

## Раздел 6

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ТЕЛ. СТАТИКА**

NX Nastran для решения краевых задач о напряженно-деформированном состоянии (НДС) тел применяет постановку задачи в перемещениях с использованием вариационного принципа Лагранжа и метода конечных элементов. Такие расчеты могут потребовать очень значительные объемы оперативной и еще больше дисковой памяти, а также занимать много времени на этапе вычисления. Это потому, что метод конечных элементов порождает большую по размеру систему алгебраических уравнений, занимающую много памяти ЭВМ и относительно долго решаемую.

Основные теоретические сведения о статических краевых задачах про НДС тел приведены в Приложениях 5 и 6.

**6.1. Задание начальных и граничных условий в FEMAP**

В Разделе 4.1. изложены общие сведения относительно задания граничных условий. Здесь изложим лишь дополнительные сведения, характерные для задач об НДС тел.

Для этих задач различают два типа граничных условий: ГУ 1-го рода (закрепления, перемещения узлов, связи степеней свободы разных узлов) и все другие ГУ: сосредоточенные силы, распределенные на поверхности усилия (естественные ГУ, или ГУ 2-го рода), объемные (вес, инерционные и „температурные” силы).

**6.1.1. Задание начальных условий**

По умолчанию считается, что все начальные условия – нулевые. Однако можно назначить другие варианты начальных условий, используя для этого результаты предварительно проведенных расчетов. Подробно об этой процедуре речь шла в Разделе 4.1.4.5.

**Внимание:** если в расчетах необходимо учитывать *температурные деформации*, то нужно:

- провести, если это еще не было сделано, расчет теплового состояния тела (см. Раздел 5);
- с помощью команды **Model→Load→From Output...** подключить один из полученных векторов значений температуры *в узлах* как граничное условие задачи (см. Раздел 4.1.4.5, рис.4.9-а и рис.4.10-а);

- командой **Model→Load→Body...** вызвать диалоговую панель „**Create Body Loads**” (см. рис.5.1-а), проверить или изменить (последнее допустимо только в случае предыдущего решения *стационарной* задачи теплопроводности) значение *температуры* тела (в поле „**Default Temperature**”, внизу), которая назначается для всех *узлов* КЭС.

**6.1.2. Задание граничных условий 1-го рода (закреплений, перемещений, связей)**

Чтобы краевую задачу об НДС тела можно было решить, тело обязательно должно иметь такой набор ГУ 1-го рода (закрепления в пространстве, заданные перемещения, связи), которые исключают для тела все возможности двигаться *как жесткое целое*: как поступательным, так и вращательным образом. Но эти закрепления, перемещения и связи не должны противоречить расчетной схеме краевой задачи, создавать паразитные напряжения и деформации.

Такие закрепления, известные перемещения и связи потом передаются программой в *узлы* конечно-элементной сетки (КЭС).

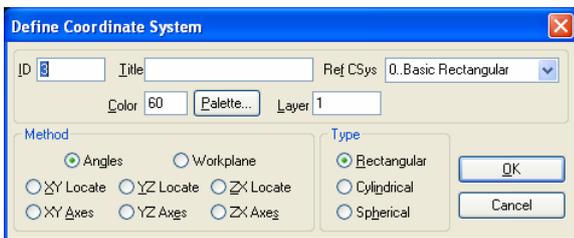
Как уже отмечалось во Вступлении, **DOF** – степени свободы узла конечно-элементной сетки. Вообще их шесть: три – перемещения (**Translation**) узла вдоль координатных осей (обозначаются как **TX**, **TY** и **TZ**), три – вращения (**Rotation**) узла вокруг осей, параллельных соответствующей координатной оси (обозначаются как **RX**, **RY** и **RZ**). Итак, для исключения

возможности телу двигаться как жесткое целое достаточно ввести ГУ 1-го рода для 6-ти степеней свободы одного или нескольких узлов. При этом нужно учитывать, какие **DOF** (степени свободы) имеют узлы конечного элемента выбранного типа (см. „**Help**” или Приложение 3). Например, трехмерные КЭ – только первые три **DOF**, а осесимметричные – только две **DOF**: **TR** и **TZ** (для цилиндрической системы координат обозначения **TX** и **TY** изменяются на **TR** и **TT**), т.е. только перемещения (на другие **DOF** можно не обращать внимания – все назначения для них игнорируются).

В FEMAP ГУ 1-го рода можно задавать непосредственно в узлах, в узлах на поверхности и на геометрических объектах (точках, линиях, поверхностях). Но и в последнем случае они передаются в узлы, *ассоциированные с данными геометрическими объектами* (об ассоциациях узлов см. Раздел 4.1.2).

Команда **Model**→**Constraint**→**Set** позволяет создать новый набор ГУ 1-го рода (только для закреплений) или выбрать его со списка ранее введенных.

### 6.1.2.1. Создание собственной системы координат

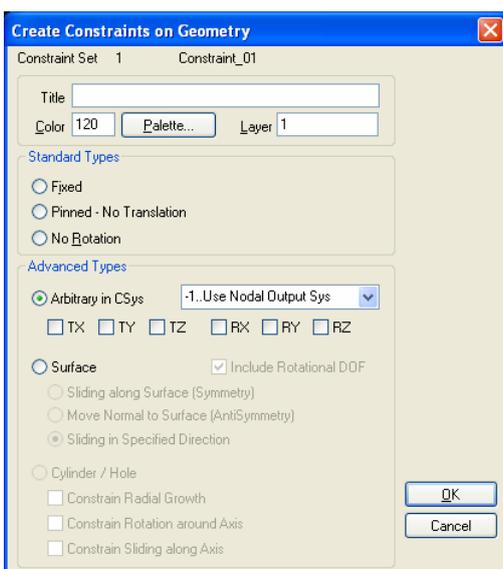


**Рис.6.1.** Диалоговая панель для создания собственной системы координат

Иногда для задания граничных условий 1-го рода (и не только) нужна система координат, которая имеет другую ориентацию осей, чем глобальная. Командой **Model**→**Coord Sys...** вызывается соответствующая диалоговая панель (см. рис.6.1), где нужно: дать ей название (**Title**); указать тип глобальной системы (**Ref CSys**); при необходимости – изменить номер уровня (**Layer**) и цвет изображения; указать метод назначения ее положения. После

команды „**OK**” последовательно вводятся для методов:

- **Angles**: координаты начала новой системы, углы вращения относительно осей основной системы (градусы);
- **Workplane**: ничего (координаты начала новой системы находятся „в нулях” рабочей плоскости (РП), оси **X** и **Y** – параллельны осям **X** и **Y** РП, ось **Z** – перпендикулярна РП);
- **XY, YZ, ZX Locate**: координаты трех точек, а именно начала новой системы, конца первой оси (таким способом задается ее направление), последней точки, которая определяет плоскость **XY**, **YZ** или **ZX** соответственно;



**Рис.6.2.** Диалоговая панель закрепления узлов через геометрические объекты

- **XY, YZ, ZX Axes**: координаты начала новой системы, направление первой оси, направление второй оси.

### 6.1.2.2. Задание граничных условий 1-го рода в виде закреплений

Варианты закрепления степеней свободы узлов (**DOF**) через *геометрические объекты* – стандартные и расширенные (см. рис.6.2). В зависимости от типа геометрического объекта дается команда **Model**→**Constraint**→**On Point...** (→**On Curve...** или →**On Surface...**), выбираются объекты и назначается один из указанных ниже вариантов закрепления.

В секции „**Standard Types**” для всех типов геометрических объектов: „**Fixed**” – полное закрепление; „**Pinned – No Translation**” – полный запрет перемещений (шарнир); „**No Rotation**” – полный запрет вращений (только для узлов, которые имеют **DOF=456**).

В секции „**Advanced Types**” (расширенный тип закреплений) есть такие варианты:

- „Arbitrary in CSys” (в выбранной со списка системе, в частности, и в специально созданной) – полный контроль над всеми **DOF** узлов, ассоциированных с геометрическим объектом. **Внимание:** система „-1..Use Nodal Output Set” – для вывода результатов в узлах, которая автоматически создается для узлов, ассоциируемых с геометрическим объектом;
- „Surface” (на поверхности любой геометрии):
  - ♦ „Sliding along Surface (Symmetry)” (скольжение вдоль поверхности, т.е. будут запрещены перемещения в нормальном к любой точке поверхности направлении (обычно так моделируют отброшенную *симметричную* часть тела); в рабочем поле FEMAP на поверхности появятся метки „S”);
  - ♦ „Move Normal to Surface (AntiSymmetry)” (перемещения будут возможны лишь в направлении нормали к любой точке поверхности; на ней появятся метки „N”);
  - ♦ „Sliding in Specified Direction” (перемещения будут возможными лишь в указанном направлении, касательном к поверхности в любой ее точке; на поверхности появятся метки „D”);
- „Cylinder / Hole” (на цилиндрической поверхности, в частности в отверстии) – комбинация из таких вариантов (для вывода результатов в узлах автоматически создается локальная цилиндрическая система координат):
  - ♦ „Constraint Radial Growth” – закрепления в радиальном направлении (**DOF=1**), на поверхности появятся метки „CR”;
  - ♦ „Constraint Rotation around Axis” – запрет вращения вокруг оси поверхности (**DOF=2**), на поверхности появятся метки „CT”;
  - ♦ „Constraint Sliding along Axis” – запрет перемещений вдоль оси поверхности (**DOF=3**), на поверхности появятся метки „CS”.

**Примечание 6.1.** Если узлы КЭС имеют **DOF** вращения, то для назначения для них условий закрепления нужно включить опцию „Include Rotational DOF” (применять **DOF** вращения, т.е. **DOF=456**). Тогда на поверхности к метке добавляется „R”.

**Примечание 6.2.** В сложных случаях есть смысл еще до запуска процесса решения задачи привести условия закрепления к узлам (с помощью команды **Model→Constraint→Expand...**, см. Раздел 4.1.4.6) и тщательно проверить, какие локальные координаты в узлах были введены и какие **DOF** были реально закреплены (см. также Раздел 6.1.2.6).

Команда **Model→Constraint→Nodal...** вызывает диалог введения ГУ 1-го рода в виде закрепления непосредственно для узлов. Сначала выбирается узел или несколько (все) узлов с одинаковыми закреплениями. Появляется диалоговая панель „Create Nodal Constraints/DOF” (см. рис.6.3). Здесь можно изменить координатную систему „Coord Sys”, самостоятельно указать **DOF**, что будут запрещены (установить „флажки”) или назначить с помощью кнопок один из вариантов: „Free” (все **DOF** – свободны); „Fixed” (все **DOF** – запрещены); „Pinned” (только вращение); „No Rotation” (только линейные перемещения); „X Symmetry”, „Y Symmetry” или „Z Symmetry” (тело и ГУ имеют симметрию в указанном направлении); „X AntiSymm”, „Y AntiSymm” или „Z AntiSymm” (тело и ГУ имеют антисимметрию в указанном направлении).

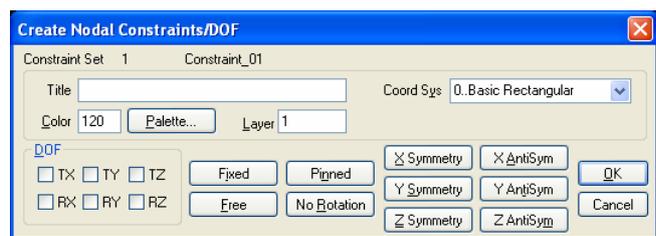


Рис.6.3. Диалоговая панель закрепления узлов

**Примечание 6.3.** Как это уже отмечалось в Разделе 3.3.2.1, еще на этапе создания конечно-элементной сетки (КЭС) можно исключить некоторые **DOF** всех узлов КЭС. Чтобы эти назначения изменить, совсем не нужно удалять КЭ и создавать их снова. Достаточно ввести новые значения для всех узлов (см. предыдущий абзац).

**Примечание 6.4.** Как это уже отмечалось в Разделе 1.6, еще на этапе создания расчетной модели, если тело имеет геометрическую плоскость симметрии и все условия нагружения тоже симметричны относительно этой плоскости, то симметричную часть нужно отбро-

суть, заменив отброшенную часть граничными условиями симметрии: запретить степени свободы (**DOF**) узлов конечно-элементной сетки, что расположены на этой плоскости, в направлении, *перпендикулярном* к этой плоскости. Таких плоскостей может быть несколько. При этом:

- приблизительно в два раза при каждом симметричном отсечении уменьшается размер системы уравнений, порождаемой методом конечных элементов;
- во столько же раз уменьшаются нужный размер оперативной памяти и памяти на магнитном носителе;
- еще значительно уменьшается время решения системы уравнений;
- действительно достигается симметрия решения краевой задачи.

Довольно часто вместо команды **Model**→**Constraint**→**Nodal...** удобнее пользоваться возможностями команды **Model**→**Constraint**→**Nodal on Face...** (закрепления в узлах на грани). Подробно о варианте назначений ГУ (не только 1-го рода) в узлах на грани (**Nodal on Face...**) изложено в Разделе 4.1.1.

**Внимание:** грани КЭ (называются „**Face ID**”) имеют номера от 1 до 6 максимум; другие грани и объекты – номера 1 и выше.

### 6.1.2.3. Задание граничных условий 1-го рода в виде перемещений или углов вращения

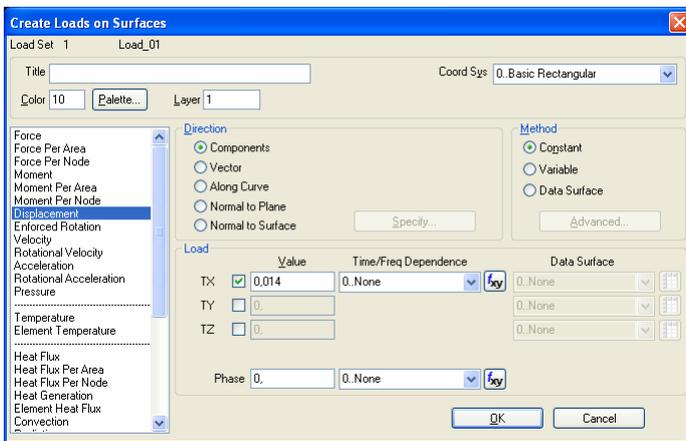


Рис.6.4. Диалоговая панель для введения граничных условий к отдельным объектам тела

Когда заранее известно о законе перемещения или вращения узла или другого объекта проекта, соответствующее ГУ задается с помощью команд **Model**→**Load**: назначается тип объекта для приложения ГУ (→**Nodal...**, →**Nodal on Face...**, другие) и выбираются объекты; на появившейся диалоговой панели „**Create Loads on ...**” (см. рис.6.4) выбирается „**Displacement**” (перемещение) или „**Enforces Rotation**” (назначенный угол вращения, в градусах), выполняются другие действия (см. Разделы 4.1.3 и 4.1.4).

**Внимание:** варианты ГУ „**Velocity**” (скорость), „**Acceleration**” (ускорение) и „**Rotational Acceleration**” (ускорение при вращении) *не являются* ГУ 1-го рода, поэтому напомним об обязательности задания ГУ 1-го рода для тела (см. первый абзац Раздела 6.1.2).

### 6.1.2.4. Задание граничных условий 1-го рода в виде связей

В Разделе 3.4.1. уже рассматривались связи между узлами, которые (связи) создавались с помощью КЭ типа **RIGID**. В FEMAP есть еще одна возможность создания связей между узлами – по формуле  $\sum a_i q_i = 0$ , где  $q_i$  – степени свободы узлов,  $a_i$  – коэффициенты.

Командой **Model**→**Constraint**→**Equation...** вызывается диалоговая панель „**Create Constraint Equation**” (см. рис.6.5-а), на которой указываются: **ID** формулы; цвет изображения связей; уровень (**Layer**); значение коэффициента  $a_i$ ; номер узла; степени свободы **DOF**, что связываются. Дается команда „**Add**” (прибавить) и указанная информация появляется в большом окне диалоговой панели. Когда все компоненты данной суммы набраны, дается команда „**OK**”. Если в сумме есть значительное количество узлов с одинаковыми назначениями (кроме их номеров), то можно кнопкой „**Multiple Nodes...**” вызвать стандартный диалог выбора узлов. В FEMAP есть ограничения для количества членов в сумме: до 70. На рис.6.5-а изображено состояние диалогового окна после подачи команды „**Add**” перед командой „**OK**”, т.е. после формирования уравнения  $TZ(4) - TZ(49) = 0$ , которое указывает, что перемещения узлов 4 и 49 в направлении координатной оси **Z** должны быть одинаковыми.

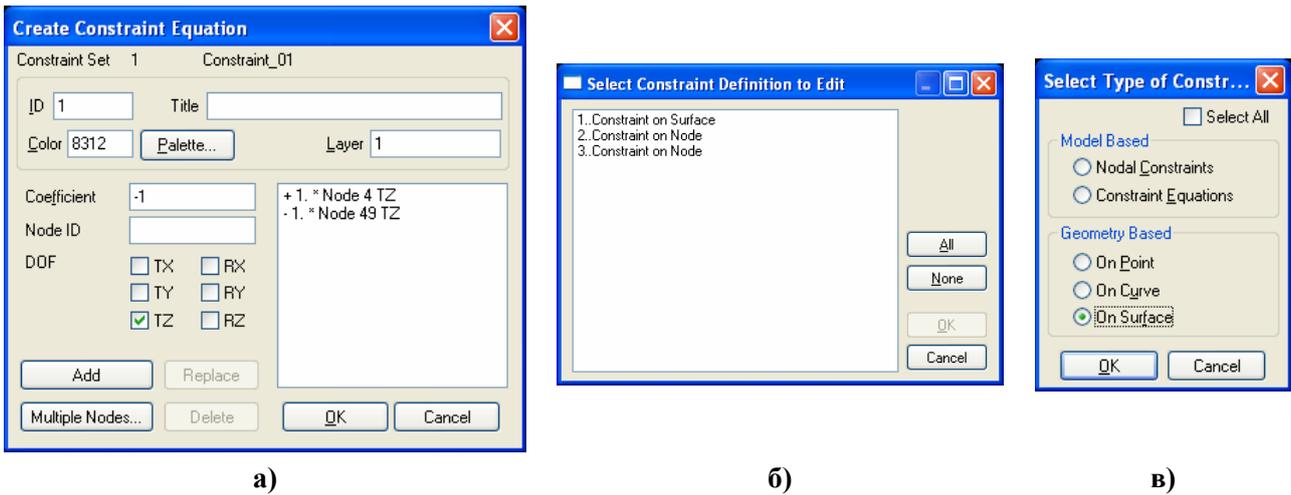


Рис.6.5. Диалоговые панели: а) – создания уравнения связи между DOF узлов; б) – выбора объектов для редактирования закреплений; в) – выбора объектов для удаления закреплений

Для возвращения к предыдущей ситуации есть кнопка „**Replace**”, для удаления ненужных или по ошибке набранных компонентов суммы – команда „**Delete**”.

#### 6.1.2.5. Редактирование или удаление граничных условий 1-го рода

Для редактирования уже сформированного списка ГУ 1-го рода дается команда **Modify**→**Edit**→**Constraint – Definition...**, на появившейся панели „**Select Constraint Definition to Edit**” (см. рис.6.5-б) выбирается нужный вариант или все варианты (есть кнопка „**All**”). Есть и другая команда: **Modify**→**Edit**→**Constraint – Individual...**, вызывающая панель „**Select Type of Constr...**” (см. рис.6.5-в), где выбирается нужный вариант условий, дается команда „**OK**” и выбираются объекты указанного типа с ГУ 1-го рода. В обоих случаях, если такая модификация возможна, одна за одной будут появляться соответствующие диалоговые панели с заполненными полями, которые можно редактировать. Но такая возможность реализуется не всегда. Если такое редактирование не удалось, приходится удалять отдельные группы ГУ. Есть три варианта: командой **Delete**→**Model**→**Constrain – Definition...** вызывается диалоговая панель „**Select Constrain Definition(s) to Delete**” (аналогична изображенной на рис.6.5-б) со списком вариантов ГУ; или командой **Delete**→**Model**→**Constrain – Individual...** вызывается диалоговая панель „**Constrain List Options**” (аналогична рис.6.5-б, только вместо радиокнопок – опции), выбираются варианты ГУ, что будут удаляться; или командой **Delete**→**Model**→**Constrain – Set...** удаляется даже полный список с ГУ.

#### 6.1.2.6. Контроль закрепления тела

Для контроля введенных ГУ 1-го рода нужно с помощью команды **List**→**Model**→**Constraint – Definition...** или **List**→**Model**→**Constraint – Individual...** вызвать стандартную диалоговую панель для выбора списков с ГУ (см. рис.6.5-б и рис.6.5-в), поэтому действия при выборе необходимых вариантов ГУ описаны выше. После последней команды „**OK**” в окне сообщений (**Messages**) появится соответствующий список. Если он не помещается в стандартное количество строк, необходимо ее увеличить, как это описано в Разделе 1.5.

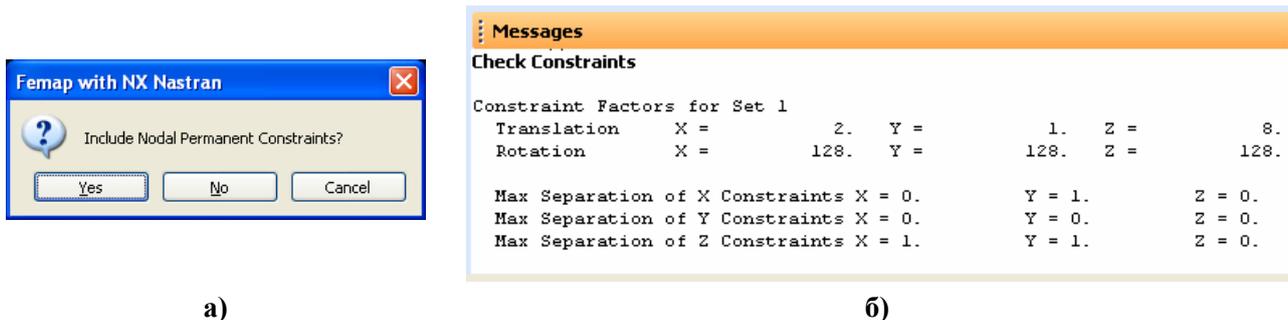


Рис.6.6. Контроль закрепления тела: а) – вопрос относительно подключения постоянных узловых связей; б) – результат проверки условий закрепления тела

Если условия закрепления приведены к узлам (в частности, с помощью команды **Model**→**Constraint**→**Expand...**), можно применить автоматический вариант контроля. Дается команда **Tools**→**Check**→**Constraints...**, дается ответ на вопрос (см. рис.6.6-а) относительно подключения для анализа постоянных узловых связей. В окне сообщений появится отчет (см. рис.6.6-б). В строках „**Translation**” и „**Rotation**” будет указано общее количество запрещенных или постоянно связанных степеней свободы узлов по перемещениям и вращениям соответственно. В сумме их не должно быть меньше, чем шесть; причем в строке „**Translation**” не должно быть нулей. В строке „**Rotation**” нули могут быть, даже все, поскольку вращение тела можно предотвратить запретом перемещений узлов. **Внимание:** если КЭ не учитывает некоторые **DOF**, то и при анализе назначенных условий закрепления на эти **DOF** не надо обращать внимания.

В трех последних строках отчета показываются максимальные расстояния между узлами по направлениям **X**, **Y** и **Z**. **Внимание:** если в *двух* столбиках одновременно все значения (для направлений **X**, **Y** или **Z**) близки до нуля или нули, то это ситуация недопустима, кроме случая, когда в строке „**Rotation**” в направлении с *третьим* названием – не нуль и когда эта **DOF** – значащая. Это потому, что все нули в столбике означают, что все эти узлы лежат в одной плоскости; а все нули в двух столбиках – на одной оси. Итак, относительно этой оси тело может вращаться, если в строке „**Rotation**” для этой оси – нуль.

### 6.1.3. Задание силовых граничных условий

#### 6.1.3.1. Задание объемных силовых граничных условий

На диалоговой панели „**Create Body Loads**” (см. рис.6.7), которая вызывается командой **Model**→**Load**→**Body...** (англ. **Body** – масса, тело), можно определить (кроме начальной температуры тела) *объемные (потенциальные) силы*, которые будут действовать на все тело. Они могут назначаться:

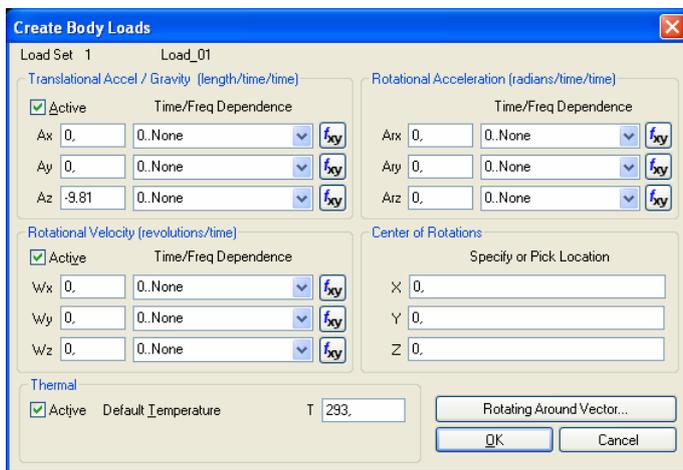


Рис.6.7. Диалоговая панель для введения граничных условий для всего тела

- в секции „**Translational Accel / Gravity (length/time/time)**” параметрами „**Ax**”, „**Ay**” и/или „**Az**” как осевые компоненты вектора ускорения (в системе **SI** размерность –  $m/c^2$ ), что возникает под действием этих сил (например, ускорение свободного падения);

- в секции „**Rotational Acceleration (radians/time/time)**” параметрами „**Arx**”, „**Ary**” и/или „**Arz**” как компоненты углового ускорения вращения (в системе **SI** размерность –  $радиан/c^2$ ) относительно осей **X**, **Y** и/или **Z**. При этом считается, что тело вращается относительно точки, координаты которой задаются значениями „**X**”, „**Y**” и/или „**Z**” в

секции „**Center of Rotation**”;

- в секции „**Rotational Velocity (revolutions/time)**” параметрами „**Wx**”, „**Wy**” и „**Wz**” как количество оборотов за принятую единицу времени (в системе **SI** размерность – об/с) вокруг осей **X**, **Y** и/или **Z**.

Каждая из таких нагрузок может быть функцией времени (**1..vs. Time**) или частоты колебаний (**3..vs. Frequency**), для чего есть поля выбора функций влияния и кнопки вызова диалоговой панели (см. рис.1.16) для создания функций.

#### 6.1.3.2. Задание статических линейных силовых граничных условий

Статические линейные силовые ГУ – это сосредоточенные силы, моменты и давления. Соответствующее ГУ задается с помощью команды **Model**→**Load**: назначается тип объекта для приложения ГУ (→**Nodal...**, →**Nodal on Face...**, другие) и выбираются объекты; на появившейся диалоговой панели „**Create Loads on ...**” (см. рис.6.4) выбирается один из вариан-

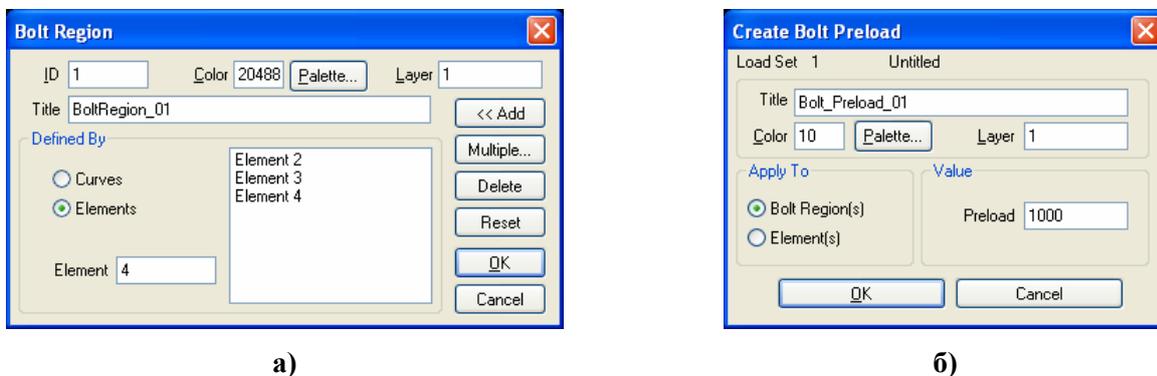
тов: „Force” (сила), „Force per Area” (сила на плоскости), „Force per Node” (сила в узле), „Moment” (момент), „Moment per Area” (момент на плоскости), „Moment per Node” (момент в узле) или „Pressure” (давление. **Внимание:** *положительное* значение давления – давление, действующее *в тело*). Выполняются другие стандартные действия, рассмотренные в Разделах 4.1.3 и 4.1.4.

### 6.1.3.3. Задание силовых граничных условий „болтового соединения”

Можно смоделировать болтовое соединение с предварительной нагрузкой в болте (т.е. с силой затягивания). Это можно делать для таких типов анализа: **Linear Static Analysis** (линейный статический), **Modal Analysis** (модальный динамический), **Buckling** (устойчивость) и **Advanced Nonlinear Analysis (Solution 601)** – передовой нелинейный анализ).

Болт в FEMAP 9.3 моделируется как один или несколько КЭ типа **BAR** или **BEAM** первого порядка аппроксимации (не Parabolic).

После создания соответствующих КЭ можно заранее создать болты-регионы. Команда **Connect→Bolt Region...** вызывает панель „Bolt Region” (см. рис.6.8-а), где выбираются или непосредственно КЭ или линии, с которыми ассоциированы КЭ: создается болт-регион с назначенным названием (**Title**).



а)

б)

Рис.6.8. Диалоговые панели: а) – создания болта-региона; б) – задания предварительной нагрузки (Preload) в болтах региона или отдельных болтах

Предварительная нагрузка в болте создается командой **Model→Load→Bolt Preload...**: на диалоговой панели (см. рис.6.8-б) выбирается или „Bolt Region(s)” (регион уже создан) или „Element(s)” (будет создаваться новый болт-регион), задается величина (сила) предварительной нагрузки в болте. После команды „OK” осталось выбрать или существующий болт-регион, или КЭ для нового болта-региона. **Внимание:** если после применения варианта „Bolt Region(s)” из решения будет видно, что предварительная нагрузка реально была создана лишь для одного КЭ (с наименьшим номером в Bolt-регионе), то необходимо отказаться от регионов и использовать вариант „Element(s)” (наверное, в программе есть ошибка).

**Примечание 6.5.** Если КЭ типа **BAR** или **BEAM** присоединяются (в узлах) к КЭ типа **Solid**, узлы которых не учитывают степени свободы 4, 5 и 6, то необходимо в таких узлах с помощью команды **Modify→Update Other→Perm Constraint...** запретить указанные степени свободы, иначе будет фатальная ошибка с номером 9137 (тело недостаточно закреплено).

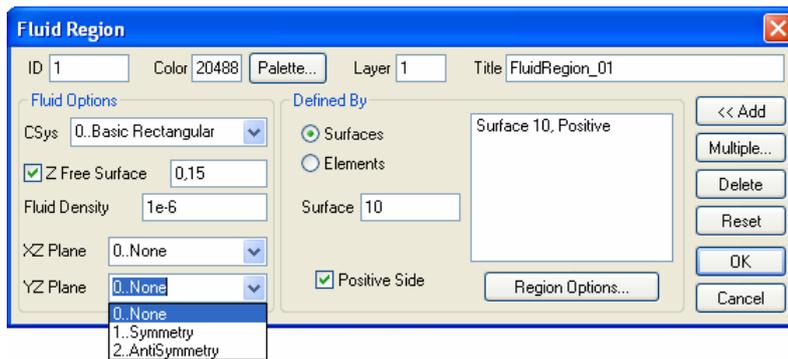
### 6.1.3.4. Задание силовых граничных условий типа „несжимаемая жидкость”

В FEMAP 9.3 появились инструменты для задания нагрузки в виде присоединения к геометрической поверхности или поверхности КЭ некоторого объема несжимаемой жидкости. В результате FEMAP создает матрицу присоединенной массы. Такой тип нагрузки поддерживается для следующих типов краевых задач в NX Nastran 5.0 (см. табл. 4.2): **103 (Modal Analysis)**, **107 ... 112 (Complex Modal Analysis и Dynamic Analyses)**, **129 (Nonlinear Transient Analysis)**, которые будут рассмотрены в Разделе 7, и задачи типа **200 (Optimization)**.

Командой **Connect→Fluid Region...** вызывается диалоговая панель „Fluid Region” (см. рис.6.9-а).

В секции „Fluid Options” (опции жидкости) есть такие опции:

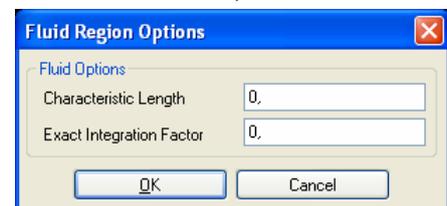
- „CSys” – система координат, должна быть *декартовой* типа: глобальной или специально созданной локальной, причем ось **Z** должна быть перпендикулярной к свободной поверхности жидкости, поскольку вдоль этой оси будет определяться толщина слоя жидкости;
- „Z Free Surface” – расстояние от начала координаты к свободной поверхности жидкости, должна быть  $\geq 0.0$ . Если начало координатной системы установить „на дне”, то опция определяет всю толщину жидкости, если „выше дна”, то – часть толщины. Таким образом можно отсекаать „гарантированную” толщину слоя жидкости от изменяемой. Еще один вариант рассмотрен в Разделе 7.2 (действует только для динамического анализа);
- „XZ Plane” и „YZ Plane” – указывает, какой тип симметрии слоя жидкости связан с этими плоскостями: отсутствует (**0..None**), симметрия (**1..Symmetry**) или кососимметрия (**2..Antisymmetry**).



а)



б)



в)

Рис.6.9. Диалоговые панели задания силовых ГУ типа „несжимаемая жидкость”

В секции „Defined By” (определение региона) радиокнопками „Surfaces” или „Elements” определяются геометрические поверхности и их стороны (в поле „Surface” и опцией „Positive Side”) или КЭ и их поверхности (в полях „Element” и „Face”, см. рис.6.9-б), с которыми взаимодействует жидкость. Список формируется стандартным способом с помощью кнопок „<<Add”, „Multiple...”, „Delete” и „Reset”.

Кнопкой „Region Options...” вызывается панель „Fluid Region Options” (см. рис.6.9-в) с опциями:

- „Characteristic Length” – характерная длина: взаимодействием с КЭ, которые лежат за пределами этой величины, NX Nastran пренебрегает;
- „Exact Integration Factor” – фактор точного интегрирования. Если расстояние между двумя КЭ меньше, чем указанное значение, умноженное на корень квадратный из размера (площади) большого КЭ, то в КЭ применяется точное интегрирование. Иначе – для интегрирования используется только центральная точка КЭ.

В случае присутствия в модели силовых граничных условий типа „несжимаемая жидкость” FEMAP в результатах формирует данные с названием „Fluid Pressure” (давление жидкости) при установлении значений „1..Print Only” (\*.f06), „2..PostProcess Only” (\*.op2), „3..Print and PostProcess” (\*.op2 и \*.f06), или „5..Punch and PostProcess” (\*.op2) на панели „NASTRAN Output Requests”.

#### 6.1.3.5. Задание нелинейных силовых граничных условий

В FEMAP можно задать в узлах силы такие, что зависят от смещения или скорости движения выбранного узла.

Команда **Model**→**Load**→**Nonlinear Force** вызывает диалоговую панель, изображенную на рис.6.10. В секторе „Relationship” (взаимосвязь) есть 4 варианта таких связей (см. табл. 6.1): „Tabular Function” (соответственно табличной функции, что выбирается со списка созданных ранее функций в секторе „Options”); „Product of Two Variables” (от двух переменных); „Positive Variable to a Power” (степенная функция, при положительной переменной); „Negative Variable to a Power” (степенная функция, при отрицательной переменной).

Таблица 6.1. Определение силы от смещения или скорости движения выбранного узла

Вариант в секторе Relationship	Формула (F=Сила, X=Смещение/Скорость)
Tabular Function	$F_i(t) = Scale \cdot Table(X_j(t))$
Product of Two Variables	$F_i(t) = Scale \cdot X_j(t) \cdot X_k(t)$
Positive Variable to Power	$F_i(t) = \begin{cases} Scale \cdot [X_j(t)]^{Power}, & \text{если } X_j(t) > 0 \\ 0, & \text{если } X_j(t) \leq 0 \end{cases}$
Negative Variable to Power	$F_i(t) = \begin{cases} -Scale \cdot [-X_j(t)]^{Power}, & \text{если } X_j(t) < 0 \\ 0, & \text{если } X_j(t) \geq 0 \end{cases}$

В секторе „Apply Force To” указываются номера узла и его степени свободы (узел можно выбрать курсором „мыши” на рабочем поле FEMAP), к которым сила будет приложена; в секторе „Based On” – тоже номера узла/узлов и его/их степени свободы, а также величину (Type), от которой сила будет зависеть: **0..Displacement** (смещение) или **1..Velocity** (скорость).

Другие варианты нелинейности, которые можно реализовать в FEMAP, связаны с геометрической или физической нелинейностью.

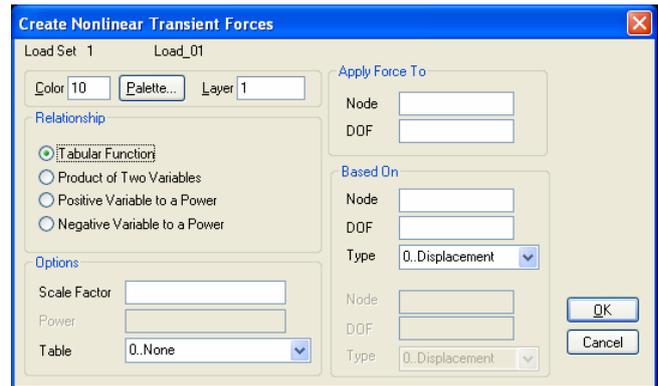


Рис.6.10. Диалоговая панель задания силы, зависимой от смещения или скорости движения выбранного узла

## 6.2. Задание опций и параметров нелинейного анализа

Когда в задаче предполагается *любая* нелинейность, для каждого из наборов нагрузок (активизировать командой **Model→Load→Set...**) нужно задать опции и параметры нелинейного анализа. **Внимание:** при применении модифицированного подхода Лагранжа (тип задачи **22..Advanced Nonlinear Static** – см. Раздел 6.4) это делать не обязательно.

Командой **Model→Load→Nonlinear Analysis...** вызывается диалоговая панель „Load Set Options for Nonlinear Analysis” (см. рис.6.11-а). На ней кнопкой „Default” сначала устанавливаются типичные значения. Кнопкой „Copy...” можно из набора нагрузок, где назначения уже сделаны, скопировать данные для текущего набора.

В секциях панели указывается:

- в „Solution Type” – тип задачи: статическая (**Static**), ползучесть (**Creep**) или эволюционная (**Transient**);
- в „Basic” – количество временных шагов (**Number of Increments**), размер временного шага (**Time Increment**) и максимальное количество итераций на каждом шаге (**Max Iterations / Step**). При линейном статическом анализе всегда делается лишь один шаг: от начального состояния к конечному. При решении нелинейной задачи все заданные нагрузки будут приложены к телу не сразу, а с нарастанием *одинаковыми частями*. Для этого вводится внутренний параметр с названием **Time** (обозначим как  $\tau$ ), который изменяется от 0 до 1 по формуле  $\tau = n \cdot \Delta\tau$ , где  $n$  – номер текущего шага нагрузки,  $\Delta\tau = 1/N$ , а  $N$  – количество таких шагов, которое вводится в диалоговом поле „Number of Increments”. В соответствии с этим среди результатов расчета будет  $N$  таблиц, в названии которых присутствует значение **Time**, для которого этот результат получен. Если по какой-то причине процесс решения задачи прерван (например, фатальная ошибка как результат вырождения геометрии КЭ), то количество таблиц будет меньшим, чем число  $N$ . Это количество может и превышать число  $N$ , если программа NX Nastran приняла решение о целесообразности уменьшения шага нагрузки (была задействована адаптивная процедура);

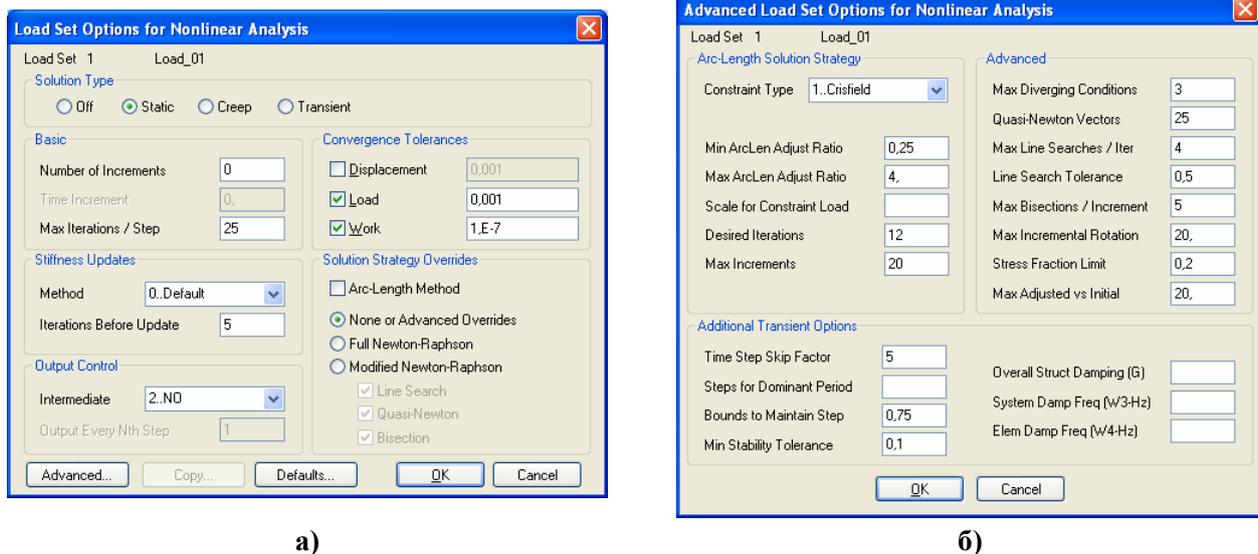


Рис.6.11. Диалоговые панели задания опций и параметров нелинейного анализа:  
а) – основная; б) – дополнительная

- в „**Stiffness Updates**” – один из 5-ти методов (**AUTO**, **ITER**, **SEMI**, **TSTEP**, **ADAPT**) модифицирования матрицы жесткости тела (МЖ); а также количество итераций (**Iteration Before Update**), через которое матрица будет модифицироваться. Если метод выбран неверно, автоматически будет установлен тот, что используется „по умолчанию”, т.е. **0..Default**. В случае нелинейной статической задачи (**Static**) можно применять **AUTO**, **ITER** или **SEMI**. В других (нестатических) – **AUTO**, **TSTEP** и **ADAPT**, причем в **0..Default** используется метод **ADAPT**, т.е. с автоматическим выбором временного шага. В методе **AUTO** МЖ обновляется исходя из оценок сходимости разных численных методов (квазиньютоновского, с линейной итерацией, половинного деления) и выбором того из них, что даст минимальное количество обновлений МЖ. Метод **SEMI** подобен методу **AUTO**, но обновление МЖ обязательно проводится и на первой итерации после изменения нагрузки, что бывает эффективно для сильно нелинейных процессов. Методы **ITER** и **TSTEP** проводят обновление МЖ после каждой порции из количества итераций, что указана в поле „**Iteration Before Update**”, что также может быть эффективным для сильно нелинейных процессов, в частности, когда предполагается, что геометрия тела в процессе деформирования может резко измениться (например, в задаче о „прошелкивании”). Метод **TSTEP** применяется при нелинейном анализе во времени (**Transient**);

- в „**Output Control**” – формирование таблиц результатов на промежуточных временных шагах (варианты опции „**Intermediate**”: **0..Default** (по умолчанию), **YES** (выводить), **NO** (не выводить), **ALL** (на всех шагах)) для типов задачи „**Static**” и „**Creep**” или через указанное количество шагов (**Output Every Nth Step**) для типа задачи „**Transient**”, когда значение „**Intermediate**” выбрано как **YES**);

- в „**Convergence Tolerances**” – допуски (точность) для удовлетворения условий сходимости для нагрузок (**Load**), перемещений (**Displacement**) и внутренней работы (**Work**);

- в „**Solution Strategy Overrides**” – корректирование процесса решения глобальной нелинейной системы алгебраических уравнений, порождаемой методом конечных элементов.

Обычно корректировки делают, если возникают проблемы в получении расчетов. Это может быть обусловлено специфическими свойствами краевой задачи, поэтому общих рекомендаций нет. В частности, метод „**Arc-Length Method**” формирует величину временного шага (и догрузки) с учетом информации о перемещении узлов тела. Полный метод Ньютона-Рафсона (**Full Newton-Raphson**) очень быстро сходится, но нуждается в дополнительном времени для создания дополнительной матрицы для полной матрицы САУ на каждой итера-

ции. Модифицированный метод Ньютона-Рафсона (**Modified Newton-Raphson**) не нуждается в таком действии, но сходится значительно медленнее, поэтому для его ускорения могут применяться дополнительные процедуры: „**Line Search**” (линейного поиска), „**Quasi-Newton**” (квази-ньютоновского ускорения) и/или „**Bisection**” (половинного деления).

Кнопкой „**Advanced...**” вызывается диалоговая панель „**Advanced Load Set Options for Nonlinear Analysis**” (см. рис.6.11-б) для назначения дополнительных параметров, что корректируют (здесь не рассматриваем). Обычно это требует значительного опыта пользователя.

**Внимание.** Только некоторые конечные элементы могут моделировать нелинейный статический анализ и анализ эволюционных процессов, причем с особенностями, указанными в таблице (см. „**Chapter 2. Elements for Nonlinear Analysis**” в книге „**NX Nastran Basic Nonlinear Analysis. User’s Guide**”, которая содержится в файле `.../FEMAP93/NastranHelp/NXNastran/nast/misc/doc/docs/pdf/bas_nonlinear.pdf`):

Тип КЭ	Особенности	Нелинейная упругость	Упруго-пластичность	Только геометрическая нелинейность
Spring	3-D демпфер с 6-ю степенями свободы	+	–	–
Spring	осевая вязко-упругая связь (модель Фойхта)	+	–	+
Rod, Tube	осевая деформация (кручение – линейное)	+	+	+
Beam	пластический шарнир в каждом конце КЭ (центральная секция, поперечный сдвиг, кручение – линейные)	+	+(только упруго – идеально-пластический)	+
Plate (QUAD4, TRIA3)	1. Shell и Plate: 1...12 слоев, поперечный сдвиг – линейный; 2. Plane Strain: MID2=-1 PARAM,NLAYER=1; 3. Plane Stress: MID2=0, PARAM,NLAYER=1	+	+	+
Plane strain, Axisymmetric (CQUADX, CTRIAX)	изопараметрические	+(гиперупругость)	–	–
Solid (HEXA, 8 Nodes)	8 точек Гаусса; функция напряжений	+	+	+
Solid (HEXA, 20 Nodes)	изопараметрические, 27 точек Гаусса	+	+	+
Solid (PENTA, 6 Nodes)	6 точек Гаусса; функция напряжений	+	+	+
Solid (PENTA, 15 Nodes)	изопараметрические, 21 точка Гаусса; функция напряжений	+	+	+
Solid (TETRA, 4 Nodes)	1 точка Гаусса	+	+	+
Solid (TETRA, 10 Nodes)	4 точки Гаусса	+	+	+
Solid (TETRA, 10 Nodes)	изопараметрические, 5 точек Гаусса	+	+	+

Большинство других типов КЭ могут включаться в нелинейную модель тела при условии, что они остаются линейными на протяжении всего анализа. Наиболее часто ошибочное применение КЭ в нелинейном анализе связано с использованием КЭ типа **Bar**, **Rigid** и **Gap**.

**Примечание 6.6.** Задача с *линейными* свойствами материала тоже может решаться как и задача нелинейной упругости, если:

- в теле будут учитываться значительные перемещения. Например, при моделировании спиральной пружины;
- нагрузка тела будет превышать критические значения. Это будет так называемое за-критическое поведение тела, или задача о его устойчивости (см. Раздел 6.3.6).

### 6.3. Моделирование статических краевых задач о НДС тел

Статические краевые задач о НДС тел могут быть линейно и нелинейно-упругие, упруго-пластические, с учетом температурных деформаций и ползучести материала. Отдельные классы задач – задачи об устойчивости тел, об оптимизации конструкций, и о контакте тел.

Основные теоретические сведения о краевых задачах про НДС тела изложены в Приложениях 5 и 6. Большинство действий, необходимых для создания модели краевой задачи в FEMAP, рассмотрено в Разделе 2 (создание геометрической модели), Разделе 3 (создание конечно-элементной модели), Разделе 4 и Разделе 6.1 (общие сведения о задании начальных и граничных условий). Поэтому здесь изложим лишь дополнительные сведения, характерные для разных типов краевых задач.

#### 6.3.1. Краевые задачи линейной упругости и термоупругости

Линейная упругость – более простой вариант задачи. Для материала достаточно задать модули упругости. Если по результатам расчета будет оцениваться запас прочности в теле, то еще дополнительно нужно ввести предельные напряжения; если температурные деформации (термоупругость) – коэффициент линейного температурного удлинения (см. Раздел 3.1). О задании начальных условий см. Раздел 6.2.1.1; ГУ 1-го рода – Раздел 6.1.2; силовых граничных условий – Раздел 6.1.3. Кроме того, для задачи термоупругости необходимо ввести в начальные условия таблицу распределения температуры в теле (см. Раздел 6.1.1), которую было получено при предыдущем решении задачи теплопроводности.

Для запуска процесса расчета краевой задачи создается задание: дается команда **Model**→**Analysis...**, на диалоговой панели „**Analysis Set Manager**” инициируется кнопка „**New...**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) значение „**1..Static**” (т.е. статическая задача). Все другие действия, связанные с запуском процесса расчета краевой задачи, уже описаны в Разделе 4.2. Этот тип краевой задачи можно решать, кроме NX Nastran, другими анализаторами, но рассматриваем только NX Nastran.

В процессе решения задачи на экране монитора могут появляться сообщения, которые нуждаются в ответе „**Да**” или „**Нет**”, предупреждения о некоторых не фатальных ошибках, а иногда – даже фатальных. Например, фатальную ошибку вызовет отсутствие наборов начальных и/или граничных условий, недостаточное закрепление тела и т.п.

#### 6.3.2. Краевые задачи нелинейной упругости для изотропного материала

От формулирования задачи линейной упругости отличаются:

- заданием свойства *изотропного* (и только!) материала как нелинейного упругого (см. Раздел 3.1): на диалоговой панели „**Define Material – ISOTROPIC**” на вкладке „**Nonlinear**” (см. рис.3.3-а) нужно радиокнопкой выбрать вариант „**Nonlinear Elastic**”, в появившемся поле „**Function Dependence**” – указать на созданную функцию (заранее или с помощью кнопки , слева внизу) нелинейной зависимости напряжения от деформации (типа **4..vs. Stress** – диаграмму деформирования материала, которая должна быть заданной в 1-м и 3-м квадрантах, чтобы моделировать разные свойства материала при растяжении и сжатии) или зависимости от температуры (типа **2..vs. Temperature**);

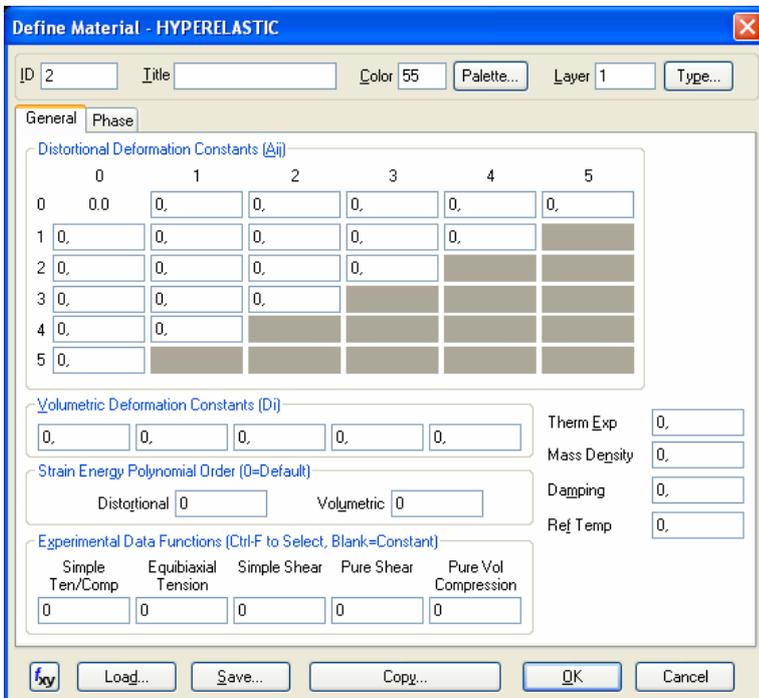
- установлением опций нелинейной задачи командой **Model**→**Load**→**Nonlinear Analysis...** (см. Раздел 6.2). Сначала кнопкой „**Default...**” нужно установить те значения, что

предусмотрены „по умолчанию” для варианта типа задачи „**Static**”, потом в диалоговом окне „**Number of Increments**” – указать количество шагов нагрузки (>0), в окне „**Max Iterations / Step**” – максимальное количество итераций на каждом шаге нагрузки, а в окне „**Intermediate**” – выводить или нет промежуточные результаты; в секции „**Convergence Tolerances**” – точность решения САУ; в секции „**Solution Strategy Overrides**” – указать другой метод решения нелинейной САУ (при желании). **Внимание:** заданная точность решения нелинейной задачи может оказаться *завышенной*, что приведет к преждевременному прекращению процесса решения задачи с фатальными ошибками;

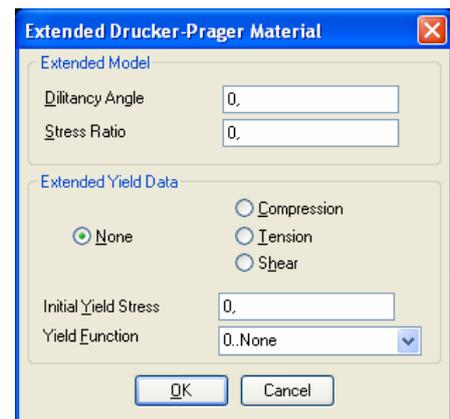
- созданием задания: дается команда **Model→Analysis...**, на диалоговой панели „**Analysis Set Manager**” инициируется кнопка „**New...**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) значение „**10..Nonlinear Static**” (нелинейная статика) или „**22..Advanced Nonlinear Static**” (нелинейная статика, „передовой” анализ – см. Раздел 6.3.8).

### 6.3.3. Краевые задачи нелинейной упругости для материала типа „резина”

От формулирования задачи *нелинейной* упругости для изотропного материала различается заданием на диалоговой панели „**Material Type**” (см. рис.3.2-б) варианта „**Hyperelastic**” и назначением на диалоговой панели „**Define Material – HYPERELASTIC**” нужных свойств материала (см. рис.6.12-а и Раздел Д5.1.4.3 Приложения 5).



а)



б)

**Рис.6.12. Диалоговые панели введения свойств материала:**

а) – гиперупругого типа „резина”; б) – упруго-пластического для модели Друкера-Прагера

**Внимание:** не все типы КЭ могут моделировать такой материал. В „**Help**” рекомендуют проверять это перед применением желательного типа КЭ.

В секции „**Distortional Deformation Constants (Aij)**” задаются компоненты матрицы  $A_{ij}$ , причем  $A_{00} = 0$ , а в секции „**Volumetric Deformation Constants (Di)**” – компоненты  $D_i$ .

Для неогукowego материала – только  $A_{10}$  и  $D_1$ ; для линейной модели Муни-Ривлина –  $A_{10}$ ,  $A_{01}$  и  $D_1$ . Для более точных моделей нужно ввести и другие компоненты, а также в секции „**Strain Energy Polynomial Order (0=Default)**” – величины в полях „**Distortional**” и „**Volumetric**”, которые указывают на степени аппроксимирующих полиномов: от 0 до 4 (0 – линейный, 1 – квадратичный, ...) для частей функционала упругой энергии, описывающих „искривления” и изменение объема соответственно.

Есть и другие варианты. Если на панели „**Define Material**” инициировать кнопку „**Type...**” и выбрать „**Other Types**”, в списке „**Material Type**” можно найти пять вариантов гиперупругого материала: от 501.. до 505.. (подробнее – в „**Help**”, а именно в разделе **FEMAP→Commands→4. Finite Element Modeling→4.2 Creating Finite Elements Entities→4.2. 3 Model, Material→4.2. 3.6 Other Types...**), причем эти модели можно применять лишь для типов задач 601 и 701 (см. табл. 4.2).

Есть еще один вариант. С помощью функции типа **4..vs. Stress** можно задать зависимости напряжений от деформаций: **Simple Ten/Comp** (простое растяжение/сжатие), **Equibiaxial Tension** (двухосное растяжение), **Simple Shear** (простой сдвиг), **Pure Shear** (чистый сдвиг), **Pure Vol Compression** (чистое объемное сжатие).

Поскольку перемещения и деформации – значительны и очень значительны, то при приложении силовых нагрузок в соответствующих местах необходимо задать их зависимыми от смещения точки приложения (см. Раздел 6.1.3.5).

При создании задания, на диалоговой панели „**Analysis Set Manager**” (вызывается командой **Model→Analysis...**) инициируется кнопка „**New...**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) значение „**10..Nonlinear Static**” (нелинейная статика) или „**22..Advanced Nonlinear Static**” (нелинейная статика, „передовой” анализ – см. Раздел 6.3.8).

При этом рекомендуют выбирать итерационный метод решения системы алгебраических уравнений (установить в поле „**Iterative Solver**” на диалоговой панели „**NASTRAN Executive and Solutions Options**”, см. рис.4.15-а).

### 6.3.4. Краевые задачи упруго-пластичности

От формулирования задачи нелинейной упругости для изотропного материала различается заданием на диалоговой панели „**Define Material – ISOTROPIC**”, на вкладке „**Nonlinear**” (см. рис.3.3-а) в секции „**Nonlinearity Type**” свойства материала как нелинейного с *пластическими* деформациями: „**Elasto-Plastic (Bi-linear)**” или „**Plastic**”, см. Раздел 3.1.

Здесь напомним, что нужно выбрать критерий текучести материала (из списка „**Yield Criterion**”), обязательно задать величину предела текучести материала (**Initial Yield Stress**) для критериев текучести „**0..fon Mises**” и „**1..Tresca**”; или значения „**2\* Cohesion**” (удвоенное значение коэффициента сцепления) и „**Friction Angle**” (угол внутреннего трения) для критериев текучести „**2..Mohr-Coulomb**” и „**3..Drucker-Prager**” (для материалов типа грунтов). Также нужно нанести модуль линейного упрочнения (**Plasticity Modulus, H**) для упруго-пластического материала с кусочно-линейной аппроксимацией (**Elasto-Plastic, Bi-Linear**) или (для случая „**Plastic**”) выбрать в поле „**Function Dependence**” функцию нелинейной зависимости напряжения от деформации (типа **4..vs. Stress**) – диаграмму деформирования материала (заранее созданную, или с помощью кнопки ). В поле „**Hardening Rule**” нужно выбрать модель упрочнения материала; „**0..Isotropic**”, „**1..Kinematic**” или „**2..Isotropic+Kinematic**”. Кнопка „**Extended Material Model...**” предназначена для учета влияния температуры или скорости деформирования или обоих факторов одновременно на границу текучести (подключением функции **2..vs.Temperature** и/или **9..vs.Strain Rate**) для критерия текучести „**0..fon Mises**”, а также вызывает диалоговую панель „**Extended Drucker-Prager Material**” (см. рис.6.12-б).

**Внимание:** при решении задач с грунтами желательно учитывать гравитационное тяготение (задавать в виде ускорения свободного падения, которое действует во всем объеме, см. рис.6.7).

В UGS.F93 в случае подключения к заданию произвольного количества наборов закреплений и нагрузок („**MultiSet...**”) все такие комбинации прикладываются к телу *последовательно*, причем значения из предыдущего решения считаются начальными для следующих решений.

Поэтому, если нужно решить краевую задачу упруго-пластичности с условиями полной или частичной разгрузки после активной упруго-пластической нагрузки, то нужно создать необходимое количество наборов нагрузок, последнее из которых задает условия разгрузки,

причем для набора с условиями разгрузки тоже необходимо установить опции нелинейной задачи (командой **Model→Load→Nonlinear Analysis...**). Потом при создании задания для расчета нужно подключить к заданию все эти наборы нагрузок: на панели „**Analysis Set Manager**” применить кнопку „**MultiSet...**”, потом последовательно выбрать наборы: один или больше – закреплений (**Constraint**) и все – нагрузок.

Можно решать задачу при малых или значительных (установлена опция „**LGDISP**” на панели „**NASTRAN Bulk Data Options**”, см. рис.4.15-б) смещениях (геометрическая нелинейность). Напомним, что при учете геометрической нелинейности еще можно применять опции „**LANGLE**” и „**LGSTRN**” (см. Раздел 4.2.6).

При создании задания, на диалоговой панели „**Analysis Set Manager**” (вызывается командой **Model→Analysis...**) инициируется кнопка „**New...**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) значение „**10.Nonlinear Static**” (нелинейная статика) или „**22.Advanced Nonlinear Static**” (нелинейная статика, „передовой” анализ – см. Раздел 6.3.8).

### 6.3.5. Краевые задачи ползучести

Эти задачи – эволюционные, когда деформации в теле (и напряжения) зависят от времени.

От формулирования задачи нелинейной упругости отличается:

- заданием на вкладке „**Creep**” (см. рис.3.3-б) диалоговой панели „**Define Material – ISOTROPIC**” одного из трех вариантов описания свойств материала при ползучести (см. Раздел 3.1);

- созданием двух идентичных наборов нагрузки (создать один набор, командой **Model→Load→Copy...** сделать его копию);

- для первого набора нагрузки (назначить активным с помощью команды **Model→Load→Set...**) заданием на диалоговой панели „**Load Set Options for Nonlinear Analysis**” (вызывается командой **Model→Load→Nonlinear Analysis...**) варианта „**Static**” и значений в активных полях и хотя бы в одном поле „**Convergence Tolerances**”;

- для второго набора нагрузки (назначить активным) заданием на той же диалоговой панели варианта „**Creep**”, аналогичных значений в активных полях и дополнительно количество временных шагов „**Number of Time Steps**” и размер временного шага в поле „**Time Increment**”. **Внимание:** полное время моделирования тела в условиях ползучести будет определяться результатом перемножения величин полей „**Number of Time Steps**” и „**Time Increment**”. Поскольку в программе применяется алгоритм автоматической коррекции временного шага (в сторону уменьшения, когда это нужно из условий устойчивости решения и согласованности пространственно-временной сетки), то результаты расчетов обычно имеют большее количество таблиц, чем это задается в поле „**Number of Time Steps**”.

**Внимание:** все другие данные этих двух наборов нагружения должны быть идентичными.

Согласно заданию, сначала будет решена обычная краевая задача о статическом нагружении, а потом – задача ползучести, с учетом достигнутого (в первой задаче) уровня напряжений.

При создании задания на диалоговой панели „**Analysis Set Manager**” (вызывается командой **Model→Analysis...**) инициируется кнопка „**New...**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) значение „**10.Nonlinear Static**” (нелинейная статика) или „**22.Advanced Nonlinear Static**” (нелинейная статика, „передовой” анализ – см. Раздел 6.3.8).

### 6.3.6. Краевые задачи об упругой устойчивости тел

Прежде чем моделировать такую задачу, целесообразно ознакомиться с изложенными в Разделе Д5.2.7 Приложения 5 сведениями. Во всяком случае, нужно иметь в виду, что считается, что формы потери устойчивости – именно такие, как и собственные формы колебаний

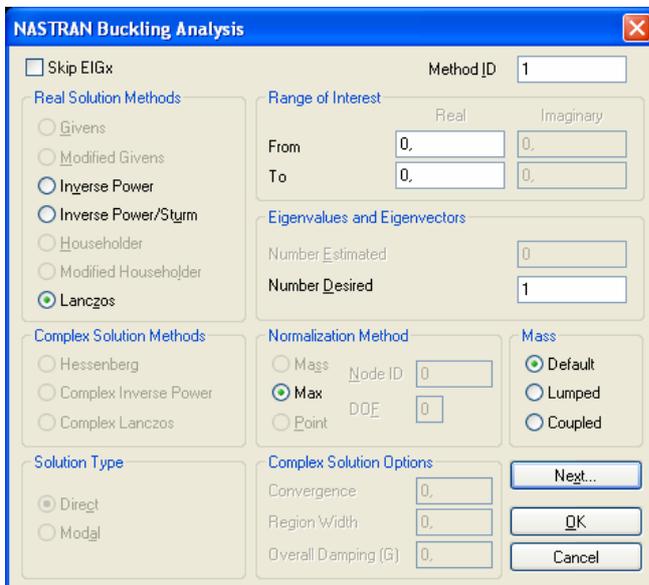
(подход Эйлера). Поэтому алгоритм будет находить одну или несколько собственных частот и форм колебаний, а это требует много действий.

Все типы КЭ могут применяться, но есть такие ограничения:

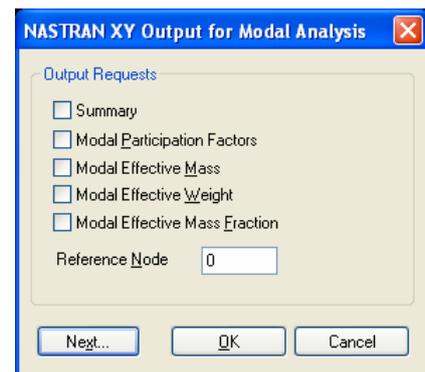
- материал – только линейно-упругий;
- чтобы иметь удовлетворительную точность, КЭ типа **CURVED BEAM** не должны перекрывать дугу круга большую, чем 15 градусов;
- осесимметричные КЭ моделируют только осесимметричные составляющие критической нагрузки и формы потери устойчивости, которые обычно не являются самыми низкими;
- двумерные КЭ (ПНС и ПДС) моделируют только двумерные составляющие критической продольной нагрузки и формы потери устойчивости, которые обычно не являются самыми низкими.

От моделирования задач линейной упругости отличаются тем, что:

- свойства материала должны иметь, кроме модулей упругости, еще одну характеристику: плотность (**Mass Density**, см., например, рис.3.2-а);
- при создании задания для расчета (дается команда **Model→Analysis...**, на диалоговой панели „**Analysis Set Manager**” инициируется кнопка „**New...**”), на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) значение „**7..Buckling**” (устойчивость);
- в разделе „**Options**” панели „**Analysis Set Manager**” появятся два подраздела: „**NASTRAN Modal/Buckling**” и „**NASTRAN ModalXYPlot**”, настраиваемые с помощью диалоговых панелей „**NASTRAN Bulking Analysis**” и „**NASTRAN XY Output for Modal Analysis**” соответственно (см. рис.6.13);
- на диалоговой панели „**NASTRAN Bulking Analysis**” (см. рис.6.13-а) в секции „**Real Solution Methods**” нужно выбрать один из методов (**Lanczos**, **Inverse Power** или **Inverse Power/Sturm**) для нахождения нескольких собственных частот (форм потери устойчивости), количество которых устанавливается в поле „**Number Desired**” секции „**Eigenvalues and Eigenvectors**”. В секции „**Range of Interest**” в полях „**From**” и „**To**” можно указать диапазон собственных частот, который интересует пользователя. Еще можно изменить способ собирания матрицы масс (**Default**, **Lumped** (распределенная) или **Coupled** (конденсированная));



а)



б)

**Рис.6.13. Диалоговые панели для настраивания: а) – анализа потери устойчивости; б) – вывода информации во вспомогательный файл \*.f06**

- на диалоговой панели „**NASTRAN XY Output for Modal Analysis**” (см. рис.6.13-б) в секции „**Output Request**” можно инициировать опции „**Summary**”, „**Modal Participation**”, „**Modal Effective Mass**”, „**Modal Effective Weight**” и „**Modal Effective Mass Fraction**”, указывающие, какие сведения выводить во вспомогательный файл \*.f06. Если в поле „**Reference**

**Node**” указать номер узла, существующего в модели, то сведения будут выводиться в системе координат этого узла (иначе – в декартовой системе);

- среди результатов расчета есть один набор результатов статического расчета с названием „NX NASTRAN Case 1” и столько наборов результатов расчетов на устойчивость, сколько задано в параметре „Number Desired” или соответствуют указанному диапазону собственных частот. Их названия начинаются со слова **Eigenvalue**, потом – номер критического состояния, потом – значение параметра  $\beta$ , например, „3..Eigenvalue 2 1.917812”. Критическая нагрузка равна приложенной, умноженной на  $\beta$ . Поэтому, если некоторые значения  $|\beta|$  меньше единицы, то это означает, что заданная для тела нагрузка превышает соответствующие критические нагрузки. Если  $\beta$  – отрицательно, то это указывает на противоположное направление действующих на тело нагрузок.

Результаты расчетов целесообразно просматривать в режиме „Deformed View” (просмотреть формы потери устойчивости).

**Примечание 6.7.** Поскольку формы потери устойчивости получаются на основе обобщенной проблемы о собственных формах колебаний тела, причем в NX Nastran во внимание берутся только изгибные формы, то все силовые нагрузки, не отвечающие соответствующим схемам нагружения тела, будут проигнорированы.

**Примечание 6.8.** После проведения такого расчета часто возникает желание получить более подробную информацию о поведении тела после потери устойчивости. Ее можно получить, если провести расчет тела в варианте *нелинейного* статического анализа (см. Раздел 6.3.2) с нагрузкой, которая *немного* превышает критическую. Материал можно задать как линейно-упругий, нелинейно-упругий или упруго-пластичный. При этом довольно часто необходимо дополнительно ввести хотя бы незначительную возмущающую силу, или незначительный дефект геометрии тела, чтобы вызвать потерю устойчивости тела (обычно при нескольких низших уровнях нагрузки, чем в идеальных условиях, т.е. будет смоделирована более реалистичная ситуация). Это нужно делать тогда, когда нелинейный анализ не выявил потерю устойчивости конструкции. Если предполагается, что геометрия тела в процессе нелинейного статического анализа может резко измениться (например, в задаче об „процелкивании”, являющейся разновидностью задач о потере устойчивости тела, см. Раздел Д5.2.7 Приложения 5), то в секции „Stiffness Updates” (см. рис.6.11-а) необходимо выбрать метод **2..ITER** и в поле „Iteration Before Update” ввести число **1**, т.е. потребовать обновления матрицы жесткости CAU после каждой итерации. Результаты нелинейного статического анализа целесообразно просматривать в виде кривых зависимости выбранной функции (перемещения, напряжения, ...) в узле (или КЭ) от внутреннего параметра **Time** (траектория перемещений узла, история изменения напряжений в узле, ...).

**Примечание 6.9.** Если при формулировании задания ввести значение параметра **BUCKLE=2** (т.е. **PARAM,BUCKLE,2**, см. Раздел 4.3.2), то будет проведен *нелинейный* анализ об устойчивости тела с применением любого метода решения нелинейной CAU (не только **2..ITER**).

**Внимание:** краевые задачи об упругой устойчивости тел имеют значительную специфику, поэтому при их моделировании нужно четко представлять себе, какие граничные условия прикладывать, а также проводить тщательную проверку и осмысление полученных результатов.

### 6.3.7. Краевые задачи об оптимизации конструкции

В NX Nastran реализован итерационный алгоритм, в котором подбирается один из указанных параметров КЭ типа **ROD**, **BAR** или **PLATE** таким образом, чтобы минимизировалась целевая функция. В NX Nastran 5.0 есть лишь одна целевая функция: **Minimize Weight**, т.е. минимальный вес тела.

Если в оптимизации участвуют не все КЭ, то сначала нужно для таких КЭ назначить новое „Property”, но с теми же значениями (создать новое „Property” с помощью кнопки

„Copy...”, после команды **Modify**→**Update Elements**→**Property ID** выбрать КЭ и назначить им новое „Property”).

Потом – проверить (или назначить) в секции „**Limit Stress**” диалоговой панели для задания свойств материала (команда **Model**→**Material...** или **Modify**→**Edit**→**Material...**) предельные напряжения при растяжении (**Tension**), сжатии (**Compression**) и сдвиге (**Shear**).

Следующее действие: командой **Model**→**Optimization...** вызвать диалоговую панель „**Design Optimization**” (см. рис.6.14). Назначения ведутся последовательно в трех секциях. В секции „**Goal – Design Objective**” (радиокнопка „**Goal**” – цель) выбирается целевая функция и указывается ограничение в количестве итераций (**Max Design Cycles**).

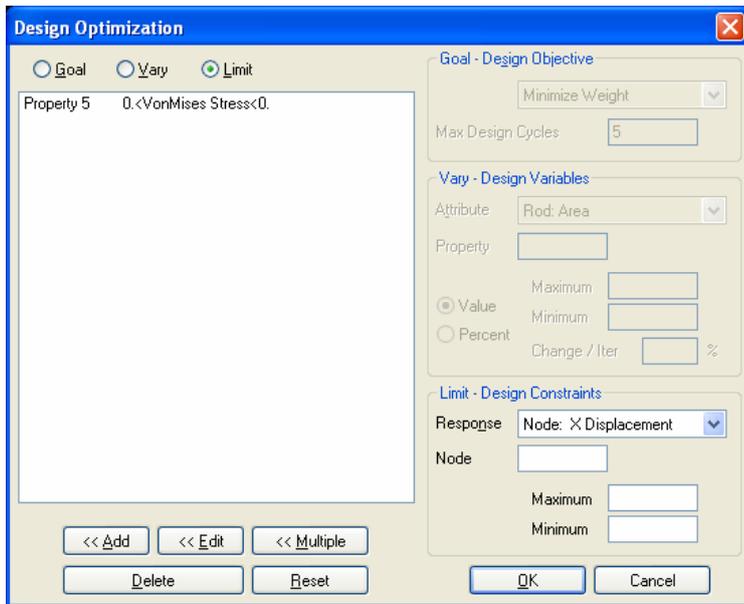


Рис.6.14. Диалоговая панель для введения параметров оптимизации

В секции „**Vary – Design Variables**” (переменные проекта, радиокнопка „**Vary**”) выбирается геометрический параметр КЭ, за счет изменения которого будет проводиться оптимизация: для КЭ типа **ROD** – **Area**, **Torsion Constant**; для **BAR** – **Area**, **I1**, **I2** (главные моменты инерции), **Torsion Constant**; для **PLATE** – **Thickness**, т.е. толщина (о параметрах см. табл. 3.2). Также указывается **ID** (номер) того „**Property**”, которое имеют КЭ, принимающие участие в процессе оптимизации; границы изменения размеров (**Maximum** и **Minimum**), причем можно применять конкретные значения (**Value**) или проценты отклонения от исходного значения (**Percent**); шаг изменения в итерациях (**Change/Iter**), причем ну-

левое значение указывает на автоматический выбор этого шага программой. Когда все назначения для выбранного **ID** „**Property**” сделаны, нужно добавить их в список кнопкой „<<Add”. Для редактирования этого списка есть кнопки „Delete” и „Reset”, а для внесения изменений в ранее созданные данные – кнопка „<<Edit”.

В секции „**Limit – Design Constraints**” (радиокнопка **Limit**) для каждого „**Property**” со списка „**Response**” выбирается характеристика напряженно-деформированного состояния (функция), на основе которой будет проводиться оптимизация, указываются максимальные и минимальные (**Maximum**, **Minimum**) ее значения, что допускаются (незаполненное значение равняется нулю). Доступны те же кнопки с теми же функциями. Кнопка „<<Multiple” позволяет *одновременно* выбрать несколько „**Property**”, которые появятся в списке с одинаковыми параметрами оптимизации, после чего эти параметры можно редактировать и вносить изменения с помощью кнопки „<<Edit”.

При создании задания для расчета (дается команда **Model**→**Analysis...**, на диалоговой панели „**Analysis Set Manager**” инициируется кнопка „New...”), на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) значение „8..**Design Optimization**” (оптимальное проектирование). Если для задачи было сформировано несколько наборов нагрузок или закреплений, то будет активной кнопка „**MultiSet...**” – для создания многовариантного задания для проведения оптимизации.

Новые значения параметров КЭ, за счет изменения которых была проведена оптимизация, помещаются в таблицу результатов расчетов. В частности, для КЭ типа **PLATE** это будет таблица „**Plate Top Fiber**” (верхний слой пластины, т.е. половина ее толщины). Информация о том, как изменялись этот и некоторые другие параметры в итерациях, помещается в

таблицы, которые можно просмотреть в виде функции: команда **View**→**Select**, радиокнопка „**XY of Function**”, кнопка „**Model Data...**”, список „**Select**” в секции „**Function**”, функции „**1.Design Objective**” (масса), „**2.Max Value of Constraint**” (максимальная реакция связей), „**3.Prop 1: Thickness**” (толщина для „**Property 1**”), „**3.Prop1: Rod Area**” (площадь сечения стержня) или другие подобные (зависят от типа КЭ и условий оптимизации). Минимизированные значения автоматически округляются к значениям из стандартного ряда размеров.

После соответствующего изменения размеров КЭ в „**Property**” целесообразно провести обычный (статический) расчет для обновленной геометрии тела.

### 6.4. Применение модифицированного подхода Лагранжа для решения краевых задач со всеми видами нелинейности

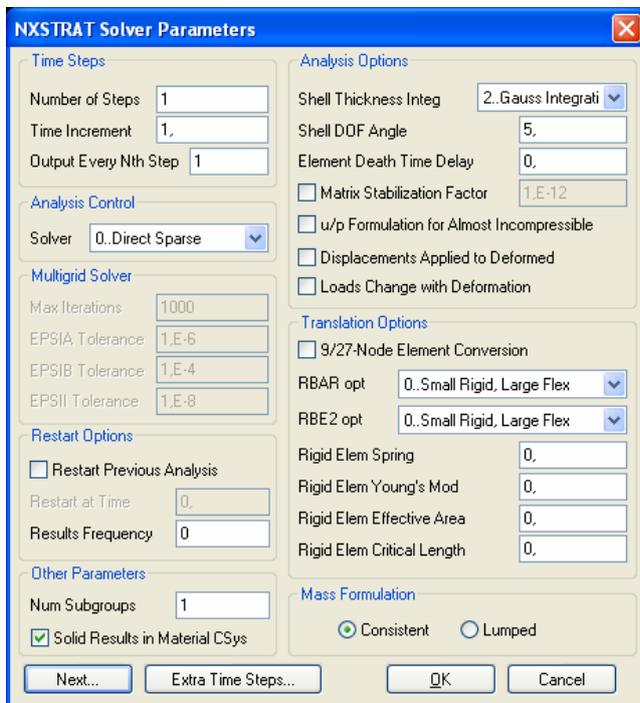
Будем считать, что при создании задания на решение краевой задачи на диалоговой панели „**Analysis Set Manager**” (вызывается командой **Model**→**Analysis...**) была инициализирована кнопка „**New...**”, на панели „**Analysis Set**” – в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) выбрано вместо „**10.Nonlinear Static**” значение „**22.Advanced Nonlinear Static**”.

Отметим, что в варианте „**10.Nonlinear Static**” применяется полный подход Лагранжа (**Total Lagrange – TL**), а в „**22.Advanced Nonlinear Static**” – модифицированный подход Лагранжа (**Update Lagrange – UL**).

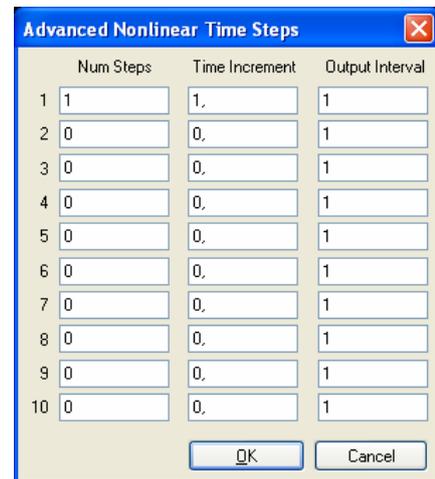
Последний, относительно новый вариант анализа, реализовано в FEMAP 9.3 лишь для NX Nastran, хотя есть программы, в которых тоже реализован **UL**-подход, например, ANSYS, LS-DYNA3D, MARC и т.п., и с которыми FEMAP 9.3 имеет интерфейс.

**Внимание:** в варианте „**22.Advanced Nonlinear Static**” могут применяться не все типы КЭ и материалов, а только в соответствии с таблицей 4.3.

В разделе „**Options**” появляется подраздел „**NASTRAN Advanced Nonlinear Solver**”, который настраивается с помощью диалоговой панели „**NXSTRAT Solver Parameters**” (см. рис.6.15-а).



а)



б)

Рис.6.15. Диалоговые панели для настраивания:  
а) – параметров анализатора; б) – временных шагов

#### 6.4.1. Опции диалоговой панели „NXSTRAT Solver Parameters”

В секции „**Time Steps**” (временные шаги) вводятся:

- „**Number of Steps**” (количество временных шагов);

- „**Time Increment**” (временной шаг);
- „**Output Every Nth Step**” (выводить результаты на каждом N-м шаге).

Кнопкой „**Extra Time Steps**” (внизу панели) можно вызвать панель „**Advanced Nonlinear Time Steps**” (см. рис.6.15-б), на которой можно указать до десяти конкретных значений для временных шагов и времен вывода результатов.

В секции „**Analysis Control**” можно изменить метод решения системы алгебраических уравнений на: „**0.Direct Sparse**” (прямой, разреженная матрица – по умолчанию), „**1.Multi-grid**” (многосеточный) или „**2..3-D Iterative**” (итерационный трехмерный). Если выбран вариант „**1.Multigrid**”, то становятся активными опции секции „**Multigrid Solver**”, а именно: „**Max Iterations**” (максимальное количество итераций); „**EPSIA Tolerance**”, „**EPSIB Tolerance**” и „**EPSII Tolerance**” (точности сходимости).

В секции „**Restart Options**” (опции рестарта) можно активировать опцию „**Restart Previous Analysis**” (перезапустить предыдущий анализ) и задать время рестарта в поле „**Restart at Time**” (должен равняться времени завершения предыдущего решения или 0.0, тогда для рестарта будет использоваться последнее решение). Значение в поле „**Results Frequency**” указывает, как часто сохранять/прикладывать результаты для рестарта. Если задать 0, то это то же самое, как и 1; если задать <0, то результат будет прикладываться.

В секции „**Other Parameters**” опция „**Num Subgroups**” указывает, сколько групп КЭ с одинаковыми „**Property**” создано для более эффективной обработки (имеет смысл, если количество КЭ в группах превышает 1000). Активная опция „**Solid Results in Material CSys**” указывает, что для КЭ типа **Solid** результаты будут выводиться в системе координат материала (иначе – в той системе координат, в которой описан КЭ).

Секция „**Analysis Controls**” имеет несколько опций:

- „**Shell Thickness Integ**” (можно выбрать схему интегрирования в КЭ типа **Shell** в **t**-направлении; по умолчанию – схема Гаусса с 2-мя точками для интегрирования);
- „**Shell DOF Angle**” (5 или 6 степеней свободы назначать для узлов средней поверхности оболочечного КЭ);
- „**Element Death Time Delay**” (время „умирания” КЭ с очень искривленной вследствие деформирования геометрией (вместо мгновенного удаления таких КЭ из матрицы жесткости системы): это часто позволяет улучшить сходимость в получении результатов анализа);
- „**Matrix Stabilization Factor**” (использовать ли стабилизационный фактор для матрицы жесткости системы, его размер);
- „**u/p Formulation for Almost Incompressible**” (использовать **u/p** формулирование для КЭ с материалами, коэффициент Пуассона которых  $\geq 0.48$  (всегда используется для КЭ с гиперупругим материалом));
- „**Displacements Applied to Deformed**” (применять заданные перемещения к начальной или деформированной (инициировать опцию) конфигурации);
- „**Loads Change with Deformation**” (заданные давление и инерционные силы зависят от деформаций тела – при установленной опции **LGDISP**, см. Раздел 4.2.6).

В секции „**Translation Options**” (опции преобразований) есть такие опции:

- „**9/27-Node Element Conversion**”. При установлении проводится преобразование КЭ: двумерные с 3-мя ребрами и 6-ю узлами – в 7-ми узловые; с 4-мя ребрами и 8-ю узлами – в 9-ти узловые; трехмерные КЭ с 10 узлами – в 11-ти узловые, с 20 узлами – в 27-ми узловые;
- „**RBAR Opt**” и „**RBE2 Opt**” (опции для КЭ FEMAP типа **Rigid**) со списками: „**0.Small Rigid, Large Flex**” – малые смещения, большой изгиб; „**1.Rigid**” – жесткая связь; „**2.Flexible**” – гибкий КЭ (**Spring** или **Beam**); „**3.Use Springs**” – КЭ типа **Spring**;
- „**Rigid Elem Spring**” – жесткость КЭ, что моделируют КЭ **RBAR** и **RBE2** (см. выше). Если оставить значение 0.0, то NX Nastran назначит значение жесткости как результат перемножения максимального значения модуля Юнга модели на наибольший размер модели. Если в модели нет материалов, то будут назначены значения  $10^{12}$ ;

- „**Rigid Elem Young's Mod**” – модуль Юнга материала КЭ, что моделируют КЭ **RBAR** и **RBE2** (см. выше). Если оставить значение 0.0, то NX Nastran назначит значение как 100 максимальных значений модуля Юнга модели. Если в модели нет материалов, то будут назначены значения  $10^{12}$ ;

- „**Rigid Elem Effective Area**” – площадь круглого поперечного сечения КЭ, что моделируют КЭ **RBAR** и **RBE2** (см. выше). Если оставить значение 0.0, то NX Nastran назначит значение как 0.01 от наибольшего размера модели;

- „**Rigid Elem Critical Length**” – критическая длина КЭ, что моделируют КЭ **RBAR** и **RBE2** (см. выше) в случае выбора „**1..Rigid**” или „**2..Flexible**”. Если оставить значение 0.0, то NX Nastran назначит значение как  $10^{-6}$  максимального размера модели в случае „**1..Rigid**” и как  $10^{-3}$  максимального размера модели в случае „**2..Flexible**”.

В секции „**Mass Formulation**” можно выбрать тип матрицы масс, которая будет использоваться в динамическом анализе: „**Consistent**” (распределенная) или „**Lumped**” (конденсированная).

#### 6.4.2. Опции диалоговой панели „NXSTRAT Iteration and Convergence Parameters”

Еще в разделе „**Options**” появляется подраздел „**NASTRAN Advanced Nonlinear Iteration/Convergence**”, который настраивается с помощью диалоговой панели „**NXSTRAT Iteration and Convergence Parameters**” (параметры и сходимости NXSTRAT, см. рис.6.16).

В секции „**Analysis Control**” из списка „**Auto Increment**” (автоприращение) выбирается: „**0..Off**” (отключено); „**1..On**” (включена схема автоматического приращения – **ATS**); „**2..Load-Displacement**” (включена схема автоматического приращения с контролем усилия-перемещения – **LDC**). Также можно установить опцию „**Continue of Non-Positive Definite**” – продолжать в случае не позитивности матрицы жесткости (это возможно при больших искривлениях КЭ).

**Внимание:** если в поле „**Auto Increment**” установлено „**1..On**” или „**2..Load-Displacement**”, то для контактной задачи это то же самое, что эта опция („**Continue of Non-Positive Definite**”) установлена.

В случае выбора в секции „**Analysis Control**” из списка „**Auto Increment**” варианта „**1..On**” становится активной секция „**Auto Time Stepping**”. Она имеет такие опции:

- „**Smallest Step Divisor**” – наименьший делитель шага, нужно задавать >1. Схема **ATS** не сможет применять шаги нагрузки, меньшие, чем величина, заданная в поле „**Time Increment**” (см. рис.6.15-а), разделенная на значение „**Smallest Step Divisor**”;

- „**Largest Step Multiplier**” – наибольший множитель шага, нужно задавать >1. Это антипод предыдущего значения;

- „**Step Size Flag**” – флаг размера шага: „**0..Automatic**” (назначается автоматически); „**1..Match Convergence**” (использовать тот размер шага, что привел к сходимости); „**2..Original**” (возвращаться к первоначальному шагу); „**3..Match Solution Time**” (назначать размеры шагов в соответствии со временем решения);

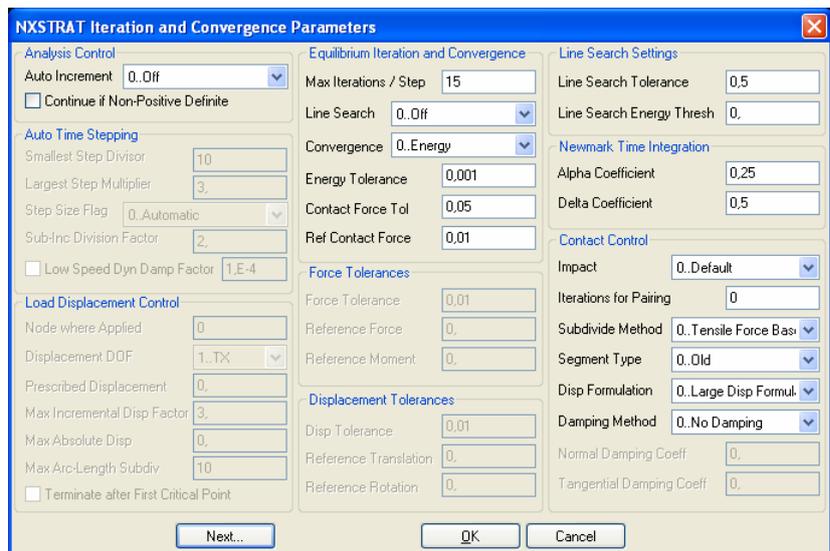


Рис.6.16. Диалоговая панель для настраивания параметров итераций и сходимости

- „**Sub-Inc Division Factor**” – фактор изменения шага (если сходимость не достигнута, то шаг делится на указанное значение этого фактора);

- „**Low Speed Dyn Damp Factor**” – указывает, выполнять ли медленный динамический анализ вместо статического, а также значение фактора динамического демпфирования;

При выборе в секции „**Analysis Control**” из списка „**Auto Increment**” варианта „**2..Load-Displacement**” становится активной секция „**Load-Displacement Control**”. Она имеет такие опции:

- „**Node where Applied**” – номер узла, в котором для первого шага решения задачи заданы смещения;

- „**Displacement DOF**” – из списка выбирается степень свободы узла (см. предыдущую опцию): „**1..TX**”, „**2..TY**”, „**3..TZ**”, „**4..RX**”, „**5..RY**” или „**6..RZ**”;

- „**Prescribed Displacement**” – величина смещения (см. две предыдущие опции);

- „**Max Incremental Disp Factor**” – максимально допустимое увеличение смещения (см. предыдущую опцию) в процессе получения решения;

- „**Max Absolute Disp**” – максимальное значение смещения (см. предыдущие опции), при достижении которого процесс получения решения будет остановлен;

- „**Max Arc-Length Subdiv**” – максимально допустимое количество секторов дуги при применении метода **Arc-Length** для выбора шага нагрузки (целое значение >1);

- „**Terminate after First Critical Point**” – остановить процесс получения решения задачи при достижении *первой* критической точки равновесия.

В секции „**Equilibrium Iteration and Convergence**” (управление итерациями и сходимостью) есть такие опции:

- „**Max Iterations / Step**” – максимальное количество итераций в пределах временного шага (целое число между 1 и 999). Если это количество будет достигнуто, но сходимости – нет, при выборе в секции „**Analysis Control**” из списка „**Auto Increment**” варианта „**0..Off**” процесс поиска решения будет остановлен;

- „**Line Search**” – линейный поиск. Есть варианты: „**0..Off**” (отключен); „**1..On**” (включен);

- „**Convergence**” – назначение критерия сходимости: „**0..Energy**” (энергия); „**1..Energy and Force**” (энергия и силы); „**2..Energy and Displacement**” (энергия и перемещения); „**3..Force**” (силы); „**4..Displacement**” (перемещения). В зависимости от выбранного варианта будут активны поля для введения соответствующих значений погрешностей (**Tolerance**) и номинальных значений для сравнения (**Reference**): „**Energy Tolerance**” (по энергии), секции „**Force Tolerance**” („**Force Tolerance**” (по сила), „**Reference Force**” (сила) и „**Reference Moment**” (момент)), секции „**Displacement Tolerance**” („**Disp Tolerance**” (перемещения), „**Reference Translation**” (перемещение) и „**Reference Rotation**” (поворот)).

Для контактной задачи есть аналогичные поля „**Contact Force Tol**” и „**Ref Contact Force**”.

В секции „**Line Search Settings**” (параметры линейного поиска) есть опции:

- „**Line Search Tolerance**” – точность линейного поиска (по умолчанию = 0.5);

- „**Line Search Energy Thresh**” – порог энергии линейного поиска;

В секции „**Newmark Time Integration**” (интегрирование во времени по методу Ньюмарка) есть опции:

- „**Alpha Coefficient**” – коэффициент  $\alpha$ . В методе Ньюмарка  $\alpha \geq 0.25$ ;

- „**Delta Coefficient**” – коэффициент  $\delta$ . В методе Ньюмарка  $\delta \geq 0.5$ .

В секции „**Contact Control**” (контроль контакта) есть опции:

- „**Impact**” – влияние. Выбирается один из вариантов: „**0..Default**” (без влияний); „**1..Adjust Vel/Accel**” (применить пост-влияние регулирования скоростей/ускорений); „**2..Mod Newmark Param**” (использовать измененные параметры метода Ньюмарка);

- „**Iterations for Pairing**” – количество итераций для соединения контактного узла с сегментом. Может помочь в сходимости контактного алгоритма, можно задавать значения от

0 до 99. После исчерпания указанного количества итераций все установленные связи уже не будут пересматриваться (станут „замороженными”);

- „**Subdivide Method**” – метод определения. Выбирается один из вариантов: „**0..Tensile Force Based**” (шаг тем меньше, чем больше контактные силы растяжения); „**1..Time Step Based**” (шаг выбирается по схеме автоматического приращения – **ATS**);

- „**Segment Type**” – тип контактного сегмента. Выбирается один из вариантов: „**0..Old**” (старый); „**1..New**” (новый, что разработан для NX Nastran 4.1. Рекомендуется в первую очередь для тетраэдрического КЭ 2-го порядка аппроксимации, с 10 узлами);

- „**Disp Formulation**” – формулирование перемещений. Выбирается один из вариантов: „**0..Large Disp Formulation**” или „**2..Large Disp Formulation**” (большие, когда условия контакта изменяются), „**1..Small Disp Formulation**” (малые, когда условия контакта фиксированы. **Внимание:** поиск зоны контакта проводится *только один раз*);

- „**Damping Method**” – метод демпфирования, для ускорения стабилизации зон контакта; рекомендуется применять особенно при наличии жесткого смещения контактирующих тел. Выбирается один из вариантов: „**0..No Damping**” (нет); „**1..1st Step Damping**” (демпфирование только на первом шаге контактного алгоритма) или „**2..All Step Damping**” (на всех шагах контактного алгоритма). Для второго и третьего вариантов необходимо ввести коэффициенты демпфирования: „**Normal Damping Coeff**” (нормальный) и „**Tangential Damping**” (тангенциальный).