

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 подразделе 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 п.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. п.4.1.4.5, 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 **TU** 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 поверхностях КЭ 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. п.4.1.2).

Команда **Model**→**Constraint**→**Create/Manage 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

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;
- **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:

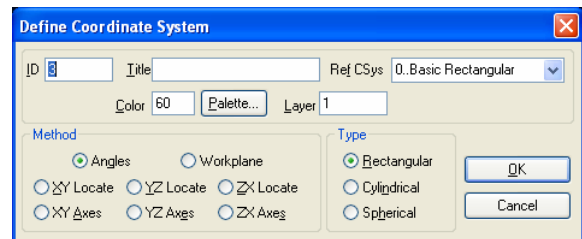


Рис.6.1. Диалоговая панель для создания собственной системы координат

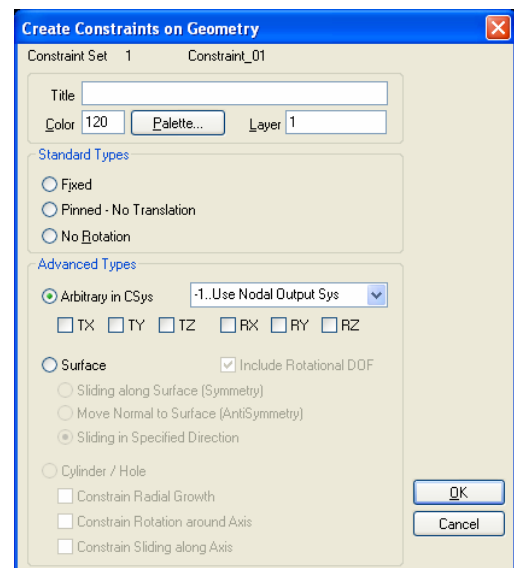


Рис.6.2. Диалоговая панель закрепления узлов через геометрические объекты

- „Arbitrary in CSys” (в выбранной из 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. п.4.1.4.6) и тщательно проверить, какие локальные координаты в узлах были введены и какие **DOF** были реально закреплены (см. также п.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

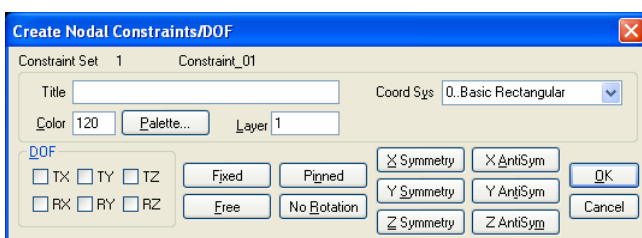


Рис.6.3. Диалоговая панель закрепления узлов

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 вращения); „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).

Примечание 6.3. Как это уже отмечалось в п.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 подразделе 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 от-

бросить, 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 КЭ). Подробно о варианте назначений ГУ (не только 1-го рода) в узлах на грани КЭ (**Nodal on Face...**) изложено в п.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

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. п.4.1.3 и п.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 п.6.1.2).

6.1.2.4 Задание граничных условий 1-го рода в виде связей

В п.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.

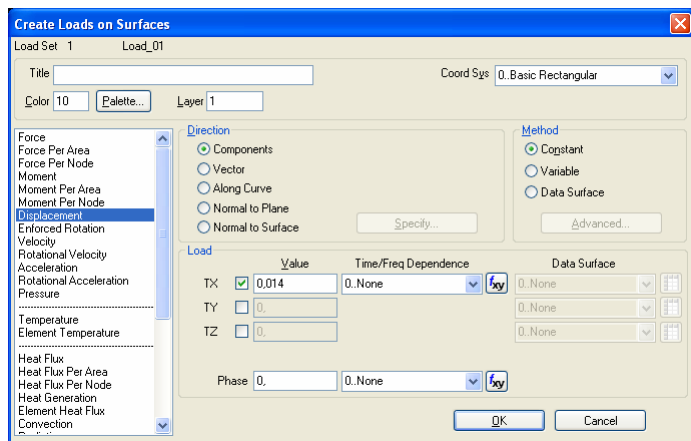


Рис.6.4. Диалоговая панель для введения граничных условий к отдельным объектам тела

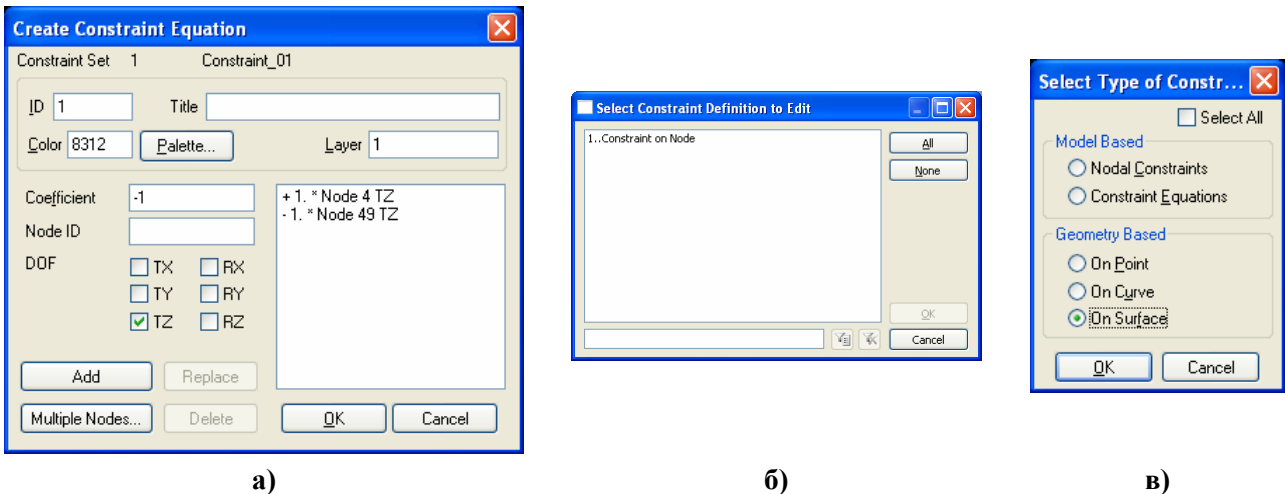


Рис.6.5. Диалоговые панели: а) – создания уравнения связи между DOF узлов; б) – выбора объектов для редактирования закреплений; в) – выбора объектов для удаления закреплений

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 Constraint**” (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**→**Constrain – Definition...** или **List**→**Model**→**Constrain – 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 подразделе 1.5.

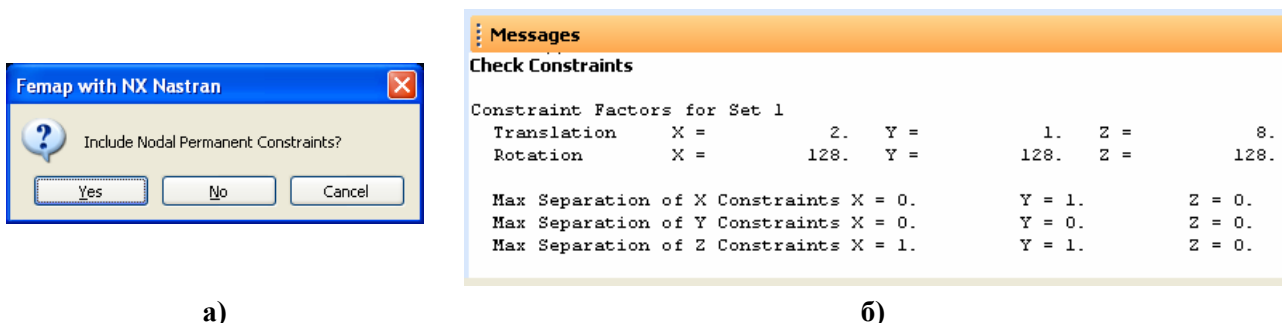


Рис.6.6. Контроль закрепления тела: а) – вопрос относительно подключения постоянных узловых связей; б) – результат проверки условий закрепления тела

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 для выбранной координатной системы:

- в секции „**Translational Accel / Gravity (length/time/time)**” параметрами „**Ax**”, „**Ay**” и/или „**Az**” как осевые компоненты вектора ускорения (в системе **SI** размерность – м/с²), 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/с²) 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**.

Для заполнения значений последних двух секций можно использовать кнопку „**Rotating Around Vector...**”, при этом последовательно вызываются диалоговые панели для задания направления оси вращения и номинальных значений скорости и/или ускорения.

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 команд **Model**→**Load**: назначается тип объекта

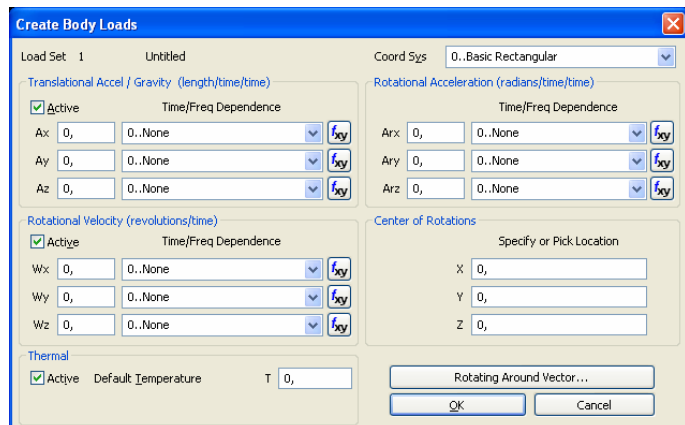


Рис.6.7. Диалоговая панель для введения граничных условий для всего тела

для приложения ГУ (\rightarrow Nodal..., \rightarrow Nodal on Face..., другие) и выбираются объекты; на появившейся диалоговой панели „Create Loads on ...” (см. рис.6.4) выбирается один из вариантов: „Force” (сила), „Force per Area” (сила на плоскости), „Force per Node” (сила в узле), „Bearing Force” (силы опоры), „Moment” (момент), „Moment per Area” (момент на плоскости), „Moment per Node” (момент в узле), „Torque” (крутящий момент) или „Pressure” (давление). **Внимание:** *положительное* значение давления – давление, действующее *в тело*. Имеются ввиду *полные* значения, которые программой Femap распределяются по узлам КЭС всех выбранных поверхностей (варианты „Force”, „Bearing Force”, „Moment” и „Torque”) или линий („Force”, „Moment”). Силы опоры распределяются по узлам КЭС неравномерно (на поверхностях круговых отверстий – примерно по закону синуса) на указанном угле (по умолчанию 180 градусов), а опция „Traction Load” позволяет менять направление сил на противоположное, т.е. вместо опоры будет моделироваться тяга.

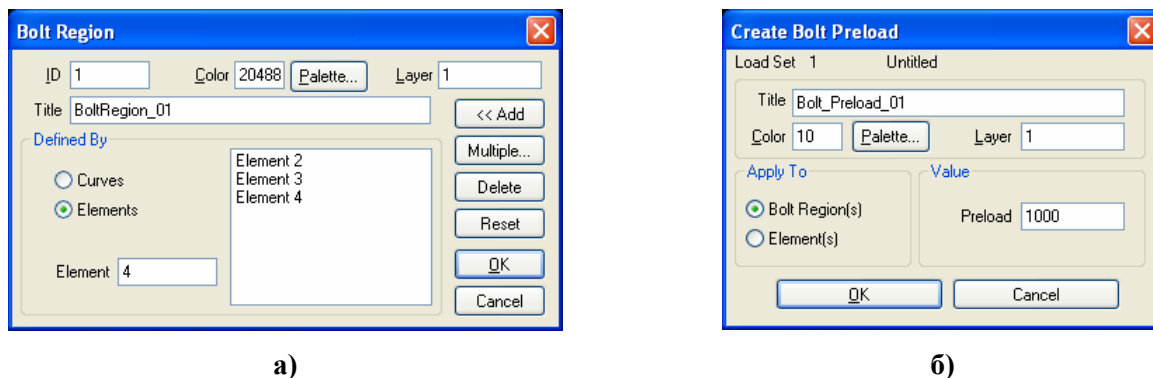
Выполняются другие стандартные действия, рассмотренные в п.4.1.3 и п.4.1.4.

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 10.2 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** \rightarrow **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** \rightarrow **Load** \rightarrow **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 „ОК” осталось выбрать или существующий болт-регион, или КЭ для нового болта-региона. **Внимание:** только для типа задачи **Advanced Nonlinear Analysis (Solution 601 – передовой нелинейный анализ)** болт-регион может содержать больше одного КЭ (ограничение Nastran, отмеченное в „Help”).

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** \rightarrow **Update Other** \rightarrow **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 10.2 есть 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 7.1 (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 *декартового* 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;
- „**Fluid Density**” – удельная плотность жидкости;
- „**Z Free Surface**” – расстояние от начала координаты к свободной поверхности жидкости, должна быть ≥ 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 подразделе 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**).

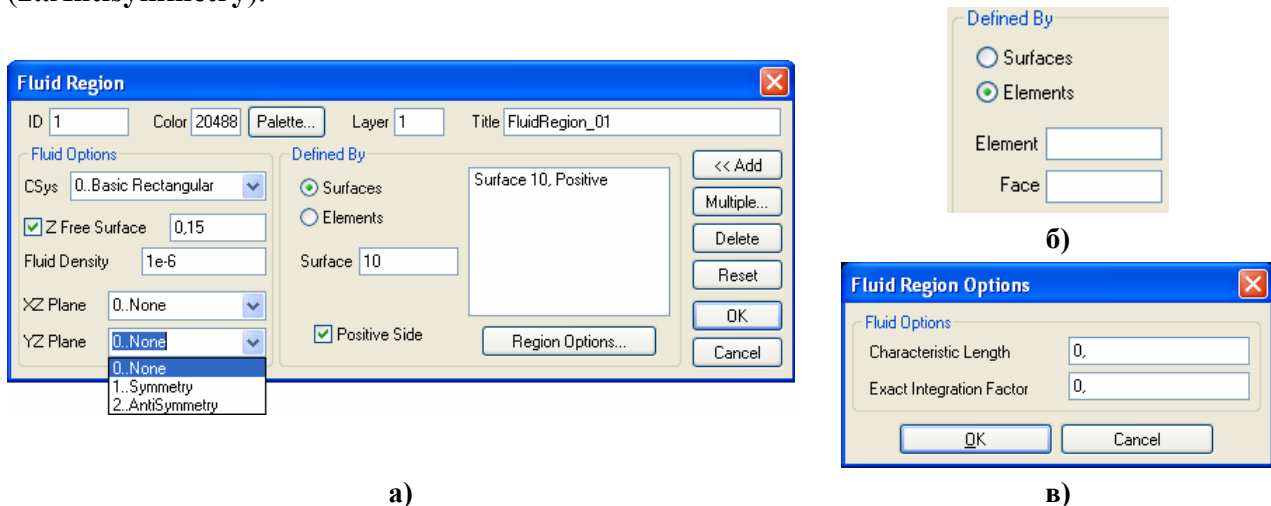


Рис.6.9. Диалоговые панели задания силовых ГУ типа „несжимаемая жидкость”

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) большего из них, 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 такими, 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	$F_i(t) = \begin{cases} -Scale \cdot [-X_j(t)]^{Power}, & \text{если } X_j(t) < 0 \\ 0, & \text{если } X_j(t) \geq 0 \end{cases}$

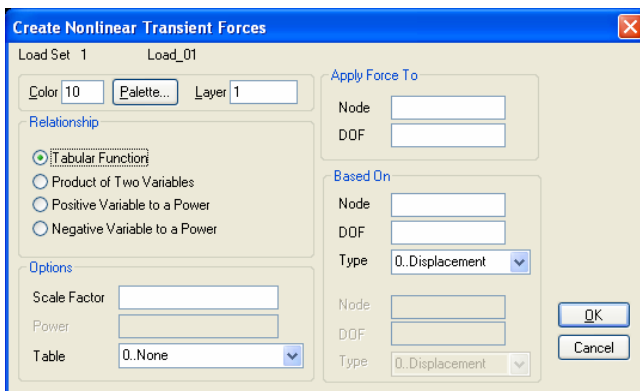


Рис.6.10. Диалоговая панель задания силы, зависимой от смещения или скорости движения выбранного узла

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.

6.2 Задание опций и параметров нелинейного анализа

Когда в задаче предполагается *любая* нелинейность, для каждого из наборов нагрузок (активизировать командой **Model**→**Load**→**Create/Manage Set...**) нужно задать опции и параметры нелинейного анализа. **Внимание:** при применении модифицированного подхода Лагранжа (тип задачи **22..Advanced Nonlinear Static** – см. подраздел 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 началь-

ного 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 τ), 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);

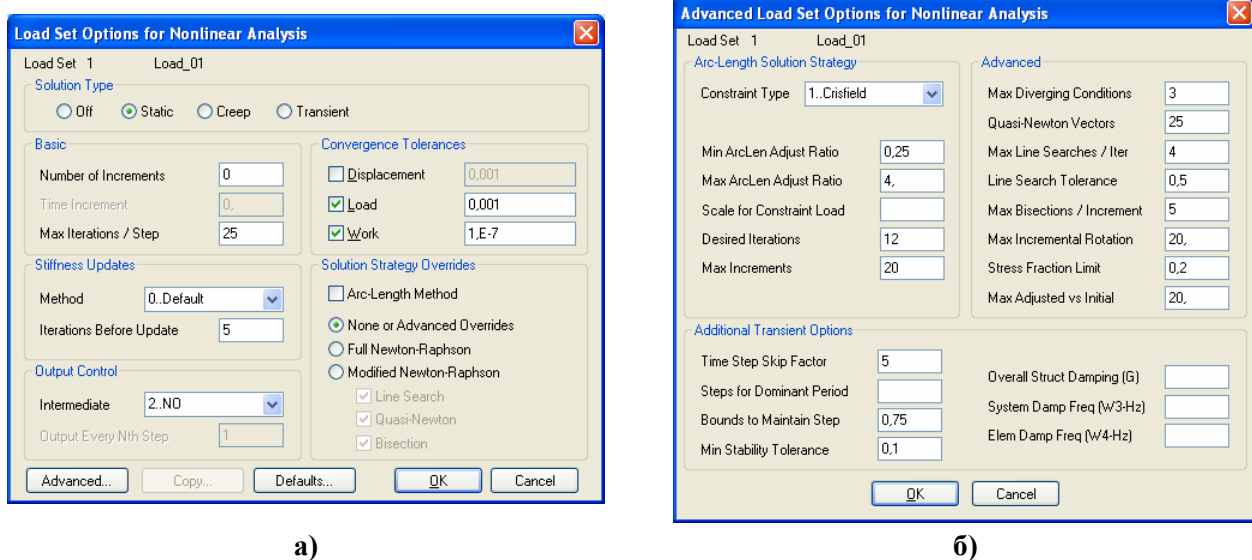


Рис.6.11. Диалоговые панели задания опций и параметров нелинейного анализа:
а) – основная; б) – дополнительная

- 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**”;

- 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 итерации. 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; это требует значительных знаний пользователя).

Внимание. Только некоторые (основные) конечные элементы могут моделировать нелинейный статический анализ и анализ эволюционных процессов, причем с особенностями, указанными в „**Chapter 2. Elements for Nonlinear Analysis**” в книге „**NX Nastran Basic Nonlinear Analysis. User’s Guide**”, которая содержится в файле `.../FEMAPv102/Nastran-Help/NXNastran/nast/misc/doc/docs/pdf/bas_nonlinear.pdf`.

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 закритическое поведение тела, или задача о его устойчивости (см. п.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 подразделе 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 – наиболее 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. подраздел 3.1). О задании начальных условий см. пп.6.2.1.1; ГУ 1-го рода – п.6.1.2; силовых граничных условий – п.6.1.3. Кроме того, для задачи термоупругости необходимо ввести в граничные условия таблицу распределения температуры в теле (см. п.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 подразделе 4.2. Этот тип краевой задачи можно решать, кроме NX Nastran, многими 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. подраздел 3.1): на диалоговой панели „**Define Material – ISOTROPIC**” на вкладке „**Nonlinear**” (см. рис.3.3-а) нужно радиокнопкою 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. подраздел 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. п.6.3.8).

6.3.3 Краевые задачи нелинейной упругости для материала типа „резина”

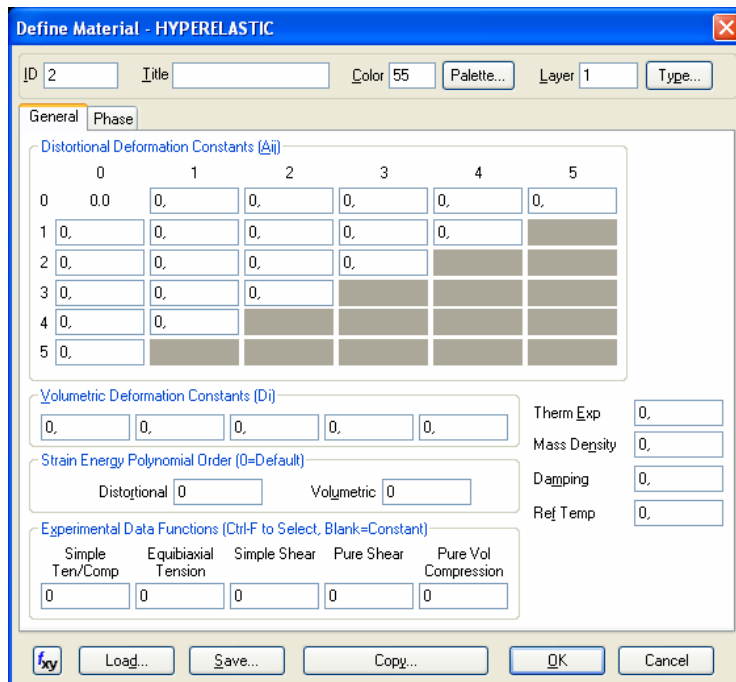
От формулирования задачи *нелинейной* упругости для изотропного материала отличается заданием на диалоговой панели „**Material Type**” (см. рис.3.2-б) варианта „**Hyperelastic**” и назначением на диалоговой панели „**Define Material – HYPERELASTIC**” нужных свойств материала (см. рис.6.12-а и пп.Д5.1.4.3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

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

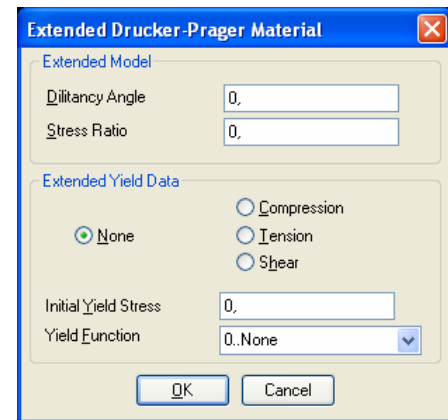
В секции „**Distortional Deformation Constants (Aij)**” задаются компоненты матрицы A_{ij} , причем $A_{00} = 0$, а в секции „**Volumetric Deformation Constants (Di)**” – компоненты D_i .

Для неогукового 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.



а)



б)

Рис.6.12. Диалоговые панели введения свойств материала:

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

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 и еще 507 (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).

Если ожидаются значительные и очень значительные перемещения и деформации, то при приложении силовых нагрузок в соответствующих местах необходимо задать их зависимыми от смещения точки приложения (см. пп.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. п.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. подраздел 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 внести 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 SPLMS.Fv10.2.0 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. п.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. п.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. подраздел 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→Create/Manage 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. п.6.3.8).

6.3.6 Краевые задачи об упругой устойчивости тел

Прежде чем моделировать такую задачу, целесообразно ознакомиться с изложенными в п.П5.2.7 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.

Внимание: необходимо учитывать, что

- 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 также 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: „Modal/Buckling” и „Modal XYPlot”, 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));

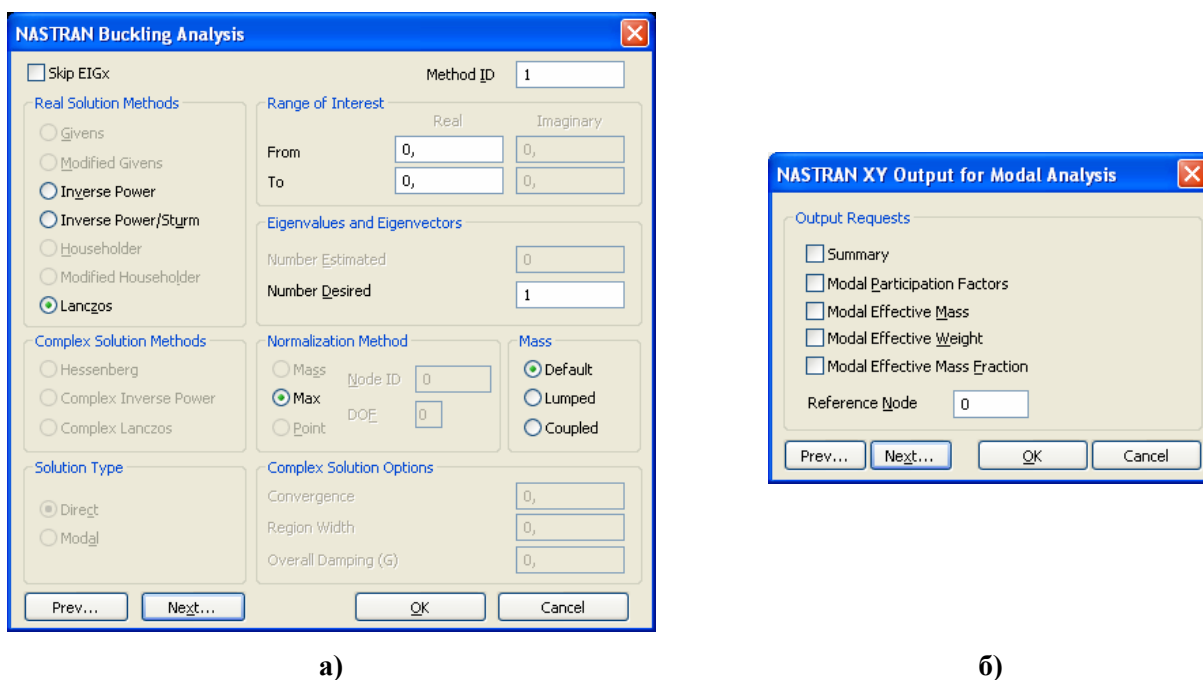


Рис.6.13. Диалоговые панели для настраивания: а) – анализа потери устойчивости; б) – вывода информации во вспомогательный файл *.f06

- 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 β , например, „3..Eigenvalue 2 1.917812”. Критическая нагрузка равна приложенной, умноженной на β . Поэтому, если некоторые значения $|\beta|$ меньше единицы, то это означает, что заданная для тела нагрузка превышает соответствующие критические нагрузки.

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

Примечание 6.7. 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. п.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 несколько 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. п.П5.2.7 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 САУ 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 6.8. Если при формулировании задания ввести значение параметра **BUCKLE=2** (т.е. **PARAM,BUCKLE,2**, см. п.4.3.2), то будет проведен *нелинейный* анализ об устойчивости тела с применением любого метода решения нелинейной САУ (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 7.1 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**).

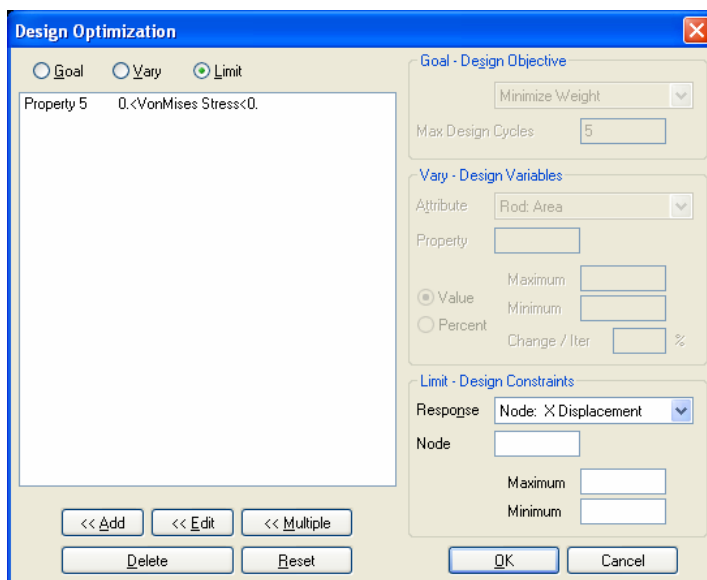


Рис.6.14. Диалоговая панель для введения параметров оптимизации

– **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 нулевое значение указывает на автоматический выбор этого шага программой. Когда все назначения для выбранного **ID** „**Property**” сделаны, нужно добавить

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**).

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**

их в список кнопкой „<<Add”. Для редактирования этого списка есть кнопки „Delete” и „Reset”, а для внесения изменений в ранее созданные данные – кнопка „<<Edit”. 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”.

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). Доступные те же кнопки с теми же функциями.

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 инициирована 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 полная формулировка Лагранжа (**Total Lagrange – TL**), а в „22..Advanced Nonlinear Static” – модифицированная формулировка Лагранжа (**Update Lagrange – UL**).

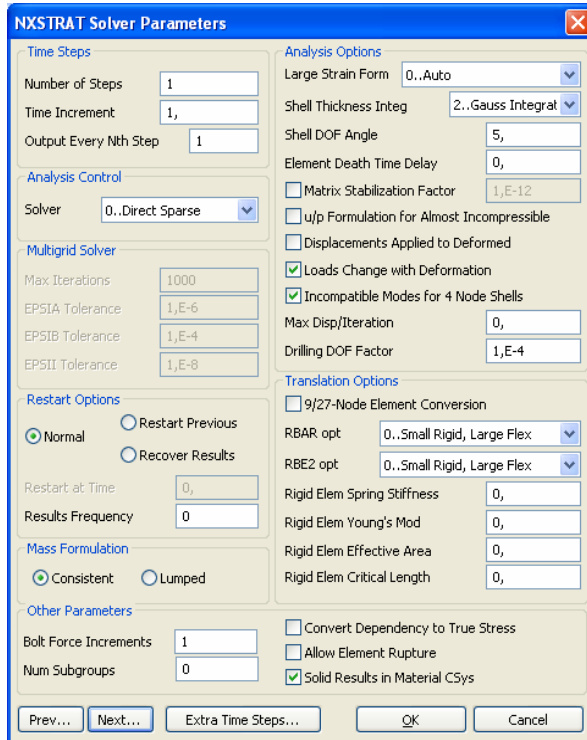
Последний (т.е. **UL**), относительно новый вариант анализа, реализовано в FEMAP 10.2 лишь для **SPLMS.Fv10.2.0**, хотя имеются программы, в которых тоже реализована **UL**-формулировка, например, ANSYS, LS-DYNA3D, MARC и т.п., и с которыми FEMAP 10.2 имеет интерфейс. Если быть совсем точным, то типы задач „22..”, „23..” и „24..” предназначены для встроеного в **SPLMS.Fv10.2.0** решателя под названием **ADINA**, о чем в процессе решения в файлах диагностики появятся соответствующие сведения. **Внимание:** в этих вариантах могут применяться не все типы КЭ и материалов, а только в соответствии с таблицей 4.3.

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

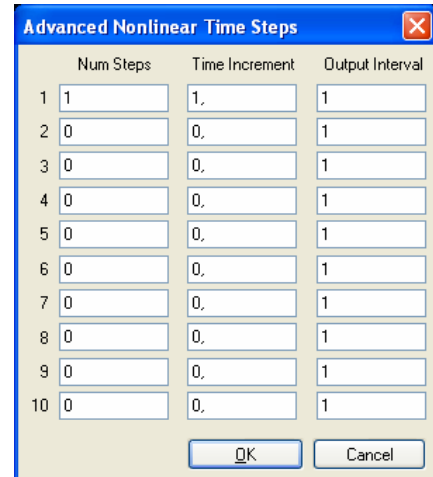
6.4.1 Опции диалоговой панели „NXSTRAT Solver Parameters”

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).



а)



б)

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

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

Секция „**Other Parameters**” имеет такие опции:

- „**Bolt Force Increments**” – за какое число шагов применить полную величину предварительной затяжки болта (бывает полезно для сходимости);
- „**Num Subgroups**” – сколько групп КЭ с одинаковыми „**Property**” создано для более эффективной обработки (имеет смысл, если количество КЭ в группах превышает 1000);
- „**Convert Dependency to True Stress**” – пересчитать напряжения и деформации от технических к истинным;

- „**Solid Results in Material CSys**” – для КЭ типа **Solid** результаты будут выводиться в системе координат материала (иначе – в той системе координат, в которой описан КЭ);
 - „**Allow Element Rupture**” – позволить разрыв КЭ.
- Секция „**Analysis Options**” имеет набор таких опций:
- „**Large Strain Form**” (формы больших деформаций): „**0..Auto**” (автовыбор), „**1..Updated Lagrangian-Jauman**” (UL с напряжениями Яумана), „**2..Updated Lagrangian-Hencky**” (UL с деформациями Генки);
 - „**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 срединной 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 ≥ 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. п.4.2.6);
 - „**Incompatible Modes for 4 Node Shell**” (использовать несовместимые режимы для 4-х узлового оболочечного КЭ) – для **SOL 601** и **SOL 701**;
 - „**Max Disp/Iteration**” (максимальное ограничение на перемещение любого узла модели (0.0 – отсутствие ограничения). Особо полезно для контактных задач);
 - „**Drilling DOF Factor**” (для узлов оболочки с нулевой жесткостью вращения. В пределах от 0 до 1. По умолчанию $1.0 \cdot 10^{-4}$).
- 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 Stiffness**” – 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”.

6.4.2 Опции диалоговой панели „NXSTRAT Iteration and Convergence Parameters”

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

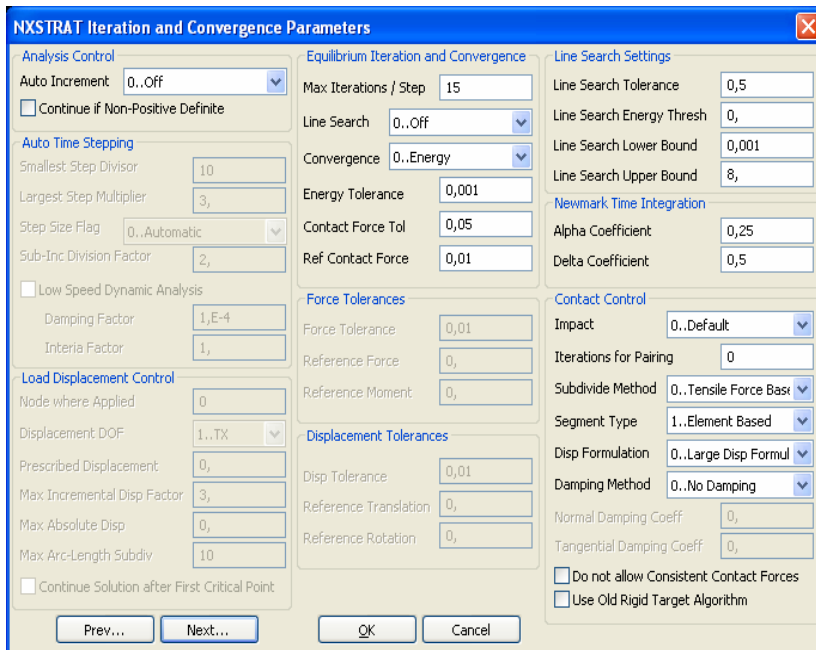


Рис.6.16. Диалоговая панель для настраивания параметров итераций и сходимости

„3..Total Load, Stabilize” (схема TLAS – дополнительно к схеме TLA применена стабилизация (см. „Help”)).

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” и других 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);
- „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 значения фактора динамического демпфирования и инерционного фактора (**Inertia Factor**);

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 – схема LDC); „3..Total Load” (схема TLA – проводить 50 временных шагов с приращением 0.2, максимум 30 итераций, наименьший делитель шага =64, включен режим линейного поиска (Line Search), установлен параметр MAXSDISP = 0.05*(максимальную раз-

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);
- „**Continue Solution after First Critical Point**” – продолжать процесс получения решения задачи и после достижения *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 силе), „**Reference Force**” (сила) и „**Reference Moment**” (момент)), секции „**Displacement Tolerance**” („**Disp Tolerance**” (по перемещениям), „**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;
- „**Line Search Lower Bound**” и „**Line Search Upper Bound**” – нижняя (между 0 и 1, по умолчанию 0.001) и верхняя (больше или равно 1, по умолчанию =1 для контактного анализа и =8 для других случаев) границы для метода „**Line Search**”.

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

- „**Alpha Coefficient**” – коэффициент α . В методе Ньюмарка $\alpha \geq 0.25$;
- „**Delta Coefficient**” – коэффициент δ . 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..Linear Contact**” (старый); „**1..Element Based**” (более новый, что разработан для NX Nastran 4.1. Рекомендуется в первую очередь для тетраэдрического КЭ 2-го порядка аппроксимации, с 10 узлами). По умолчанию используется „**1..Element Based**”, но только лишь при установлении на вкладке „**NX Adv Nonlin**” диалоговой панели „**Define Connection Property**” в поле „**Contact Type**” значения „**0..Constraint Function**” (см. пп.8.2.3.2);

- „**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);

- „**Do not Allow Consistent Contact Forces**” – не позволять противоречивые контактные усилия на квадратичных контактных сегментах;

- „**Use Old Rigid Target Algorithm**” – использовать старый алгоритм „**Rigid Target**”.