

Министерство образования Российской Федерации

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра "Строительная механика корабля и сопротивление материалов"

Введение в систему конечно-элементного анализа

COSMOS/M

на примерах плоской задачи теории упругости

Часть I

Методические разработки

Нижний Новгород
2000

Составители: А.Н. Дербасов, С.А. Сергеева

УДК 539.3/6(076)

Введение в систему конечно-элементного анализа COSMOS/M
на примерах плоской задачи теории упругости: Ч.1/ НГТУ;
Сост.: А.Н. Дербасов, С.А. Сергеева;
Н. Новгород, 2000. – 28 с.

Методические разработки предназначены для студентов, обучающихся по специальности "Динамика и прочность машин" при изучении дисциплины "Компьютерная механика". Содержит задания и примеры их выполнения. Оно пригодно для студентов других специальностей при изучении дисциплин "Сопротивление материалов" и "Механика деформируемого твердого тела", а также в качестве начального курса в переподготовке по САПР инженеров-конструкторов.

Научный редактор В.М. Волков

Редактор И.И. Морозова

Подп. к печ. 20.01.00. Формат 60×84¹/16. Бумага газетная. Печать
офсетная. Печ. л. 1,75. Уч.-изд. л. 1,9. Тираж 200 экз. Заказ 41.

Нижегородский государственный технический университет.
Типография НГТУ. 603600, Н.Новгород, ул. Минина, 24.

© Нижегородский государственный
технический университет, 2000

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное развитие науки и техники тесно связано с использованием персональных ЭВМ, ставших рабочим инструментом ученого, инженера, конструктора.

В настоящее время расчеты, геометрические и графические построения, информационная обработка осуществляются на вычислительной технике нового поколения – персональных компьютерах (personal computer), в аббревиатуре РС. Широкое распространение получили системы автоматического проектирования (САПР), называемые на английском языке CAD (computer aided design – компьютерно-ориентированное проектирование) [1]. (Список литературы во второй части методических разработок.)

Вычислительные задачи, возникающие при расчетах конструкций на прочность и жесткость, можно разбить на ряд элементарных операций: решение систем линейных алгебраических уравнений, нахождение собственных значений, вычисление интегралов, решение систем дифференциальных уравнений, определение экстремумов функций и т.д., для вычисления которых разработаны различные математические пакеты типа МАТКАД, МАТЛАБ, системы символьной математики Mathematica [2].

Применение ЭВМ может быть различным в зависимости от “оригинальности” или “стандартности” задачи, необходимой точности результата, наличия пакета прикладных программ и т.д. Если задача “нестандартна” и не очень сложна, то для ее решения легче составить программу на одном из языков программирования, чем искать возможность ее решения с помощью пакета прикладных программ.

Если задача “стандартна” с точки зрения вычислительных процедур, то для ее решения легче использовать математические пакеты, реализующие различные вычислительные процедуры (вычисление интегралов, матричная алгебра, решение систем дифференциальных уравнений и т.д.) в удобной для использования форме, где пользователю (студенту) достаточно понимать физическую сторону проблемы, уметь готовить исходную и интерпретировать выходную информацию [3].

Третий подход использования ЭВМ – применение систем автоматизированного проектирования, позволяющих выполнять прочностные, жесткостные и динамические расчеты в режимах, аналогичных текстовым, графическим, музыкальным и т.д. редакторам, что составляет ныне круг новой дисциплины – сопроматки, являющейся частью инженерной информатики [1]. Этому подходу и посвящена настоящая разработка.

В процессе эволюции различных методов расчета напряженно-деформированного состояния конструкций с помощью ЭВМ наиболее эффективным оказался метод конечных элементов (МКЭ), трудоемкий при ручном счете и легко реализуемый на ЭВМ. На основании МКЭ в мире разработано много пакетов прикладных программ, одним из которых является COSMOS/M.

Пакет COSMOS/M позволяет вести конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния тел, обтекания тел жидкостью, теплопередач в различных телах, т.е. расчеты по основным дисциплинам технических специальностей.

Система конечно-элементного анализа (в учебном варианте) состоит из двух частей: GEOSTAR и MODSTAR. Графический препроцессор GEOSTAR является системой геометрического моделирования на базе описания ключевых точек, параметров кривых, поверхностей и объемов. С помощью модуля MODSTAR осуществляется расчет напряжений

и перемещений сконструированной в GEOSTAR конечно-элементной модели. Результат выдается в цифровой и графико-цветовой формах.

Методические разработки состоят из двух частей. В первой части в краткой форме приводятся основные положения метода конечных элементов, необходимые для физического осмысления вычислительных процессов, и на двух примерах плоской задачи теории упругости рассматривается процедура построения конечно-элементной модели с последующим анализом напряженно-деформированного состояния модели.

Во второй части приводится подробное описание команд графического препроцессора GEOSTAR и модуля MODSTAR, входящих в примеры первой части разработок. Завершаются разработки индивидуальными заданиями для выполнения анализа напряженно-деформированного состояния с помощью системы конечно-элементного анализа COSMOS/M.

Цель настоящих методических разработок – на примерах плоской задачи теории упругости дать начальные сведения по работе в системе конечно-элементного анализа COSMOS/M с последующим самостоятельным углублением в силу профессиональной или иной заинтересованности. Поэтому подробно рассматриваются только те команды, которые встречаются в примерах. В случае необходимости в других командах информацию о них можно получить с помощью диктограммы HELP на английском языке или в электронном русскоязычном сопровождении системы (файлы.doc).

Чтобы овладеть навыками работы в системе COSMOS/M в общем нет необходимости знать подробно метод конечных элементов, достаточно интуитивно чувствовать основные положения метода и хорошо знать физическую сторону задачи, излагаемую в дисциплинах "Сопrotивление материалов" и "Механика деформируемого твердого тела".

Освоив навыки работы в системе COSMOS/M, студент будет владеть логикой компьютерного анализа напряженно-деформируемого состояния конструкций, в инструментальной основе отличающейся от традиционной.

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В отличие от традиционных методов решения задач в МКЭ начинают не с дифференциальных или интегральных уравнений, описывающих поведение среды, а с разработки конечно-элементной модели и с изучения свойств элементов конечных размеров. При установлении этих свойств используются уравнения, описывающие поведение сплошной среды, но размеры элементов среды остаются все время конечными. В результате конструкция с бесконечным числом степеней свободы представляется дискретной моделью, имеющей конечное число степеней свободы.

Покажем на примере пластины, деформирующейся в своей плоскости, сущность МКЭ, рассматривая основные этапы его приложения.

1.1.1. Построение конечно-элементной модели

Разобьем пластину рис.1,а на конечные, например, треугольные элементы. Действие распределенной нагрузки приближенно заменим нагрузкой, сосредоточенной в узлах. Перемещения пластины будут характеризоваться перемещениями ее узлов (каждый i -й узел имеет два перемещения: U_i - горизонтальное, V_i - вертикальное). Полученная таким образом конечно-элементная модель показана на рис.1,б. Она характеризуется узлами и элементами. Процедура построения конечно-элементной модели в COSMOS/M осуществляется с помощью графического препроцессора GEOSTAR.

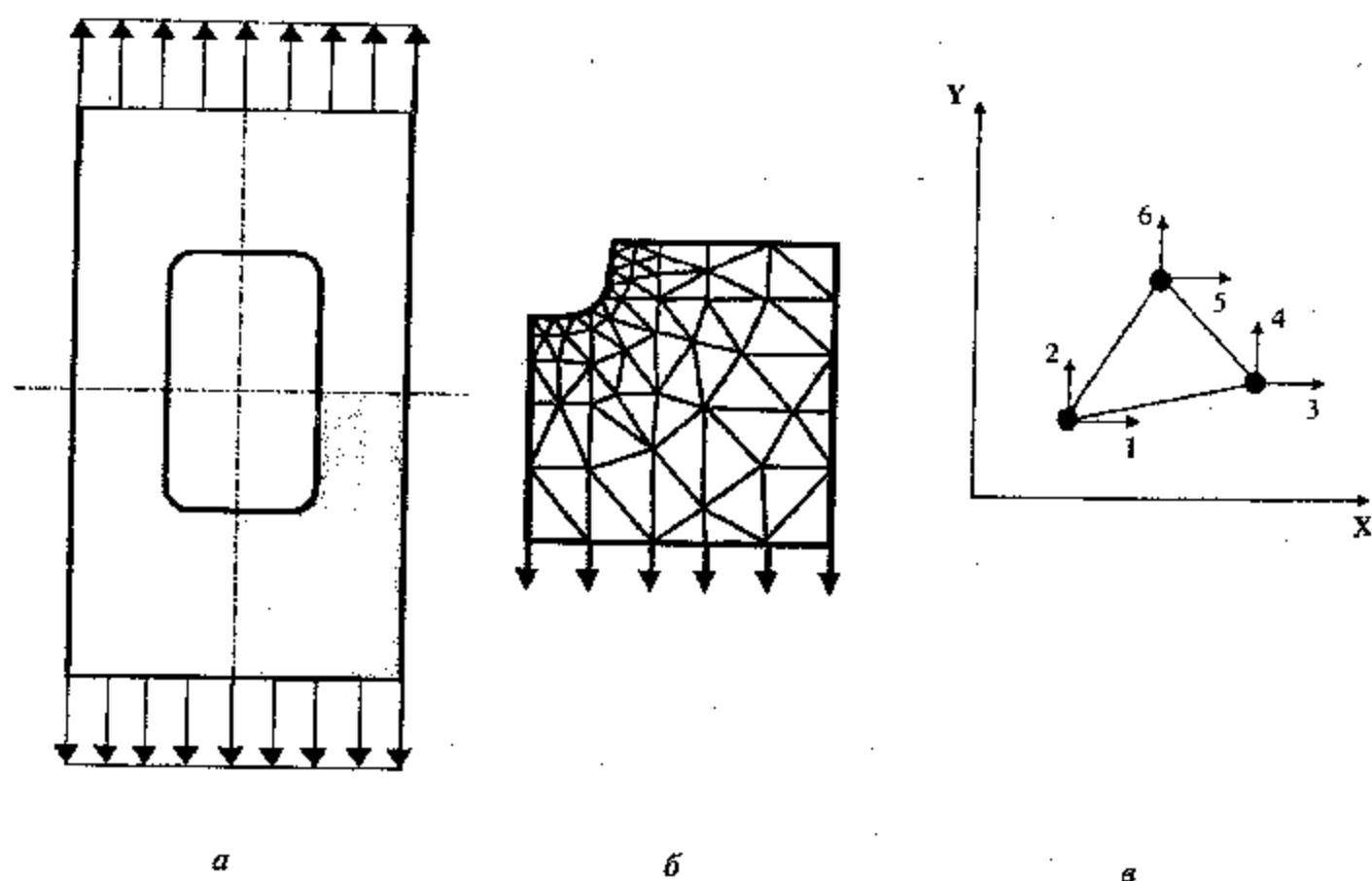


Рис. 1. Дискретизация пластины:
 а-общий вид, б-конечно-элементная модель, в-конечный элемент

1.1.2. Построение зависимостей, характеризующих упругие свойства элемента

Выделим из конечно-элементной модели треугольный конечный элемент с тремя узлами и пронумеруем перемещения его узлов и усилия, возникающие в этих узлах (рис. 1, в). Действие отброшенных элементов заменим усилиями $\{R\} = \{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6\}^T$. Так как положение КЭ в пространстве определяется вектором узловых перемещений элемента $\{q\} = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\}^T$, содержащим шесть компонентов узловых перемещений, то это позволяет предположить закон изменения перемещений по полю элемента в виде

$$\begin{cases} u(x, y) = \alpha_1 + \alpha_3 x + \alpha_5 y, \\ v(x, y) = \alpha_2 + \alpha_4 x + \alpha_6 y, \end{cases} \quad (1)$$

где $u(x, y), v(x, y)$ - соответственно горизонтальные и вертикальные перемещения любой точки КЭ с координатами x, y .

Выражение (1) можно переписать в матричном виде:

$$\{u\} = [A] \{\alpha\}, \quad (2)$$

где $\{u\} = \{u, v\}^T$ - вектор перемещений;

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x & 0 & y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x & 0 & y \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\{\alpha\} = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6\}^T.$$

В зависимости (1) число коэффициентов α_i взято равным числу узловых перемещений элемента (в данном случае 6). Это позволяет выразить $\{\alpha\}$ через $\{q\}$. Подстановка значений узловых координат в выражение (2) дает

$$\{q\} = [B] \{\alpha\}, \quad (4)$$

где

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_1 & 0 & y_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x_1 & 0 & y_1 \\ 1 & 0 & x_2 & 0 & y_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x_2 & 0 & y_2 \\ 1 & 0 & x_3 & 0 & y_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & x_3 & 0 & y_3 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Отсюда

$$\{\alpha\} = [B]^{-1} \{q\}, \quad (6)$$

Подставляя $\{\alpha\}$ в (2), получаем связь между перемещениями $\{u\}$ по полю элемента и узловыми перемещениями $\{q\}$:

$$\{u\} = [N] \{q\}, \quad (7)$$

где

$$[N] = [A][B]^{-1}.$$

Выражение (7) определяет распределение перемещений $u(x, y), v(x, y)$ по полю элемента в зависимости от узловых перемещений.

Деформированное состояние элемента характеризуется вектором деформаций $\{\epsilon\} = \{\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z\}^T$, компоненты которого связаны с компонентами перемещений зависимостями Коши:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

или в матричной записи, с учетом (1) и (6):

$$\{\varepsilon\} = [H][B]^{-1}\{q\}, \quad (9)$$

где

$$[H] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Матрица $[H]$ получается в результате дифференцирования выражения (1) по зависимостям (8).

Напряженное состояние элемента определяется вектором напряжений $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}^T$, который на основании закона Гука для ортотропного материала связан с $\{\varepsilon\}$ зависимостью

$$\{\sigma\} = [E_\varepsilon]\{\varepsilon\}, \quad (11)$$

$$[E_\varepsilon] = \begin{bmatrix} \frac{E_x}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{E_x \nu_{yx}}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ \frac{E_x \nu_{xy}}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} & \frac{E_y}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix}$$

где E_x, E_y (модули упругости), ν_{xy}, ν_{yx} (коэффициенты Пуассона), G (модуль сдвига) – параметры, характеризующие упругие свойства элемента.

Если исключить теперь с помощью (9) вектор $\{\varepsilon\}$ из правой части (11), то получим выражение, определяющее напряжения в элементе по известным значениям его узловых перемещений:

$$\{\sigma\} = [E]\{q\}, \quad (12)$$

где $[E] = [E_\varepsilon][H][B]^{-1}$ – матрица напряжений.

Теперь, когда напряженное (12) и деформированное (9) состояния элемента определяются через его узловые перемещения, можно определить потенциальную энергию e -го элемента через его узловые перемещения:

$$\Delta U_e = \frac{1}{2} \int_F (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dF - \{q\}_e^T \{R\}_e \quad (13)$$

или

$$\Delta U_e = \frac{1}{2} \int_F \{\sigma\}^T \{\varepsilon\} dF - \{q\}_e^T \{R\}_e. \quad (14)$$

где F - площадь элемента.

Подставляя сюда зависимости (12) и (9), а также учитывая правило транспонирования произведения матриц (матрицы перечисляются в противоположном порядке), получим

$$\Delta U_e = \frac{1}{2} \{q\}_e^T [K]_e \{q\}_e - \{q\}_e^T [R]_e. \quad (15)$$

где $[K]_e = \int_F ([B]^{-1})^T [H][E_e][H][B]^{-1} dF$ - матрица жесткости

рассматриваемого конечного элемента. Она полностью определяет его жесткостные свойства. Так как матрицы, входящие в это выражение не зависят от координат X и Y , то

$$[K]_e = F ([B]^{-1})^T [H][E_e][H][B]^{-1}. \quad (16)$$

Минимизируя потенциальную энергию конечного элемента, получим выражение, которое описывает равновесие конечного элемента

$$\frac{\partial \Delta U_e}{\partial \{q\}_e} = 0 \Rightarrow \{R\}_e = [K]_e \{q\}_e. \quad (17)$$

Установление зависимости (17) между узловыми перемещениями и узловыми усилиями является основным этапом при использовании МКЭ. Эта процедура "вшита" в модуль MODSTAR и автоматически осуществляется по выбранному типу элемента.

1.1.3. Построение системы разрешающих алгебраических уравнений

Система линейных алгебраических уравнений для определения перемещений всей конечно-элементной модели может быть получена путем рассмотрения равновесия каждого узла от действия внешних сил, приложенных в этом узле, и сил от действия сходящихся в этом узле элементов. Эта процедура очень трудоемкая при ручном счете, легко реализуется на ЭВМ. В результате приходим к системе линейных алгебраических уравнений

$$[K]\{q\} = \{Q\}, \quad (18)$$

где

$[K]$ - матрица жесткости всей конечно-элементной модели. Она автоматически формируется в MODSTAR по геометрии и топологии модели из матриц жесткостей отдельных элементов;

- $\{q\}$ - вектор узловых перемещений модели при их сквозной нумерации. Эта процедура также осуществляется автоматически по геометрии модели;
- $\{Q\}$ - вектор узловых усилий. Формируется автоматически в GEOSTAR при нагружении.

1.1.4. Определение напряжений

С помощью зависимости (12) по найденным узловым перемещениям можно определить напряжения внутри каждого элемента. Эта процедура реализована в модуле MODSTAR, и результаты выводятся в графико-цветовой форме.

1.2. СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ГРАФИЧЕСКОГО ПРЕПРОЦЕССОРА GEOSTAR

1.2.1. Описание экрана GEOSTAR

На рис. 2 показан графический экран, появляющийся на мониторе компьютера в начале сеанса. Экран разделен на пять основных частей:

1. Главное меню, расположенное в виде строки в верхней части экрана.
2. Пиктограммы, расположенные вертикально в правой части экрана.
3. Диалоговая зона для введения команд от подсказки GEO>, расположенная горизонтально в нижней части экрана.
4. Рабочее поле, покрывающее большую часть экрана в центре, где графически показывается формирование конечно-элементной модели конструкции из точек, кривых, поверхностей и объемов, закрепление и нагружение конструкции.
5. Информационная зона в нижнем правом углу, где указывается номер версии GEOSTAR, дата и время проведения сеанса.

1.2.2. Главное меню команд GEOSTAR

Главное меню обеспечивает доступ к различным командам, необходимым при формировании конечно-элементной модели конструкции, с помощью мыши. Для этого достаточно установить курсор мыши в нужной позиции и щелкнуть левой кнопкой мыши. Чтобы убрать выпадающее при этом меню, нужно щелкнуть правой кнопкой мыши. Все команды GEOSTAR сгруппированы по следующим разделам главного меню:

- GEOMETRY - команды, связанные с геометрическими образованиями модели из точек, кривых, поверхностей и объемов.
- MESHING - команды, относящиеся к разбиению геометрической модели на узлы и конечные элементы.
- PROPSET - команды, определяющие тип конечного элемента и соответствующие ему физические характеристики, такие, как модули упругости, коэффициенты Пуассона, момент инерции, площади и т.д.
- FD_CONDS - команды, определяющие перемещения, граничные условия, нагрузку, действующую на конструкцию.
- DISPLAY - группа команд, применяемых при изображении геометрии, что способствует лучшему графическому изменению моделей в процессе разработки.
- CONTROL - этот раздел содержит команды, используемые для активизации и контроля в процессе построения конечно-элементной модели.
- WINDOW - группа команд, используемых для многооконного представления объектов (может быть определено до пяти окон, причем каждое

MISC - работает как независимый экран).
- группа команд, используемых для смешанных операций.

1.2.3. Пиктограммы и функции

Пиктограмма представляет собой условное изображение информационного объекта или операции и предназначена для интерактивного режима пользователя на экране. Для активизации или деактивизации необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши на соответствующей пиктограмме. Ниже дано краткое объяснение функций пиктограмм.

- ABORT - используется для прерывания команд. Клавиша "ESC" на клавиатуре также выполняет эту задачу.
- HELP - выдает полную информацию о команде, набранной в диалоговой зоне экрана.
- PNT - используется для прорисовки или перерисовки экрана. Результатом является очищение и перепостроение всех уже созданных примитивов.
- CLS - очищает экран.
- PIC - позволяет вводить с помощью мыши координаты ключевой точки.
- SEL - реализует с помощью мыши процесс указания. Например, при активизированной пиктограмме с помощью команд NIDEN и EIDEN можно определить номер узла с его координатами и номер элемента.
- REP - активизация этой пиктограммы дает возможность многократно повторять одну и ту же команду несколько раз.
- F_C - эта пиктограмма указывает цвет, каким будут прорисовываться рассматриваемые примитивы. Щелкая правой кнопкой мыши по этой пиктограмме, можно последовательно выбрать нужный цвет точек и линий.
- B_C - определяет цвет фона рисунка. Правой кнопкой мыши по этой пиктограмме можно последовательно выбрать нужный цвет фона.

1.2.4. Ввод команд

Команду можно ввести любым из следующих способов:

- с клавиатуры;
- из ниспадающего меню.

Используя клавиатуру, можно вводить любую команду независимо от команд, предлагаемых в меню. Далее через запятые необходимо набрать параметры, входящие в данную команду. Если этого не сделать и нажать Enter, то система сама начинает подсказывать какие параметры необходимо ввести. Ввод команд с клавиатуры требует хорошего знания команд системы. В этом случае обеспечивается высокая скорость диалога. Если щелкнуть левой кнопкой мыши в соответствующем разделе главного меню, то высветится ниспадающее меню, имеющее древовидную структуру. Выбирая левой кнопкой мыши нужную команду, мы получаем команду в диалоговой зоне. Далее через запятые набираются необходимые параметры. Чтобы отменить меню и подменю, используется правая кнопка мыши.

| GEOMETRY | MESHING | PROPSET | FD CONDS | DISPLAY | CONTROL | WINDOW | MISC |
|------------------------------|---------|---------|----------|---------|---------|--------|---|
| | | | | | | | ABORT |
| | | | | | | | HELP |
| | | | | | | | P N T |
| | | | | | | | C L S |
| | | | | | | | P I C |
| | | | | | | | SEL |
| | | | | | | | RRR EEE PPP |
| | | | | | | | F_C |
| | | | | | | | B_C |
| Problem name> или GEO> | | | | | | | COSMOS/M GeoStar D1.52a DATE 2-14-00 TIME 9:9:38 |

Рис.2

1.2.5. Пример 1 построения конечно-элементной модели

Для того чтобы работать с GEOSTAR и MODSTAR необходимо создать свою рабочую директорию (F7, Mkdir) по своей фамилии (например SIDOR) и обязательно работать из этой директории, т.к. все автоматически создаваемые файлы помещаются в рабочую директорию.

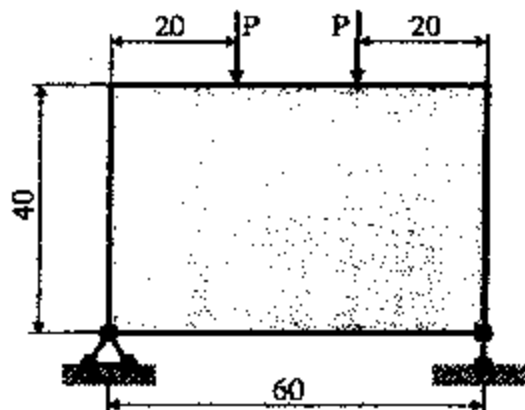
Задача. Выполнить расчет изотропной пластины, деформирующейся в своей плоскости, методом конечных элементов.

Размеры пластины 40×60 см, толщина 1 см.

Материал Ст 3: $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа} = 2,1 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2$ - модуль Юнга;

$\nu_{XY} = 0,3$ - коэффициент Пуассона.

Нагрузка: $P = 10^4 \text{ Н}$.



Решение

1. Создаем рабочую директорию по фамилии.
2. Открываем директорию.
3. В командной строке набираем GEOSTAR.

После выполнения этой команды на экране появляется главное меню GEOSTAR и приглашение

Problem name > Pgrim1 (даем имя задачи Pgrim1)

В результате в рабочей директории автоматически создаются рабочие файлы, важнейшим из которых является файл PRIM1.SES.

Разработка конечно-элементной модели состоит в последовательном вводе команд, которые автоматически записываются в сеансовый файл fname.ses (в нашем случае в файл Pgrim1.ses).

Примечание: Наименование файлов и команд можно набирать как строчными, так и прописными буквами.

После того как все команды будут введены, необходимо создать рабочий файл Pgrim1.geo в рабочей директории и скопировать в него Pgrim1.ses. Это необходимо для того, чтобы использовать файл Pgrim1.geo в соединении с командой FILE при уже ранее набранной конечно-элементной модели.

Таким образом, новый сеанс работы может быть осуществлен двумя путями:

- а) ввод команд с клавиатуры и меню команд;
- б) ввод с помощью команды FILE, Pgrim1.geo ранее сформированной конечно-элементной модели.

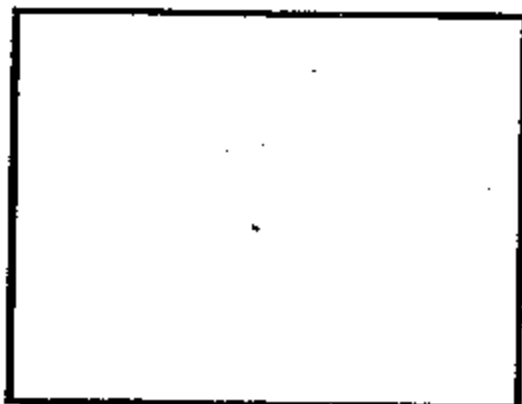
Замечание. Изменения в файле Pgrim1.geo можно производить в любом текстовом редакторе. Остальные файлы необходимо стереть, дать имя задаче Pgrim1 (или иное) и с помощью команды FILE заново создать базу данных. Иначе будут искажения.

Так как конечно-элементная модель задачи создается впервые, то ввод команд осуществляем с клавиатуры и меню команд.

4. Установка обзора

GEO > VIEW, 0, 0, 1

GEO > CLS, 1



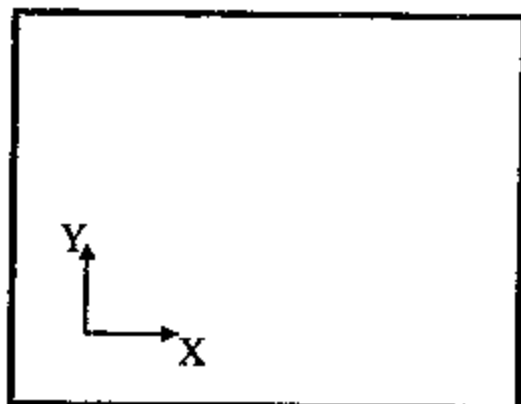
Установка направления взгляда.

Очистка экрана и установка цвета фона 1

(1- черный цвет).

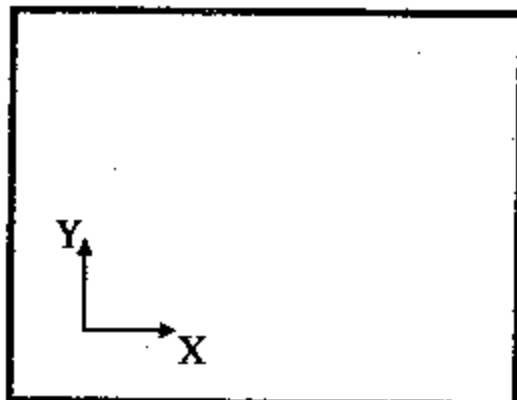
Эту команду можно осуществить пиктограммой В_С и затем пиктограммой CLS с помощью правой кнопки мыши.

GEO > AXIS, 1, 16



Нарисовать (1) (0 - убрать) координатные оси 16-м цветом (16 - белый цвет).

GEO > PLANE, Z, 0, 1



Определить плоскость, перпендикулярную оси Z на расстоянии 0 от начала координат. Тип линии сетки - 1 (непрерывная линия).

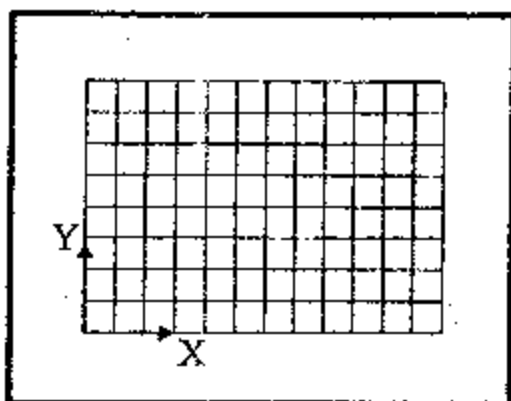
GEO > GRIDON, 0, 0, 5, 5, 12, 8, 2

Вычертить в указанной плоскости сетку.

Шаги сетки $\Delta x = 5$, $\Delta y = 5$;

число ячеек по оси X равно 12, по оси Y - 8; цвет линий сетки - 2 (серый).

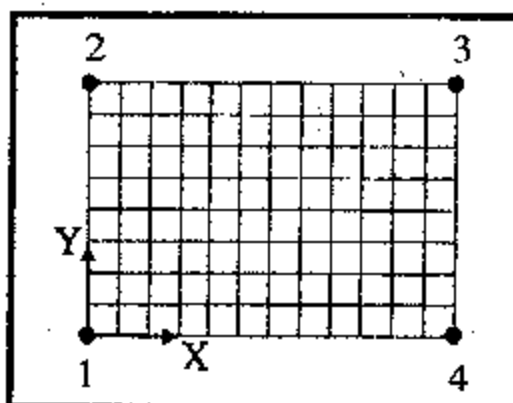
Замечание: Сетка нужна только для ориентировки на стадии рисования, поэтому команда GRIDON в Primitives не попадает.



Геометрия модели

5. Задание координат ключевых точек

GEO > PT, 1, 0, 0, 0 }
 GEO > PT, 2, 0, 40, 0 }
 GEO > PT, 3, 60, 40, 0 }
 GEO > PT, 4, 60, 0, 0 }



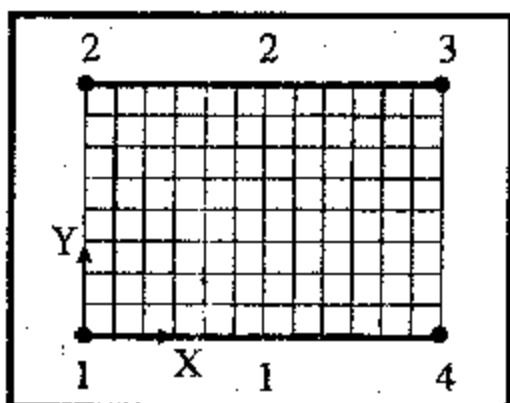
6. Задание кривых (в данном случае прямых)

GEO > CRLINE, 1, 1, 4

GEO > CRLINE, 2, 2, 3

Определить 1-ю прямую линию с началом в 1-й точке и концом в 4-й точке.

Определить 2-ю прямую линию с началом во 2-й точке и концом в 3-й точке.

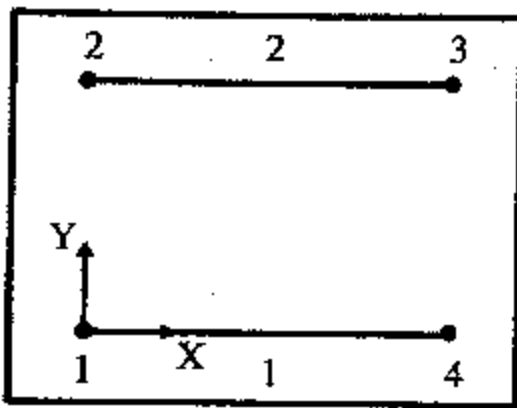


GEO > CLS

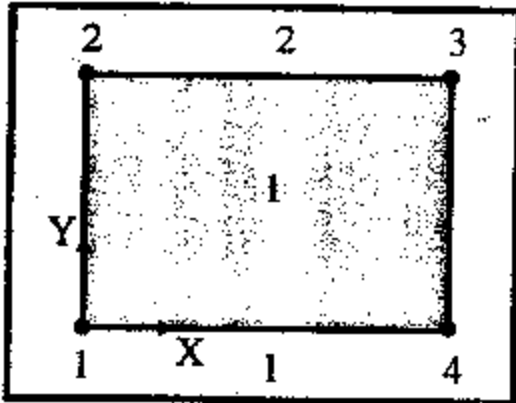
GEO > CRPLOT, 1, 2, 1

Очистить экран.

Вычертить кривые (в данном случае прямые) с 1-й по 2-ю с шагом 1.



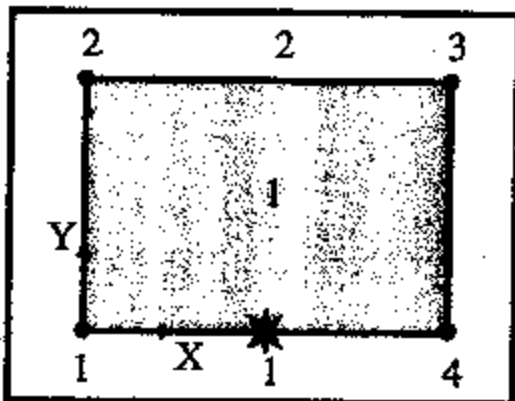
7. Задание поверхностей
 GEO > SF2CR, 1, 1, 2, 0



Описать поверхность №1 между граничными прямыми (кривыми) 1 и 2. Концы кривых соединить прямыми.

GEO > ACTMARK, SF, 1
 GEO > CLS
 GEO > SFPLOT, 1, 1, 1

Активизировать маркер ориентации поверхности и очистить экран.
 Отрисовать поверхности с 1-й по 1-ю с шагом 1. На кривой 1 появился маркер.



8. Установка элементных групп
 GEO > EGROUP, 1, PLANE2D

Определить элементную группу №1 с элементами PLANE2D и с опциями по умолчанию.

9. Установка свойств материала
 GEO > MPROP, 1, EX, 2.1E07

Задание модуля Юнга EX для набора материала №1 элементов PLANE2D.

GEO > MPROP, 1, NUXY, 0.3

Задание коэффициента Пуассона для набора материала №1 элементов PLANE2D.

10. Установка констант (толщины пластины)

GEO > RCONST, 1, 1, 1, 1, 1.0

Определить константу, связанную с элементной группой 1, как набор 1, начинающийся с единицы и включающий

GEO > SAVE

одно значение, как величину 1.0 для толщины.

Запись набранных команд в файл PRIM1.SES. Рекомендуется время от времени производить сохранение задачи.

11. Генерация конечно-элементной сетки

Выбор цвета конечно-элементной сетки делаем с помощью пиктограммы F_C.

GEO > M_SF, 1, 1, 1, 4, 6, 6, 1, 1

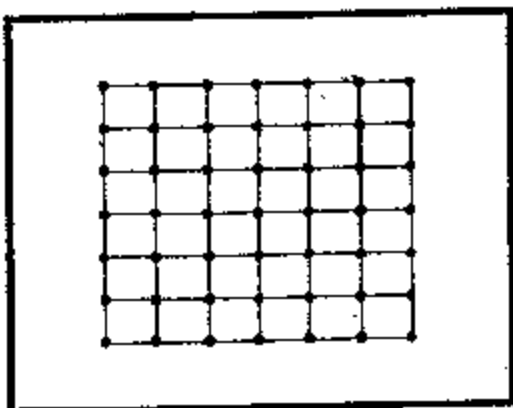
Разбить поверхности с 1-й по 1-ю с шагом 1, четырехузловыми элементами по 6 элементов вдоль сторон.

GEO > CLS

Очистка экрана с помощью пиктограммы CLS (иначе будет наложение изображений на экране).

GEO > EPLOT, 1, 36, 1

Вычерчивание полной конечно-элементной модели с 1-го элемента по 36-й с шагом 1 (все эти параметры подсчитываются автоматически и задаются по умолчанию).



12. Определение номеров узлов и элементов

Активируем пиктограмму SEL.

GEO > NIDENT

Определяем (идентифицируем) номер нужного нам узла, щелкнув левой кнопкой мыши по этому узлу. В результате около узла высвечивается его номер, а в диалоговом окне появляются его координаты.

Повторив команду NIDENT несколько раз, устанавливаем, что закрепление пластины надо произвести в узлах 1 и 7, а нагрузку приложить в узлах 45 и 47.

Аналогично, используя команду EIDENT, можно определить номера элементов.

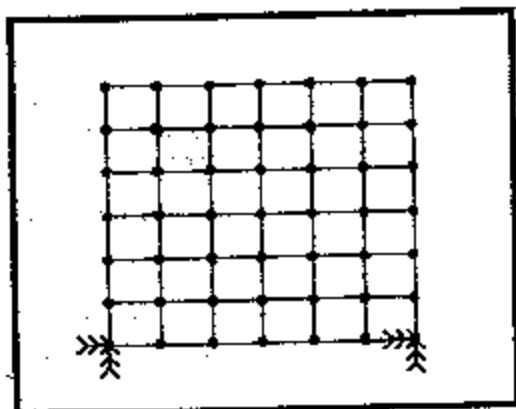
13. Закрепление конструкции

GEO > DND, 1, ALL, 0, 1, 1

Установить перемещения узлов с 1-го по 1-й с шагом 1 по всем направлениям равными нулю.

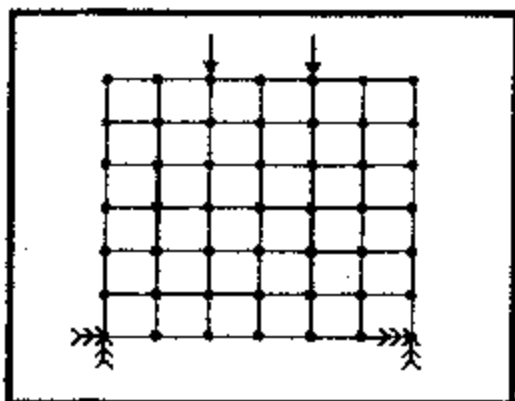
GEO > DND, 7, ALL, 0, 7, 1

Установить перемещения узлов с 7-го по 7-й с шагом 1 по всем направлениям равными нулю.



14. Нагружение конструкции
GEO > FND, 45, FY, -1.E4, 45, 1

GEO > FND, 47, FY, -1.E4, 47, 1



Приложить силу, равную -10^4 Н
в направлении оси Y в узлах с 45-го по 45-й
с шагом 1.

Приложить силу, равную -10^4 Н
в направлении оси Y в узлах с 47-го по 47-й
с шагом 1.

15. Оценка правильности построения модели

Этот этап обычно включает прорисовку всех элементов, граничных условий и приложенной нагрузки. Выбираем с помощью пиктограммы B_C голубой цвет фона экрана.

GEO > CLS

Очистка экрана; цвет фона меняется на голубой.

С помощью пиктограммы F_C выбираем белый цвет изображения.

GEO > NPLOT, 1, 49, 1

Прорисовать узлы с 1-го по 49-й с шагом 1. Эти параметры подсчитываются автоматически и вводятся по умолчанию. В результате появляется изображение узлов модели белого цвета.

Для изображения конечно-элементной сетки с помощью пиктограммы F_C выбираем зеленый цвет.

GEO > EPLOT, 1, 36, 1, 1

Прорисовать элементы с 1-го по 36-й с шагом 1. Эти параметры подсчитываются автоматически и вводятся по умолчанию. В результате появляется изображение конечно-элементной сетки зеленого цвета.

Для прорисовки граничных закреплений с помощью пиктограммы F_C выбираем желтый цвет.

GEO > DPLOT, 1, ALL, 49, 1

Прорисовать условия закрепления во всех направлениях в узлах с 1-го по 49-й с шагом 1. Эти параметры подсчитываются автоматически и вводятся по умолчанию. В результате появляется изображение граничных закреплений желтого цвета.

Для изображения нагрузки с помощью пиктограммы F_C выбираем красный цвет.

GEO > FPLOT, 1, ALL, 49, 1

Прорисовать внешнюю нагрузку во всех направлениях в узлах с 1-го по 49-й с шагом 1. Эти параметры подсчитываются автоматически и вводятся по умолчанию. В результате появляется изображение усилий красного цвета.

В дальнейшем можно многократно в разных цветах прорисовывать конечно-элементную модель, но обязательно стирая (CLS,N) и заказывая цвет экрана и изображения. Можно даже разные участки модели изобразить разными цветами.

С помощью команды ZOOMIN(Путь в меню: DISPLAY→DISP_PAR→ZOOMIN) можно увеличить отдельные области модели. Чтобы убрать увеличение, необходимо использовать команду RESET(вновь установить) (путь в меню: WINDOWS→RESET) и повторить команды EPLOT, DPLOT, FPLOT, т.е. заново прорисовать все данные объекта.

Нижеперечисленные команды позволяют узнать следующую цифровую информацию об объектах конечно-элементной модели:

PTLIST

(Путь в меню: GEOMETRY→POINTS→PTEDIT→PTLIST)

CRLIST

(Путь в меню: GEOMETRY→CURVES→CREDIT→CRLIST)

SFLIST

(Путь в меню: GEOMETRY→SURFACES→SFEDIT→SFLIST)

NLIST

(Путь в меню: MESHING→NODES→NLIST)

ELIST

(Путь в меню: MESHING→ELEMENTS→ELIST)

EGLIST

(Путь в меню: PROPSETS→EGLIST)

MPLIST

(Путь в меню: PROPSET→MPRLIST)

RCLIST

(Путь в меню: PROPSETS→RCLIST)

DLIST

(Путь в меню: FD_CONDS→DISPLMNT→DLIST)

FLIST

(Путь в меню: FD_CONDS→FORCES→FLIST)

Аналогичную, но только графическую информацию дают команды PTPLOT, CRPLOT, SFPLOT, NPLOT, EPLOT, DPLOT, FPLOT, имеющие тот же путь в меню команд.

16. Создание входного файла для MODSTAR

GEO→MODINP, PRIM1.MOD

Создать входной командный файл для данной конечно-элементной модели. Имя файла по умолчанию будет PRIM1.MOD, хотя можно указать любое другое.

Структура текстового файла PRIM1.MOD

```
EG, 1 PLANE2D, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0
EX, 1, 2.100000e+07
NUXY, 1, 3.000000e-01
RC, 1, 1, 1.000000e+000
ACTIVE CS 0
```

```

N, 1, 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
N, 2, 1.000000e+001 0.000000e+000 0.000000e+000
N, 3, 2.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
.
.
.
.
N, 49, 6.000000e+001 4.000000e+001 0.000000e+000
ACTIVE GROUP 1
ACTIVE MAT 1
ACTIVE REAL 1
E, 1, 1, 2, 9, 8
E, 2, 2, 3, 10, 9
E, 3, 3, 4, 11, 10
.
.
.
.
E, 36, 41, 42, 49, 48
D, 1, UX, 0.000000e+000, 1, 1, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
D, 7, UX, 0.000000e+000, 7, 1, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ
ACTIVE LC1
F, 45, FY -1.000000E+000
F, 47, FY 1.000000E+000
MERGE
DATA_CHECK
RENUM, ON

```

Матрица геометрии модели: указывает координаты узлов.

Матрица топологии модели: указывает, какой элемент какие узлы соединяет.

Условия закрепления.

Внешнее нагружение.

Примечание

1. При отладке конечно-элементной модели рекомендуется после каждой команды ввести команду `GETHTT`, производящую остановку. Это позволяет последовательно просматривать выполнение каждой команды при вводе ранее сформированной конечно-элементной модели с помощью команды `FILE, PRIM1.GEO`.

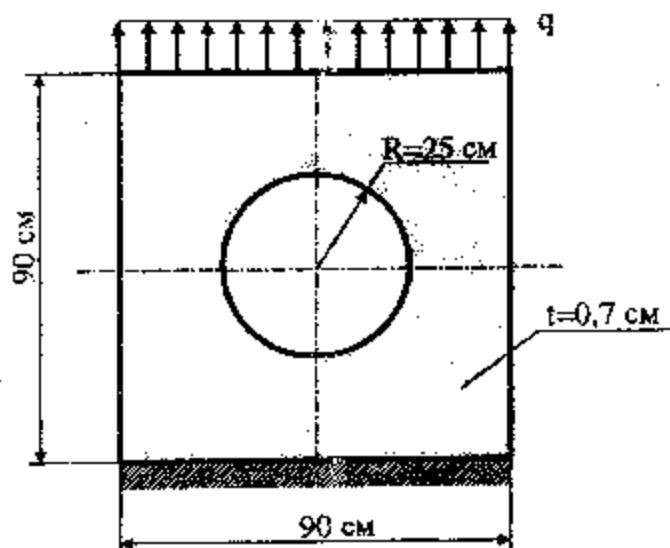
2. Символы `C*` в строке команд означают начало комментария. Все, что находится между `C*` и концом строки, графическим препроцессором `GEOSTAR` не воспринимается.

1.2.6. Пример 2 построения конечно-элементной модели

Задача. Выполнить расчет напряженно-деформированного состояния изотропной пластины, деформирующейся в своей плоскости, методом конечных элементов.

В своей рабочей директории набираем `GEOSTAR`.

`Problem name > PRIM2` (даем имя задачи `PRIM2`).



Размеры пластины 90×90 см, толщина 0,7 см.

Материал Ст 3:

$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа} = 2,1 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2$ -
 модуль Юнга;
 $\nu = 0,3$ - коэффициент Пуассона;
 погонная нагрузка: $q = 333,333 \text{ Н/м}$.

1. Установка обзора

GEO > VIEW, 0, 0, 1
 GEO > CLS, 1

GEO > AXIS, 1, 16

2. Установка сетки для вычерчивания

GEO > PLANE, Z, 0, 1

GEO > GRIDON, 0, 0, 20, 20, 2

Геометрия модели

3. Задание ключевых точек

GEO > PT, 1, 0, 90, 0
 GEO > PT, 2, 90, 90, 0
 GEO > PT, 3, 90, 0, 0
 GEO > PT, 4, 0, 0, 0
 GEO > PT, 5, 45, 45, 0

4. Задание кривых

GEO > ACTMARK, CR, 1
 GEO > CRLINE, 1, 1, 2
 GEO > CRLINE, 2, 2, 3
 GEO > CRLINE, 3, 3, 4
 GEO > CRLINE, 4, 4, 1
 GEO > CRPCIRCLE, 5, 5, 3, 25.0, 360, 4

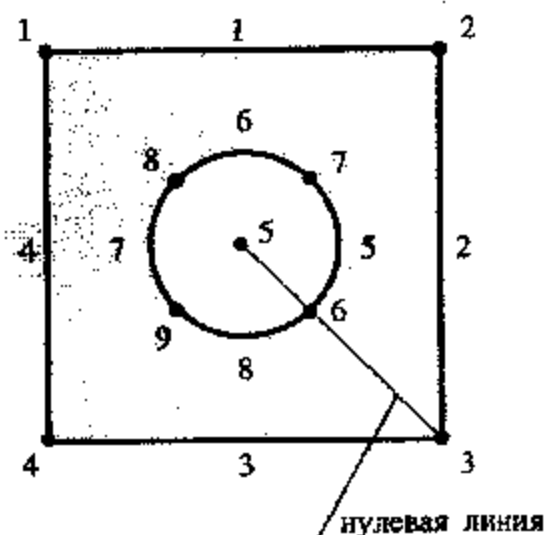
Установка направления взгляда.

Очистка экрана и установка черного цвета фона экрана.

Нарисовать координатные оси белым цветом.

Определить плоскость, перпендикулярную оси Z на расстоянии 0 от начала координат. Тип линии сетки - 1 (непрерывная линия).

Вычертить в указанной плоскости сетку. Шаги сетки $\Delta x = 5$, $\Delta y = 5$; число ячеек по оси X равно 20, по оси Y - 20; цвет линий сетки - 2 (серый).



Определить окружность 5 с центром в точке 5 и радиусом 25. Точка 3 используется для определения нулевой линии. Число сегментов на угловом интервале в 360° равно 4. С помощью команды CRPCIRCLE окружность, начиная от

нулевой линии, в направлении против часовой стрелки делится на четыре равных сегмента. В результате создаются новые ключевые точки 6, 7, 8, 9 и новые кривые 5, 6, 7, 8.

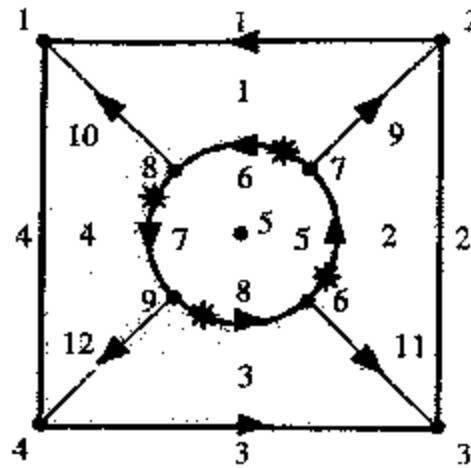
5. Задание поверхностей
GEO > ACTMARK, SF, 1

GEO > SF2CR, 1, 6, 1, 0

GEO > SF2CR, 2, 5, 2, 0

GEO > SF2CR, 3, 8, 3, 0

GEO > SF2CR, 4, 7, 4, 0



6. Оценка правильности задания геометрии модели

GEO > CLS

GEO > PTPLOT, 1, 9, 1

GEO > CRPLOT, 1, 12, 1

GEO > SFPLOT, 1, 4, 1

GEO > SAVE

GEO > GETHIT

Выбираем цвет фона и очищаем экран.

Выбираем цвет ключевых точек.

Выбираем цвет кривых.

Выбираем цвет поверхностей. Из рисунка видно, что в результате образования поверхностей появились дополнительные кривые 9, 10, 11, 12. Стрелки на кривых являются маркерами кривых. Звездочки являются маркерами поверхностей.

Рекомендуется время от времени производить сохранение задачи.

Останов ввода ранее сформированной конечно-элементной модели (ввод с помощью команды FILE, PRIM2.GEO). Рекомендуется использовать эту команду для просмотра выполнения команд при отладке конечно-элементной модели.

7. Установка элементных групп и свойств материала

GEO > EGROUPE, 1, PLANE2D

GEO > MPROP, 1, EX, 2.1E7

GEO > MPROP, 1, NUXY, 0.3

GEO > RCONST, 1, 1, 1, 1, 0.7

Установка элементной группы.

Установить $E_x = 2,1 \cdot 10^7$ для 1-го набора материала.

Установить коэффициент Пуассона для первого набора материала.

Определить константу, связанную с элементной группой 1 как набор 1, начинающийся с единицы и включающий одно значение как величину 0,7 для толщины.

8. Генерация конечно-элементной сетки

Выбираем цвет конечно-элементной сетки.

GEO > M_SF, 1, 1, 1, 4, 6, 6, 1, 1

GEO > GETHTT

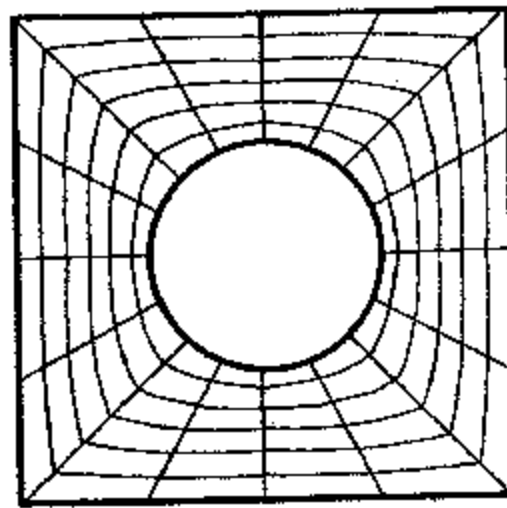
GEO > M_SF, 2, 2, 1, 4, 6, 6, 1, 1

GEO > GETHTT

GEO > M_SF, 3, 3, 1, 4, 6, 6, 1, 1

GEO > GETHTT

GEO > M_SF, 4, 4, 1, 4, 6, 6, 1, 1



Эти операции можно выполнить с помощью одной команды:

C* M_SF, 1, 4, 1, 4, 6, 6, 1

Разбить каждую поверхность с 1-й по 4-ю с шагом 1 четырехузловыми элементами по 6 элементов на двух главных сторонах каждой поверхности.

Примечание. Символы C* означают начало комментария. Концом комментария является код перехода на новую строку. Внутри комментария можно набирать любой текст латинскими буквами. В данном случае символы комментария используются для того, чтобы исключить из исполнения набранную команду. Рекомендуется использовать этот прием при отладке конечно-элементной модели.

9. Закрепление конструкции

Выбираем цвет изображения закрепления конструкции.

GEO > DCR, 3, UX, 0, 3, 1

GEO > DCR, 3, UY, 0, 3, 1

Установить перемещения вдоль осей X и Y узлов, расположенных на кривой 3, равными нулю.

Эти операции можно выполнить с помощью одной команды:

C* DCR, 3, ALL, 0, 3, 1

При неудачном закреплении конструкции эти закрепления можно стереть с помощью команды DCRDEL и заново задать командой DCR.

10. Нагружение конструкции

Выбираем цвет изображения нагрузок.

GEO > FCR, 1, UY, 4285.71, 1, 1

Приложить силы в направлении оси Y в узлах кривой (прямой) 1. Здесь узловая нагрузка подсчитана следующим образом: $(333,333 \text{ Н/см} \times 90 \text{ см}) / 7 = 4285,71 \text{ Н}$, т.к. погонная нагрузка на длине 90 см распределяется по 7 узлам, расположенным на кривой 1.

При неудачном задании нагрузки ее можно стереть с помощью команды FCRDEL и заново задать командой FCR.

11. Оценка правильности построения модели

Прорисовка всех точек, кривых, поверхностей, узлов, конечных элементов, граничных закреплений и нагружения выполняется так же, как и в примере 1.

12. Создание входного файла для MODSTAR

GEO > MODINP, PRIM2.MOD

Примечание. Рекомендуется посмотреть структуру текстового файла PRIM2.MOD, сформированного графическим препроцессором GEOSTAR.

1.3. ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ МОДУЛЯ MODSTAR

MODSTAR представляет собой управляемую в режиме меню интерактивную систему, все функциональные возможности которой реализуются через большое число подменю, являющихся следствием главного меню, которое появляется на экране при выполнении (рис. 3).

1.3.1. Описание экрана MODSTAR

На рис.3 показан графический экран, появляющийся на мониторе компьютера в начале сеанса. Экран разделен на три основные части.

1. Главное меню, расположенное вертикально в правой части экрана.
2. Рабочее поле, покрывающее большую часть экрана в центре, где осуществляется ввод команд и графически показывается результат их выполнения.
3. Зона функциональных клавиш, осуществляющих быстрый переход из одного подменю в другое.

1.3.2. Главное меню команд MODSTAR

Главное меню обеспечивает доступ к различным командам необходимым как для формирования конечно-элементной модели, так и для выполнения расчетов и анализа результатов в цифровой и графико-цветовой форме. Движение по меню осуществляется с помощью мыши, активизация команды – щелчком левой кнопки мыши, выход из подменю – щелчком правой кнопки мыши.

Все команды MODSTAR сгруппированы по следующим разделам меню:

- | | |
|----------------|--|
| HOW_TO | - здесь находится подробная информация, относящаяся к использованию программных средств; |
| TUTORIAL | - обучающий пакет (краткое знакомство с работой программы COSMOS/M); |
| CONTROL | - группа команд, выполняющих различные пользовательские операции с базами данных; |
| CONSTRAINTS | - предпроцессорные команды программы MODSTAR. Результатом работы этих команд является формирование списка смещений границы тела и команд, формирующих уравнения связи; |
| COSMOS | - информация обо всех модулях и процедурах пакета COSMOS/M; |
| CURRENT_SET | - команды для определения как типа, так и опций решаемой задачи; |
| LOADS | - группа команд для задания внешних воздействий; |
| MESH | - команды для создания узлов и элементов; |
| PROPERTIES | - список команд, определяющих свойства материалов; |
| REAL_CONSTANTS | - команды для введения информации о геометрических характеристиках (свойствах) объекта, таких как толщины, площадь и т.д.; |
| RESULTS | - набор команд, позволяющих составлять поля перемещений и напряжений, а также выделять диапазон, в котором рассматриваемый параметр имеет максимальное значение; |
| CAD_SYSTEMS | - инструкции, относящиеся к использованию интерфейса, работающего с системой CAD; |
| PLOT | - команды графической оценки результатов расчета; |
| SPECIAL_TOPICS | - информация о специальных свойствах управляющих модулей программы COSMOS/M. |

Modstar (Version 1.52 - A)
Problem name > Prim1
MOD >

2/23/2000 11:25:46

MAIN MENU

HOW_TO
TUTORIAL
CONTROL
CONSTRAINTS
COSMOS
CURRENT_SET
LOADS
MESH
PROPERTIES
REAL_CONSTANTS
RESULTS
CAD_SYSTEMS
PLOT
SPECIAL_TOPICS

PgUp PREV MENU
Home MAIN HELP
F1 FULL HELP
F2 BRIEF HELP
HELP EXIT
CSC ABORT CMND

Рис.3

1.3.3. Расчет напряженно-деформированного состояния конечно-элементной модели примера I

1. Вход в модуль предварительной обработки MODSTAR

Из своей рабочей директории в командной строке набираем MODSTAR. Появляется главное меню MODSTAR и приглашение

Problem name > PLATE1 (даем имя задачи PLATE1 в MODSTAR)

В результате в рабочей директории автоматически создаются рабочие файлы, имена некоторых из них совпадают с именами рабочих файлов, создаваемых в GEOSTAR. Поэтому имена задач в GEOSTAR и MODSTAR должны различаться или, создав name_file.mod, работать в MODSTAR в другой рабочей директории. Возможен также другой путь: после работы в GEOSTAR в рабочей директории удалить все файлы, кроме PRIM1.GEO и PRIM1.MOD. Тогда имена задач в GEOSTAR и MODSTAR могут совпадать.

Важнейшие рабочие файлы в MODSTAR:

- PRIM1.MOD Входной командный файл в кодах ASCII, содержащий полную информацию о конечно-элементной модели. Он может быть создан в любом текстовом редакторе. Мы создали этот файл с помощью графического препроцессора GEOSTAR.
- PLATE1.LOG Текстовый файл в кодах ASCII, содержащий все входные команды, задаваемые пользователем для построения модели. Практически полностью повторяет командный файл PRIM1.MOD с добавлениями о происхождении.
- X.BAT В этом файле запоминается имя текущей задачи, загруженной в память системы. Он открывается в начале работы MODSTAR, закрывается и удаляется при нормальном завершении работы, сопровождаемой командой EXIT. Если произойдет какой-либо сбой или выход из обработки, то задача выбрасывается, а X.BAT остается в директории пользователя и вызывает различные трудности при повторном выполнении MODSTAR. Поэтому рекомендуется в такой ситуации удалить файл X.BAT перед повторным запуском. Рекомендуется также удалить все файлы данной задачи, т.к. вероятно повреждение некоторых из них.

2. Ввод конечно-элементной модели

Ввести конечно-элементную модель можно непосредственно с клавиатуры в терминах команд MODSTAR (интерактивный режим), либо из командного файла, созданного, например, в GEOSTAR (пакетный режим). Поэтому ввод осуществляется в пакетном режиме.

MOD > FILEINPUT, PRIM1.MOD Ввод конечно-элементной модели из командного файла PRIM1.MOD.

Чтобы перейти в главное меню MODSTAR, достаточно щелкнуть правую кнопку мыши.

3. Оценка геометрии введенной модели

- MOD > NPLOT Прорисовка узлов без нумерации.
- MOD > NNUM, 1, 1 Заявка на нумерацию узлов при прорисовке.
- MOD > NPLOT Прорисовка узлов с нумерацией.
- MOD > EPLOT Прорисовка элементов без нумерации.
- MOD > ENUM, 1, 1 Заявка на нумерацию элементов.
- MOD > EPLOT Прорисовка элементов с нумерацией.
- MOD > VIEW, 1, 1, 1 Изменение направления взгляда.

Далее можно повторить предыдущие команды оценки модели.

MOD > RENUMBER, ON Перенумерация узлов с целью уменьшения размерности и ширины ленты матрицы жесткости (в нашем примере необязательная команда).

4. Расчет перемещений узлов

MOD > RUN_STATIC По информации, заложенной в файл PRIM1.MOD, происходит формирование и решение системы линейных алгебраических уравнений (18).

5. Оценка полученных перемещений

Полученные узловые перемещения конечно-элементной модели на экране можно проанализировать в цифровой или в графико-цветовой формах.

а) В цифровой форме

MOD > DISLIST, 0, 1, 49, 1

Пролистывание на экране узловых перемещений модели. Указанные параметры команды подсчитываются автоматически и могут вводиться по умолчанию.

MOD > DISMAX, UY, 0, 1, ABS

Указать максимальные по абсолютной величине перемещения в направлении оси Y и номера узлов, имеющих эти перемещения, с допуском в 1% от максимального перемещения.

В результате выполнения этой команды будут отслежены максимальное по абсолютной величине перемещение в направлении оси Y и перемещения узлов, отличающихся от максимального не более чем на 1%.

| NODE | Y- Displacement |
|------|-----------------|
| 45 | - 0.257533E-02 |
| 47 | - 0.257533E-02. |

б) В графико-цветовой форме

MOD > RUN_PLOT

Переключение пакета COSMOS/M с режима MODSTAR в режим PLOTSTAR для выполнения графического пред- и послепроцессорного анализа текущей задачи.

MOD > DPLOT, 1, 1, 7, 4, 1

Изобразить в первом окне деформированный вид модели красным цветом (7) и недеформированный вид модели зеленым цветом (4) во весь экран.

MOD > ANIMATE, 1, 0

Мультипликация (анимация - оживление) деформированного вида модели со стандартной скоростью.

Выдается сообщение:

Window too big, open a smaller window for animation (Очень большое окно, откройте окно меньших размеров для анимации).

MOD > NEWWIN

С помощью перекрестий устанавливаем размер нового, второго окна, щелкая правой кнопкой мыши.

MOD > ANIMATE, 2, 1000

Анимация деформированного вида модели с замедленной скоростью.

MOD > DELWIN, 2, 0

Удалить окно 2 без сохранения его изображения на экране;

MOD > DLINE, 1, 0, 0

Заявка на изображение в окне 1 цветового графика перемещений.

MOD > DISPLOT, 1, 4, 1, 0

Построить в окне 1 цветовой график результирующих перемещений на деформированной поверхности модели в полный экран.

При выполнении этой команды в рабочем поле экрана появляется цветовой график перемещений на деформированной поверхности модели, а в зоне меню дается цифровое сопровождение цветовых зон перемещений, а также величина минимального и максимального перемещений с указанием номеров узлов, в которых они имеют место.

MOD > DLINE, 1, 1, 1

Заявка на изображение в окне 1 линейчатого графика перемещений с указанием меток на каждом конечном элементе.

MOD > DISPLOT, 1, 4, 1, 0

Построить линейчатый график результирующих перемещений на деформированной поверхности модели в полный экран.

MOD > ZOOMIN, 1

Увеличить фрагмент изображения с помощью специального окна, которое становится активным.

MOD > RESET

Закрытие специального окна и восстановление первоначального изображения.

6. Расчет напряжений

MOD > RUN_STRESS

По информации, заложенной в файле PRIM1.MOD, и по узловым перемещениям, находящимся в файле PRIM1.OUT, с помощью модуля STRESS происходит вычисление напряжений в конечных элементах модели. Результат помещается в файл PRIM1.OUT.

7. Оценка полученных напряжений

Полученные напряжения, возникающие в конечно-элементной модели, на экране можно проанализировать в цифровой или графико-цветовой формах.

а) В цифровой форме

MOD > STRLIST, 1, 1, 49, 1, 1

Пролистывание на экране числовых значений главных напряжений и интенсивности напряжений в узлах.

MOD > STRLIST, 1, 1, 49, 1, 2

Пролистывание на экране числовых значений компонентов σ_x , σ_y , τ_{xy} напряжений.

Напряжения в центре конечных элементов можно увидеть, просматривая файл PRIM1.OUT в любом текстовом редакторе.

MOD > STRMAX, SX, 1, 5, ABS

Получить максимальное по абсолютной величине σ_x с допуском 5% от максимального значения.

MOD > STRMAX, SY, 1, 5, ABS

Получить максимальное по абсолютной величине σ_y с допуском 5% от максимального значения.

MOD > STRMAX, TXY, 1, 5, ABS

Получить максимальное по абсолютной величине τ_{xy} с допуском 5% от максимального значения.

MOD > STRMAX, PX, 1, 5, ABS

MOD > STRMAX, PY, 1, 5, ABS

MOD > STRMAX, PZ, 1, 5, ABS

Получить максимальные по абсолютной величине главные напряжения $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ соответственно с допуском 5% от максимального значения.

MOD > STRMAX, VON, 1, 5, ABS

Получить интенсивность напряжений σ_1 с допуском 5% от максимального значения.

б) В графико-цветовой форме

MOD > RUN_PLOT

Переключение с режима MODSTAR в режим PLOTSTAR для выполнения графического анализа задачи.

MOD > STRSET, 1, 1, 0

Установка на отображение в окне 1 напряжений σ_x для нулевого шага по времени.

MOD > SLINE, 1, 0, 1

Установка на цветовую заливку зон графика напряжений в окне 1.

MOD > SPLOT, 1, 0, 1

Вывод графика напряжений σ_x в первом окне во весь экран в недеформированном виде.

MOD > SPLOT, 1, 1, 1

Вывод графика напряжений σ_x в первом окне во весь экран в деформированном виде.

MOD > SLINE, 1, 1, 2

Установка на отображение линейчатого графика напряжений

σ_x в окне 1 с постановкой меток на каждом втором элементе.

MOD > SPLOT, 1, 0, 1

Отображение линейчатого графика напряжений σ_x в окне 1 в недеформированном виде.

Произведя установку второго параметра в команде и применяя вышеперечисленные команды, можно отобразить на экране графики остальных напряжений:

σ_y (2), τ_{xy} (4), σ_1 (7), σ_2 (8), σ_3 (9), σ_i (10), τ_{\max} (11).

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 3 |
| 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ | 4 |
| 1.1.1. Построение конечно-элементной модели | 4 |
| 1.1.2. Построение зависимостей, характеризующих упругие свойства элемента | 5 |
| 1.1.3. Построение системы разрешающих алгебраических уравнений | 8 |
| 1.1.4. Определение напряжений | 9 |
| 1.2. СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ГРАФИЧЕСКОГО ПРЕПРОЦЕССОРА GEOSTAR | 9 |
| 1.2.1. Описание экрана GEOSTAR | 9 |
| 1.2.2. Главное меню команд GEOSTAR | 9 |
| 1.2.3. Пиктограммы и функции | 10 |
| 1.2.4. Ввод команд | 10 |
| 1.2.5. Пример 1 построения конечно-элементной модели | 12 |
| 1.2.6. Пример 2 построения конечно-элементной модели | 19 |
| 1.3. ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ МОДУЛЯ MODSTAR | 23 |
| 1.3.1. Описание экрана MODSTAR | 23 |
| 1.3.2. Главное меню команд MODSTAR | 23 |
| 1.3.3. Расчет напряженно-деформированного состояния конечно-элементной модели примера 1 | 25 |