyze/Entire Model/Full Run.

Для дополнительного вывода усилий и моментов в балках, а также баланса узловых сил следует модифицировать расчетный случай. С этой целью нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем Default. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Далее нажимаем кнопку *Output Request* (запросы по выводу).

В верхнем списке «Select Result Type» указываем строки Element Forces (силы в элементах) и Grid Point Force Balance (баланс узловых сил). *OK*.

Затем последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И наконец, собственно для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

15. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание Access Results/Attach XDB/Result Entities.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл lab3.xdb, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

16. Изобразить перемещения рамы в векторном представлении.

Выбираем приложение «Results» и устанавливаем сочетание Create/Marker/Vector.

В списке «Select Vector Result» в качестве величины для векторного изображения указываем Displacements, Translational (поступательные перемещения).

В выпадающем меню «Show As» (показать как) выбираем позицию Resultant (результатирующее перемещение).

После нажатия кнопки *Apply* формируется векторное изображение поля перемещений.


Можно видеть, что максимальное перемещение возникает в точке 3 и составляет 8,45 мм.

17. Построить эпюры сил и моментов.

Для построения двумерного графика в том же приложении устанавливаем сочетание Create/Graph/Y vs X.

В списке «Select Y Results» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем Bar Forces, Rotational (моменты в балках). Ниже в выпадающем меню «Quantity» указываем компоненту X Component .


В меню «X» за ось абсцисс принимаем Path Length (длину траектории).

Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

В выпадающем меню «Addtl. Display Control» (дополнительное управление изображением) выбираем Curves (кривые).


Активизируем поле выбора определяющих траекторию кривых «Select Path Curves» и в графическом окне указываем сразу все кривые. Должна появиться запись Curve 1:3.

В поле «Points Per Segment» (число точек на сегмент) вводим число 20.

Далее с помощью кнопки  устанавливаем вид для задания опций вычерчивания.

Для отключения осреднения результатов в узлах в разделе «Averaging Definition» устанавливаем «Domain»: None.

После нажатия кнопки *Apply* в отдельном окне появляется график.

Для наложения на этот график других кривых с помощью кнопки-пиктограммы  устанавливаем вид для задания атрибутов изображения и включаем опцию «Append Curves in XY Window».

Далее устанавливаем вид для выбора результатов (кнопка ).

Выбираем компоненту Y Component, *Apply*.

Затем – Z Component, *Apply*.

Получаемые при этом графики показаны на рисунке 14.6.

Ось абсцисс здесь представляет собой расстояние, отсчитываемое вдоль созданной траектории, проходящей через все три участка рамы.

Данные кривые являются эпюрами моментов относительно осей x_e, y_e, z_e систем координат балочным элементом (см. рисунок 14.4).

Напомним, что для удаления окна с графиком следует установить сочетание Delete/Plots и в списке «Existing Plot Types» выбрать GRA_default_Graph, *Apply*.

Совершенно аналогично строятся и эпюры сил. Только в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, следует выбрать Bar Forces, Translational (силы в балках).

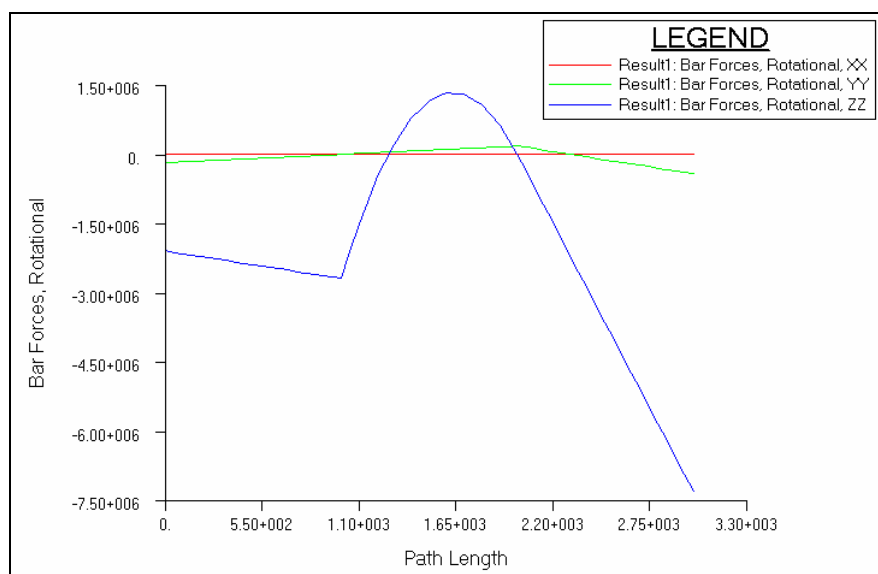


Рисунок 14.6 – Эпюры моментов (в Н·мм)

18. Построить эпюры напряжений.

Они строятся точно так же, как и эпюры сил и моментов. Поэтому перечислим здесь лишь доступные результаты:

- Bar Stresses, Axial – осевые напряжения;
- Bar Stresses, Bending – изгибные напряжения в точках C, D, E и F сечения (см. рисунок 14.3);
- Bar Stresses, Maximum Combined – максимальные в сечениях напряжения от совместного действия осевых сил и моментов;
- Bar Stresses, Minimum Combined – минимальные в сечениях напряжения от совместного действия осевых сил и моментов.

Следует отметить, что выбрать конкретную точку сечения можно с помощью кнопки *Position....*


19. Для определения реакций в опорах построить диаграмму свободного тела.

Для построения диаграммы свободного тела устанавливаем сочетание Create/Freebody/Loads.

В списке «Select Result Type» выбираем Freebody Loads.

Нажимаем *Apply*.

Появляющееся при этом изображение представлено на рисунке 14.7, где приводятся внешние силы, а также уравновешивающие их силы реакций.

Для демонстрации реактивных моментов следует с помощью кнопки-пиктограммы  изменить вид диалоговой панели и в выпадающем меню «Show» выбрать пункт Moment.

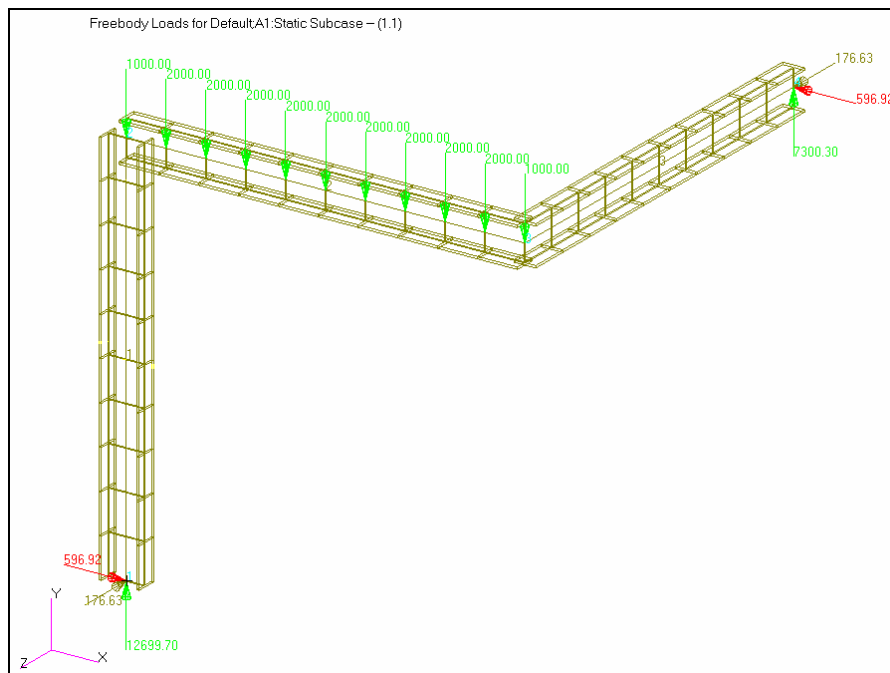


Рисунок 14.7 – Приложенная нагрузка и силы реакций

20. Выйти из программы: *File > Quit*.

15 СОЗДАНИЕ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ УЗЛАМИ

15.1 Явное задание уравнений связей

Так называемые уравнения многоточечных связей MPC (Multi-Point Constraint) используются в различных МКЭ-пакетах для моделирования некоторых конструктивных особенностей, которые плохо поддаются идеализации обычными конечными элементами. Например, таких как жесткие соединения, шарниры разного вида, поверхности скольжения и т.п.

Уравнения связей определяют поведение одних узловых степеней свободы (называемых зависимыми) в виде линейных функций поведения других узловых степеней свободы (называемых независимыми). В программе MSC.Patran явная (explicit) форма записи уравнения связи, поддерживаемая большинством решателей (в том числе и MSC.Nastran), имеет следующий вид:

$$u_0 = c_1 u_1 + c_2 u_2 + \dots + c_n u_n + c_0,$$

где u_0 – зависимая степень свободы; u_i – независимые степени свободы; c_i – коэффициенты уравнения (постоянные).

Величина, стоящая в левой части этого уравнения, называется зависимым (dependent) членом, а слагаемые, входящие в правую часть, называются независимыми (independent) членами, причем c_0 – это особый независимый член, называемый постоянным членом.

Рассмотрим пример явного задания уравнения MPC:

$$UX(\text{Node } 4) = 0.5 * UX(\text{Node } 5) - 0.5 * UY(\text{Node } 10) + 1.0,$$

которое определяет, что перемещение u_x узла 4 равно половине перемещения u_x узла 5 минус половина перемещения u_y узла 10 плюс 1,0. Таким образом, в данном примере один зависимый член, два независимых члена и один постоянный член.

Следует отметить, что зависимые степени свободы с помощью уравнений связей исключаются из числа искомых перемещений. В решателе MSC.Nastran они помещаются в так называемый m -набор.

Далее в качестве примера рассмотрим брусок (рисунок 15.1), закрепленный по нижнему основанию, а по верхнему – сдавливаемый горизонтально расположенным жестким штампом (трением пренебрегаем). При этом пе-

реещения узлов 1, 2, 3 и 4 вдоль оси Y должны быть одинаковыми. Уравнения связей в данном случае имеют вид

$$UY(1) = UY(2); \quad UY(2) = UY(3); \quad UY(3) = UY(4).$$

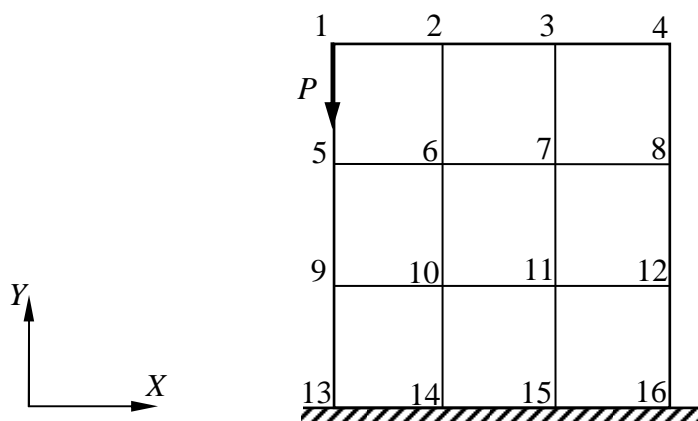


Рисунок 15.1 – Брусок, сдавливаемый жестким штампом

Суммарную нагрузку P здесь можно приложить в одном узле (например, в узле 1), поскольку она соответствующим образом перераспределится на остальные узлы за счет наложенных связей.

В заключение заметим, что зависимая степень свободы, назначенная одним уравнением связи, не может выбираться в качестве зависимой другим уравнением. Кроме того, на зависимые степени свободы нельзя накладывать граничные условия.

15.2 Жесткие элементы

Следует отметить, что во многих случаях достаточно сложно с помощью явных уравнений создать нужные связи между узлами. Поэтому большинство решателей поддерживают специальные типы уравнений связей МРС, называемые неявными (implicit). К таковым в первую очередь можно отнести жесткие (rigid) элементы, в которых, например, независимый узел жестко связывается с одним или несколькими зависимыми узлами. При их применении пользователю необходимо задать только номера соответствующих узлов. Таким образом, жесткий элемент математически эквивалентен одному или нескольким явным уравнениям связей, каждое из которых определяет лишь одну зависимую степень свободы.

В программе MSC.Patran различие между использованием жестких элементов и явных уравнений связей заключается в том, что последние

включаются в совокупность граничных условий текущего случая нагружения, т.е. в другом случае нагружения их не будет, а жесткие элементы останутся, поскольку они интерпретируются как обычные конечные элементы.

Отметим, что жесткие элементы используются для двух целей:

- для моделирования абсолютно жестких связей между двумя или несколькими узлами;
- для создания связей в виде линейных комбинаций степеней свободы различных узлов (в этом случае их называют обычно не жесткими, а интерполирующими элементами).

Жесткие связи могут применяться, например, для задания недеформируемых участков границ, для передачи нагрузки на отдельные части конструкции, для сопряжения элементов разных типов и т.д.

В решателе MSC.Nastran к жестким элементам относятся RROD, RBAR, RTRPLT, RBE1 и RBE2, а элементы RBE3 и RSPLINE являются интерполирующими. Все эти элементы объединяются под общим названием R-type элементы.

15.2.1 Элемент RROD

RROD – стержень с шарнирами на концах, который является абсолютно жестким в осевом направлении.

В программе MSC.Nastran данный элемент определяется следующими параметрами:

EID – номер элемента;

GA, GB – номера принадлежащих ему узлов;

CMA, CMB – номер одной поступательной степени свободы в глобальной системе координат, выбираемой пользователем в качестве зависимой либо в узле GA, либо GB (целое число 1, 2 или 3, задаваемое лишь для одного параметра).

Отметим, что степень свободы, указываемая в качестве зависимой, должна иметь ненулевую составляющую на ось стержня. Это подразумевает, в частности, что данный элемент должен иметь конечную (ненулевую) длину, т.е. узлы GA и GB не могут быть совпадающими.

Как известно, уравнение связи генерируется для каждой зависимой степени свободы. Элемент RROD определяет одну зависимую степень свободы, поэтому он эквивалентен лишь одному уравнению связи ($m = 1$).

15.2.2 Элемент RBAR

RBAR – жесткий брус с шестью степенями свободы на каждом конце ($1 \leq m \leq 6$).

Данный элемент связывает от одной до шести зависимых степеней свободы всегда с шестью независимыми степенями свободы. Эти шесть независимых степеней свободы должны представлять все возможные перемещения элемента как жесткого целого.

Параметры:

EID – номер элемента;

GA, GB – номера принадлежащих ему узлов;

CNA, CNB – номера независимых для элемента степеней свободы в глобальной системе координат в узлах GA и GB соответственно (комбинация из целых чисел от 1 до 6 без пробелов либо 0, либо пустое поле);

CMA, CMB – номера зависимых степеней свободы в глобальной системе координат в узлах GA и GB соответственно (см. предыдущий параметр).

Отметим, что общее число компонент в CNA и CNB должно быть равно шести, например, $CNA = 1236$, $CNB = 34$. Для номеров степеней свободы здесь используются следующие обозначения: 1, 2, 3 – поступательные перемещения UX, UY, UZ; 4, 5, 6 – углы поворота RX, RY, RZ. Если оба параметра CMA и CMB равны нулю или не заданы, то все степени свободы, не указанные в CNA и CNB, будут определены как зависимые.

Как отмечалось ранее, шесть независимых степеней свободы данного элемента должны допускать представление любого из его возможных перемещений как жесткого целого. Проверить это можно следующим образом. Если закрепить все независимые степени свободы элемента RBAR, то должна быть обеспечена его неподвижность.

В качестве примера на рисунке 15.2 представлено несколько конфигураций элемента RBAR. В конфигурациях (а) и (в), если закрепить все шесть независимых степеней свободы, то элемент не сможет перемещаться как жесткое целое в каком-либо направлении. Однако в конфигурации (б) при фиксации всех независимых степеней свободы элемент может еще поворачиваться вокруг оси Y. Таким образом, конфигурация (б) не проходит тест жесткого тела и не работает как элемент RBAR.

В большинстве случаев при использовании элемента RBAR все шесть независимых степеней свободы выбираются только в одном узле, называе-

мом независимым. При этом в качестве зависимых определяются все шесть или менее степеней свободы другого узла, который называется уже зависимым.

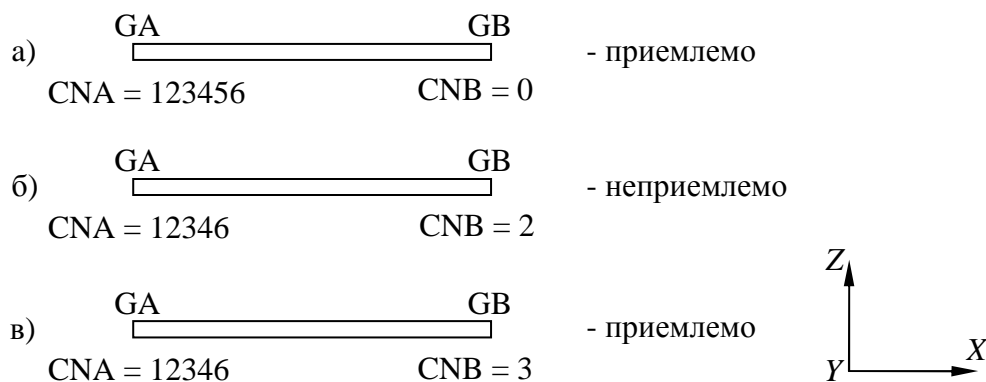


Рисунок 15.2 – Различные конфигурации элемента RBAR

Следует отметить, что элемент RBAR связывается жестко в зависимом узле с другими элементами только по зависимым степеням свободы, а остальные освобождаются от связи и остаются независимыми для модели. Такой подход позволяет моделировать, например, различные шарнирные соединения.

На рисунке 15.3 представлен пример создания шарнирного соединения двух балочных элементов CBAR1 и CBAR2. Узлы 2 и 3 здесь являются совпадающими. Они показаны раздельно лишь для удобства изображения.

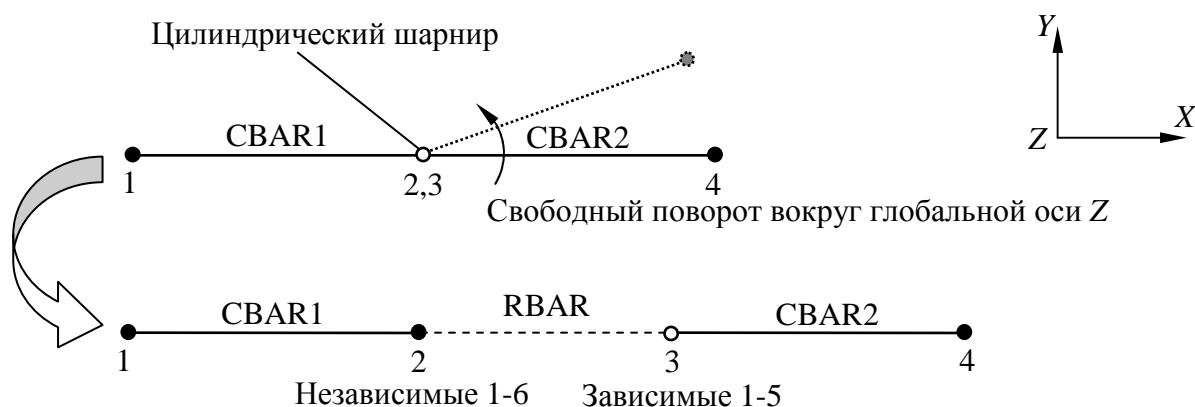


Рисунок 15.3 – Моделирование шарнирного соединения балочных элементов

Данный способ моделирования шарнирного соединения состоит в использовании совпадающих узлов в центре вращения и определении между ними жесткого элемента RBAR. При этом RBAR будет иметь нулевую длину,

что допускается для него. Здесь необходимо в качестве независимых для жесткого элемента выбрать все шесть степеней свободы одного из его узлов и в качестве зависимых задать не все, а лишь определенное количество степеней свободы другого узла, оставляя независимыми для модели перемещения, представляющие шарнир. Так, в нашем примере компонента 6 узла 3 оставляется независимой, что позволяет элементу CBAR2 свободно поворачиваться вокруг оси Z относительно элемента CBAR1.

Следует отметить, что если вы используете совпадающие узлы для идеализации каких-либо конструктивных особенностей, то при выполнении «сшивки» модели их необходимо исключить из данной операции.

Конечно, для моделирования шарнирного соединения балочных элементов проще воспользоваться заданием флагов шарниров (pin-флагов), однако элемент RBAR незаменим при моделировании шарнирного соединения, например, двух пластин.

15.2.3 Элемент RTRPLT

RTRPLT – жесткая треугольная пластина с шестью степенями свободы в каждой вершине ($1 \leq m \leq 12$).

Параметры:

EID – номер элемента;

GA, GB, GC – номера принадлежащих ему узлов;

CNA, CNB, CNC – номера независимых для элемента степеней свободы в глобальной системе координат в узлах GA, GB и GC соответственно;

CMA, CMB, CMC – номера зависимых степеней свободы в глобальной системе координат в узлах GA, GB и GC соответственно.

Отметим, что общее число компонент в CNA, CNB и CNC должно быть равно шести, например, $CNA = 1236$, $CNB = 3$, $CNC = 3$. При этом они должны совместно допускать представление любого из перемещений элемента как жесткого целого. Если все параметры CMA, CMB и CMC равны нулю или не заданы, то все степени свободы, не указанные в CNA, CNB и CNC, будут определены как зависимые.

15.2.4 Элемент RBE1

RBE1 (Rigid Body Element, type 1) – жесткое тело, прикрепленное к произвольному числу узлов. Зависимые и независимые степени свободы здесь могут выбираться произвольно ($m \geq 1$).

Параметры:

EID – номер элемента;

GN_i – номера узлов, в которых для элемента назначаются независимые степени свободы (максимум шесть узлов);

CN_i – номера независимых для элемента степеней свободы в глобальной системе координат в узлах GN_i;

“UM” – текстовое поле, указывающее начало задания зависимых степеней свободы;

GM_i – номера узлов, в которых назначаются зависимые степени свободы;

CM_i – номера зависимых степеней свободы в глобальной системе координат в узлах GM_i.

Общее число компонент в CN_i здесь также должно быть равно шести, и они должны допускать все возможные перемещения как жесткого целого. Степень свободы не может быть одновременно независимой и зависимой для одного и того же элемента. Однако в одном и том же узле могут одновременно находиться как независимые, так и зависимые компоненты.

15.2.5 Элемент RBE2

RBE2 (Rigid Body Element, type 2) – жесткое тело, прикрепленное к произвольному числу узлов. В качестве независимых для элемента здесь выбираются все шесть степеней свободы одного из узлов, а зависимые степени свободы других узлов должны быть одинаковыми, т.е. иметь одни и те же номера, выбираемые пользователем ($m \geq 1$).

Параметры:

EID – номер элемента;

GN – номер узла, все шесть степеней свободы которого выбираются в качестве независимых для элемента;

CM – номера зависимых степеней свободы в глобальной системе координат в узлах GM_i;

GM_i – номера узлов, в которых назначаются зависимые степени свободы.

Отметим, что элемент RBE2 является очень удобным инструментом для жесткого соединения одинаковых компонент движения нескольких узлов. Конечно, вместо данного элемента можно воспользоваться более уни-

версальным элементом RBE1 или взять несколько элементов RBAR. Однако они менее удобны в работе.

Элемент RBE2 может использоваться для моделирования различных жестких включений, для передачи нагрузки на отдельные части конструкции и т.д.

15.2.6 Элемент RBE3

RBE3 (Rigid Body Element, type 3) – интерполирующий элемент, определяющий перемещение базового узла путем весового осреднения перемещений системы других узлов ($1 \leq m \leq 6$).

Данный элемент полезен, например, для перераспределения приложенных нагрузок и масс в модели. Здесь силы и моменты, действующие в базовом узле, распределяются к системе независимых степеней свободы с учетом геометрии элемента RBE3 и заданных пользователем весовых коэффициентов.

Параметры:

EID – номер элемента;

REFGRID – номер базового узла;

REFC – номера степеней свободы базового узла, по которым должны передаваться нагрузки;

WT_i – весовой коэффициент для степеней свободы в узлах осреднения $G_{i,j}$, связываемых с базовым;

C_i – номера степеней свободы с весовым коэффициентом WT_i в узлах осреднения $G_{i,j}$;

$G_{i,j}$ – номера узлов, чьи компоненты перемещения C_i входят в осредняющие уравнения связей с весовым коэффициентом WT_i ;

“UM” – текстовое поле, указывающее начало задания зависимых степеней свободы (по умолчанию в качестве зависимых выбираются все степени свободы, указанные для параметра REFC);

GM_i – номера узлов, в которых назначаются зависимые степени свободы;

SM_i – номера зависимых степеней свободы в глобальной системе координат в узлах GM_i .

Следует отметить, что по умолчанию весовые коэффициенты принимаются равными единице. При этом каждый из узлов осреднения входит на «равных правах» в уравнения связей.

Параметры C_i используются для задания степеней свободы узлов осреднения, через которые выражаются степени свободы базового узла. Данных компонент, во-первых, должно быть достаточно для фиксации создаваемого элемента как жесткого целого (хотя сам он не является абсолютно жестким, а просто перераспределяет нагрузки между базовым узлом и узлами осреднения). Во-вторых, при задании указанных степеней свободы должны учитываться требуемые свойства передачи нагрузки. Для большинства задач рекомендуется использовать для параметра C_i только поступательные перемещения UX, UY, UZ (т.е. $C_i = 123$). Исключением здесь является лишь случай, когда все узлы осреднения лежат на одной прямой.

Как правило, для поля “UM” следует использовать значение по умолчанию кроме случаев, когда пользователь по какой-либо причине желает исключить некоторые или все компоненты, заданные параметром REFC, из m -набора (т.е. из числа зависимых степеней свободы).

Отметим, что силы и моменты, приложенные в базовом узле, распределяются на узлы осреднения по правилу группового болтового соединения. Пусть в базовом узле действуют сила \vec{F}_A и момент \vec{M}_A (рисунок 15.4). Перенесем их в центр тяжести узлов осреднения, положение которого определяется с учетом весовых коэффициентов.

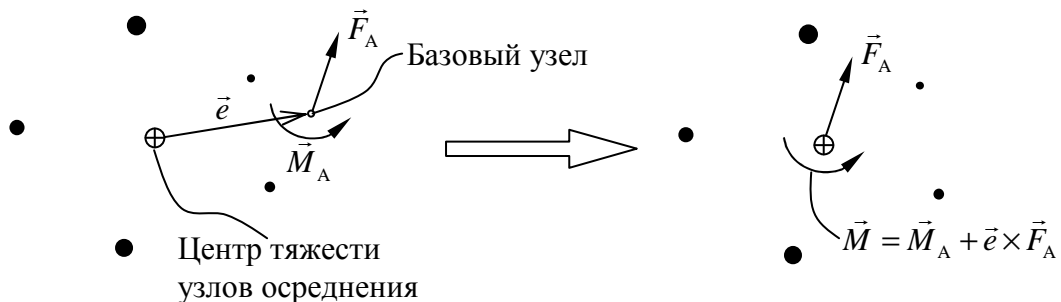


Рисунок 15.4 – Перенос нагрузки в центр тяжести узлов осреднения

Сила \vec{F}_A распределяется на узлы осреднения пропорционально их весовым коэффициентам (рисунок 15.5,а):

$$\vec{F}_i = \vec{F}_A \frac{\omega_i}{\sum_k \omega_k},$$

где \vec{F}_i – сила в i -ом узле осреднения; ω_i – весовой коэффициент для степеней свободы i -го узла.

Момент \vec{M} распределяется в виде сил, которые пропорциональны их расстояниям от центра тяжести, умноженным на их весовые коэффициенты (рисунок 15.5,б):

$$\vec{F}_i = \frac{\omega_i \vec{M} \times \vec{r}_i}{\sum_k \omega_k \vec{r}_k},$$

причем \vec{r}_i – радиус-вектор, соединяющий центр тяжести узлов осреднения и i -ый узел.

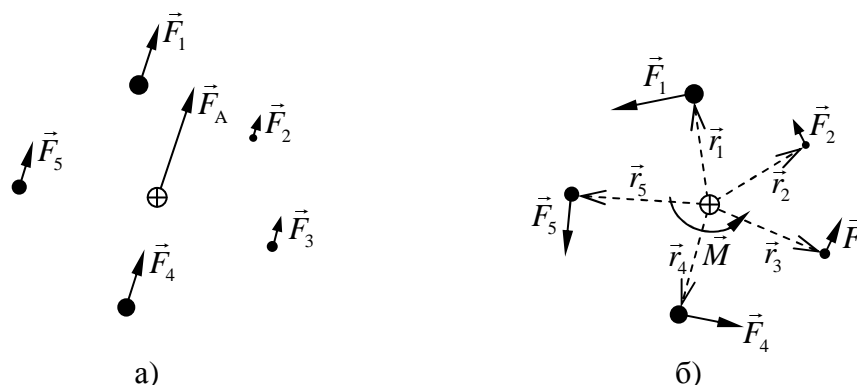


Рисунок 15.5 – Распределение нагрузки на узлы осреднения

Таким образом, полная сила, действующая в каждом узле осреднения, будет равна сумме двух сил.

Способность элемента RBE3 распределять нагрузку делает его идеальным инструментом для передачи сил от грубой модели к более детальной.

15.2.7 Элемент RSPLINE

RSPLINE – осуществляет интерполяцию перемещений с помощью уравнения изогнутой оси балки-трубы, проходящей через ряд узлов ($m \geq 1$).

Этот элемент полезен, например, при изменении размеров сетки в конечно-элементной модели (рисунок 15.6).

Параметры:

EID – номер элемента;

D/L – отношение диаметра трубы к сумме длин всех сегментов (по умолчанию задается равным 0,1);

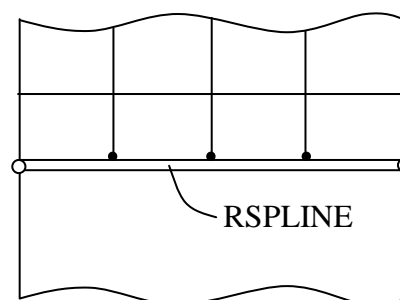


Рисунок 15.6 – Изменение размеров сетки

G_i – номера узлов;

C_i – номера степеней свободы узла G_i , которые должны выражаться через другие перемещения (т.е. определяться как зависимые).

Пустое поле для параметра C_i указывает, что все степени свободы узла G_i являются независимыми. Поскольку первый и последний узлы всегда должны быть независимыми, для них не предусмотрены параметры C_i .

Отметим, что узлы здесь должны перечисляться в том же порядке, как они располагаются вдоль линии, соединяющей две области.

15.3 Сопряжение элементов разных типов

Для сопряжения объемных элементов с элементами балки, пластины и оболочки можно воспользоваться интерполирующим элементом RBE3. Известно, что в узлах объемных элементов определены только поступательные перемещения в направлении осей координат, в то время как в узлах балок, пластин и оболочек имеются еще и углы поворота. Определить такие углы в узле объемного элемента можно, расположив в нем базовый узел интерполирующего элемента и связав его с соседними узлами объема.

Рассмотрим реализацию данного подхода применительно к пластине (или оболочке). В каждом узле сопряжения здесь создается интерполирующий элемент RBE3 (рисунок 15.7,а). При этом в базовом узле (узел 8 для выделенного элемента) указываются только вращательные степени свободы RX , RY и RZ , поскольку поступательные перемещения в нем и так определены. Для узлов осреднения 3, 4 и 7 выбираются поступательные степени свободы UX , UY и UZ . Для второго элемента RBE3 базовым является узел 7, а узлами осреднения – 3, 4 и 8. Созданные таким образом интерполирующие элементы моделируют повороты верхней грани объемного элемента.

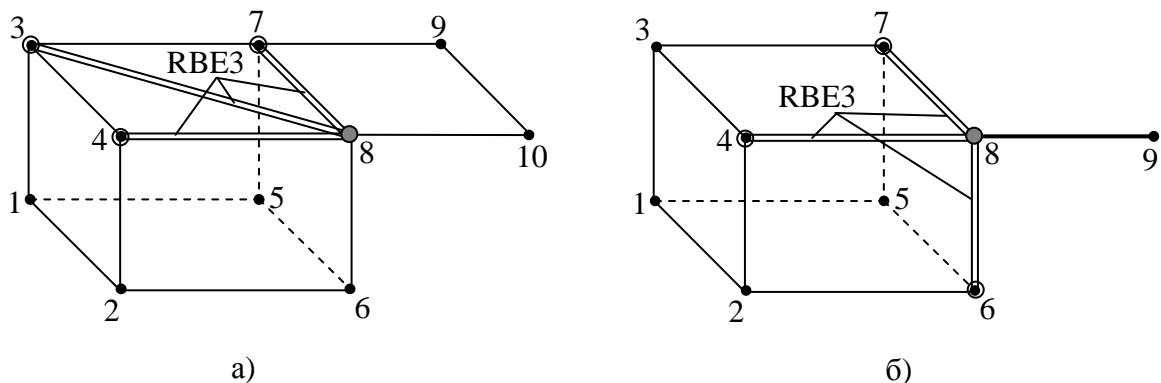


Рисунок 15.7 – Использование RBE3 для сопряжения элементов

Точно так же осуществляется сопряжение балочного и объемного элементов. Отличие заключается лишь в том, что узлы осреднения должны лежать в разных плоскостях (рисунок 15.7,б).

Следует отметить, что в программе MSC.Nastran имеется специализированный жесткий элемент RSSCON, предназначенный для сопряжения оболочки с трехмерным телом.

RSSCON – определяет уравнения связей для моделирования жесткого соединения оболочечных элементов с объемными ($m = 12$).

Параметры (рисунок 15.8):

RBID – номер элемента;

TYPE – тип соединения: “ELEM” – соединение описывается с помощью номеров элементов; “GRID” – соединение описывается с помощью номеров узлов (по умолчанию используется значение “ELEM”);

ES1 – номер элемента оболочки (если TYPE = “ELEM”) или номер узла оболочки (если TYPE = “GRID”);

EA1 – номер элемента объема (если TYPE = “ELEM”) или номер узла объема (если TYPE = “GRID”);

EB1 – номер узла объема (только для TYPE = “GRID”);

ES2 – номер узла оболочки (только для TYPE = “GRID”);

EA2 – номер узла объема (только для TYPE = “GRID”);

EB2 – номер узла объема (только для TYPE = “GRID”).

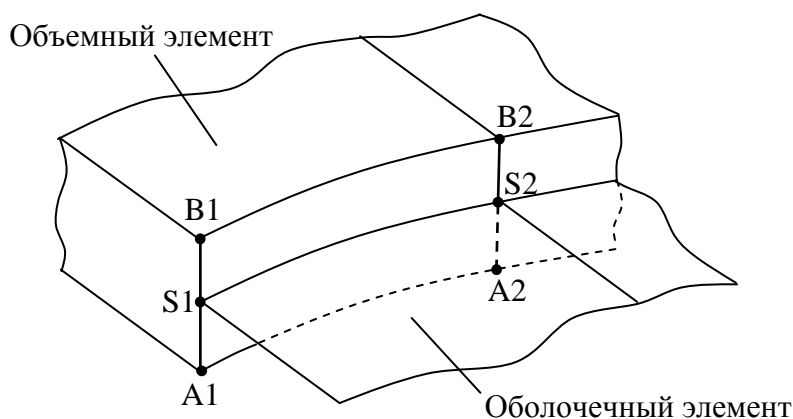


Рисунок 15.8 – Использование RSSCON для сопряжения элементов

Следует отметить, что здесь все степени свободы узлов сопряжения оболочки становятся зависимыми. Они связываются с поступательными пе-

ремещениями верхней и нижней кромок грани объемного элемента. При этом учитывается эффект Пуассона, т.е. обжатие нормали.

Узел оболочки должен лежать на линии, соединяющей два узла объема (нижний и верхний). Отклонение от данной линии не должно превышать 5% расстояния между узлами объема.

Когда выбирается опция TYPE = "ELEM", в качестве объемных элементов могут использоваться CHEXA, CPENTA и CTETRA (как с промежуточными узлами на сторонах, так и без них), а в качестве оболочечных – CQUAD4, STRIA3, CQUADR, STRIAR, CQUAD8 и STRIA6. При этом не рекомендуется соединять более одного элемента оболочки с одним и тем же объемным элементом.

При использовании опции TYPE = "GRID" программа не проверяет, являются ли задаваемые узлы действительно узлами оболочки или объема.

В заключение отметим, что кромка оболочки может совпадать с верхней или нижней кромкой объема. Однако рекомендуется, чтобы высота грани объемного элемента приблизительно равнялась толщине элемента оболочки. В этом случае, очевидно, кромка оболочки должна располагаться посередине грани объема.

15.4 Ввод уравнений связей MPC в среде MSC.Patran

Программа MSC.Patran для всех типов MPC (за исключением циклической симметрии и поверхности скольжения) использует единую форму ввода исходных данных. Для этих целей применяется приложение «Elements» (рисунок 15.9).

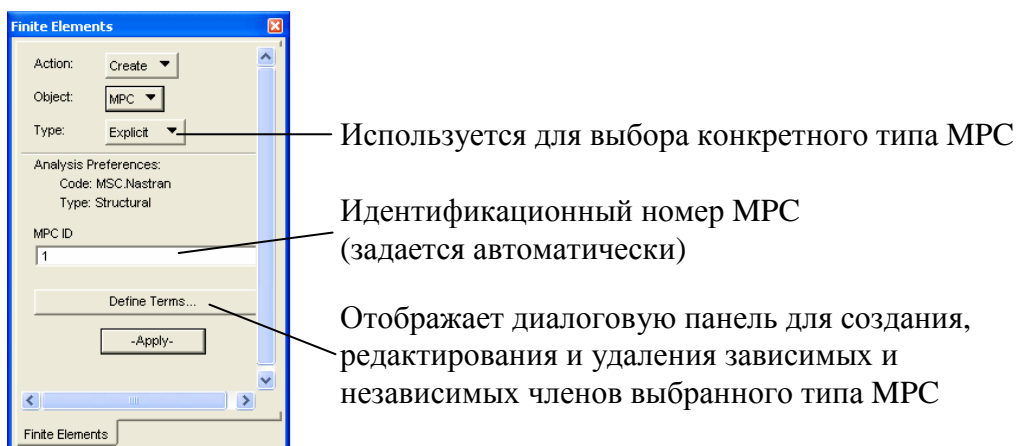


Рисунок 15.9 – Ввод MPC

Диалоговая панель для определения членов MPC (появляется при нажатии кнопки *Define Terms*) представлена на рисунке 15.10.

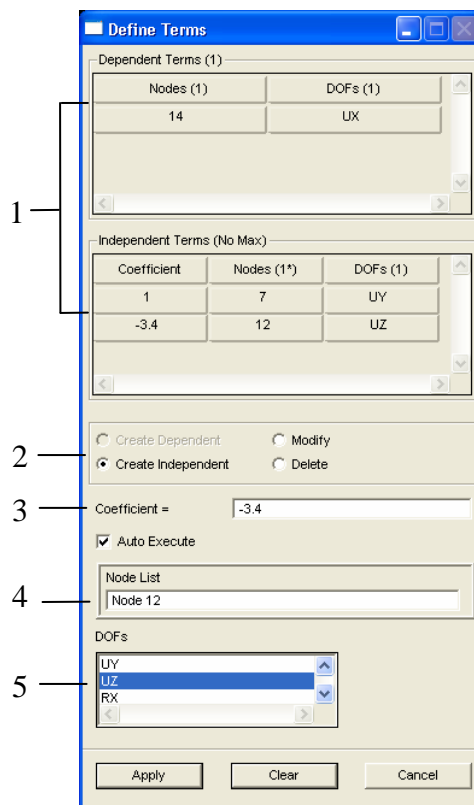


Рисунок 15.10 – Определение членов MPC

Здесь имеются следующие разделы:

1 – Таблицы, в строках которых содержится информация о зависимых (dependent) и независимых (independent) членах. Требуемое число членов приводится в круглых скобках в заголовках таблиц. Информация по каждому члену включают в себя максимум четыре набора данных:

- порядковый номер (не показывается);
- ненулевой коэффициент;
- список узлов (требуемое число узлов приводится в круглых скобках, причем 1* означает, что номера узлов могут вводиться по одному в каждом члене либо все в одном члене);
- список степеней свободы (требуемое число узлов также приводится в круглых скобках).

2 – Область установки режимов работы функции *Apply* (Create Dependent – создать зависимый член; Create Independent – создать независимый член; Modify – модифицировать член; Delete – удалить член). После ввода

максимально возможного числа зависимых или независимых членов режимы их создания становятся недоступными.

3 – Поле ввода ненулевого коэффициента для члена. Оно изображается только в том случае, когда создается или редактируется член, для которого таблица содержит столбец коэффициентов.

4 – Поле ввода списка узлов для члена.

5 – Область выбора степеней свободы для члена.

Следует отметить, что требуемое (или допускаемое) число зависимых и независимых членов различно для разных типов MPC. Например, MPC явного типа (*explicit*) допускает только один зависимый член, в то время как число независимых членов здесь неограниченно. И наоборот, MPC типа жестких элементов может допускать один независимый член и неограниченное число зависимых.

При изображении модели MPC-связи показываются в виде совокупности линий (по умолчанию красных), которые соединяют каждый зависимый узел с соответствующим независимым. При этом зависимые узлы обводятся кружочками.

В заключение отметим, что в некоторых случаях программа MSC.Patran позволяет за один раз создавать сразу несколько MPC-систем (называемых подсистемами Sub-MPCs) с одним идентификационным номером. Например, когда MPC требует определения только одного узла как для зависимых, так и для независимых членов, вы можете ввести более одного узла, задавая одинаковое их число в каждом члене. При этом количество создаваемых подсистем будет равно числу введенных для одного члена узлов. Первый узел каждого члена извлекается для определения первой Sub-MPC, второй узел – для определения второй Sub-MPC и т.д.

Когда создается несколько Sub-MPCs, они изображаются с одним и тем же номером в центре каждой подсистемы. Транслятор будет трактовать каждую Sub-MPC как отдельную MPC-систему, однако программа MSC.Patran трактует набор Sub-MPCs как один объект.

Вопросы по теме 15

- 1) Что такое MPC?
 1. Многоточечные связи.
 2. Граничные условия.
 3. Случай нагружения.
 4. Реакции опор.
 5. Разновидность нагрузки.

- 2) Для чего используются MPC?
 1. Для моделирования конструктивных особенностей, плохо поддающихся идеализации обычными элементами.
 2. Для моделирования конструктивно ортотропных пластин и оболочек.
 3. Для моделирования композитных конструкций.
 4. Для исключения ложных деформаций сдвига.
 5. Для устранения мембранного запираания.

- 3) Что определяют уравнения связей?
 1. Зависимые перемещения в виде линейных функций независимых перемещений.
 2. Независимые перемещения в виде линейных функций зависимых перемещений.
 3. Зависимые перемещения в виде нелинейных функций независимых перемещений.
 4. Независимые перемещения в виде нелинейных функций зависимых перемещений.

- 4) Какие элементы решателя MSC.Nastran используются для моделирования абсолютно жестких связей между узлами?
 1. RROD.
 2. RBAR.
 3. RTRPLT.
 4. RBE1.
 5. RBE2.
 6. RBE3.
 7. RSPLINE.

- 5) Какие элементы решателя MSC.Nastran являются интерполирующими?
 1. RROD.
 2. RBAR.
 3. RTRPLT.

4. RBE1.
5. RBE2.
6. RBE3.
7. RSPLINE.

6) Сколько независимых степеней свободы определяет явное уравнение связей?

1. 1.
2. От 1 до 6.
3. От 1 до 12.
4. 6.
5. 12.
6. Неограниченное число.

7) Сколько независимых степеней свободы определяет элемент RROD?

1. 1.
2. От 1 до 6.
3. От 1 до 12.
4. 6.
5. 12.
6. Неограниченное число.

8) Сколько независимых степеней свободы определяет элемент RBAR?

1. 1.
2. От 1 до 6.
3. От 1 до 12.
4. 6.
5. 12.
6. Неограниченное число.

9) Сколько независимых степеней свободы определяет элемент RTRPLT?

1. 1.
2. От 1 до 6.
3. От 1 до 12.
4. 6.
5. 12.
6. Неограниченное число.

10) Сколько независимых степеней свободы определяет элемент RBE1?

1. 1.
2. От 1 до 6.
3. От 1 до 12.

4. 6.
5. 12.
6. Неограниченное число.

11) Сколько независимых степеней свободы определяет элемент RBE2?

1. 1.
2. От 1 до 6.
3. От 1 до 12.
4. 6.
5. 12.
6. Неограниченное число.

12) Сколько независимых степеней свободы определяет элемент RBE3?

1. 1.
2. От 1 до 6.
3. От 1 до 12.
4. 6.
5. 12.
6. Неограниченное число.

13) Сколько независимых степеней свободы определяет элемент RSPLINE?

1. 1.
2. От 1 до 6.
3. От 1 до 12.
4. 6.
5. 12.
6. Неограниченное число.

14) Сколько независимых степеней свободы определяет элемент RSSCON?

1. 1.
2. От 1 до 6.
3. От 1 до 12.
4. 6.
5. 12.
6. Неограниченное число.

15) Какие из перечисленных ниже способов задания независимых степеней свободы являются правильными для элемента CBAR, ориентированного параллельно оси X?

1. $CNA = 123456, CNB = 0.$
2. $CNA = 12345, CNB = 1.$

3. $CNA = 12345, CNB = 2.$
4. $CNA = 12345, CNB = 3.$
5. $CNA = 123, CNB = 123.$
6. $CNA = 123, CNB = 456.$

16) Какие из перечисленных ниже способов задания независимых степеней свободы являются правильными для элемента СВАР, ориентированного параллельно оси Y?

1. $CNA = 123456, CNB = 0.$
2. $CNA = 12345, CNB = 1.$
3. $CNA = 12345, CNB = 2.$
4. $CNA = 12345, CNB = 3.$
5. $CNA = 123, CNB = 123.$
6. $CNA = 123, CNB = 456.$

17) Какие из перечисленных ниже способов задания независимых степеней свободы являются правильными для элемента СВАР, ориентированного параллельно оси Z?

1. $CNA = 123456, CNB = 0.$
2. $CNA = 12345, CNB = 1.$
3. $CNA = 12345, CNB = 2.$
4. $CNA = 12345, CNB = 3.$
5. $CNA = 123, CNB = 123.$
6. $CNA = 123, CNB = 456.$

18) Что относится к элементу RBE1?

1. Независимые степени свободы выбираются произвольно.
2. Независимые степени свободы выбираются произвольно, но общее их число должно быть равно шести.
3. Зависимые степени свободы выбираются произвольно.
4. Зависимые степени свободы выбираются произвольно, но общее их число должно быть равно шести.
5. В качестве независимых выбираются все степени свободы одного узла.
6. Зависимые степени свободы во всех зависимых узлах должны быть одинаковыми.

19) Что относится к элементу RBE2?

1. Независимые степени свободы выбираются произвольно.
2. Независимые степени свободы выбираются произвольно, но общее их число должно быть равно шести.
3. Зависимые степени свободы выбираются произвольно.

4. Зависимые степени свободы выбираются произвольно, но общее их число должно быть равно шести.
5. В качестве независимых выбираются все степени свободы одного узла.
6. Зависимые степени свободы во всех зависимых узлах должны быть одинаковыми.

20) Какой элемент определяет перемещение базового узла путем весового осреднения перемещений системы других узлов?

1. RROD.
2. RBAR.
3. RTRPLT.
4. RBE1.
5. RBE2.
6. RBE3.
7. RSPLINE.
8. RSSCON.

21) Какой элемент осуществляет интерполяцию перемещений с помощью уравнения изогнутой оси трубы?

1. RROD.
2. RBAR.
3. RTRPLT.
4. RBE1.
5. RBE2.
6. RBE3.
7. RSPLINE.
8. RSSCON.

22) Какой элемент определяет уравнения связей для моделирования жесткого соединения оболочечных элементов с объемными?

1. RROD.
2. RBAR.
3. RTRPLT.
4. RBE1.
5. RBE2.
6. RBE3.
7. RSPLINE.
8. RSSCON.

23) Для чего используется элемент RBE3?

1. Для перераспределения приложенных нагрузок и масс в модели.
2. Для сопряжения элементов разных типов.

3. Для задания недеформируемых участков границ.
4. Для моделирования абсолютно жестких связей между узлами.
5. Для жесткого соединения одинаковых компонент движения нескольких узлов.

24) Какие степени свободы элемента RBE3 выбираются по умолчанию в качестве зависимых?

1. Степени свободы базового узла, по которым передаются нагрузки.
2. Все степени свободы базового узла.
3. Все степени свободы узлов осреднения.
4. Указанные степени свободы узлов осреднения.
5. Все степени свободы одного из узлов осреднения.

25) В каких случаях полезен элемент RSPLINE?

1. При сопряжении сеток разного размера.
2. При передаче нагрузок на отдельные части конструкции.
3. При сопряжении элементов разных типов.
4. При наличии жестких включений.
5. При наличии шарнирных соединений.

26) Какие степени свободы выбираются в базовом узле элемента RBE3 при сопряжении оболочки с трехмерным телом?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. RX.
5. RY.
6. RZ.

27) Какие степени свободы выбираются в узлах осреднения элемента RBE3 при сопряжении оболочки с трехмерным телом?

1. UX.
2. UY.
3. UZ.
4. RX.
5. RY.
6. RZ.

28) Как по умолчанию описывается соединение объемных элементов с оболочечными при использовании RSSCON?

1. С помощью номеров элементов.
2. С помощью номеров узлов.
3. С помощью номеров степеней свободы.
4. С помощью номеров зависимых степеней свободы.
5. С помощью номеров независимых степеней свободы.

29) Какое приложение используется для задания MPC в среде MSC.Patran?

1. Geometry.
2. Elements.
3. Loads/BCs.
4. Properties.
5. Load Cases.
6. Fields.
7. Analysis.
8. Insight.

16 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

«Исследование напряженно-деформированного состояния круглой (на развертке) цилиндрической панели»

Исходные данные: круглая цилиндрическая панель (рисунок 16.1) жестко закреплена по контуру и нагружена через жесткий центр силой $P = 10$ кН. Радиус цилиндра $R = 1$ м; радиус панели $r_1 = 550,1$ мм; радиус жесткого центра $r_0 = 66,1$ мм; толщина панели $h = 5$ мм; модуль упругости $E = 1,96 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Допущение: отношения диаметра панели $2r_1$ и радиуса кривизны оболочки R к толщине h больше 10, что позволяет использовать для ее моделирования оболочечные элементы.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние круглой цилиндрической панели; построить графики изменения мембранных и изгибных окружных напряжений в сечении $y = 0$.

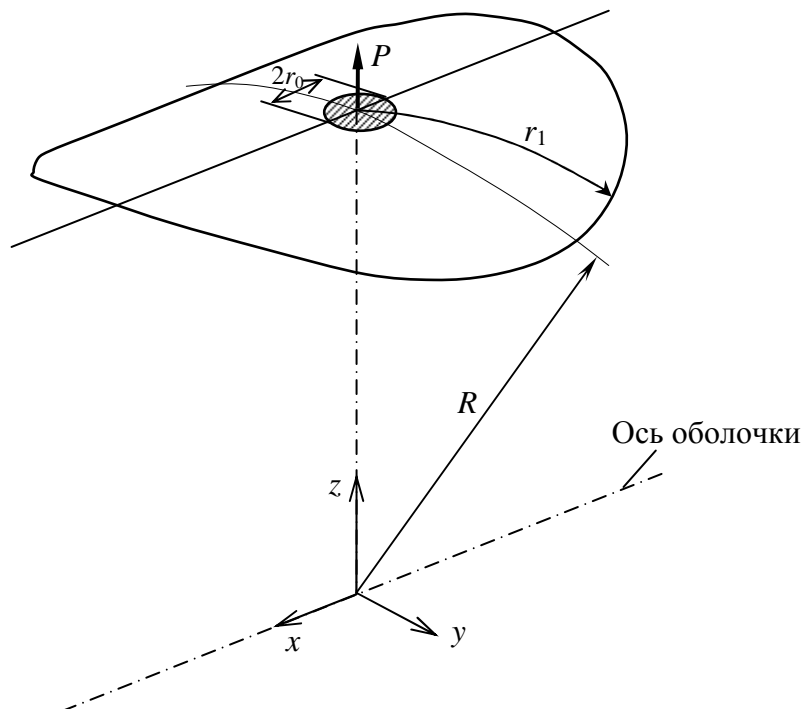


Рисунок 16.1 – Геометрия оболочки

Конструкция имеет двойную симметрию (относительно плоскостей xz и yz), что позволяет ограничиться рассмотрением лишь четверти панели. При этом вместо силы P нужно будет прикладывать силу $P/4$.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных: *File>New*.
В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab4.db, *OK*.

2. Задать начальные установки.

В разделе «Tolerance» диалоговой панели «New Model Preference» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 550.1 (в мм), *OK*.

3. Построить две дуги окружности на плоскости *XU*.

Выбираем приложение «Geometry» и для построения на заданной плоскости дуги окружности, начало и конец которой определяются углами, в выпадающих меню диалоговой панели устанавливаем сочетание *Create/ Curve/2D ArcAngles*.

В соответствующие поля вводим:

«Radius»: 550.1 (радиус, мм)

«Start Angle»: 0 (начальный угол, град)


«End Angle»: 90 (конечный угол, град)

«Construction Plane List»: Coord 0.3 (плоскость построения перпендикулярна оси *Z* глобальной декартовой системы координат)

«Center Point List»: [0 0 0] (координаты центра)

Apply.

Для построения второй дуги меняем только радиус «Radius»: 66.1, *Apply*.

С помощью кнопки  панели инструментов включаем отображение ссылочных номеров геометрических объектов.

4. Выполнить масштабирование первой дуги по оси *U*.

Данная операция требуется для получения круглой на развертке панели. При этом коэффициент масштабирования вычисляется в соответствии с рисунком 16.2 по следующей формуле:

$$k_y = \frac{R}{r_1} \sin \frac{r_1}{R} = 0,95032.$$

Для выполнения операции масштабирования линии устанавливаем сочетание *Transform/Curve/Scale*.

Вводим:

«Scale Factor»: 1.0 0.95032 1.0 (коэффициенты масштабирования)

«Repeat Count»: 1 (количество повторов).

Далее устанавливаем флаг «Delete Original Curves» (удалить исходные кривые).

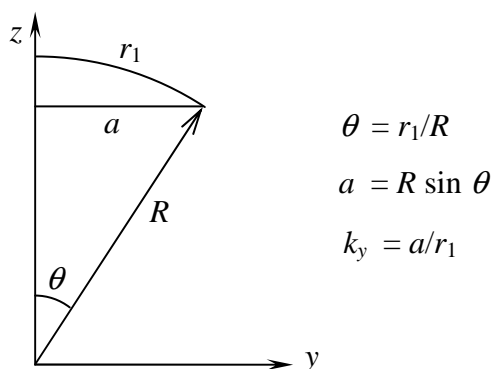







Рисунок 16.2 – К определению коэффициента масштабирования

Активизируем поле «Curve List» и в графическом окне указываем кривую 1 (большую дугу).

Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*.

На вопрос «Вы хотите удалить исходные кривые?» отвечаем нажатием кнопки *Yes* (да).

С помощью кнопки  (Iso 1 View) панели инструментов устанавливаем изометрическую проекцию.

Перемещать и вращать модель можно также мышью, нажав среднюю кнопку (колесико). Напомним, что для изменения режима здесь следует воспользоваться кнопками , , , .

5. Построить новую дугу окружности на плоскости YZ.

Опять устанавливаем сочетание Create/Curve/2D ArcAngles.

Вводим:

«Radius»: 1000 (радиус)

«Start Angle»: 45 (начальный угол)

«End Angle»: 90 (конечный угол)

«Construction Plane List»: Coord 0.1 (плоскость построения перпендикулярна оси X глобальной декартовой системы координат)

«Center Point List»: [0 0 0] (координаты центра)

Apply.



6. Построить цилиндрическую поверхность путем вытягивания дуги в заданном направлении.

Устанавливаем сочетание Create/Surface/Extrude.

В поле «Translation Vector» вводим компоненты вектора смещения: <600 0 0>.

Активизируем поле «Curve List» и в графическом окне указываем кривую 4 (построенную на предыдущем шаге дугу).

Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*.

Для визуализации внутренней геометрии поверхности можно воспользоваться кнопкой  или  панели инструментов.

7. Спроецировать построенные ранее кривые на поверхность.

В верхней части диалоговой панели устанавливаем сочетание Create/ Curve/Project.

Вводим:

«Project onto»: Surface (проецировать на поверхность)

«Option»: Define Vector (определить вектор)

«Projection Vector»: $\langle 0 \ 0 \ 1 \rangle$ (вектор проецирования направляется по оси Z глобальной системы координат).

Далее устанавливаем флаг «Delete Original Curves» (удалить исходные кривые) и отключаем опцию автоматического выполнения «Auto Execute».

Активизируем поле «Curve List» и в графическом окне указываем мышью кривые 2 и 3, удерживая нажатой клавишу *Shift*.

Затем активизируем область ввода «Surface List» и указываем поверхность 1, *Apply*.

Кнопкой *Yes* подтверждаем удаление исходных кривых.

8. Обрезать поверхность вдоль спроецированных линий.

Для редактирования кромок поверхности используем сочетание Edit/ Surface/Edge.

С помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

Сначала используем установленную по умолчанию опцию «Retain Long Portion of Edge» (оставить большую часть периметра).

Для поля «Surface» указываем поверхность 1, а для поля «Curve List» – кривую 5 (расположенную ближе к центру цилиндрической панели).

Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*.

Затем устанавливаем опцию «Retain Short Portion of Edge» (оставить меньшую часть периметра), используя рядом расположенную кнопку.

Для поля «Curve List» указываем кривую 6, *Apply*.

9. Удалить лишние кривые.

Выбираем сочетание Delete/Curve.

Активизируем область ввода «Curve List» и в графическом окне мышью вытягиваем прямоугольник выбора так, чтобы он охватил всю модель.

При этом должна появиться запись Curve 4:6.

При необходимости нажимаем *Apply*.

Таким образом, геометрическая модель рассматриваемой четверти цилиндрической панели, описывается одной поверхностью (рисунок 16.3).

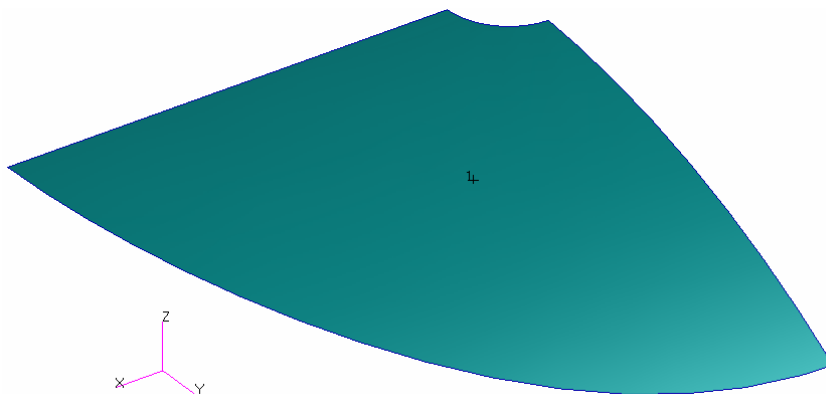


Рисунок 16.3 – Геометрическая модель четверти панели

10. Проверить ориентацию нормали к поверхности.

Устанавливаем сочетание Show/Surface/Normal.

Для поля «Surface List» указываем поверхность 1, *Apply*.

Нормаль к построенной нами поверхности должна быть направлена наружу. В противном случае необходимо изменить ее направление с помощью сочетание Edit/Surface/Reverse.

11. Задать опорные точки сетки.

Выбираем приложение «Elements».

Сначала для задания равномерного расположения опорных точек сетки устанавливаем сочетанием Create/Mesh Seed/Uniform.

Используя опцию «Number of Elements», вводим число элементов: Number = 30.

Активизируем поле «Curve List» и указываем кромку, примыкающую к жесткому центру. При необходимости нажимаем *Apply*.

Затем для сгущения сетки к жесткому центру устанавливаем сочетание Create/Mesh Seed/One Way Bias.

Используя опцию «Num Elems and L2/L1», вводим число элементов и отношение длин: Number = 30; L2/L1 = 0.1.

Активизируем поле «Curve List» и указываем одну из кривых, расположенных в плоскостях симметрии, *Apply* (если требуется).

12. Разбить поверхность на конечные элементы.

Для генерации сетки в том же приложении устанавливаем сочетание Create/Mesh/Surface.

Выбираем:

«Elem Shape»: Quad (четырёхугольная форма)

«Mesher»: IsoMesh (генератор регулярных изосеток)

«Topology»: Quad4 (топология – четырёхугольник с четырьмя узлами).


Отметим, что здесь мы используем генератор регулярных сеток, поскольку построенная поверхность является простой (изображается зеленым цветом).

Активизируем поле «Surface List» и в графическом окне указываем поверхность 1, *Apply*.

13. Построить дополнительный узел в центре цилиндрической панели.

Устанавливаем сочетание Create/Node/Edit.


В поле «Node Location List» вводим координаты узла в квадратных скобках (в мм): [0 0 1000]. *Apply*.

Для того чтобы увидеть построенный узел, воспользуемся кнопкой  панели инструментов, позволяющей менять размер изображения узлов.

14. Для моделирования жесткого центра построить элемент RBE2.

Используем сочетание Create/MPC/RBE2.


Для удобства выбора узлов с помощью соответствующей кнопки панели инструментов устанавливаем проекцию на плоскость XY.

Там же нажимаем кнопку  и в графическом окне выделяем мышью центральный фрагмент оболочки, чтобы приблизить его.

Для определения зависимых и независимых членов элемента жесткого тела нажимаем кнопку *Define Terms*. При этом появляется дополнительная диалоговая панель.

По умолчанию здесь установлен режим создания зависимых членов (Create Dependent).

В области «DOFs» (степени свободы) выделяем все перемещения UX, UY, UZ, RX, RY, RZ, используя стандартные для Windows-приложений приемы.

Активизируем поле «Node List», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  и с помощью полигона в графическом окне указываем зависимые узлы, лежащие на примыкающей к жесткому центру кромке (рисунок 16.4). При этом вершины полигона отмечаем щелчком левой кнопки мыши, а последнюю – двойным щелчком.

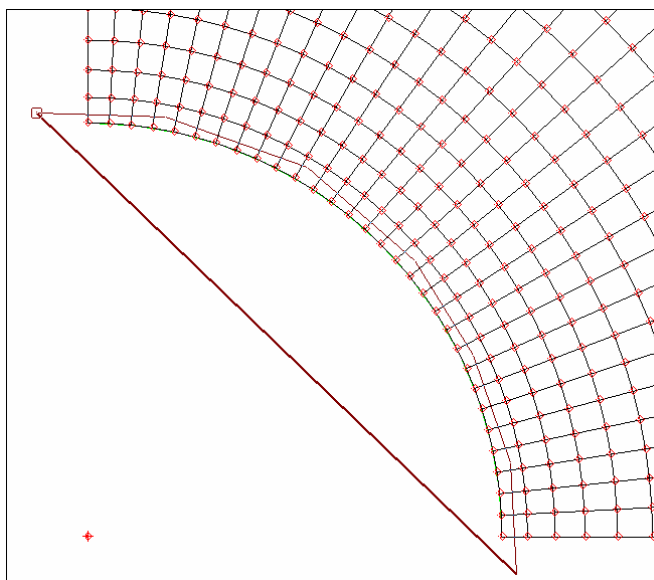


Рисунок 16.4 – Указание зависимых узлов с помощью полигона

Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*. Должна появиться соответствующая запись в верхней таблице диалоговой панели (рисунок 16.5).

После этого автоматически устанавливается режим создания независимых членов (Create Independent).

Для поля «Node List» указываем один узел в центре оболочки (построенный на предыдущем шаге).

При необходимости нажимаем *Apply*. Во второй таблице также должна появляться запись (см. рисунок 16.5).

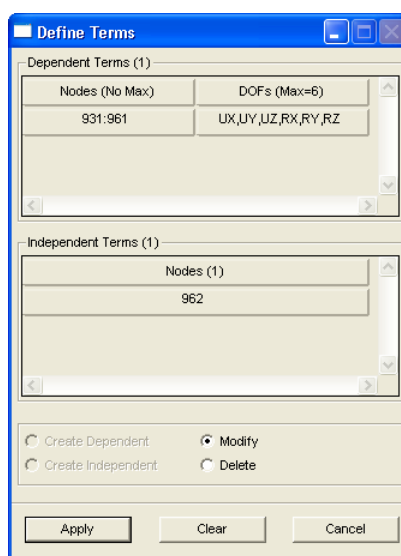



Рисунок 16.5 – Определение зависимых и независимых членов

В заключение закрываем дополнительное окно кнопкой *Cancel* и в основной диалоговой панели приложения нажимаем *Apply*.

Жесткий элемент RBE2 изображается в виде совокупности красных линий, соединяющих независимый узел со всеми зависимыми.

Кнопкой  панели инструментов устанавливаем подходящий масштаб.

15. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «Materials» и выбираем сочетание Create/Isotropic/Manual Input.

В поле «Material Name» вводим имя материала, например steel.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* и вводим свойства:

«Elastic Modulus» = 1.96e5 (модуль упругости в МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.


В конце нажимаем кнопку *Apply*.

16. Определить свойства элементов.

Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств оболочечных элементов устанавливаем сочетание Create/2D/Shell.

В поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например panel.

Не меняя установленные по умолчанию опции, нажимаем кнопку *Input Properties*. При этом появляется дополнительное окно, где будет выбран стандартный элемент однородной пластины CQUAD4, который используется для моделирования как пластин, так и оболочек.

Нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем steel.

В поле «Thickness» вводим значение толщины: 5 (в мм).

Закрываем окно кнопкой *OK*.

Нажимаем кнопку *Select Application Region* и указываем поверхность 1.

Затем последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

17. Задать граничные условия симметрии.

Напомним, что здесь для узлов, расположенных в плоскости симметрии, необходимо закрепить поступательное перемещение в направлении, перпендикулярном этой плоскости, и два угла поворота относительно осей, параллельных данной плоскости.

Для удобства указания узлов устанавливаем проекцию на плоскость XY.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений выбираем сочетание Create/Displacement/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например `sym_x`.

Нажимаем кнопку *Input Data* (ввод данных).

В поле «Translations» (поступательные перемещения) вводим `<0,,>`, что соответствует $u_x = 0$.

В поле «Rotations» (углы поворота) вводим `<,0,0>`, что соответствует $\vartheta_y = \vartheta_z = 0$. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора конечно-элементных объектов устанавливаем опцию «Select»: FEM.

Активируем поле «Select Nodes» и выделяем прямоугольником все узлы, расположенные в плоскости *YZ*, включая независимый узел элемента RBE2 в центре оболочки. Нажимаем *Add*.

Затем увеличиваем центральный фрагмент оболочки.

Снова активируем поле «Select Nodes» и указываем один зависимый узел, также лежащий в плоскости *YZ*. Нажимаем *Remove* для удаления данного узла из области приложения, поскольку на зависимые степени свободы нельзя накладывать граничные условия.

В конце нажимаем *OK* и *Apply*.

Аналогично определяем второй набор граничных условий симметрии для узлов, расположенных в плоскости *XZ*. Присвоим ему имя `sym_y`.

При этом для поступательных перемещений вводим `<,0,>`, а для углов поворота – `<0,,0>`.


Область приложения здесь должна содержать все узлы, лежащие в плоскости *XZ* (включая независимый узел), за исключением одного зависимого узла.

18. Задать граничные условия защемления по внешнему контуру панели.

В поле «New Set Name» вводим новое имя, например `fixed`.

Нажимаем кнопку *Input Data*, в полях «Translations» и «Rotations» вводим `<0,0,0>` для фиксации всех перемещений. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кривая или кромка) и указываем внешнюю кромку поверхности.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

19. Приложить сосредоточенную силу.

В том же приложении выбираем сочетание Create/Force/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например load.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Force» для задания силы, действующей в направлении оси *Z*, вводим следующие компоненты (в Н): <0 0 2500>. *OK*.

Необходимо напомнить, что здесь мы задаем не полную силу, а $P/4$.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора конечно-элементных объектов устанавливаем опцию «Select»: FEM.

Активизируем поле «Select Nodes» и указываем независимый узел, где приложена сила (см. рисунок 1).

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

20. Сохранить базу данных.

В полосе меню выбираем *File>Save*. В результате выполнения этой команды введенные данные по модели записываются в файл Lab4.db.

21. Запустить задачу на счет.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание *Analyze/Entire Model/Full Run*.

Для дополнительного вывода погонных сил и моментов в оболочке следует модифицировать расчетный случай. С этой целью нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем Default. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Далее нажимаем кнопку *Output Request* (запросы по выводу).

В верхнем списке «Select Result Type» указываем строку Element Forces (силы в элементах), *OK*.

Затем последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И наконец, собственно для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

22. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл lab4.xdb, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

23. Отобразить на экране дисплея поле напряжений по Мизесу.

Здесь полезно предварительно убрать с экрана изображение геометрических объектов. С этой целью выбираем в полосе меню команду *Display> Plot/Erase* и в подразделе «Geometry» нажимаем кнопку *Erase* (стереть). Отметим, что расположенная рядом кнопка *Plot* позволяет снова включить отображение геометрических объектов.

Для закрытия диалоговой панели нажимаем *OK*.

Выбираем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание *Create/Quick Plot*.

В списке «Select Fringe Result» в качестве величины для многоцветного представления ее поля указываем *Stress Tensor* (тензор напряжений).

Ниже с помощью кнопки *Position* можно выбрать нижнюю (*Z1*) или верхнюю (*Z2*) поверхность оболочки, для которой будут изображаться результаты. В нашем случае, поскольку нормаль к поверхности направлена наружу, нижней будет внутренняя поверхность, а верхней – наружная.

В качестве компоненты (*Quantity*) выбираем *von Mises* (напряжение по Мизесу, или эквивалентное напряжение по теории прочности энергии формоизменения).

Далее в списке «Select Deformation Result» в качестве результата для изображения деформированного состояния модели указываем строку *Displacement, Translational* (поступательные перемещения).

При желании можно установить флаг «Animate» для включения анимации.

Нажимаем кнопку-пиктограмму  и отключаем опцию «Show Undeformed» (показать недеформированное состояние).

Результаты появляются на экране после нажатия кнопки *Apply* (рисунок 16.6).

Можно видеть, что максимальное напряжение составляют 264 МПа, а максимальное перемещение – 0,846 мм.

24. Построить графики изменения мембранных и изгибных окружных напряжений в сечение $Y = 0$.

Мембранные напряжения – это напряжения в срединной поверхности, равные полусумме напряжений на верхней и нижней поверхностях оболочки, а изгибные – определяются как полуразность этих напряжений.

Мембранные σ_{ij}^M и изгибные $\sigma_{ij}^{из}$ напряжения выражаются также через погонные силы N_{ij} и моменты M_{ij} :

$$\sigma_{ij}^M = \frac{N_{ij}}{h}; \quad \sigma_{ij}^{M3} = \frac{6M_{ij}}{h^2},$$

где h – толщина оболочки.

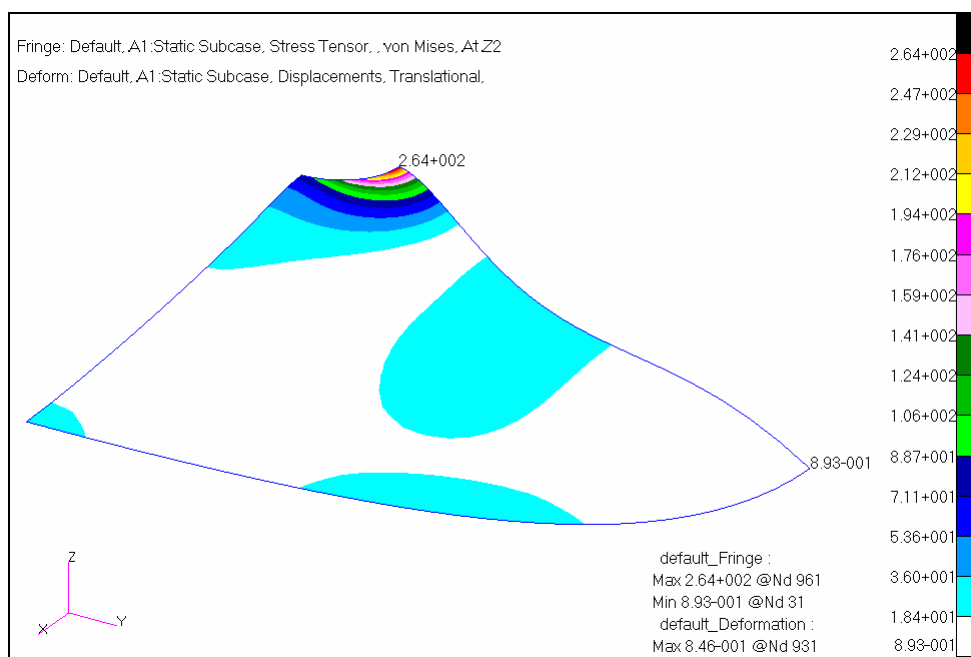



Рисунок 16.6 – Поле напряжений по Мизесу (в МПа) на наружной поверхности оболочки

Следует отметить, что вдоль сечения $Y = 0$ окружные напряжения (а также погонные силы и моменты) совпадают с компонентой Y Component в глобальной декартовой системе координат или X Component в системе координат элемента. Для отображения на экране систем координат элементов необходимо выбрать приложение «Elements», установить сочетание Show/Element/Coord. Sys. и для поля «Select Elements» указать нужные элементы.

Для построения двумерного графика в приложении «Results» устанавливаем сочетание Create/Graph/ Y vs X .

В списке «Select Y Results» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем Shell Forces, Force Resultant (погонные силы в оболочке). Ниже в выпадающем меню «Quantity» указываем компоненту Y Component (или X Component).

В меню « X » за ось абсцисс принимаем Path Length (длину траектории).

Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

В выпадающем меню «Addtl. Display Control» (дополнительное управление изображением) выбираем Curves (кривые).

Активизируем поле выбора определяющих траекторию кривых «Select Path Curves» и в графическом окне указываем кромку, лежащую в плоскости XZ. Если кромка не выделяется, то следует включить отображение геометрических объектов (команда полосы меню Display>Plot/Erase).


В поле «Points Per Segment» (число точек на сегмент) вводим число 100 для получения более гладких графиков.

Далее с помощью кнопки-пиктограммы  устанавливаем вид для задания опций вычерчивания.

Для параметра «Coordinate Transformation» (преобразование координат) устанавливаем значение Global (если выбрана y-компонента) или Element IJK (в случае выбора x-компоненты).


В поле «Scalar Factor» (скалярный коэффициент) вводим число 0.2 (т.е. $1/h$ для вычисления мембранных напряжений).

После нажатия кнопки *Apply* в отдельном окне появляется график.

Для наложения на этот график других кривых с помощью кнопки-пиктограммы  устанавливаем вид для задания атрибутов изображения и включаем опцию «Append Curves in XY Window».

Далее устанавливаем вид для выбора результатов (кнопка ).

В списке «Select Y Results» выбираем Shell Forces, Moment Resultant (погонные моменты в оболочке).

Нажимаем кнопку-пиктограмму  и в поле «Scalar Factor» вводим значение -0.24 (т.е. $6/h^2$ для вычисления изгибных напряжений; знак минус требуется для согласования правила знаков).

Нажимаем *Apply*.

Получаемые при этом графики показаны на рисунке 16.7.

Ось абсцисс здесь представляет собой расстояние, отсчитываемое вдоль созданной траектории.

25. Выйти из программы: *File>Quit*.

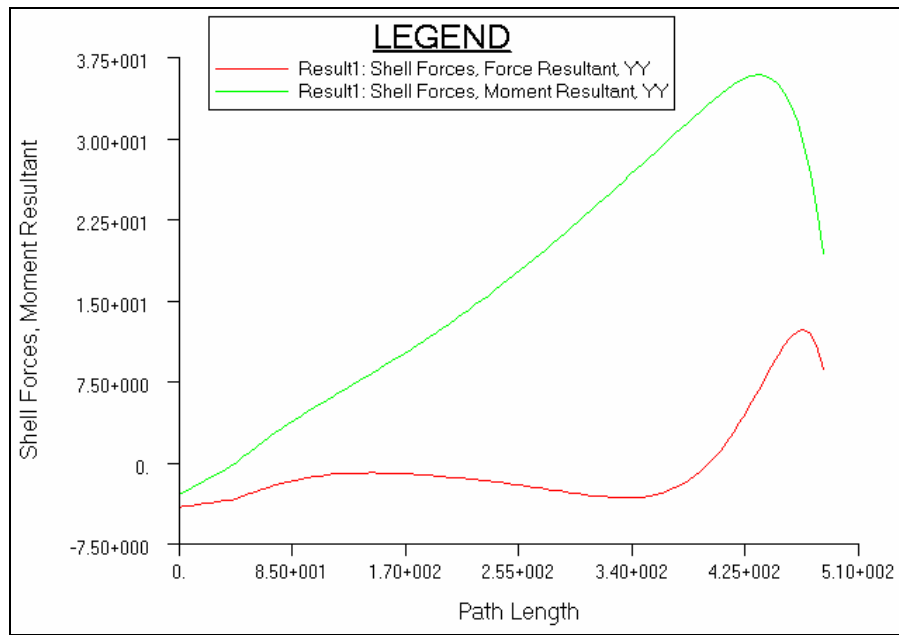


Рисунок 16.7 – Графики мембранных и изгибных окружных напряжений (в МПа)

17 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

«Исследование напряженно-деформированного состояния косозаделанного кессона»

Исходные данные: косозаделанный кессон (угол стреловидности 45°), имеющий четыре стальных пояса площадью сечения 240 мм^2 каждый и дюралевую обшивку толщиной 1 мм, на одном конце нагружен поперечной силой 10 кН, на другом его пояса закреплены неподвижно (рисунок 17.1). Верхняя и нижняя панели обшивки дополнительно подкреплены дюралевыми стрингерами площадью сечения 40 мм^2 каждый. Конструкция включает в себя пять равномерно расположенных нервюр толщиной 1 мм, перпендикулярных оси кессона; помимо них имеется еще одна нервюра в сечении у заделки. Для стали: модуль упругости $2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона 0,3; для дюралюминия: модуль упругости $7,1 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона 0,3.

Допущение: жесткость на изгиб и кручение поясов и стрингеров невелика, что позволяет использовать для их моделирования одноосные стержневые элементы.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние кессона; построить эпюры осевых напряжений в поясах.

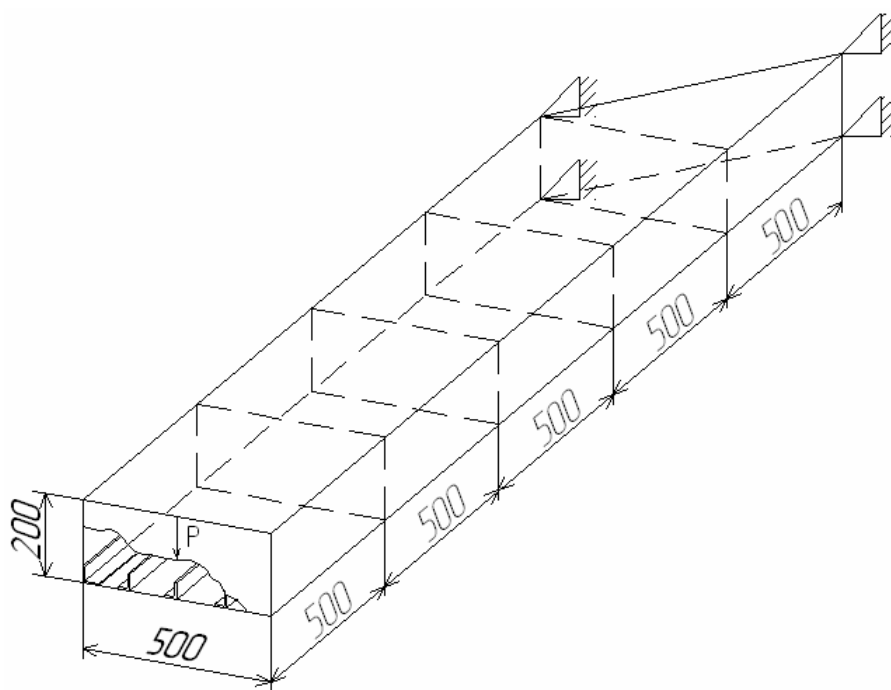


Рисунок 17.1 – Геометрия кессона

Начало системы координат поместим в левую нижнюю точку закрепленного торца тонкостенной конструкции. При этом ось X направим вправо, Y – вверх, а Z – по оси кессона.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.


1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных: *File>New*.

В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab5.db, *OK*.

2. Задать начальные установки.

В разделе «Tolerance» диалоговой панели «New Model Preference» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 2500 (в мм), *OK*.

3. Построить нижнюю панель кессона.

Предварительно с помощью кнопки  панели инструментов устанавливаем вид на плоскость XZ , а также включаем нумерацию геометрических объектов.

Выбираем приложение «Geometry» и для построения поверхности по четырем вершинам используем сочетание *Create/Surface/Vertex*.

В соответствующие поля вводим в квадратных скобках координаты четырех вершин (в мм):

«Surface Vertex 1 List»: [0 0 0]

«Surface Vertex 2 List»: [500 0 -500]

«Surface Vertex 3 List»: [500 0 2000]

«Surface Vertex 4 List»: [0 0 2000]

Apply.

Далее необходимо разрезать полученную поверхность на пять частей. Это удобно выполнить с помощью плоскостей.

Для построения сразу несколько плоскостей, нормальных к заданной кривой устанавливаем сочетание *Create/Plane/Interpolate*.

В появившейся диалоговой панели в поле «Number of Planes» (число плоскостей) вводим значение 5 и для поля «Curve List» указываем левую кромку поверхности (т.е. Surface 1.4). Остальные параметры оставляем без изменения.

Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*.

И, собственно, для разрезания поверхности плоскостями выбираем сочетание *Edit/Surface/Break*.

В качестве инструмента для резания используем плоскость, т.е. «Option»: Plane.

Для удаления исходных поверхностей устанавливаем флаг «Delete Original Surfaces».

Отметим, что ненужные в дальнейшем исходные поверхности всегда следует удалять. Во-первых, они будут мешать выбору геометрических объектов, а, во-вторых, при генерации конечно-элементных сеток могут появиться дубликаты элементов, приводящие к увеличению жесткости.

Для поля «Surface List» указываем поверхность 1, а для поля «Break Plane List» – плоскость 1 (самая верхняя).

Если требуется, нажимаем *Apply* и кнопкой *Yes* подтверждаем удаление исходных поверхностей.

Операцию разбиения поверхности повторяем еще три раза, каждый раз указывая нижнюю поверхность и соответствующую плоскость.

Получаемые при этом поверхности показаны на рисунке 17.2 (изображение повернуто на 90°).

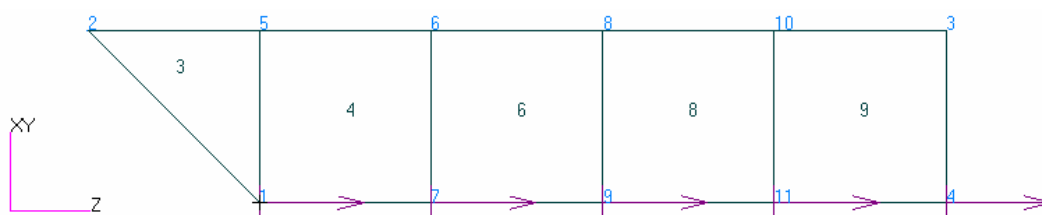


Рисунок 17.2 – Разрезание нижней панели кессона с помощью плоскостей

В заключение для удаления плоскостей устанавливаем сочетание Delete/Plane.

В поле «Plane List» указываем все пять плоскостей, *Apply*.

С помощью кнопки *Iso 1 View* панели инструментов устанавливаем изометрическую проекцию.

4. Построить верхнюю панель кессона.

Для копирования поверхностей со смещением устанавливаем сочетание Transform/Surface/Translate.

Вводим:

«Direction Vector»: <0 200 0> (направляющий вектор)

«Repeat Count»: 1 (число копий).

Снимаем флаг «Delete Original Surfaces» (удалить исходные поверхности).

Активизируем поле «Surface List» и указываем все поверхности, используя зону выбора в виде прямоугольника.

Нажимаем *Apply*, если требуется.

Для визуализации внутренней геометрии поверхностей нажимаем кнопку *Smooth shaded* панели инструментов.

5. Построить нервюры и боковые стенки.

Для построения поверхности путем вытягивания линии в заданном направлении устанавливаем сочетание *Create/Surface/Extrude*.

В поле «Translation Vector» вводим компоненты вектора смещения: <0 200 0>.

Активизируем поле «Curve List» и в графическом окне указываем все кромки поверхностей нижней панели (здесь удобно предварительно установить вид на плоскость XY).

Нажимаем *Apply* (если требуется).

6. Разрезать поверхности для получения линий, представляющих оси стрингеров.

В качестве режущего инструмента здесь также удобно воспользоваться плоскостью.

Для построения сразу нескольких плоскостей, нормальных к заданной кривой устанавливаем сочетание *Create/Plane/Interpolate*.

В появившейся диалоговой панели в поле «Number of Planes» (число плоскостей) вводим значение 5 и для поля «Curve List» указываем одну из горизонтальных кромок свободного торца (например, верхнюю).

Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*.

Для разрезания поверхности выбираем сочетание *Edit/Surface/Break*.

Выбираем «Option»: Plane.

Для удаления исходных поверхностей устанавливаем флаг «Delete Original Surfaces».

Данную команду выполняем три раза, причем для поля «Surface List» всегда указываем все поверхности, а для поля «Break Plane List» – по очереди три средние плоскости.

Каждый раз нажимаем *Apply* (если требуется) и кнопкой *Yes* подтверждаем удаление исходных поверхностей.

В результате получаем геометрическую модель кессона, состоящую из одних поверхностей (рисунок 17.3).

Отметим, что вспомогательные плоскости следует удалить (сочетание Delete/Plane).

7. С помощью групп разделить геометрическую модель на отдельные части. Для удобства дальнейшей работы в полосе меню выбираем команду *Preferences>Picking*.

Включаем опцию «Enclose centroid» (выбор объектов, центр тяжести которых попадает в зону выбора). Окно закрываем кнопкой *Close*.

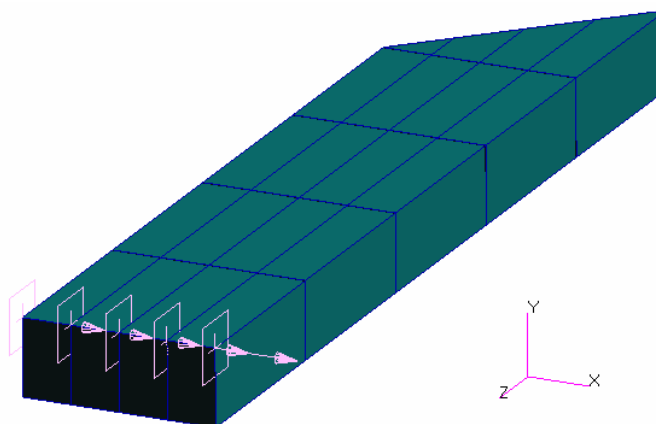



Рисунок 17.3 – Геометрическая модель кессона

С помощью кнопки *Front view* панели инструментов устанавливаем вид на плоскость XY.

В полосе меню выбираем команду *Group>Create*. При этом справа появляется диалоговая панель.

В поле «New Group Name» вводим имя вновь создаваемой группы, например bottom.

Активизируем поле «Entity Selection» (выбор объектов), в пиктографическом меню выбора дважды нажимаем кнопку  (сначала для входа в подменю геометрических объектов, а затем для выбора конкретно поверхности) и в графическом окне указываем поверхности нижней панели кессона, обводя их прямоугольником (рисунок 17.4).

В конце нажимаем *Apply*.

Для следующей группы вводим другое имя, например top.

В нее аналогичным образом помещаем поверхности верхней панели кессона (см. рисунок 17.4).

И наконец, в группу с именем lateral записываем поверхности, представляющие нервюры и боковые стенки (см. рисунок 17.4).

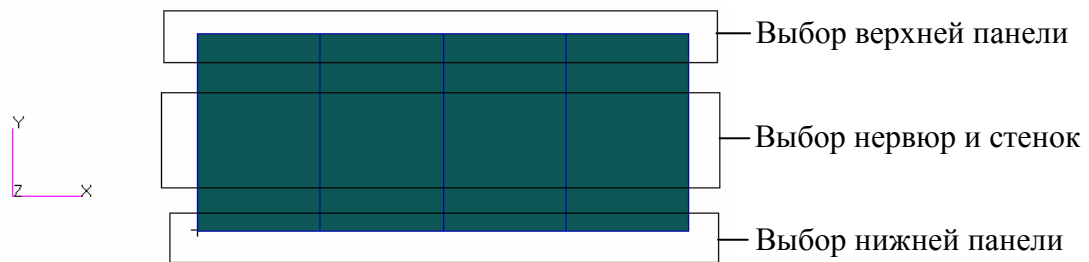


Рисунок 17.4 – Выбор отдельных частей кессона

8. Разбить поверхности и продольные линии нижней панели на конечные элементы.

В полосе меню выбираем команду *Group>Post* (либо выбираем ее из выпадающего меню диалоговой панели «Group»).

В списке «Select Groups to Post» в качестве групп, посылаемых в графическое окно, указываем лишь одну группу *bottom*, *Apply*.

При этом группа *bottom* становится текущей, т.е. в нее будут помещаться все вновь создаваемые объекты.

Далее запускаем приложение «Elements» и для разбиения поверхностей устанавливаем сочетание *Create/Mesh/Surface*.

Выбираем:

«Elem Shape»: Quad (четырёхугольная форма)

«Mesher»: IsoMesh (генератор регулярных изосеток)

«Topology»: Quad4 (топология – четырёхугольник с четырьмя узлами).

Активизируем поле «Surface List» и в графическом окне указываем все поверхности.

Используя автоматически рассчитанную программой глобальную длину стороны элемента, нажимаем *Apply*.

Затем для разбиения линий устанавливаем сочетание *Create/Mesh/Curve*.

В качестве топологии элемента указываем *Bar2* (линейный двухузловой).

Активизируем поле «Curve List» и в графическом окне, удерживая нажатой клавишу *Shift*, указываем все продольные кромки, представляющие пояса и стрингеры (всего 24 линии).

Нажимаем *Apply*.

Отметим, что линейные элементы изображаются желтым цветом.

9. Разбить поверхности и продольные линии верхней панели на конечные элементы.

Здесь сначала отображаем в графическом окне и делаем текущей группу top (для доступа к диалоговой панели «Group» следует внизу выбрать одноименную вкладку).

Затем точно так же, как и для нижней панели кессона, разбиваем на конечные элементы все поверхности и все продольные кромки.

10. Разбить поверхности, представляющие нервюры и боковые стенки, на конечные элементы.

Отображаем в графическом окне и делаем текущей группу lateral.

Все содержащиеся в этой группе поверхности разбиваем на элементы Quad4.

11. Сшить конечно-элементную модель.

Поскольку при генерации стержневых элементов мы разбивали кромки поверхностей, их узлы совпадают в пространстве с узлами оболочечных элементов, что позволяет легко объединить эти узлы, т.е. сшить модель.

Предварительно следует послать в графическое окно все группы (команда *Group>Post*).

В приложении «Elements» устанавливаем сочетание Equivalence/All/Tolerance Cube.

Ничего не меняя, нажимаем *Apply*. При этом места сшивки модели обводятся кружочками.

Отметим, что проверить наличие дубликатов элементов можно с помощью сочетания *Verify/Element/Duplicates*.

12. Задать свойства материалов.

Запускаем приложение «Materials» и выбираем сочетание *Create/Isotropic/Manual Input*.

В поле «Material Name» вводим имя материала, например dural.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* и вводим свойства:

«Elastic Modulus» = 7.1×10^4 (модуль упругости дюралюминия, МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона дюралюминия)

ОК.

Нажимаем кнопку *Apply*.

В поле «Material Name» вводим другое имя материала, например steel.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* и вводим свойства:

«Elastic Modulus» = 2.1×10^5 (модуль упругости стали, МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона стали)

ОК.

В конце нажимаем *Apply*.

13. Определить свойства элементов.


Выбираем приложение «Properties».

Для задания свойств оболочечных элементов устанавливаем сочетание *Create/2D/Shell*.

Поскольку обшивки, нервюры и боковые стенки изготовлены из одного материала и имеют одинаковую толщину, для них можно определить один общий набор свойств.

В поле «Property Set Name» вводим имя набора, например *skin*.

Не меняя установленные по умолчанию опции, нажимаем кнопку *Input Properties*. При этом появляется дополнительное окно, где будет выбран стандартный элемент однородной пластины CQUAD4, который используется для моделирования как пластин, так и оболочек.

Нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем *dural*.

В поле «Thickness» вводим значение толщины: 1 (в мм).

Закрываем окно кнопкой *OK*.

Нажимаем кнопку *Select Application Region* и указываем все поверхности.

Затем последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

Для задания свойств одноосных стержневых элементов устанавливаем сочетание *Create/1D/Rod*.


Набору свойств поясов присваиваем имя *rovas*.

Не меняя установленные по умолчанию опции, нажимаем кнопку *Input Properties*. При этом появляется дополнительное окно, где будет выбран стержневой элемент общего сечения CROD.

Для поля «Material Name» из списка существующих материалов выбираем *steel*.

В поле «Area» (площадь поперечного сечения) вводим значение 240 (в мм²). *OK*.

Для удобства выбора области приложения этих свойств с помощью кнопки *Top View* панели инструментов устанавливаем вид на плоскость XZ.

Нажимаем *Select Application Region*, в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (линейные элементы) и указываем моделирующие пояса элементы. При этом сначала прямоугольником выбираем линейные элементы с одной стороны, а затем с другой, каждый раз нажимая *Add* (рисунок 17.5; изображение повернуто на 90°).

Для завершения ввода нажимаем *Apply*.

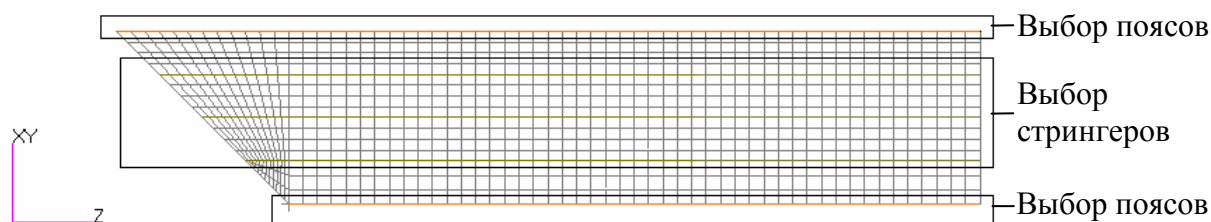


Рисунок 17.5 – Выбор элементов, моделирующих пояса и стрингеры

И наконец, набору свойств стрингеров присваиваем имя *stringer*.

При вводе свойств здесь нужно выбрать материала *dural* и в поле «Area» ввести число 40 (в мм²).

В качестве области приложения следует прямоугольником выбрать соответствующие линейные элементы (см. рисунок 17.5).


14. Задать граничные условия.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений устанавливаем сочетание *Create/Displacement/Nodal*.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например *fixed*.

Нажимаем кнопку *Input Data*, в полях «Translations» (поступательные перемещения) и «Rotations» (углы поворота) вводим <0,0,0> для фиксации всех перемещений. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем четыре угловые точки сечения у заделки, удерживая нажатой клавишу *Shift*.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.


15. Приложить нагрузку.

В том же приложении выбираем сочетание *Create/Force/Nodal*.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например *load*.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Force» для задания силы, действующей против оси *Y*, вводим следующие компоненты (в Н): <0 -5000 0> (*P/2*, поскольку мы будем прикладывать силы в двух точках). *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем на свободном торце кессона две нижние угловые точки.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

16. Запустить задачу на счет.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание *Analyze/Entire Model/Full Run*.

Для дополнительного вывода усилий в стержнях следует модифицировать расчетный случай. С этой целью нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем *Default*. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Далее нажимаем кнопку *Output Request* (запросы по выводу).

В верхнем списке «Select Result Type» указываем строку *Element Forces* (силы в элементах), *OK*.

Затем последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И наконец, собственно для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

17. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab5.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

18. Отобразить на экране дисплея поле напряжений по Мизесу.

Выбираем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание *Create/Quick Plot*.

В списке «Select Fringe Result» в качестве величины для многоцветного представления ее поля указываем *Stress Tensor* (тензор напряжений).

В качестве компоненты (Quantity) выбираем *von Mises* (напряжение по Мизесу).

Далее в списке «Select Deformation Result» в качестве результата для изображения деформированного состояния модели указываем строку *Displacement, Translational* (поступательные перемещения).

При желании можно установить флаг «Animate» для включения анимации. Результаты появляются на экране после нажатия кнопки *Apply*.

Посылая в графическое окно поочередно группы bottom, top и lateral, можно наблюдать распределение напряжений отдельно в нижней и верхней панелях кессона, а также в нервюрах и боковых стенках.


19. Построить эпюры осевых напряжений в поясах.

Для построения двухмерного графика в том же приложении устанавливаем сочетание Create/Graph/Y vs X.


В списке «Select Y Results» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем Bar Forces, Translational (осевые силы в стержнях). Ниже в выпадающем меню «Quantity» указываем компоненту X Component.


В меню «X» за ось абсцисс принимаем Coordinate (координату).

Ниже в поле «Select Coordinate Axis» вводим Coord 0.3, что соответствует оси Z глобальной системы координат.

Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.


Устанавливаем «Target Entity»: Elements (элементы).

Активизируем поле «Select Elements», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (линейные элементы) и указываем моделирующие короткий верхний пояс элементы (здесь удобно предварительно установить фронтальную проекцию, т.е. на плоскость XY).

Далее с помощью кнопки  устанавливаем вид для задания опций вычерчивания.

В поле «Scalar Factor» (скалярный коэффициент) вводим число 0.0041667 (т.е. $1/F$ для вычисления напряжений).

После нажатия кнопки *Apply* в отдельном окне появляется график.

Для наложения на него другой кривой с помощью кнопки-пиктограммы  устанавливаем вид для задания атрибутов изображения и включаем опцию «Append Curves in XY Window».

Далее устанавливаем вид для выбора целевых объектов и для поля «Select Elements» указываем элементы, моделирующие длинный верхний пояс.

В конце нажимаем *Apply*.

Получаемые при этом графики показаны на рисунке 17.6.

Ось абсцисс здесь совпадает с осью Z глобальной декартовой системы координат.

20. Выйти из программы: *File>Quit*.

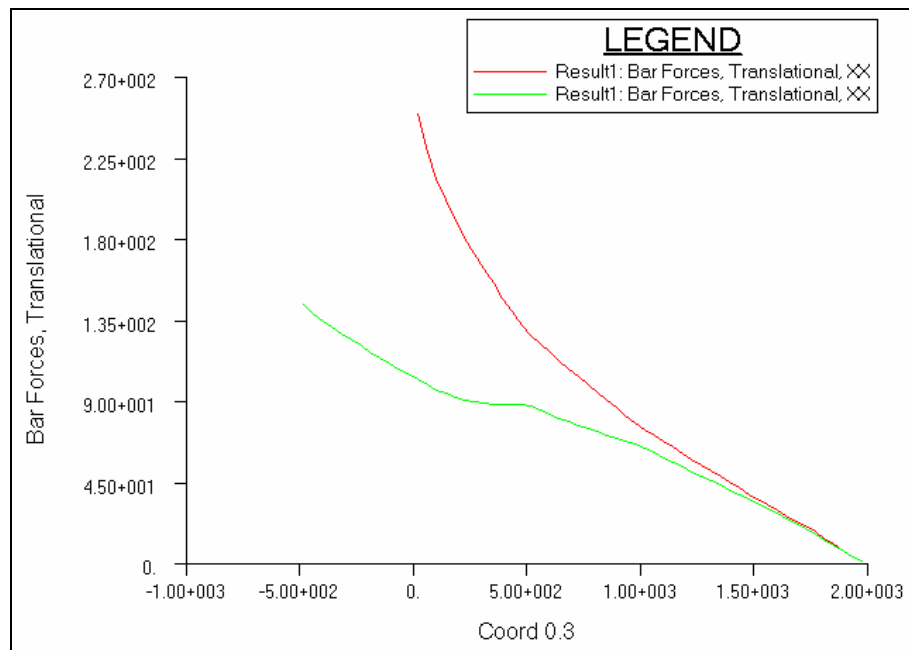


Рисунок 17.6 – Эпюры осевых напряжений в верхних поясах (в МПа)

18 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

«Расчет упора, импортированного из CAD-системы»

Исходные данные: упор (рисунок 18.1) воспринимает нагрузку $F = 10$ кН, равномерно распределенную по лицевой грани; материал – Ст.3 (модуль упругости $2,1 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 235 МПа). Твёрдотельная модель упора, созданная в одной из CAD-систем, записана в файл стандарта IGES.

Допущение: способ крепления данного упора позволяет в качестве граничных условий принять заделку по внутренним поверхностям больших отверстий.

Цель: импортировать твёрдотельную модель; упростить геометрию; определить общее напряженно-деформированное состояние упора.

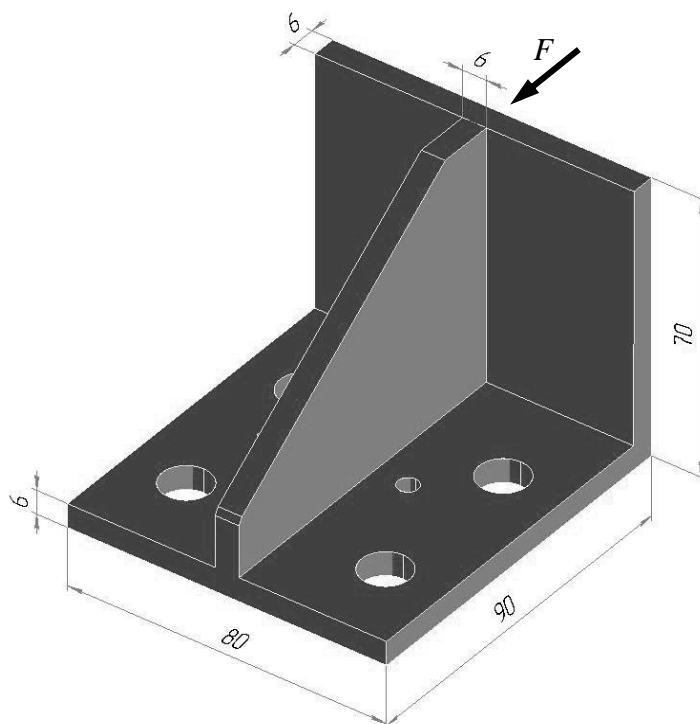


Рисунок 18.1 – Геометрия упора

Перед началом выполнения данной лабораторной работы файл `support.igs`, содержащий геометрическую модель упора, следует скопировать в рабочую папку программы `MSC.Patran`.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных: *File>New*.
Вводим имя файла базы данных Lab6.db, *OK*.
2. Задать начальные установки.
В разделе «Tolerance» диалоговой панели «New Model Preference» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 90 (в мм), *OK*.
3. Импортировать твердотельную модель из IGES-файла.
В полосе меню выбираем команду *File>Import*.
При этом появляется окно, где в выпадающих меню выбираем:
«Object»: Model (объектом импортирования является модель)
«Source»: IGES (источник – нейтральный файл стандарта IGES).
Снимаем флаг «Import to Parasolid» (импортировать в формате геометрического ядра Parasolid).
Указываем имя файла support.igs, *Apply*.
После импорта модели выдается звуковой сигнал и появляется окно со списком импортированных объектов. Закрываем его кнопкой *OK*.
Отметим, что данная модель состоит из одного В-гер тела (т.е. непараметрического объема с произвольным числом граней).
Следует напомнить, что вращать отображаемую в графическом окне деталь можно мышью, нажав среднюю кнопку (колесико).
Упростим геометрию путем удаления двух маленьких отверстий.
4. Разобрать В-гер объем на поверхности, представляющие его грани.
Выбираем приложение «Geometry» и устанавливаем сочетание *Edit/Solid/Disassemble*.
Для удаления исходного объема включаем опцию «Delete Original Solids». Активизируем поле «Solid List» и в графическом окне указываем объем 1. Нажимаем *Apply* и подтверждаем удаление объема кнопкой *Yes*.
5. Удалить внутренние поверхности двух маленьких отверстий.
Устанавливаем сочетание *Delete/Surface*.
Для поля «Surface List», удерживая нажатой клавишу *Shift*, выбираем четыре поверхности, показанные на рисунке 18.2.
Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем кнопку *Apply*.
6. Удалить оставшиеся после выполнения предыдущей операции отверстия в поверхностях.

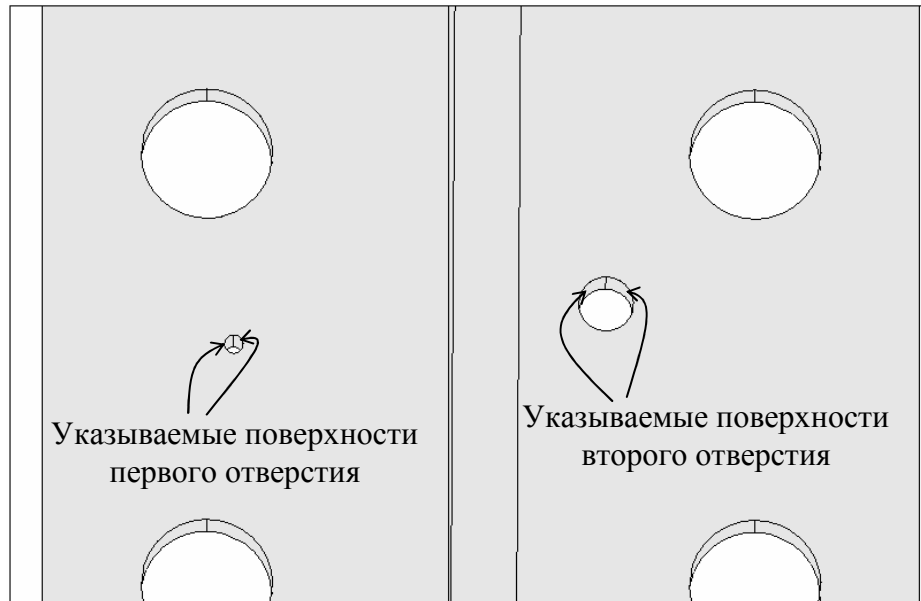


Рисунок 18.2 – К удалению внутренних поверхностей маленьких отверстий

Устанавливаем сочетание *Edit/Surface/Remove Hole*.

Ниже располагаются две кнопки: *Remove Hole* (удалить отверстие) и *Fill Hole* (заполнить отверстие). Нажимаем первую.

Активизируем поле «Trimmed Surface» и указываем сначала, например, правую верхнюю поверхность подошвы (т.е. Surface 11).

Активизируем поле «Inner Loop List» и указываем одну или обе кромки удаляемого отверстия (т.е. Surface 11.9 и/или 11.10).

Если требуется, нажимаем *Apply*.

Далее для поля «Trimmed Surface» указываем левую верхнюю поверхность подошвы (т.е. Surface 3), а для поля «Inner Loop List» – кромки удаляемого отверстия (т.е. Surface 3.9 и/или 3.10). *Apply*.

В заключение указываем нижнюю поверхность подошвы (т.е. Surface 5) и кромки двух удаляемых отверстий (т.е. Surface 5.5 и/или 5.6 и 5.15 и/или 5.16). *Apply*.

7. Построить новый B-пер объем.

Выбираем сочетание *Create/Solid/B-per* для создания тела с представимыми границами путем определения полного списка топологически конгруэнтных поверхностей, образующих замкнутый объем.

Устанавливаем флаг «Delete Original Surfaces» (удалить исходные поверхности).

Активизируем поле «Surface List» и в графическом окне указываем все поверхности, пользуясь зоной выбора в виде прямоугольника.

Нажимаем *Apply* (если требуется) и подтверждаем удаление исходных поверхностей кнопкой *Yes*.

8. Разбить объем на конечные элементы.

Выбираем приложение «Elements» и для построения сетки в объеме устанавливаем сочетание Create/Mesh/Solid.

Выбираем:

«Elem Shape»: Tet (тетраэдральная форма)

«Mesher»: TetMesh (автоматический генератор сложных сеток из тетраэдральных элементов)

«Topology»: Tet10 (топология – тетраэдр с десятью узлами).

Отметим, что здесь мы не используем генератор регулярных сеток, поскольку построенный объем является сложным (изображается белым цветом).

Непараметрический объем можно разбивать только на элементы тетраэдральной формы первого или второго порядка. Тетраэдральный элемент первого порядка имеет только четыре узла в вершинах. Такой элемент обычно завышает жесткость конструкции, и для получения приемлемых результатов здесь требуется довольно мелкая сетка. Поэтому более экономичными являются элементы второго порядка с десятью узлами.

Активизируем поле «Input List» и в графическом окне указываем объем 1. В разделе «Global Edge Length» отключаем опцию автоматического вычисления глобальной длины стороны элемента и в поле «Value» вводим значение 7 (в мм).

Нажимаем *Apply*.

Получаемая здесь разбивка показана на рисунке 18.3.

9. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «Materials» и выбираем сочетание Create/Isotropic/Manual Input.

В поле «Material Name» вводим имя материала, например steel3.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* и вводим свойства:

«Elastic Modulus» = 2.1e5 (модуль упругости в МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона)

ОК.

В конце нажимаем кнопку *Apply*.

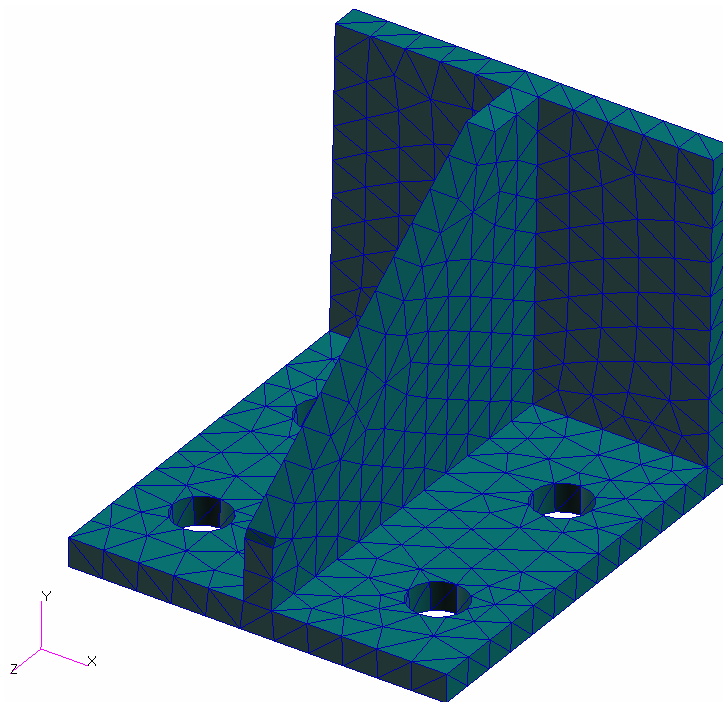



Рисунок 18.3 – Сетка конечных элементов

10. Определить свойства элементов.

Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств объемных элементов устанавливаем сочетание Create/3D/Solid.

В поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например volume. Не меняя установленные по умолчанию опции, нажимаем кнопку *Input Properties*.

Для объемных элементов здесь необходимо указать лишь материал.

Нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем steel3.

Закрываем окно кнопкой *OK*.

Нажимаем кнопку *Select Application Region* и указываем объем 1.

Затем последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

11. Задать граничные условия.


Согласно принятому допущению рассматриваемый упор жестко защемлен по всем оставшимся после упрощения геометрии отверстиям.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений выбираем сочетание Create/Displacement/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например fixed.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Translations» (поступательные перемещения) вводим $\langle 0,0,0 \rangle$, *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (поверхность или грань) и указываем внутренние поверхности оставшихся четырех отверстий (всего восемь).

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

12. Приложить нагрузку.

Напомним, что по условию задачи нагрузка $F = 10 \text{ кН}$ равномерно распределена по лицевой грани упора (см. рисунок 18.1).

В том же приложении для интегрального задания распределенной нагрузки устанавливаем сочетание *Create/Total Load/Element Uniform*.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например *load*.

В качестве типа целевых элементов выбираем объемные, т.е. «Target Element Type»: 3D.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Load» вводим компоненты суммарного вектора нагрузки в угловых скобках (в Н): $\langle 0 \ 0 \ 10000 \rangle$. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Solid Faces» и указываем лицевую грань упора. Здесь должна появиться запись *Solid 1.22*.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

13. Запустить задачу на счет.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание *Analyze/Entire Model/Full Run*.

Нажимаем *Apply*, ничего не меняя.

14. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab6.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.


15. Отобразить поле напряжений по Мизесу на деформированном состоянии упора.

Выбираем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание *Create/Quick Plot*.


В списке «Select Fringe Result» в качестве величины для многоцветного представления ее поля указываем Stress Tensor (тензор напряжений).

В качестве компоненты (Quantity) выбираем von Mises (напряжение по Мизесу).

Далее в списке «Select Deformation Result» в качестве результата для изображения деформированного состояния модели указываем строку Displacement, Translational (поступательные перемещения).

С помощью кнопки-пиктограммы  устанавливает вид для настройки многоцветного представления поля.

Выбираем «Style»: Continuous (непрерывное изображение поля без четких границ).

С помощью кнопки-пиктограммы  устанавливает вид для настройки изображения деформированного состояния модели.

Отключаем опцию «Show Undeformed» (показать недеформированное состояние).

В конце нажимаем *Apply*.

Получаемое при этом изображение представлено на рисунке 18.4.

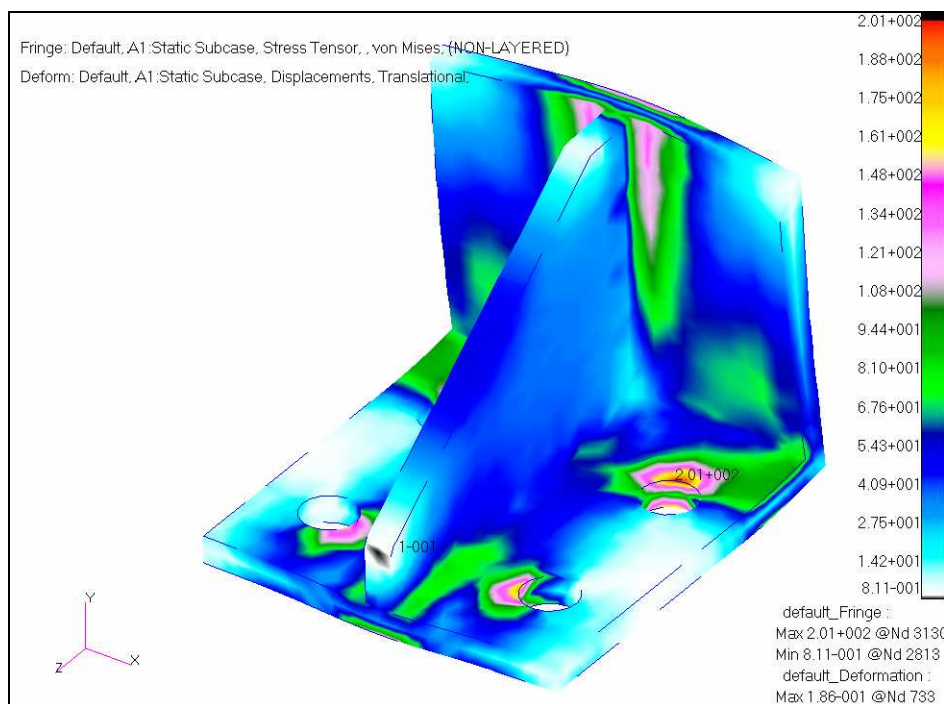


Рисунок 18.4 – Напряжения по Мизесу (в МПа)

Видно, что максимальное напряжение составляет 201 МПа, что меньше предела текучести. Здесь же внизу приводится и максимальное перемещение (равное 0,186 мм).

Можно ли доверять такому решению? Для ответа на этот вопрос необходимо исследовать его сходимость, т.е. выполнить расчет для более мелкой разбивки.

16. Создать плоскости отсечения.

Для построения произвольной плоскости отсечения в полосе меню выбираем команду *Viewing>Arbitrary Clipping*.

В поле «Clipping Plane Name» вводим имя плоскости отсечения, например clip_1.

Включаем опции «Post Clipping Plane» (послать плоскость отсечения), «Move with Model» (перемещать вместе с моделью) и «Display Direction Icon» (отображать значок направления).

В соответствующие поля вводим:

«Direction»: $\langle 0\ 0\ 1 \rangle$ (вектор внешней нормали к плоскости отсечения)

«Location»: $[0\ 0\ 7]$ (точка, лежащая на плоскости отсечения)

Apply.

Для определения второй плоскости отсечения вводим:

«Clipping Plane Name»: clip_2.

«Direction»: $\langle 0\ 0\ -1 \rangle$

«Location»: $[0\ 0\ 30]$

Apply.

Следует отметить, что оставляемая часть модели лежит со стороны вектора внешней нормали к плоскости отсечения (рисунок 18.5).

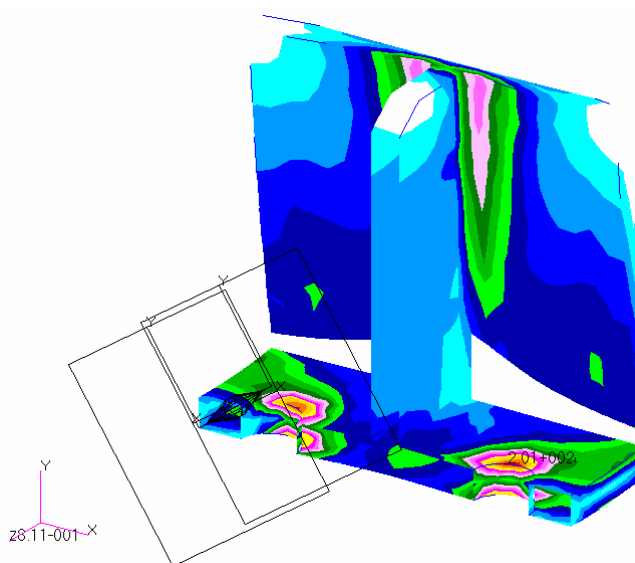


Рисунок 18.5 – Отсеченная часть модели с полем напряжений

Кроме того, с помощью команды *Viewing>Clipping/Perspective* можно задать две стационарные (не связанные с моделью) плоскости отсечения: Back (задняя) и Front (передняя). Нормали к этим плоскостям всегда перпендикулярны плоскости экрана.

Отметим, что при выборе способа изображения результатов Quick Plot здесь не показывается внутренность объема и, как следствие, распределение напряжений по сечению.

Для отображения внутренности объема необходимо установить сочетание Create/Fringe, нажать кнопку-пиктограмму *Target Entities* и в выпадающем меню «Addtl. Display Control» выбрать пункт Faces.

17. Выйти из программы: *File>Quit*.

19 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

«Исследование напряженно-деформированного состояния двойной проушины (вилки)»

Исходные данные: геометрия проушины показана на рисунке 19.1; материал – сталь 08пс (модуль упругости $2,03 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; предел текучести 175 МПа). Проушина нагружена через болт силой 20 кН.

Допущение: болт принимается абсолютно жестким.

Цель: определить общее напряженно-деформированное состояние двойной проушины.

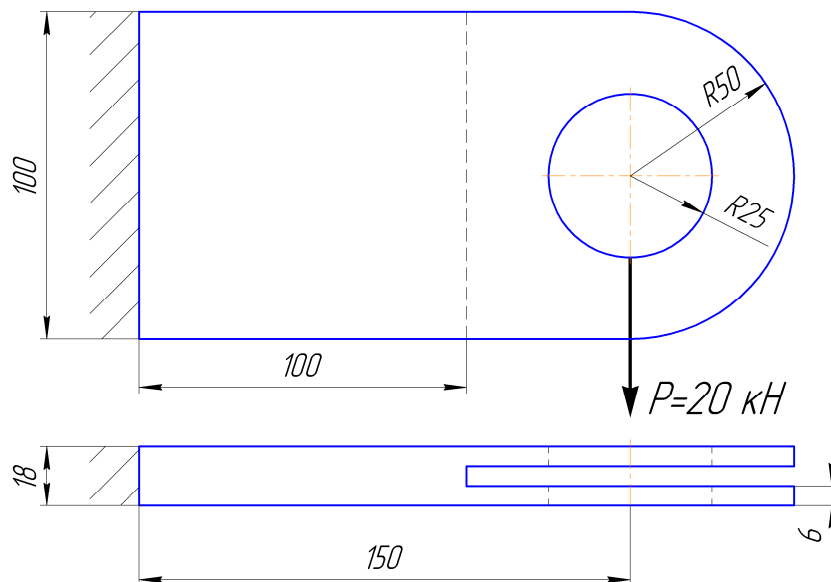


Рисунок 19.1 – Геометрия проушины

Приведенная на рисунке 19.1 двойная проушина, а также нагрузка имеют вертикальную плоскость симметрии, что позволяет для исследования напряженно-деформированного состояния ограничиться рассмотрением лишь половины конструкции. Однако здесь мы будем моделировать проушину полностью, поскольку она будет использоваться в следующей лабораторной работе для анализа собственных колебаний (где требуется полная модель). Начало системы координат поместим в центр отверстия передней поверхности проушины.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных: *File>New*.
В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab7.db, *OK*.
2. Задать начальные установки.
В разделе «Tolerance» диалоговой панели «New Model Preference» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 200 (в мм), *OK*.
3. Построить точку на контуре отверстия.
Выбираем приложение «Geometry» и для построения точки по трем координатам устанавливаем сочетание *Create/Point/XYZ*.
Вводим:
«Point Coordinate List»: [25 0 0]
Apply.
Включаем нумерацию геометрических объектов (кнопка *Label Control* панели инструментов).
4. Вращением точки относительно оси Z построить четыре дуги окружности, определяющие верхнюю половину контура отверстия.
В том же приложении устанавливаем сочетание *Create/Curve/Revolve*.
В соответствующие поля вводим:
«Axis»: Coord 0.3 (ось вращения – ось Z)
«Total Angle»: 45 (полный угол, град)
«Offset Angle»: 0 (отступ угла, град).
Включаем опцию «Auto Execute», активизируем поле «Point List» и последовательно указываем в графическом окне точки 1, 2, 3 и 4 (рисунок 19.2).

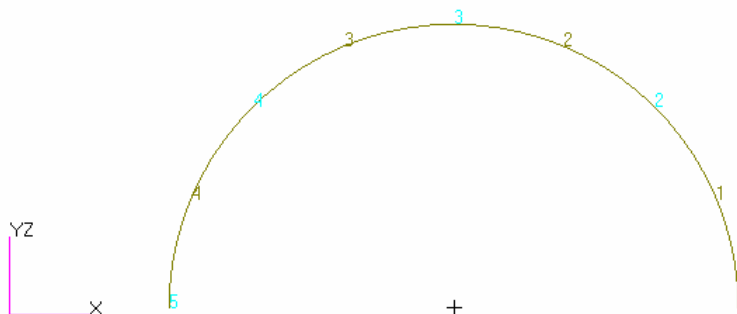


Рисунок 19.2 – Четыре дуги окружности

5. Построить цилиндрическую систему координат.
В дальнейшем нам потребуется цилиндрическая система координат.

Для определения системы координат по трем точкам устанавливаем сочетание `Create/Coord/3Point`.

Здесь меняем только тип «Type»: *Cylindrical* (цилиндрическая), *Apply*.

При этом будет построена цилиндрическая система координат `Coord 1`, начало которой совпадает с началом глобальной декартовой системы координат (изображается белым крестиком).

6. Выполнить копирование кривых со смещением в радиальном направлении для описания внешнего контура уха.

Устанавливаем сочетание `Transform/Curve/Translate`.

В разделе «Type of Transformation» (тип преобразования) выбираем строку «*Curvilinear in Refer. CF*» (криволинейное в базовой системе координат).

Вводим:

«Refer. Coordinate Frame»: `Coord 1` (базовая система координат)

«Translation Vector»: $\langle 25\ 0\ 0 \rangle$ (вектор смещения)

«Repeat Count»: 1 (количество копий).

Для выполнения операции копирования, а не смещения снимаем флаг «Delete Original Curves» (удалить исходные кривые).

При включенной опции «Auto Execute» активизируем поле «Curve List» и последовательно указываем кривые 1 и 2 (рисунок 19.3).

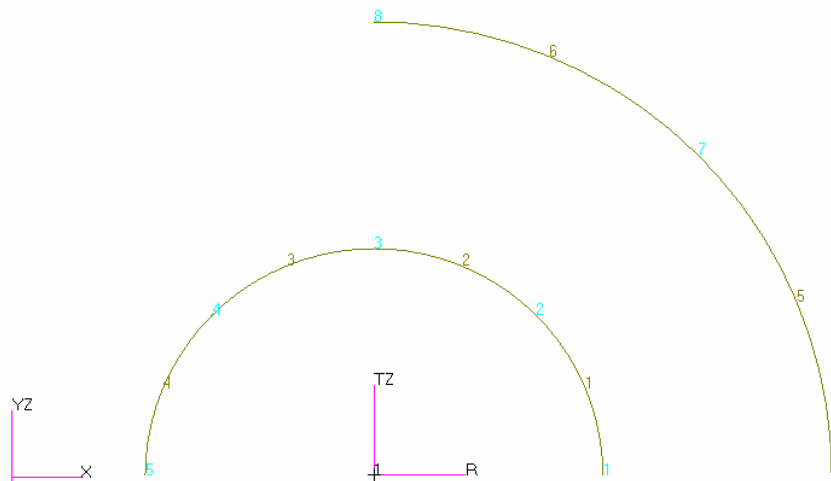


Рисунок 19.3 – Копирование кривых со смещением в радиальном направлении

7. Построить прямоугольную поверхность, определяющую верхнюю часть тела проушины.

Устанавливаем сочетание `Create/Surface/XYZ`.


Вводим:

«Refer. Coordinate Frame»: Coord 0 (базовая система координат)

«Vector Coordinates List»: <-100 50 0> (описывающий диагональ вектор)

«Origin Coordinate List»: [-50 0 0] (координаты начала вектора)

Apply.

Для визуализации внутренней геометрии поверхностей воспользуемся кнопкой  панели инструментов.

8. Построить четыре поверхности, определяя каждую по двум противоположным кромкам.

Для построения поверхности, проходящей через две или более кривых, устанавливаем сочетание *Create/Surface/Curve*.


Выбираем «Option»: 2 Curve (по двум кривым).

Снимаем флаг «Auto Execute».

Для поля «Starting Curve List» (список начальных кривых) указываем сразу две кривые 1 и 2, а для поля «Ending Curve List» (список конечных кривых) – кривые 5 и 6.

Нажимаем *Apply*.

При построении следующей поверхности в качестве начальной выбираем кривую 4, а конечной – правую кромку первой поверхности (т.е. *Surface 1.1*). *Apply*.

И наконец, для последней поверхности начальной является кривая 3, а конечная кривая отсутствует. Однако ее можно задать по двум точкам. Для этого активизируем поле «Ending Curve List», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (две точки) и указываем, без использования клавиши *Shift*, точки 8 и 10 (рисунок 19.4). Программа MSC.Patran между данными точками создаст теоретическую (воображаемую) кривую.

Нажимаем *Apply*.

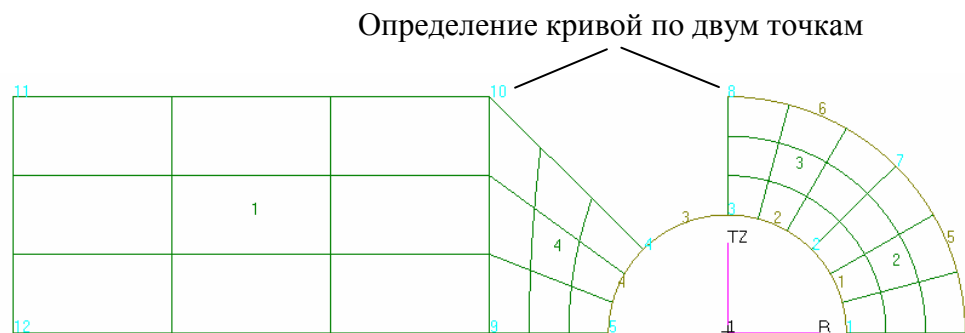


Рисунок 19.4 – Построение поверхностей по двум противоположным кромкам


Для наглядности выполнения последующих операций с помощью кнопки *Iso 1 View* панели инструментов устанавливаем изометрическую проекцию.

9. Построить объемы путем придания толщины имеющимся поверхностям. Выбираем сочетание *Create/Solid/Normal*.

В поле «Thickness» (толщина) вводим значение 6 (в мм).

Для поля «Surface List» указываем все поверхности (т.е. Surface 1:5).


Если требуется, нажимаем *Apply*.

Для изображения модели с закрашенными гранями и с тенями нажимаем кнопку  панели инструментов. При этом режим отрисовки промежуточных линий можно отключить.

10. Создать зеркальное отображение построенных объемов относительно горизонтальной плоскости.

Устанавливаем сочетание *Transform/Solid/Mirror*.

В нашем случае плоскость зеркала совпадает с глобальной плоскостью *XZ*, а также с плоскостью *RZ* цилиндрической системы координат. Плоскость зеркала можно определять перпендикулярной к ней осью. В системах координат 0 и 1 таковой является ось 2.

Активизируем поле «Define Mirror Plane Normal» (определение нормали к плоскости зеркала), в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  и в графическом окне указываем, например, цилиндрическую систему координат. Должна появиться запись *Coord 1.2*.

Поскольку исходные объемы удалять не следует, флаг «Delete Original Solids» должен быть снят.

Для поля «Solid List» указываем все объемы (Solid 1:5).

При необходимости нажимаем *Apply*.

11. Построить остальные объемы путем копирования существующих со смещением.

Устанавливаем сочетание *Transform/Solid/Translate*.

Сначала вводим:

«Refer. Coordinate Frame»: *Coord 0* (базовая система координат)

«Translation Vector»: $\langle 0\ 0\ -6 \rangle$ (вектор смещения)

«Repeat Count»: 2 (количество копий).

Для выполнения операции копирования, а не смещения флаг «Delete Original Solids» должен быть снят.

При выключенной опции «Auto Execute» активизируем поле «Curve List» и указываем прямоугольные объемы 1 и 6, моделирующие тело проушины. *Apply*.

Затем вводим:

«Translation Vector»: <0 0 -12>

«Repeat Count»: 1.

Активизируем поле «Solid List» и указываем восемь объемов, окружающих отверстие уха. Чтобы очистить данное поле от предыдущего ввода, сначала щелкаем мышью на одном из этих объемов, после чего нажимаем клавишу *Shift* и, удерживая ее, указываем остальные семь объемов. *Apply*. Построенная таким образом геометрическая модель проушины представлена на рисунке 19.5.

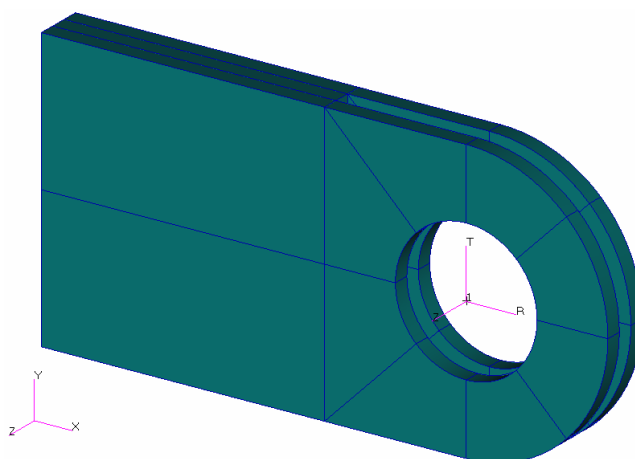


Рисунок 19.5 – Геометрическая модель проушины

12. На геометрическую модель нанести сетку конечных элементов.

Запускаем приложение «Elements» и для построения сетки в объеме устанавливаем сочетание Create/Mesh/Solid.

Поскольку все построенные объемы являются шестигранными, для их разбиения можно использовать генератор регулярных изосеток.

Выбираем:

«Elem Shape»: Hex (шестигранная форма)

«Mesher»: IsoMesh (генератор регулярных изосеток)

«Topology»: Hex8 (топология – шестигранник с восемью узлами).

Отметим, что в отличие от элементов тетраэдральной формы шестигранные элементы первого порядка (т.е. с узлами в вершинах) не завышают

жесткость конструкции и поэтому являются более экономичными, нежели элементы второго порядка.

Для поля «Solid List» указываем все объемы (Solid 1:22). Если объемов больше 22, то следует проверить геометрическую модель на наличие дубликатов объемов. Их необходимо удалить.

Используя автоматически рассчитанную программой глобальную длину стороны элемента, нажимаем *Apply*.

Получаемая здесь разбивка показана на рисунке 19.6.

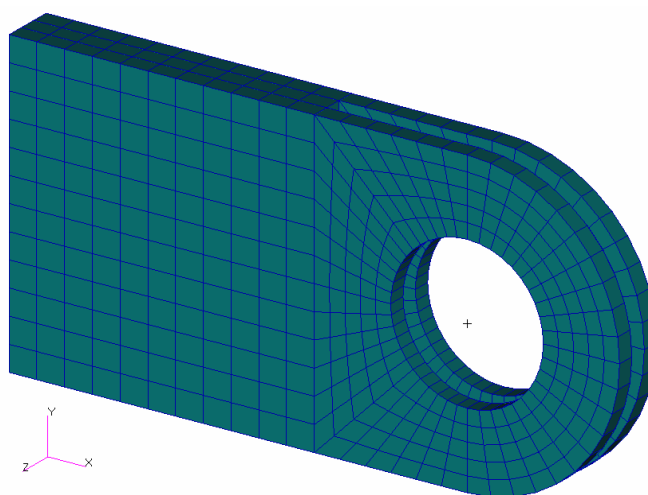


Рисунок 19.6 – Сетка конечных элементов

13. Сшить конечно-элементную модель.

Сначала для наглядности отобразим на экране свободные (т.е. несшитые) кромки. Выбираем сочетание *Verify/Element/Boundaries*.

Используя установленную по умолчанию опцию «Free Edges» (свободные кромки), нажимаем *Apply*. Появляющееся при этом изображение показано на рисунке 19.7,а.

Для восстановления исходного вида нажимаем *Reset Graphics*.

Далее для выполнения собственно операции сшивки устанавливаем сочетание *Equivalence/All/Tolerance Cube*.

Ничего не меняя, нажимаем *Apply*. При этом места сшивки модели обводятся кружочками.

Если теперь снова отрисовать свободные кромки, то должно появиться изображение, как на рисунке 19.7,б.

14. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «Materials» и выбираем сочетание *Create/Isotropic/Manual Input*.

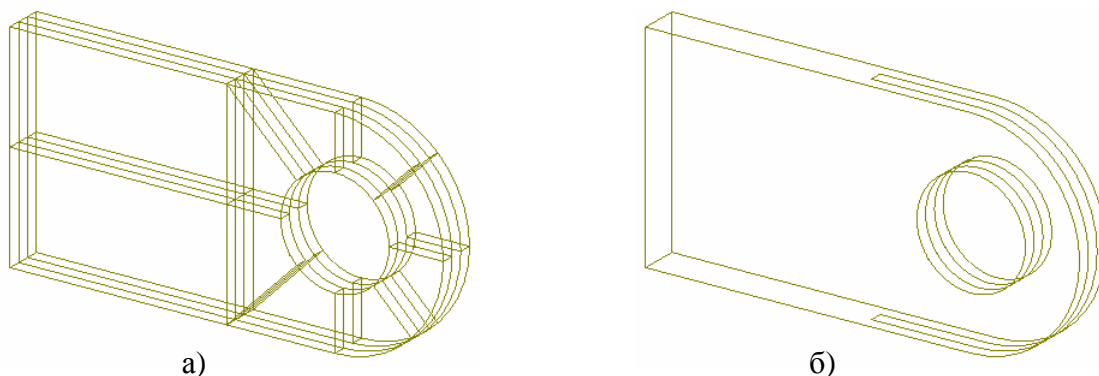


Рисунок 19.7 – Проверка выполнения операции сшивки

В поле «Material Name» вводим имя материала, например steel08.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* и вводим свойства:

«Elastic Modulus» = $2.03e5$ (модуль упругости, МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона)

ОК.

В конце нажимаем кнопку *Apply*.


15. Определить свойства элементов.

Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств объемных элементов устанавливаем сочетание Create/3D/Solid.

В поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например clevis.

Не меняя установленные по умолчанию опции, нажимаем кнопку *Input Properties*.

Для объемных элементов здесь необходимо указать лишь материал.

Нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем steel08.

Закрываем окно кнопкой ОК.

Нажимаем кнопку *Select Application Region* и указываем все объемы, используя зону выбора в виде прямоугольника.

Затем последовательно нажимаем *Add*, ОК и *Apply*.

16. Задать граничные условия.

Рассматриваемая двойная проушина жестко закреплена по левому торцу (см. рисунок 19.1).

Для удобства указания объектов в полосе меню выбираем команду *Preferences>Picking*.

Включаем опцию «Enclose centroid» (выбор объектов, центр тяжести которых попадает в зону выбора). Окно закрываем кнопкой *Close*.


С помощью кнопки *Front view* панели инструментов устанавливаем вид на плоскость *XY*.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений выбираем сочетание *Create/Displacement/Nodal*.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например *clamped*.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Translations» (поступательные перемещения) вводим $\langle 0,0,0 \rangle$, *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (поверхность или грань) и указываем шесть поверхностей, расположенных на левом торце проушины, как показано на рисунке 19.8.

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

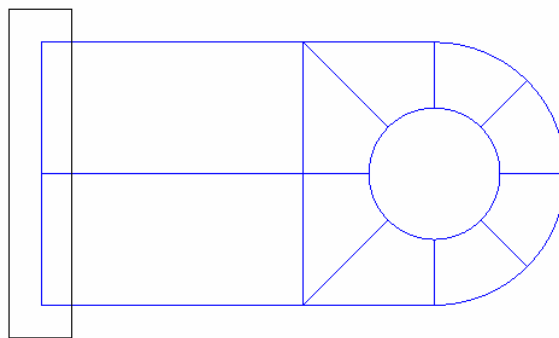


Рисунок 19.8 – Выбор поверхностей для задания граничных условий

17. Задать пространственное поле, описывающее изменение нагрузки.

По условию задачи нагружение проушины осуществляется через болт силой $P = 20$ кН (см. рисунок 19.1). Будем прикладывать ее в виде давления, распределенного по нижним поверхностям отверстий обеих половин проушины.

Предположим, что давление изменяется по закону синуса (рисунок 19.9):

$$p(\alpha) = p_m \sin \alpha .$$

Вычислим его максимальное значение p_m из условия равенства равнодействующей давления силе P :

$$P = 2 \int_0^{\pi} p(\alpha) tr \sin \alpha d\alpha = 2 \int_0^{\pi} p_m tr \sin^2 \alpha d\alpha = p_m \pi tr ,$$

где $t = 6$ мм – толщина одного уха; $r = 25$ мм – радиус отверстия.

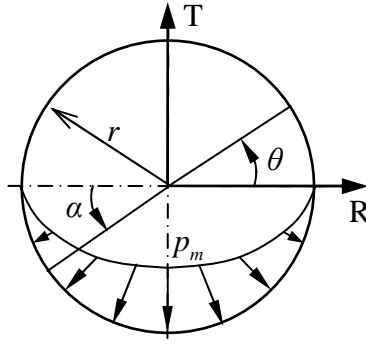


Рисунок 19.9 – Изменение давления

Откуда

$$p_m = \frac{P}{\pi tr} = 42,441 \text{ МПа.}$$

Следует отметить, что в цилиндрической системе координат угол θ отсчитывается от оси R в направлении оси T (см. рисунок 9).

Поскольку $\alpha = \theta - \pi$, получим

$$p(\theta) = -p_m \sin \theta .$$

Запускаем приложение «Fields» и для задания пространственного поля с помощью функций языка PCL устанавливаем сочетание Create/Spatial/PCL Function.

Вводим:

«Field Name»: sin_field (имя пространственного поля)

«Field Type»: Scalar (тип поля – скалярное)

«Coordinate System Type»: Real (тип системы координат – физическая действительная)

«Coordinate System»: Coord 1 (система координат – номер 1, т.е. в нашем случае цилиндрическая)

«Scalar Function»: -42.441*SINR('T) (скалярная функция)

Apply.

Напомним, что в PCL-выражении перед переменной должен стоять апостроф. Ее можно выбирать из расположенного ниже списка.

Для проверки правильности задания поля отобразим его в виде двухмерного графика (действие Show).

Нажимаем *Specify Range* (задать диапазон) и в соответствующие поля вводим:

«Minimum»: 0 (минимальное значение переменной T)

«Maximum»: 6.28 (максимальное значение переменной T)

«No. of Points»: 30 (число точек)

OK.

После нажатия *Apply* в отдельном окне появляется график, а рядом – таблица значений. Закрываем ее кнопкой *Cancel*.

Для закрытия окна с графиком следует воспользоваться кнопкой *Unpost Current XYWindow*.

18. Приложить нагрузку.


Снова выбираем приложение «Loads/BCs» и для задания давления устанавливаем сочетание *Create/Pressure/Element Uniform*.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например *load*.

В качестве типа целевых элементов выбираем объемные, т.е. «Target Element Type»: 3D.

Нажимаем кнопку *Input Data* и из списка имеющихся пространственных полей «Spatial Fields» выбираем *sin_field*. В области ввода «Pressure» должна появиться запись *f:sin_field*, *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем область ввода «Select Solid Faces», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  и с помощью полигона в графическом окне указываем нижние поверхности отверстий обеих половин проушины, как показано на рисунке 19.10. При этом вершины полигона отмечаем щелчком левой кнопки мыши, а последнюю – двойным щелчком.

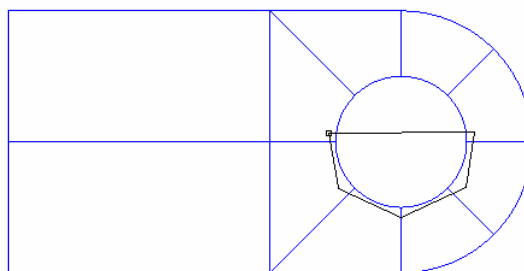


Рисунок 19.10 – Выбор поверхностей для приложения нагрузки

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

19. Запустить задачу на счет.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание *Analyze/Entire Model/Full Run*.

Нажимаем *Apply*, ничего не меняя.

20. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab7.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.


21. Отобразить поле напряжений по Мизесу на деформированном состоянии проушины.

Выбираем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание *Create/Quick Plot*.

В списке «Select Fringe Result» в качестве величины для многоцветного представления ее поля указываем *Stress Tensor* (тензор напряжений).

В качестве компоненты (*Quantity*) выбираем *von Mises* (напряжение по Мизесу).

Далее в списке «Select Deformation Result» в качестве результата для изображения деформированного состояния модели указываем строку *Displacement, Translational* (поступательные перемещения).

С помощью кнопки-пиктограммы  устанавливает вид для настройки изображения деформированного состояния модели.

Под установленным флагом «Show Undeformed» для опции «Render Style» (стиль отображения недеформированного состояния) выбираем значение *Free Edge* (свободные кромки).

В конце нажимаем *Apply*.

Получаемое при этом изображение представлено на рисунке 19.11.

Видно, что максимальное напряжение составляет 150 МПа, что меньше предела текучести. Здесь же внизу приводится и максимальное перемещение (равное 0,167 мм).

22. Выйти из программы: *File>Quit*.

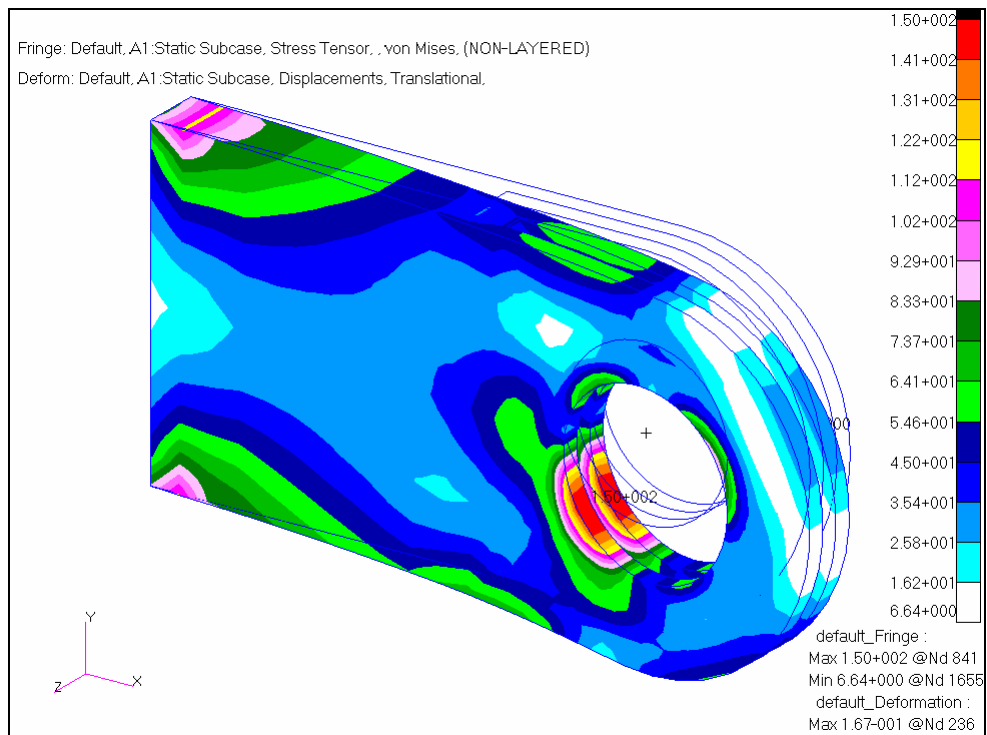


Рисунок 19.11 – Напряжения по Мизесу (в МПа)

Замечание: Не удаляйте базу данных Lab7.db, поскольку построенная здесь модель будет использоваться в следующей лабораторной работе для анализа собственных колебаний проушины.

20 РЕШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

20.1 Выбор типа анализа (статика или динамика)

В статическом анализе внешние нагрузки считаются постоянными и полагаются значимыми только силы упругости (жесткости). При этом игнорируются эффекты инерции и демпфирования, вызываемые нагрузками, изменяющимися во времени. Однако при решении статических задач могут учитываться постоянные инерционные силы (такие как сила тяжести, центробежная сила инерции и т.п.), а также изменяющиеся во времени силы, которые могут быть аппроксимированы статически эквивалентными нагрузками (например, эквивалентные ветровые и сейсмические нагрузки, обычно регламентируемые строительными нормами и правилами).

Наряду с динамическими и статическими имеются и так называемые квазистатические процессы. Это процессы, применительно к которым можно считать силы инерции такими, что внутренние усилия успевают «следить» за внешними силами, и в любой момент времени имеет место равновесие. В таком случае время выступает как параметр состояния. Вообще говоря, если частота возбуждения меньше $1/3$ низшей частоты собственных колебаний конструкции, то можно считать данный процесс квазистатическим и ограничиться проведением статического расчета.

В случае, когда нагрузки достаточно быстро изменяются во времени, возникающие при деформации тела инерционные силы могут играть существенную роль, и их необходимо учитывать. Разрешающее уравнение МКЭ, которое используется в динамическом анализе, имеет следующий вид:

$$[M][\ddot{v}] + [C][\dot{v}] + [K][v] = [P(t)], \quad (20.1)$$

где $[K]$ – матрица жесткости тела; $[M]$ – его матрица масс; $[C]$ – матрица демпфирования; $[v]$ – вектор узловых перемещений; $[\dot{v}]$ – вектор узловых скоростей; $[\ddot{v}]$ – вектор узловых ускорений; $[P(t)]$ – вектор внешних узловых сил, которые являются функциями времени t .

МКЭ-пакет MSC.Nastran позволяет выполнять все виды динамического анализа конструкций:

- расчет частот и форм собственных колебаний (*Normal Modes*);
- расчет вынужденных установившихся колебаний (*Frequency Response*);

- исследование переходных неустановившихся процессов (*Transient Response*).

Расчет динамического поведения конструкции заключается в определении перемещений и напряжений как функции времени. Динамический анализ может в качестве предварительного этапа содержать расчет собственных колебаний, в результате чего определяются частоты и формы собственных колебаний. В некоторых случаях эта информация представляет самостоятельный интерес.

20.2 Расчет частот и форм собственных колебаний

Собственные (или свободные) колебания совершаются при отсутствии внешних сил. Это наиболее естественные движения конструкции. Они являются важнейшей характеристикой линейных систем. Любые колебания системы являются некоторой комбинацией собственных колебаний. Обычно интерес представляет лишь небольшое число (как правило, не более 10) наименьших частот и соответствующих им форм собственных колебаний. Например, в строительстве проектирование сооружений в сейсмоопасных регионах выполняют таким образом, чтобы среди первых трех форм собственных колебаний не было крутильной, поскольку при землетрясении в первую очередь возбуждаются именно такие колебания.

Расчет частот и форм собственных колебаний (или модальный анализ) проводится только для линейных моделей. При этом нелинейные эффекты (если таковые определены) игнорируются.

С точки зрения математики модальный анализ сводится к решению обобщенной проблемы собственных значений:

$$([K] - \omega_i^2 [M])[\Phi_i] = 0, \quad (20.2)$$

где ω_i^2 – собственное значение с номером i (в данном случае ω_i является круговой частотой собственных колебаний); $[\Phi_i]$ – соответствующий ему собственный вектор (характеризующий форму собственных колебаний).

Следует отметить, что собственные векторы вычисляются лишь с точностью до произвольного множителя. Поэтому для определенности их обычно нормируют. Например, нормирование можно проводить по матрице масс, так чтобы выполнялось равенство

$$[\Phi_i]^T [M] [\Phi_i] = 1. \quad (20.3)$$

Для решения проблемы собственных значений разработано достаточно большое количество различных методов, эффективных в тех или иных случаях. В программе MSC.Nastran по умолчанию выбирается метод Ланцоша (Lanczos), обладающий высокой скоростью сходимости.

20.3 Расчет вынужденных установившихся колебаний

Любая циклически изменяющаяся внешняя нагрузка порождает циклически изменяющийся отклик системы (гармонический отклик). Расчет вынужденных колебаний дает возможность предсказания поведения периодически возбуждаемой динамической системы, позволяя, таким образом, проверять модель конструкции на наличие резонанса, усталость и т.п.

Гармонический анализ применим только для вынужденных установившихся колебаний. Переходные динамические процессы, которые происходят в начале процесса возбуждения, собственно вынужденными колебаниями не описываются (рисунок 20.1).

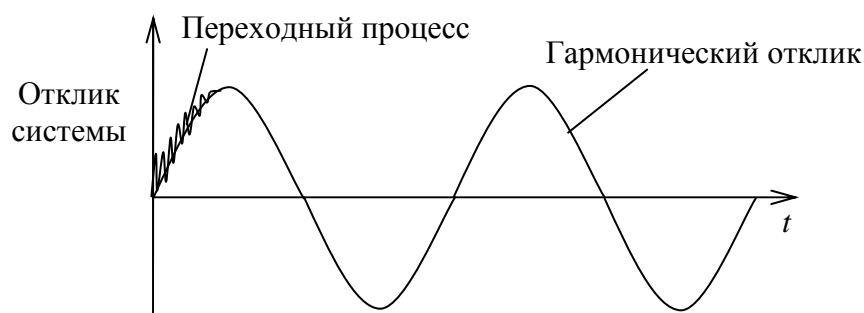


Рисунок 20.1 – Вынужденные колебания в модели

При расчете вынужденных установившихся колебаний вводятся следующие ограничения:

- все нагрузки считаются зависящими от времени по синусоидальному (гармоническому) закону;
- все нагрузки изменяются с равной частотой;
- нелинейности не допускаются;
- переходные эффекты не учитываются.

Цель данного расчета заключается в вычислении отклика на нескольких частотах гармонического возбуждения (в циклах на единицу времени) и получении функции некоторой выходной величины (обычно амплитуды пе-

ремещения) от частоты. Эти зависимости часто называют амплитудно-частотными характеристиками.

Для исследования вынужденных колебаний в программе MSC.Nastran применяются два метода: Direct – метод прямого интегрирования уравнений движения; Modal – метод суперпозиций, или разложения по формам собственных колебаний.

Первый метод является более простым, но самым затратным по времени. Для решения задачи вторым методом необходимо предварительно провести расчет частот и форм собственных колебаний.

Для полного определения гармонической нагрузки требуется задать амплитуду, фазовый угол и частоту (или диапазон изменения частот). Фазовый угол является мерой времени отставания или упреждения. В комплексной плоскости он представляет собой угол, отсчитываемым от действительной оси (рисунок 20.2). Фазовый угол требуется только в случае, когда прикладываемые нагрузки (сосредоточенные силы, перемещения) не совпадают по фазе возбуждения. Отметим, что поверхностные (например, давление) и объемные нагрузки задаются лишь для нулевой фазы.

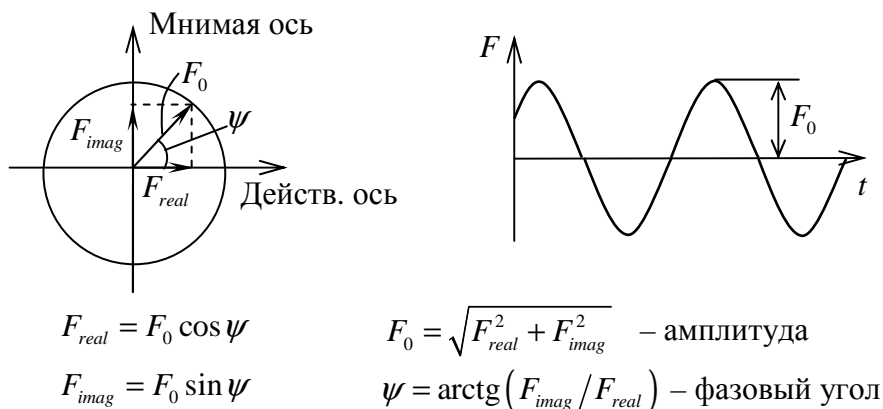


Рисунок 20.2 – Действительная и мнимая компоненты нагрузки

Следует отметить, что при решении динамических задач для получения корректных в отношении поведения реальной конструкции результатов необходимо правильно учитывать демпфирование. Сделать это достаточно сложно, поскольку механизм его образования включает множество факторов и причин, причем в ряде случаев неизвестных точно. Демпфирование часто оценивается на основе данных динамических испытаний.

В большинстве случаев демпфирование, как правило, мало, и поэтому простая математическая модель дает вполне удовлетворительные результаты.

Так, в программе MSC.Nastran математическая модель учитывает два типа демпфирования: вязкое и конструкционное (обусловленное силами внутреннего трения). В первом случае демпфирующие силы пропорциональны скорости, а во втором – перемещению. Другими словами, силы конструкционного демпфирования (в отличие от вязкого) не зависят от частоты колебаний.

Уравнение движения (20.1) не позволяет напрямую учесть силы конструкционного демпфирования. Однако это можно сделать в гармоническом анализе, если искать решение в комплексном виде. Коэффициент конструкционного демпфирования G учитывается здесь не в матрице вязкого демпфирования $[C]$, а при формировании комплексной матрицы жесткости

$$[K] = (1 + iG)[K], \quad (20.4)$$

где i – мнимая единица, определяющая сдвиг по фазе на угол $\pi/2$.

При расчете вынужденных колебаний нельзя определять функцию отклика на одновременное действие нескольких возбуждающих сил, изменяющихся с разной частотой. Однако средства постпроцессора позволяют наложить несколько откликов на различные нагрузки для получения суммарной реакции системы.

20.4 Исследование переходных неустановившихся процессов

Переходные неустановившиеся процессы (иногда называемые процессами с историей нагружения) – это, как правило, кратковременные процессы, происходящие в начале возбуждения колебаний, например в случае ударного воздействия. При этом нагрузка может произвольно изменяться во времени и возможен учет различных нелинейных эффектов.

Напомним, что в программе MSC.Patran задать кривую «нагрузка–время» можно с помощью зависящего от времени поля, которое является частным случаем так называемого непространственного поля (Non Spatial).

Расчет переходных динамических процессов требует определения двух групп начальных условий (поскольку система уравнений имеет второй порядок): начальные перемещения и начальные скорости. Если они равны нулю, то ничего особо указывать не требуется.

Точность расчета переходного динамического процесса зависит от выбранного шага интегрирования по времени Δt . Отметим, что динамический отклик системы можно представить в виде комбинации форм ее собственных колебаний. При этом размер шага Δt должен быть таким, чтобы с достаточ-

ной точностью воспроизводились те колебания, которые играют наиболее существенную роль в динамическом поведении конструкции, т.е. колебания с относительно низкими частотами. Известно, что для хорошего отображения какой-либо собственной формы требуется не менее 20 точек на период колебаний. Таким образом, для оценки шага Δt можно воспользоваться следующей формулой:

$$\Delta t \leq \frac{T_{\min}}{20}; \quad T_{\min} = \frac{1}{f_{\max}}, \quad (20.5)$$

где T_{\min} и f_{\max} – период и частота той наивысшей формы собственных колебаний, которую необходимо описать достаточно точно, поскольку она еще вносит значительный вклад в суммарный отклик системы.

Для исследования переходных динамических процессов в программе MSC.Nastran используются те же два метода, что и в гармоническом анализе.

В отличие от гармонического анализа при исследовании переходного динамического процесса нельзя напрямую учесть силы конструкционного демпфирования, пропорциональные перемещению. Для их приближенного учета в MSC.Nastran конструкционное демпфирование приводится к эквивалентному вязкому:

$$[C] = \frac{G}{W_3} [K], \quad (20.6)$$

где G – безразмерный общий коэффициент конструкционного демпфирования; W_3 – значение частоты для преобразования конструкционного демпфирования в эквивалентное вязкое.

В качестве частоты преобразования W_3 обычно выбирается наименьшая частота собственных колебаний конструкции.

Следует отметить, что очень часто матрица $[C]$ представляется в виде линейной комбинации

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (20.7)$$

где α и β – определяемые экспериментально коэффициенты, имеющие размерности s^{-1} и s соответственно. Во многих практических задачах демпфирование, связанное с матрицей масс можно игнорировать ($\alpha = 0$).

Таким образом, если в формуле (20.6) положить $W_3 = 1$, то коэффициент конструкционного демпфирования G будет совпадать с множителем β .

Вопросы по теме 20

- 1) В каких случаях можно проводить статический анализ?
 1. При действии постоянных нагрузок.
 2. При действии не изменяющихся во времени инерционных сил.
 3. Когда силы инерции такие, что внутренние усилия успевают «следить» за внешними силами.
 4. В случае установившихся гармонических колебаний.
 5. В случае неустановившихся колебаний.
 6. При ударном воздействии.

- 2) В каких случаях следует проводить динамический анализ?
 1. При действии постоянных нагрузок.
 2. При действии не изменяющихся во времени инерционных сил.
 3. Когда силы инерции такие, что внутренние усилия успевают «следить» за внешними силами.
 4. В случае установившихся гармонических колебаний.
 5. В случае неустановившихся колебаний.
 6. При ударном воздействии.

- 3) В каком случае процесс можно считать квазистатическим?
 1. При действии постоянных нагрузок.
 2. При действии не изменяющихся во времени инерционных сил.
 3. Когда силы инерции такие, что внутренние усилия успевают «следить» за внешними силами.
 4. В случае установившихся гармонических колебаний.
 5. В случае неустановившихся колебаний.
 6. При ударном воздействии.

- 4) Какие силы характеризует матрица $[K]$?
 1. Силы упругости.
 2. Силы инерции.
 3. Демпфирующие силы.
 4. Сосредоточенные силы.
 5. Поверхностные силы.
 6. Объемные силы.

- 5) Какие силы характеризует матрица $[M]$?
 1. Силы упругости.
 2. Силы инерции.
 3. Демпфирующие силы.
 4. Сосредоточенные силы.
 5. Поверхностные силы.
 6. Объемные силы.

6) Какие силы характеризует матрица $[C]$?

1. Силы упругости.
2. Силы инерции.
3. Демпфирующие силы.
4. Сосредоточенные силы.
5. Поверхностные силы.
6. Объемные силы.

7) При какой частоте возбуждения процесс можно считать квазистатическим?

1. Меньше $1/3$ низшей собственной частоты.
2. Меньше $1/3$ высшей собственной частоты.
3. Меньше $1/2$ низшей собственной частоты.
4. Меньше $1/2$ высшей собственной частоты.
5. Меньше $3/4$ низшей собственной частоты.
6. Меньше $3/4$ высшей собственной частоты.

8) В чем суть модального анализа?

1. Расчет свободных колебаний.
2. Расчет вынужденных установившихся колебаний.
3. Исследование неустановившихся процессов.
4. Исследование квазистатических процессов.
5. Исследование статических процессов.

9) В чем суть гармонического анализа?

1. Расчет свободных колебаний.
2. Расчет вынужденных установившихся колебаний.
3. Исследование неустановившихся процессов.
4. Исследование квазистатических процессов.
5. Исследование статических процессов.

10) В чем суть переходного анализа?

1. Расчет свободных колебаний.
2. Расчет вынужденных установившихся колебаний.
3. Исследование неустановившихся процессов.
4. Исследование квазистатических процессов.
5. Исследование статических процессов.

11) Что такое собственные колебания?

1. Свободные колебания.
2. Вынужденные неустановившиеся колебания.
3. Вынужденные установившиеся колебания.

4. Колебания, совершаемые при отсутствии внешних сил.

12) Чему соответствует собственное значение при выполнении модального анализа?

1. Круговой частоте собственных колебаний.
2. Квадрату круговой частоты собственных колебаний.
3. Корню квадратному от круговой частоты собственных колебаний.
4. Частоте собственных колебаний (в циклах на единицу времени).
5. Квадрату частоты собственных колебаний (в циклах на единицу времени).
6. Корню квадратному от частоты собственных колебаний (в циклах на единицу времени).

13) Что характеризует собственный вектор при выполнении модального анализа?

1. Круговую частоту собственных колебаний.
2. Частоту собственных колебаний (в циклах на единицу времени).
3. Форму собственных колебаний.
4. Бесконечную норму формы собственных колебаний.
5. Эвклидову норму формы собственных колебаний.

14) Как в системе MSC.Patran-Nastran по умолчанию выполняется нормирование собственных векторов?

1. По матрице жесткости.
2. По матрице масс.
3. По матрице демпфирования.
4. По единичной матрице.
5. По вектору нагрузки.

15) Какой метод решения проблемы собственных значений выбирается в системе MSC.Patran-Nastran по умолчанию?

1. Lanczos.
2. Subspace.
3. Givens.
4. Householder.
5. Inverse Power.

16) Какие ограничения вводятся в программе MSC.Nastran при расчете вынужденных установившихся колебаний?

1. Все нагрузки считаются зависящими от времени по гармоническому закону.
2. Все нагрузки изменяются с равной частотой.
3. Нелинейности не допускаются.
4. Переходные эффекты не учитываются.
5. Инерционные силы считаются постоянными.
6. Демпфирование не учитывается.

17) Какие нагрузки в случае гармонического анализа позволяют при вводе задавать сдвиг по фазе?

1. Перемещения.
2. Сосредоточенные силы и моменты.
3. Поверхностные нагрузки.
4. Объемные нагрузки.
5. Инерционные силы.
6. Демпфирующие силы.

18) Что требуется задать для полного определения гармонической нагрузки?

1. Амплитуду.
2. Фазовый угол.
3. Частоту.
4. Направляющие косинусы.
5. Время.

19) Какие методы имеются в программе MSC.Nastran для исследования вынужденных установившихся колебаний?

1. Direct.
2. Reduced.
3. Modal.
4. Full.
5. Lanczos.
6. Powerdynamic.

20) Какие методы имеются в программе MSC.Nastran для исследования переходных динамических процессов?

1. Direct.
2. Reduced.
3. Modal.
4. Full.
5. Lanczos.

6. Powerdynamic.

21) Что такое процесс с историей нагружения?

1. Переходный неустановившийся процесс.
2. Квазистатический процесс.
3. Вынужденные установившиеся колебания.
4. Статический процесс.
5. Свободные колебания.

22) Как задается зависимость «нагрузка-время» при проведении анализа переходных процессов?

1. Путем определения нескольких шагов нагружения.
2. Путем задания нескольких подшагов в пределах шага нагружения.
3. При помощи пространственного поля.
4. При помощи пространственного поля.
5. Заданием нескольких нагрузок.

23) Какие начальные условия требуются для интегрирования разрешающей системы уравнений при анализе переходных процессов?

1. Начальные перемещения.
2. Начальные скорости.
3. Начальные ускорения.
4. Начальные силы.
5. Начальные напряжения.
6. Начальные деформации.

24) Сколько требуется точек на период колебаний для хорошего отображения формы собственных колебаний?

1. Пять.
2. Десять.
3. Двадцать.
4. Тридцать.
5. Сорок.
6. Пятьдесят.

25) Чему пропорциональны силы вязкого демпфирования?

1. Перемещению.
2. Скорости.
3. Ускорению.
4. Внешней нагрузке.

26) Чему пропорциональны силы конструкционного демпфирования?

1. Перемещению.
2. Скорости.
3. Ускорению.
4. Внешней нагрузке.

21 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

«Расчет частот и форм собственных колебаний двойной проушины (вилки)»

Исходные данные: рассматривается та же проушина, что и в предыдущей лабораторной работе; плотность материала 7850 кг/м^3 .

Допущения: нагрузка не учитывается; болт не моделируется.

Цель: определить первые двенадцать низших частот и соответствующих им форм собственных колебаний.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных: *File>New*.
В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab8.db, *OK*.
2. Импортировать модель из базы данных предыдущей лабораторной работы.

В полосе меню выбираем команду *File>Import*.

При этом появляется окно, где в выпадающих меню выбираем:

«Object»: Model (объектом импортирования является модель)

«Source»: MSC.Patran DB (источник – файл базы данных MSC.Patran).

Указываем имя файла Lab7.db, *Apply*.

После импорта модели появляется окно со списком импортированных объектов. Закрываем его кнопкой *OK*.

3. Задать начальные установки.
В разделе «Tolerance» диалоговой панели «New Model Preference» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 200 (в мм), *OK*.

4. Дополнительно задать плотность материала.
Запускаем приложение «Materials» и для редактирования модели материала устанавливаем сочетание Modify/Isotropic.

В списке существующих материалов «Existing Materials» выбираем steel08. При этом автоматически появляется диалоговая панель для задания свойств материала.

Вводим:

«Density»: 7850×10^{-12} (плотность, т/мм^3)

OK.

- В конце обязательно нажимаем кнопку *Apply*.
5. Запустить задачу на счет.
Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание Analyze/Entire Model/Full Run.
Для изменения типа решения нажимаем кнопку *Solution Type* и выбираем Normal Modes (расчет частот и форм собственных колебаний), *OK*.
Далее для модификации расчетного случая нажимаем кнопку *Subcases*.
В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем Default. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».
Для изменения параметров расчетного случая используем кнопку *Subcase Parameters*.
Вводим:
 «Extraction Method»: Lanczos (метод решения проблемы собственных значений – Ланцоша)
 «Number of Desired Roots» = 12 (число требуемых корней)
 «Normalization Method»: Mass (метод нормирования собственных векторов – относительно матрицы масс).
OK.
Затем последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.
И наконец, собственно для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.
 6. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.
В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание Access Results/Attach XDB/Result Entities.
Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл lab8.xdb, *OK*.
В заключение нажимаем *Apply*.
 7. Вывести список рассчитанных собственных частот и отобразить в графическом окне формы собственных колебаний.
Здесь полезно предварительно убрать с экрана изображение геометрических объектов. С этой целью выбираем в полосе меню команду Display>Plot/Erase и в подразделе «Geometry» нажимаем кнопку *Erase* (стереть).
Для закрытия диалоговой панели нажимаем *OK*.
Запускаем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание Create/Quick Plot.

Следует отметить, что в модальном анализе для каждой рассчитанной формы (или моды) собственных колебаний создается свой отдельный случай результатов.

Эти случаи результатов приводятся в списке «Select Result Cases» (рисунок 21.1), где указываются имя расчетного случая, номера мод и собственные частоты (в Гц).

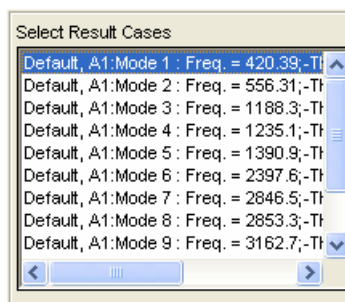


Рисунок 21.1 – Случай результатов


Видно, что первая (наименьшая) собственная частота рассматриваемой конструкции составляет 420,4 Гц.

В данном списке выбираем любую форму колебаний.

Далее в списке «Select Fringe Result» в качестве величины для многоцветного представления ее поля указываем Eigenvectors, Translational (собственный вектор – поступательные перемещения, характеризующие форму колебаний).

В качестве компоненты (Quantity) выбираем Magnitude (величина).

В списке «Select Deformation Result» в качестве результата для изображения деформированного состояния модели также указываем строку Eigenvectors, Translational.

С помощью кнопки-пиктограммы  устанавливает вид для настройки изображения деформированного состояния модели.

Отключаем опцию «Show Undeformed» (показать недеформированное состояние).

Следует отметить, что истинные перемещения, как правило, малы по сравнению с размерами конструкции, и поэтому их масштабируют.

Коэффициент масштабирования для перемещений здесь задается в поле «Scale Factor», причем его интерпретация зависит от значения опции «Scale Interpretation».

При выборе значения Model Scale масштабирование выполняется по отношению к габаритному размеру конструкции (т.е. коэффициент масштабирования 0,1 означает, что максимальное перемещение будет составлять 10% габаритного размера конструкции).

Если требуется истинный масштаб, то необходимо установить значение True Scale.

Нажимаем *Apply*.

Одна из форм собственных колебаний показана на рисунке 21.2.

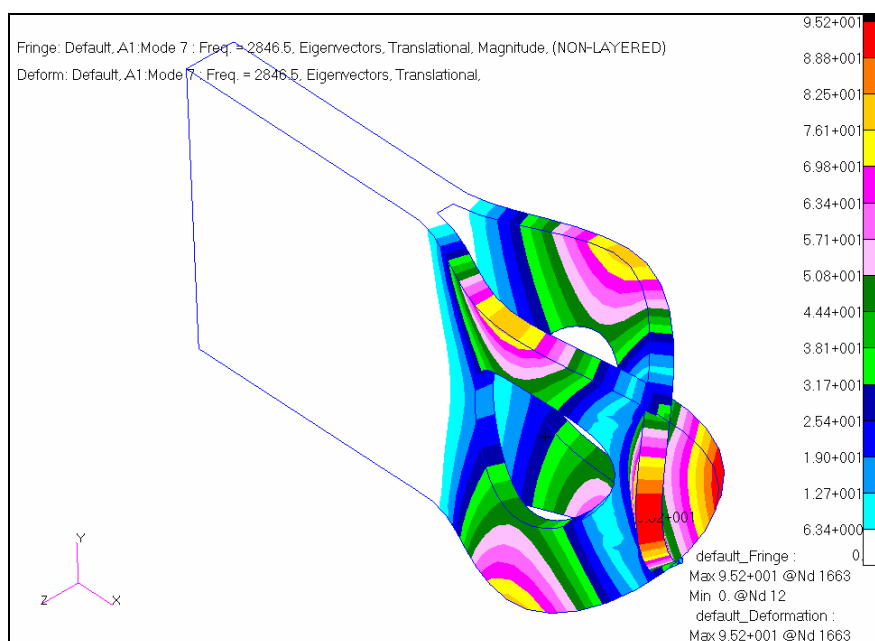


Рисунок 21.2 – Форма собственных колебаний №7


Следует напомнить, что формы собственных колебаний вычисляются с точностью до произвольного множителя и по умолчанию нормируются относительно матрицы масс конструкции. Поэтому абсолютные значения перемещений здесь могут быть несколько завышенными (они не имеют физического смысла).

8. Включить анимацию форм собственных колебаний.

Устанавливаем вид для выбора результатов (кнопка).

Изображение поля выходной величины на деформированном состоянии модели может помешать просмотру анимации форм собственных колебаний. Поэтому в списке «Select Fringe Result» снимаем выделение строки Eigenvectors, Translational.

Устанавливаем флаг «Animate».

Опять нажимаем кнопку-пиктограмму  и в разделе «Deformed» для опции «Render Style» (стиль отображения деформированного состояния) выбираем значение Shaded (с закрашенными гранями и тенями).

Далее нажимаем последнюю кнопку с кинолентой .

В разделе «Animation Graphics» выбираем трехмерную графику (3D), позволяющую вращать модель в процессе анимации.

Для получения более плавной анимации можно увеличить число кадров (поле «Number of Frames»).

И наконец, нажимаем кнопку *Apply*.

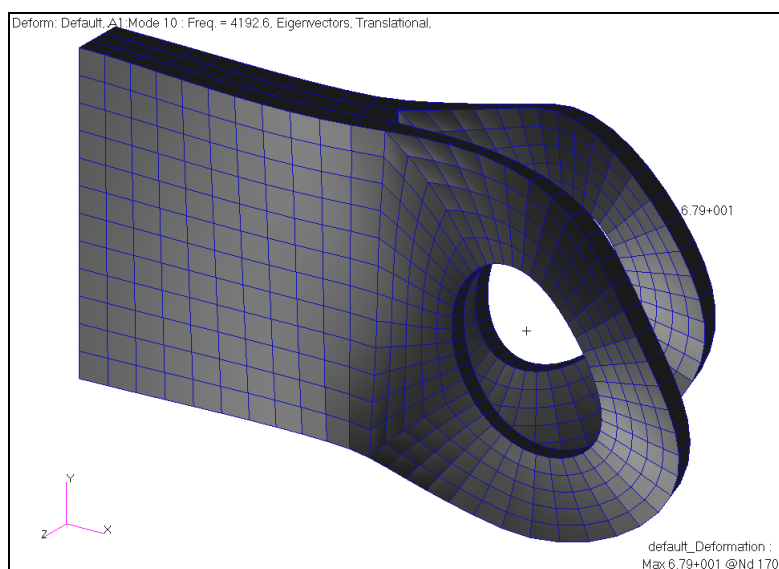
Некоторое время займет формирование видео файла, после чего в графическом окне будет представлена анимация выбранной формы собственных колебаний. Кроме того, появится дополнительная панель «Animation Control».

Скорость анимации здесь регулируется бегунком «Animation Speed».

В случае необходимости изменения опций здесь следует временно прервать процесс анимации, установив флаг «Pause Animation».

Для полного завершения процесса анимации необходимо нажать одну из кнопок раздела «Stop Animation and ...».

Нажимаем *No Graphics Refresh* (не восстанавливать изображение). При этом результаты расчета останутся на экране (рисунке 21.3).



**Рисунок 21.3 – Форма собственных колебаний №10
(без многоцветного представления поля)**

9. Выйти из программы: *File>Quit*.

22 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

«Исследование вынужденных установившихся колебаний пластины»

Исходные данные: прямоугольная дюралевая пластина с круглой стальной шайбой жестко закреплена по двум смежным сторонам (рисунок 22.1). Размеры пластины $a = 1000$ мм и $b = 600$ мм; радиус шайбы $r = 50$ мм; толщина пластины $h = 2$ мм; толщина шайбы $h_{ш} = 4$ мм. Свойства дюралюминия: модуль упругости $7 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; плотность 2700 кг/м³. Свойства стали: модуль упругости $2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3; плотность 7800 кг/м³. В центре шайбы приложена изменяющаяся по гармоническому закону поперечная сила P (амплитуда 10 Н; частота возбуждения может принимать значения до 20 Гц).

Допущение: отношение наименьшего размера пластины b к толщине h , а также диаметра шайбы $2r$ к толщине шайбы $h_{ш}$ больше 10, что позволяет использовать для моделирования данной конструкции оболочечные элементы.

Цель: определить отклик системы на нескольких частотах возбуждения и построить зависимости амплитуд прогибов характерных точек от частоты.

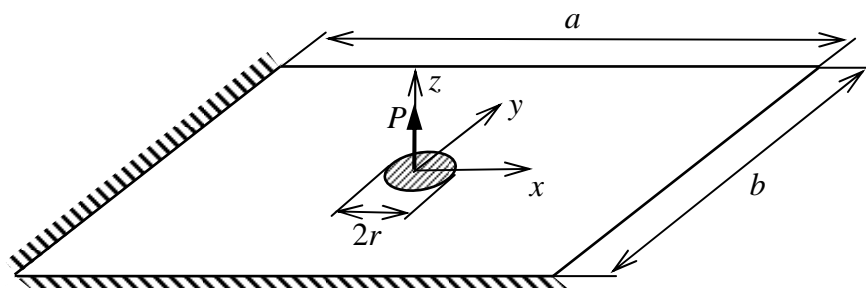


Рисунок 22.1 – Геометрия пластины

Следует отметить, что перед выполнением гармонического анализа всегда полезно (для отслеживания резонансных явлений) определять частоты собственных колебаний.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных: *File>New*.

В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab9.db, *OK*.

2. Задать начальные установки.

В разделе «Tolerance» диалоговой панели «New Model Preference» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 1000 (в мм), *OK*.

3. Построить прямоугольную поверхность.

Запускаем приложение «Geometry» и устанавливаем сочетание *Create/Surface/XYZ*.


Вводим:

«Refer. Coordinate Frame»: Coord 0 (базовая система координат)

«Vector Coordinates List»: <1000 600 0> (описывающий диагональ вектор)

«Origin Coordinate List»: [0 0 0] (координаты начала вектора)

Apply.

Для визуализации внутренней геометрии поверхностей воспользуемся кнопкой  панели инструментов.

Включаем нумерацию геометрических объектов.

4. Сделать отверстие.

Устанавливаем сочетание *Edit/Surface/Add Hole*.

Вводим:

«Hole Radius»: 50 (радиус отверстия, мм)

«Surface»: Surface 1 (поверхность)

«Center Point List»: [500 300 0] (координаты центра отверстия, мм)

Apply.

5. Заполнить отверстие.

Устанавливаем сочетание *Edit/Surface/Remove Hole*.

Для заполнения отверстия ниже нажимаем кнопку *Fill Hole*. При этом изменится вид диалоговой панели.

Для поля «Trimmed Surface» указываем поверхность 1, а для поля «Inner Loop List» – контур отверстия.

Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*.

6. Построить точку в центре круга.

Для определения точки по трем координатам устанавливаем сочетание *Create/Point/XYZ*.

Вводим:

«Point Coordinate List»: [500 300 0] (координаты точки, мм)

Apply.

7. Привязать точку к геометрии круглой поверхности.

Устанавливаем сочетание Associate/Point/Surface.

Для поля «Point List» указываем построенную на предыдущем шаге точку (Point 6), а для поля «Surface List» – круглую поверхность (Surface 2).

Если требуется, нажимаем *Apply*.

Точка, связанная с поверхностью, помечается треугольником.

Следует напомнить, что такие присоединенные точки позволяют управлять процессом генерации конечно-элементных сеток, поскольку в них обязательно образуются узлы.

8. Разбить поверхности на конечные элементы.

Запускаем приложение «Elements» и для нанесения сетки на поверхность устанавливаем сочетание Create/Mesh/Surface.

Построенные нами поверхности изображаются пурпурным цветом, т.е. они не являются простыми. Поэтому для их разбиения будем использовать генератор свободных сложных сеток.

Выбираем:

«Elem Shape»: Quad (четырёхугольная форма)

«Mesher»: Paver (алгоритм построения свободных сеток на любых поверхностях)

«Topology»: Quad4 (топология – четырёхугольник с четырьмя узлами).

Активизируем поле «Surface List» и в графическом окне указываем круглую поверхность (Surface 2).

В разделе «Global Edge Length» отключаем опцию автоматического вычисления глобальной длины стороны элемента и в поле «Value» вводим значение 20 (в мм).

Нажимаем *Apply*.

Снова активизируем поле «Surface List» и в графическом окне указываем прямоугольную поверхность с отверстием (Surface 1).

В поле «Value» в качестве глобальной длины стороны элемента вводим значение 60 (в мм).

Опять нажимаем *Apply*.

Получаемая при этом сетка показана на рисунке 22.2.

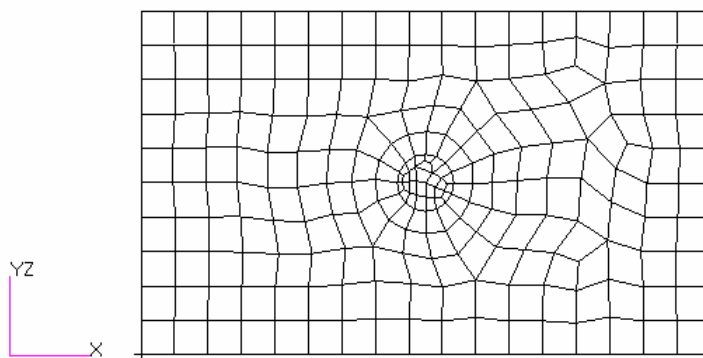


Рисунок 22.2 – Конечно-элементная сетка

9. Сшить конечно-элементную модель.

Сначала для наглядности отобразим на экране свободные (т.е. несшитые) кромки. Выбираем сочетание *Verify/Element/Boundaries*.

Используя установленную по умолчанию опцию «Free Edges» (свободные кромки), нажимаем *Apply*. Появляющееся при этом изображение показано на рисунке 22.3,а.

Для восстановления исходного вида нажимаем *Reset Graphics*.

Далее для выполнения собственно операции сшивки устанавливаем сочетание *Equivalence/All/Tolerance Cube*.

Ничего не меняя, нажимаем *Apply*. При этом места сшивки модели обводятся кружочками.

Если теперь снова отрисовать свободные кромки, то должно появиться изображение, как на рисунке 22.3,б.

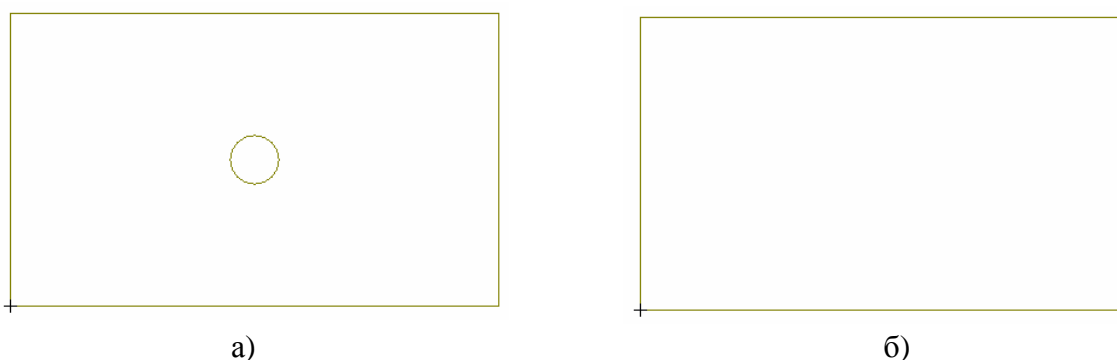


Рисунок 22.3 – Проверка выполнения операции сшивки

10. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «Materials» и выбираем сочетание *Create/Isotropic/Manual Input*.

В поле «Material Name» вводим имя материала, например *dural*.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* и вводим свойства:

«Elastic Modulus» = $7e4$ (модуль упругости дюралюминия, МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона дюралюминия)

«Density» = $2700e-12$ (плотность дюралюминия, т/мм³)

ОК.

Нажимаем кнопку *Apply*.

Затем в поле «Material Name» вводим другое имя, например steel.

Нажимаем кнопку *Input Properties* и вводим свойства:

«Elastic Modulus» = $2e5$ (модуль упругости стали, МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона стали)

«Density» = $7800e-12$ (плотность стали, т/мм³)

ОК.


В конце нажимаем кнопку *Apply*.

11. Определить свойства элементов.

Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств оболочечных элементов устанавливаем сочетание Create/2D/Shell.

Сначала для пластины в поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например plate.

Не меняя установленные по умолчанию опции, нажимаем кнопку *Input Properties*. При этом появляется дополнительное окно, где будет выбран стандартный элемент однородной пластины CQUAD4, который используется для моделирования как пластин, так и оболочек.

Нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем dural.

В поле «Thickness» вводим значение толщины: 2 (в мм).

Закрываем окно кнопкой ОК.

Нажимаем кнопку *Select Application Region* и указываем прямоугольную поверхность с отверстием (Surface 1).

Затем последовательно нажимаем *Add*, ОК и *Apply*.

Затем для шайбы в поле «Property Set Name» вводим другое имя, например washer.

Нажимаем кнопку *Input Properties*.

Из списка существующих материалов выбираем steel.

В поле «Thickness» вводим значение толщины: 4 (в мм).

Закрываем окно кнопкой ОК.

Нажимаем кнопку *Select Application Region* и указываем круглую поверхность (Surface 2).

Затем последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.


12. Задать граничные условия защемления на двух смежных сторонах пластины (см. рисунок 22.1).

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений выбираем сочетание *Create/Displacement/Nodal*.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например *clamped*.

Нажимаем кнопку *Input Data*, в полях «Translations» (поступательные перемещения) и «Rotations» (углы поворота) вводим $\langle 0,0,0 \rangle$, *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кривая или кромка) и указываем с использованием клавиши *Shift* нижнюю и левую кромки ($x = -a/2$ и $y = -b/2$).

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

13. Выполнить модальный анализ.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание *Analyze/Entire Model/Full Run*.

Для изменения типа решения нажимаем кнопку *Solution Type* и выбираем *Normal Modes* (расчет частот и форм собственных колебаний), *OK*.

По умолчанию число рассчитываемых частот и форм равно десяти, что нас устраивает, поэтому расчетный случай менять не будем.

Для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply*.

14. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab9.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

15. Вывести список первых десяти низших частот собственных колебаний.

Запускаем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание *Create/Quick Plot*.

Собственные частоты приводятся в списке «Select Result Cases»:

№ моды	Частота, Гц
1	6,3719
2	15,177
3	30,097
4	34,050
5	41,036
6	61,130
7	62,035
8	82,069
9	87,877
10	92,910

Для просмотра форм собственных колебаний здесь можно воспользоваться приемами, подробно описанными в предыдущей лабораторной работе. Одна из мод представлена на рисунке 22.4.

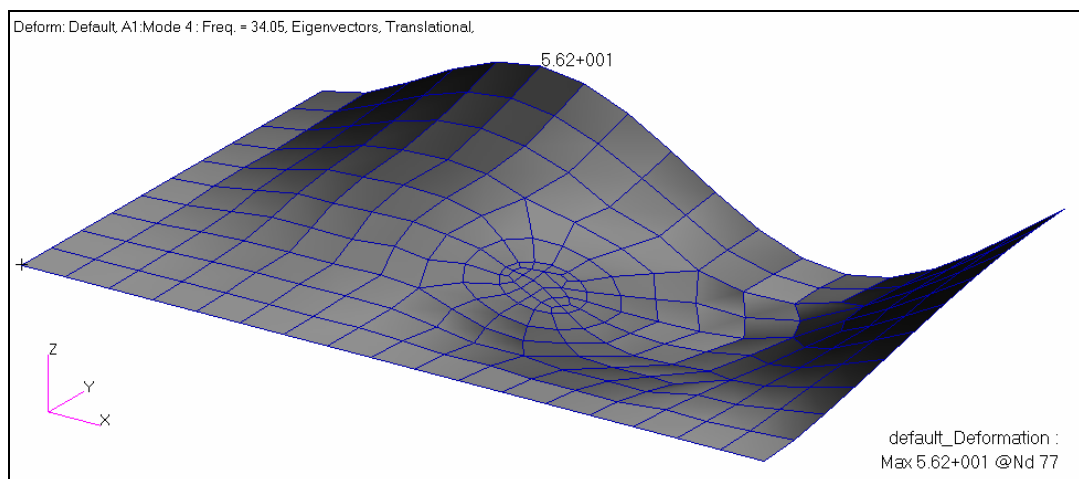


Рисунок 22.4 – Форма собственных колебаний №4


16.3. Задать амплитуду поперечной силы.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и устанавливаем сочетание Create/Force/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например load.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Force» для задания силы, действующей по оси Z, вводим следующие компоненты (в Н): <0 0 10>. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем точку в центре шайбы.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

17. Выполнить гармонический анализ.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание Analyze/Entire Model/Full Run.

Для изменения типа решения нажимаем кнопку *Solution Type* и выбираем Frequency Response (частотный, или гармонический, анализ).

С помощью выпадающего меню «Formulation» здесь можно задать метод решения: Modal – метод суперпозиций, или разложения по формам собственных колебаний; Direct – метод прямого интегрирования уравнений движения.

Выбираем Direct.

Далее нажимаем кнопку *Solution Parameters* и вводим:

«Mass Calculation»: Coupled (использовать согласованную матрицу масс)

«Struct. Damping Coeff.» = 0.1 (безразмерный общий коэффициент конструкционного демпфирования G)

OK.

Закрываем диалоговую панель «Solution Type» кнопкой OK.

Затем для модификации расчетного случая нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем Default. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Для изменения параметров расчетного случая используем кнопку *Subcase Parameters*.

При нажатии кнопки *DEFINE FREQUENCIES* появляется дополнительное окно с таблицей (рисунок 22.5), где можно задать диапазон частот возбуждения. Для ввода значения здесь необходимо активизировать соответствующую ячейку таблицы, набрать в поле «Input Data» нужное число и нажать клавишу *Enter*.

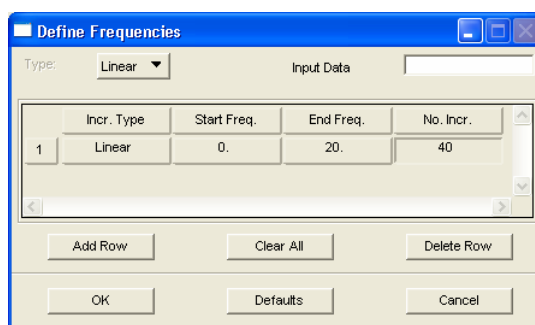


Рисунок 22.5 – Задание диапазона частот возбуждения

Заполняем первую строчку таблицы:

«Incr. Type»: Linear (тип приращений – линейный, т.е. с одинаковым шагом)

«Start Freq»: 0 (начальная частота, Гц)

«End Freq»: 20 (конечная частота, Гц)

«No. Incr.»: 40 (число приращений)

OK.

При этом будет выполняться расчет для следующих частот возбуждения: 0,5; 1; 1,5; 2;...; 20 Гц.

Отметим, что в динамическом анализе по умолчанию выводятся лишь перемещения и силы реакций. Если требуются другие результаты, например напряжения, то необходимо запросить их, воспользовавшись кнопкой *Output Requests*.

Последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И наконец, собственно для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

18. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.


В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab9.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

19. Построить зависимости амплитуд прогибов характерных точек от частоты возбуждения.


Запускаем приложение «Results» и для построения двухмерного графика устанавливаем сочетание *Create/Graph/Y vs X*.

В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным частотам возбуждения. При этом для раскрытия списка случаев результатов следует отжать кнопку .


В списке «Select Y Results» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем *Displacement, Translational* (поступательные перемещения). Ниже в выпадающем меню «Quantity» указываем компоненту *Z Component*.

В меню «X» за ось абсцисс принимаем *Global Variable* (глобальную переменную).

Ниже в меню «Variable» выбираем пункт Frequency, тем самым, уточняя, что в качестве глобальной переменной будет использоваться частота.

Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

Активизируем поле «Select Nodes» и в графическом окне указываем узел в центре шайбы и, удерживая нажатой клавишу *Shift*, узел, расположенный в свободном углу пластины.

Далее с помощью кнопки-пиктограммы  устанавливаем вид для задания опций вычерчивания.

Для построения графиков амплитуд перемещений выбираем «Complex No. as»: Magnitude.

После нажатия кнопки *Apply* в отдельном окне появляются графики зависимостей амплитуд поперечных перемещений в двух выбранных узлах от частоты возбуждения (рисунок 22.6).

Видно, что пиковые значения амплитуд (характеризующие резонансные явления) соответствуют первым двум частотам собственных колебаний пластины.

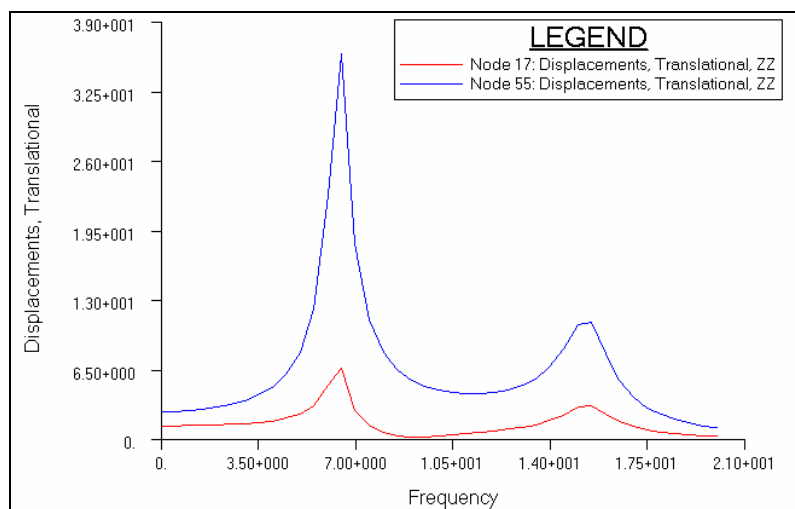


Рисунок 22.6 – Зависимости амплитуд прогибов от частоты

20. Выйти из программы: *File > Quit*.

Замечание: Не удаляйте базу данных Lab9.db, поскольку построенная здесь модель будет использоваться в следующей лабораторной работе для исследования неустановившихся колебаний пластины при поперечном ударе.

23 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

«Исследование неустановившихся колебаний пластины при поперечном ударе»

Исходные данные: рассматривается та же пластина, что и в предыдущей лабораторной работе. Форма импульса поперечной ударной силы P , действующей в центре шайбы, представлена на рисунке 23.1.

Цель: определить динамический отклик системы на действие ударной нагрузки и построить зависимости прогибов характерных точек от времени.



Рисунок 23.1 – Форма импульса ударной силы

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных: *File>New*.
В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab10.db, *OK*.
2. Импортировать модель из базы данных предыдущей лабораторной работы.
В полосе меню выбираем команду *File>Import*.
При этом появляется окно, где в выпадающих меню выбираем:
«Object»: Model (объектом импортирования является модель)
«Source»: MSC.Patran DB (источник – файл базы данных MSC.Patran).
Указываем имя файла Lab9.db, *Apply*.
После импорта модели появляется окно со списком импортированных объектов. Закрываем его кнопкой *OK*.
3. Задать начальные установки.

В разделе «Tolerance» диалоговой панели «New Model Preference» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 1000 (в мм), *OK*.

4. Удалить граничные условия и нагрузку.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и устанавливаем сочетание Delete/Displacement.

В списке существующих наборов граничных условий «Existing Sets» указываем clamped, *Apply*.

Затем устанавливаем сочетание Delete/Force и в списке существующих наборов выбираем load, *Apply*.

5. Определить зависящий от времени случай нагружения.

Выбираем приложение «Load Cases».

В поле «Load Case Name» вводим имя вновь создаваемого случая нагружения, например Time_vary.

Устанавливаем флаг «Make Current» (сделать текущим).

В выпадающем меню «Type» выбираем пункт Time Dependent (зависящий от времени).

В конце нажимаем кнопку *Apply*.

6. Задать граничные условия для зависящего от времени случая нагружения.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений выбираем сочетание Create/Displacement/Nodal.

Проверяем, что в качестве текущего используется зависящий от времени случай нагружения. Должно быть установлено:

«Current Load Case»: Time_vary

«Type»: Time Dependent.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например clamped.


Нажимаем кнопку *Input Data*.

Поскольку перемещения задаются для зависящего от времени случая нагружения, диалоговая панель «Input Data» будет содержать два столбца: Spatial Dependence (зависимость от пространственных координат) и Time/Freq. Dependence (зависимость от времени или частоты).

В нашем случае граничные условия не зависят от времени, поэтому заполняем только первый столбец.

В полях «Translations» (поступательные перемещения) и «Rotations» (углы поворота) вводим <0,0,0>, *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кривая или кромка) и указываем с использованием клавиши *Shift* нижнюю и левую кромки ($x = -a/2$ и $y = -b/2$).

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

7. Задать поле, описывающее изменение нагрузки во времени.

Выбираем приложение «Fields».

Напомним, что зависящее от времени поле является частным случаем непространственных полей. Для его построения устанавливаем сочетание *Create/Non Spatial/Tabular Input*.

В поле «Field Name» вводим имя вновь создаваемого поля, например *time_field*.

В качестве типа скалярного поля «Scalar Field Type» используем задаваемое по умолчанию значение *Real* (действительное).

Также по умолчанию здесь определена лишь одна независимая переменная – время, т.е. установлен флаг «Time (t)», что нас устраивает.

Далее нажимаем кнопку *Input Data*.

При этом появляется дополнительное окно с таблицей (рисунок 23.2). Для ввода значения здесь необходимо активизировать соответствующую ячейку таблицы, набрать в поле «Input Data» нужное число и нажать клавишу *Enter*.

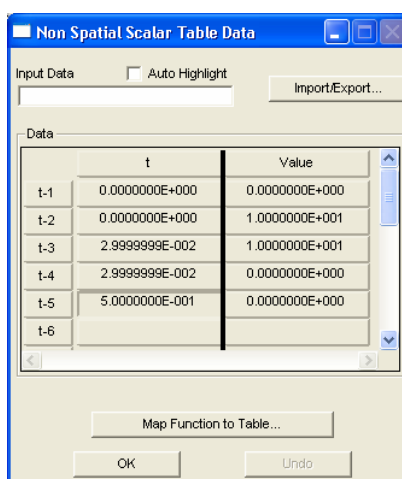


Рисунок 23.2 – Табличное задание поля

Вводим следующие значения:

№	t, c	P, H
1	0	0
2	0	10
3	0.03	10
4	0.03	0
5	0.5	0

Закрываем окно с таблицей кнопкой *OK*.

В конце нажимаем *Apply*.

Сообщение о том, что значения независимой переменной перечисляются не в возрастающем порядке, игнорируем нажатием кнопки *Yes*.

Для проверки правильности задания поля отобразим его в виде двумерного графика (действие *Show*).

Нажимаем *Specify Range* (задать диапазон) и в соответствующие поля вводим:

«Minimum»: 0 (минимальное значение переменной t)

«Maximum»: 0.05 (максимальное значение переменной t)

«No. of Points»: 100 (число точек)

OK.

Следует отметить, что здесь требуется достаточно большое число точек, поскольку введенная зависимость имеет вертикальные участки.

После нажатия *Apply* в отдельном окне появляется график, а рядом – таблица значений. Закрываем ее кнопкой *Cancel*.

Для закрытия окна с графиком следует воспользоваться кнопкой *Unpost Current XYWindow*.

8. Приложить нагрузку в виде ударной силы.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и устанавливаем сочетание *Create/Force/Nodal*.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например *load*.

Нажимаем кнопку *Input Data*.

Отметим, что для зависящего от времени случая нагружения нагрузка определяется в виде произведения двух функций. Первая описывает изменение нагрузки в пространстве, а вторая – во времени (или от частоты).

В нашем случае нагрузка изменяется лишь во времени.

Поэтому в первой (левой) области ввода строки «Force» для задания силы, действующей по оси Z , вводим не поле, а постоянные компоненты вектора: $\langle 0 \ 0 \ 1 \rangle$. *OK*.

Далее активизируем вторую (правую) область ввода данной строки и в списке зависящих от времени (или частоты) полей указываем `time_field`. При этом должна появиться запись `f:time_field` (рисунок 23.3). *OK*.

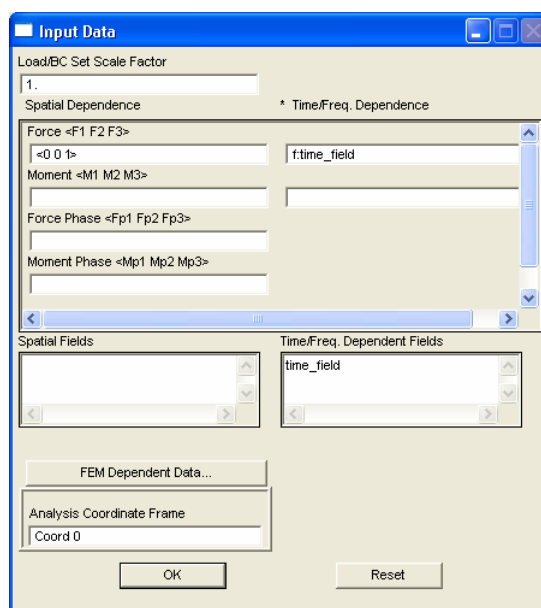



Рисунок 23.3 – Ввод зависящей от времени нагрузки

Затем нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем точку в центре шайбы.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

9. Выполнить переходный динамический анализ.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание *Analyze/Entire Model/Full Run*.

Для изменения типа решения нажимаем кнопку *Solution Type* и выбираем *Transient Response* (переходный динамический анализ).

С помощью выпадающего меню «Formulation» здесь можно задать метод решения: *Modal* – метод суперпозиций, или разложения по формам собственных колебаний; *Direct* – метод прямого интегрирования уравнений движения.

Выбираем *Direct*.

Далее нажимаем кнопку *Solution Parameters* и вводим:

«Mass Calculation»: *Coupled* (использовать согласованную матрицу масс)

«Struct. Damping Coeff.» = $2e-3$ (безразмерный общий коэффициент конструкционного демпфирования G)

«W3, Damping Factor» = 1 (значение частоты для преобразования конструкционного демпфирования в эквивалентное вязкое, рад/с)

OK.

Закрываем диалоговую панель «Solution Type» кнопкой *OK.*

Затем для модификации расчетного случая нажимаем кнопку *Subcases.*

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем *Time_vary.* Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Для изменения параметров расчетного случая используем кнопку *Subcase Parameters.*

При нажатии кнопки *DEFINE TIME STEPS* появляется дополнительное окно с таблицей (рисунок 23.4), где можно определить шаги интегрирования по времени. В первом столбце здесь задается число шагов (No. of Time Steps), во втором – размер шага по времени (Delta-T), а в третьем – интервал времени в шагах, через который будут выводиться значения выходных величин (Skip Factor).

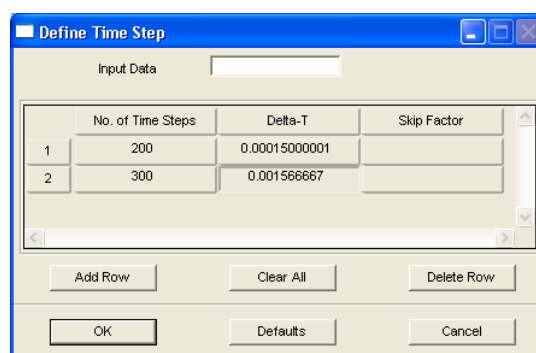


Рисунок 23.4 – Задание шагов интегрирования по времени

В первую строчку вводим 200 шагов по 0,00015 с ($200 \times 0,00015 = 0,03$ с).

Для добавления второй строчки нажимаем *Add Row* и вводим 300 шагов по 0,001566667 с ($0,03 + 300 \times 0,001566667 = 0,5$ с).

Нажимаем *OK.*

Отметим, что в динамическом анализе по умолчанию выводятся лишь перемещения и силы реакций. Если требуются другие результаты, например напряжения, то необходимо запросить их, воспользовавшись кнопкой *Output Requests.*

Последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel.*

Для выбора расчетного случая, посылаемого на анализ, нажимаем кнопку *Subcase Select*.

В верхнем списке указываем расчетный случай *Time_vary* для перемещения его в список, содержащий выбранные для анализа случаи.

В нижнем списке указываем случай *Default* для удаления его из числа посылаемых на анализ.

И наконец, собственно для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

10. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.


В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab10.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

11. Построить зависимости прогибов характерных точек от времени.


Запускаем приложение «Results» и для построения двухмерного графика устанавливаем сочетание *Create/Graph/Y vs X*.

В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным моментам времени. При этом для раскрытия списка случаев результатов следует отжать кнопку .

В списке «Select Y Results» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем *Displacement, Translational* (поступательные перемещения). Ниже в выпадающем меню «Quantity» указываем компоненту *Z Component*.

В меню «X» за ось абсцисс принимаем *Global Variable* (глобальную переменную).

Ниже в меню «Variable» выбираем пункт *Time*, тем самым, уточняя, что в качестве глобальной переменной будет использоваться время.

Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

Активизируем поле «Select Nodes» и в графическом окне указываем узел в центре шайбы и, удерживая нажатой клавишу *Shift*, узел, расположенный в свободном углу пластины.

После нажатия кнопки *Apply* в отдельном окне появляются графики зависимостей поперечных перемещений в двух выбранных узлах от времени (рисунок 23.5).

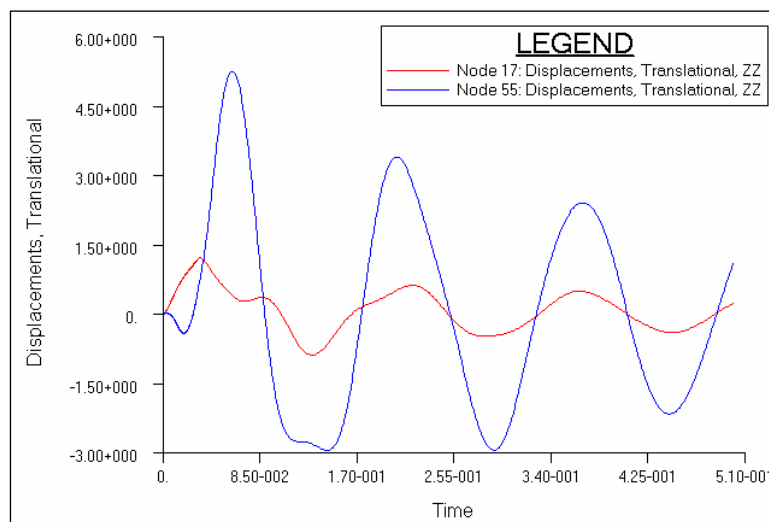


Рисунок 23.5 – Зависимости прогибов от времени

Следует отметить, что в рассматриваемом случае после удара пластина начинает совершать свободные затухающие колебания, так как было задано демпфирование. При этом колебания происходят в основном по первому тону (т.е. с частотой 6,37 Гц), поскольку они менее всего подвержены демпфированию.

Для того чтобы увидеть колебания, соответствующие второму тону и т.д., необходимо отключить демпфирование.

Отметим, что для удаления окна с графиком следует установить сочетание *Delete/Plots* и в списке «Existing Plot Types» выбрать *GRA_default_Graph*, *Apply*.

12. Включить анимацию переходного динамического процесса.

Здесь полезно предварительно убрать с экрана изображение геометрических объектов.

Нажимаем кнопку *Iso 3 View* панели инструментов для задания подходящего вида.

Устанавливаем сочетание *Create/Deformation*.

В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным моментам времени.

В списке «Select Deformation Result» выбираем Displacement, Translational (поступательные перемещения).

Включаем опцию «Animate».

Нажимаем кнопку-пиктограмму  для задания атрибутов изображения.

Снимаем флаг «Show Undeformed» (показать недеформированное состояние).

В разделе «Deformed» для опции «Render Style» (стиль отображения деформированного состояния) выбираем значение Shaded (с закрашенными гранями и тенями).

Далее нажимаем последнюю кнопку с кинолентой .

В поле «Number of Frames» (число кадров) вводим значение 30 для получения более плавной анимации.

И наконец, нажимаем кнопку *Apply*.

Некоторое время займет формирование видео файла, после чего в графическом окне будет представлена анимация переходного динамического процесса. Кроме того, появится дополнительная панель «Animation Control».

Скорость анимации здесь регулируется бегунком «Animation Speed».

В случае необходимости изменения опций здесь следует временно прервать процесс анимации, установив флаг «Pause Animation».

Для полного завершения процесса анимации необходимо нажать одну из кнопок раздела «Stop Animation and ...».

13. Выйти из программы: *File > Quit*.

24 РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ

24.1 Особенности учета нелинейных эффектов в МКЭ-расчетах

Линейность поведения конструкции опирается на следующие допущения:

- перемещения малы по сравнению с размерами тела;
- материал является линейно-упругим;
- природа граничных условий сохраняется неизменной во время приложения нагрузки.

Тот факт, что перемещения малы, учитывается при вычислении матрицы жесткости конструкции $[K]$ и вектора нагрузки $[P]$, поскольку интегрирование выполняется по исходному (недеформированному) объему конечных элементов, а матрица $[\beta]$, связывающая деформации с узловыми перемещениями, считается не зависящей от перемещений. Допущение о линейно-упругом материале позволяет использовать постоянную матрицу $[\kappa]$, связывающую напряжения с деформациями. И наконец, допущение о том, что природа граничных условий сохраняется неизменной, отражается при использовании постоянных граничных связей.

При этих допущениях в случае статического анализа конечно-элементные уравнения равновесия имеют вид

$$[K][v]=[P]. \quad (24.1)$$

Здесь узловые перемещения $[v]$ являются линейной функцией приложенного вектора нагрузки $[P]$. Таким образом, если вместо нагрузки $[P]$ приложить $\alpha[P]$ (где α – некоторая постоянная), то перемещения будут равны $\alpha[v]$. Это не выполняется в нелинейном анализе.

Если перемещения тела являются большими (например, для пластин и оболочек прогиб больше четверти толщины), то необходимо учитывать изменение конфигурации тела, т.е. так называемую *геометрическую нелинейность*. Для тонкостенных конструкций обычно возникает ситуация, когда перемещения и углы поворота большие, а деформации можно считать малыми (по сравнению с единицей). Случай больших деформаций (более 4%) требует использования специальной формулировки. И наконец, особо следует выделить случай очень больших (конечных) деформаций, превышающих

30%. Корректно решать такие задачи можно только с использованием современных пакетов, предназначенных для анализа высоконелинейных процессов.

Если связь между напряжениями и деформациями нелинейная (например, как при пластическом течении), то следует учитывать *физическую нелинейность*.

Если в процессе нагружения граничные условия изменяются (например, при определенном уровне нагрузки накладываются дополнительные ограничения на некоторые перемещения), то поведение будет линейным только до изменения граничных условий. Такая ситуация возникает при решении *контактных задач*.

Основной целью нелинейного анализа является нахождение положения равновесия тела, соответствующего приложенным нагрузкам. Принимая, что внешние силы являются функцией времени, условия равновесия системы конечных элементов, соответствующей телу, могут быть выражены как

$${}^t[P] - {}^t[F] = 0, \quad (24.2)$$

где ${}^t[P]$ – вектор внешне приложенных узловых сил в конфигурации в момент времени t ; ${}^t[F]$ – вектор узловых сил, соответствующих напряжениям в элементах в той же конфигурации.

Данное уравнение должно удовлетворяться в любой момент всей истории приложения нагрузки, т.е. переменная времени t должна браться от 0 до максимального значения, которое нас интересует. В статическом анализе без временных эффектов t является лишь удобной переменной для обозначения различных уровней приложения нагрузки и соответственно различных конфигураций. Данную переменную в этом случае можно назвать параметром нагрузки.

Во многих задачах требуется найти только напряжения или перемещения, достигнутые при определенном уровне нагрузки. В некоторых случаях (для консервативных систем) равновесные конфигурации, соответствующие заданной нагрузке, могут вычисляться сразу без решения для других равновесных конфигураций. Однако, когда анализ включает зависящие от уровня нагрузки нелинейные геометрические или физические условия или зависящие от времени явления (т.е. неконсервативное поведение), уравнение (24.2) необходимо решать для полного временного диапазона. Для этого используется пошаговый метод последовательных нагружений.

В пошаговой схеме предполагается, что решения для временных шагов от 0 до t включительно получены, а требуется найти решение для момента времени $t + \Delta t$, где Δt – некоторое малое приращение времени. Согласно (24.2) в момент времени $t + \Delta t$ имеем

$${}^{t+\Delta t}[P] - {}^{t+\Delta t}[F] = 0. \quad (24.3)$$

Так как решение в момент времени t известно, можно записать

$${}^{t+\Delta t}[F] = {}^t[F] + [\Delta F], \quad (24.4)$$

где $[\Delta F]$ – приращение узловых сил, соответствующее приращению напряжений за период времени от t до $t + \Delta t$. Этот вектор может аппроксимироваться с помощью так называемой матрицы тангенциальной жесткости ${}^t[K]$, которая соответствует геометрическим и физическим условиям в момент времени t :

$$[\Delta F] = {}^t[K][\Delta v], \quad (24.5)$$

где $[\Delta v]$ – вектор приращения узловых перемещений. Подставляя (24.5) и (24.4) в (24.3), получим

$${}^t[K][\Delta v] = {}^{t+\Delta t}[P] - {}^t[F]. \quad (24.6)$$

Решая эту систему уравнений, можно определить $[\Delta v]$, а затем найти приближение для перемещений в момент времени $t + \Delta t$:

$${}^{t+\Delta t}[v] = {}^t[v] + [\Delta v]. \quad (24.7)$$

Однако из-за допущения (24.5) такое решение может приводить к существенным ошибкам и в зависимости от размера шага по времени (или нагрузке) может быть неустойчивым. Поэтому на практике, как правило, требуется итерационное уточнение решения на каждом шаге.

Широко используемой итерационной процедурой здесь является метод Ньютона-Рафсона, предназначенный для решения систем нелинейных уравнений. При этом уравнения (24.6) и (24.7) примут вид

$${}^{t+\Delta t}[K]^{(i-1)}[\Delta v]^{(i)} = {}^{t+\Delta t}[P] - {}^{t+\Delta t}[F]^{(i-1)}; \quad (24.8)$$

$${}^{t+\Delta t}[v]^{(i)} = {}^{t+\Delta t}[v]^{(i-1)} + [\Delta v]^{(i)}, \quad (24.9)$$

с начальными условиями

$${}^{t+\Delta t}[K]^{(0)} = {}^t[K]; \quad {}^{t+\Delta t}[v]^{(0)} = {}^t[v]; \quad {}^{t+\Delta t}[F]^{(0)} = {}^t[F]. \quad (24.10)$$

Здесь $i = 1, 2, \dots$ – номер итерации.

Следует отметить, что каждая итерация полного метода Ньютона-Рафсона требует пересчета (т.е. обновления) матрицы тангенциальной жесткости, который является весьма трудоемкой операцией. Поэтому на практике часто используется упрощенный (модифицированный) метод Ньютона-Рафсона. Эффективность данной схемы в МКЭ-расчетах заключается в том, что в пределах шага по времени матрица тангенциальной жесткости не меняется. В этом случае уравнение (24.8) преобразуется к следующему виду:

$${}^t[K][\Delta v]^{(i)} = {}^{t+\Delta t}[P] - {}^{t+\Delta t}[F]^{(i-1)}. \quad (24.11)$$

Правая часть уравнений (24.8) и (24.11), которая определяет «невязку» сил, обращается в нуль, если конфигурация тела соответствует его равновесному состоянию. В противном случае по величине «невязки» находится приращение перемещений на очередной итерации, а также корректируется конфигурация тела. На практике итерационный процесс выполняется до тех пор, пока приращение перемещений не будет находиться внутри определенной меры сходимости.

На рисунках 24.1 и 24.2 представлена графическая иллюстрация полного и модифицированного методов Ньютона-Рафсона при использовании их в пошаговой процедуре последовательных нагружений. В этом случае приращение нагрузки, как правило, берется постоянным.

Видно, что модифицированный метод требует для сходимости значительно большего числа итераций, нежели полный, однако время выполнения одной итерации здесь существенно меньше.

Следует отметить, что нелинейные соотношения могут быть записаны в лагранжевом или эйлеровом представлении. В лагранжевой (материальной) формулировке внимание фокусируется на движении фиксированных частиц, а в эйлеровой (пространственной) – наблюдается протекание во времени процесса в данном месте. Для твердых тел материальное описание обычно является более естественным и эффективным подходом, чем пространственное, которое применяется, как правило, в решении задач механики жидкости и газа.

Основная трудность нелинейного анализа заключается в том, что параметры состояния среды определяются в деформированной конфигурации в момент времени $t + \Delta t$, которая сама обычно является неизвестной, тогда как, например, начальная конфигурация входит в состав исходных данных. По-

этому вводятся вспомогательные величины, определенные относительно известной отсчетной конфигурации. Так, для характеристики напряженного состояния здесь может использоваться второй тензор напряжений Пиолы-Кирхгофа, а для характеристики деформированного состояния – тензор деформации Коши-Грина. Они являются объективными характеристиками, поскольку их значения не зависят от движения тела как жесткого целого.

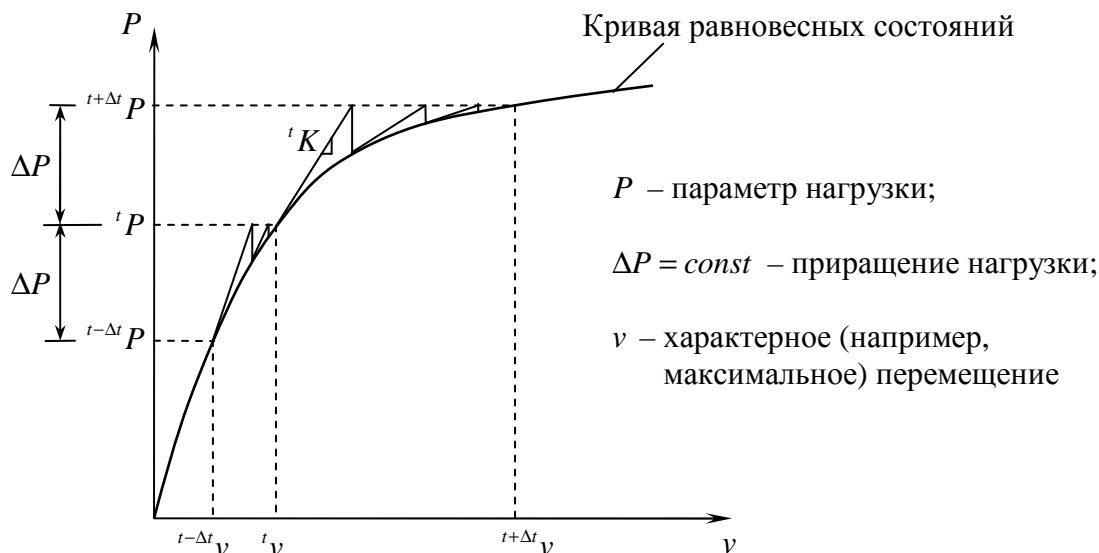


Рисунок 24.1 – Полный метод Ньютона-Рафсона

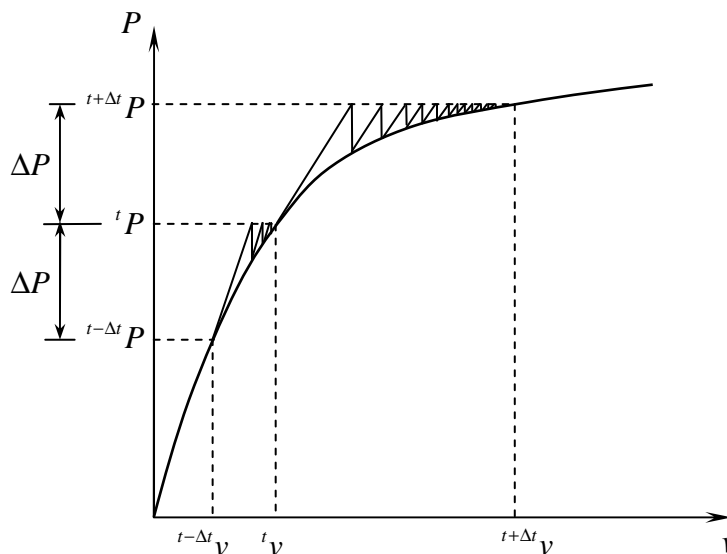


Рисунок 24.2 – Модифицированный метод Ньютона-Рафсона

В принципе в качестве отсчетной конфигурации может использоваться любая из уже определенных конфигураций. Однако на практике выбор лежит преимущественно между двумя формулировками, которые называются общей (total) и модифицированной (updated) формулировками Лагранжа. В первой схеме решения все статические и кинематические переменные относятся к начальной конфигурации, а во второй – к конфигурации в момент времени t . Если начальная конфигурация не имеет преимуществ по сравнению с остальными, то эффективнее использовать модифицированную формулировку, поскольку в этом случае выражения получаются проще. Так, матрица тангенциальной жесткости здесь записывается в виде суммы двух матриц:

$${}^t[K] = {}^t[K_0] + {}^t[K_\sigma], \quad (24.12)$$

где ${}^t[K_0]$ – инкрементальная матрица жесткости; ${}^t[K_\sigma]$ – матрица начальных напряжений (или геометрическая матрица жесткости). При использовании же общей формулировки Лагранжа появляется еще одна квадратная матрица – матрица начальных (или больших) перемещений.

24.2 Задача начальной устойчивости (линеаризованный подход)

Как известно, форма статического равновесия может быть устойчивой (после отклонения система возвращается в исходное состояние), неустойчивой (после отклонения система не возвращается в исходное состояние, а будет уходить от этого состояния) и нейтральной, или безразличной (после отклонения система не возвращается в исходное состояние, но и не удаляется от него).

Очевидно, что при малых внешних нагрузках соотношение между внешними силами и перемещениями мало отличается от линейного и состояние равновесия будет устойчивым. При увеличении внешних нагрузок (особенно это относится к тонкостенным конструкциям) состояние устойчивого равновесия может смениться на состояние неустойчивого равновесия. Нагрузка, при которой начальная форма перестает быть устойчивой, называется критической, а соответствующее состояние – критическим.

Отметим, что на основе линейной теории можно установить лишь устойчивое состояние равновесия, но невозможно определить критические нагрузки. Поэтому здесь нужны нелинейные соотношения.

Выпишем уравнения равновесия системы, идеализированной по МКЭ, в приращениях (формулы (24.6) и (24.12)):

$${}^t[K][\Delta v] = {}^{t+\Delta t}[P] - {}^t[F], \quad (24.13)$$

где

$${}^t[K] = {}^t[K_0] + {}^t[K_\sigma].$$

Можно показать, что критерием устойчивости здесь является положительная определенность матрицы тангенциальной жесткости ${}^t[K]$.

Задача начальной устойчивости решается с помощью статического критерия устойчивости Эйлера и путем линеаризации исходных нелинейных соотношений. Согласно этому критерию критическим называется наименьшее значение нагрузки, при котором кроме начального положения равновесия система может иметь, по крайней мере, еще одно близкое к начальному положение равновесия. Таким образом, задача заключается в отыскании состояния нейтрального равновесия.

Уравнение нейтрального равновесия следует непосредственно из равенства (24.13), если его правую часть приравнять нулю:

$${}^t[K][\Delta v] = 0. \quad (24.14)$$

Эта однородная система уравнений имеет ненулевое решение лишь в том случае, когда определитель ее матрицы коэффициентов равен нулю. Таким образом, в состоянии нейтрального равновесия $\det({}^t[K]) = 0$, т.е. матрица тангенциальной жесткости является сингулярной (вырожденной).

Для линеаризации задачи предположим, что в исходном (докритическом) состоянии перемещения малы, и, следовательно, можно не учитывать изменение конфигурации тела. Таким образом, решение можно найти за один шаг. Здесь необходимо отметить, что матрица начальных напряжений $[K_\sigma]$ не содержит перемещения в явном виде и пропорциональна напряжениям. На первом шаге напряжения определяются из линейного решения и, в свою очередь, пропорциональны внешней нагрузке. Если нагрузку увеличить в λ раз, то можно найти, что существует состояние нейтрального равновесия, т.е. такое, при котором

$$([K_0] + \lambda[K_\sigma])[\Delta v] \equiv 0, \quad (24.15)$$

где $[K_0]$ – обычная матрица жесткости конструкции.

Таким образом, приходим к обобщенной проблеме собственных значений. Решая приведенную выше задачу, можно найти наименьшее собственное значение λ_1 , которое и определяет критическую нагрузку. При этом соответствующий собственный вектор (с точностью до произвольного множителя) будет характеризовать форму потери устойчивости.

Следует отметить, что в МКЭ-пакетах метод начальной устойчивости реализуется с помощью режима Buckling. При этом определение критической нагрузки здесь осуществляется в два этапа по следующей схеме. Сначала по заданной внешней нагрузке $[P]$ (обычно единичной) с использованием линейного статического анализа вычисляются напряжения, по которым строится матрица начальных напряжений $[K_\sigma]$. Затем решается проблема собственных значений для определения наименьшего собственного значения λ_1 , которое показывает во сколько раз критическая нагрузка больше заданной, т.е. $[P_{кр}] = \lambda_1 [P]$.

В заключение отметим, что описанный выше подход часто используется там, где он не применим. Задача начальной устойчивости дает физически правильное решение только в тех случаях, когда возможна бифуркация (разветвление) форм равновесия и малы докритические перемещения. Это может быть только в очень ограниченном числе представляющих практический интерес случаев (например, идеально прямой стержень под действием сжимающей силы; пластина при сжатии силами, лежащими в ее срединной плоскости; замкнутая сфера, нагруженная равномерно распределенным внешним давлением, и т.д.). На рисунке 24.3 представлена классическая задача Эйлера – устойчивость консольного стержня при сжатии мертвой (т.е. не меняющей своего направления) силой. Здесь докритические перемещения равны нулю и на кривой равновесных состояний имеется точка бифуркации.

В практических приложениях задачи устойчивости (особенно для оболочечных конструкций, потеря устойчивости которых часто сопровождается скачкообразным увеличением прогибов) следует решать с учетом геометрической, а иногда и физической нелинейностей, т.е. пошаговым методом последовательных нагружений. В этом случае критическая нагрузка находится по расходимости итераций или по смене знака определителя матрицы тангенциальной жесткости.

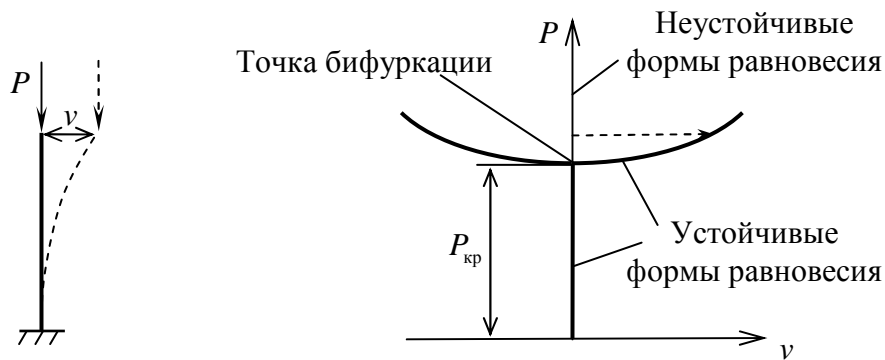


Рисунок 24.3 – Кривая равновесных состояний с точкой бифуркации

24.3 Исследование закритического деформирования. Метод длины дуги

На рисунке 24.4 показано поведение тонкой оболочки (арки) при различных значениях отношения H/L . В последнем случае (когда H/L – велико) критическая нагрузка $P_{кр}^0$, найденная на базе линеаризованного подхода, обычно оказывается в несколько раз больше верхней критической нагрузки $P_{кр}^в$, определяемой из нелинейного анализа. Для нахождения нижней критической нагрузки $P_{кр}^н$ необходимо исследовать закритическое поведение. Здесь возникает ряд вычислительных проблем, связанных с сингулярностью матрицы тангенциальной жесткости в предельных точках.

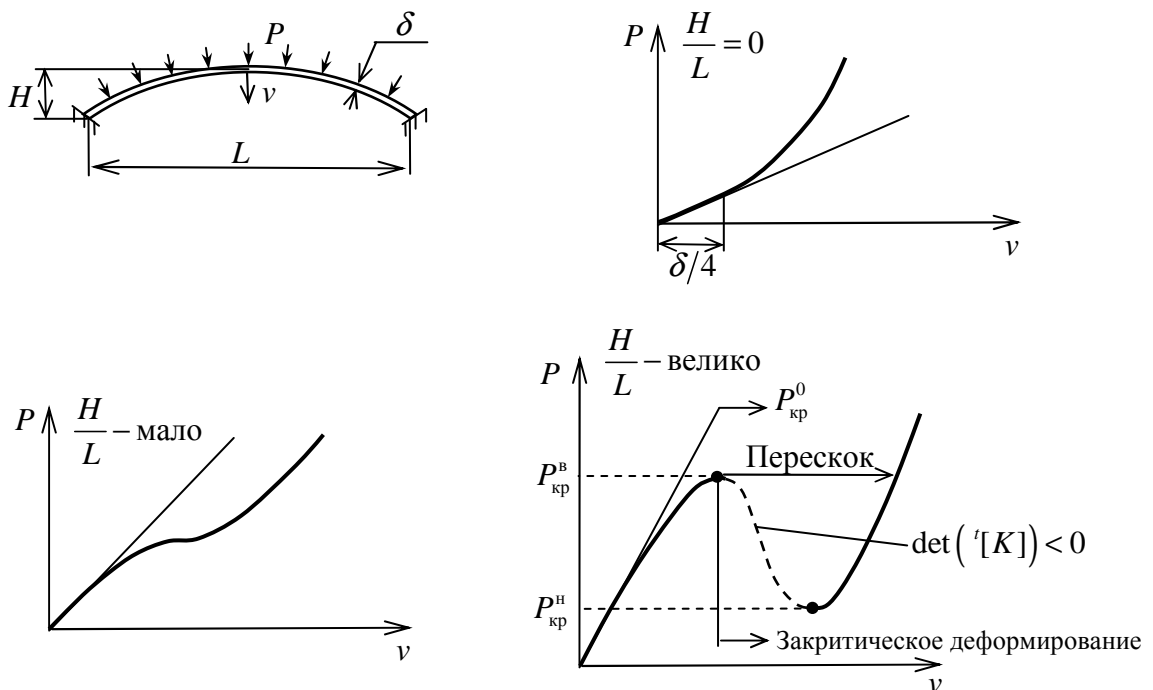


Рисунок 24.4 – Различные виды деформирования тонкой оболочки (арки)

Для перехода через предельные точки необходимо воспользоваться специальными приемами. Рассмотрим типичную для оболочек кривую равновесных состояний (рисунок 24.5). Как правило, она является не однозначной по нагрузке и однозначной по перемещению, т.е. одной и той же нагрузке может соответствовать несколько равновесных конфигураций, а одному и тому же перемещению – только одно состояние равновесия. Это обстоятельство указывает на необходимость в таких ситуациях смены управляющего параметра, когда вместо приращений нагрузки задаются приращения перемещений и вычисляются соответствующие реакции, характеризующие внешнюю нагрузку. Однако такой подход применим лишь в случае действия сосредоточенной нагрузки. Кроме того, он не позволяет определять участки кривой равновесных состояний, не однозначные по перемещению, где одновременно происходит уменьшение нагрузки и перемещения (рисунок 24.6).

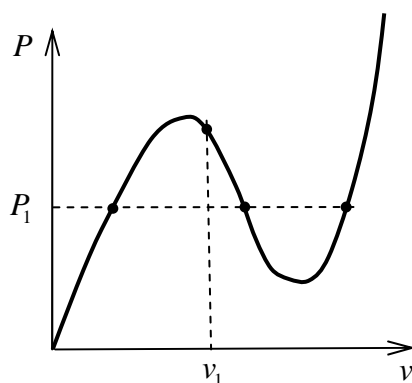
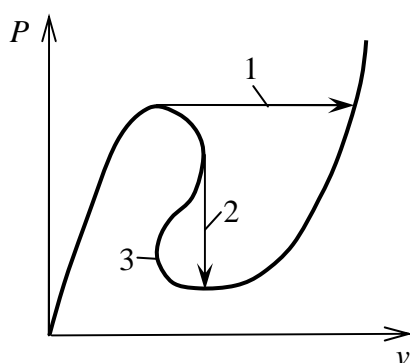


Рисунок 24.5 – Типичная для оболочек кривая равновесных состояний



- 1 – задание приращений нагрузки;
- 2 – задание приращений перемещений;
- 3 – метод длины дуги

Рисунок 24.6 – Кривая равновесных состояний, не однозначная по перемещению

Отметим, что одним из универсальных приемов перехода через предельные точки является метод длины дуги (arc-length method), который в настоящее время чаще других используется в МКЭ-пакетах для исследования закритического деформирования тонкостенных конструкций. Он является, по сути дела, методом автоматического выбора шага по нагрузке на основе перемещений. Здесь в процессе выполнения итераций нагрузка и перемещение изменяются одновременно. В данном методе вводятся дополнительные уравнения связей, чтобы ограничить длину дуги кривой равновесных состояний (в пространстве нагрузка – перемещение) некоторым предписанным значением, как показано на рисунке 24.7. На первом шаге длина дуги определяется исходя из полной нагрузки и заданного числа шагов. На каждом последующем шаге новая длина дуги вычисляется на основе длины дуги предыдущего шага и поведения решения (т.е. в зависимости от степени нелинейности).

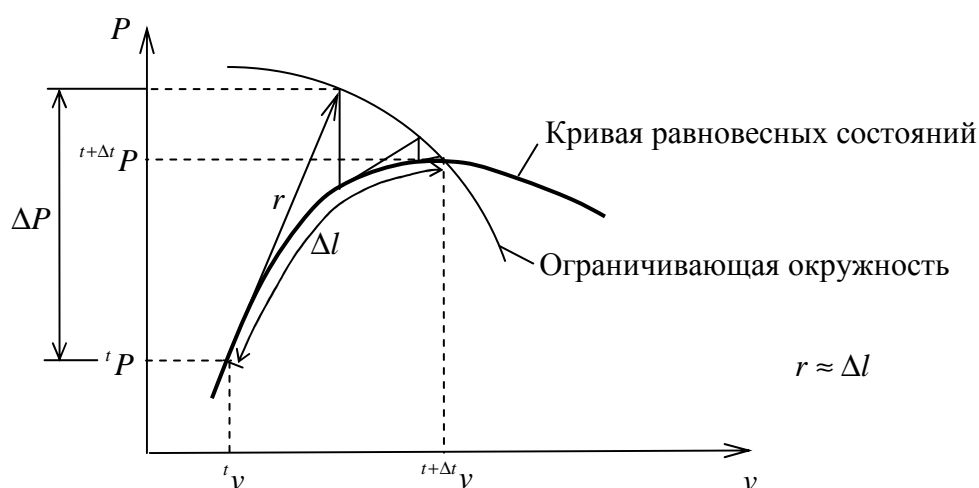


Рисунок 24.7 – Геометрическая интерпретация метода длины дуги

Вопросы по теме 24

- 1) Какие допущения используются в линейном анализе конструкций?
 1. Перемещения малы по сравнению с размерами тела.
 2. Материал является линейно-упругим.
 3. Граничные условия сохраняются неизменными в процессе приложения нагрузки.
 4. Нагрузка не меняется во времени.
 5. Отсутствуют силы инерции.
 6. Демпфирующие силы полагаются равными нулю.

- 2) В каком случае необходимо учитывать геометрическую нелинейность?
 1. Когда перемещения являются большими.
 2. Если связь между напряжениями и деформациями нелинейная.
 3. Если в процессе нагружения меняются граничные условия.
 4. При изменении нагрузки во времени.
 5. Когда возникают силы инерции.
 6. Если имеются демпфирующие силы.

- 3) В каком случае необходимо учитывать физическую нелинейность?
 1. Когда перемещения являются большими.
 2. Если связь между напряжениями и деформациями нелинейная.
 3. Если в процессе нагружения меняются граничные условия.
 4. При изменении нагрузки во времени.
 5. Когда возникают силы инерции.
 6. Если имеются демпфирующие силы.

- 4) В каком случае необходимо решать контактную задачу?
 1. Когда перемещения являются большими.
 2. Если связь между напряжениями и деформациями нелинейная.
 3. Если в процессе нагружения меняются граничные условия.
 4. При изменении нагрузки во времени.
 5. Когда возникают силы инерции.
 6. Если имеются демпфирующие силы.

- 5) При каких прогибах пластин и оболочек справедливо линейное решение?
 1. Меньше двух толщин.
 2. Меньше толщины.
 3. Меньше половины толщины.
 4. Меньше трети толщины.
 5. Меньше четверти толщины.

6) Какой метод необходим для анализа нелинейного поведения неконсервативных систем?

1. Пошаговый метод последовательных нагружений.
2. Итерационный метод.
3. Метод длины дуги.
4. Метод линейного поиска.
5. Метод бисекции.

7) Каково назначение метода Ньютона-Рафсона?

1. Решение системы нелинейных уравнений.
2. Решение системы линейных алгебраических уравнений.
3. Пошаговое решение уравнений равновесия МКЭ.
4. Решение задачи начальной устойчивости.

8) В каком представлении могут быть записаны нелинейные соотношения?

1. Лагранжевом.
2. Эйлеровом.
3. Декартовом.
4. Ньютоновском.

9) В чем суть лагранжевой (материальной) формулировки?

1. Внимание фокусируется на движении фиксированных частиц.
2. Наблюдается протекание во времени процесса в данном месте.
3. В качестве отсчетной выбирается начальная конфигурация тела.
4. В качестве отсчетной выбирается конфигурация тела, найденная на предыдущем шаге.

10) В чем суть эйлеровой (пространственной) формулировки?

1. Внимание фокусируется на движении фиксированных частиц.
2. Наблюдается протекание во времени процесса в данном месте.
3. В качестве отсчетной выбирается начальная конфигурация тела.
4. В качестве отсчетной выбирается конфигурация тела, найденная на предыдущем шаге.

11) Какая формулировка является наиболее эффективной при решении задач механики деформируемого твердого тела?

1. Лагранжа.
2. Эйлера.
3. Декарта.

4. Ньютона.
5. Якоби.

12) Какая формулировка является наиболее эффективной при решении задач механики жидкости и газа?

1. Лагранжа.
2. Эйлера.
3. Декарта.
4. Ньютона.
5. Якоби.

13) Что называется критической нагрузкой по Эйлеру?

1. Нагрузка, при которой исходная форма равновесия перестает быть устойчивой.
2. Нагрузка, вызывающая появление пластического шарнира.
3. Нагрузка, при которой конструкция теряет несущую способность.
4. Нагрузка, приводящая к разрушению конструкции.
5. Нагрузка, при которой исчезают какие-либо формы статического равновесия.

14) Как решается задача начальной устойчивости?

1. С помощью статического критерия Эйлера.
2. Путем линеаризации исходных нелинейных соотношений.
3. С использованием соотношений линейной теории.
4. С помощью динамического критерия.
5. Пошаговым методом последовательных нагружений.

15) В чем заключается задача начальной устойчивости?

1. В отыскании состояния нейтрального равновесия.
2. В отыскании состояния устойчивого равновесия.
3. В отыскании состояния неустойчивого равновесия.
4. В отыскании состояния движения или колебания с монотонно возрастающей или ограниченной амплитудой.

16) К чему сводится задача начальной устойчивости?

1. К решению обобщенной проблемы собственных значений.
2. К решению системы линейных алгебраических уравнений.
3. К решению системы нелинейных уравнений.
4. К решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

17) Что показывает наименьшее собственное значение, найденное при решении задачи начальной устойчивости?

1. Во сколько раз критическая нагрузка больше заданной.
2. Во сколько раз критическая нагрузка меньше заданной.
3. Критическую нагрузку.
4. Форму потери устойчивости.
5. Частоту собственных колебаний.

18) В каком случае задача начальной устойчивости дает физически правильное решение?

1. Когда возможна бифуркация и малы докритические перемещения.
2. Для консервативных систем.
3. Для неконсервативных систем.
4. Если нагрузка не меняет своего направления.
5. При общей форме потери устойчивости.
6. При местной форме потери устойчивости.

19) Что такое бифуркация?

1. Разветвление форм равновесия.
2. Потеря устойчивости с перескоком.
3. Критическая нагрузка.
4. Предельная точка на кривой равновесных состояний.
5. Неоднозначность кривой равновесных состояний.

20) Как определяется верхняя критическая нагрузка?

1. Из геометрически нелинейного анализа.
2. Из физически нелинейного анализа.
3. Путем исследования закритического деформирования.
4. Методом начальной устойчивости.
5. Из анализа переходного процесса.

21) Как определяется нижняя критическая нагрузка?

1. Из геометрически нелинейного анализа.
2. Из физически нелинейного анализа.
3. Путем исследования закритического деформирования.
4. Методом начальной устойчивости.
5. Из анализа переходного процесса.

22) Какие специальные приемы используются для перехода через предельные точки?

1. Смена управляющего параметра.
2. Метод длины дуги.
3. Метод Ньютона-Рафсона.
4. Метод линейного поиска.
5. Пошаговый метод последовательных нагружений.

23) Что такое закритическое деформирование?

1. Поведение системы после потери устойчивости.
2. Форма потери устойчивости.
3. Потеря несущей способности.
4. Движение с монотонно возрастающей амплитудой.
5. Колебания с ограниченной амплитудой.

24) Какой из перечисленных ниже методов является универсальным для исследования закритического деформирования?

1. Смена управляющего параметра.
2. Метод длины дуги.
3. Метод Ньютона-Рафсона.
4. Метод линейного поиска.
5. Пошаговый метод последовательных нагружений.

25 ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА В СРЕДЕ MSC.PATRAN-NASTRAN

25.1 Задание параметров нелинейного анализа

Следует отметить, что для выполнения нелинейного статического анализа необходимо в приложении «Analysis» в качестве типа решения (кнопка *Solution Type*) выбрать пункт *Nonlinear Static*.

В МКЭ-пакетах решение нелинейных задач, как правило, проводится шагово-итерационным методом последовательных нагружений. В программе MSC.Patran стратегия итерационного решения определяется параметрами расчетного случая. Для их задания следует воспользоваться кнопкой *Subcase Parameters* диалоговой панели «Subcases». При этом появляется дополнительное окно, показанное на рисунке 25.1.

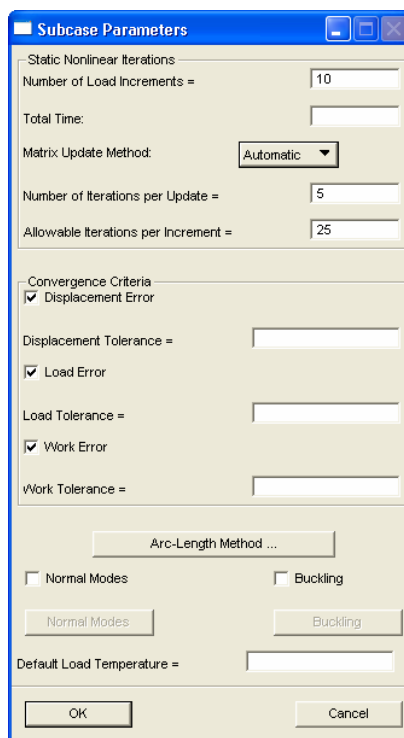


Рисунок 25.1 – Задание параметров расчетного случая для нелинейного статического анализа

Здесь в разделе «Static Nonlinear Iterations» (итерации нелинейного статического анализа) имеются следующие поля ввода:

- *Number of Load Increments* – число шагов по нагрузке, или ступеней нагружения, которое должно использоваться для приложения полной нагрузки (можно задать максимум 999 шагов);

- Total Time – общее время приложения полной нагрузки (по умолчанию равно единице);

- Matrix Update Method – метод, в соответствии с которым производится обновление (пересчет) матрицы тангенциальной жесткости (МТЖ). Здесь из выпадающего меню доступны следующие значения: Automatic – автоматический метод обновления МТЖ, основанный на оценке сходимости решения при использовании различных численных методов (квазиньютоновского, линейного поиска, половинного деления) и выборе наилучшего из них с наименьшим числом обновлений МТЖ (задается по умолчанию); Semi-Automatic – полуавтоматический метод, отличающийся от предыдущего лишь тем, что в нем обязательно производится обновление МТЖ на первой итерации каждого шага по нагрузке; Controlled Iters. – производит обновление МТЖ после числа итераций, указанного в следующем поле. Последний метод может оказаться полезным в ряде задач с резким изменением расчетных параметров системы;

- Number of Iterations per Update – число итераций, после которого должно выполняться обновление МТЖ при использовании метода Controlled Iters. (по умолчанию принимается равным пяти). Если данный параметр положить равным единице, то МТЖ будет пересчитываться на каждой итерации, что соответствует классическому (т.е. полному) методу Ньютона-Рафсона. Для перехода к модифицированному методу Ньютона-Рафсона эту величину следует положить равной максимально допустимому числу итераций на шаге, указанному в следующем поле;

- Allowable Iterations per Increment – максимально допустимое число итераций на каждом шаге по нагрузке (по умолчанию принимается равным 25). Если решение не сходится за указанное здесь число итераций, то приращение нагрузки делится пополам и анализ повторяется. При достижении максимального числа бисекций (по умолчанию равного пяти) в зависимости от погрешности решения анализ переходит к следующему шагу или прекращается.

Следует отметить, что на каждом шаге нагружения выполняется итерационное уточнение решения до обеспечения условий сходимости, задаваемых в разделе «Convergence Criteria» (критерии сходимости):

- Displacement Error – флаг, указывающий, должен ли использоваться критерий сходимости по перемещениям;

- Displacement Tolerance – допустимая величина погрешности для приращений узловых перемещений (по умолчанию принимается равной 10^{-3}). Это поле становится активным лишь при включении предыдущей опции;

- Load Error – флаг, указывающий, должен ли использоваться критерий сходимости по нагрузке;

- Load Tolerance – допустимая величина погрешности для «невязки» нагрузки (по умолчанию принимается равной 10^{-3}). Это поле становится активным лишь при включении предыдущей опции;

- Work Error – флаг, указывающий, должен ли использоваться критерий сходимости по работе;

- Work Tolerance – допустимая величина погрешности для работы «невязки» нагрузки на приращениях узловых перемещений (по умолчанию принимается равной 10^{-7}). Это поле становится активным лишь при включении предыдущей опции.

Отметим, что итерационный процесс завершается только при удовлетворении всех активизированных в данном разделе критериев сходимости.

Известно, что сходимость решения нелинейных уравнений МКЭ во многом определяется особенностями модели и внутренними ограничениями, присущими применяемым численным методам. Дать универсальные рекомендации по настройке параметров, определяющих стратегию итерационного решения, в общем случае затруднительно. Варьирование данных параметров имеет смысл, если возникают проблемы с решением конкретной задачи.

Кроме перечисленных выше параметров диалоговая панель «Subcase Parameters» содержит следующие элементы управления (см. рисунок 25.1):

- Arc-Length Method – кнопка, открывающая дополнительное окно для активизации метода длины дуги, который по умолчанию отключен. Данный метод используется для исследования закритического деформирования конструкции;

- Normal Modes – флаг, активизирующий расчет частот и форм собственных колебаний конструкции с учетом напряжений, найденных в конце данного расчетного случая. С помощью одноименной кнопки здесь можно указать число подлежащих определению наименьших частот и соответствующих им мод;

- Buckling – флаг, активизирующий анализ устойчивости конструкции в конце данного расчетного случая. С помощью одноименной кнопки здесь можно указать число подлежащих определению собственных значений.

Следует отметить, что в программе MSC.Patran при нелинейном анализе величины нагрузок задаются в виде зависимости $[P]t$ от некоторой переменной t , называемой Time (время) и изменяющейся по умолчанию при статическом расчете от 0 до 1. Здесь $[P]$ – совокупность нагрузок, определенная в наборе Load Case (случай нагружения), используемом для данного нелинейного расчета. С целью повышения точности решения и улучшения его сходимости интервал изменения переменной t (процесс нагружения) делится на ступени (или шаги) нагружения. Число таких шагов задается в поле «Number of Load Increments» параметром NINC. Так, при числе шагов нагружения равном 20, переменная t последовательно принимает значения 0,05; 0,1; 0,15;...; 1. В этом случае при включении опции вывода промежуточных решений в результатах расчета будут представлены 20 наборов выходных величин (Result Cases) с указанием текущего значения нагрузки соответствующей ступени нагружения в процентах от полной нагрузки $[P]$: 5%; 10%; 15% и т.д. Число таких наборов может оказаться меньше, чем задано параметром NINC, если на какой-то ступени нагружения решение не будет найдено. При этом по окончании счета появится сообщение о фатальной ошибке (Fatal Error), и будут представлены результаты для всех предыдущих шагов нагружения. Если же при некотором значении t наблюдается резкое изменение расчетных величин, решатель MSC.Nastran производит автоматическое деление данного шага на более мелкие. В этом случае число наборов выходных величин будет больше, чем установлено параметром NINC.

В заключение отметим, что для вывода промежуточных решений необходимо воспользоваться кнопкой *Output Requests* (запросы по выводу) диалоговой панели «Subcases». При этом появляется дополнительное окно, позволяющее выбирать выходные величины. Здесь, прежде всего, следует задать расширенный вид окна («Form Type»: Advanced), что позволит отобразить поле «Intermediate Output Option» (опция промежуточного вывода). Для этого параметра доступны следующие значения:

Но – не выводить результаты расчетов на промежуточных шагах нагружения (задается по умолчанию). Здесь будут представлены результаты лишь для последнего шага, т.е. в общем случае для полной нагрузки;

Yes – выводить результаты для каждого вычисленного шага нагружения;

All – выводить результаты для каждого вычисленного и определенного пользователем шага нагружения. Данная опция позволяет пользователю при использовании метода длины дуги получать решения для интересующих его уровней нагрузки, поскольку в этом случае вычисленные шаги могут отличаться от заданных пользователем.

25.2 Использование метода длины дуги

Как отмечалось ранее, метод длины дуги предназначен для исследования закритического деформирования конструкции. Он является, по сути дела, методом автоматического выбора шага по нагрузке на основе перемещений. Здесь в процессе выполнения итераций нагрузка и перемещения изменяются одновременно. В данном методе вводятся дополнительные уравнения связей, чтобы ограничить длину дуги кривой равновесных состояний (в пространстве нагрузка–перемещение) некоторым предписанным значением.

Для активизации метода длины дуги следует нажать кнопку *Arc-Length Method* диалоговой панели «Subcase Parameters» (см. рисунок 25.1) и установить флаг «Use Arc-Length Method» (использовать метод длины дуги), как показано на рисунке 25.2.

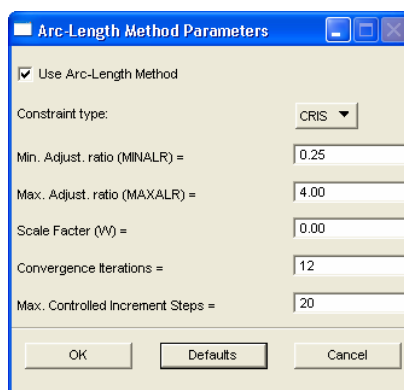


Рисунок 25.2 – Активизация метода длины дуги

Здесь же можно задать следующие параметры:

- Constraint Type – тип уравнений связей. При этом из выпадающего меню доступны следующие значения: CRIS – метод Крисфилда (задается по умолчанию); RIKS – метод Рикса; MRIKS – модифицированный метод Рикса;

- Min. Adjust. ratio (MINALR) – минимально допустимое отношение для регулировки длины дуги между шагами ($0.0 < \text{MINALR} \leq 1.0$; по умолчанию полагается равным 0.25);

- Max. Adjust. ratio (MAXALR) – максимально допустимое отношение для регулировки длины дуги между шагами ($\text{MAXALR} \geq 1.0$; по умолчанию полагается равным 4.0);

- Scalar Factor (W) – коэффициент масштабирования для управления вкладом нагрузки в ограничение длины дуги: $W = 0.0$ – управление на основе перемещений (задается по умолчанию); $W > 0.0$ – комбинированное управление на основе нагрузки и перемещений; $W \rightarrow \infty$ – управление на основе нагрузки (обычный метод Ньютона-Рафсона);

- Convergence Iterations (DESITER) – желаемое число итераций для достижения сходимости, используемое для регулировки длины дуги ($\text{DESITER} > 0$; по умолчанию принимается равным 12);

- Max. Controlled Increment Steps (MXINC) – максимальное число шагов приращений, допускаемое в пределах данного расчетного случая ($\text{MXINC} > 0$; по умолчанию принимается равным 20).

Отметим, что параметры MINALR и MAXALR используются для задания пределов изменения длины дуги от одного шага к другому:

$$\text{MINALR} \leq \frac{\Delta l_{\text{new}}}{\Delta l_{\text{old}}} \leq \text{MAXALR},$$

где Δl_{old} и Δl_{new} – старая и новая длины дуги.

Регулировка длины дуги основывается на скорости сходимости (т.е. числе итераций, требуемом для сходимости) и степени изменения матрицы тангенциальной жесткости. Длина дуги в течение анализа будет оставаться неизменной, если принять $\text{MINALR} = \text{MAXALR} = 1$. В том случае, когда длина дуги может меняться от шага к шагу, используется следующая формула:

$$\Delta l_{\text{new}} = \sqrt{\frac{\text{DESITER}}{I_{\text{max}}}} \Delta l_{\text{old}},$$

где I_{max} – число итераций, которое потребовалось для сходимости на предыдущем шаге.

Параметр MXINC полезен для ограничения числа шагов в случае, когда решение не может достигнуть заданной нагрузки (например, при анализе разрушения конструкции).

Вопросы по теме 25

1) Какой метод используется в программе MSC.Nastran для решения нелинейных статических задач?

1. Шагово-итерационный метод последовательных нагружений.
2. Прямой фронтальный метод.
3. Метод разреженных матриц.
4. Метод сопряженных градиентов.

2) Какой итерационный метод используется в программе MSC.Nastran для уточнения решения на каждом шаге по нагрузке?

1. Метод Ньютона-Рафсона.
2. Метод Эйлера.
3. Метод секущих.
4. Метод Якоби.
5. Метод бисекций.

3) В какой диалоговой панели задаются параметры, определяющие стратегию итерационного решения?

1. Subcase Parameters.
2. Solution Parameters.
3. Translation Parameters.
4. Output Requests.
5. Solution Type.

4) В каком поле задается число ступеней нагружения?

1. Number of Load Increments.
2. Number of Load Steps.
3. Number of Iterations per Update.
4. Allowable Iterations per Increment.
5. Max. Controlled Increment Steps.

5) При выборе какого метода обязательно производится обновление МТЖ на первой итерации каждого шага по нагрузке?

1. Automatic.
2. Semi-Automatic.
3. Controlled Iters.
4. Manual.

6) Какой метод пересчета МТЖ выбирается программой MSC.Patran по умолчанию?

1. Automatic.

2. Semi-Automatic.
3. Controlled Iters.
4. Manual.

7) При выборе какого метода пересчет МТЖ производится после указанного пользователем числа итераций?

1. Automatic.
2. Semi-Automatic.
3. Controlled Iters.
4. Manual.

8) После выполнения какого числа итераций по умолчанию производится пересчет МТЖ при выборе метода Controlled Iters.?

1. 1.
2. 2.
3. 3.
4. 5.
5. 10.
6. 25.

9) Чему по умолчанию равно максимально допустимое число итераций на каждом шаге по нагрузке?

1. 10.
2. 15.
3. 20.
4. 25.
5. 30.
6. 50.
7. 100.

10) Что происходит, если решение не сходится после достижения максимально допустимого числа итераций?

1. Приращение нагрузки уменьшается в два раза.
2. Анализ прекращается.
3. Выполняется переход к следующему шагу.
4. Выполняется переход к предыдущему шагу.
5. Активизируется метод длины дуги.

11) В каких случаях прекращается итерационное уточнение решения?

1. При достижении максимально допустимого числа итераций.
2. При удовлетворении всех критериев сходимости.
3. При достижении заданной нагрузки.
4. При расхождении итераций.

12) Какие критерии сходимости используются в программе MSC.Nastran?

1. По перемещениям.
2. По нагрузке.
3. По работе.
4. По деформациям.
5. По напряжениям.
6. По удельной энергии.

13) Что активизирует установка флага «Normal Modes» в диалоговой панели «Subcase Parameters»?

1. Расчет частот и форм собственных колебаний с учетом найденных напряжений.
2. Анализ устойчивости в конце данного расчетного случая.
3. Метод длины дуги.
4. Частотный анализ.
5. Переходный динамический анализ.

14) Что активизирует установка флага «Buckling» в диалоговой панели «Subcase Parameters»?

1. Расчет частот и форм собственных колебаний с учетом найденных напряжений.
2. Анализ устойчивости в конце данного расчетного случая.
3. Метод длины дуги.
4. Частотный анализ.
5. Переходный динамический анализ.

15) С какой целью процесс нагружения делится на ступени?

1. Для повышения точности расчета.
2. Для улучшения сходимости решения.
3. Для перехода через предельные точки.
4. Для анализа закритического деформирования.
5. Для возможности определения критической нагрузки.

16) В какой диалоговой панели можно включить опцию вывода промежуточных решений?

1. Subcase Parameters.
2. Solution Parameters.
3. Translation Parameters.
4. Output Requests.
5. Solution Type.

17) В каких случаях количество вычисленных шагов будет отличаться от числа заданных?

1. При использовании метода длины дуги.
2. Когда происходит резкое изменение расчетных величин и производится деление шага на более мелкие.
3. Когда на какой-то ступени нагружения решение расходится.
4. При использовании метода Ньютона-Рафсона.
5. В случае хорошей сходимости решения.

18) Для чего используется метод длины дуги?

1. Для исследования закритического деформирования конструкции.
2. Для улучшения сходимости.
3. Для возможности учета геометрической нелинейности.
4. Для решения физически нелинейных задач.

19) Во сколько раз по умолчанию может максимально уменьшиться длина дуги в случае плохой сходимости?

1. В два раза.
2. В три раза.
3. В четыре раза.
4. В пять раз.
5. В шесть раз.
6. В десять раз.

20) Во сколько раз по умолчанию может максимально увеличиться длина дуги в случае хорошей сходимости?

1. В два раза.
2. В три раза.
3. В четыре раза.
4. В пять раз.
5. В шесть раз.
6. В десять раз.

21) Что необходимо задать для использования метода постоянной длины дуги?

1. $MINALR = 1$.
2. $MAXALR = 1$.
3. $DESITER = 1$.
4. $MXINC = 1$.
5. $Constraint Type = RIKS$.

22) Для чего используется параметр MXINC?

1. Для ограничения числа шагов, когда решение не может достигнуть заданной нагрузки.
2. Для регулировки длины дуги.
3. Для задания пределов изменения длины дуги.
4. Для управления вкладом нагрузки в ограничение длины дуги.

26 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

«Расчет устойчивости оболочки в виде усеченного конуса под действием внешнего давления»

Исходные данные: коническая оболочка толщиной 2 см нагружена внешним давлением p и имеет следующие размеры: $L=1$ м; $R_1=1$ м; $R_2=0,5$ м; $\alpha=60^\circ$ (рисунок 26.1). Свойства материала: модуль упругости $1 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3. Оболочка жестко защемлена по контуру меньшего основания и шарнирно оперта по контуру большего основания.

Допущение: поскольку докритические перемещения малы и возможна бифуркация форм равновесия, можно ограничиться решением задачи начальной устойчивости.

Цель: определить критическое давление и форму потери устойчивости.

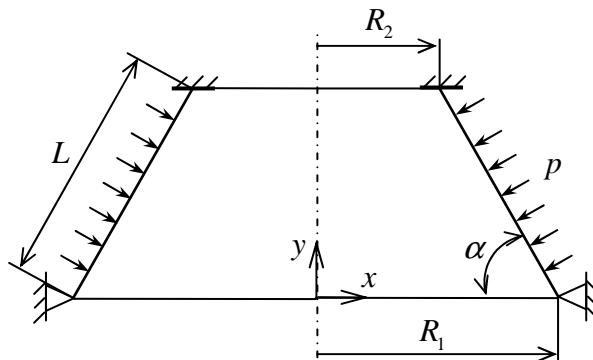


Рисунок 26.1 – Геометрия оболочки

Рассматриваемая конструкция и нагрузка симметричны относительно оси оболочки. Однако при потере устойчивости могут появиться неосесимметричные формы, поэтому здесь следует моделировать коническую оболочку полностью. Начало системы координат поместим в центр нижнего основания, как показано на рисунке 26.1.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных: *File>New*.
В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab11.db, ОК.
2. Задать начальные установки.

В разделе «Tolerance» диалоговой панели «New Model Preference» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 2000 (в мм), *OK*.

3. Построить прямую линию – образующую конической оболочки.
Запускаем приложение «Geometry» и устанавливаем сочетание Create/ Curve/XYZ.

Вводим:

«Refer. Coordinate Frame»: Coord 0 (базовая система координат)

«Vector Coordinates List»: <-500 866 0> (компоненты вектора)

«Origin Coordinate List»: [1000 0 0] (координаты начала вектора)

Apply.

4. Построить коническую поверхность путем вращения образующей относительно центральной оси.

Устанавливаем сочетание Create/Surface/Revolve.

Вводим:

«Axis»: Coord 0.2 (ось вращения – ось Y)

«Total Angle»: 360 (полный угол, град)

«Offset Angle»: 0 (отступ угла, град).

Активизируем поле «Curve List» и в графическом окне указываем кривую 1.

Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*.

С помощью кнопок *Iso 1 View* и *Smooth Shaded* панели инструментов устанавливаем изометрическую проекцию и изображение модели с закрашенными гранями и тенями.

5. Проверить направление нормали к поверхности.

Для отображения нормали устанавливаем сочетание Show/Surface/Normal.

Для поля «Surface List» указываем поверхность 1, *Apply*.

Если нормаль к построенной нами поверхности направлена вовнутрь, то следует изменить ее направление с помощью сочетания Edit/Surface/Reverse.

6. Выполнить разбивку геометрической модели на конечные элементы.

Запускаем приложение «Elements» и для нанесения сетки на поверхность устанавливаем сочетание Create/Mesh/Surface.

Выбираем:

«Elem Shape»: Quad (четырёхугольная форма)

«Mesher»: IsoMesh (алгоритм построения регулярных изосеток)

«Topology»: Quad4 (топология – четырехугольник с четырьмя узлами).
Активизируем поле «Surface List» и в графическом окне указываем поверхность 1.

В разделе «Global Edge Length» отключаем опцию автоматического вычисления глобальной длины стороны элемента и в поле «Value» вводим значение 50 (в мм).

Нажимаем *Apply*.

7. Сшить конечно-элементную модель.

Устанавливаем сочетание Equivalence/All/Tolerance Cube.

Ничего не меняя, нажимаем *Apply*. При этом места сшивки модели обводятся кружочками.

8. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «Materials» и выбираем сочетание Create/Isotropic/Manual Input.

В поле «Material Name» вводим имя материала, например mater.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* и вводим свойства:

«Elastic Modulus» = $1e5$ (модуль упругости, МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.


Нажимаем кнопку *Apply*.

9. Определить свойства элементов.

Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств оболочечных элементов устанавливаем сочетание Create/2D/Shell.

В поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например cone.

Не меняя установленные по умолчанию опции, нажимаем кнопку *Input Properties*.

Нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем mater.

В поле «Thickness» вводим значение толщины: 20 (в мм).

Закрываем окно кнопкой *OK*.

Нажимаем кнопку *Select Application Region* и указываем поверхность 1.

Затем последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.


10. Задать граничные условия.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений выбираем сочетание Create/Displacement/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например bottom.

Нажимаем кнопку *Input Data* и для моделирования шарнирного опирания фиксируем только поступательные перемещения, т.е. в поле «Translations» вводим $\langle 0,0,0 \rangle$, *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кривая или кромка) и указываем контур большего основания (Surface 1.4).

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

Затем в поле «New Set Name» вводим другое имя, например top.

Нажимаем кнопку *Input Data* и для моделирования жесткого защемления фиксируем как поступательные перемещения, так и углы поворота, т.е. в полях «Translations» и «Rotations» вводим $\langle 0,0,0 \rangle$, *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities» и указываем контур меньшего основания (Surface 1.2).

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

11. Приложить нагрузку.

Поскольку значение внешнего давления нам заранее неизвестно, зададим единичную нагрузку $p = 1$ МПа.


В том же приложении выбираем сочетание Create/Pressure/Element Uniform.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например load.

В качестве типа целевых элементов выбираем поверхностные, т.е. «Target Element Type»: 2D.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Top Surf Pressure» (давление на верхней поверхности) вводим значение 1 (в МПа). *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Surfaces or Edges», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (поверхность или грань) и указываем поверхности 1.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

Стрелки давления должны быть направлены вовнутрь.

Отметим, что нагрузку и граничные условия можно показать и на конечно-элементной модели.

Для этого следует в полосе меню выбрать команду *Display>Load/BC/Elem. Props* и установить флаг «Show on FEM only» (показывать только на конечно-элементной модели), причем флаг «Show LBC/EI. Prop. Values» (показывать значения нагрузок, граничных условий и свойств элементов) лучше снять, *Apply* и *Cancel*.

Затем для отображения значков необходимо в приложении «Loads/BCs» в качестве действия выбрать *Plot Markers* и в списке «Assigned Load/BC Sets» (заданные наборы нагрузок и граничных условий) указать соответствующий набор (или наборы), *Apply*.

12. Выполнить анализ начальной устойчивости.

Запускаем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание *Analyze/Entire Model/Full Run*.

Для изменения типа решения нажимаем кнопку *Solution Type* и выбираем *Buckling* (анализ начальной устойчивости), *OK*.

Для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

13. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab11.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

14. Определить критическую нагрузку.

Запускаем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание *Create/Quick Plot*.

Напомним, что задача начальной устойчивости решается в два этапа. Сначала проводится линейный статический анализ, а затем решается проблема собственных значений.

Поэтому в списке «Select Result Cases» будут представлены два случая результатов *Static* и *Mode 1*, соответствующие двум указанным выше этапам.

На втором этапе определяется наименьшее собственное значение λ_1 , показывающее во сколько раз критическая нагрузка больше приложенной.

Собственное значение приводится после названия случая результатов:

$$\text{Factor} = 8.8385.$$


Таким образом, для рассматриваемой задачи $\lambda_1 = 8,84$ и, следовательно,

$$p_{\text{кр}} = \lambda_1 p = 8,84 \text{ МПа.}$$

15. Отобразить на экране дисплея форму потери устойчивости.

В списке «Select Result Cases» указываем второй случай результатов.

В списке «Select Deformation Result» в качестве результата для изображения деформированного состояния модели указываем строку Eigenvectors, Translational (собственный вектор – поступательные перемещения, характеризующие форму потери устойчивости).

С помощью кнопки-пиктограммы  устанавливает вид для настройки изображения деформированного состояния модели.

Отключаем опцию «Show Undeformed» (показать недеформированное состояние).

Нажимаем *Apply*.

Здесь полезно предварительно убрать с экрана изображение геометрических объектов.

Форма потери устойчивости рассматриваемой конструкции представлена на рисунке 26.2.

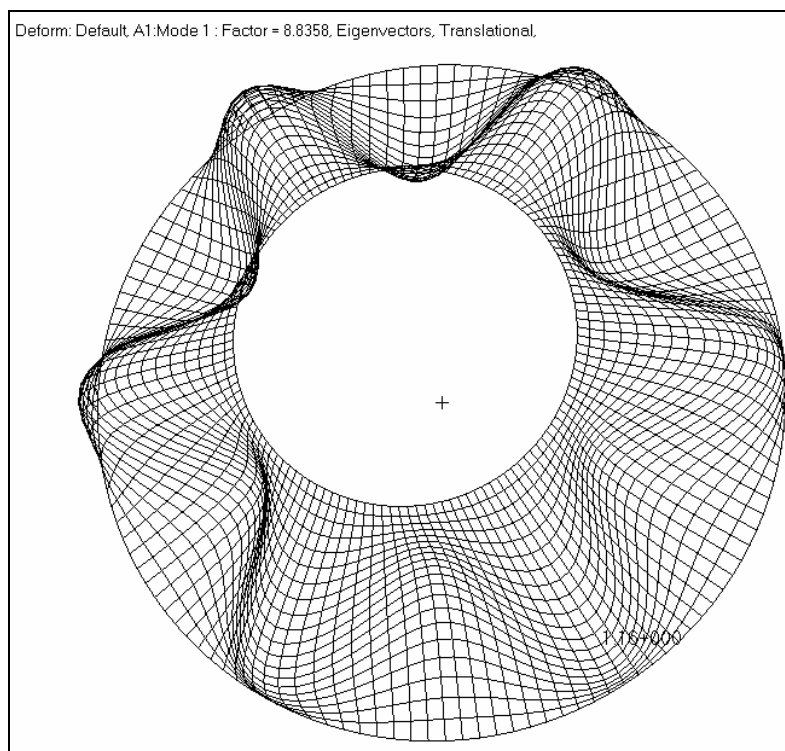


Рисунок 26.2 – Форма потери устойчивости

Видно, что при потере устойчивости в окружном направлении образуется шесть волн, а в меридиональном – лишь одна полуволна.

Следует отметить, что собственный вектор, характеризующий эту форму, определяется с точностью до постоянного множителя, и поэтому абсолютные значения перемещений и их знак здесь не имеют физического смысла.

16. Выйти из программы: *File>Quit*.

27 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

«Исследование устойчивости и закритического деформирования цилиндрической панели»

Исходные данные: цилиндрическая панель нагружена сосредоточенной силой P в центре, как показано на рисунке 27.1; оболочка шарнирно оперта вдоль ее прямолинейных кромок и свободна вдоль криволинейных; материал линейно-упругий изотропный (модуль упругости $3,1 \cdot 10^3$ МПа; коэффициент Пуассона 0,3).

Допущение: отношения наименьшей длины стороны панели и радиуса кривизны оболочки к толщине больше 10, что позволяет использовать для ее моделирования оболочечные элементы.

Цель: 1) определить критическую нагрузку методом начальной устойчивости; 2) выполнить анализ с учетом геометрической нелинейности путем задания приращений нагрузки и определить верхнюю критическую нагрузку (сравнить с предыдущим решением); 3) выполнить анализ с учетом геометрической нелинейности путем задания приращений перемещений и определить верхнюю и нижнюю критические нагрузки; 4) исследовать закритическое поведение панели методом длины дуги.

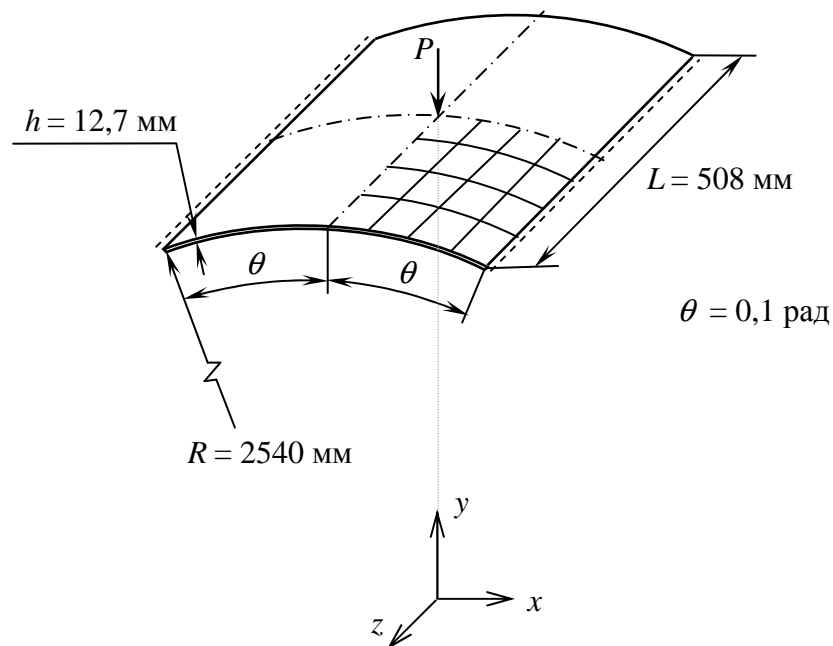


Рисунок 27.1 – Геометрия оболочки

Благодаря двойной симметрии конструкции и нагрузки здесь можно ограничиться рассмотрением лишь четверти панели. При этом вместо силы P нужно будет прикладывать силу $P/4$.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

I. Метод начальной устойчивости.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных: *File>New*.
В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab12.db, *OK*.
2. Задать начальные установки.
В разделе «Tolerance» диалоговой панели «New Model Preference» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 254 (в мм), *OK*.
3. Построить точку в центре цилиндрической панели.
Выбираем приложение «Geometry» и для построения точки по трем координатам устанавливаем сочетание Create/Point/XYZ.
Вводим:
«Point Coordinate List»: [0 2540 0]
Apply.
Включаем нумерацию геометрических объектов (кнопка *Label Control* панели инструментов).
4. Построить дугу окружности путем вращения точки 1 относительно оси Z на угол θ .
Устанавливаем сочетание Create/Curve/Revolve.
Вводим:
«Axis»: Coord 0.3 (ось вращения – ось Z)
«Total Angle»: -5.73 (полный угол, град)
«Offset Angle»: 0 (отступ угла, град).
Направление вращения здесь определяется правилом правого винта.
Активизируем поле «Point List» и в графическом окне указываем точку 1.
Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*.
С помощью кнопок *Iso 1 View* и *Smooth Shaded* панели инструментов устанавливаем изометрическую проекцию и изображение модели с закрашенными гранями и тенями.
5. Построить цилиндрическую поверхность путем вытягивания дуги в заданном направлении.
Устанавливаем сочетание Create/Surface/Extrude.

В поле «Translation Vector» вводим компоненты вектора смещения (в мм): <0 0 254>.

Активизируем поле «Curve List» и в графическом окне указываем кривую 1 (построенную на предыдущем шаге дугу).

Если отключена опция «Auto Execute», нажимаем *Apply*.

6. Разбить поверхность на конечные элементы.

Следует отметить, что для получения результатов приемлемой точности здесь достаточно построить сетку 8x8.

Выбираем приложение «Elements».

Сначала для задания равномерного расположения опорных точек сетки устанавливаем сочетанием Create/Mesh Seed/Uniform.

Используя опцию «Number of Elements», вводим число элементов: Number = 8.

Активизируем поле «Curve List» и указываем две смежные кромки. При необходимости нажимаем *Apply*.

Далее для нанесения сетки на поверхность устанавливаем сочетание Create/Mesh/Surface.

Выбираем:

«Elem Shape»: Quad (четырёхугольная форма)

«Mesher»: IsoMesh (генератор регулярных изосеток)

«Topology»: Quad4 (топология – четырёхугольник с четырьмя узлами).

Активизируем поле «Surface List» и в графическом окне указываем поверхность 1, *Apply*.

7. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «Materials» и выбираем сочетание Create/Isotropic/Manual Input.

В поле «Material Name» вводим имя материала, например mater.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* и вводим свойства:

«Elastic Modulus» = 3.1e3 (модуль упругости, МПа)

«Poisson Ratio» = 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.


Нажимаем кнопку *Apply*.

8. Определить свойства элементов.

Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств оболочечных элементов устанавливаем сочетание Create/2D/Shell.

В поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например panel.

Не меняя установленные по умолчанию опции, нажимаем кнопку *Input Properties*.

Нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем mater.

В поле «Thickness» вводим значение толщины: 12.7 (в мм).

Закрываем окно кнопкой *OK*.

Нажимаем кнопку *Select Application Region* и указываем поверхность 1.

Затем последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

9. Задать граничные условия симметрии.

Напомним, что здесь для узлов, расположенных в плоскости симметрии, необходимо закрепить поступательное перемещение в направлении, перпендикулярном этой плоскости, и два угла поворота относительно осей, параллельных данной плоскости.

Сначала при помощи кнопки *Top view* панели инструментов устанавливаем вид сверху, т.е. на плоскость *XZ*.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений выбираем сочетание *Create/Displacement/Nodal*.


В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например sum_x.

Нажимаем кнопку *Input Data* (ввод данных).

В поле «Translations» (поступательные перемещения) вводим <0,,>, что соответствует $u_x = 0$.

В поле «Rotations» (углы поворота) вводим <,0,0>, что соответствует $\vartheta_y = \vartheta_z = 0$. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кривая или кромка) и указываем левую кромку (Surface 1.3).

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

Аналогично определяем второй набор граничных условий симметрии для узлов, расположенных в плоскости *XY*. Присвоим ему имя sum_z.

При этом для поступательных перемещений вводим <,,0>, а для углов поворота – <0,0,>.

В качестве области приложения здесь выбираем верхнюю кромку (Surface 1.4 или Curve 1).

10. Задать граничные условия шарнирного опирания на прямолинейной кромке.

В поле «New Set Name» вводим новое имя, например hinge.

Нажимаем кнопку *Input Data*.

В поле «Translations» вводим $\langle 0,0,0 \rangle$, *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region* и указываем правую кромку (Surface 1.1).

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

11. Задать сосредоточенную силу в центре панели.

Поскольку значение силы нам неизвестно, зададим единичную нагрузку, например $P = 1$ кН.


В том же приложении выбираем сочетание Create/Force/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например load.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Force» для задания силы, действующей в отрицательном направлении оси Y , вводим следующие компоненты (в Н): $\langle 0 -250 0 \rangle$. *OK*.

Необходимо напомнить, что здесь мы задаем не полную силу, а $P/4$.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем левую верхнюю вершину (Point 1, Curve 1.2 или Surface 1.3.1).

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

В конце устанавливаем изометрическую проекцию.

12. Выполнить анализ начальной устойчивости.

Запускаем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание Analyze/Entire Model/Full Run.

Для изменения типа решения нажимаем кнопку *Solution Type* и выбираем Buckling (анализ начальной устойчивости), *OK*.

Для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

13. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание Access Results/Attach XDB/Result Entities.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл lab12.xdb, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

14. Определить критическую силу.

Запускаем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание *Create/Quick Plot*.

Собственное значение здесь приводится в списке «Select Result Cases» после названия второго случая результатов:

$$\text{Factor} = 10.646.$$

Таким образом, для рассматриваемой задачи $\lambda_1 = 10,65$ и, следовательно,

$$P_{\text{кр}} = \lambda_1 P = 10,65 \text{ кН}.$$

Можно ли доверять данному решению? Ответить на этот вопрос можно лишь, выполнив нелинейный анализ.

15. Отобразить на экране дисплея форму потери устойчивости.

В списке «Select Result Cases» указываем второй случай результатов.

В списке «Select Deformation Result» в качестве результата для изображения деформированного состояния модели выбираем строку *Eigenvectors, Translational*. *Apply*.

Форма потери устойчивости рассматриваемой конструкции представлена на рисунке 27.2.

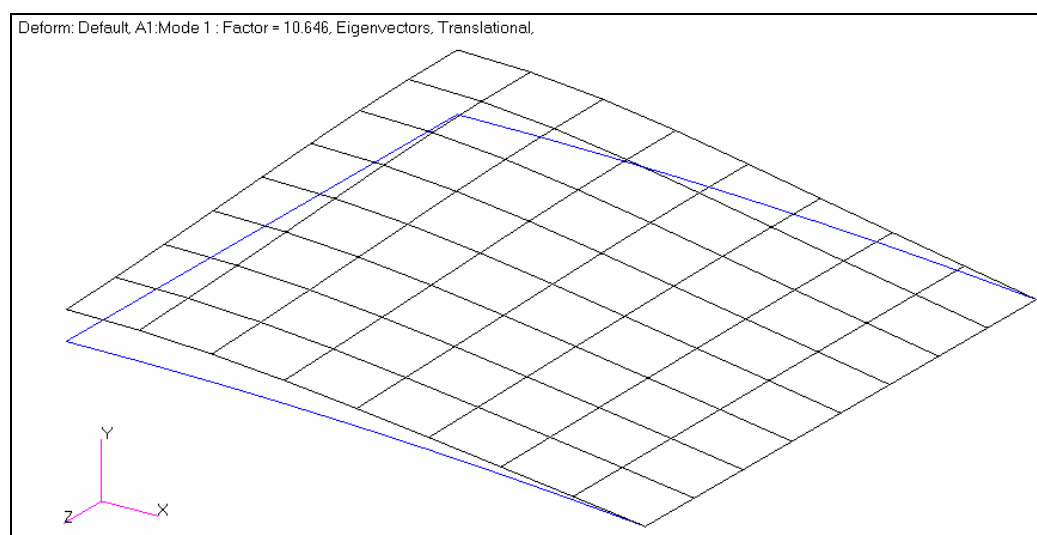


Рисунок 27.2 – Форма потери устойчивости

Видно, что панель при потере устойчивости прогибается навстречу приложенной силы. Это связано с тем, что собственный вектор (характери-

зующий в данном случае форму потери устойчивости) даже после нормирования определяется с точностью до знака.

Таким образом, абсолютные значения перемещений, а также их знак здесь не имеют физического смысла.

II. Геометрически нелинейный анализ (задание приращений нагрузки).

16. Увеличить значение сосредоточенной силы.

Анализ начальной устойчивости показывает, что критическая нагрузка значительно превышает заданную силу в 1 кН.

Увеличим нагрузку до 4 кН.

Запускаем приложением «Loads/BCs» и для изменения нагрузки выбираем сочетание Modify/Force/Nodal.

В списке «Select Set to Modify» указываем набор load.

Нажимаем кнопку *Modify Data* и в поле «Force» вводим <0 -1000 0>. *OK*.

В конце нажимаем *Apply*.

17. Выполнить геометрически нелинейный анализ.

Запускаем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание Analyze/Entire Model/Full Run.

Для изменения типа решения нажимаем кнопку *Solution Type* и выбираем Nonlinear Static (нелинейный статический анализ), *OK*.

Затем для модификации расчетного случая нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем Default. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Для изменения параметров расчетного случая используем кнопку *Subcase Parameters*.

В поле «Number of Load Increments» вводит число ступеней (или шагов) нагружения, например 25. *OK*.

Для включения опции вывода промежуточных решений нажимаем кнопку *Output Requests* (запросы по выводу). В выпадающем меню «Form Type» (тип окна) выбираем пункт Advanced (расширенный) и устанавливаем «Intermediate Output Option»: Yes (выводить результаты для каждого вычисленного шага нагружения). *OK*.

Последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И наконец, для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

Появляющиеся здесь сообщения закрываем кнопкой *Yes*.

18. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание Access Results/Attach XDB/Result Entities.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл lab12.xdb, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

19. Определить верхнюю критическую нагрузку.

Запускаем приложение «Results». Для быстрого изображения результатов используем сочетание Create/Quick Plot.

В данном случае для каждого шага по нагрузке создается отдельный случай результатов. Случаи результатов представлены в списке «Select Result Cases», где указываются текущие значения нагрузки в процентах от полной (рисунок 27.3).

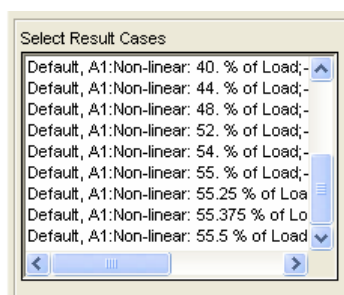


Рисунок 27.3 – Случаи результатов


Можно заметить, что решение достигло лишь 55,5% заданной нагрузки. При превышении этого значения решение расходится, поскольку оболочка теряет устойчивость с перескоком.

Таким образом, верхняя критическая нагрузка $P_{кр}^B$ для рассматриваемой конструкции составляет $4 \cdot 0,555 = 2,22$ кН, что почти в пять раз меньше критической нагрузки $P_{кр}^0$, найденной методом начальной устойчивости.

Таким образом, метод начальной устойчивости для решения подобных задач не применим!!!

20. Построить кривую равновесных состояний.


Для построения двухмерного графика устанавливаем сочетание Create/Graph/Y vs X.

В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным ступеням нагружения (кнопка  должна быть отжата).

В списке «Select Y Results» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем Displacement, Translational (поступательные перемещения). Ниже в выпадающем меню «Quantity» указываем компоненту Magnitude (величина, т.е. длина вектора).

В меню «X» за ось абсцисс принимаем Global Variable (глобальную переменную).

Ниже в меню «Variable» выбираем пункт Percent of Load, тем самым, уточняя, что в качестве глобальной переменной будет использоваться нагрузка (с указанием значений в процентах от полной нагрузки).

Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

Активизируем поле «Select Nodes» и в графическом окне указываем узел в центре цилиндрической панели.

После нажатия кнопки *Apply* в отдельном окне появляется график зависимости прогиба в центре оболочки от нагрузки (рисунок 27.4).

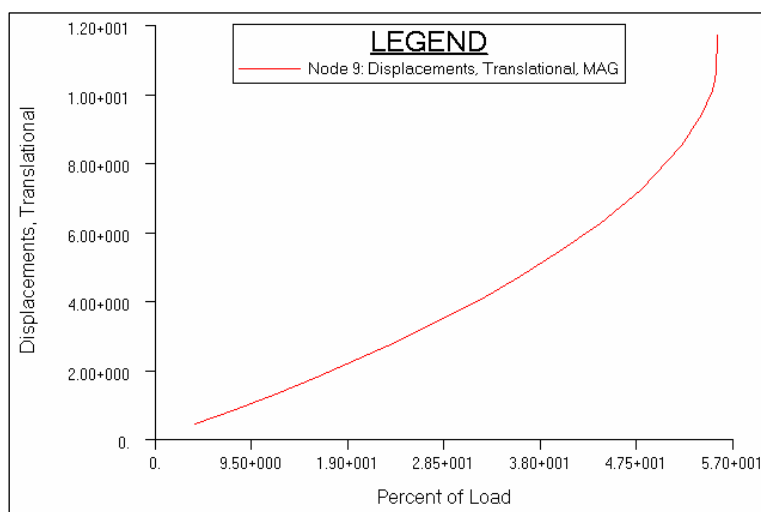


Рисунок 27.4 – Зависимость перемещение – сила, получаемая при задании приращений нагрузки

Отметим, что при задании приращений нагрузки нельзя построить полную кривую равновесных состояний, поскольку данный прием не позволяет проходить через предельные точки. В этих точках матрица тангенциальной жесткости сингулярная, и решение либо расходится (как в нашем слу-

чае), либо происходит перескок на другую устойчивую ветвь кривой равновесных состояний.

Для удаления окна с графиком устанавливаем сочетание Delete/Plots и в списке «Existing Plot Types» выбираем GRA_default_Graph, *Apply*.

III. Геометрически нелинейный анализ (задание приращений перемещений).

21. Удалить нагрузку.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и устанавливаем сочетание Delete/Force.

В списке существующих наборов «Existing Sets» указываем load, *Apply*.


22. Вместо силы приложить в центральной точке перемещение.

Для задания перемещений выбираем сочетание Create/Displacement/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например load.

Нажимаем кнопку *Input Data* и для задания смещения против оси *Y* в поле «Translations» вводим следующие компоненты вектора (в мм): $\langle 0, -30, 0 \rangle$, *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем центральную точку цилиндрической панели (Point 1, Curve 1.2 или Surface 1.3.1).

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

23. Выполнить геометрически нелинейный анализ.

Запускаем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание Analyze/Entire Model/Full Run.

С помощью кнопки *Solution Type* проверяем, выбрана ли опция Nonlinear Static (нелинейный статический анализ), *OK*.

Затем для модификации расчетного случая нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем Default. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Для изменения параметров расчетного случая используем кнопку *Subcase Parameters*.

В поле «Number of Load Increments» вводит число ступеней (или шагов) нагружения: 30, *OK*.

С помощью кнопки *Output Requests* проверяем, установлена ли опция вывода промежуточных решений. *OK*.

Последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И наконец, для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

Появляющиеся здесь сообщения закрываем кнопкой *Yes*.

24. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab12.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

25. Построить кривую равновесных состояний.

Запускаем приложение «Results» и устанавливаем сочетание *Create/Graph/Y vs X*.


В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным ступеням нагружения.

В списке «Select Y Results» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем *Constraint Forces, Translational* (силы реакций).

Ниже в выпадающем меню «Quantity» указываем компоненту *Y Component*.

В меню «X» за ось абсцисс принимаем *Global Variable* (глобальную переменную).


Ниже в меню «Variable» выбираем пункт *Percent of Load*.

Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

Активизируем поле «Select Nodes» и в графическом окне указываем узел в центре цилиндрической панели.

Далее с помощью кнопки-пиктограммы  устанавливаем вид для задания атрибутов изображения.

В выпадающем меню «Curve Fit» (подгонка кривой) для сглаживания кривой выбираем пункт *Least Squares* (метод наименьших квадратов).

И наконец, для задания опций вычерчивания нажимаем кнопку-пиктограмму .

В поле «Scalar Factor» (коэффициент масштабирования) вводим отрицательное число: -0.004 (для получения значений силы для полной конструкции в кН).

Нажимаем *Apply*.

Отображаемый в этом случае график показан на рисунке 27.5.

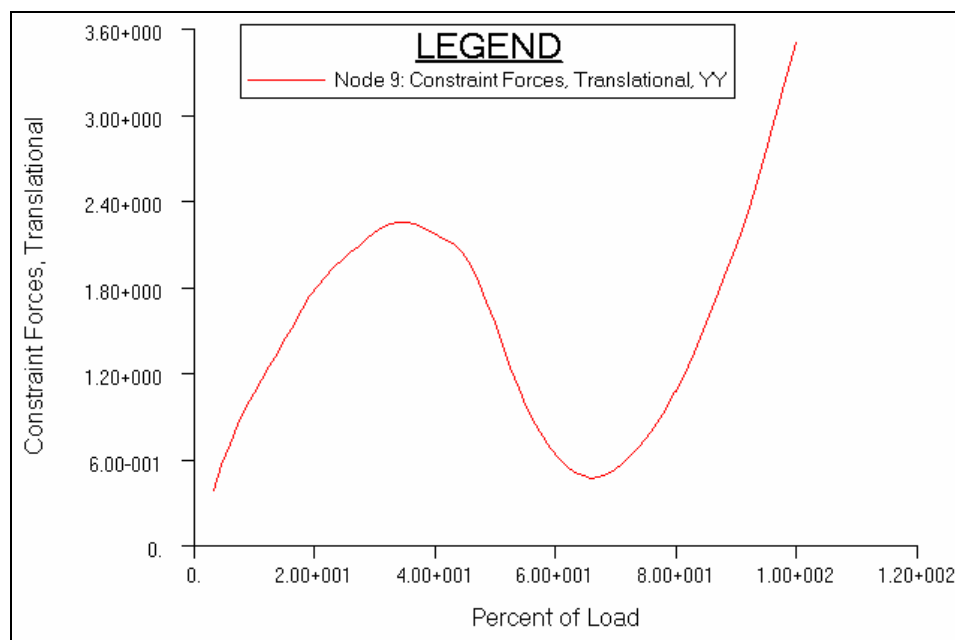


Рисунок 27.5 – Зависимость сила – перемещение, получаемая при задании приращений перемещений

Отметим, что по оси абсцисс здесь откладываются значения перемещения в процентах от заданного (т.е. 100% соответствует перемещению в 30 мм), а по оси ординат – значения центральной силы P (в кН).

Для удаления окна с графиком устанавливаем сочетание Delete/Plots и в списке «Existing Plot Types» выбираем GRA_default_Graph, *Apply*.


26. Определить верхнюю и нижнюю критические нагрузки.

Для формирования текстового отчета устанавливаем сочетание Create/Report/Append File.

В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным ступеням нагружения.

В списке «Select Report Result» указываем Constraint Forces, Translational (силы реакций).

В списке «Select Quantities» выбираем компоненту Y Component.


Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

В выпадающем меню «Target Entity» (целевые объекты) выбираем Nodes (узлы).

Активизируем поле «Select Nodes» и в графическом окне указываем узел в центре цилиндрической панели.

С помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

В поле «File Name» вводим новое имя файла отчета, например Lab12.rpt.

И наконец, для задания опций вычерчивания нажимаем кнопку-пиктограмму .

В поле «Scalar Factor» (коэффициент масштабирования) вводим значение -0.004.

Нажимаем *Apply*.

Файл Lab12.rpt записывается в рабочую папку пользователя. Он будет содержать, в частности, следующие данные:

% of Load	Y Component
3.33333	0.385382
6.66667	0.752572
10.	1.087873
13.3333	1.276289
16.6667	1.544026
20.	1.782592
23.3333	1.993317
26.6667	2.036274
30.	2.177243
33.3333	2.208565
36.6667	2.279461
40.	2.161691
43.3333	2.090053
46.6667	1.955874
50.	1.784340
53.3333	1.168436
56.6667	0.842921
60.	0.627947
63.3333	0.467819
66.6667	0.470183
70.	0.527525
73.3333	0.719951
76.6667	0.852208
80.	1.065348
83.3333	1.420261
86.6667	1.749240
90.	2.081060
93.3333	2.463956
96.6667	3.022873
100.	3.496700

Анализ полученных данных показывает, что сила сначала возрастает до некоторого значения, которое характеризует верхнюю критическую на-

грузку, затем убывает до значения, соответствующего нижней критической нагрузке, после чего снова возрастает.

Таким образом, для рассматриваемой конструкции $P_{кр}^B = 2,28$ кН и $P_{кр}^H = 0,47$ кН. Здесь для верхней критической нагрузки получается более точное значение.

Напомним, что данный прием имеет ряд существенных ограничений. Он применим лишь в случае действия сосредоточенной нагрузки и не позволяет определять участки кривой равновесных состояний, не однозначные по перемещению.

IV. Использование метода длины дуги.

27. Удалить заданное в центральной точке перемещение.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и устанавливаем сочетание Delete/Displacement.

В списке существующих наборов «Existing Sets» указываем load, *Apply*.


28. Снова задать сосредоточенную силу в центре панели.

В том же приложении выбираем сочетание Create/Force/Nodal.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например load.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Force» для задания силы, действующей в отрицательном направлении оси Y , вводим следующие компоненты (в Н): <0 -1000 0>. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: Geometry.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем точку в центре цилиндрической панели (Point 1, Curve 1.2 или Surface 1.3.1).

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

29. Выполнить геометрически нелинейный анализ с использованием метода длины дуги.

Запускаем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание Analyze/Entire Model/Full Run.

С помощью кнопки *Solution Type* проверяем, выбрана ли опция Nonlinear Static (нелинейный статический анализ), *OK*.

Затем для модификации расчетного случая нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем Default.

Для изменения параметров расчетного случая используем кнопку *Subcase Parameters*.

В поле «Number of Load Increments» вводит число ступеней (или шагов) нагружения: 30, *OK*.

Далее для включения метода длины дуги нажимаем кнопку *Arc-Length Method* и устанавливаем флаг «Use Arc-Length Method».

В поле «Min. Adjust. ratio (MINALR)» (минимальный множитель) вводим значение 0.1, а в поле «Max. Adjust. ratio (MAXALR)» (максимальный множитель) – значение 4.

Данные параметры используются для задания пределов изменения длины дуги от одного шага к другому, т.е. в случае хорошей сходимости длина дуги может за один шаг увеличиться максимум в четыре раза, а при плохой – уменьшиться максимум в десять раз.

В поле «Max. Controlled Increment Steps» (максимально допустимое число шагов приращений) вводим число 100. *OK*.

С помощью кнопки *Output Requests* проверяем, установлена ли опция вывода промежуточных решений. *OK*.

Последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И наконец, для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

Появляющиеся здесь сообщения закрываем кнопкой *Yes*.

30. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.

В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание Access Results/Attach XDB/Result Entities.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл lab12.xdb, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.


31. Построить кривую равновесных состояний.

Запускаем приложение «Results» и устанавливаем сочетание Create/Graph/ Y vs X.

В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным ступеням нагружения.

В списке «Select Y Results» в качестве выходной величины, отображаемой по оси ординат, выбираем Displacement, Translational (поступательные перемещения). Ниже в выпадающем меню «Quantity» указываем компоненту Magnitude.

В меню «X» за ось абсцисс принимаем Global Variable. Ниже в меню «Variable» выбираем пункт Percent of Load.


Для выбора целевых объектов с помощью кнопки-пиктограммы  меняем вид диалоговой панели.

Активизируем поле «Select Nodes» и в графическом окне указываем узел в центре цилиндрической панели.

Далее с помощью кнопки-пиктограммы  устанавливаем вид для задания атрибутов изображения.

В выпадающем меню «Curve Fit» для сглаживания кривой выбираем пункт Spline (сплайн).

Снимаем флаг «Sort Data By X Coordinate» (сортировать данные по X координате).

И наконец, для задания опций вычерчивания нажимаем кнопку-пиктограмму .

В поле «Scalar Factor» (коэффициент масштабирования) вводим число 1.

Нажимаем *Apply*. В отдельном окне появляется график (рисунок 27.6).

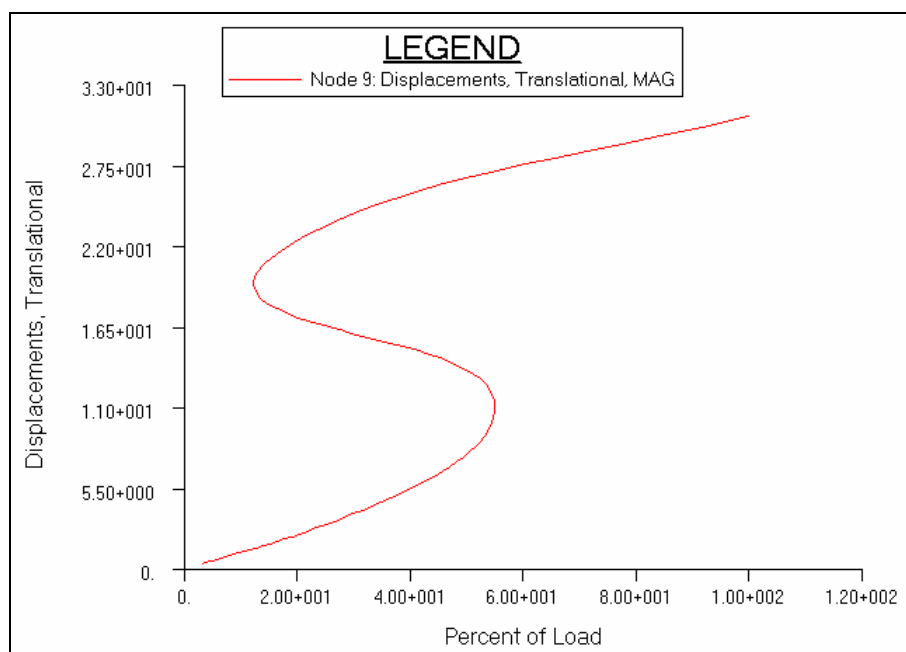
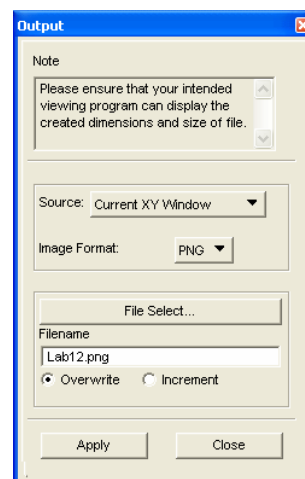


Рисунок 27.6 – Зависимость перемещение – сила, получаемая методом длины дуги

Отметим, что по оси абсцисс здесь откладываются значения силы в процентах от заданной (т.е. 100% соответствует силе в 4 кН), а по оси ординат – значения прогиба в центральной точке (в мм).

32. Выйти из программы: *File>Quit*.

Дополнительное задание: найти верхнюю и нижнюю критические силы для цилиндрической панели, представленной на рисунке 27.1, но с толщиной $h = 6,3$ мм. Кривую равновесных состояний записать в файл Lab12.png, применяя команду *File>Images* полосы меню. При этом использовать установки, как показано на рисунке справа.



28 УЧЕТ ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Пластичностью называется свойство твердого тела изменять под внешними воздействиями, не разрушаясь, свою форму и размеры и сохранять остаточные (пластические) деформации после устранения этих воздействий. Пластичность материалов является одним из самых распространенных видов физической нелинейности.

28.1 Диаграммы деформирования

Для расчетов за пределами упругости необходимо располагать диаграммами деформирования материалов. Экспериментальные исследования механических свойств материалов при одноосном растяжении обычно обрабатывают в виде графиков зависимости напряжения σ от деформации ε . При этом силу P , растягивающую образец, относят к первоначальной площади сечения F_0 , а удлинение образца Δl – к первоначальной расчетной длине образца l_0 :

$$\sigma = \frac{P}{F_0}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (28.1)$$

т.е. не учитывают изменение площади поперечного сечения образца и предполагают равномерное его деформирование по длине. Поэтому график зависимости $\sigma - \varepsilon$ (рисунок 28.1), построенный с использованием формул (28.1), называют условной диаграммой растяжения (деформирования).

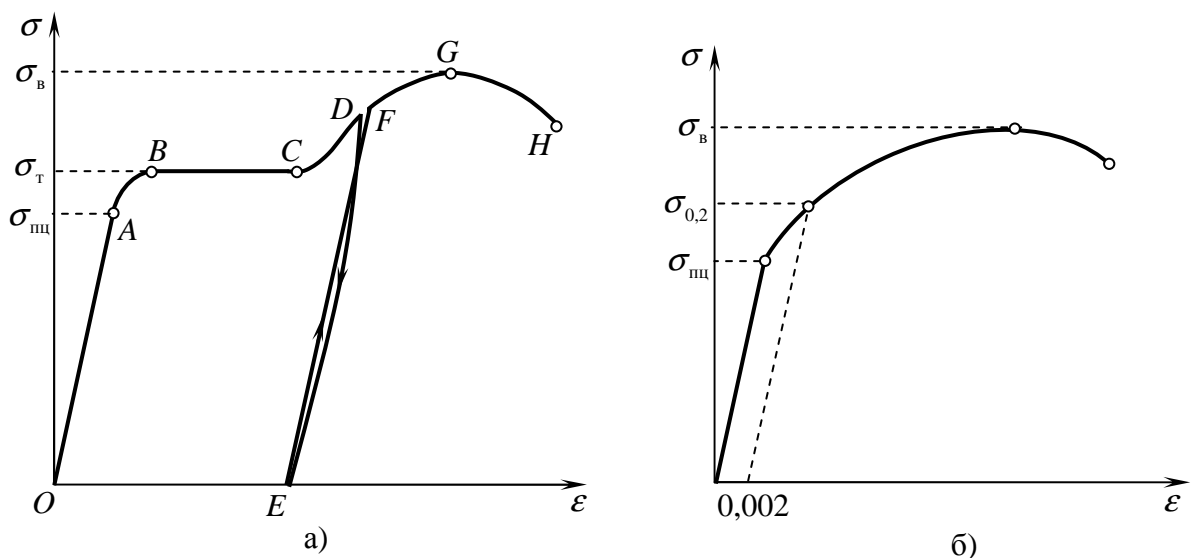


Рисунок 28.1 – Условные диаграммы растяжения

На участке OA (см. рисунок 28.1,а) материал деформируется линейно, т.е. справедлив закон Гука. Точка A соответствует так называемому пределу пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ и лежит несколько ниже предела упругости (точка B), после которого уже появляются остаточные деформации, и удлинения быстро увеличиваются. При этом часто обнаруживается характерная площадка текучести BC , когда образец удлиняется, а сила не увеличивается. Напряжение, соответствующее площадке BC , называется физическим пределом текучести σ_T .

Для некоторых материалов кривая растяжения лишена площадки текучести (см. рисунок 28.1,б) и иногда практически не имеет начального прямолинейного участка. В таких случаях вводят понятие условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ как напряжения, соответствующего остаточной деформации 0,2%.

Следует отметить, что в теории пластичности (как и в программе MSC.Nastran) понятия пределов пропорциональности, упругости и текучести не различаются.

За площадкой текучести напряжение вновь начинает возрастать. Участок CG отвечает состоянию упрочнения материала. Если при этом нагрузку уменьшать, то кривая разгрузки DE в общем близка к прямой линии, причем последняя имеет такой же наклон, как и линия упругого участка OA . Такое поведение связано с тем, что при разгрузке деформация тела происходит благодаря накопленной им упругой потенциальной энергии. Величина остаточной деформации измеряется отрезком OE . Если повторно нагрузить образец, то кривая нагружения EF будет мало отличаться от линии DE . Таким образом, материал вследствие первоначальной вытяжки как бы приобретает упругие свойства и повышает предел текучести. Это явление называется упрочнением (наклепом).

Моменту образования шейки соответствует точка G . Далее удлиняется практически лишь область шейки, и диаметр уменьшается только здесь. По этой причине за точкой D сила P убывает, т.е. моменту образования шейки соответствует максимальная сила растяжения. Условное напряжение в этот момент называется временным сопротивлением разрыву σ_B . И наконец, в точке H происходит разрыв образца.

Следует отметить, что при анализе больших (и особенно конечных) деформаций необходимо располагать действительной (истинной) диаграм-

мой деформирования. При этом растягивающую силу нужно относить к действительной площади поперечного сечения образца F :

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{F}. \quad (28.2)$$

Действительная площадь F может быть легко связана с первоначальной площадью F_0 , если приближенно принять, что объем элемента образца $F_0 dz$ при его деформации остается постоянным. Поскольку длина dz этого элемента после деформации равна $dz(1 + \varepsilon)$, а площадь поперечного сечения равна F , то согласно принятому допущению

$$F_0 dz = F dz(1 + \varepsilon),$$

откуда

$$F = \frac{F_0}{1 + \varepsilon}.$$

Подставляя эту величину в формулу (28.2), получаем зависимость действительного напряжения от условного

$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon). \quad (28.3)$$

Кроме того, при нагружении образца приращения деформации необходимо вычислять по отношению к текущему (мгновенному) состоянию:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l},$$

где l – текущая длина образца; dl – бесконечно малое ее изменение. Суммирование приводит к так называемой логарифмической деформации:

$$\bar{\varepsilon} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon). \quad (28.4)$$

Таким образом, действительная диаграмма деформирования материала выражает зависимость действительного напряжения $\bar{\sigma}$ от логарифмической деформации $\bar{\varepsilon}$. Следует отметить, что при $\varepsilon < 10\%$ различие между логарифмической и обычной деформациями незначительно (не превышает 5%).

28.2 Условия текучести

В теории пластического течения, получившей наибольшее распространение, в основе уравнений состояния пластически деформируемой сплошной среды лежат:

- условия текучести (или пластичности);

- условия упрочнения;
- закон течения.

В случае одноосного растяжения или сжатия пластические деформации возникают, когда напряжение достигает предела текучести материала (точка B на рисунке 28.1,а). Однако важно знать поведение материала при сложном напряженном состоянии. В частности, необходимо иметь суждение о том, какие условия характеризуют переход материала из упругого состояния в состояние текучести.

В общем случае плоского или объемного напряженных состояний экспериментально невозможно определить условия текучести для бесконечного множества соотношений между составляющими напряжений. Поэтому условие текучести для сложного напряженного состояния устанавливается гипотетическим путем с последующей экспериментальной проверкой.

Поскольку в начальной стадии нагружения справедлив закон Гука, возникновение пластических деформаций однозначно определяется напряжениями. Следовательно, условие начала пластичности может быть представлено в виде

$$f(\sigma_{ij}, F) = 0, \quad (28.5)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; F – некоторые характеристики материала, определяющие возникновение пластических деформаций при простейших напряженных состояниях. В случае изотропии F представляет собой одну единственную скалярную константу (обычно предел текучести), а для анизотропного материала F может быть совокупностью многих параметров, вид которой определяется конкретной записью условия текучести.

Геометрически критерий (28.5) можно интерпретировать как некоторую предельную поверхность в шестимерном пространстве напряжений (рисунок 28.2), т.е. условие текучести выполняется в тот момент, когда заданный вектор напряжений достигает этой поверхности, называемой поверхностью текучести. Любое напряженное состояние внутри этой поверхности является упругим.

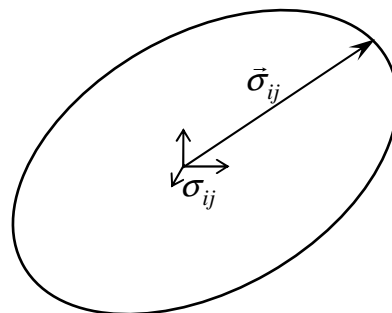


Рисунок 28.2 – Поверхность текучести

Для изотропных материалов, свойства которых одинаковы во всех направлениях, наибольшее распространение получило условие текучести Мизеса:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_T, \quad (28.6)$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – эквивалентное напряжение по Мизесу, которое через главные напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 выражается как

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}. \quad (28.7)$$

В трехмерном пространстве главных напряжений уравнение (6) описывает круговую цилиндрическую поверхность, ось которой является прямая $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ (рисунок 28.3,а). Таким образом, согласно условию Мизеса при всесторонних равных растяжениях или сжатиях пластические деформации не возникают. В случае двухосного напряженного состояния цилиндрическая поверхность вырождается в эллипс (рисунок 28.3,б).

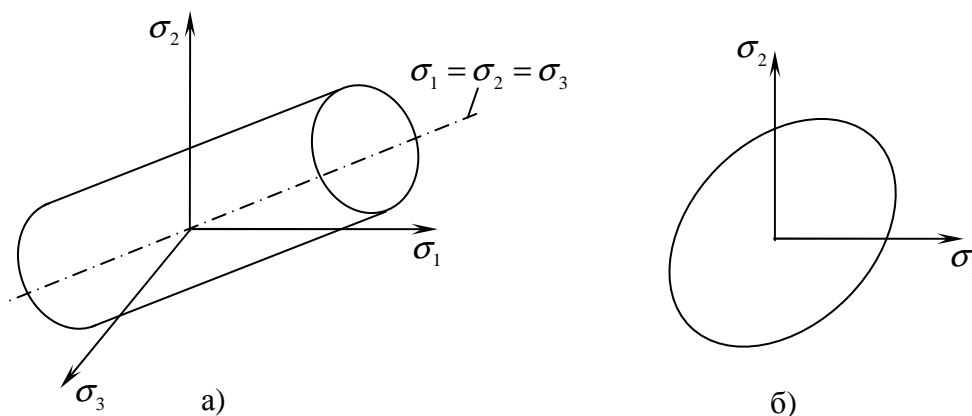


Рисунок 28.3 – Поверхность и кривая текучести Мизеса

28.3 Условия упрочнения

Как отмечалось выше, пластические деформации вне горизонтальной площадки текучести приводят к упрочнению материала, т.е. повышают предел текучести (в направлении деформирования). Таким образом, для упрочняющегося материала поверхность текучести не является фиксированной (как в случае идеальной пластичности), а как-то расширяется и смещается по мере развития упрочнения. Форма и положение этой поверхности зависят,

вообще говоря, не только от текущего напряженного состояния, но и от всей предшествующей истории деформирования.

Изменение поверхности текучести в процессе нагружения описывают условия упрочнения. Имеются два основных вида упрочнения: изотропное и кинематическое. В первом случае поверхность текучести сохраняет в пространстве напряжений свое относительное положение (т.е. не смещается), но увеличивается в размерах (равномерно расширяется) по мере развития пластических деформаций. При использовании критерия Мизеса (28.6) здесь будет увеличиваться только радиус цилиндра. Иллюстрация изотропного упрочнения для двухосного напряженного состояния представлена на рисунке 28.4,а.

При кинематическом упрочнении поверхность текучести сохраняет свои размеры, но смещается в направлении пластического деформирования (рисунок 28.4,б). При этом предел текучести в направлении деформации возрастает, а в противоположном направлении падает (т.е. происходит разупрочнение). Такая схема, по крайней мере, качественно описывает эффект Баушингера, который заключается в том, что предварительная пластическая деформация одного знака ухудшает сопротивляемость материала в отношении последующей пластической деформации другого знака (так, пластическое растяжение стержня приводит к заметному снижению предела текучести при последующем сжатии того же стержня).

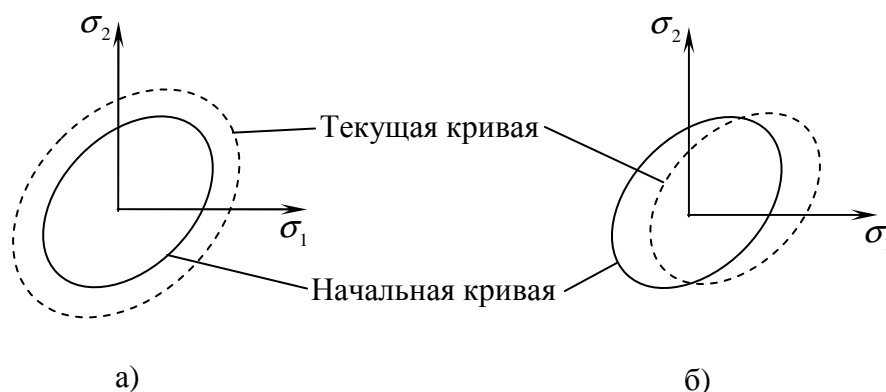


Рисунок 28.4 – Изотропное (а) и кинематическое (б) упрочнения

Возможно также комбинированное упрочнение, когда поверхность текучести испытывает перенос и одновременно расширяется равномерно во всех направлениях.

Следует отметить, что кинематическое упрочнение рекомендуется использовать при анализе малых пластических деформаций, когда имеет место непропорциональное нагружение (особенно, при циклическом изменении нагрузки). Изотропное упрочнение является более предпочтительным для задач с большими деформациями.

28.4 Закон течения

Закон течения определяет направление развития пластических деформаций. Он обычно записывается как

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (28.8)$$

где $d\varepsilon_{ij}^p$ – приращения пластических деформаций; $d\lambda \geq 0$ – некоторый бесконечно малый скалярный множитель; f – функция текучести.

Закон текучести в таком виде называется ассоциированным, поскольку связывается (ассоциируется) с условием пластичности. Он устанавливает, что вектор приращений $d\varepsilon_{ij}^p$ направлен по нормали к поверхности текучести.

Отметим, что классическая теория пластичности не учитывает влияние каких-либо временных эффектов. Зависимость пластических деформаций от скорости деформации изучается в теории вязкопластичности. Изменение деформаций и напряжений во времени рассматривается в теории ползучести. Данные эффекты могут быть определяющими при высоких температурах.

В заключение следует подчеркнуть, что задание пластических свойств материала вносит нелинейность в модель. Кроме того, пластичность представляет собой неконсервативный процесс, при котором последовательность приложения нагрузок может повлиять на конечный результат. Поэтому в сложных случаях (например, при непропорциональном нагружении) нагрузку следует прикладывать в правильной последовательности, соблюдая реальную историю нагружения.

Вопросы по теме 28

- 1) Что называется пластичностью?
 1. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и сохранять остаточные деформации после снятия нагрузки.
 2. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и возвращаться в исходное состояние после снятия нагрузки.
 3. Нелинейность связи напряжений с деформациями.
 4. Изменение деформаций и/или напряжений во времени.
 5. Зависимость пластических деформаций от скорости деформирования.

- 2) Что называется ползучестью?
 1. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и сохранять остаточные деформации после снятия нагрузки.
 2. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и возвращаться в исходное состояние после снятия нагрузки.
 3. Нелинейность связи напряжений с деформациями.
 4. Изменение деформаций и/или напряжений во времени.
 5. Зависимость пластических деформаций от скорости деформирования.

- 3) Что называется вязкопластичностью?
 1. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и сохранять остаточные деформации после снятия нагрузки.
 2. Свойство тела изменять при нагружении форму, не разрушаясь, и возвращаться в исходное состояние после снятия нагрузки.
 3. Нелинейность связи напряжений с деформациями.
 4. Изменение деформаций и/или напряжений во времени.
 5. Зависимость пластических деформаций от скорости деформирования.

- 4) Какой вид физической нелинейности является наиболее актуальным для конструкционных материалов?
 1. Пластичность.
 2. Ползучесть.
 3. Вязкопластичность.
 4. Вязкоупругость.
 5. Гиперупругость.
 6. Нелинейная упругость.

- 5) Какие факторы не учитываются при построении условной диаграммы растяжения?

1. Изменение площади поперечного сечения образца.
2. Неравномерность деформирования по длине образца.
3. Изменение объема.
4. Нелинейность связи напряжение–деформация.
5. Изменение длины образца.

б) Что называется пределом пропорциональности?

1. Напряжение, до которого материал деформируется линейно.
2. Напряжение, до которого материал деформируется упруго.
3. Напряжение, соответствующее площадке текучести.
4. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,002.
5. Отношение максимальной силы растяжения образца к первоначальной площади поперечного сечения.
6. Отношение максимальной силы растяжения образца к действительной площади поперечного сечения.

7) Что называется пределом упругости?

1. Напряжение, до которого материал деформируется линейно.
2. Напряжение, до которого материал деформируется упруго.
3. Напряжение, соответствующее площадке текучести.
4. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,002.
5. Отношение максимальной силы растяжения образца к первоначальной площади поперечного сечения.
6. Отношение максимальной силы растяжения образца к действительной площади поперечного сечения.

8) Что называется физическим пределом текучести?

1. Напряжение, до которого материал деформируется линейно.
2. Напряжение, до которого материал деформируется упруго.
3. Напряжение, соответствующее площадке текучести.
4. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,002.
5. Отношение максимальной силы растяжения образца к первоначальной площади поперечного сечения.
6. Отношение максимальной силы растяжения образца к действительной площади поперечного сечения.

9) Что называется условным пределом текучести?

1. Напряжение, до которого материал деформируется линейно.
2. Напряжение, до которого материал деформируется упруго.
3. Напряжение, соответствующее площадке текучести.
4. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,002.
5. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,2.
6. Отношение максимальной силы растяжения образца к первоначальной площади поперечного сечения.

10) Что называется временным сопротивлением?

1. Напряжение, до которого материал деформируется линейно.
2. Напряжение, до которого материал деформируется упруго.
3. Напряжение, соответствующее площадке текучести.
4. Напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,002.
5. Отношение максимальной силы растяжения образца к первоначальной площади поперечного сечения.
6. Отношение максимальной силы растяжения образца к действительной площади поперечного сечения.

11) В каких случаях необходимо располагать действительной диаграммой деформирования?

1. При больших деформациях.
2. При конечных деформациях.
3. При больших перемещениях и углах поворота.
4. При возникновении пластических деформаций.

12) Какие величины связывает истинная диаграмма деформирования?

1. Действительное напряжение с логарифмической деформацией.
2. Напряжение с деформацией.
3. Действительное напряжение с экспоненциальной деформацией.
4. Истинную силу с удлинением образца.
5. Логарифмическое напряжение с истинной деформацией.

13) При каких значениях деформации различие между логарифмической и обычной деформациями не превышает 5%?

1. Меньше 0,1.
2. Меньше 0,2.
3. Меньше 1.
4. Меньше 10.
5. Меньше 20.

14) Что лежит в основе теории пластического течения?

1. Условия текучести.
2. Условия упрочнения.
3. Закон течения.
4. Уравнения пластического равновесия.
5. Геометрические соотношения.

15) Какое условие текучести получило наибольшее распространение для изотропных материалов?

1. Мизеса.
2. Треска.
3. Хилла.
4. Сен-Венана.
5. Максвелла.

16) Какую поверхность в пространстве главных напряжений представляет условие текучести Мизеса?

1. Круговой цилиндр.
2. Конус.
3. Эллипсоид.
4. Гиперболоид.
5. Сферу.
6. Плоскость.

17) В какую кривую вырождается поверхность текучести Мизеса в случае двухосного напряженного состояния?

1. В окружность.
2. В эллипс.
3. В параболу.
4. В гиперболу.
5. В прямоугольник.

18) Что такое упрочнение материала?

1. Увеличение предела текучести при пластическом деформировании.
2. Увеличение предела прочности при пластическом деформировании.
3. Увеличение модуля упругости при пластическом деформировании.
4. Увеличение коэффициента Пуассона при пластическом деформировании.
5. Увеличение временного сопротивления разрыву при пластическом деформировании.

19) Какие виды упрочнения рассматриваются в теории пластичности?

1. Изотропное.
2. Кинематическое.
3. Комбинированное.
4. Геометрическое.

5. Статическое.
6. Динамическое.

20) В чем суть эффекта Баушингера?

1. Увеличение предела текучести в направлении деформации и уменьшение его в противоположном направлении.
2. Уменьшение предела текучести в направлении деформации и увеличение его в противоположном направлении.
3. Увеличение предела текучести в направлении деформации и в противоположном направлении.
4. Уменьшение предела текучести в направлении деформации и в противоположном направлении.

21) Что определяет закон течения?

1. Направление развития пластических деформаций.
2. Направление упрочнения.
3. Направление увеличения предела текучести.
4. Направление уменьшения предела текучести.
5. Интенсивность остаточных деформаций.

22) Что устанавливает ассоциированный закон течения?

1. Вектор приращений пластических деформаций направлен по нормали к поверхности текучести.
2. Вектор приращений пластических деформаций направлен по касательной к поверхности текучести.
3. Вектор приращений пластических деформаций направлен по вектору напряжений.
4. Вектор приращений пластических деформаций направлен перпендикулярно вектору напряжений.

23) Что следует предпринять для правильного учета пластичности в случае непропорционального нагружения?

1. Нагрузку следует прикладывать в правильной последовательности, соблюдая реальную историю нагружения.
2. Нагрузку следует прикладывать постепенно, используя большое число шагов.
3. Следует включить учет больших перемещений.
4. Следует использовать метод длины дуги.

24) В каких случаях рекомендуется использовать кинематическое упрочнение?

1. В случае непропорционального нагружения при малых деформациях.
2. В случае циклического нагружения при малых деформациях.
3. При больших деформациях.
4. При конечных деформациях.

25) В каких случаях рекомендуется использовать изотропное упрочнение?

1. В случае непропорционального нагружения при малых деформациях.
2. В случае циклического нагружения при малых деформациях.
3. При больших деформациях.
4. При конечных деформациях.

29 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

«Растяжение полосы, ослабленной угловым вырезом»

Исходные данные: полоса с угловым вырезом равномерно растягивается напряжениями $\sigma_0 = 1000$ МПа (рисунок 29.1). Вершина выреза притуплена радиусом R0,5. Материал – сталь 30ХГСА (модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}} = 860$ МПа; условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 970$ МПа), диаграмма деформирования которого задана точками (таблица 29.1).

Допущение: предполагается, что реализуется плоская деформация.

Цель: исследовать развитие пластических деформаций вблизи вершины выреза по мере возрастания нагрузки.

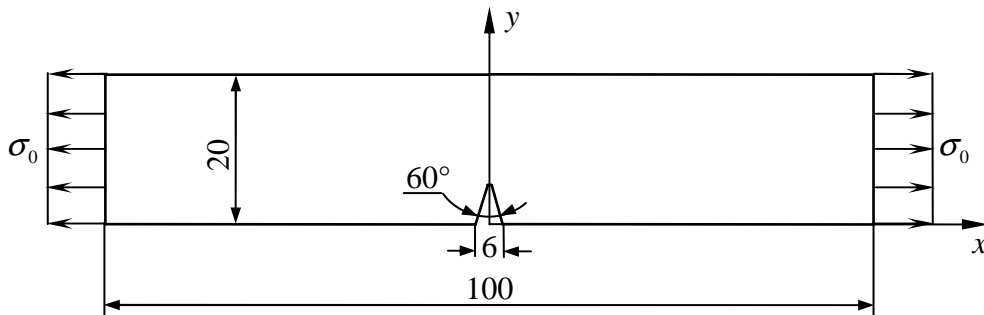


Рисунок 29.1 – Геометрия полосы с вырезом

Таблица 29.1 – Зависимость напряжения от деформации

№	ε	σ , МПа
1	0	0
2	0,0043	860
3	0,0050	920
4	0,0069	970
5	0,010	1010
6	0,015	1045
7	0,020	1067
8	0,025	1085
9	0,030	1095
10	0,035	1100
11	0,040	1100

Диаграмма деформирования стали 30ХГСА, построенная с использованием данных таблицы 29.1, представлена на рисунке 29.2. Следует отметить, что при задании кривой $\sigma - \varepsilon$ для решателя MSC.Nastran первая точка должна иметь нулевые координаты ($\sigma_1 = 0, \varepsilon_1 = 0$), а вторая точка – определять предел текучести ($\sigma_T = \sigma_2$). При этом наклон линии, соединяющей первую и вторую точки, должен быть равен модулю упругости:

$$\frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = E .$$

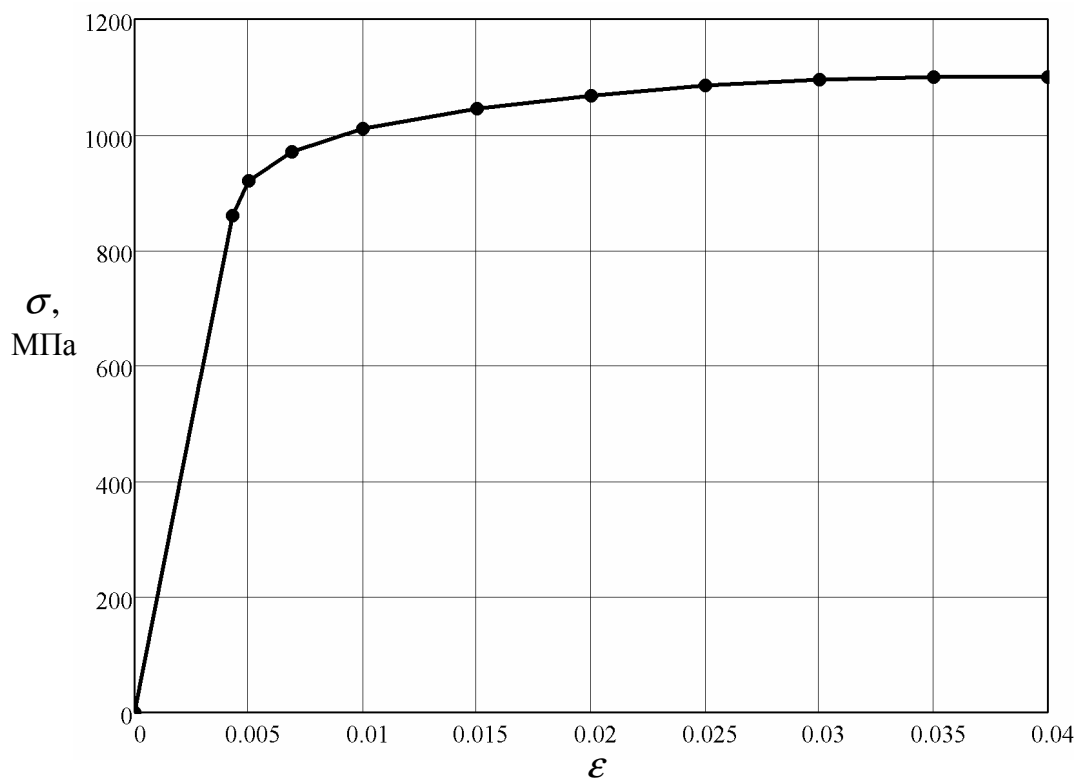


Рисунок 29.2 – Диаграмма деформирования стали

Подчеркнем, что в МКЭ-пакетах не различаются понятия пределов пропорциональности, упругости и текучести.

Вне области определения данной кривой ее экстраполяция осуществляется с сохранением наклона конечного сегмента, поэтому в конце добавлен горизонтальный участок.

Благодаря симметрии конструкции и нагрузки относительно вертикальной оси здесь можно ограничиться рассмотрением половины полосы.

Для решения задачи предлагается выполнить следующие действия.

1. Запустить пакет MSC.Patran и открыть новую базу данных.

В полосе меню выбираем команду *File>New*.

В поле «File name» указываем имя файла базы данных Lab13.db, *OK*.

2. Задать начальные установки.

В разделе «Tolerance» выбираем опцию «Based on Model» (на основе модели) и в поле «Model Dimension» (габаритный размер модели) вводим значение 50 (в мм), *OK*.

3. Построить два прямоугольника.

Выбираем приложение «Geometry» и устанавливаем сочетание *Create/Surface/XYZ*.

Для первого прямоугольника вводим:

«Vector Coordinates List»: <6 20 0> (описывающий диагональ вектор)

«Origin Coordinate List»: [0 0 0] (координаты начала вектора)


Apply.

Для второго прямоугольника:

«Vector Coordinates List»: <44 20 0>

«Origin Coordinate List»: [6 0 0]

Apply.

Для визуализации внутренней геометрии поверхностей воспользуемся кнопкой  панели инструментов.

Включаем нумерацию геометрических объектов.

4. Для определения выреза построить две точки.

Сначала полезно с помощью кнопки  панели инструментов увеличить размер изображения точек до девяти пикселей.

Устанавливаем сочетание *Create/Point/XYZ*.

Для первой точки в поле «Point Coordinate List» вводим следующие значения координат (в мм): [3,0,0], *Apply*.

Вторая точка по оси *Y* имеет значение координаты $3\sqrt{3}$ мм. Отметим, что в программе MSC.Patran при вводе отдельных компонент допустимы математические операции. Для этих целей используется обратный апостроф (располагается на одной клавише с буквой ё).

Таким образом, для второй точки в поле «Point Coordinate List» вводим [0, `3*SQRT(3)`,0], *Apply*.

5. Соединить построенные на предыдущем шаге точки прямой линией.

Выбираем сочетание *Create/Curve/Point*.

Используем установленную по умолчанию опцию *2 Point*.

Для поля «Starting Point List» указываем точку 7, а для поля «Ending Point List» – точку 8.

Если снят флаг «Auto Execute», то для завершения операции нажимаем кнопку *Apply*.

6. Создать зеркальное отображение проведенной на предыдущем шаге линии.

Устанавливаем сочетание Transform/Curve/Mirror.

В поле «Define Mirror Plane Normal» в качестве нормали к плоскости зеркала вводим Coord 0.1 (т.е. ось X).

Проверяем, что флаг «Delete Original Curves» снят.

Для поля «Curve List» указываем линию 1.

При необходимости нажимаем *Apply*.

7. Построить дугу скругления в вершине выреза.

Устанавливаем сочетание Create/Curve/Fillet.

В поле «Fillet Radius» вводим радиус скругления (в мм): 0.5.

Опция «Trim Original Curves» (подрезать исходные кривые) должна быть включена.

Для поля «Curve/Point 1 List» без использования клавиши *Shift* указываем кривую 1 и ее конечную точку со стороны оставляемой части (т.е. точку 7).

Аналогично для поля «Curve/Point 2 List» указываем кривую 2 и точку 9.

Если требуется, нажимаем *Apply*.


8. Разбить дугу скругления на две части в месте ее пересечения с кромкой поверхности.

Выбираем сочетание Edit/Curve/Break.

Используем установленную по умолчанию опцию Point (разбиение при помощи точки).

Для удаления исходной кривой включаем флаг «Delete Original Curves».

Для поля «Curve List» указываем дугу скругления (Curve 3).

Затем активизируем область ввода «Break Point List», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка пересечения двух кривых) и без использования клавиши *Shift* указываем дугу скругления и левую кромку поверхности 1.

При необходимости нажимаем *Apply*.

Кнопкой *Yes* подтверждаем удаление исходной кривой.

9. Добавить кромку поверхности.

Устанавливаем сочетание *Edit/Surface/Edge*.

Ниже нажимаем среднюю кнопку-пиктограмму *Add Edge* (добавить кромку).

Используем опцию «*Retain Long Portion of Edges*» (оставить большую часть периметра).

Для поля «*Surface*» указываем поверхность 1, а для поля «*Curve List*» – лежащие на ней кривые 1 и 4.

Если требуется, нажимаем *Apply*.

10. Построить полуокружность.

Устанавливаем сочетание *Create/Curve/2D ArcAngles*.

В соответствующие поля вводим:

«*Radius*»: 2 (радиус, мм)

«*Start Angle*»: -90 (начальный угол, град)

«*End Angle*»: 90 (конечный угол, град)

«*Construction Plane List*»: *Coord 0.3* (плоскость построения перпендикулярна оси *Z* глобальной декартовой системы координат).

Активизируем поле «*Center Point List*» (центр дуги окружности) и указываем точку в вершине выреза (расположенную в середине дуги скругления).

При необходимости нажимаем *Apply*.

11. При помощи построенной на предыдущем шаге полуокружности разбить поверхность на две части.

Выбираем сочетание *Edit/Surface/Break*.

Используем установленную по умолчанию опцию *Curve* (разбиение при помощи кривой).

Для удаления исходной поверхности включаем флаг «*Delete Original Surfaces*».

Для поля «*Surface List*» указываем поверхность 1, а для поля «*Break Curve List*» – построенную на предыдущем шаге полуокружность.

При необходимости нажимаем *Apply*.

Кнопкой *Yes* подтверждаем удаление исходной поверхности.

12. Удалить лишние кривые.

Устанавливаем сочетание *Delete/Curve*.

Активизируем поле «*Curve List*» и в графическом окне, удерживая нажатой левую кнопку мыши, охватываем прямоугольником всю модель.

Если требуется, нажимаем *Apply*.

Геометрическая модель половины полосы с вырезом, состоящая из трех поверхностей, показана на рисунке 29.3. Напомним, что зеленым цветом изображаются простые поверхности, а пурпурным – сложные trimmed-поверхности.

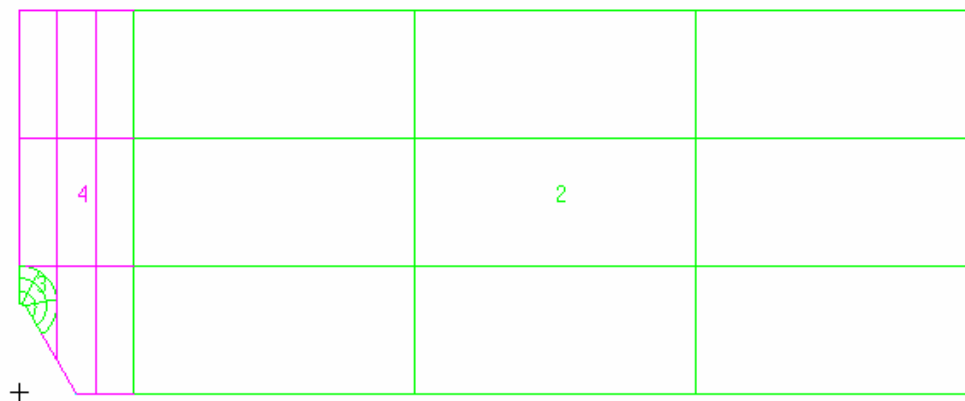


Рисунок 29.3 – Поверхности с нумерацией

13. Разбить поверхности на конечные элементы.

Запускаем приложение «Elements» и устанавливаем сочетание Create/ Mesh/Surface.

Выбираем:

«Elem Shape»: Quad (четырёхугольная форма)

«Mesher»: Paver (генератор свободных сложных сеток)

«Topology»: Quad4 (топология – четырёхугольник с четырьмя узлами).

Активизируем поле «Surface List» и в графическом окне указываем поверхность, окружающую вершину выреза (Surface 3).

В разделе «Global Edge Length» отключаем опцию автоматического вычисления глобальной длины стороны элемента и в поле «Value» вводим значение 0.2 (в мм). *Apply*.

Затем для поля «Surface List» указываем прямоугольную поверхность (Surface 2) и в области «Value» вводим значение 1 (в мм). *Apply*.

В конце указываем trimmed-поверхность (Surface 4) и для глобальной длины стороны элемента вводим значение 0.5 (в мм). *Apply*.

14. Сшить конечно-элементную модель.

Устанавливаем сочетание Equivalence/All/Tolerance Cube.

Ничего не меняя, нажимаем *Apply*. При этом места сшивки модели обводятся кружочками.

Получаемая здесь разбивка показана на рисунке 29.4.

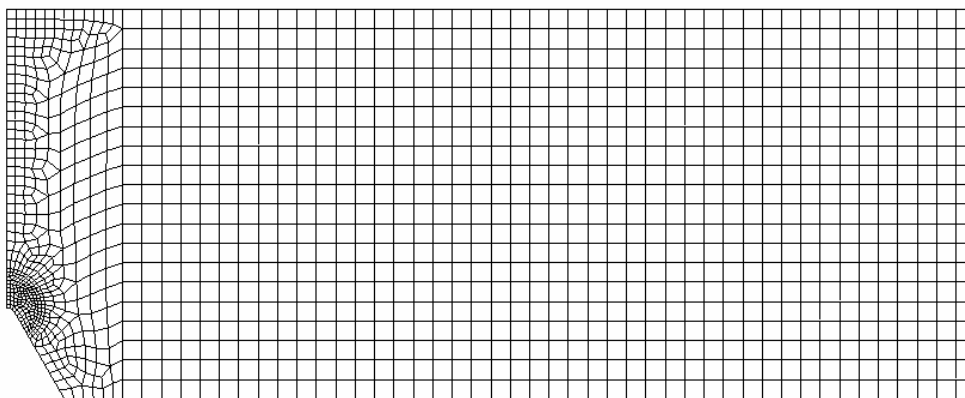


Рисунок 29.4 – Конечно-элементная сетка

15. Построить поле свойств материала, описывающее диаграмму деформирования.

Запускаем приложение «Fields» и устанавливаем сочетание Create/Material Property/Tabular Input.

В области ввода «Field Name» вводим имя поля свойств материала, например *diagram*.

В списке активных независимых переменных «Active Independent Variables» снимаем флаг «Temperature (T)» (температура) и устанавливаем флаг «Strain (e)» (деформация).

Для ввода данных нажимаем кнопку *Input Data*.

При этом появляется дополнительное окно с таблицей, содержащей два столбца (рисунок 29.5). Для ввода значения здесь необходимо активизировать соответствующую ячейку таблицы, набрать в поле «Input Data» нужное число и нажать клавишу *Enter*.

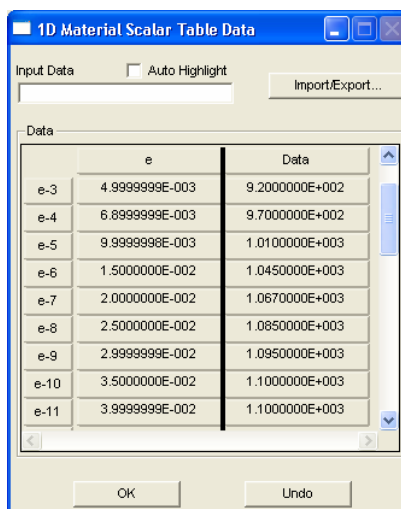


Рисунок 29.5 – Табличное задание поля

Последовательно вводим 11 точек диаграммы из таблицы 29.1.

Закрываем дополнительное окно кнопкой *OK*.

В конце нажимаем *Apply*.

Для проверки правильности задания поля отобразим его в виде двухмерного графика (действие *Show*).

В списке «*Select Field To Show*» выделяем строку *diagram*.

Нажимаем *Specify Range* (задать диапазон) и в соответствующие поля вводим:

«*Minimum*»: 0 (минимальное значение переменной e)

«*Maximum*»: 0.04 (максимальное значение переменной e)

«*No. of Points*»: 20 (число точек)

OK.

После нажатия *Apply* в отдельном окне появляется график, а рядом – таблица значений. Закрываем ее кнопкой *Cancel*.

Для закрытия окна с графиком следует воспользоваться кнопкой *Unpost Current XYWindow*.

16. Задать свойства материала.

Запускаем приложение «*Materials*» и устанавливаем сочетание *Create/Isotropic/Manual Input*.

В поле «*Material Name*» вводим имя материала, например *steel*.

Далее нажимаем кнопку *Input Properties* (ввод свойств). При этом появляется дополнительное окно, где по умолчанию установлена линейно-упругая модель состояния (*Linear Elastic*).

В соответствующие поля вводим:

«*Elastic Modulus*» = $2e5$ (модуль упругости в МПа)

«*Poisson Ratio*» = 0.3 (коэффициент Пуассона)

OK.

Нажимаем кнопку *Apply*. При этом вновь созданная модель материала должна появиться в списке существующих материалов «*Existing Materials*».

Для задания пластических свойств снова нажимаем *Input Properties*.

В выпадающих меню выбираем:

«*Constitutive Model*»: *Elastoplastic* (упругопластическая модель состояния)

«*Nonlinear Data Input*»: *Stress/Strain Curve* (ввод кривой $\sigma - \varepsilon$)

«*Yield Function*»: *Von Mises* (функция текучести Мизеса)

«Hardening Rule»: Isotropic (изотропное упрочнение).

Активизируем область ввода «Stress/Strain Curve =>» и ниже в списке имеющихся полей свойств материалов выбираем *diagram*. *OK*.

В конце опять нажимаем кнопку *Apply*.


17. Определить свойства элементов.

Выбираем приложение «Properties». Для задания свойств плоских элементов устанавливаем сочетание *Create/2D/2D Solid*.

В поле «Property Set Name» вводим имя набора свойств, например *band*.

Установленные по умолчанию опции *Plane Strain* (плоская деформация) и *Standard Formulation* (стандартная формулировка) нас устраивают.

Далее нажимаем *Input Properties* (ввод свойств).

Нажимаем кнопку  и из списка существующих материалов выбираем *steel*, *OK*.

Затем для выбора области приложения введенных свойств нажимаем кнопку *Select Application Region*.

Активизируем поле «Select Members» и указываем все три поверхности, пользуясь зоной выбора в виде прямоугольника.

Последовательно нажимаем *Add*, *OK* и *Apply*.

18. Задать граничные условия.


Граничные условия для рассматриваемой задачи представляют собой условия симметрии на линии отсечения моделируемой части полосы.

Запускаем приложение «Loads/BCs» и для задания перемещений устанавливаем сочетание *Create/Displacement/Nodal*.

В поле «New Set Name» вводим имя вновь создаваемого набора, например *sym*.

Нажимаем кнопку *Input Data* (ввод данных) и в поле «Translations» (попутательные перемещения) вводим $\langle 0, \rangle$, что соответствует запрету перемещений в направлении оси *X*. *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кривая или кромка) и указываем две левые кромки, расположенные на оси симметрии.


Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

Отметим, что после задания условий симметрии модель имеет еще возможность перемещения как жесткое целое в направлении оси Y . Поэтому здесь следует наложить одну дополнительную связь.

В поле «New Set Name» вводим другое имя, например *u*.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Translations» вводим $\langle,0,\rangle$, что соответствует запрету перемещений в направлении оси Y . *OK*.

Нажимаем *Select Application Region*.

Активизируем поле «Select Geometry Entities», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (точка или вершина) и указываем одну точку, например правую нижнюю.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

19. Приложить нагрузку.


В том же приложении выбираем сочетание *Create/Pressure/Element Uniform*.

В поле «New Set Name» вводим имя нового набора, например *load*.

В качестве типа целевых элементов выбираем поверхностные, т.е. «Target Element Type»: *2D*.

Нажимаем кнопку *Input Data* и в поле «Edge Pressure» (давление на кромке) вводим значение -1000 (положительное давление направлено к поверхности и вызывает сжатие, а в нашем случае необходимо задать растяжение, поэтому мы вводим отрицательное число). *OK*.

Далее нажимаем кнопку *Select Application Region*. Для выбора геометрических объектов устанавливаем опцию «Select»: *Geometry*.

Активизируем поле «Select Surfaces or Edges», в пиктографическом меню выбора нажимаем кнопку  (кромка) и указываем правую кромку модели.

Последовательно нажимаем кнопки *Add*, *OK* и *Apply*.

20. Запустить задачу на счет.

Выбираем приложение «Analysis» и устанавливаем сочетание *Analyze/Entire Model/Full Run*.

Для изменения типа решения нажимаем кнопку *Solution Type* и выбираем *Nonlinear Static* (нелинейный статический анализ), *OK*.

Затем для модификации расчетного случая нажимаем кнопку *Subcases*.

В списке доступных расчетных случаев «Available Subcases» указываем *Default*. Данное имя должно появиться в поле «Subcase Name».

Для изменения параметров расчетного случая используем кнопку *Subcase Parameters*.

В поле «Number of Load Increments» вводит число ступеней (или шагов) нагружения, например 25. *OK*.

Для включения опции вывода промежуточных решений нажимаем кнопку *Output Requests* (запросы по выводу). В выпадающем меню «Form Type» (тип окна) выбираем пункт *Advanced* (расширенный) и устанавливаем «Intermediate Output Option»: *Yes* (выводить результаты для каждого вычисленного шага нагружения).

Кроме того, для дополнительного вывода деформаций в верхнем списке «Select Result Type» указываем строку *Element Strains* (деформации в элементах), *OK*.

Последовательно нажимаем *Apply* и *Cancel*.

И наконец, для запуска задачи на счет нажимаем кнопку *Apply* основной диалоговой панели приложения.

21. Присоединить файл результатов расчета к базе данных программы MSC.Patran.


В том же приложении для доступа к результатам расчета устанавливаем сочетание *Access Results/Attach XDB/Result Entities*.

Нажимаем кнопку *Select Results File* и в появившемся окне выбираем файл *lab13.xdb*, *OK*.

В заключение нажимаем *Apply*.

22. Включить анимацию распространения пластической зоны вблизи вершины выреза по мере возрастания нагрузки.

Запускаем приложение «Results» и устанавливаем сочетание *Create/Fringe*.

В разделе «Select Result Cases» выбираем сразу все случаи результатов, соответствующие различным ступеням нагружения. При этом для раскрытия списка случаев результатов следует отжать кнопку .

В списке «Select Fringe Result» указываем строку *Nonlinear Strain, Plastic Strain* (нелинейные деформации, пластические деформации).

Включаем опцию «Animate».

Далее нажимаем последнюю кнопку с кинолентой .

Для анимации по глобальной переменной выбираем «Animation Method»: *Global Variable*.

В поле «Number of Frames» (число кадров) вводим значение 25 для получения более плавной анимации.

И наконец, нажимаем кнопку *Apply*.

Некоторое время займет формирование видео файла, после чего в графическом окне будет представлена анимация процесса распространения пластической зоны. Кроме того, появится дополнительная панель «Animation Control».

Скорость анимации здесь регулируется бегунком «Animation Speed».

В случае необходимости изменения опций здесь следует временно прервать процесс анимации, установив флаг «Pause Animation».

Для полного завершения процесса анимации необходимо нажать одну из кнопок раздела «Stop Animation and ...».

Поле пластических деформаций при полной нагрузке представлено на рисунке 29.6.

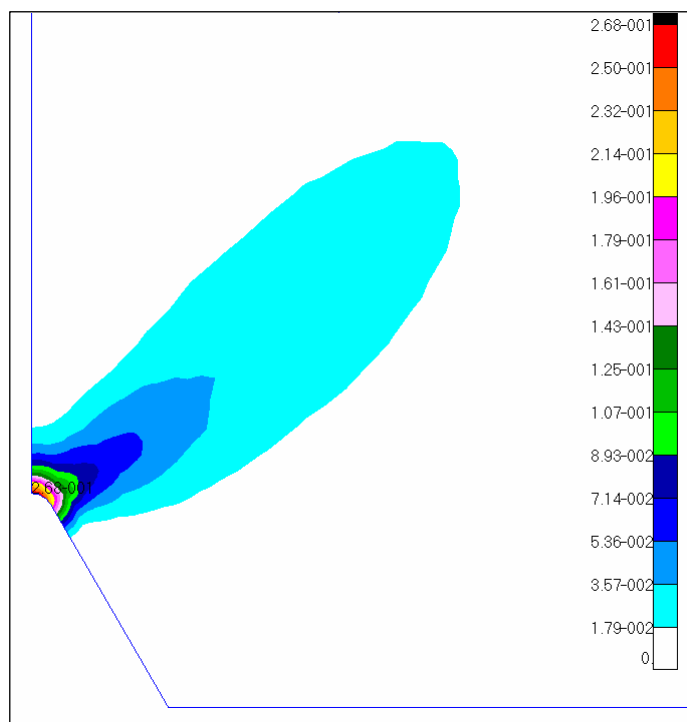



Рисунок 29.6 – Пластические деформации

23. Включить анимацию изменения поля напряжений по Мизесу по мере возрастания нагрузки.

Нажимаем кнопку-пиктограмму .

Следует отметить, что в списке «Select Fringe Result» для многоцветного изображения полей напряжений содержатся три величины: Stress Tensor (тензор напряжений); Nonlinear Stresses, Stress Tensor (нелинейные напря-

жения, тензор напряжений) и Nonlinear Stresses, Equivalent Stress (нелинейные напряжения, эквивалентное напряжение).

Для нелинейного элемента CQUAD4 первые две величины выдают одинаковые значения компонент, причем напряжения σ_{zz} полагаются равными нули. Однако в случае плоской деформации это не соответствует действительности, что приводит к некорректному вычислению эквивалентных напряжений.

Поэтому для правильного расчета напряжений по Мизесу здесь следует указать строку Nonlinear Stresses, Equivalent Stress.

Для включения процесса анимации нажимаем *Apply*.

Поле напряжений по Мизесу при полной нагрузке показано на рисунке 29.7.

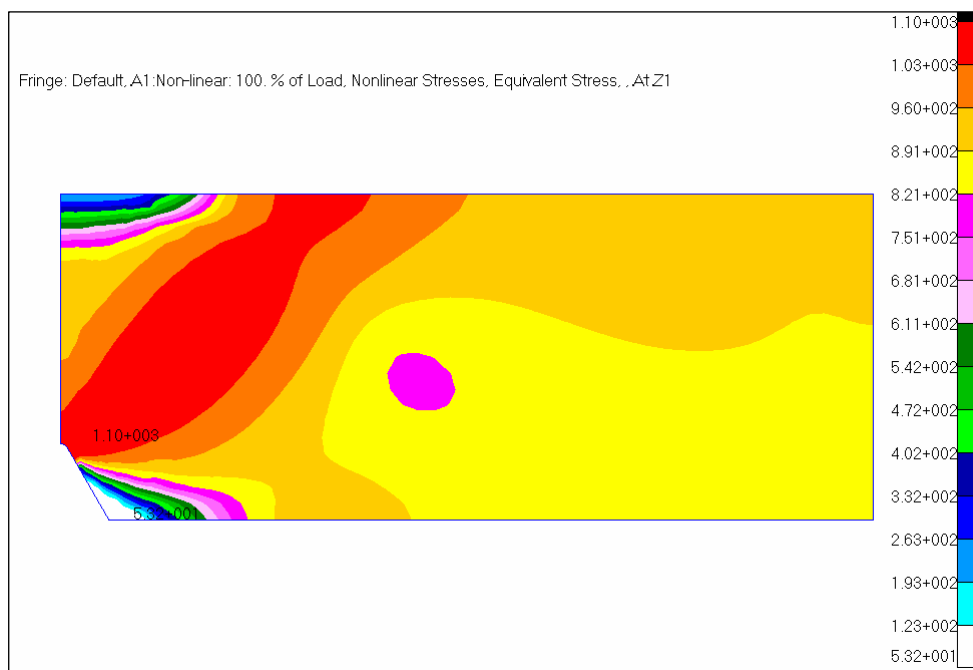


Рисунок 29.7 – Поле напряжений по Мизесу (в МПа)

24. Выйти из программы: *File > Quit*.