

Раздел 8

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ТЕЛ. КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ

Расчеты краевых контактных задач могут требовать очень значительные объемы оперативной и еще больше дисковой памяти, а также занимать очень много времени на этапе вычисления, поскольку решаются с применением итераций, в которых определяются зоны контакта, согласовываются контактные усилия и перемещения.

Основные сведения об особенностях контактных краевых задачах про определение НДС тел приведены в Приложении 8.

Контактные задачи формулируются для двух или большего количества тел. При этом тела могут иметь как конечную (деформируемое тело), так и бесконечную жесткость (жесткое тело или ограничения). В *первом* случае сначала создаются конечно-элементные модели всех тел, во *втором* случае контактная поверхность *жесткого* тела покрывается КЭ типа **PLOT ONLY**. Потом узлы КЭ, выходящие на контактные поверхности, связываются контактными КЭ.

Внимание: если поверхность контакта известна и отсутствует взаимное проскальзывание поверхностей контакта, задачу целесообразно решать как неконтактную, объединив два тела в одно.

В SPLMS.Fv10.2.0 есть два метода формирования возможных зон контакта в краевой задаче о контакте тел, а именно как контакт типа:

- „узел-узел”, с применением КЭ типа **GAP** в одномерном и типа **SLIDE LINE** в двумерном и трехмерном случае;
- „поверхность-поверхность”, с применением регионов. Реализовано в программах **NX Nastran**, **NE/NASTRAN**, **ABAQUS**, **MARC**, **ANSYS**, **LS-DYNA3D** и других.

8.1 Формирование зон контакта методом „узел-узел”

При формировании зон контакта методом „узел-узел” применяют контактные КЭ типа **GAP** в одномерном и типа **SLIDE LINE** в двумерном и трехмерном случае.

Контактные КЭ типа **GAP** или **SLIDE LINE** создаются с помощью команды **Model→Element...** (см. Раздел 3.4.1).

Проблемы при создании контактных КЭ типа **GAP** (зазор) связаны с тем, что он не может иметь длину, равную нулю, а также допускает лишь незначительный натяг.

Если при создании „**Property**” контактного КЭ на диалоговой панели „**Define Property – SLIDE LINE Element Type**” выбрать радиокнопкою вариант „**Symmetrical Penetration**”, то будут учитываться только симметричные члены матрицы жесткости контактного КЭ, что ускоряет расчет, но несколько снижает его точность.

Необходимо учитывать, что КЭ типа **SLIDE LINE** не имеет своей координатной системы, но должен находиться в плоскости **XY**. Поэтому, если это условие не выполняется в глобальной системе координат, в нужном месте необходимо создавать соответствующим образом ориентированную локальную систему координат, в которой и задавать КЭ типа **SLIDE LINE**.

Фактически контактный КЭ типа **SLIDE LINE** содержит перечень узлов *возможной* зоны контакта двух поверхностей, поскольку при его создании *последовательно* (от начального до конечного) указываются (отдельно на сторонах каждого тела) *все* узлы будущего (возможного) контакта. В созданных таким образом списках программа ищет узлы, которые противостоят друг другу с некоторым допуском (контактные пары узлов), потом между ними создает КЭ типа **GAP** (линия, соединяющая два узла, для моделирования работы на растяже-

ние (обычно с незначительной жесткостью для моделирования, например, сил молекулярного притяжения), сжатие и сдвиг).

Внимание: поскольку контактный КЭ типа **GAP** не может быть создан с нулевой длиной, то одно из контактирующих тел сначала нужно сдвинуть как жесткое тело (чтобы появился зазор между ними) в направлении, перпендикулярном к поверхности, создать все КЭ типа **GAP** или **SLIDE LINE** и потом придать телу верное положение. Жесткое смещение КЭ удобно проводить с помощью команды **Modify→Move By→Element...** Иногда есть смысл не двигать, а масштабировать КЭ (командой **Modify→Scale→Element...**, например, задать масштаб 0.99 относительно точки с нулевыми координатами).

О параметрах КЭ типа **GAP** или **SLIDE LINE** см. в таблице 3.2, об их создании – в Разделе 3.4.1.

Поскольку КЭ типа **SLIDE LINE** – плоский, то он включает в зону контакта тела лишь один ряд узлов на каждой поверхности контакта. Поэтому в объемных и осесимметричных контактных задачах необходимо узлы КЭС размещать ровными рядами с согласованным расстоянием между ними. Если такие ряды контактных КЭ создавать методом копирования прежде созданных, то *возникают совпадающие узлы*, которые необходимо обнаруживать и ликвидировать еще до придания подвинутому телу верного положения.

Все эти условности и дополнительные действия значительно усложняют создание контактных „связей” этим методом (узел-узел).

8.2 Формирование зон контакта с применением регионов

8.2.1 Общие сведения

Модель контакта с применением регионов для NX Nastran можно создавать между „твердыми” телами (**Solid**), оболочечными КЭ (**Shell**) и твердыми поверхностями (**Rigid Surfaces**). Предполагаются следующие условия моделирования контакта:

- контактные узлы и КЭ заранее не известны;
- трение моделируется в соответствии с законом трения Кулона разных модификаций (для анализа типа 701 – только классической формулировки);
- моделируется сцепление и проскальзывание;
- появление и исчезновение контактных зон (пар узлов, соединений) может иметь любую последовательность;
- разрешены самоконтакт в теле и двусторонний контакт тонких частей тела;
- может быть смоделирован „склеенный” контакт (только для анализа типа 601);
- возможен только сравнительно небольшой относительный сдвиг.

8.2.2 Автоматический и „ручной” варианты формирования зон контакта с применением регионов

Если в модели контакт осуществляется между поверхностями „твердых” тел (**Solid**), то есть смысл применять автоматический вариант поиска контактных поверхностей, который инициируется командой **Connect→Automatic...** (при отсутствии „твердых” тел эта команда не активна). После выбора „твердых” тел появится диалоговая панель, изображенная на рис.8.1-а.

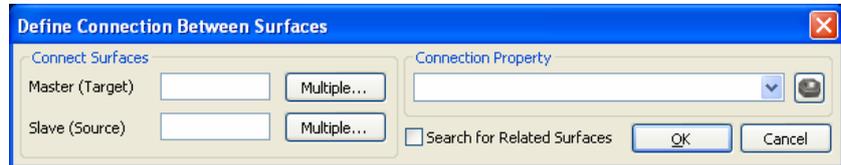
В секции „**Coincident Surface Detection**” есть такие опции:

- „**Tolerance**” и „**Angular Tolerance _ deg.**”: устанавливают критические величины зазора и угла наклона (градусов) между поверхностями „твердых” тел, которые не позволят считать, что эти поверхности могут при анализе контактировать;
- „**Direction Strategy**” (стратегия выявления): от „**Minimal**” (минимальная) к „**Aggressive**” (агрессивная) – пять степеней. Первая степень („**Minimal**”) – только плоские поверхности; вторая – дополнительно рассматриваются цилиндрические, сферические, конусные поверхности и тороиды; третья – дополнительно используются логические (Булевы) операции; четвертая – как третья, но предварительно все „твердые” тела „раздуваются” на величину в 0.5 от „**Tolerance**” (от критической величины зазора); пятая („**Aggressive**”) – как четвертая, но тела „раздуваются” на полную величину „**Tolerance**”;

- „**Check for Connections in same Solid**” – проверять на „самоконтакт”, т.е. соединение в том же теле (например, берега трещины в теле при ее закрытии входят в контакт);
- „**Combine all Connections between Solids**” – объединить все соединения в теле в единый регион. Нуждается в отключении в случае наличия „самоконтакта”;



а)



б)

Рис.8.1 – Диалоговые панели настраивания: а) – автоматического поиска поверхностей контакта; б) – „ручного” поиска поверхностей контакта

В секции „**Connection Property**” есть такие варианты: „**Contact**” (создание нового контактного „**Property**”), „**Glued**” (создание нового контактного „**Property**” типа „клея”) и „**Property**” (выбрать из списка уже существующее „**Property**” и использовать его).

Примечание 8.1. Вариант „**Glued**” не может применяться в типах анализа **601** и **701** (см. табл.4.2). Этот вариант имеет такие особенности: во-первых, создаются жесткие связи типа „**Springs**”, которые не допускают относительные смещения объектов контакта; во-вторых, нельзя в NX Nastran 7.1 применять *итерационный* процесс решения линейной системы алгебраических уравнений.

Можно использовать „ручной” вариант поиска контактных поверхностей: дать команду **Connect→Surface...** Появится диалоговая панель, изображенная на рис.8.1-б. У поля „**Master (Target)**” (главная) и „**Slave (Source)**” (подчиненная) вводятся номера двух поверхностей или с помощью кнопок „**Multiple...**” создаются списки поверхностей, выбирается или (с помощью кнопки ) создается контактное „**Property**” (см. ниже). Если установить опцию „**Search for Related Surfaces**” (поиск связанных поверхностей), то в регион будут автоматически включаться поверхности, логически связанные с уже найденными. Например, одна поверхность логическими операциями разделена на несколько; цилиндрическое отверстие в среде **Parasolid** имеет две логически связанные поверхности.

8.2.3 Диалоговая панель „**Define Connection Property**”

Диалоговая панель „**Define Connection Property**” (кроме кнопки  еще вызывается командой **Connect→Connection Property...**) имеет общую зону и 8 вкладок, из них лишь три предназначены для NX Nastran. В общей зоне, кроме стандартных полей, есть поле списка „**Connect Type**” (тип соединения) с двумя вариантами: „**0..Contact**” (контакт) и „**1..Glued**” (склеивание). Кнопкой „**Defaults**” рекомендуют заполнить опции стандартными значениями.

8.2.3.1 Вкладка „**NX Linear**” диалоговой панели „**Define Connection Property**”

Первая вкладка „**NX Linear**” (см. рис.8.2) предназначена для настраивания анализа типа 101 – линейного статического (см. табл.4.2). Кроме того, некоторые данные, введенные на этой панели, используются во всех типах контактного анализа.

В секции „**Contact Pair (BCTSET)**” есть такие опции:

- „**Friction**” – статический коэффициент трения Кулона;
- „**Min Contact Search Dist**” – минимальное расстояние для поиска пары контакта i – го узла. **Внимание:** при наличии натяга это расстояние может быть отрицательным;

- „**Max Contact Search Dist**” – максимальное расстояние для поиска пары контакта i – го узла (измеряется вдоль нормали к поверхности КЭ из точки, имеющей координаты узла).

В секции „**Contact Property (BCTPARM)**” опции должны иметь одинаковые значения во всех „**Connection Property**”. Поэтому FEMAP будет пользоваться значениями *лишь из одной* „**Connection Property**”, которая связана с *наименьшим* номером КЭ. Это такой набор опций:

- „**Max Force Iterations**” – максимальное количество итераций для уравнивания контактных усилий и достижения условия взаимного не проникновения (внутренний цикл);

- „**Max Status Iterations**” – максимальное количество „внешних” итераций для нахождения решения;

- „**Force Convergence Tol**” – точность сходимости контактных усилий (евклидова норма). По умолчанию принято значение, равное 0.01;

- „**Convergence Criteria**” – критерии сходимости. Варианты из списка: „**0..Number of Changes**” (число изменений), „**1..Percentage of Active**” (процент от активных контактных элементов внешнего цикла);

- „**Num For Convergence**” – числовое значение для предыдущей опции;

- „**Min Contact Percentage**” – минимальный процент от контактных КЭ, которые считаются активными. По умолчанию принято значение, равное 100;

- „**Adaptive Stiffness**” – адаптивная жесткость штрафа. Опция подключает алгоритм использования адаптивной жесткости штрафа в контактном методе штрафа;

- „**Penetration Factor**” – коэффициент проникновения. Определяет коэффициент проникновения для алгоритма, подключаемого предыдущей опцией. По умолчанию значение 0.0001;

- „**Initial Penetration**” – начальное проникновение. Варианты из списка: „**0..Calculated**” (вычисление с использованием координат узлов), „**2..Calculated / Zero Penetrations**” (как предыдущее, но при наличии проникновения устанавливается нулевое значение), „**3..Zero Gap/Penetration**” (для мест с зазорами и натягом – нуль);

- „**Shell Offset**” – учитывать толщину оболочки. Варианты из списка: „**0..Include shell thickness**” (учитывать) и „**1..Do not include thickness**” (не учитывать);

- „**Avg Methods**” – метод усреднения для контактных давления и натяжения. Варианты из списка: „**0..Include All Elements**” (включать *все* КЭ зон контакта) и „**1..Include Active Elements**” (включать только активные (реально контактирующие) КЭ);

- „**Contact Status**” – статус контакта. Варианты из списка: „**0..Start from Prev Subcase**” (запуск от предыдущего случая) или „**1..Start from Init State**” (запуск от начального состояния);

- „**Contact Inactive**” – активность контактных КЭ. Варианты из списка: „**0..Can Be Inactive**” (все контактные КЭ могут стать неактивными), „**1..Restrict From Inactive**” (запрет предыдущей ситуации, приводящей к преждевременному прерыванию процесса решения задачи);

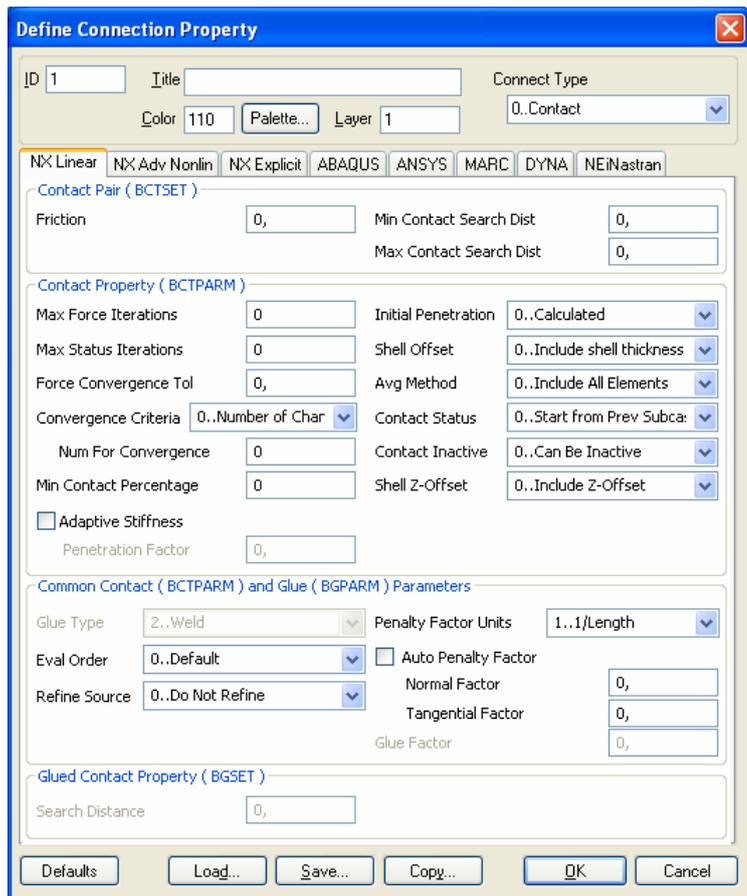


Рис.8.2 – Диалоговая панель настраивания „**Connection Property**” для анализа типа 101

- „**Shell Z-Offset**” – (Z-отступ в оболочечных КЭ, только для контакта типа „склеивание”). Варианты из списка: „**0.Include Z-Offset**” (учитывать), „**1.No not Include Z-Offset**” (не учитывать при определении зоны контакта).

В секции „**Common Contact (BCTPARAM) and Glue (BGPARM) Parameters**” (общие параметры контакта и склеивания) есть такие опции:

- „**Glue Type**” – тип склеивания. Варианты из списка: „**1.Spring**” (для определения величин в соединении будут использоваться нормальные и касательные к контактной поверхности связи, с учетом величин, введенных в полях „**Auto Penalty Factor**”, „**Normal Factor**” и „**Tangential Factor**”), „**2.Weld**” (сварка; используется только значение из поля „**Glue Factor**”. Установлено по умолчанию);

- „**Eval Order**” – порядок оценивания взаимного проникновения. Варианты из списка: „**0.Default**” (по умолчанию, как в NX Nastran), „**1.Low**” (низкий порядок точности), „**2.Medium**” (средний) и „**3.High**” (высокий). **Внимание:** повышение точности увеличивает время поиска решения;

- „**Refine Source**” – модифицировать сетку КЭ в зоне контакта? Варианты из списка: „**0.Do Not Refine**” (не делать этого), „**1.Refine Source to Target**” (модифицировать, используя информацию о контактной поверхности) и „**2.NXN 7.0 Method**” (метод NX Nastran версии 7.0);

- „**Penalty Factor Units**” – модуль фактора штрафа. Выбирается один из вариантов его подсчета: „**1.1/Length**” (обратно длине) или „**2.Force/(Length x Area)**” (отношение силы к произведению длины на площадь) в случае выбора опции „**Glue Type**” (см. выше) как „**1.Spring**”; а при выборе „**2.Weld**” – два других варианта: „**1.Scale Factor**” (масштаб) или „**2.F/L^2**” (отношение силы к квадрату длины);

- „**Auto Penalty Factor**” – фактор штрафа формировать автоматически;

- „**Normal Factor**” – фактор штрафа (жесткости проникновения) для нормального направления;

- „**Tangential Factor**” – фактор штрафа для тангенциального направления (в 10 ... 100 раз меньший нормального);

- „**Glue Factor**” – фактор склеивания. Опция доступна лишь в случае выбора опции „**Glue Type**” (см. выше) в варианте „**2.Weld**”.

Внимание:

- в NX Nastran 7.1 для типа краевой задачи 153 (см. табл. 4.2) может использоваться контакт типа „**Glue**” только в варианте „**1.Spring**”;

- в NX Nastran 7.1 для контакта типа „**Glue**” нельзя применять *итерационный* метод решения системы алгебраических уравнений, порождаемых методом конечных элементов (см. Примечание 8.1 на стр. 174).

В секции „**Glued Contact Property (BGSET and BGPARM)**” (свойства склеенного контакта) есть лишь одна опция: „**Search Distance**” – расстояние для поиска i – й пары контакта. **Внимание:** при наличии натяга это расстояние может быть отрицательным. Кроме того, лишь *единственное* значение дистанции используется в NX Nastran 7.1 для контакта типа „**Glue**”.

8.2.3.2 Вкладка „NX Adv Nonlin” диалоговой панели „Define Connection Property”

Вторая вкладка „**NX Adv Nonlin**” (см. рис.8.3) предназначена для настраивания анализа типа 601 – нелинейного статического (см. табл. 4.2). Напомним, что в этом случае для NX Nastran в поле „**Connect Type**” можно применять лишь вариант „**0.Contact**”.

В секции „**General**” (общие) есть такие опции:

- „**Contact Type**” – алгоритм контакта: „**0.Constraint Function**” (ограничивающих функций), „**1.Segment Method**” (метод сегмента) и „**2.Rigid Target**” (жесткий целевой/ Не применим для двумерного (2D) контактного анализа);

- „**Double Sided**” – разрешение на использование для контакта обеих сторон поверхности оболочки;

- „**Initial Penetration**” – начальное проникновение. Варианты из списка: „**0.Eliminate**” (удалить), „**1.Eliminate/Print**” (удалить, создать и вывести в файл соответствующий список уз-

лов), „2..Ignore” (игнорировать) и „3..Specify with Gap Distance” (задавать значением из поля „Gap Distance”. При >0.0 – зазор; при <0.0 – проникновение, которое будет устранено);

- „Penetration Depth” – допустимая глубина проникновения для одностороннего контакта;

- „Segment Normal” – использовать ли интерполированный сегмент для определения нормали к поверхности. Варианты из списка: „0..Default” (как „1..Used” – для одностороннего; как „-1..Not Used” – для двустороннего контакта), „1..Used” (использовать непрерывный (интерполированный) сегмент) и „-1..Not Used” (не использовать);

- „Offset Type” – тип отступа. Варианты из списка: „0..Single Sided” (только для односторонних), „1..Single/Double-Sided” (для односторонних и двусторонних) и „2..Half Shell Thick” (половина толстой оболочки);

- „Offset Distance” – размер отступа (для первых двух вариантов „Contact Type” можно задавать *разный* размер в разных регионах контакта).

- „Birth Time” – время создания контакта;

- „Death Time” – время окончания („смерти”) контакта (если это значение равно времени создания, то контакт игнорируется).

В секции „Standard Contact Algorithm” есть такие опции:

- „Disp Formulation” – формулирование перемещений. Варианты из списка: „0..Use NXSTRAT CTDISP” (по умолчанию, т.е. как определено переменной CTDISP в NXSTRAT), „1..Small Disp Formulation” (малые перемещения, условия контакта не обновляются) и „2..Large Disp Formulation” (большие перемещения, условия контакта обновляются);

- „Consistent Stiffness” – использовать (или нет) согласованную жесткость контакта;

- „Tied Tolerance” – точность связывания регионов в каждой паре контакта. В NX Nastran 7.1 при инициации этой опции считается, что регионы контакта имеют малые повороты;

- „Init Penetration Duration” – продолжительность ликвидации начального проникновения. Если задать 0.0, то начальное проникновение будет ликвидировано на первом временном шаге, но это может вызвать проблемы со сходимостью;

- „Surface Extension Factor” – фактор продления поверхности, обозначим как δl . Длина поверхности L увеличивается, равняется $(1.0 + \delta l) \cdot L$. Диапазон значений: от 10^{-6} до 0.1; по умолчанию = 0.001;

- „Friction Model” – модель трения. Варианты из списка: „0..Default (Param 1)” (постоянный коэффициент трения, определенный на вкладке „NX Linear” в секции „Contact Pair (BCTSET)” в поле „Friction”); „1..Constant (Param 1)” (постоянный коэффициент трения, определенный в поле „Friction Param 1”); „2..Model 1 (1,2)” (модель 1); „3..Model 2 (1,2,3)” (модель 2); „12..Modified Model 1(1,2)” (модифицированная модель 1); „13..Modified Model 2(1,2,3)” (модифицированная модель 2); „4..Static/Dynamic (1,2,3)” (разные коэффициенты трения статического и динамического); „5..vs Sliding Velocity (1,2,3)” (коэффициент трения зависит от скоро-

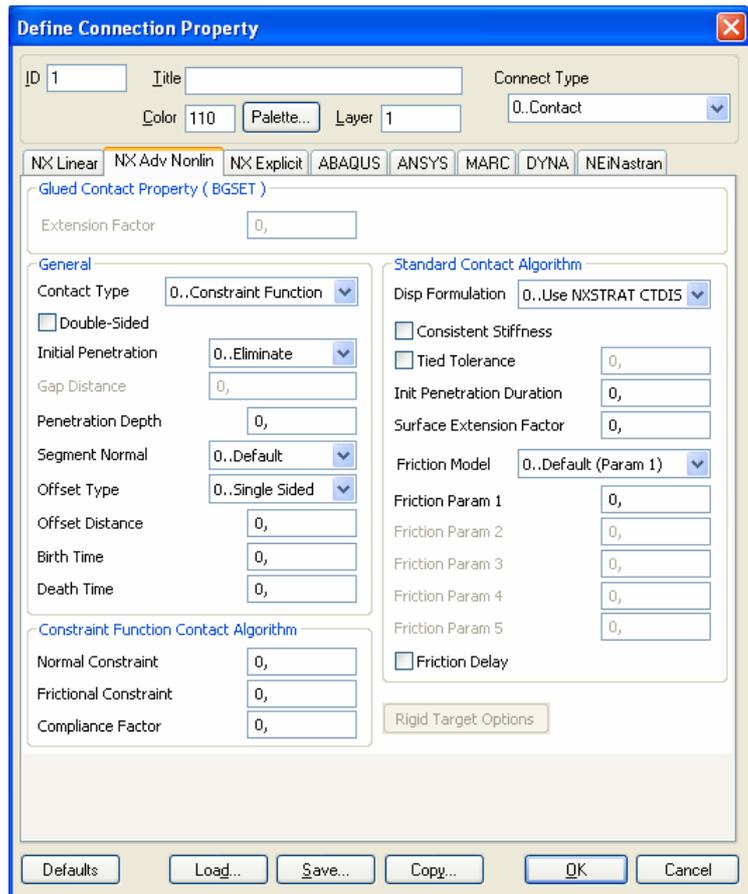


Рис.8.3 – Диалоговая панель настройки „Connection Property” для анализа типа 601

сти взаимного проскальзывания); „6..Anisotropic (1-5)” (анизотропная модель); „7..vs Contact Force (1,2)” (коэффициент трения зависит от контактного усилия); „8..vs Time (1,2,3)” (коэффициент трения зависит от времени) и „9..vs Coordinate (1-5)” (коэффициент трения зависит от координат). В скобках указываются номера параметров, которые используются для задания коэффициента. Формулы приведены в табл.П8.1 Приложения 8;

- „Friction Param 1”, „Friction Param 2”, „Friction Param 3”, „Friction Param 4” и „Friction Param 5” – значения параметров моделей трения;

- „Friction Delay” – использовать временную задержку. Условие наличие трения в контактной паре будет отсрочено на один шаг после образования контактной пары.

В секции „Constraint Function Contact Algorithm” (ограничения функции контактного алгоритма, только для варианта алгоритма контакта „0..Constraint Function”) есть такие опции:

- „Normal Constraint” – параметр ε_N (нормальное ограничение) функции $w(g, \lambda)$: см. формулу (П5.16-6) Приложения 8. По умолчанию $=10^{-12}$;

- „Frictional Constraint” – ограничения трения. Нужно задавать значения, которые >0.0 . По умолчанию $=0.001$;

- „Compliance Factor” – фактор компиляции. По умолчанию $=0.0$.

В случае выбора в опции „Contact Type” (алгоритм контакта) варианта „2..Rigid Target” (жесткий целевой, кроме 2D контактного анализа) стает активной кнопка „Rigid Target Options”, вызывающая диалоговую панель „NX Adv Nonlin Rigid Target Algorithm” (см. рис.8.4).

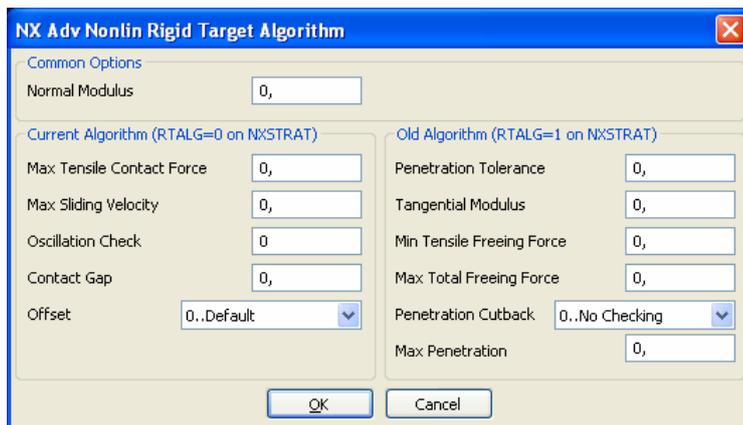


Рис.8.4 – Диалоговая панель введения опций контактного алгоритма „Rigid Target”

- „Max Sliding Velocity” – верхний предел скорости проскальзывания при использовании модели „липкого” трения (по умолчанию $=10^{-10}$). При превышении – проскальзывание;

- „Oscillation Check” – контроль осцилляций осуществлять через указанное число итераций (по умолчанию $=5$). При $=0$ – не контролировать;

- „Contact Gap” – контактный зазор. Контакт не идентифицируется при превышении указанного значения (по умолчанию $=0.0$);

- „Offset” – метод учета отступов от поверхности контакта. Есть три варианта: „0..Default” (не использовать отступ), „1..Sphere” (сферическое смещение), „2..Surface” (создаются две вспомогательные (нижняя и верхняя) поверхности на указанной величине отступа).

В секции „Old Algorithm (RTALG=1 on NXSTRAT)” есть такие опции:

- „Penetration Tolerance” – максимально допустимое значение для проникновения в тело (по умолчанию $=10^{-8}$);

- „Tangential Modulus” – касательный модуль контакта (по умолчанию $=0.0$);

- „Min Tensile Freeing Force” – минимальная допустимая сила контактного растяжения для разрыва контактной пары (по умолчанию $=0.001$);

- „Max Total Freeing Force” – максимальное значение суммы контактных сил растяжения в узлах, которые изменяют свой статус, со всей зоны контакта (по умолчанию $=1.0$). При превы-

В секции „Common Options” есть лишь одна опция „Normal Modulus” – нормальный модуль контакта. По умолчанию $=10^{11}$.

Внимание: используются значения лишь одной из описанных ниже секций, в зависимости от сделанного ранее выбора.

В секции „Current Algorithm (RTALG=0 on NXSTRAT)” есть такие опции:

- „Max Tensile Contact Force” – максимально допустимое растягивающее значение контактного усилия (по умолчанию $=0.001$);

шении этого значения алгоритм уменьшает текущее приращение времени, т.е. разделяет приращение контактных нагрузок на несколько частей;

- „**Penetration Cutback**” – сокращение проникновения. Есть такие варианты: „**0.No Checking**” (не проверять проникновение), „**Max Pen*Model Length**” (уменьшать текущее приращение времени, если превышено значение поля „**Max Penetration**” (см. ниже), умноженное на некую усредненную длину контакта), „**2..Max Penetration**” (то же действие, но при превышении значения поля „**Max Penetration**”);

- „**Max Penetration**” – допустимая глубина проникновения для одностороннего контакта.

Дополнительные сведения см. в Приложении 8 и книге „**Nonlinear Analysis Theory and Modeling guide**”, имеющейся в составе „**Help**”.

8.2.3.3 Вкладка „NX Implicit” диалоговой панели „Define Connection Property”

Третья вкладка „**NX Implicit**” (см. рис.8.5) предназначена для настраивания анализа типа 701 – прямого нелинейного динамического (см. табл.4.2). Напомним, что для NX Nastran в поле „**Connect Type**” можно применять лишь вариант „**0..Contact**”. Некоторые опции – такие же, как и на второй вкладке.

В секции „**General**” есть такие опции:

- „**Contact Type**” – тип контакта. Варианты из списка: „**0..Constraint Function**” (ограниченные функции), „**1..Penalty Method**” (метод штрафа) и „**3..Rigid Target**” (жесткий целевой);

- „**Double Sided**” – использовать для контакта обе стороны поверхности;

- „**Initial Penetration**” – начальное проникновение. Варианты из списка: „**0..Eliminate**” (ликвидировать), „**1..Eliminate/Print**” (ликвидировать и создать соответствующий список узлов) и „**2..Ignored**” (игнорировать);

- „**Penetration Depth**” – глубина проникновения для одностороннего контакта;

- „**Segment Normal**” – использовать ли интерполированный сегмент для определения нормали к поверхности. Варианты из списка: „**0..Default**” (по умолчанию), „**1..Used**” (использовать) и „**-1..Not Used**” (не использовать);

- „**Offset Type**” – тип отступления. Варианты из списка: „**0..Single Sided**” (только для односторонних оболочек), „**1..Single/Double-Sided**” (для односторонних и двусторонних) и „**2..Half Shell Thick**” (половина толстой оболочки, только с алгоритмом „**Rigid Target**”);

- „**Offset Distance**” – размер отступления;

- „**Friction**” – статический коэффициент трения.

В секции „**Time Activation**” есть такие опции:

- „**Birth Time**” – время создания контакта. По умолчанию =0.0;

- „**Death Time**” – время окончания („смерти”) контакта (если это значение равно времени создания, то контакт игнорируется).

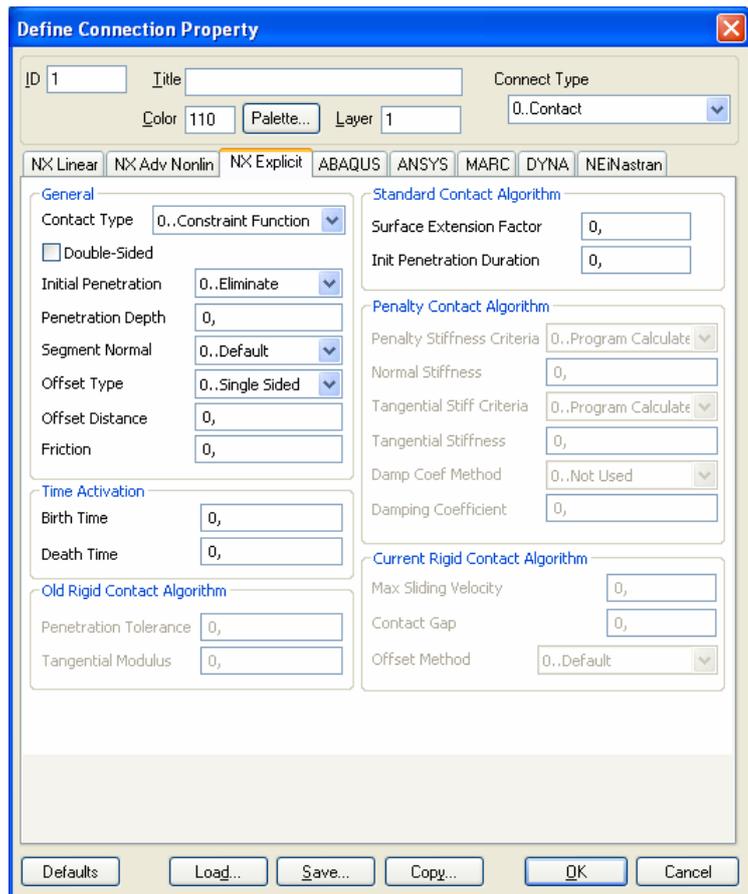


Рис.8.5 – Диалоговая панель настраивания „Connection Property” для анализа типа 701

В секции „**Standard Contact Algorithm**” (стандартный контактный алгоритм) есть такие опции:

- „**Surface Extension Factor**” – фактор продолжения поверхности, обозначим как δl . Длина поверхности L увеличивается, равняется величине $(1.0 + \delta l) \cdot L$. Диапазон значений: от 10^{-6} к 0.1; по умолчанию = 0.001;

- „**Init Penetration Duration**” – продолжительность ликвидации начального проникновения. Если задать 0.0 (по умолчанию), то начальное проникновение будет ликвидировано на первом же временном шаге, но это может вызвать проблемы со сходимостью.

В секции „**Penalty Contact Algorithm**” (контактный алгоритм штрафа) есть такие опции:

- „**Penalty Stiffness Criteria**” – критерий для оценивания нормальной жесткости штрафа. Варианты из списка: „**0..Program Calculated**” (величина „**Normal Stiffness**” вычисляется программой), „**1..User Defined**” (определяется пользователем в последующей опции);

- „**Normal Stiffness**” – величина нормальной жесткости штрафа;

- „**Tangential Stiff Criteria**” – критерий для оценивания жесткости штрафа в тангенциальном направлении. Варианты из списка: „**0..Program Calculated**” (величина „**Tangential Stiffness**” вычисляется программой), „**1..User Defined**” (определяется пользователем в последующей опции);

- „**Tangential Stiffness**” – величина жесткости в тангенциальном направлении;

- „**Damp Coefficient Method**” – метод задания коэффициента демпфирования. Варианты из списка: „**0..Not Used**” (демпфирование не используется), „**1..As Crit Damping Factor**” (демпфирование используется и является критическим фактором), „**2..Directly Defined**” (непосредственно определен в последующей опции);

- „**Damping Coefficient**” – коэффициент демпфирования. Относительное для варианта „**1..As Crit Damping Factor**” и абсолютное значение.

В секции „**Old Rigid Contact Algorithm**” (старый жесткий контактный алгоритм) есть такие опции:

- „**Penetration Tolerance**” – максимальное значение для проникновения в тело (по умолчанию = 10^{-8});

- „**Tangential Modulus**” – касательный (тангенциальный) модуль контакта (по умолчанию = 0.0).

В секции „**Current Rigid Contact Algorithm**” (актуальный жесткий контактный алгоритм) есть такие опции:

- „**Max Sliding Velocity**” – верхний предел скорости проскальзывания при использовании модели „липкого” трения (по умолчанию = 10^{-10}). При превышении – проскальзывание;

- „**Contact Gap**” – контактный зазор. Контакт не идентифицируется при превышении указанного значения (по умолчанию = 0.0);

- „**Offset Method**” – метод учета отступов от поверхности контакта. Есть три варианта: „**0..Default**” (не использовать отступ), „**1..Sphere**” (сферическое смещение), „**2..Surface**” (создаются две вспомогательные (нижняя и верхняя) поверхности на указанной величине отступа).

Дополнительные сведения см. в Приложении 8, а также в книге „**Nonlinear Analysis Theory and Modeling guide**”, имеющейся в составе „**Help**”.

8.2.4 Команды создания/редактирования объектов контактного региона

После создания хотя бы одного контактного региона в разделе „**Connections**” информационно-навигационной панели „**Model Info**” появляются объекты модели в полях **Properties**, **Regions** та **Connectors** (см. рис.8.6-а). Их названия можно изменить.

Если навести курсор мыши на эти объекты „**Model Info**” и щелкнуть правой кнопкой мыши, появится динамическая диалоговая панель, набор команд которой соответствует объекту. Для **Connections**→**Properties** такая панель изображена на рис.8.6-б, для **Connections**→**Regions** – на рис.8.6-в, для **Connections**→**Connectors** – на рис.8.6-г.

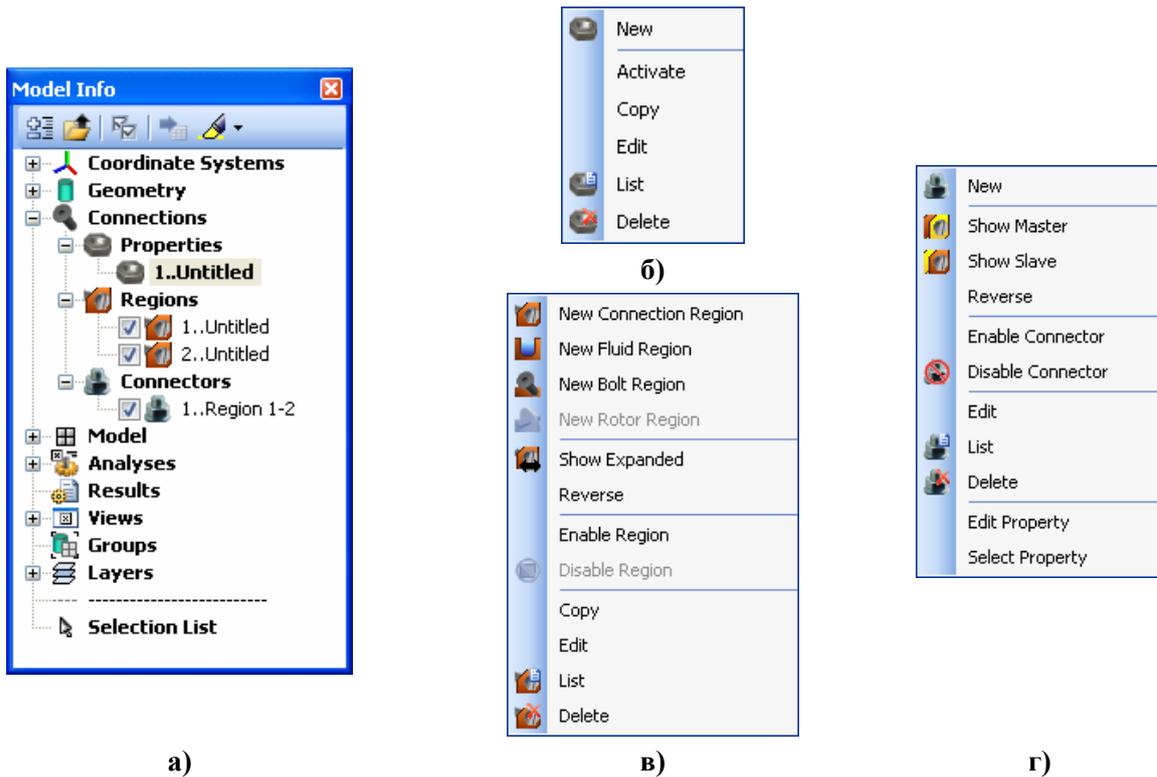


Рис.8.6 – Содержание панелей для Connections

Команда **Connect→Connection Property...**, а также команда **„Edit”** на панели, изображенной на рис.8.6-б, вызывают уже описанную диалоговую панель **„Connection Property”** (см. рис.8.2).

Команда **Connect→Connection Region...**, а также команда **„Edit”** на панели, изображенной на рис.8.6-в, вызывает диалоговую панель **„Connection Region”** (см. рис.8.7-а). Назначение панели – создание/редактирование контактного региона.

Главная задача – с помощью радиокнопок, опций и кнопок **„<<Add”**, **„Multiple...”**, **„Delete”** и **„Reset”** сформировать в большом поле список объектов, создающих контактный регион.

В секции **„Type”** выбирается тип контактного региона: **„Deformable”** (деформируемый) или **„Rigid”** (жесткий). В последнем случае (для анализа типов **601** и **701**) становится активным поле **„Ref Node”**, в которое нужно ввести номер узла, в котором (будут) заданы ограничения (**Constraint**), смещение (**Displacement**), скорость перемещения (**Velocity**) и т.п., которые будут перенесены на весь контактный регион жесткого типа.

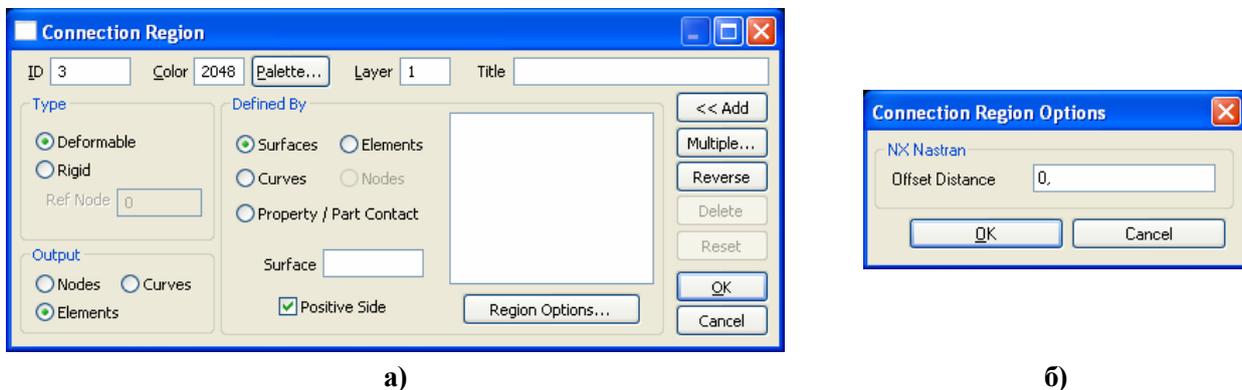


Рис.8.7 – Диалоговые панели: а) – контактного региона; б) – опций контактного региона

В секции **„Define By”** радиокнопками **„Surfaces”**, **„Elements”**, **„Curves”**, **„Nodes”** и **„Property / Part Contact”** выбирается тип объекта, который будет входить в контактный регион, причем в зависимости от типа объекта в нижней части секции появляются дополнительные поля, опции и кнопки, а именно:

- для „**Surfaces**” – поле „**Surface**” для введения номера поверхности и опция „**Positive Side**” – для изменения стороны поверхности (положительная или нет). Если поверхность ассоциирована с КЭ типа **Solid**, то сторона поверхности не имеет значения;
- для „**Elements**” – поля „**Element**” и „**Face**” для введения номеров КЭ и поверхности КЭ;
- для „**Curves**” – поле „**Curve**” для введения номера линии и опция „**Positive Side**” – для изменения стороны линии (положительна или нет, но эта опция в SPLMS.Fv10.2.0 реально не используется) или список „**CSys**” координатных систем проекта;
- для „**Nodes**” – поле „**Node**” для введения номера узла;
- для „**Property / Part Contact**” – поле „**Property**” для введения номера „**Property**” КЭ, причем для ограничения количества КЭ, которые имеют такое „**Property**” и будут включены в список, есть кнопка „**Contact Box...**”, которая вызывает стандартную панель для создания точки в пространстве. Таких точек будет создано две. Эти точки – противоположные угловые точки четырехугольного „бокса”. Все КЭ, что имеют указанное „**Property**” и геометрические центры которых лежат в рамках „бокса”, будут включены в контактный регион. Для удаления назначений границ „бокса” есть кнопка „**Delete**”.

Кроме того, в секции „**Define By**” есть кнопка „**Region Options...**”, вызывающая панель „**Connection Region Options**” (см. рис.8.7-б), где в поле „**Offset Distance**” можно установить величину отступления от объекта контактного региона.

В секции „**Output**” радиокнопками „**Nodes**”, „**Curves**” и „**Elements**” выбирается тот тип объекта модели, к которому все назначения будут переназначаться программой FEMAP при создании файла для передачи модели в программу-анализатор (NX Nastran или другой).

Эта панель – универсальна, как и среда FEMAP. Поэтому вариантов – много, причем для NX Nastran нужны не все варианты, а лишь несколько.

Некоторые дополнительные сведения об условиях использования разных вариантов можно получить в „**Help**”, а именно в **FEMAP→Commands→4. Finite Element Modeling→4.4 Creating Connections and Regions→4.4.4 Connect, Connection Region...**

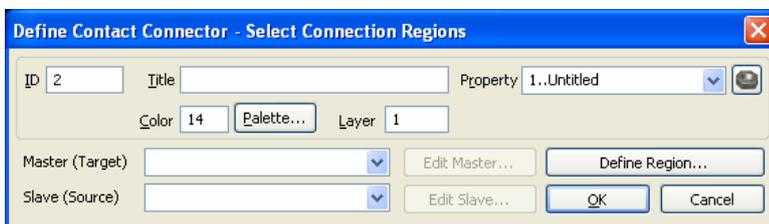


Рис.8.8 – Диалоговая панель для создания/редактирования списка контактных регионов, создающих контакт

(или редактирование существующего контактного соединения).

На этой панели нужно в поле „**Property**” выбрать одно из созданных ранее „**Connection Property**” (или с помощью кнопки  создать новое); в списках „**Master (Target)**” (главный, цель) и „**Slave (Source)**” (ведомый, источник) – по одному з контактных регионов, которые будут создавать контакт, причем с помощью кнопок „**Edit Master**” и „**Edit Slave**” можно вызвать диалоговую панель „**Connection Region**” (см. рис.8.7-а) для редактирования выбранных контактных регионов, а кнопки „**Define Region**” – такую же панель для создания нового контактного региона.

8.3 Дополнительные пояснения к контактными алгоритмам

В случаях, когда программа объединяет значения, которые заданы на панелях для разных контактных регионов, она использует значения, заданные для контактного региона с *наибольшим ID*. Поэтому нужно иметь в виду, какие данные – общие, а какие – индивидуальные.

Когда в поле „**Eval Order**” (см. рис.8.2) устанавливается разный порядок оценивания взаимного проникновения, то алгоритм использует разное количество точек на контактирующей поверхности КЭ, в зависимости от количества узлов, которое содержат поверхности КЭ – см.

Команда **Connect→Connector...**, а также команда „**Edit**” на панели, изображенной на рис.8.6-г, вызывает диалоговую панель „**Define Contact Connector – Select Connection Region**” (см. рис.8.8). Назначение панели – создание нового контактного соединения (из прежде созданных контактных регионов).

табл.8.1. С повышением порядка оценивания контактные силы и напряжения получают более гладкие распределения.

Таблица 8.1 – Зависимость количества точек на фронтальной поверхности двумерного КЭ и боковой поверхности трехмерного КЭ от порядка оценивания взаимного проникновения тел, порядка приближения в КЭ и геометрии контактирующей грани КЭ

Порядок приближения / геометрия поверхности	Установленный порядок оценивания взаимного проникновения		
	1	2	3
Линейный / треугольная	1	3	7
Параболический / треугольная	3	7	12
Линейный / четырехугольная	1	4	9
Параболический / четырехугольная	4	9	16

Внимание:

- в узлах контактной поверхности не желательно задавать перемещения и другие граничные условия, поскольку в контактном алгоритме такие узлы будут проигнорированы или вызовут фатальную ошибку (последний случай возникает, например, при использовании граничных узлов в формульных (**Model**→**Constraint**→**Equation...**) связях);
- фатальные ошибки в работе контактного алгоритма может вызвать неудачная нумерация контактных регионов;
- неверные результаты можно получить после запрещения степеней свободы узлов командой **Modify**→**Update Other**→**Perm Constraint...**

8.4 Создание задания для проведения расчета краевой контактной задачи

При создании задания, на диалоговой панели „**Analysis Set Manager**” (вызывается командой **Model**→**Analysis...**) иницируется кнопка „**New...**”, на панели „**Analysis Set**” выбирается в списке „**Analysis Type**” (см. рис.4.13-б) значение:

- „**1..Static**” (статика), „**10..Nonlinear Static**” (нелинейная статика) или „**22..Advanced Nonlinear Static**” (нелинейная статика, „передовой” анализ, см. Раздел 6.3.8 и Приложения П5, П6, П8) – статические контактные задачи;
- „**23..Advanced Nonlinear Transient**” (неявный метод Ньюмарка, см. пункт П7.3.1.1 Приложения 7) или „**24..Advanced Nonlinear Explicit**” (явный центрально-разностный алгоритм, **CDM**; см. пункт П7.3.1.2) – динамические контактные задачи (переходной, эволюционный анализ).

В случае назначения типов задач **22..**, **23..** и **24..** еще нужно настроить некоторые опции. Об этом – см. Раздел 6.4.

Поскольку зоны контакта могут быть определены с точностью расстояния между узлами контактной поверхности тела, то точность решения контактной задачи не может быть очень высокой. В полученном решении смещения в зоне контакта всегда рассчитываются точнее, чем контактные усилия. Поэтому значения (по умолчанию) точность для контактных усилий (поле „**Contact Force Tol**” – см. рис.6.16) в 0.05, т.е. в 5% является нормальным явлением. **Внимание:** чрезмерные требования относительно точности решения контактной задачи приведут к исчерпанию заданного на панели „**NXSTRAT Iteration and Convergence Parameters**” (см. рис.6.16) максимального количества итераций и к фатальной ошибке.

Если при создании „**Connection Property**” применялся метод „**1..Segment Method**” (см. рис.8.3 и рис.8.5), то:

- все тела модели должны иметь отдельные (свои) условия закрепления;
- нельзя назначать в поле „**Convergence**” (см. рис.6.16) такие методы оценки сходимости: „**0..Energy**” (энергия) и „**1..Energy and Force**” (энергия и сила).