

## Раздел 9

## ПРОСМОТР РЕЗУЛЬТАТОВ И ДРУГИХ ВВЕДЕННЫХ ДАННЫХ

Просмотр результатов расчетов краевой задачи в NX Nastran и других введенных данных обеспечивают постпроцессорные инструменты FEMAP.

### 9.1. Загрузка результатов расчетов краевой задачи

Есть два варианта появления результатов расчетов краевой задачи в FEMAP:

- результаты получены программой NX Nastran и содержатся в файлах проекта \*.mod, \*.op2, \*.f06 и других (см. Раздел 1.4);
- импорт результатов, полученных с применением других программных продуктов.

#### 9.1.1. Импорт результатов расчетов краевой задачи другими программами

Первый вариант: командой **File→Open...** из файлов проектов, которые имеют формат *других* программ. В FEMAP 9.3 читаются форматы ABAQUS (\*.inp) и ANSYS (\*.ans), т.е. есть прямой интерфейс с этими программами, а также формат \*.neu, который некоторые программы применяют как „родной”, и многие – как универсальный формат экспорта/импорта данных.

Другой вариант: с помощью команды **File→Import→FEMAP Neutral...** из файлов типа \*.neu или \*.fno. Нужно начать новый проект (**File→New**), потом указанной командой вызвать диалог поиска файла в файловой системе ПЭВМ.

При открытии файла формата \*.neu появляется диалоговая панель (см. рис.9.1-а), на которой нужно указать, что импортировать: геометрию, конечно-элементную модель, результаты.

**Внимание:** если проводить *импортирование* в уже открытый *другой* проект (не начать новый проект командой **File→New**), то можно получить непредвиденные эффекты, если с помощью опции „ID Offset” (см. рис.9.1-а) задать недостаточный „сдвиг” для ID всех объектов, что будут введены (точек, линий, поверхностей, тел, узлов, элементов, материалов и др.). С целью избежать аналогичных проблем есть смысл применять еще такие опции: „Renumber Layers” (перенумеровать уровни), „Renumber Load and Constraint Sets” (перенумеровать наборы нагрузок и закреплений) и „Always Create New Output Set” (всегда создавать новый набор результатов).

Еще один вариант: отдельный импорт КЭ модели и результатов. Сначала командой **File→Import→Analysis Model...** вызывается панель, изображенная на рис.9.1-б, указывается программа, которая создавала модель; после команды „OK” осуществляется поиск файла в файловой системе ПЭВМ. Потом командой **File→Import→Analysis Results...** вызывается фактически такая же диалоговая панель (см. рис.9.1-б), где выбирается название программы, которая проводила расчет; после команды „OK” осуществляется поиск файла результа-

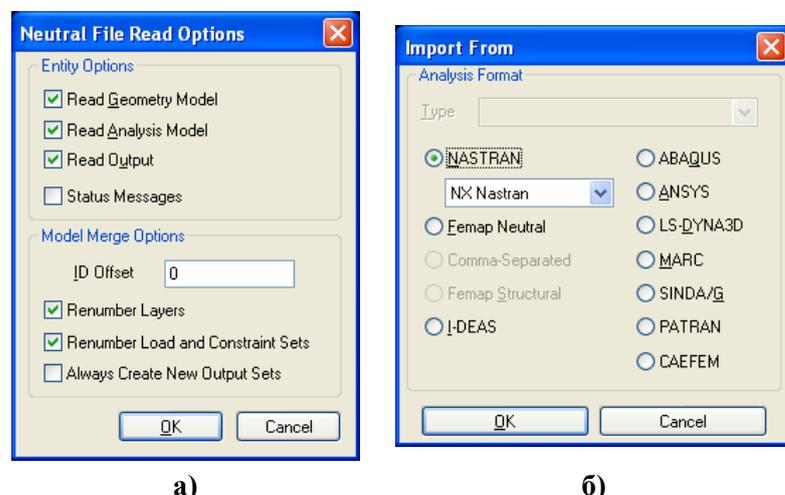


Рис.9.1. Диалоговые панели: а) – опции „нейтральной модели”; б) – выбор программы

тов (в частности, \*.op2, \*.f06 или \*.xdb для Nastran, \*.fil для ABAQUS, \*.rst для ANSYS) в файловой системе ПЭВМ.

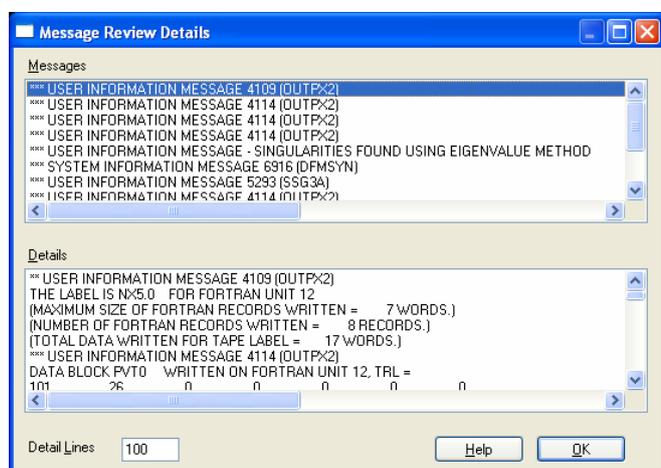
После импортирования набора результатов в *открытый* проект новый набор добавляется к существующим, поэтому его можно просмотреть таким же способом, что и другие. Об этом – в Разделе 9.3.

### 9.1.2. Загрузка результатов расчетов NX Nastran

В FEMAP для просмотра *информационных сообщений* программы NX Nastran нужно с помощью команды **File→Import→Analysis Results...** открыть файл с расширением имени \*.f06. Появляется панель с информацией о наличии сообщений (см. рис.9.2-а). Для их просмотра дается команда „**Show Details...**”.



а)



б)

Рис.9.2. Панели просмотра отчета о процессе решения краевой задачи

фактически являются таблицами со столбцами (векторами) значений в узлах (температура, перемещения вдоль оси X, ...) или конечных элементах (температура в одномерных КЭ, напряжения в характерных точках, ...). Названия основных векторов – результатов расчетов краевых задач – приведены в Приложении 12.

Иногда возникает необходимость в комбинировании, преобразовании, экстраполяции, даже в редактировании таблиц результатов. Для проведения этих действий в FEMAP есть группа команд (общую часть **Model→Output→** команды опускаем):

- **Set...** (установить): из списка (см. рис.9.3-а) выбирается (активируется) набор результатов или создается новый (пустой) набор для дальнейшего наполнения (задаются новый „ID” и „Title”, можно добавить заметки). При необходимости изменяется значение „Set Value”. Для деактивации *всех* наборов дается команда „Reset”;
- **Vector...** (выбрать вектор): из активизированного списка выбирается категория вектора (см. рис.9.3-б), тип данных из этого вектора (в поле „Type”): значение или амплитудное значение (**0..Value or Amplitude**), фаза (**1..Phase**), действительная (**2..Real Component**) или мнимая (**3..Imaginary Component**) компонента (последние три – для колебаний); в списке векторов выбранной категории (нижняя часть панели) – собственно вектор;
- модификации данных в выбранном предыдущей командой векторе:
  - ♦ **Define...** (изменение значений в узлах или КЭ): на рабочем поле курсором „мыши” выбирается узел КЭС (или КЭ), в поле „Data Value” (см. рис.9.3-в) указывается но-

Появляется панель (см. рис.9.2-б), верхняя часть которой содержит заголовки, а нижняя – короткое описание предостережения или сообщения, в частности о фатальных ошибках. Информацию о некоторых характерных сообщениях NX Nastran помещено в Приложении 11.

NX Nastran создает битовые файлы результатов расчетов с расширением имени \*.op2 и \*.xdb. В FEMAP их необходимо импортировать с помощью команды **File→Import→Analysis Results...**, причем проект (файл \*.mod) должен быть „загружен” раньше.

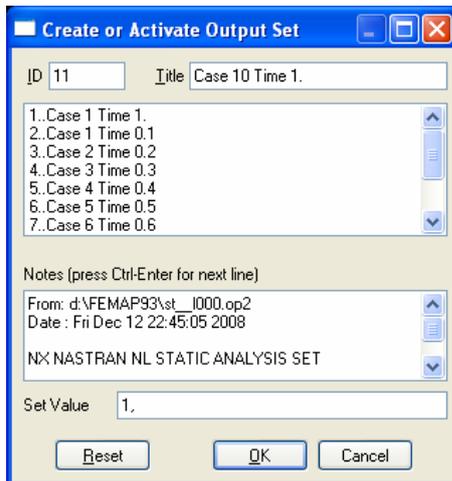
Иногда возникает необходимость в уничтожении результатов расчетов. Это делается с помощью команды **Delete→Output**.

## 9.2. Комбинирование и редактирование результатов расчетов краевой задачи

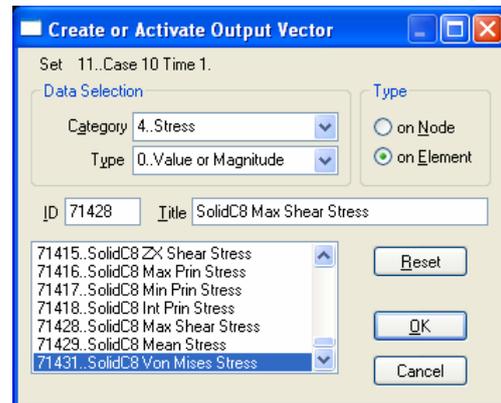
Результаты расчетов NX Nastran фак-

вое значение. Для продолжения есть кнопка „More...”, для окончания – „Last One”;

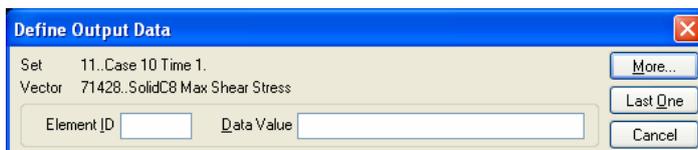
- ♦ **Fill...** (вычисление значений в узлах или КЭ с помощью формульных вычислений): на рабочем поле курсором „мыши” выбираются необходимые узлы КЭС (или КЭ), в поле „Equation” (см. рис.9.3-г) задается формула вычисления величины в зависимости от номера узла или КЭ (**ID**), или постоянное значение. Например, выражение **XND(i)** дает координату **X** узла; выражение **SQRT (SQR(VEC(1; 31; !i)) + SQR(VEC(2; 31; !i)) + SQR(VEC(3; 31; !i)))** – среднее квадратичные значения температуры узлов из трех наборов (см. Приложение 2);



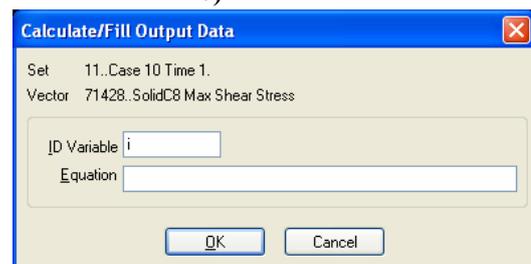
а)



б)



в)



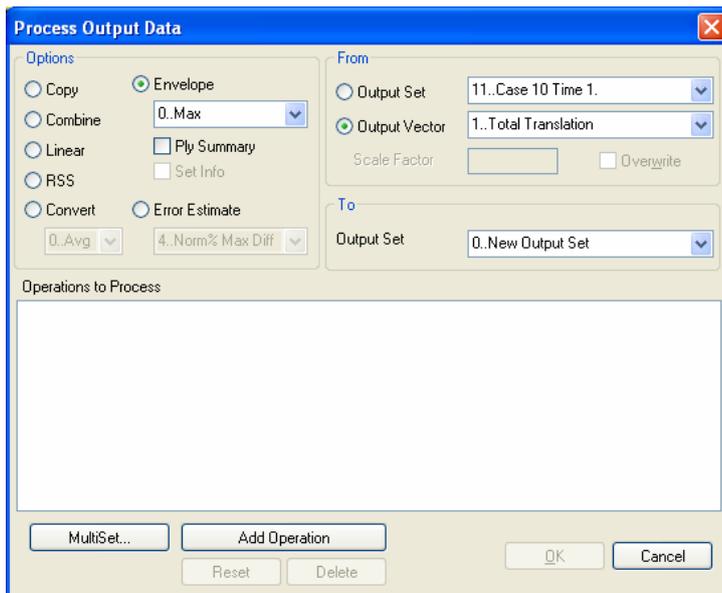
г)

**Рис.9.3. Диалоговые панели работы с результатами расчетов:** а) – активизации / деактивизации набора; б) – выбор вектора; в) – изменение значений; г) – заполнение значений

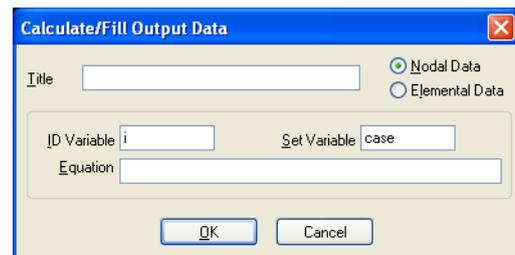
• **Process...** – комплекс команд для манипуляций результатами. На диалоговой панели (см. рис.9.4-а) с помощью радиокнопок выбирается одна из операций: „Copy” (копирование), „Combine” (комбинирование), „Linear” (линейное комбинирование), „RSS” (Root Sum Square – среднеквадратичное значение), „Convert” (конвертирование), „Envelope” (выбором по условию), „Error Estimate” (оценка погрешности). В секции „From” (откуда) с помощью радиокнопок выбирается или „Output Set” (полный набор) или „Output Vector” (набор и вектор). В секции „To” (куда) выбирается набор, в который будут помещены результаты, причем по умолчанию будет создан новый набор. Кнопкой „Add Operation” сделанные назначения добавляются к списку „Operations to Process”. С помощью кнопки „Multi Set...” к этому списку можно добавить сразу несколько векторов (выбранных ранее командой **Vector...**) наборов. Для редактирования списка есть кнопки „Delete” (удаление выбранной строки) и „Reset” (полное очищение списка). Есть дополнительные опции и назначения:

- ♦ „Overwrite” (записать с заменой);
- ♦ „Scale Factor” (общий для выбранного  $j$ -го набора или вектора коэффициент  $a_j$  для линейного комбинирования  $\{V_{ref}\} = \sum a_j \{V_j\}$  и вычисление среднеквадратичного значения  $\{V_{ref}\} = \sqrt{\sum a_j \{V_j\}^2}$ );
- ♦ для варианта „Convert” (вычисление „0..Avg” (усредненного) или „1..Max” (максимального) значение при конвертировании значений от узлов до центра КЭ или наборот);

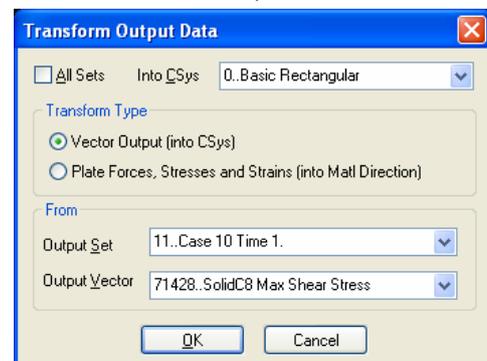
- ♦ для варианта „Envelope” (отбор данных по максимальному (**0..Max**), минимальному (**1..Min**) или максимальному абсолютному (**2..Max Abs**) значению), а также опция „Ply Summary” (резюме слоя, т.е. для пластин, в частности многослойных, вычислять суммарную для толщины величину, например, прогиба);
- ♦ для варианта „Error Estimate” (метод „0..Max Diff” (максимальная разность), „1..Diff to Avg” (разность от среднего), „2..% Max Diff” (процент от максимальной разности), „3..% Diff to Avg” (процент разности от среднего), „4..Norm% Max Diff” (нормализованный процент от максимальной разности) или „5..Norm% Diff to Avg” (нормализованный процент от разности от среднего). Формулы можно увидеть в разделе „Command Reference → Post Processing → Output Manipulation → Model, Output, Process” из „Help”. Значения погрешности, меньшие, чем значения в окне „Skip Below”, будут заменяться нулями (чтобы лучше „оттенить” зоны с максимальными погрешностями). Результаты помещаются в тот же набор. Используются данные всей КЭС (**Full Model**) или тех КЭ, что были помещены в выбранную группу;
- вычисления (**Calculate...**): сначала указывается **ID** нового набора, потом на диалоговой панели (см. рис.9.4-б) вводится название нового вектора (**Title**), тип данных (для узлов или для КЭ), вводится уравнение (см. объяснения к команде **Fill...**)... Параметрами уравнения является порядковый номер объекта (**ID** узла или КЭ), а также порядковый номер набора (в окне „Set Variable”), которые автоматически „пробегают” все значения. Узлы или КЭ выбираются стандартным образом после команды „OK”;



а)



б)



в)

Рис.9.4. Диалоговые панели работы с результатами расчетов: а) – комбинированная; б) – заполнения вычислением; в) – преобразования векторов результатов к другой координатной системе

• преобразования начальных и граничных условий в векторы результатов (**From Load...**). Появляется диалоговая панель „Select Type of Load” (идентична панели „Load Options”, см. рис.4.4-а), выбирается необходимый тип ГУ (узловые, элементные или для жидкости);

• преобразования векторов результатов к другой координатной системе (**Transform...**): на диалоговой панели (см. рис.9.4-в) выбираются набор и вектор (внизу), в секции „Transform Type” – тип преобразований. Новые векторы данных создаются в своем наборе. Если установить опцию „All Sets”, то преобразования состоятся во всех имеющихся наборах. Если выбрано „Vector Output (into CSys)”, то еще необходимо указать новую координатную систему „Into CSys” (таким образом преобразуют трехмерные векторы, например, „Total

**Translation**". При этом появляются 12 новых компонент: 3 компоненты глобального вектора, каждая разложенная на 3 дополнительных компоненты, все в новой системе). Если выбрано „**Plate Forces, Stresses and Strain (into Matl Direction)**”, то преобразования проводятся только в *двумерных КЭ для внутренних сил и моментов, напряжений или деформаций* к направлению анизотропии свойств материалов (см. Раздел 3.2). Для задания другого направления есть команда „**Modify→Update Elements→Material Angle...**”. Если материал в КЭ – изотропный, то в процессе преобразований появится диалоговая панель „**Transform ...**” (для КЭ **Tria3, Quad4, Tria6** или **Quad8**, как это изображено на рис.9.5-а), где необходимо указать начало координатной системы текущего вывода (**Current Output Orientation**): посреди первого ребра КЭ (**Element First Edge**), в центре КЭ (**Element Midside Locations**) или посреди диагонали КЭ (**Element Diagonal Bisector**);

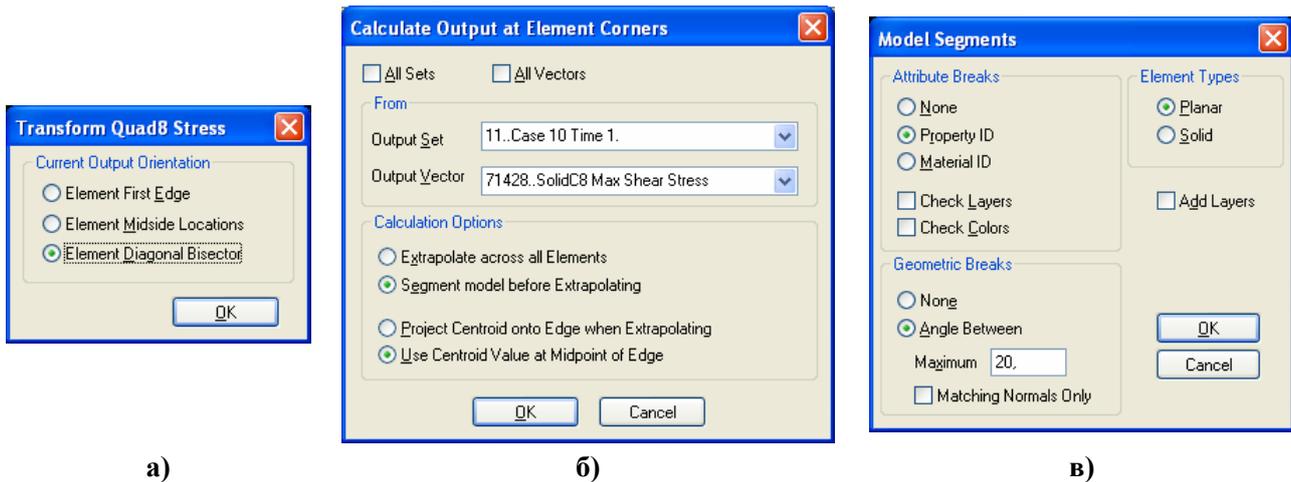


Рис.9.5. Диалоговые панели: а) – указания начала координатной системы текущего вывода; б) – экстраполяции результатов; в) – сегментации модели КЭ для экстраполяции результатов

- экстраполяции результатов из центров КЭ к их узлам (**Extrapolate...**). Эта операция нужна лишь иногда. Если установить опцию „**All Sets**” (см. рис.9.5-б), то преобразования состоятся во всех имеющихся наборах; если „**All Vectors**” – для всех векторов. Индивидуальный выбор проводится с помощью списков „**Output Set**” и „**Output Vector**”. Еще необходимо выбрать опции (**Calculation Options**): „**Extrapolate across all Elements**” (экстраполяция для всех КЭ) или „**Segment model before Extrapolating**” (выборочная экстраполяция; диалоговую панель „**Model Segments**”, что появится потом, (см. рис.9.5-в и рис.1.12-а) подробно описано в Разделе 1.7.2. для команды **Group→Operations→Generate**). Еще есть опции для установления метода экстраполяции: „**Project Centroid onto Edge when Extrapolating**” (проекционный) или „**Use Centroid Value at Midpoint of Edge**” (центроидальный, рекомендуется для неравномерной КЭС);

- создания комплексов из амплитудных и фазовых значений, имеющихся в указанных наборах данных и векторах (**Convert Complex...**), а также проведения обратного преобразования (см. рис.9.6-а). Это бывает необходимо при анализе результатов динамических задач;

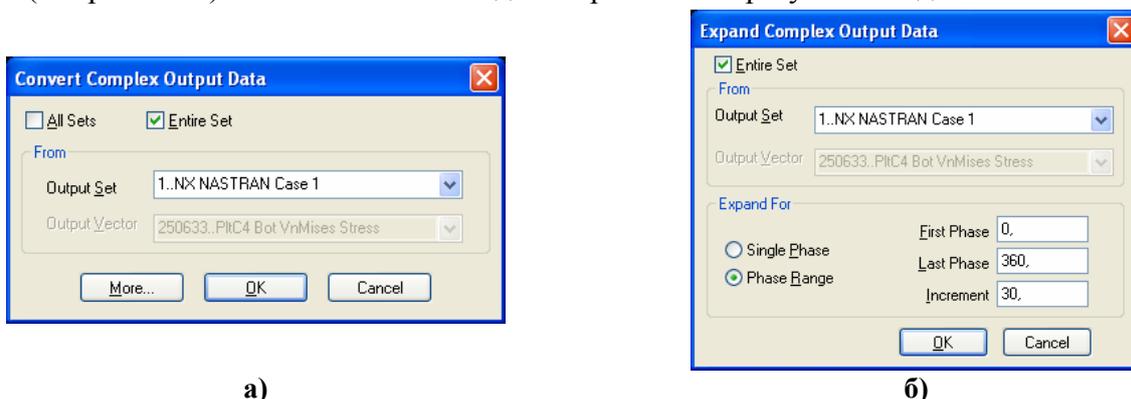


Рис.9.6. Диалоговые панели создания комплексов: а) – обычных; б) – расширенных

• создания нового комплексного набора данных в указанных фазовых интервалах (**Expand Complex...**). Основой являются указанные наборы данных и векторы. Если на диалоговой панели (см. рис.9.6-б) выбрать „**Single Phase**” (одна фаза), будет создан набор для указанного значения „**First Phase**” (начальная фаза). Для случая „**Phase Range**” (диапазон фаз) еще необходимо указать „**Last Phase**” (последняя фаза) и „**Increment**” (фазовый шаг). **Внимание:** для значения, которое указано в поле „**Last Phase**”, новые данные не создаются.

### 9.3. Управление изображениями на рабочем поле FEMAP

#### 9.3.1. Команды меню „Window” и „View”

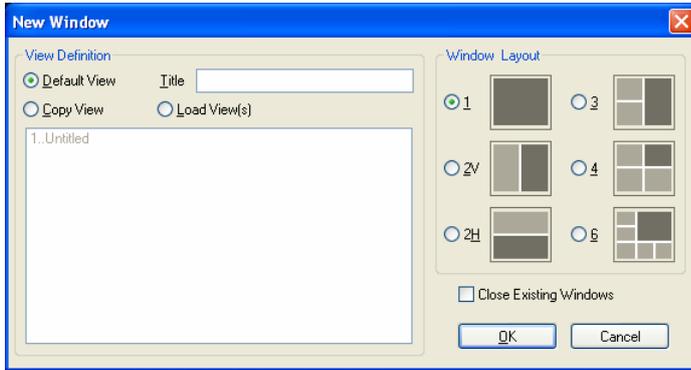
Для управления изображением окон FEMAP есть такие команды меню „**Window**”:

• **New Window...** – создание новых (от 1 до 6), копирование или загрузка прежде созданных окон изображений (см. табл. 9.1 и рис.9.7-а). Есть опция „**Close Existing Windows**” – закрыть все существующие окна;

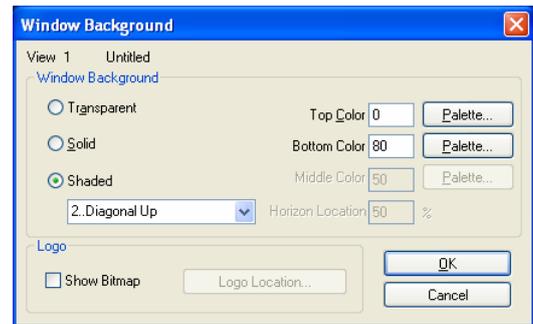
Таблица 9.1. Ориентация изображений в зависимости от количества окон

| Количество окон | Ориентация                           | Количество окон | Ориентация  |
|-----------------|--------------------------------------|-----------------|---|
| 1               | Default (XY или копирование)         | 4               | XZ, XY, YZ, default (XY или копирование)  |
| 2V, 2H          | XY, default (XY или копирование)     | 6               | Изометрия (-23, 34, 0 градусов), XZ, XY, YZ, изометрия (60, 0, 60 градусов), default (XY или копирование) |
| 3               | XZ, XY, default (XY или копирование) |                 |   |

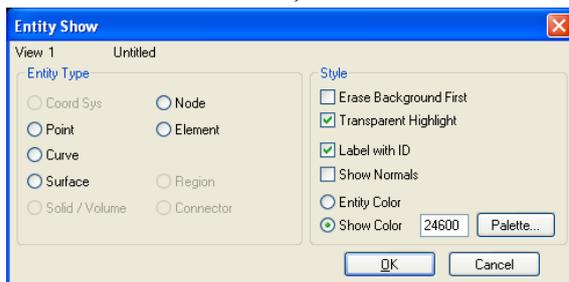
- **Close** – закрытие активного окна;
- **Tile Horizontal, Tile Vertical, Cascade** – изображение всех открытых окон таким образом, чтобы не было закрытых частей (**Tile**) или каскадом (**Cascade**);
- **Toggle Tabs** – переключатель: изображать *вкладки* для окон изображений, или нет;
- **Toggle Title Bars** – переключатель: показывать названия окон изображений, или нет;
- **Redraw** (или „горячие клавиши” **F12, Ctrl+D**) – обновление окон изображений на рабочем поле, без обновления внутренних массивов графической информации;



а)



в)



б)



г)

Рис.9.7. Диалоговые панели:

а) – создания новых окон; б) – показа некоторых свойств выбранных элементов модели; в) – заполнения рабочего поля; г) – позиционирование изображения

- **Regenerate** („Ctrl+G” или „Ctrl+F12” – регенерация активного окна; „Ctrl+Shift+G” – регенерация всех окон). При регенерации все массивы графической информации создаются снова, поэтому эту команду рекомендуют при наличии проблем с изображением;

- **Show Entities...** – показывать некоторые свойства выбранных объектов. На появившейся диалоговой панели „Entity Show” (см. рис.9.7-б) в секции „Entity Type” выбирается тип объекта, в секции „Style” указываются опции, формирующие стиль изображения: „Erase Background First” (сначала сотрите фон), „Transparent Highlight” (прозрачное изображение), „Label with ID” (номера объектов), „Show Normals” (показать нормали), „Entity Color” (цвет объекта), „Show Color” (показать цвет), „Palette...” (палитра).

Кроме того, с помощью меню „Window”, можно перейти к другому (открытому ранее) проекту.

Для управления изображением разнообразных объектов на рабочем поле FEMAP есть следующие команды меню „View”:

- **Set...** – создание нового или активация существующего окна с изображением модели;

- **All Views** („Alt+F7). Это не команда, а опция. Когда она активна, изменения изображений происходят не только в активном окне, а во *всех других открытых* окнах одного проекта;

- **Background...** – заполнение рабочего поля (см. рис.9.7-в): типа фона (**Transparent** – прозрачный, **Solid** – твердый или **Shaded** – заштрихованный), причем в последнем случае нужно из списка выбрать, каким способом заполнять рабочее поле двумя цветами, которые выбираются в полях „Top Color” (верхний цвет) и „Bottom Color” (цвет основы). Есть такие варианты: „0..Vertical” – изменяться вниз; „1..Horizontal” – горизонтально направо; „2..Diagonal Up” – по диагонали вверх; „3..Diagonal Down” – по диагонали вниз; „4..Square Spot” – квадратом от центра; „5..Circular Spot” – окружностью от центра; „6..Horizon” – с горизонтом (становятся активными еще два поля: „Middle Color” (средний цвет) и „Horizon Location” (положение горизонта)); „7..Bitmap” – не масштабируемое изображение из файла типа \*.bmp, который указывается в поле „Logo” вкладки „Views” диалоговой панели „Preferences”, вызываемой командой „File→Preferences...”; „8...Stretched Bitmap” – масштабируемое изображение из файла типа \*.bmp. В последнем случае, если изображение меньше размера рабочего поля, его можно позиционировать с помощью опции „Show Bitmap” и кнопки „Logo Location...”, которая вызывает панель „Select View Position – Logo Center” (см. рис.9.7-г), где указывается положение центра изображения (в процентах);

- **Layers...** – уровни; см. Раздел 1.7.1;

- **Select...** (или клавиши „F5”) – выбор табличных данных (функций, результатов расчетов) для их дальнейшего изображения (см. Раздел 9.4);

- **Options...** (или клавиши „F6”) – изменение параметров изображения для отдельных элементов модели. Некоторые сведения об этих инструментах приведены в Разделе 1.5 и на рис.1.10, а дополнительные к ним – в следующем Разделе 9.3.2;

- **Advanced Post...** – группа команд для просмотра результатов расчетов в конечно-элементной модели (см. Раздел 9.4);

- **Rotate, Aling By, Magnify..., Zoom..., Pan...** – см. Раздел 2.2.1;

- **Autoscale...** (автоматическое изменение масштаба изображения к стандартному). Есть такие варианты: „All” (Shift+F7), „Regenerate All” (Shift+Ctrl+F7) и „Visible” (Ctrl+A). Сопровождается скачкообразным перемещением изображения в центр рабочего поля;

- **UnZoom** – возвращение к предыдущему масштабу изображения;

- **Center...** (есть электронная кнопка ) – помещение точки с указанными координатами, а также одновременно центра вращения для модели в центр рабочей плоскости. Изображение модели получит соответствующий сдвиг. Если рассматривается график, то значение (0%, 0%) соответствует левому верхнему углу, а (100%, 100%) – правому нижнему.

### 9.3.2. Диалоговая панель „View Options”

Диалоговая панель „View Options” (см. рис.1.10-а и рис.9.8) вызывается командой **View→Options...**, а также клавишей „F6” или командой „More Options...” на мнемоническом меню (см. рис.9.9), которое вызывается кнопкой „Post Option” мнемонического меню „Post” (см. табл.1.3).

Она имеет три секции.

В секции „Category” выбирается нужный вариант: „Labels, Entities and Color” (обозначения, объекты и цвета), „Tools and View Style” (инструменты и стиль изображения) или „PostProcessing” (результаты расчета). Потом в списке „Option” указывается необходимый объект. В правой части панели появляются дополнительные списки и поля для назначения параметров изображения объекта. Название и содержание этих списков и полей соответствуют выбранному объекту. Вариантов немало, их перечень приведен в Приложении 1.

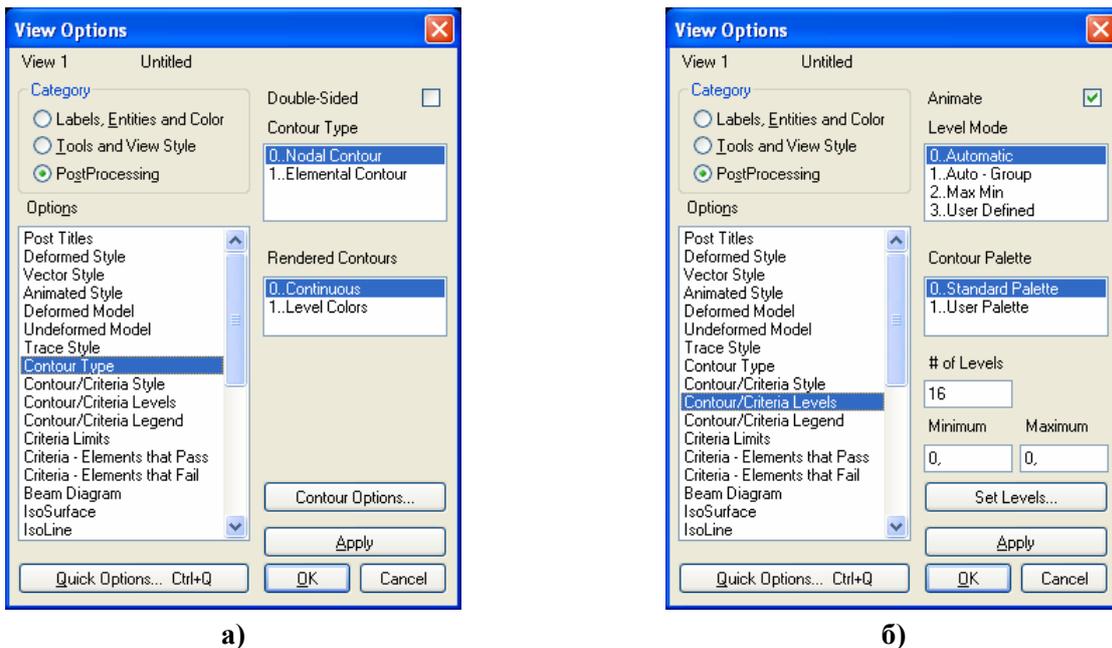


Рис.9.8. Диалоговая панель View Option настраивания изображения объектов

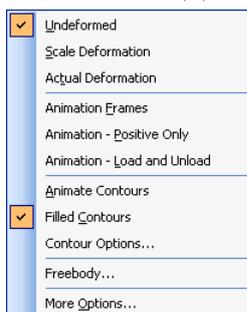


Рис.9.9. Мнемоническое меню управления изображением

Для быстрых групповых изменений (отображать / не отображать) можно кнопкой „Quick Options...” вызвать диалоговую панель „View Quick Options” (см. рис.1.10-б).

Как будет выглядеть изображение после изменений, можно увидеть, не выходя из диалога (кнопка „Apply”). Кнопка „Cancel” отменяет все новые назначения.

Кстати, если вместо „Continuous” выбрать „Level Colors” (см. рис.9.8-а), то функция на поверхности тела будет изображать не цветом, что плавно изменяется, а изополосами.

В двух ситуациях на диалоговой панели „View Options” появляются кнопки „Contour Options...” и „Set Levels...” (см. рис.9.8-а и рис.9.8-б соответственно).

Кнопка „Contour Options...” вызывает панель „Select Contour Options” (см. рис.9.10).

**Примечание 9.1.** В NX Nastran система алгебраических уравнений, порождаемая МКЭ, решается относительно узловых значений температуры (задача о ТС) или перемещений (задача о НДС), потом на их основе рассчитываются для каждого из КЭ отдельно другие величины (производные от основных: тепловой поток, деформации, напряжения, ...) или в точках численного интегрирования, или в геометрических центрах КЭ, или в узлах КЭ (это зависит от типа КЭ). Поскольку графика OpenGL строит изображение лишь на данных в узлах, то все величины, что нужно отобразить на контуре тела, нужно иметь в узлах КЭС. Итак, если величина была рассчитана не в узлах КЭС, то ее необходимо привести к ним.

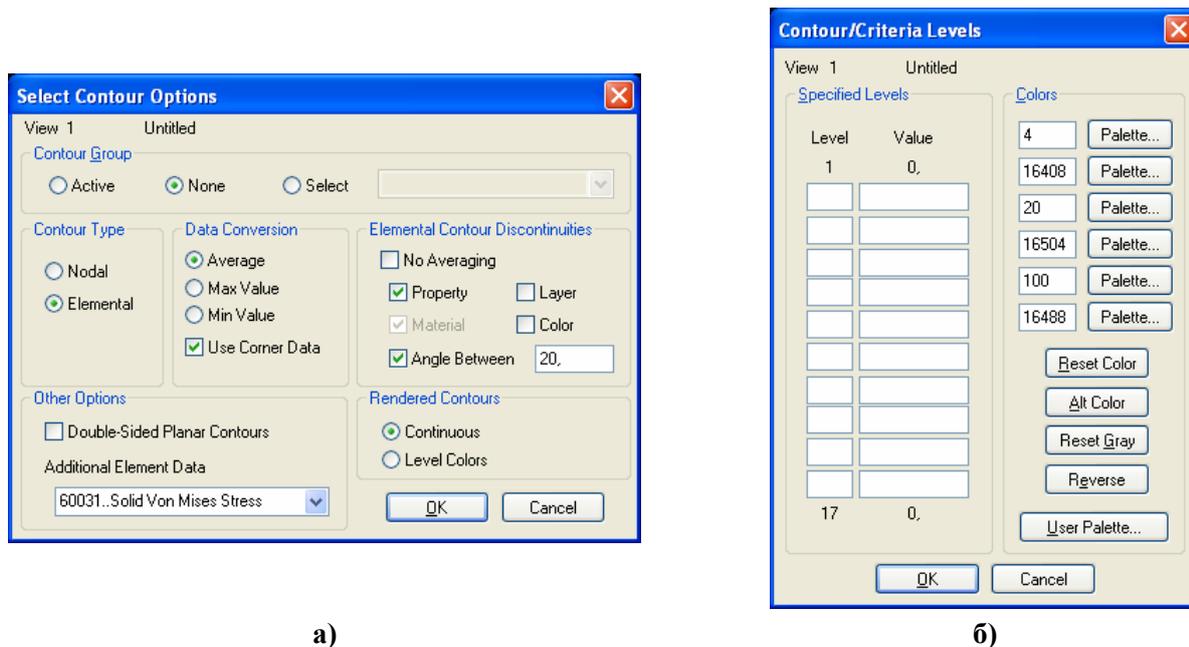


Рис.9.10. Диалоговые панели для назначения: а) – типа контура и варианта преобразований данных; б) – базовых и дополнительных цветов изополюс

В NX Nastran реализовано два варианта приведения величин к узлам. В первом сначала величины приводят к узлам (вариант „**Nodal**”), во втором – к центру (вариант „**Elemental**”) каждого КЭ. Потом последовательно рассматриваются все узлы КЭС тела и, если некоторый узел КЭС входит в  $N > 1$  КЭ, то из  $N$  значений величины, рассчитанных в этих  $N$  КЭ (узловых или „центровых”), вычисляется единое („эквивалентное”) значение величины для данного узла как объекта КЭС тела. Есть несколько вариантов вычисления единого значения. Для выбора всех этих вариантов и создана рассматриваемая диалоговая панель „**Select Contour Options**”.

В секции „**Contour Group**” (группа контуров) выбирается (если она есть) ранее созданная группа: или активная, или из списка групп.

В секции „**Type Contour**” (тип контура) выбирается вариант „**Nodal**” или „**Elemental**”. Секция „**Data Conversion**” имеет три варианта вычисления „эквивалентного” узлового значения: „**Average**” (среднее арифметическое), „**Max Value**” (максимальное) и „**Min Value**” (минимальное) из  $N$  значений. Активная опция „**Use Corner Data**” указывает, что будут использоваться первичные данные только из *угловых* узлов КЭ. В секции „**Rendered Contours**” можно выбрать или вариант „**Continuous**” (бесперывный цвет. Он имеет недостатки: во-первых, невозможно будет проявить имеющиеся (возможно, ошибочные) разрывы в КЭС или естественные разрывы напряжений на стыках разных материалов; во-вторых, для двумерных КЭ усреднение нескольких данных (в первую очередь – напряжений) по толщине, которое при этом состоится, не является верным вариантом) или „**Level Colors**” (цвет изополюс).

Для варианта „**Elemental**” активны еще две секции. В секции „**Elemental Contour Discontinuities**” можно опцией „**No Averaging**” отменить все усреднения или другими опциями указать выборочные принципы отбора: согласно „**Property**”, „**Material**”, „**Layer**”, „**Color**” (когда их несколько), „**Angle Between**” (угол расхождения ориентации КЭ, в пределах ... градусов). Это имеет смысл при разрывах изображаемой величины, например, когда стыкуются пластины разной толщины. В секции „**Other Options**” опция „**Double-Sided Planar Contours**” указывает, что нужно одновременно изобразить два контура (только для двумерных КЭ: сверху и снизу пластины). В окне „**Additional Output Vector**” можно выбрать вектор результатов, который дополнительно будет отображаться (обычно это актуально, когда стыкуются поверхностями двумерный и трехмерный КЭ).

**Примечание 9.2.** Значительная разница между минимальным (максимальным) и средним значением в узле указывает на значительную погрешность расчетов, особенно там, где нет резких изменений геометрии тела или локально приложенных нагрузок. В таких случаях нужно изменять КЭС (уменьшать размеры КЭ).

Кнопка „Set Levels...” (см. рис.9.8-б) вызывает панель „Contour /Criteria Levels” (см. рис.9.10-б). В секции „Colors” назначается шесть базовых цветов. Кнопка „Reset Color” устанавливает их „по умолчанию” (от красного до фиолетового), „Alt Color” – альтернативную палитру (от красного до темно-синего), „Reverse” изменяет их порядок на обратный. Если в поле „# of Levels” (см. позицию 71 таблицы Д1.1. Приложения 1) количество изолиний больше или меньше шести, то FEMAP проводит интерполяцию цвета между изополосами. Для дальнейшей печати на *монохромном* принтере можно кнопкой „Reset Gray” установить серую палитру. В секции „Specified Levels” можно указать еще до 10 дополнительных *промежуточных* уровней (крайние значения „Level” – указаны) и значений, которым они будут соответствовать (сверху вниз – уменьшать; противоречивые (в частности, и относительно указанным на панели „View Options” значением „Minimum” и „Maximum”) значения (Value) будут игнорироваться). С помощью кнопки „User Palette” можно настроить или считать из файла с расширением имени .cnt новую (другую) палитру. Чтобы ее применить, нужно выбрать для „Contour/Criteria Levels” (см. рис.9.8-б) значение „User Palette”.

Командой **List→View...** можно вывести все текущие назначения панели „View Options” в окно „Messages”.

#### 9.4. Просмотр функций и результатов расчетов краевой задачи

В FEMAP все данные помещены в таблицы, каждый столбик которой носит название вектора.

Результаты расчетов краевой задачи в FEMAP можно отобразить в виде графиков функций, изоповерхностей в объеме конечно-элементной модели тела или на его поверхности, а также в виде эпюр вдоль одномерной конечно-элементной сетки. Почти все действия для этого осуществляются с помощью диалоговой панели „View Select” (см. рис.9.11), которая вызывается командой **View→Select...** (или клавишей „F5”, или кнопкой ). На ней есть 4 секции.

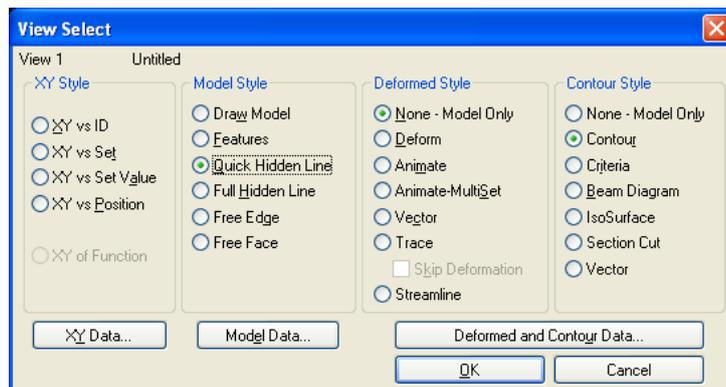


Рис.9.11. Диалоговая панель „View Select”

Секция „XY Style” (координатный стиль) имеет такие варианты создания графиков:

- „XY vs ID” – как функции „ID” („Node ID” или „Element ID”, в зависимости от величины, которая просматривается) для вектора вывода из *одного* набора результатов;

- „XY vs Set” – для указанного вектора и одного „ID” как функции от номера набора (в *нескольких* наборах результатов, например, изменение температуры узла в наборах);

- „XY vs Set Value” – подобно „XY vs Set”, только не от номера набора, а от параметра „X” набора (когда он предусмотрен), например, изменение температуры узла во времени (тогда параметр „X” – температура);

- „XY vs. Position” – изменения в зависимости от положения всех узлов (или КЭ) в направлении указанной оси (X, Y или Z) для вектора в *одном* наборе результатов;

- „XY of Function” – график функций: созданных пользователем или результатов расчетов, представленных в виде функций.

После выбора одного из вариантов (кроме последнего) кнопкой „XY Data...” вызывается диалоговая панель „Select XY Curve Data” (см. рис.9.12-а). На ней выбирается катего-

рия и тип данных, может устанавливаться опция „Data at Corners” (данные в углах). В списках „Output Set” и „Output Vector” выбираются необходимые набор и вектор результатов. Для вариантов „XY vs Set” и „XY vs Set Value” активны поля „Node” или „Element” (указывается номер узла или КЭ) и „From”, „To” (указывается (*единый* для всех кривых) диапазон номеров наборов, если используются не все наборы). Можно создать до 9 кривых (отобразятся на одном графике разными цветами). **Внимание:** для справки на панели появляются возможные значения „ID”, а также максимальные и минимальные значения величины (Value), указанной в списке „Output Vector”, *лишь в том наборе*, который выбран в списке „Output Set”.

Для варианта „XY vs. Position” в секции „Position” необходимо указать направление и координатную систему. Для вариантов „XY vs ID” и „XY vs. Position” в секции „Group” в качестве ограничения можно выбрать группу объектов (активную или из списка).

Некоторые результаты расчетов в FEMAP представляются как функции, которые можно просмотреть с помощью варианта „XY of Function”. Тогда кнопкой „Model Data...” (см. рис.9.11) нужно вызвать диалоговую панель „Select XY Curve Data” (см. рис.9.12-б), где в секции „Function” нужно в списке „Section” выбрать необходимый вектор. Аналогично (см. Раздел 1.8.2) проводится просмотр графиков функций, созданных с помощью команды **Model**→**Function**...

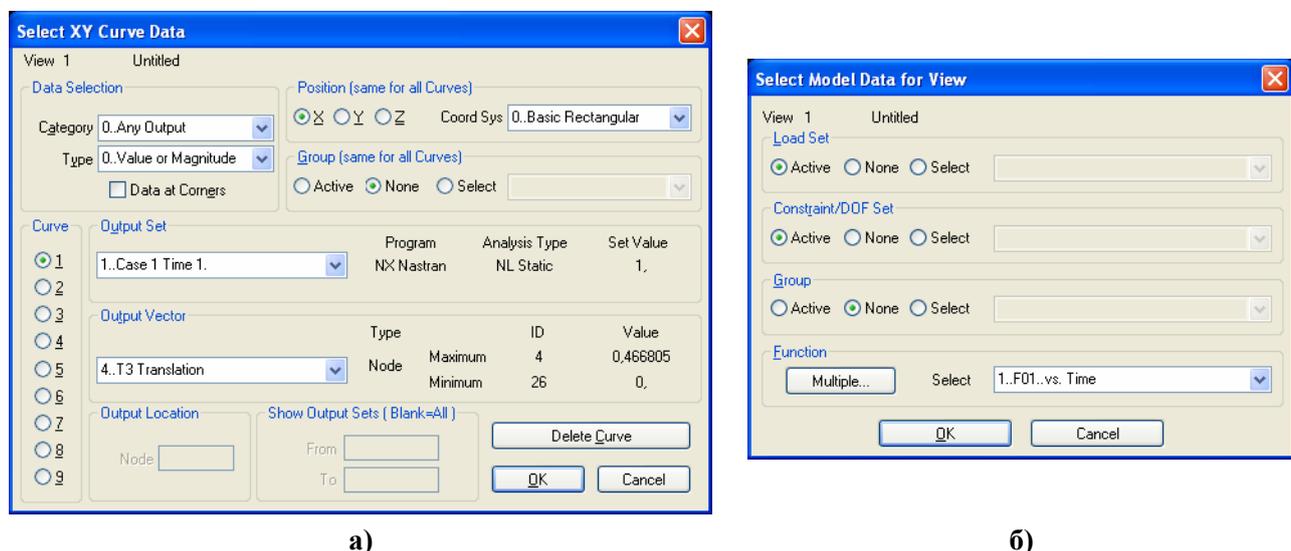


Рис.9.12. Диалоговые панели настраивания просмотра результатов расчетов в виде графиков

**Внимание:** для масштабирования графиков удобно пользоваться кнопками панели „View Magnify” (вызывается командой **View**→**Magnify...** или горячими клавишами „Ctrl+M”): „Fill View” – 100% заполнение поля графика; „Down 10%” или „Up 10%” – уменьшение или увеличение сразу на 10%. Последние действия можно также выполнять электронными кнопками . Кнопка (**Zoom**) может послужить для „вырезания” части графика.

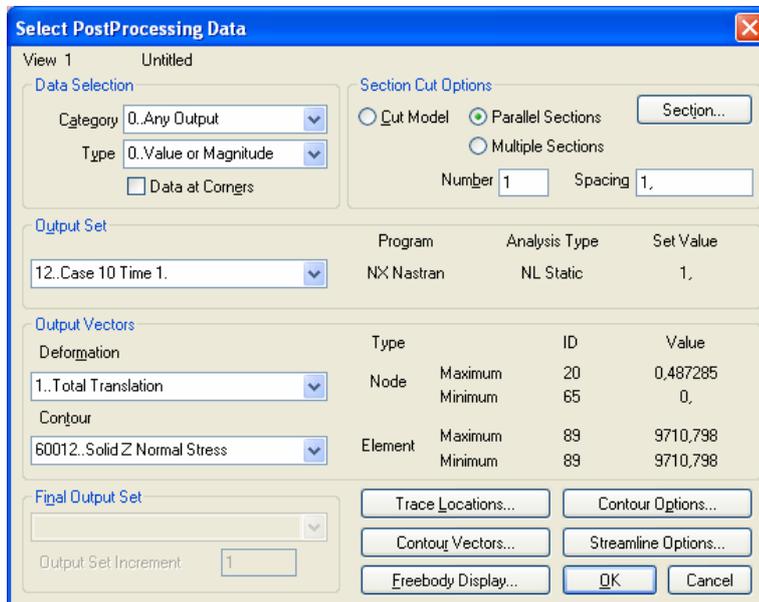
В секции „Model Style” (см. рис.9.11) выбирается стиль изображения: „Draw Model” (геометрическая модель – проволочная); „Features” (учет назначений графического режима Windows); „Quick Hidden Line” (быстрый (не точный) алгоритм удаления невидимых линий); „Full Hidden Line” (полное удаление невидимых линий); „Free Edge” (свободные грани); „Free Face” (свободные лицевые поверхности). Последние два режима применяют для проверки качества модели, поскольку свободные грани и лицевые поверхности часто указывают на локальные разрывы модели. Указанные стили изображения и те, что устанавливаются с помощью кнопки , в совокупности обеспечивают практически все варианты, которые могут потребоваться для работы с объектами модели.

В секции „Deformed Style” (см. рис.9.11) выбирается стиль отображения деформаций тела: „None – Model Only” (без деформаций); „Deform” (с деформациями, степень утрирования устанавливается на диалоговой панели „View Options”, см. Раздел 9.3.2 и п. 63 табл.Д1.1

Приложения 1); „**Animate**” (анимация с деформациями); „**Animate Multi-Set**” (анимация на основе нескольких последовательных наборов); „**Vector**” (без деформаций, но с векторами направления деформирования); „**Trace**” (подобно „**Animate Multi-Set**”, но без отображения соединенных линий); „**Streamline**” (направление потока через КЭ типа **Solid**). Для отображения скалярных величин для трех стилей активна опция „**Skip Deformations**”.

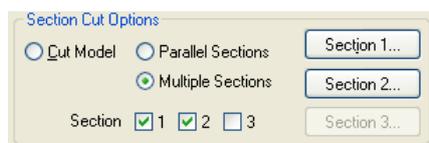
В секции „**Contour Style**” (см. рис.9.11) выбирается стиль отображения результатов расчетов в виде цветных изополос, изоповерхностей и эпюр: „**None – Model Only**” (не отображать); „**Contour**” (аппроксимированное изображение на контуре, т.е. на поверхностях КЭ, которые являются внешними для тела); „**Criteria**” (как „**Contour**”, но не аппроксимированное, а усредненное для КЭ); „**Beam Diagram**” (эпюры или подобный им диаграммы); „**IsoSurface**” (внутренние изоповерхности в *трехмерных* КЭ моделях; „**Section Cut**” (отсеченные плоскостями частей тела); „**Vector**” (векторы из центров КЭ).

**Внимание:** во-первых, изображение может несколько измениться при выборе других вариантов секции „**Model Style**”; во-вторых, количество изополос (цветов) устанавливается на диалоговой панели „**View Options**” в категории „**PostProcessing**” для „**Contour/Criteria Levels**” в поле „**# of Levels**”. По умолчанию это количество равно 16. Можно его увеличить, например, до 32, но значительно его увеличивать нет смысла.



**Рис.9.13.** Диалоговая панель назначения наборов и векторов результатов расчетов для отображения в виде цветных изополос, изоповерхностей и эпюр

– вектор результатов, на основе которого будет создаваться стиль отображения деформаций тела „**Deformed Style**” (т.е. проводится анимация); в окне „**Contour**” – тот, на основе которого будет создаваться стиль отображения „**Contour Style**” (т.е. тот, что будет отображаться цветом на поверхности тела). Если в секции „**Deformed Style**” было выбрано „**Animate Multi-Set**” или „**Trace**”, то будут активными окна „**Final Output Set**” (последний набор из диапазона наборов) и „**Output Set Increment**” (шаг по номерам наборов).



**Рис.9.14.** Изображение секции „**Section Cut Options**” диалоговой панели „**Select PostProcessing Data**” для варианта „**Multiple Sections**”

Когда назначены режимы „**Deformed Style**” и „**Contour Style**”, нужно кнопкой „**Deformed and Contour Data...**” вызвать диалоговую панель „**Select PostProcessing Data**” (см. рис.9.13). Еще эту панель можно вызвать кнопкой  (**Post Data**) из панели команд, комбинацией „**Shift+F5**” или командой „**Post Data...**” на динамической панели, вызываемой правой кнопкой „мыши” (тогда применяются те назначения на диалоговой панели „**View Select**”, что были сделаны при последнем ее вызове). Левая ее часть напоминает диалоговую панель „**Select XY Curve Data**” (см. рис.9.12-а). В окне „**Output Set**” выбирается набор результатов; в окне „**Deformation**”

В секции „**Section Cut Options**” (активна лишь для варианта „**Section Cuts**” секции „**Contour Style**”, см. рис.9.11) есть три варианта. Первый (**Cut Model**) позволяет назначить одну плоскость рассечения твердого тела (с помощью кнопки „**Define Section...**”), после чего изображение одной части тела (что на стороне с положительным направлением нормали к плоскости) исчезает, а на плоскости рассечения и на оставшихся поверхностях появляется цветное изображение. Второй

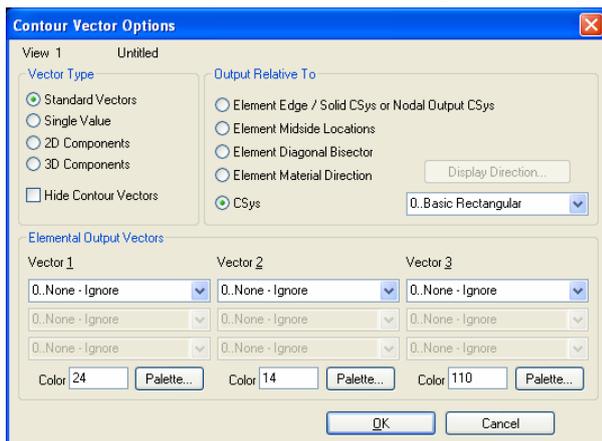
вариант (**Parallel Sections**) позволяет назначить одну или несколько *параллельных* плоскостей рассечения, причем изображение всего тела становится прозрачным, и лишь на плоскостях рассечения есть изображения изополос. В поле „**Number**” указывается количество плоскостей, а в „**Spacing**” – расстояние между ними в положительном направлении нормали к первой плоскости (со знаком минус – в обратном направлении). Изображение модели зависит от выбора варианта в секции „**Model Style**” (см. рис.9.11).

Третий вариант (**Multiple Sections**) позволяет назначить до трех плоскостей рассечения твердого тела с *независимой* ориентацией с помощью кнопок „**Section 1...**”, „**Section 2...**” и „**Section 3...**” (см. рис.9.14).

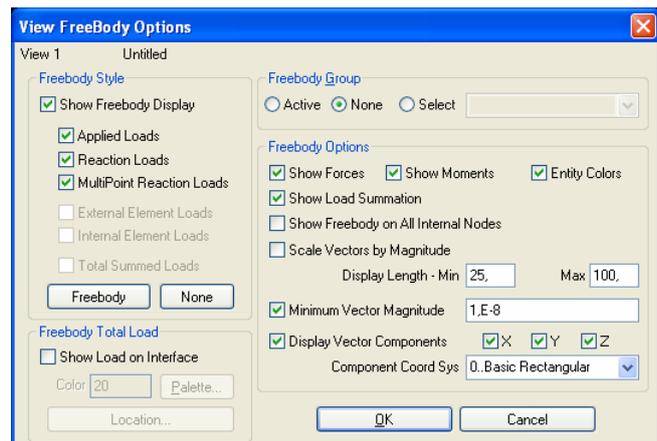
Для режима „**Trace**” (см. рис.9.11) кнопкой „**Trace Locations...**” можно вызвать диалоговую панель „**Trace Locations**”, на которой – выбрать один из трех вариантов для узлов: „**All**” (все, вариант по умолчанию), „**ID**” (конкретный узел) или „**Group**” (заранее созданная группа узлов).

Кнопкой „**Contour Options...**” можно вызвать диалоговую панель „**Select Contour Options**” (см. рис.9.10-а), которая уже описана в Разделе 9.3.2.

Для режима „**Vector**” (см. рис.9.11) кнопкой „**Contour Vectors...**” можно вызвать диалоговую панель „**Contour Vectors Options**” (см. рис.9.15-а) для настраивания контурных векторных графиков (до трех разных векторов (из списков), обозначенных разными цветами на одном графике). Есть такие типы графиков: „**Standard Vectors**” (один из векторов типа „**Total**”), „**Single Value**” (один из векторов типа „**Total**” или одна из компонент), „**2-D Components**” (два) и „**3-D Components**” (три логически связанных вектора). Например, для двух векторных графиков типа „**3-D Components**” необходимо выбрать 6 векторов. Для двумерных и трехмерных КЭ в секции „**Output Relative To**” можно выбрать один из пяти вариантов направлений: „**Element Edge / Solid CSys or Nodal Output Csys**” (в двумерных КЭ направление **X** – вдоль 1-го ребра КЭ; для трехмерных КЭ – в соответствии с введенной локальной системой координат); „**Element Midside Locations**” (в двумерных КЭ направление **X** – от среднего узла 2-го ребра к среднему узлу последнего (3-го или 4-го) ребра); „**Element Diagonal Bisector**” (в двумерных КЭ с 4-мя углами направление **X** – вдоль биссектрисы угла между диагоналями, причем угол – в треугольнике при 1-ом ребре); „**Element Material Direction**” (направление **X** – вдоль ориентации свойств материала); „**CSys**” (в выбранной глобальной системе координат). **Внимание:** FEMAP не проверяет соответствие этих назначений ситуации, поэтому возможны неверные изображения.



а)



б)

**Рис.9.15. Диалоговые панели для настраивания:**

**а) – контурных векторных графиков; б) – режима Freebody**

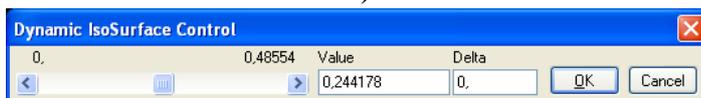
Для всех режимов, кроме „**Free Edge**” (см. рис.9.11), кнопкой „**Freebody display...**” можно вызвать диалоговую панель „**View FreeBody Options**” (см. рис.9.15-б) для настраивания еще одного типа графического изображения результатов расчетов – контурных векторов (после инициации опции „**Show Freebody Display**”). Типичная диаграмма „**freebody**” будет включать приложенные нагрузки (**Applied Loads**), реакции связей (**Reaction Loads** и **Multi-**

point Reaction Loads), внешние (External Element Loads) и внутренние (Internal Element Loads) элементные нагрузки, сумма всех сил, т.е. равновесная „Total Summed Load” (позволяет проверить, является ли тело уравновешенным?), которые отображены в виде векторов. Для прояснения изображения может послужить изображение КЭ в сжатом виде (см. п. 44 таблицы Д1.1 в Приложении 1). Есть возможность ограничить объекты (КЭ) заранее созданной группой. В секции „Freebody Options” нужно указать, какие векторы изображать: сил и/или моментов. Опция „Entity Colors” указывает, что будет применен цвет изображения векторов, предназначенный для „Vector Style” (см. рис.9.8-б). Опцией „Show Load Summation” указывается, что векторы каждого узла сводятся к единому; при этом появляется возможность в секции „Freebody Total Load” указать их особый цвет и (кнопкой „Location...” – локализацию. Опцией „Show Freebody on All Internal Nodes” (для всех внутренних узлов) рекомендуют пользоваться при незначительном количестве таких узлов. С помощью опции „Scale Vectors by Magnitude” и полей „Display Length” можно указать минимальную и максимальную длину векторов. В поле „Minimum Vector Magnitude” можно указать ограничение снизу на величины векторов, что будут отображены, а с помощью опции „Display Vector Components” – удалить векторы, направленные вдоль осей X, Y и/или Z выбранной основной координатной системы.

Для просмотра результатов расчетов в *трехмерной* конечно-элементной модели еще можно применять группу команд **View**→**Advanced Post**...



а)



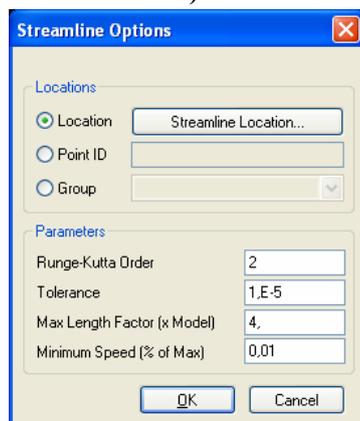
б)



в)



г)



д)

Рис.9.16. Диалоговые панели:

а) – динамического рассечения; б) – просмотра внутренней изоповерхности; в) – анимации; г) – линии потока; д) – опций линий потока

„face Color” (см. п. 77 таблицы Д1.1 Приложения 1);

- **Dynamic Cutting Plane...** – динамическое рассечение трехмерной КЭ модели первую (по умолчанию – плоскость XY), вторую (YZ) или третью (ZX) плоскостями, ориентацию которых можно изменить с помощью кнопки „Plane...” на диалоговой панели „Dynamic Section Cut Control” (см. рис.9.16-а). Текущее положение плоскостей изменяется движком полосы прокручивания или с клавиатуры в поле „Value”. В поле „Delta” можно установить шаг для скачкообразного перемещения плоскостей;

- **Dynamic IsoSurface...** – динамическое отображение результатов трехмерного расчета в виде *одной* внутренней изоповерхности. На диалоговой панели „Dynamic IsoSurface Control” (см. рис.9.16-б) с помощью движка полосы прокручивания или из поля „Value” можно установить любое значение просматриваемой функции, в диапазоне ее изменения. На трехмерной модели тела отображается соответствующая изоповерхность. Ее цвет или будет соответствовать значению функции (**Contour Colors**), или будет неизменным (**Use View Color**) и соответствовать значению „IsoSur-

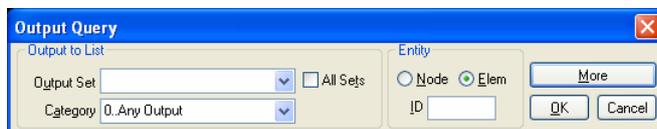
- **Animation...** – просмотр анимационных изображений (в режиме „**Animate**”, см. рис.9.11). Есть регулирование скоростью анимации (с помощью кнопок „**Faster**” и „**Slower**”, а также значение „**Delay**”, см. рис.9.16-в). В режиме „**Half**” половина изображений пропускается (есть еще „**Full**” – полный);

- **Dynamic Streamline...** – динамическое изменение начальной точки линии потока (в режиме „**Streamline**”, см. рис.9.11). На диалоговой панели „**Dynamic Streamline Control**” (см. рис.9.16-г) с помощью радиокнопок выбирается глобальная ось (**X**, **Y** или **Z**), движком полосы прокручивания или в поле „**Value**” можно установить значение координаты начальной точки, а также значение шага – в поле „**Delta**”.

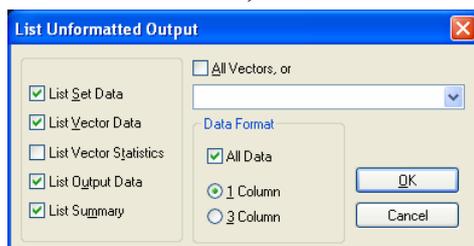
**Примечание 9.3.** На рис.9.16-д изображена диалоговая панель „**Streamline Options**”, вызываемая кнопкой „**Streamline Options...**” (см. рис.9.13). На ней в секции „**Locations**” можно указать координаты начальной точки: или с помощью кнопки „**Streamline Locations...**”, или указать **ID** точки, или указать группу с перечнем точек (тогда линий потока будет столько, сколько точек в группе). В секции „**Parameters**” – „**Runge-Kutta Order**” (порядок метода Рунга-Кутты, используемый для вычислений линии потока), „**Tolerance**” (точность вхождения в КЭ или выхода из него), „**Max Length Factor (x Model)**” (вычисление линии потока закончить при достижении этого значения), „**Minimum Speed (% of Max)**” (вычисление линии потока закончить, если он не превышает указанный процент от зафиксированного максимального значения). Почти все эти опции, а также оформление линии (цвет, тип линии, толщина) можно установить на панели „**View Options**” (см. рис.9.8) в секции „**PostProcessing**” для объекта „**Streamline**”.

Еще один вариант просмотра результатов – с помощью команд меню **List**→**Output**:

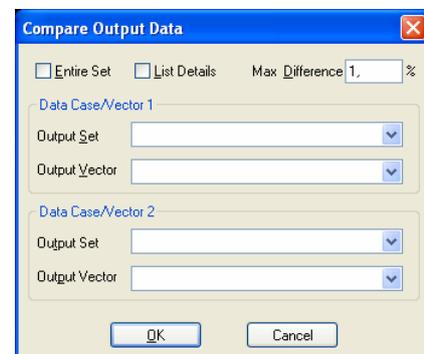
- **Query...** (запрос о данных в одиночном объекте) – на диалоговой панели (см. рис.9.17-а) выбирается набор результатов („**All Sets**” – все), категория (все, или перемещение, скорость/ускорение, напряжение ...), объект (узел или КЭ), указывается его номер (**ID**). Кнопка „**More**” позволяет продолжать вывод данных без выхода из диалога;



а)



в)



б)

**Рис.9.17.** Диалоговые панели создания запроса:

а) – для одиночного объекта; б) – сравнительного; в) – для вектора, упрощенный формат

- **Compare...** (сравнение) – на диалоговой панели (см. рис.9.17-б) выбираются два набора результатов и, если отключить опцию „**Entire Set**” (полный набор) – векторы. Также указывается предельное значение различия (в процентах), которое не будет считаться различием. Можно установить опцию „**List Details**” (детальный вывод). В заключительной строке сообщения еще приводятся **ID** и максимальное различие (**MxDiff**), **ID** и максимальное различие в процентах (**MxPct**), а также скалярное произведение (**Dot**) двух векторов (последнее можно использовать для проверки ортогональности векторов);

- **Unformatted...** (упрощенный вывод) – на диалоговой панели (см. рис.9.17-в) устанавливается опция „**All Vectors**” или выбирается вектор (из текущего набора), а также указываются, какие данные выводить и во сколько столбцов (1 или 3);

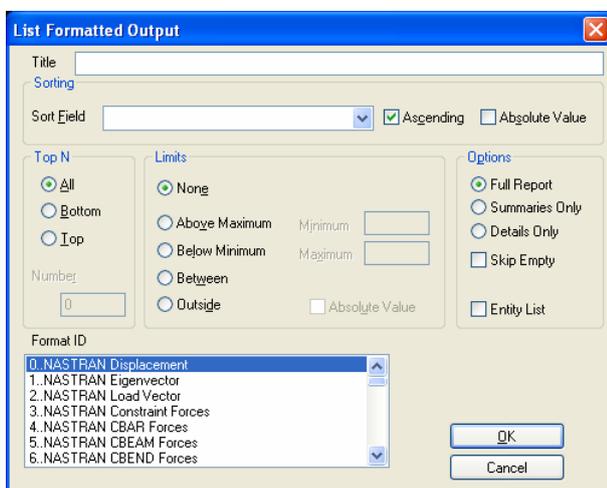
- **Standard...** (стандартный вывод) – для выбранного набора результатов на диалоговой панели (см. рис.9.18-а) можно ввести заголовок (**Title**), в списке „**Sort Field**” – выбрать вектор результатов; опциями „**Ascending**” (увеличение) и „**Absolute value**” (абсолютное значение) – назначить принцип сортировки; в секторе „**Top N**” (для узлов или КЭ) – количество значений, из которых будет сформирован список („**Top**” – максимальные или „**Bottom**” – минимальные значения); в секторе „**Limits**” – ограничения: „**Above Maximum**”, „**Below Minimum**”, „**Between**” или „**Outside**” (выше, ниже, в диапазоне или за границами указанных значений); в секторе „**Options**” – „**Full Report**” (полный отчет), „**Details Only**” (только детали) или „**Summaries Only**” (только резюме). Из списка „**Format ID**” нужно выбрать один из стандартных форматов вывода данных (**внимание**: он должен соответствовать вектору). Опция „**Skip Empty**” указывает, что не надо выводить поля с отсутствующими данными (когда вместо ожидаемых цифр выводятся „звездочки” \*\*\*\*\*); опция „**Entity List**” – список идентификаторов узлов или КЭ, для которых выведены данные;

- **Use Format...** (формат пользователя) – после выбора набора результатов появляется диалоговая панель „**List Formatted Output**” (см. рис.9.18-а). Но на ней есть две новые кнопки: „**Modify Format...**” и „**New Format...**”, вызывающие панель „**Define Output Format**” (см. рис.9.18-б). На ней кнопкой „**Load**” вызывается список стандартных форматов или кнопкой „**Copy**” – один из ранее выбранных; выбирается один из них из списка, потом формат можно изменить нужным образом. Значения в скобках <> такие: номер вектора, количество цифр, указатель E-формата (Y или N), выравнивать слева (Y или N). Более подробно – в „**Help**”;

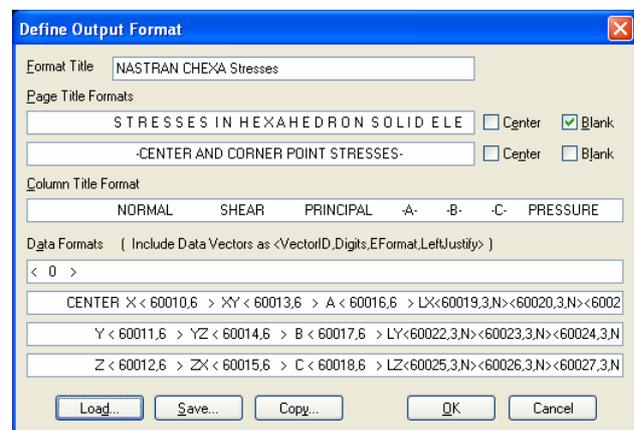
- **Force Balance...** (баланс сил) – последовательно выбираются набор результатов, узел и система координат для вывода всех сил, что действуют на узел;

- **XY Plot...** (график в виде таблицы) – необходимо последовательно построить график (**F5**→**XY vs. Set**), задать имя файла для вывода с расширением имени **.lst** (если это нужно, **List**→**Destination...**), дать команду для вывода (**List**→**Output**→**XY PLOT**);

- **Format...** – выводят данные о назначенных ранее форматах вывода результатов.



а)



б)

Рис.9.18. Диалоговые панели: а) – стандартного формата вывода; б) – настраивания формата

Сообщения появляются в окне „**Messages**”. **Внимание**: с помощью команды **List**→**Destination...** можно указать и другие пути вывода: на принтер или в файл, но нужно помнить, что туда будут выводиться *все* сообщения. Выделенную в окне „**Messages**” часть сообщения можно сохранить в файле с расширением имени **.lst** или **.rtf** с помощью команды **File**→**Messages**→**Save...**, или скопировать в буферную память.

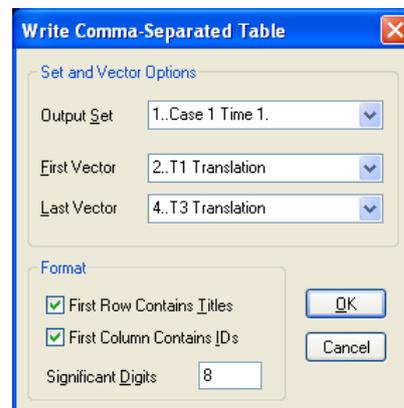
Напомним о еще двух очень удобных возможностях. Первая – применение переключателей **Prop: 1** **Ld: 1** **Con: 1** **Grp: 0** **Out: 1**, что расположены в правой части панели состояния (горизонтальная полоса внизу, см. рис.1.1. Раздела 1.3). Вторая – вывод информации об выбран-

ных объектах (линия, поверхность, узел, материал, КЭ, ...) на информационные панели „**Entity Info**” (об одном объекте) и „**Data Table**” (несколько объектов) – см. рис.1.2-в и рис.1.2-г и объяснение к ним.

Полную статистику для всей модели можно получить командой **List→Model Info**.

В FEMAP реализованная возможность передачи результатов расчетов в виде текстовых таблиц, например, в табличный редактор **Excel**. Нужно командой **File→Export→Analysis Model...** вызвать диалоговую панель „**Export Method**”, кнопкой „**Other Interface**” вызвать панель „**Export To**” и выбрать на ней вариант „**Comma-Separated**”. После назначения имени файла появится панель (см. рис.9.19), где необходимо выбрать набор результатов (**Output Set**), первый (**First**) и последний (**Last**) из нужных векторов (они должны иметь одинаковый тип: узловой или элементный). В секции „**Format**” есть опции „**First Row Contains Titles**” (первая строка – название) и „**First Column Contains IDs**” (первый столбик – номера), а также поле „**Significant Digits**” (количество значащих знаков в результатах). После выбора необходимых узлов или КЭ будет создан файл \*.csv.

Данные из этого текстового файла в табличный редактор **Excel** можно импортировать с помощью команды (русскоязычный интерфейс): **Данные → Импорт внешних данных → Импортировать данные...**, в дальнейшем указать, что формат данных – с разделителем, символ-разделитель – запятая; на следующей панели инициировать кнопку „**Подробнее...**” и указать, что разделитель целой и дробной части – точка.



**Рис.9.19.** Диалоговая панель вывода результатов в текстовый файл в виде таблиц