

Раздел 3

СОЗДАНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ТЕЛА

Конечно-элементная модель тела может создаваться автоматически (на основе созданной геометрической модели) или в диалоговом режиме (без геометрической модели) или комбинацией этих вариантов. Еще ее можно получить из других источников. В этом случае нужно начать новый проект (**File**→**New**), дать команду **File**→**Import**→**Analysis Model...**, выбрать название программы, которая создала модель, указать (при необходимости) вариант версии формата, выбрать файл в файловой системе; или дать команду **File**→**Import**→**FEMAP Neutral...**, найти файл модели с расширением имени **.neu** или **.fno**.

Каждому конечному элементу при создании необходимо назначить некоторые свойства: тип КЭ, геометрические характеристики, порядок аппроксимации в КЭ, материал, из которого он создан и т.п. Последняя характеристика (материал) может выбираться из базы данных (заранее созданных), может иметь свойства, зависящие от некоторых параметров. Такие зависимости формулируются с помощью функций (см. Раздел 1.8).

3.1 Задание свойств материалов

Как уже указывалось во Вступлении, FEMAP не имеет конкретной системы измерений геометрических и физических величин. Поэтому при создании модели пользователю необходимо выбрать конкретную систему измерений, и строго ей придерживаться. В FEMAP есть диалог (вызывается командой **Tools**→**Convert Units...**) преобразования размерностей (см. рис.3.1), с помощью которого можно быстро получить масштабные коэффициенты преобразования *производных* величин: достаточно для *основной* величины (секция „**Base Factors**”) в поле „**Multiply**” ввести новое значение масштабного коэффициента (для длины, силы, времени, массы, температуры, энергии), а в поле „**Add**” – значение начала отсчета и дать команду „**Calculate**”. С помощью кнопки „**Invert**” можно мгновенно инвертировать назначение, а кнопки „**Load...**” – считать масштабные коэффициенты из одного из файлов, предоставленных фирмой – разработчиком FEMAP (имеют расширение имени **.cf**).

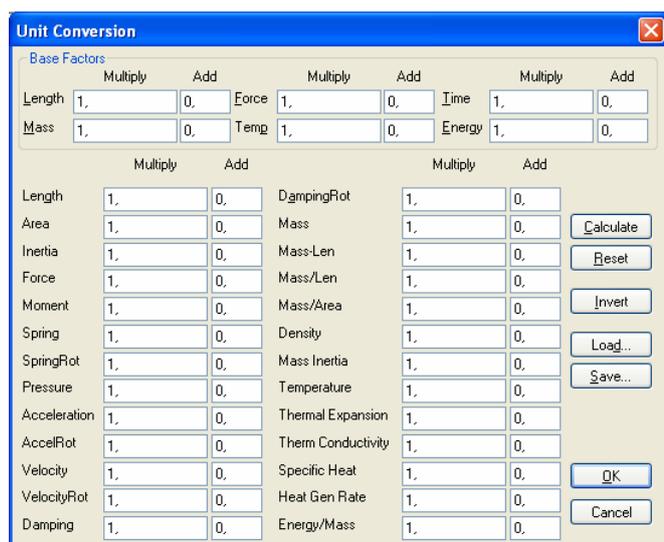


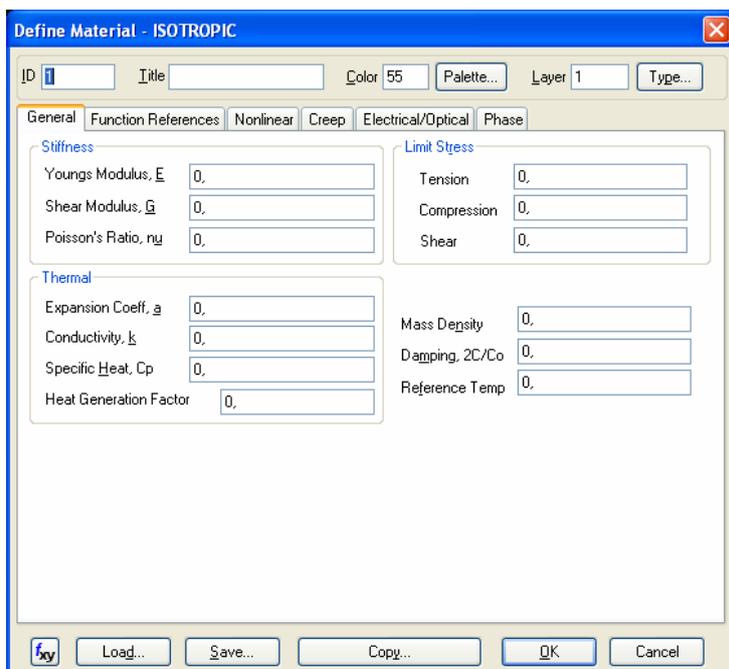
Рис.3.1. Диалоговая панель преобразования размерностей

Для введения в модель нового материала командой **Model**→**Material...** вызывается диалоговая панель „**Define Material – Isotropic**” (см. рис.3.2-а). Если материал имеет более сложные свойства, нужно кнопкой „**Type...**” вызвать диалоговую панель „**Material Type**” (см. рис.3.2-б) и сделать необходимое назначение (для „**Other Types**” есть много специальных вариантов, характерных для программ **LS-DYNA3D**, **ABAQUS**, **MARC** и др.). Диалоговая панель для введения свойств материала примет необходимый вид.

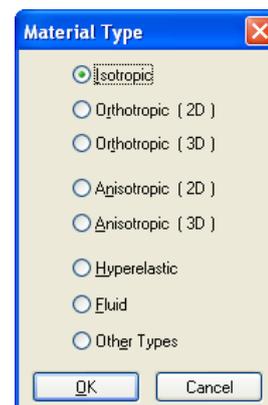
С помощью кнопки „**Load...**” можно вызвать список материалов, помещенных в базу данных, выбрать необходимый.

Для создания материала нужно:

- указать имя материала (**Title**), при необходимости можно установить для него другие **ID** и уровень (**Layer**);
- ввести в диалоговые окна необходимые для решения краевой задачи значения (остальные можно не вводить), причем строго соблюдать выбранную систему (см. табл.3.1);



а)



б)

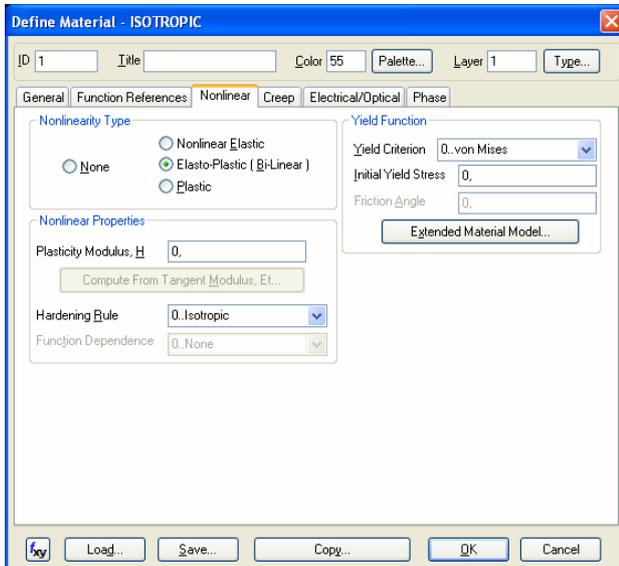
Рис.3.2. Диалоговые панели: а) – введения свойств изотропного материала; б) – назначения типа материала

• при наличии влияния температуры на свойстве материала – перейти на вкладку „Function References”, в диалоговых окнах тех параметров, что изменяются, выбрать необходимую функцию типа **2..vs.Temperature**. Функцию можно создать, не выходя из диалоговой панели, если инициировать кнопку на ней.

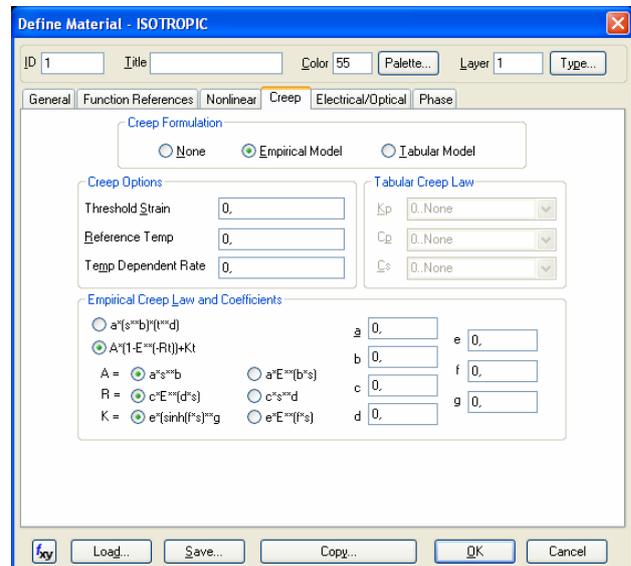
Таблица 3.1. Основные характеристики изотропного материала

№	Название (на панели)	Содержание	Единица измерения, система SI	Характерные значения*
<i>Секция Stiffness (упругость)</i>				
1	Young Modulus, E	Модуль Юнга	$Pa = N / m^2$	$(0.7-2.5) \cdot 10^{11}$
2	Shear Modulus, G	Модуль сдвига		$G = E / [2(1 + nu)]$
3	Poisson's Ratio, nu	Коэффициент Пуассона	–	0.23–0.42
<i>Секция Thermal (тепловые)</i>				
4	Expansion Coeff, a	Коэффициент линейного температурного удлинения	$1/^\circ$	$(0.5-2.5) \cdot 10^{-5}$
5	Conductivity, k	Коэффициент теплопроводности	$W / (m \cdot ^\circ K)$	85–400
6	Specific Heat, C_p	Удельная теплоемкость	$J / (kg \cdot ^\circ K)$	$(0.38-0.88) \cdot 10^3$
7	Heat generation factor	Коэффициент генерации тепла	–	–
<i>Секция Limit Stress (предельные напряжения, границы текучести)</i>				
8	Tension	При растяжении	Pa	$(60-1800) \cdot 10^6$
9	Compression	При сжатии	Pa	$(120-1800) \cdot 10^6$
10	Shear	При сдвиге	Pa	$(40-700) \cdot 10^6$
<i>Другие</i>				
11	Mass Density, ρ	Плотность материала	kg / m^3	$(2.7-9) \cdot 10^3$
12	Damping, $2C/C_0$	Коэффициент конструкционного демпфирования G	–	$(1-10) \cdot 10^{-3}$
13	Reference Temp	Температура испытания	$^\circ K (^\circ C + 273.15)$	>0
* – железо, титан, алюминий, медь и сплавы на их основе, стали, чугуны				

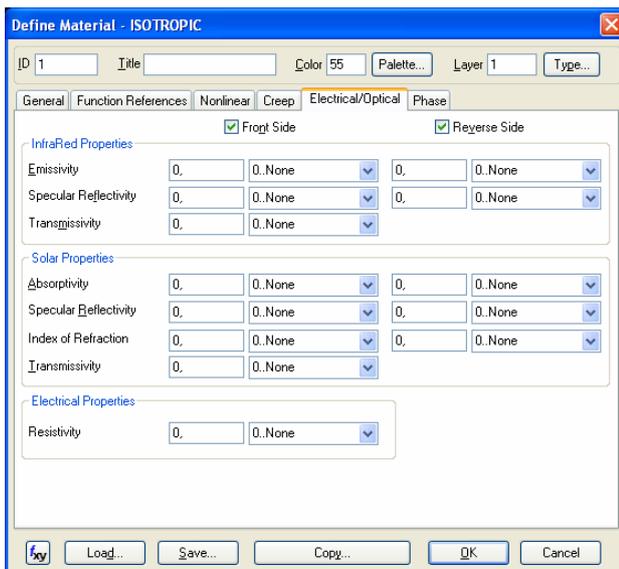
• чтобы для задачи о напряженно-деформированном состоянии учесть упругую нелинейность или пластичность – перейти на вкладку „**Nonlinear**” (см. рис.3.3-а), выбрать и задать свойства нелинейно-упругого или пластического материала. Кнопка „**Extended Material Model...**” предназначена для учета влияния температуры или скорости деформирования на границу текучести (подключением функции типа **2..vs.Temperature** или **9..vs. Strain Rate**);



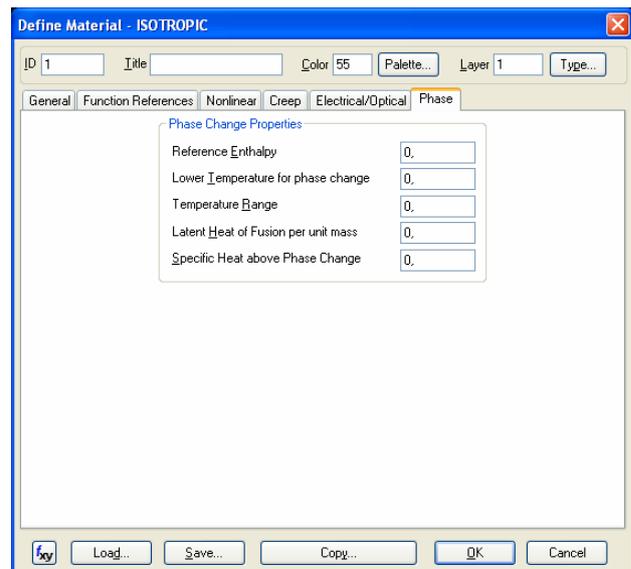
а)



б)



в)



г)

Рис.3.3. Диалоговые панели введения свойств материала: а) – упруго-нелинейного или пластического; б) – при ползучести; в) – электро-оптических; г) – при фазовых переходах

• чтобы для задачи о напряженно-деформированном состоянии учесть ползучесть материала – перейти на вкладку „**Creep**” (см. рис.3.3-б), выбрать и задать свойства материала при ползучести;

• на вкладке „**Electrical/Optical**” (см. рис.3.3-в) – ввести электро-оптические характеристики изотропных и ортотропных материалов (для моделирования теплопередачи в программах, подобный **TMG**).

• на вкладке „**Phase**” (см. рис.3.3-г) – ввести характеристики фазовых переходов (обычно – для задач теплопередачи и термического анализа в последних версиях Nastran и ABAQUS);

Внимание: если не задать необходимые для данного типа задачи данные, например, значение модуля Юнга и/или коэффициента Пуассона (линейно-упругой), границу текучести

„**Initial Yield Stress**” (пластичный материал), плотность материала (задачи нестационарной теплопроводности и динамические), то это вызовет фатальную ошибку при попытке решить соответствующую задачу.

Диаграмма деформирования для нелинейно-упругого материала (**Nonlinear Elastic**) задается функцией типа **4..vs. Stress**, где параметр **X** – это напряжение, а **Y** – деформации (выбирается из списка „**Function Dependence**”, см. рис.3.3-а) или **13..Stress vs. Strain** (**X** и **Y** – деформации и напряжения). Разгрузка проводится с применением этой же функции. Модуль линейного упрочнения (**Plasticity Modulus, H**) для упруго-пластического материала с кусочно-линейной аппроксимацией (**Elasto-Plastic, Bi-Linear**) вычисляется по формуле $H = E_T / (1 - E_T / E)$, где E – модуль Юнга, E_T – касательный модуль (из аппроксимации диаграммы растяжения образца), после введения значения E_T с помощью кнопки „**Compute From Tangent Modulus, Et...**”. Диаграмма деформирования для упруго-пластического материала общего вида (**Plastic**) задается функцией аналогично нелинейно-упругому материалу (выбирается из списка „**Function Dependence**”). Но разгрузка упруго-пластического материала моделируется линейно-упругой (используется модуль Юнга E). **Внимание:** эта функция должна иметь точку (0, 0); для разно сопротивляющегося растяжению-сжатию материала располагаться в 1-м и 3-м квадранте. Первый ее участок должен иметь тангенс угла наклона, равный модулю Юнга, т.е. $\sigma_2 / \varepsilon_2 = E$, причем $\sigma_2 = \sigma_s$, где σ_s – предел текучести.

Для критериев текучести (**Yield Criterion**) **2..Mohr-Coulomb** и **3..Drucker-Prager** (для материалов типа грунтов) нужно ввести значение „**2* Cohesion**” (удвоенное значение коэффициента сцепления) и „**Friction Angle**” (угол внутреннего трения).

Ползучесть материала описываются (см. рис.3.3-б) одним из трех вариантов:

- эмпирической формулой $\varepsilon^c(\sigma, t) = A(\sigma) \cdot \{1 - \exp[-R(\sigma) \cdot t]\} + K(\sigma) \cdot t$ (**Empirical Model**), где $A(\sigma) = a \cdot \sigma^b$ или $A(\sigma) = a \cdot \exp(b \cdot \sigma)$; $R(\sigma) = c \cdot \exp(d \cdot \sigma)$ или $R(\sigma) = c \cdot \sigma^d$; $K(\sigma) = e \cdot [sh(f \cdot \sigma)]^g$ или $K(\sigma) = e \cdot \exp(f \cdot \sigma)$; a, b, c, d, e, f, g – вводимые постоянные; σ – напряжение; t – время;

- эмпирической формулой (**Empirical Model**) $\varepsilon^c(\sigma, t) = a \cdot \sigma^b \cdot t^d$ (те же обозначения);

- табличной моделью (**Tabular Model**), где в окнах секции „**Tabular Creep Law**” для коэффициентов Kp , Cp (стадия первичной ползучести) и Cs (стадия вторичной ползучести) необходимо указать функции типа **4..vs.Stress**.

Для всех трех вариантов еще вводятся значения „**Threshold Strain**” (пороговое напряжение), „**Reference Temp**” (температура описания) и „**Temp Dependent Rate**” (скорость ползучести, зависящая от температуры).

В ортотропных материалах для трехмерных конечных элементов (**3D Orthotropic**) характерно наличие трех плоскостей и трех направлений упругой симметрии, причем $(nu)_{ij} / E_i = (nu)_{ji} / E_j$, где $i, j = 1, 2, 3$. Поэтому характеристики материала E, G, nu, a имеют по три значения, а k даже шесть (симметричная матрица 3×3). Для двумерных и осесимметричных конечных элементов (**2D Orthotropic**) направления главных осей обозначены как 1, 2, z , задаются два значения E , три – G , одно – nu , а предельными могут быть по два значения напряжений или деформаций при растяжении и сжатии. Количество коэффициентов a тоже равняется двум.

У анизотропных материалов – полный набор характеристик (**3D Anisotropic**) или несколько ограниченный (**2D Anisotropic**). Высокоэластичные материалы (резина, каучук, полимеры и т.п.) описываются другими уравнениями.

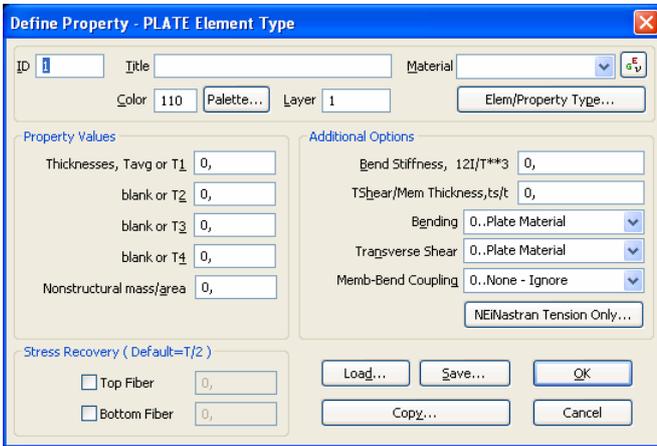
Дополнительная информация о характеристиках материалов изложена в Приложении 5.

3.2 Задание атрибутов „**Properties**” конечных элементов

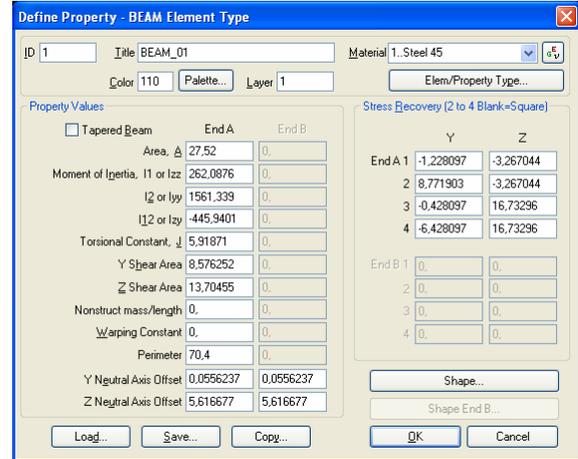
Атрибут, или свойство (**Properties**) – это объект (список) с выбранным конкретным типом КЭ и с назначенными его характеристиками, в частности: ID материала, очертанием и размерами сечения, другими. Атрибуты можно создавать непосредственно при создании ко-

нечно-элементной сетки (КЭС) тела. Но чтобы не делать это снова и снова (после отмены предыдущих действий командой **Undo**), целесообразно их создавать заранее и сохранять в библиотечном файле.

Командой **Model→Property...** вызывается диалоговая панель „**Define Property**” (см. рис.3.4), которая имеет вид, соответствующий типу КЭ (по умолчанию – для КЭ типа **PLATE**). Целесообразно сначала задать название этого „свойства” (**Title**), при необходимости изменить ее **ID**, выбрать из списка материал для КЭ или создать новый с помощью кнопки .



а)



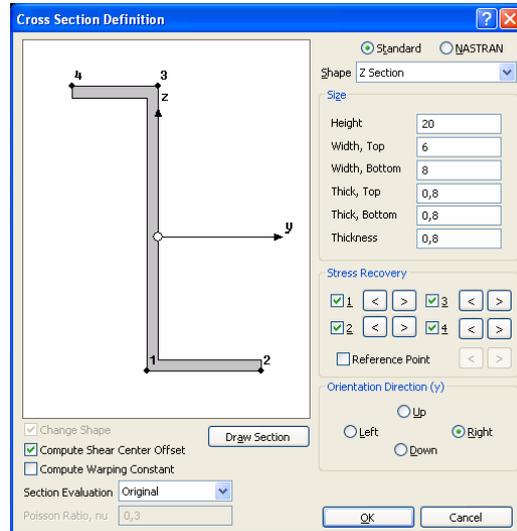
б)

Рис.3.4. Диалоговые панели „Define Property” для КЭ типа: а) – PLATE; б) – BEAM

Если нужен другой тип КЭ или другая ориентация материала в КЭ, кнопкой „**Elem/Property Type...**” вызывается соответствующая диалоговая панель (см. рис.3.5-а), где можно:



а)



б)

Рис.3.5. Диалоговые панели назначения:

а) – типа КЭ; б) – геометрических характеристик сечения одномерного КЭ

- выбрать тип КЭ (типы КЭ и их применение приведены в Приложении 3);
- установить опцию „**Parabolic Elements**”, чтобы назначить в КЭ *второй* порядок аппроксимации будущего решения задачи (*повысится точность*, но и время решения тоже);
- кнопкой „**Element Material Orientation**” вызвать одноименную панель и указать ориентацию свойств анизотропного материала или вектором, или как совпадающую с направлением оси координатной системы, или углом наклона;
- кнопкой „**Formulation**” вызвать панель с названием, соответствующим выбранному типу КЭ, указать дополнительные свойства КЭ (не для всех типов КЭ), если модель готовится для программ **Nastran**, **FEMAP Structural**, **DYNA**, **ABAQUS** или других.

После команды „ОК” диалоговая панель „Define Property” примет вид, соответствующий выбранному типу КЭ. Если это нужно для данного типа КЭ, на ней появятся несколько диалоговых окон для введения общих значений для КЭ, связанных с геометрическими или физическими характеристиками (см. рис.3.4).

В таблицу 3.2. в алфавитном порядке сведены параметры КЭ (возможно, не все), значения которых нужно вводить в диалоговые окна собственноручно.

Таблица 3.2. Основные параметры конечных элементов

Параметр	Пояснение	Типы КЭ
Allowable Tensile Stress	допустимое напряжение растяжения	Rod (для ANSYS)
Angle	угол	Laminate
Area, A	площадь поперечного сечения	Rod, Bar, Gap
Area Moment of Inertia	момент инерции плоскости	Rod (для ANSYS)
Bend Radius, r	радиус кривизны	Curved Tube
Bend Stiffness, BS	присоединенная изгибная жесткость ¹	Bending only, Plate
Bending	сгиб	Plate
BondShr Allow	допустимый относительный сдвиг слоев	Laminate
Bottom Surface	смещение нижней поверхности	Laminate
Coef. for Torsional Stress, C	коэффициент напряжений при кручении ²	Rod
Compression Stiffness	жесткость при сжатии	Gap
Damping	коэффициент вязкого демпфирования	Spring, DOF Spring
Effectiveness Factor, F	коэффициент приведенной площади сечения дополнительных ребер жесткости ³	Shear Panel
Failure Theory	теория (критерий) разрушения	Laminate
Fiber (Top, Bottom)	слой (вершины, основы): расстояние для вывода напряжений	Bending only, Plate, Plain Strain
Friction Coefficient	коэффициенты трения вдоль осей Y и Z	Gap
H	высота	Bar, Beam, Curved Beam
Initial Gap	начальный зазор	Gap
Initial Tension (Cable Only)	сила начального натяжения (гибкая нить)	Rod
Initial Slack	начальное послабление	Rod (для ANSYS)
Inner Diameter, Di	внутренний диаметр	Tube, Curved Tube
Max Penetration	максимальное проникновение	Gap
Max Adjustment Ratio	максимальный коэф. настраивания	Gap
Min Penetration Ratio	минимальный коэффициент проникновения	Gap
Memb-Bend Coupling	мембранно-сгибающее подкрепление	Plate
Nonsliding Frictional Stiffness	коэффициент жесткости для относительного смещения	Slide Line
Nonstructural mass/area, N.S.Mass/Area	неконструкционная масса на единицу площади	Почти все двумерные
Nonstructural mass/length	неконструкционная масса на единицу длины	Почти все одномерные
Outer Diameter, Do	наружный диаметр	Tube, Curved Tube
Penetration	проникновение	Slide Line
Perimeter	периметр	Rod, Bar, Beam, Curved Beam
Preload Force	предыдущая нагрузка	Gap
Radius	радиус	Bar, Beam, Curved Beam
RefTemp	начальная температура	Laminate
Slide Line Plane (Coord Sys XY)	координатная система для КЭ	Slide Line
Static Frictional Coefficient	статический коэффициент трения	Slide Line
Stiffness	жесткость ⁴	Spring, DOF Spring
Stiffness Scale Factor	коэффициент установления допустимого натяжения ⁵	Slide Line
Tension Stiffness	жесткость при растягивании	Gap
Thick (Top, Bottom)	толщина (вершины, основы)	Bar, Beam, Curved Beam

Thickness	толщина	Bar, Beam, Curved Beam, Shear, Axisymmetric Shell
Thickness, Tavg or T1	среднее значение толщины	Membrane, Bending only, Plain Strain
Torsion Constant, J	полярный момент инерции сечения	Rod
Transverse Shear	поперечный сдвиг	Plate
Transverse Stiffness	поперечная жесткость при закрытом зазоре	Gap
TShear/Mem Thickness	изгибная присоединенная жесткость ⁶	Plate
Width	ширина	Bar, Beam, Curved Beam, Gap
Width (Master, Slave)	ширина основной и подчиненной контактирующих поверхностей	Slide Line
Width Bottom	ширина основы	Bar, Beam, Curved Beam

¹ $BS = 12I/T^3$, где T – толщина КЭ; $I = I_p/t_p$; I_p – момент инерции сечения одного ребра жесткости; t_p – шаг ребер;
² $C = J/W_K$, где W_K – момент сопротивления сечения при кручении;
³ при $F \leq 1.01$ площадь сечений равна $0.5Ftb$, а при $F > 1.01$ она равна $0.5Ft^2$, где t – толщина КЭ, b – средняя величина ширины КЭ;
⁴ $C_N = \Delta x/N$ или $C_T = \Delta\varphi/T$, где Δx , $\Delta\varphi$ – изменения длины и угла кручения пружины; N , T – продольная сила и момент кручения соответственно;
⁵ коэффициент установления допускаемого натяжения ($0 \leq k_f \leq 1$), регулирует величину штрафа на взаимное проникание. Если $k_f = 0$ (по умолчанию), то допускается взаимное проникновение (натяжение) контактирующих поверхностей на величину около 1-2% от перемещений узлов этих поверхностей в направлении нормали к ним. При увеличении k_f допускаемое натяжение уменьшается;
⁶ $TS = t_s/t$, где t_s – толщина ребра изгибной присоединенной жесткости; t – средняя толщина конечного элемента.

Для описания сложных сечений одномерных КЭ типа **BAR, BEAM, CURVED BEAM** есть дополнительный инструмент, который вызывается кнопкой „**Shape...**” (см. рис.3.4-б). Появляется диалоговая панель „**Cross Section Definition**” (см. рис.3.5-б), на которой в окне „**Shape**” (Форма) нужно выбрать очертание сечения, которое сразу отображается в окне; задать характерные размеры сечения, изменить в секции „**Stress Recovery**” (исходные напряжения) нумерацию характерных точек и положение контрольной точки (**Reference Point**) для вывода (в таблицу результатов расчетов) значений напряжений (кнопками); установить ориентацию локальных осей сечения. Для КЭ типа **BEAM** можно применить модель тонкостенного стресса, если установить опции „**Compute Shear Center Offset**” (вычислить смещение от центра изгиба) и „**Compute Warping Constant**” (вычислить секторальный момент инерции). Этот тип КЭ еще может учитывать продольное изменение размеров сечения по линейному закону. Для этого нужно сначала для первого конца КЭ (**End A**) назначить форму и размеры сечения (они поместятся в диалоговые окна для начала КЭ, потом (см. рис.3.4-б) установить опцию „**Tapered Beam**” (суживающаяся балка), применить кнопку „**Shape End B...**” и сделать аналогичные назначения для второго конца КЭ (**End B**).

Все параметры, вычисляемые в FEMAP с помощью инструмента „**Shape...**” автоматически, не рассматриваем. Целесообразно в секции „**Stress Recovery**” обратить внимание на значения координат точек, в которых будут выведены значения напряжений.

Для КЭ типа **GAP** параметры секции „**Interface Element Option**” – для программы ABAQUS; КЭ типа **LINK** – для MSC/PAL и CDA/SPRINT I, поэтому их не рассматриваем.

В файле **rebeam.doc** (в папке **...FEMAPv102**) приведены данные о дополнительных библиотеках (файлы **reishape.esp**, **reangle.esp**, **retee.esp**, **rechan.esp**, **retube.esp** и **repipe.esp**) одномерных КЭ типа **BEAM, TUBE** и т.п. с конкретными вариантами сечений, что вырабатывает промышленность США, приведенными в пособии „**AISC Manual of Steel Construction**”

(тавры, двутавры, швеллеры, треугольники, трубы и т.п.). Их можно подключить из панели „Define Property ...” (см. рис.3.4-а): клавишей „Load...” вызвать панель „Select From Library”, на ней клавишей „Choose Library...” – стандартный диалог открытия файла. **Внимание:** в тексте есть предостережение, что это только справочные данные, что при их применении нужно внимательно сравнивать эти характеристики с реальными, поскольку возможны изменения в стандарте.

Для КЭ типа LAMINATE можно создать и применять структуру „Layup” (сэндвич, слоеный пирог) – набор из слоев материалов, имеющих или разные характеристики, или разную ориентацией осей анизотропии материала относительно КЭ. Для этого командой Model→Layup... или кнопкой  вызывается диалоговая панель „Layup Editor” (см. рис.3.6-а). На ней в поле „Material” выбирается (или с помощью кнопки  создается) материал слоя, в полях „Thickness” и „Angle” указываются соответственно толщина слоя и угол θ ориентации оси анизотропии материала относительно КЭ (см. рис.П3.2-а Приложения 3). Кнопкой „New Ply” эти данные переносятся в таблицу слоев (у выбранный в таблице слой). В поле „Global Ply ID (optional)” можно выбрать или с помощью кнопки  и диалоговых панелей „Global Ply Definition” и „New Global Ply” (см. рис.3.6-б, в) создать глобальный слой, который будет доступен для всех сэндвичей модели. **Внимание:** этот глобальный слой можно использовать в таблице лишь один раз (если их введено несколько, то будет учитываться лишь один на той позиции, на которую был введен последним). Для изменений значений в *таблице* нужно изменить значение в поле (над таблицей) и соответствующей кнопкой с началом названия „Update ...” – ввести эти значения в таблицу. Кнопка „Duplicate” дублирует один или несколько выбранных строк в таблице. Кнопка „Rotate” позволяет для всех выбранных в таблице слоев (с помощью клавиши „Ctrl”) одновременно изменить значение угла (путем алгебраического добавления значения на появившейся панели). Кнопки „Move Up”, „Move Down” и „Reverse” позволяют изменять порядок расположения слоев в таблице. Кнопка „Symmetry” создает в таблице симметричную копию выбранных слоев. Есть еще кнопки „Copy”, „Paste”, „Load...”, „Save...”, „Delete”, „OK” и „Cancel”, а также поля „ID” и „Title”, не нуждающиеся в пояснениях.

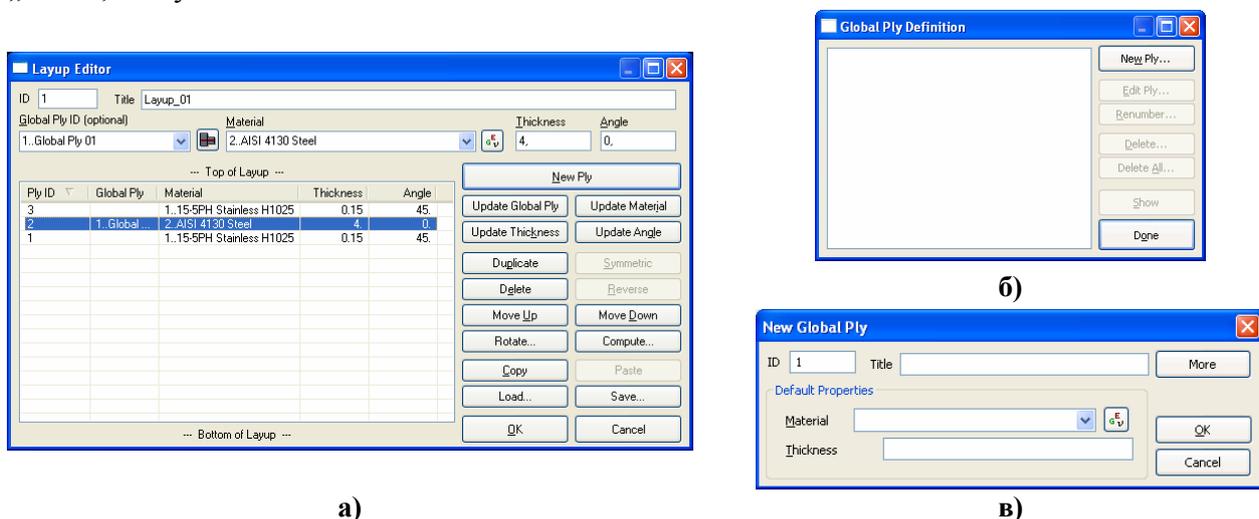


Рис.3.6. Диалоговые панели для создания: а) – сэндвича; б) – глобального слоя

Если инициировать кнопку „Compute”, то на информационную панель „Messages” будут выведены расчетные значения об *усредненных* характеристиках сэндвича: общую жесткость „Total Thickness”; ортотропные свойства в плоскости „In-Plane Properties (2-D orthotropic)”, а именно модули упругости (E_x , E_y , G_{xy}), коэффициенты Пуассона (ν_{xy} , ν_{yx}), коэффициенты теплового расширения (α_{px} , α_{py} , α_{paxy}), модули изгиба (E_{xb} , E_{yb} , G_{xyb}), коэффициенты Пуассона при изгибе (ν_{xyb} , ν_{yxb}), коэффициенты теплового расширения при изгибе (α_{pxb} , α_{pyb} , α_{paxyb}). Кроме того, выводятся шесть матриц: **A** (пространственной жесткости), **B** (жесткости связей), **D** (изгибной жесткости) и обращенные эти матрицы **A-Inv**, **B-Inv**, **D-Inv** (для опытных пользователей).

3.3 Создание конечно-элементной модели тела на основе геометрической модели

Это основной и быстрый метод создания конечно-элементной сетки (КЭС). Все команды, опции и параметры доступны через меню „Mesh” и мнемоническое меню „Mesh” (см. рис.1.5), а также значительная их часть – с помощью инструментальной панели „Meshing Toolbox” (см. рис.3.7), появившейся в 10-й версии FEMAP.

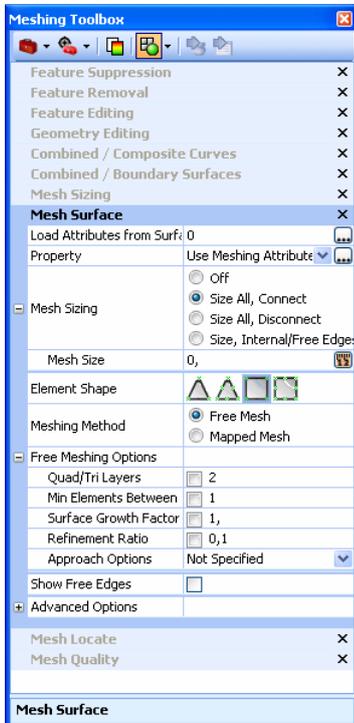
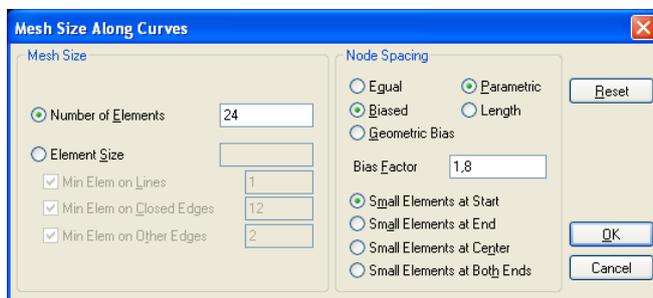


Рис.3.7. Панель Meshing Toolbox

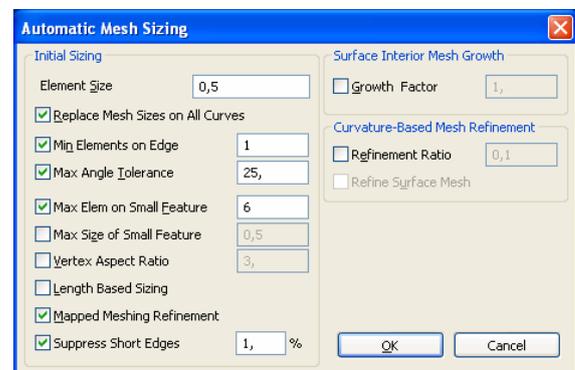
нужно некоторую неопределенность: результат не всегда совпадает с предварительными представлениями пользователя. Нужен опыт их применения.

Разметку в FEMAP можно проводить таким образом (одинаковое для всех команд начало Mesh→Mesh Control→ опускаем):

- **Size At Point...** (размер КЭ в окрестности точки *на границе поверхности*): выбираются точки, назначается размер КЭ. Для отмены назначений тоже выбираются точки, указывается *нулевой* размер;



а)



б)

Рис.3.8. Диалоговые панели разметки КЭ: а) – на кривых; б) – на поверхностях

- **Size Along Curve...** (размер КЭ на линии): выбираются линии, после чего появляется соответствующая диалоговая панель (см. рис.3.8-а). Обычно указывается количество КЭ (**Number of Element**) на линии; принцип назначения шагов точек разметки: равномерный (**Equal**), линейный (**Biased**) или логарифмический (**Geometric Bias**); тип координаты, кото-

рая будет использоваться вдоль линии (это важно для сплайновой кривой): параметрическая (**Parametric**) или длина (**Length**); коэффициент увеличения шага (**Bias Factor**); где располагать наименьший КЭ (**Small Elements at**): в начале (**Start**), на конце (**End**), посередине (**Center**) или на обоих концах (**Both Ends**) кривой. Если выбрано несколько кривых, на которых желательно иметь КЭ приблизительно одинакового размера, целесообразно задавать не количество КЭ, а среднее значение размера КЭ (**Element Size**), которое применяется для определения количества КЭ на каждой кривой отдельно. Тогда дополнительно еще можно указать минимальные количества КЭ (**Min Elem on ...**): вдоль линии (**Lines**), на замкнутых (**Closed Edges**) и других (**Other Edges**) кромках. **Внимание:** электронной кнопкой „Reset” можно „очистить” все выбранные кривые от ранее сделанных назначений;

- **Size on Surface...** (размер КЭ на поверхности): выбираются поверхности, после чего появляется соответствующая диалоговая панель „Automatic Mesh Sizing” (см. рис.3.8-б). На ней нужно указать максимальный размер КЭ (**Element Size**); минимальное количество элементов на ребре (**Min Elements on Edge**); максимальный допускаемый угол (**Max Angle Tolerance**, см. рис.3.9); максимальное количество (**Max Elem of Small Feature**) и размер (**Max Size of Small Feature**) КЭ в окрестности малых особенностей. Еще на ней можно установить опцию „Replace Mesh Sizes on All Curves” (заменить размеры сетки на всех кривых), т.е. отменить всю предыдущую разметку; а также опции „Length Based Sizing” (разметка, основанная на длине), „Mapped Meshing Refinement” (усовершенствованное отображение сетки) и „Suppress Short Edges” (подавить короткие края, с указанием процентов). Есть еще параметры: коэффициент уменьшения для вершины (**Vertex Aspect Ratio**); в секции „Surface Interior Mesh Growth” – коэффициент роста размеров КЭС по мере отдаления от границы поверхности (**Growth Factor**); в секции „Curvature-Based Mesh Refinement” включенная опция „Refinement Ratio” укажет на то, на кривых границах разметку КЭ необходимо провести соответственно указанному коэффициенту, который равен отношению $H/L < 1$ (см. рис.3.9), что позволяет построить качественную сетку на криволинейных границах; а опция „Refine Surface Mesh” – что после этого КЭС необходимо еще раз оптимизировать;

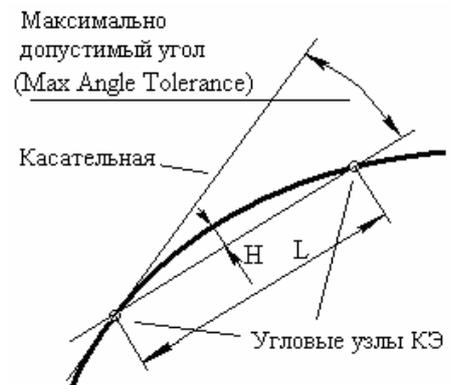


Рис.3.9. К заданию значения „Max Angle Tolerance”

- **Size on Solid...** (размер КЭ для „твёрдого” тела). Но соответствующая процедура вызывается и из панели „Automesh Solids” (кнопкой „Update Mesh Sizing...”), поэтому ее рассмотрим в Разделе 3.3.2.6;

- **Interactive...** (модификацией уже заданной на ребрах разметки): появляется диалоговая панель „Interactive Mesh Sizing”. На панели нужно радиокнопкой выбрать характер действия: прибавить (**Add**), удалить (**Subtract**) или задать (**Set To**) количество элементов, потом указать значения, лишь в последнюю очередь – ввести с клавиатуры **ID** линии или просто выбрать линию на рабочем поле и нажать левую кнопку „мыши”. Результат появится немедленно, диалоговая панель не исчезает. **Внимание:** панель имеет такую специфику: **ID** выбранной на рабочем поле кривой в соответствующем окне не появляется (практически это и не нужно).

Дополнительные возможности для проведения разметки:

- **Custom Size Along Curve...** (группами на линии): выбирается линия, после чего появляется соответствующая диалоговая панель (см. рис.3.10-а) для частичной разметки линии. Панель имеет уже знакомые элементы в секциях „Mesh Point Data” и „Spacing”, а также некоторые новые. В окне „Mesh Definition” помещается список групп, заголовки которых создаются автоматически и содержат информацию о значении локальной координаты начала группы разметки (**At**), количество КЭ (**Elem**) и коэффициент увеличения шага (**Bias**). Всегда есть „финальная” группа, которая „закрывает” разметку и которую нельзя удалить. Локальная

координата может иметь значения от 0 до 1. Ее можно вводить из клавиатуры или визуально с помощью кнопки „**Locate...**”. Когда значения для группы выбраны, необходимо нажать на кнопку „**Add/Edit**”. Кнопка „**Move...**” позволяет визуально редактировать локальную координату прежде введенной группы. Кнопки под окном „**Mesh Definition**” позволяют проводить изменения назначений для *всей* выбранной линии, причем на основе введенных групп. Это команды:

- ♦ **Equal** (равными отрезками): появляется диалог для введения количества групп (от 2 до 160), каждая из которых будет иметь один КЭ;
- ♦ **Fill** (заполнение): все группы будут размечены на отрезки (КЭ) указанного размера;
- ♦ **Expand** (разделение): все группы делятся на группы с одним КЭ, т.е. количество групп будет равно количеству КЭ;
- ♦ **Match** (соответствия): выбирается другая линия, с которой разметка переносится на активную, модифицируя введенные группы;
- ♦ **Match Mesh** (соответствия к сетке): выбирается уже существующие узлы на любой линии, разметка расположения этих узлов переносится на активную, модифицируя введенные группы;

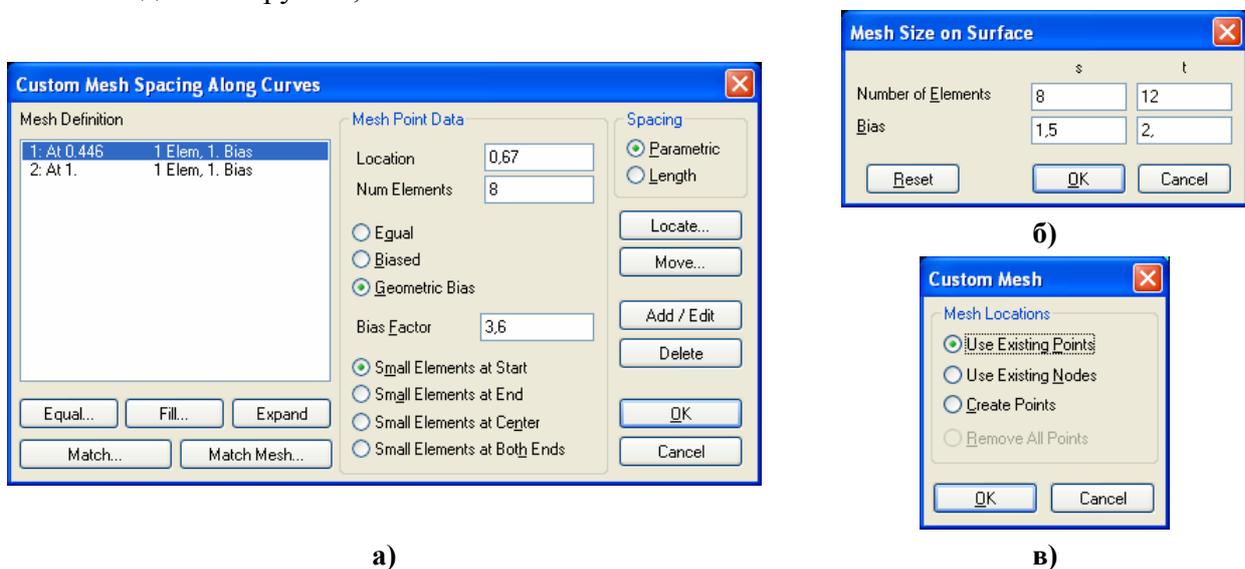


Рис.3.10. Диалоговые панели разметки КЭ: а) – на кривых; б) – на поверхностях; в) – с учетом точек и узлов

- **Mapped Divisions on Surface...** (деление параметрическим образом на ребрах поверхности (с тремя или четырьмя ребрами) „твердого” тела): выбирается поверхность (не конструкционная, см. Раздел 2.2.4), на диалоговой панели „**Mesh Size on Surface**” (см. рис.3.10-б) указывается количество КЭ по направлениям двух параметров: s (направление указано стрелкой) и t , а также значение коэффициентов *увеличения* шага от *начала* координат (**Bias**). **Внимание:** для поверхности с тремя ребрами локальные координаты на них s , t и s , т.е. первое и третье ребра будут размечены одинаково;

- **Mesh Point on Surface...** (с учетом точек на поверхности): выбирается поверхность „*твердого*” тела, на которой во всех точках (с границами включительно) будут обязательно созданы узлы КЭС. Потом появляется дополнительная диалоговая панель „**Custom Mesh**” (см. рис.3.10-в). На нее необходимо выбрать один из вариантов: „**Use Existing Points**” (использовать существующие точки), „**Use Existing Nodes**” (использовать существующие узлы), „**Create Points**” (создать точки) или „**Remove All Points**” (удалить все точки).

3.3.1.2 Назначение атрибутов конечно-элементной сетки геометрическим объектам

Назначение геометрическим объектам атрибутов может ускорить создание КЭС или улучшить ее качество. Эту процедуру можно проводить (одинаковое для всех команд начало **Mesh**→**Mesh Control**→ опускаем):

- **Attributes At Point...** (для точек): сначала выбираются точки, потом со списка ранее введенных „свойств” КЭ (**Property**) – вариант, который может быть приписан точке. В Nastran это может быть лишь КЭ с массой (**Mass, Mass Matrix**);

- **Attributes Along Curve...** (вдоль линий для одномерных КЭ): сначала выбираются линии, потом на появившейся диалоговой панели „**Curve Mesh Attributes**” (см. рис.3.11-а) выбирается „**Property**” или создается новое „свойство” (кнопка ); в секции „**Orient Using**” выбирается способ, которым будет указываться ориентация оси **Y** сечения одномерного КЭ („**Vector**” – вектором или „**Location**” – точкой); в секции „**Offsets**” – способ задания отступления (смещения) оси КЭ от выбранных линий: „**Vector**”, „**Location**” или „**Radial**”; кнопками „**End A Offset**”, „**End B Offset**” или „**End B = End A**” – их величины („**No Offset**” – отсутствие). Кнопка „**Use Reference Point**” устанавливает способ задания отступления (смещения) оси КЭ от выбранных линий в „**Location**” и нулевое отсутствие смещений. Кнопкой „**Released...**” (подвижность) вызывается панель для отключения на концах „**End A**” и/или „**End B**” соответствия (связи) для отдельных степеней свободы (см. рис.3.11-б): **TX, TY, TZ** (устанавливаются разрывы), **RX, RY** и/или **RZ** (устанавливаются шарниры). Опцией „**Reverse Element Direction**” меняется направление внутренней координатной системы в КЭ;



а)



б)

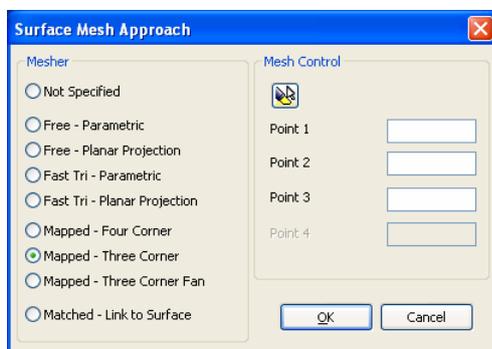
Рис.3.11. Диалоговые панели назначения геометрическим объектам атрибутов для линий

- **Attributes On Surface...** (на поверхности для двумерных КЭ). Но соответствующая панель „**Automesh Surface**” вызывается и из одноименной панели кнопкой „**More Options...**”, поэтому ее рассмотрим в Разделе 3.3.2.4;

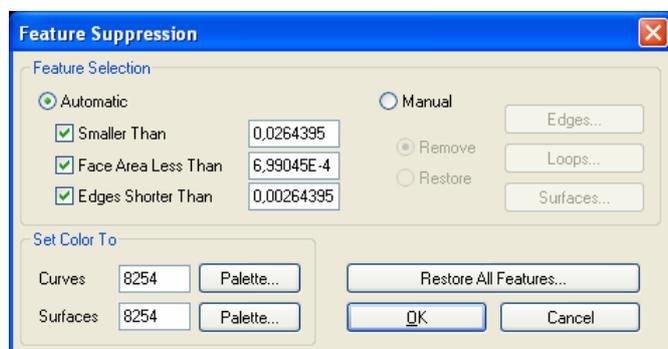
- **Attributes On Volume...** (для объемов) или **Attributes On Solid...** (для „твердых” тел): выбираются объекты, для них выбирается из списка заранее созданное „**Property**” или создается новое „свойство” (кнопка ).

3.3.1.3 Упорядочивание будущей конечно-элементной сетки на поверхности

Командой **Mesh**→**Mesh Control**→**Approach On Surface...** вызываются инструменты для упорядочивания КЭС на поверхности: выбирается поверхность, на диалоговой панели „**Surface Mesh Approach**” (см. рис.3.12-а) назначается один из вариантов:



а)



б)

Рис.3.12. Диалоговые панели:

а) – приведения в порядок КЭС на поверхности; б) – исключения особенностей КЭС

- „**Not Specified**” (нет упорядочивания) – используется по умолчанию;
- „**Free – Parametric**” – параметрическое упорядочивание;

- „Free – Planar Projection” – свободного типа, но на основе проекции КЭС с плоскости, которая потом будет выбрана. Для поверхностей с малой кривизной может давать лучшие результаты, чем предыдущий вариант;
- „Fast Tri – Parametric” – параметрическое упорядочивание, когда используется быстрый алгоритм под названием **FEMAP Fast Triangle Mesher** (см. Раздел 1.5, **Database...**);
- „Fast Tri – Planar Projection” – свободного типа, но на основе проекции КЭС с плоскости, которая потом будет выбрана (см. предыдущее объяснение). Для поверхностей с малой кривизной может давать лучшие результаты, чем предыдущий вариант;
- „Mapped – Four Corner” и „Mapped – Three Corner” – отраженного типа (имеет ось симметрии), используя информацию про 4 или 3 назначенных угла поверхности (**Point 1 ...**);
- „Mapped – Three Corner Fan” – подобно предыдущей, но веерного типа;
- „Matched – Link to Surface” – КЭС создается подобной КЭС на поверхности, что будет дополнительно указана (**Master Surface**). **Внимание:** эти поверхности не должны где-то спрягаться. Также это нельзя делать на поверхности с **Multi-surface boundaries**.

Кнопка  позволяет увидеть выбранные объекты на рабочем поле.

3.3.1.4 Исключение несущественных особенностей в „твердых” телах

Команда **Mesh→Mesh Control→Feature Suppression...** предназначенная для нахождения несущественных особенностей в „твердых” телах, для которых КЭС создаваться не будет. Она вызывает одноименную диалоговую панель (см. рис.3.12-б), где можно выбрать соответствующие опции: „**Smaller Than**” (меньше чем ... – для замкнутых кривых), „**Face Area Less Than**” (площадь грани меньше чем ...) и/или „**Edges Shorter Than**” (кромки, менее короткие, чем ...) и указать их максимальные размеры. Эти особенности будут выделяться цветами, которые назначены в секции „**Set Color To**”. Если вместо „**Automatic**” выбрать „**Manual**”, то можно исключить (**Remove**) или восстановить (**Restore**) указанные с помощью кнопок объекты: „**Edges...**” (кромки), „**Loops...**” (замкнутые кривые) или „**Surfaces...**” (поверхности). Также можно кнопкой „**Restore All Features...**” отменить все исключения.

3.3.2 Создание конечно-элементной сетки тела или конструкции на основе геометрической модели

Проводится командами **Mesh→Geometry→...**

Внимание: неудачное окончание создания КЭС сопровождается соответствующим сообщением на панели „**Messages**” (выделяется красным цветом). Но довольно часто „в наследство” остается поверхностная КЭС из элементов типа **PLOT ONLY**, которая на экране выглядит как хорошая сетка. Поэтому целесообразно просмотреть свойства полученной КЭС, например, с помощью команды „**List→Model→Element...**” или с использованием панели „**Entity Info**” и мнемонического меню „**Select**” (см. Раздел 1.3).

Довольно часто возникает необходимость удалить полностью или частично конечно-элементную сетку. Если это невозможно сделать командой отмены последнего действия (**Undo**), то применяются инструменты меню „**Delete**”. Сначала выбираются все или часть КЭ (команда **Delete→Model→Element...**, кнопка „**Select All**” или указываются КЭ, которые нужно удалить, дважды – команда „**OK**”), потом удаляются все узлы (команда **Delete→Model→Node...**, кнопка „**Select All**”, подтвердить удаление). После обновления изображения экрана (**Ctrl+D**) или регенерации модели (**Ctrl+G**) тело уже не имеет лишних ни КЭ, ни узлов.

3.3.2.1 Задание параметров узлов и конечных элементов

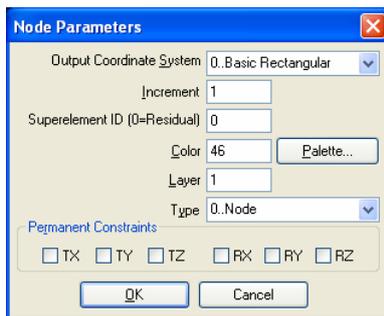
Это общие действия на этапе создания КЭС. На диалоговой панели „**Node Parameters**” (см. рис.3.13-а), которая вызывается кнопкой „**Node Param...**” диалоговых панелей создания КЭС (см. рис.3.13-б, рис.3.14-а,б, рис.3.16-а,в) можно:

- исключить некоторые степени свободы *всех* узлов КЭС, что будут создаваться: в секции „**Permanent Constraint**” (предварительное закрепление) установить соответствующие опции для **TX**, **TY**, **TZ** (перемещений в направлении указанных осей), **RX**, **RY**, **RZ** (вращений вокруг указанных осей) в выбранной координатной системе (**Output Coordinate Sys-**

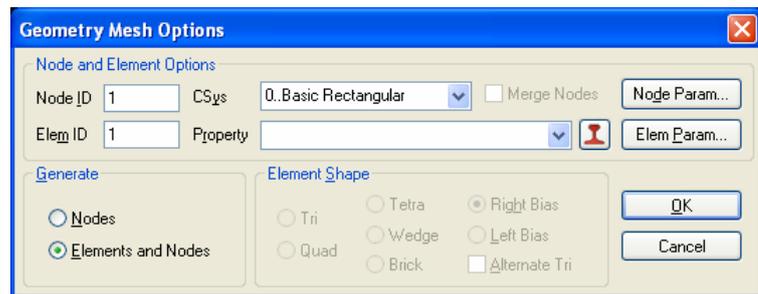
tem). **Внимание:** трехмерные и осесимметричные КЭ не имеют степеней свободы **RX**, **RY**, **RZ** (вращений), хотя в диалоге они присутствуют. Эти степени свободы желательно исключить, чтобы значительно уменьшить размер файла *.f06, который будет создаваться программой Nastran при решении краевой задачи;

- изменить шаг нумерации узлов (**Increment**), цвет изображения, **ID** уровня и/или суперэлемента (в которые будут помещены созданные узлы);
- уточнить (изменить) тип объекта (нужно лишь в некоторых случаях), что будет создаваться (диалоговое окно „**Type**“): узлы (**0..Node**), скалярная (**1..Scalar Point**) или дополнительная точка (**2..Extra Point**).

На диалоговой панели „**Element Parameters**“, вызываемой кнопкой „**Elem Param...**“ диалоговых панелей создания КЭС (см. рис.3.13-б, рис.3.14-а,б, рис.3.16-а,в) можно изменить шаг нумерации КЭ (**Increment**), цвет изображения КЭ, **ID** уровня (в который будут помещены созданные КЭ).



а)



б)

Рис.3.13. Диалоговые панели задания параметров:
а) – узлов; б) – создания КЭС в точках или на линиях

3.3.2.2 Создание конечных элементов в точках

Дается команда „**Mesh→Geometry→Point...**“, выбираются точки, появляется диалоговая панель „**Geometry Mesh Options**“ (см. рис.3.13-б). На ней можно:

- изменить координатную систему (**CSys**), начальный номер узлов и/или элементов, если это нужно (**Node ID**, **Elem ID**);
- выбрать (**Property**) или создать (кнопка , см. Раздел 3.2) „свойство“ КЭ.

В Nastran есть лишь два типа КЭ, содержащих только один узел: **MASS** и **MASS MATRIX** (см. Приложение 3). Полученный результат – КЭ в виде одного узла.

3.3.2.3 Создание конечно-элементной сетки на линиях

Дается команда „**Mesh→Geometry→Curve...**“, выбираются линии, появляется диалоговая панель „**Geometry Mesh Options**“ (см. рис.3.13-б). Она рассмотрена в Разделе 3.3.2.2.

В Nastran есть несколько типов одномерных КЭ: **ROD**, **TUBE**, **CURVED TUBE**, **BAR**, **BEAM**, **LINK**, **CURVED BEAM**, **SPRING**, **DOF SPRING**, **GAP** и **PLOT ONLY** (см. Приложение 3). Но есть еще один тип КЭ: двумерный **AXISYMMETRIC SHELL**, который создается на линиях, *не пересекающих ось вращения Z*.

При создании КЭС будут учтены назначения относительно КЭС, сделанные заранее (см. Раздел 3.3.1). Результат – КЭС в виде (на экране) линий и узлов на них. Отрезок линии между узлами – одномерный КЭ, имеющий указанные в „**Property**“ очертание, размеры и ориентацию сечения, созданный из выбранного материала. Реальные очертание и ориентацию КЭ можно увидеть в режиме „**Solid**“, если вызвать командой **View→Options...** (или клавишей **F6**) панель „**View Options**“ и установить на ней для „**Element – Orientation/Shape**“ значение „**2..Show Inertia Ratio**“, а также установить опцию „**Show Orientation**“.

3.3.2.4 Создание двумерной и осесимметричной конечно-элементной сетки

Двумерной моделью обычно представляют тонкостенные тела в виде пластин и оболочек, а осесимметричную – осесимметричные тела, в частности и толстостенные оболочки (трубы), когда по их толщине „укладывают“ несколько слоев КЭ.

Дается команда „**Mesh**→**Geometry**→**Surface...**”, выбираются поверхности, появляется диалоговая панель „**Automesh Surfaces**” (см. рис.3.14-а или рис.3.14-б). На ней можно:

- изменить координатную систему (для осесимметричных КЭ – выбрать цилиндрическую);
- изменить начальный номер узлов и/или элементов (**Node ID**, **Elem ID**);
- выбрать (**Property**) или создать (кнопка , см. Раздел 3.2) „свойство” КЭ. **Внимание:** в Nasran есть несколько типов двумерных КЭ: **SHEAR PANEL**, **MEMBRANE**, **BENDING ONLY**, **PLATE**, **LAMINATE**, **PLANE STRAIN** и **PLOT ONLY**, и лишь один тип осесимметричных КЭ: **AXISYMMETRIC** (см. Приложение 3). Есть еще один тип двумерного КЭ – **AXISYMMETRIC SHELL**, но он создается на линиях (см. Раздел 3.3.2.3).

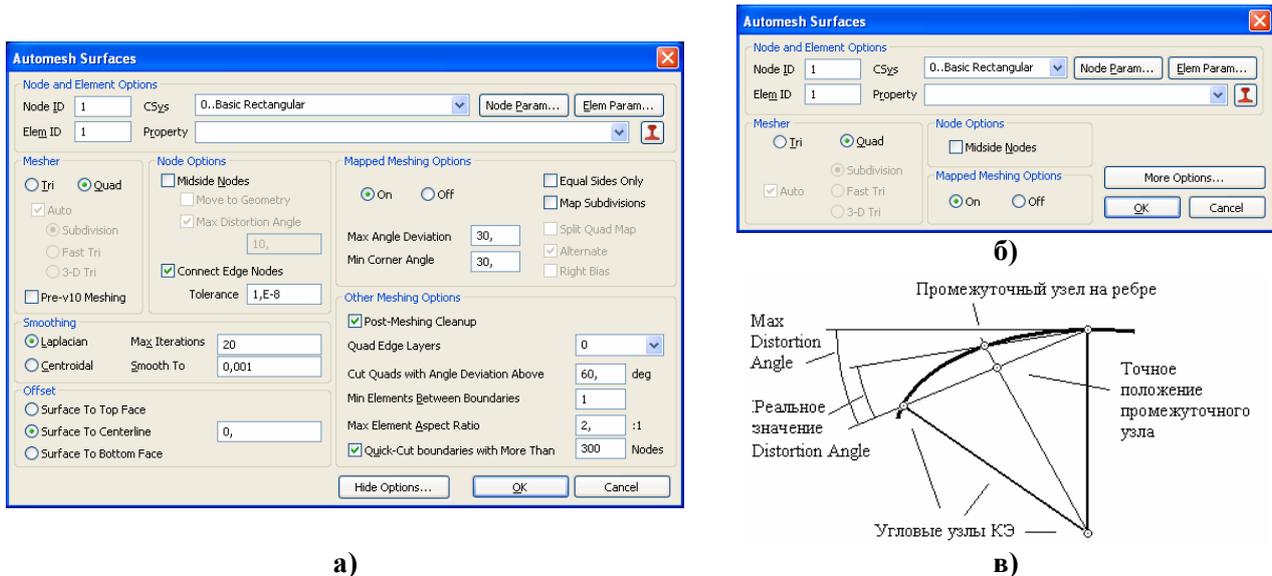


Рис.3.14. Диалоговые панели задания параметров создания КЭС на поверхностях (а – расширенный, б – укороченный варианты); в – заданию значения „Max Distortion Angle” (в)

При создании КЭС будут учтены назначения относительно КЭС, сделанные заранее для точек и линий (см. Раздел 3.3.1). Однако на панели в секциях можно установить дополнительные параметры, которые будут иметь приоритет, если возникнут противоречия (все опции содержит расширенный вариант панели, см. рис.3.14-а):

- в секции „**Mesher**” (построитель сетки) можно выбрать „**Tri**” (все – треугольные) или „**Quads**”, т.е. предпочтительно четырехугольные КЭ, причем углы могут различаться на указанную в поле „**Cut Quads with Angle Deviation Above**” величину. Отключение опции „**Auto**” в режиме „**Subdivision**” позволяет управлять минимальным количеством КЭ между границами (**Min Element Between Boundaries**), допустимым соотношением между длинами сторон КЭ (**Max Element Aspect Ratio**): желательно не больше 10:1, допустимо <100:1, а также установить опцию быстрой разбивки границы при превышении указанного числа узлов на ней (**Quick-Cut boundaries with More Than ... Nodes**): иногда это улучшает созданную КЭС. Есть еще возможность применить быстрый построитель треугольной сетки (**Fast Tri**), а также треугольной сетки с максимальным учетом неплоскостности поверхностей (**3-D Tri**). В случае выбора опции „**Pre-v10 Meshing**” (построитель Femap 10-й версии) многие параметры станут недоступными, т.е. будут выбираться в автоматическом режиме;

- в секции „**Node Options**” (опции узлов) в случае, когда КЭ имеют промежуточные узлы, для более точного описания нелинейных границ тела желательно активизировать опции „**Midside Nodes**”, „**Move on Geometry**” (поместить промежуточные узлы на границах) и „**Max Distortion Angle**” (максимальный угол отклонения), указать (редактировать) его значение. Чем больше кривизна границы, тем больше значение этого угла (см. рис.3.14-в). **Внимание:** увеличение этого значения может увеличить погрешности будущих расчетов. Еще есть опция требуемой точности (**Tolerance**) расположения узлов на ребрах (**Connect Edge Nodes**);

- в секции „**Smoothing**” (сглаживание сетки) указывается алгоритм сглаживания сетки, когда узлы центрируются относительно соседних: узлов (**Laplacian**) или центров КЭ (**Centroidal**). Итерации проводятся, пока смещения узлов превышают значение „**Smooth To**”, но количество итераций ограничено величиной „**Max Iteration**”;

- в секции „**Offset**” (отступ КЭ от поверхности) можно выбрать один из вариантов: по отношению к верхней поверхности (**Top Face**), нижней поверхности (**Bottom Face**) или центральной линии (**Centerline**);

- в секции „**Mapped Meshing Options**” (опции создания сетки) во включенном состоянии можно установить максимально допустимое изменение углов (**Max Angle Deviation**) и минимально допустимое значение углов в КЭ (**Min Corner Angle**), а также подключить опции: попытки создания сетки с равным количеством КЭ на границах (**Split Quad Map**), с чередующимся (**Alternate**) или противоположным (**Right Bias**) направлением треугольных КЭ в создаваемых рядах КЭ;

- в секции „**Other**” (другие), кроме уже описанных выше опций, есть еще две опции: очистить сетку от вспомогательных элементов (**Post Meshing Cleanup**) и создать вокруг отверстия указанное (0 ... 3) количество слоев квадратичных элементов (**Quad Edge Layers**).

Результат – КЭС в виде четырехугольных или треугольных (или смешанная) двумерных (или осесимметричных) КЭ и узлов на их ребрах. КЭ имеют указанные в „**Property**” свойства, в частности созданы из указанного материала, имеют первый или второй порядок аппроксимации.

Внимание: при создании осесимметричной сетки необходимо учитывать, что ось вращения **Z** не должна пересекать контур КЭС, что не все варианты КЭ поддерживаются в различных типах краевых задач в Nastran (треугольные 2-го порядка – во всех). Круговые ребра вырождены в точки, а поверхности – в линии, поэтому потом силовые нагрузки нужно прикладывать к этим объектам как к исходным, т.е. учитывать их реальные длины и площади.

3.3.2.5 Создание двумерной конечно-элементной сетки на основе срединных поверхностей

Довольно часто „твердое” тело как бы составлено из нескольких тонких элементов с постоянной или кусочно-линейной толщиной. Такие тела тоже можно аппроксимировать двумерными КЭ на основе *срединных поверхностей* (СП). Хотя эти операции помещены в меню „**Geometry**”, все же СП целесообразно создавать именно при построении КЭС. **Внимание:** новые СП не всегда помещаются в уровень (**Layer**), которому принадлежат базовые для СП поверхности.

СП создаются командами (общую часть **Geometry**→**Midsurface**→ опускаем):

- **Single in Solid...** (единичная в теле): поочередно выбираются две поверхности, между которыми появляется СП, которая не выходит за границы тела;

- **Single...** (единичная): аналогично предыдущей, только СП прямоугольной формы и больше тела (иногда это нужно из соображений удобства);

- **Trim To Solid...** (можно обрезать излишки СП): последовательно выбрать СП, излишки которой удаляются, и соответствующее „твердое” тело. Излишками считаются меньшие части СП, что лежат в одной плоскости. Если излишки с экрана не исчезли, дать команду „**Ctrl+G**” или **Geometry**→**Midsurface**→**Cleanup...**;

- командой **Trim with Curve...** (разрезать линией) можно разрезать СП линиями, которые имеются на СП, причем линии автоматически удлиняются к границам СП. Такими линиями могут быть линии пересечения между СП (об их создании см. Раздел 2.2.3.4);

- **Extend...** (расширение): выбирается одно из ребер СП, на появившейся панели (см. рис.3.15) в секции „**Extend Shape**” (форма расширения) выбрать „**Linear**” (линейная) или „**Continuous Curvature**” (продолжение ис-

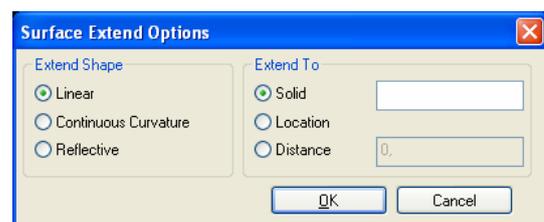


Рис.3.15. Диалоговая панель расширения СП

кривления) или „**Reflective**” (отражение), в секции „**Extend To**” (расширить до) выбрать „**Solid**” („твердое” тело) или „**Location**” (будет указываться точка) или „**Distance**” (на дистанцию) и указать эту дистанцию;

- **Automatic...**: сначала выбираются несколько поверхностей, потом задается максимальное допустимое расстояние между поверхностями, между которыми могут быть созданы СП. Появляются СП, на которых автоматически создаются линии их пересечений, а их излишки – удаляются автоматически;

- тремя отдельными командами, фактически заменяющими одну предыдущую: **Generate...** – создают СП, **Intersect...** – создают линии их пересечений, **Cleanup...** – удаляют излишки;

- **Offset Tangent Surfaces** (только для постоянной толщины): сначала выбирается базовая поверхность, затем запрашивается величина допуска, затем – величина отступа (вглубь от базовой поверхности). Если операция возможна, то запрашивается разрешение на удаление основного тела (можно и не разрешать).

Удаленные излишки помещаются в уровень „**Mid-Surfaces to Delete**”, из которого, при необходимости, можно частично вернуть СП, и который можно удалить.

Создание КЭС на СП – как в Разделе 3.3.2.4. Но если СП создано для части тела с постоянной толщиной, то командой **Assign Mesh Attributes...** можно назначить атрибуты КЭС для такой СП (фактически – только материал, поскольку при этом автоматически определяется тип КЭ – **PLATE**, и его толщина). Чтобы при этом получить КЭ 2-го порядка аппроксимации, необходимо на панели „**Automesh Surfaces**” (см. рис.3.14-а,б) в секции „**Node Options**” установить опцию „**Midside Nodes**”.

3.3.2.6 Создание трехмерной конечно-элементной сетки для „твердого” тела

В Nastran есть только один тип трехмерных КЭ – **SOLID** и несколько его модификаций. По форме он может быть (см. Приложение 3, рис.П3.6) *гексагональным* (8 углов и 6 поверхностей, **HEXA**) и (как вырожденные случаи гексагонального) *пятигранной призмой* (6 углов и 5 поверхностей, **PENTA**) и *тетрагональным* (4 угла и 4 поверхности, **TETRA**); без промежуточных (1-го порядка аппроксимации) и с промежуточными узлами на ребрах (параболический, или 2-го порядка аппроксимации).

Для создания *тетрагональной* трехмерной КЭС на основе „твердых” тел есть команда **Mesh→Geometry→Solids...** Выбираются „твердые” тела. Если модель еще не имеет введенного материала, появляется диалоговая панель для его создания (см. рис.3.2-а). После создания материала появляется диалоговая панель „**Automesh Solids**” (см. рис.3.16-а), причем, если к этому моменту не было создано „**Property**” для „твердого” тела (КЭ типа **Solid**), то оно создается автоматически, с КЭ 1-го порядка аппроксимации. Для изменения порядка аппроксимации достаточно будет на панели „**Automesh Solids**” установить опцию „**Midside Nodes**”.

Если необходимое „**Property**” было создано раньше, диалоговая панель „**Automesh Solids**” (см. рис.3.16-а) появляется сразу.

На панели „**Automesh Solids**” можно:

- изменить начальный номер узлов и/или элементов, если это нужно (**Node ID**, **Elem ID**); изменить координатную систему;

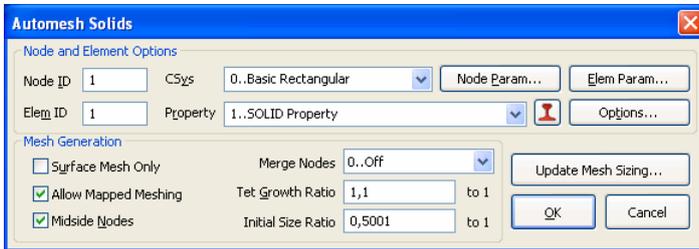
- выбрать (**Property**) или создать (кнопка , см. Раздел 3.2) „свойство” КЭ;

- установить опцию „**Midside Nodes**”, т.е. создавать (или применять) *промежуточные* узлы КЭ для аппроксимации геометрии тела (квадратичных функций формы КЭ). **Внимание:** КЭС с промежуточными узлами позволяет почти точно аппроксимировать криволинейные поверхности, обеспечивает более точное решение задачи, но приводит к значительному увеличению нужной дисковой и оперативной памяти и времени решения задачи;

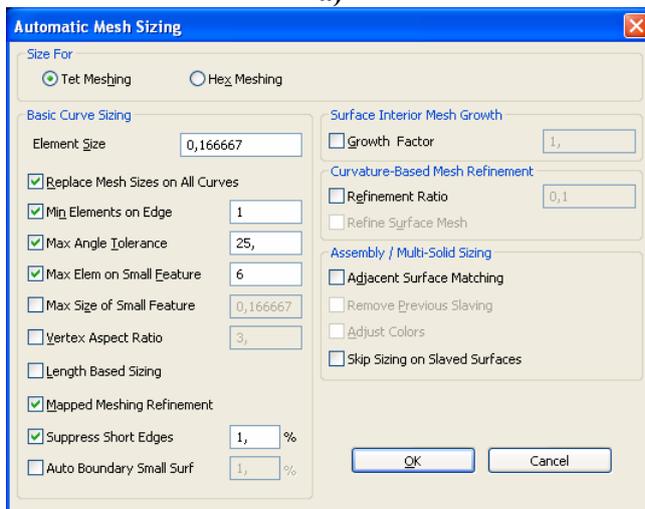
- установить опцию „**Surface Mesh Only**”, т.е. создать сетку только на поверхности тела (типа **PLOT ONLY**). После этого сетку можно отредактировать (см. Раздел 3.4) и на ее основе командой **Mesh→Geometry→Solids from Elements...** создать трехмерную КЭС);

- установить опцию „**Allow Mapped Meshing**”, т.е. пытаться создать сетку КЭ регулярно;

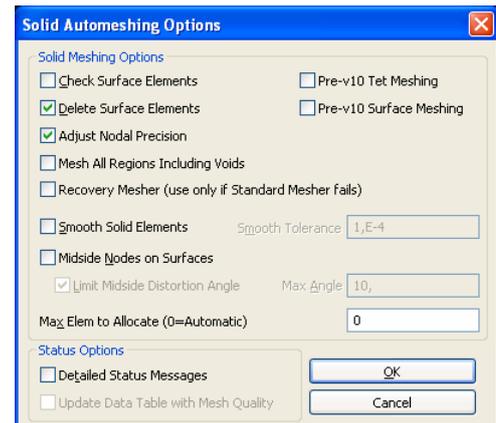
- изменить параметры узлов и/или КЭ;
- в поле „Merge Nodes” (объединить совпадающие узлы) выбрать одно из значений: „0..Off” (отключено), „1..New Nodes” (новые узлы) или „2..All Nodes” (все узлы);
- изменить значение „Tet Growth Ratio ... to 1”, т.е. коэффициента увеличения размеров КЭ (от поверхности – внутрь тела), и/или „Initial Size Ratio ... to 1”, т.е. коэффициента изменения размера начального КЭ.



а)



б)



в)

Рис.3.16. Диалоговые панели: а) – создания тетрагональной КЭС „твердого” тела; б) – задания размеров КЭС и других параметров процесса; в) – дополнительных опций

На панели „Automesh Solids” есть кнопка „Update Mesh Sizing...”, вызывающая диалоговую панель „Automatic Mesh Sizing” (см. рис.3.16-б) для дополнительной настройки процесса создания трехмерной КЭС.

На ней можно выбрать „Tet Meshing” или „Hex Meshing” (тетрагональные или гексагональные КЭ); указать: максимальный размер КЭ (Element Size); минимальное количество элементов на ребре (Min Elements on Edge); максимальный допустимый угол (Max Angle Tolerance, см. рис.3.9); максимальное количество (Max Elem of Small Feature) и размер (Max Size of Small Feature) КЭ в окрестности малых особенностей; коэффициент уменьшения для вершины (Vertex Aspect Ratio). Еще на ней можно установить опцию „Replace Mesh Sizes on All Curves” (заменить размеры сетки на всех кривых), т.е. отменить предыдущую разметку поверхностей и ребер; опции „Length Based Sizing” (разметка, основанная на длине), „Mapped Meshing Refinement” (упорядоченное создание сетки), „Suppress Short Edges” (подавление коротких кромок, с процентным размером этих кромок) и „Auto Boundary Small Surf” (автоматически находятся границы малых поверхностей (задается процент малости), эти поверхности объединяются с соседними „большими” поверхностями). Последние опции могут улучшить созданную КЭС.

Есть и другие параметры: в секции „Surface Interior Mesh Growth” – коэффициент изменения размера КЭС на внутренней части поверхности (Growth Factor); в секции „Curvature-Based Mesh Refinement” включенная опция „Refinement Ratio” укажет на то, что в зонах большой кривизны базовую сетку необходимо изменить соответственно указанному ко-

эффиценту, а опция „**Refine Surface Mesh**” – что после этого КЭС необходимо еще раз оптимизировать. Кроме того, на ней в секции „**Assembly / Multi-Solid Sizing**” (Трансляция / размеры для нескольких тел) можно установить опции: „**Adjacent Surface Matching**” (выравнивать положение узлов на сопредельных поверхностях) и „**Skip Sizing on Slaved Surfaces**” (игнорировать разметку КЭС на подчиненных поверхностях) – только для случая „**Tet Meshing**”; „**Remove Previous Slaving**” (удалить предыдущее соподчинение) и „**Adjust Colors**” (корректировать цвета).

При создании КЭС будут учтены назначения относительно КЭС, сделанные заранее (см. Раздел 3.3.1). Однако на панели „**Automesh Solids**” есть электронная кнопка „**Options**”, которая вызывает диалоговую панель „**Solid Automeshing Options**” (см. рис.3.16-в), где можно еще установить дополнительные опции:

- „**Check Surface Elements**” и „**Delete Surface Elements**”: проверить и удалить поверхностные КЭ. Напомним, что поверхностные КЭ создаются как вспомогательные, поэтому их все равно придется удалять;
- „**Adjust Nodal Precision**”: корректировать узловую точность;
- „**Mesh All Regions Including Voids**”: создавать сетку во всех без исключения областях;
- „**Recovery Mesher (use only if Standard Mesher fails)**”: восстановить сетку (использовать только при неудаче стандартного построителя КЭС);
- „**Smooth Solid Elements**”: сгладить трехмерные КЭ с погрешностью „**Smooth Tolerance**”;
- „**Midsides Nodes on Surface**”: поместить промежуточные узлы КЭ на поверхности тела. **Внимание:** это обязательно нужно делать, если тело имеет криволинейные поверхности. При этом можно задать предельное значение изменения углов при этих узлах (**Limit Midside Distortion Angle**) величиной „**Max Angle**”;
- „**Max Elem to Allocate (0 = Automatic)**”: максимальное количество создаваемых КЭ;
- „**Detailed Status Messages**”: вывести подробную информацию;
- „**Update Data Table with Mesh Quality**”: обновить таблицу данные с учетом изменений КЭС;
- „**Pre-v10 Tet Meshing**” и „**Pre-v10 Surfaces Meshing**”: использовать альтернативные построители трехмерной и/или поверхностной сетки, появившиеся в Femap версии 10.

Кроме описанного выше, трехмерную тетрагональную КЭС можно получить на основе поверхностей, создающих *замкнутое* пространство. Дается команда **Mesh→Geometry→Solids from Surfaces...** или **Mesh→Geometry→Solids from Elements...**, выбираются поверхности (поверхностные КЭ), появляется диалоговая панель „**Automesh Solids**” (см. рис.3.16-а). Ее параметры рассмотрены выше, но значительная часть из них недоступна.

Гексагональная КЭС позволяет получить более точные результаты, но не всегда может быть создана быстро, поскольку требует гексагональных (восьмиугольных) очертаний тела. Цель можно достичь, проводя „*рассечение тела с соответствием*” (см. Раздел 2.2.5.2) на восьмиугольные части с последующим одновременным созданием КЭС и сшиванием в единую КЭС.

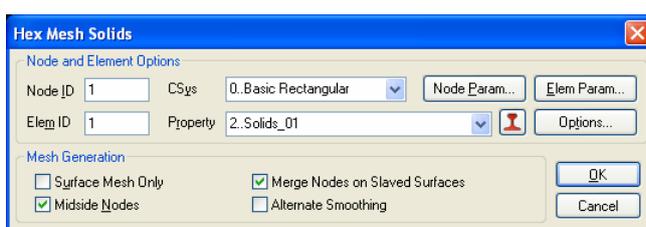


Рис.3.17. Диалоговая панель создания гексагональной КЭС „твердого” тела

Для создания *гексагональной* КЭС дается команда **Mesh→Geometry→HexMesh Solids...**, выбираются „*твердые*” тела, появляется диалоговая панель „**Hex Mesh Solids**” (см. рис.3.17). Она почти аналогична рассмотренной панели „**Automesh Solids**” (см. рис.3.16-а), за исключением опций:

- „**Merge Nodes on Slaved Surfaces**”: объединить совпадающие узлы на сопредельных и/или подчиненных поверхностях;

- „**Alternate Smoothing**”: применить альтернативный (относительно обычного) алгоритм сглаживания КЭС. Это может помочь получить гексагональную сетку тогда, когда это не удалось обычным алгоритмом.

Результат – КЭС в виде (на экране) четырехугольных и/или треугольных граней трехмерных КЭ, выходящих на поверхности тела, и узлов в их вершинах и на их ребрах. КЭ имеют указанные в „**Property**” свойства, в частности „созданы” из указанного материала.

3.3.2.7 Создание трехмерной конечно-элементной сетки на основе объема

Дается команда „**Mesh→Geometry→Volume...**”, выбираются объемы, появляется диалоговая панель „**Geometry Mesh Options**” (см. рис.3.13-б). На ней будут активными почти все опции, поэтому, кроме рассмотренных в Разделе 3.3.2.2 действий, можно:

- в секции „**Element Shape**” выбрать форму КЭ: „**Tetra**” (тетраэдр, 4 грани), „**Wedge**” (призма с треугольной основой, 5 граней) или „**Brick**” (гексаэдр, 6 граней). Для КЭ типа „**Tetra**” и „**Wedge**” еще можно указать направление наклона граней: „**Right Bias**” (правое), „**Left Bias**” (левое) или „**Alternate Tri**” (смешанное);

- установить опцию „**Merge Nodes**”, чтобы объединить совпадающие узлы.

3.3.2.8 Создание конечно-элементной модели конструкции из разных материалов

Довольно часто цельная конструкция создается из разных материалов: покрытием, свариванием или „жестким” соединением (посадкой с натягом, болтовым соединением и т.п.). Поэтому возникает необходимость в создании конечно-элементной модели из разных материалов.

Не смотря на то, что в FEMAP при автоматическом создании конечно-элементной сетки всегда *все* одновременно созданные КЭ будут иметь *одинаковый* материал (через одинаковое „**Property**”), есть возможности для достижения желанной цели.

Сначала необходимо создать конструкцию как *единое* „твердое” тело (при необходимости – объединить отдельные части с помощью команды **Geometry→Solid→Add...**, см. Раздел 2.2.5.2).

Первый вариант:

- с помощью команды **Geometry→Solid→Slice Match...** разрезать это тело на части, каждая из которых в дальнейшем должна иметь свой материал, т.е. „разрезать с соответствием” (см. Раздел 2.2.5.2);

- создать нужные материалы, записать их в библиотеку (кнопкой „**Save...**”). Если материалы созданы ранее – „загрузить” их (кнопкой **Load...** или **Copy...**);

- создать „**Property**” с одним из введенных материалов;

- создать автоматически сетку КЭ для *всех* частей тела одновременно, выбрав для них созданное ранее „**Property**”. При этом на поверхностях, которые разрезали тело „с соответствием”, узлы конечно-элементной сетки получают *разные* номера, но (почти) *одинаковые* координаты, т.е. они – совпадающие;

- объединить эти узлы с помощью команды **Tools→Scheck→Coincident Nodes...**, (аналогично описанному в Разделе 2.2. 6.3 для точек); узлы выбирать кнопкой „**Select All**”. Объединение можно провести и при создании КЭС, включив соответствующую опцию;

- с помощью команды **Modify→Update Elements→Material ID...** выбрать *любой* КЭ из той части тела, где нужно изменить материал, и на появившейся панели „**Select Material for Update**” выбрать со списка активизированных материалов нужный материал. *Все* КЭ данной части конструкции изменят материал на указанный, автоматически будет создано новое „**Property**”.

Второй вариант:

- выполнить первые два пункта первого варианта;

- создать нужное количество „**Property**”, отличающихся лишь материалами;

• с помощью команды **Modify**→**Update Elements**→**Property ID...** выбрать КЭ, в которых необходимо изменить материал, и на появившейся панели „**Select Property for Update**” выбрать со списка активизированных „**Property**” нужное.

Этот вариант не всегда удобнее первого, поскольку в нем необходимо безошибочно выбрать все КЭ, где будет изменяться „**Property**” (если по какой-то причине нельзя использовать метод выбора КЭ „**In Solid/Volume**”).

Итак, вся конструкция будет состоять из нескольких „твердых” тел из разных материалов, „сшитых” в узлах на поверхностях рассечения в единую конечно-элементную модель.

3.4 Создание конечно-элементной модели тела без геометрической модели

КЭС можно создавать и без геометрической модели. Более того, некоторые КЭ можно создать только так (**MASS**, **MASS MATRIX**, **STIFFNESS MATRIX** и **SLIDE LINE**).

Создание отдельных узлов почти во всем аналогично созданию точек (см. Раздел 2.2.2), только команда – другая: **Model**→**Node...**

Внимание: при дальнейшем формулировании краевой задачи довольно часто значительное упрощение и ускорение процесса задания граничных условий на поверхностях КЭ и в узлах достигается приложением этих условий к геометрическим объектам модели (**Point**, **Curve**, **Surface**, **Solid**). Но геометрические объекты передают ГУ к КЭС только тогда, когда объекты КЭС и геометрические объекты „ассоциированы”. Такая ассоциация назначается автоматически, если КЭС создана на основе геометрической модели. Когда КЭС создается иным образом, то такой ассоциации автоматически не возникает. В Разделе 4.1.2 описана процедура создания ассоциаций.

3.4.1 Создание конечно-элементной сетки на основе полного набора узлов

Отдельные КЭ на основе полного набора узлов (или точек) можно создать с помощью команды **Model**→**Element...** Появляется диалоговая панель с характерным началом названия „**Define ...**”. Ее вид соответствует типу КЭ (см. рис.3.18), который можно изменить (кнопка „**Type...**”). На панели можно:

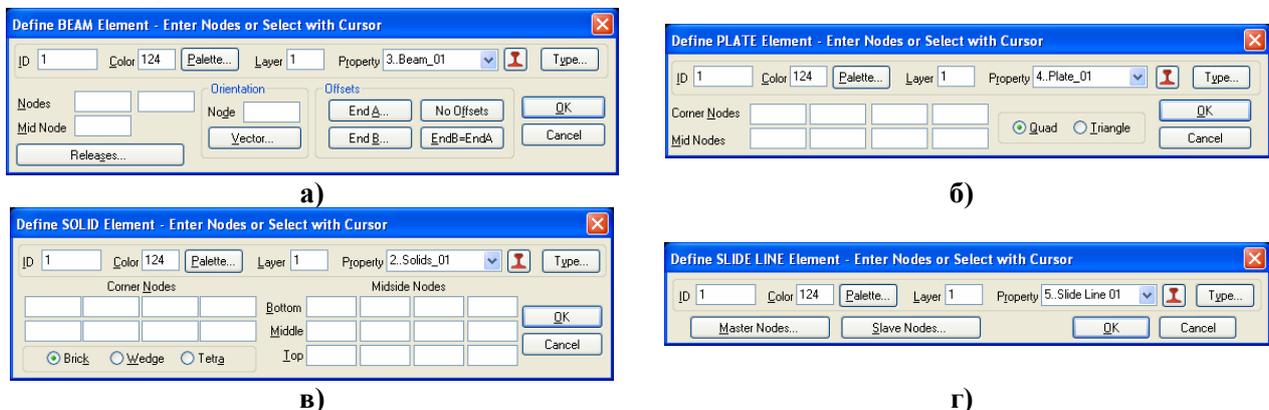


Рис.3.18. Характерный вид диалоговых панелей для создания КЭ на основе узлов

• назначить другой **ID**, цвет, уровень; выбрать ранее созданное или создать (кнопка , см. Раздел 3.2) „**Property**”;

• для одномерных КЭ типов **CURVED TUBE**, **BAR**, **BEAM**, **CURVED BEAM** и **GAP** в секции „**Orientation**” (рис.3.18-а) ввести дополнительный узел (или вектор), определяющий его ориентацию (см. рис.П3.1 в Приложении 3);

• для одномерных КЭ типа **BEAM** и **CURVED BEAM** в секции „**Offset**” (рис.3.18-а) назначить на обоих концах расстояния (рис.П3.1 Приложения 3); кнопкой „**Releases...**” вызвать диалоговую панель „**Define Element Releases**” (рис.3.19-а), где можно запретить некоторые степени свободы узлов на концах КЭ;

• для двумерных КЭ всех типов (рис.3.18-б) и осесимметричного КЭ указать количество угловых узлов: „**Quad**” (четыре) или „**Triangle**” (три); для трехмерного (рис.3.18-в) –

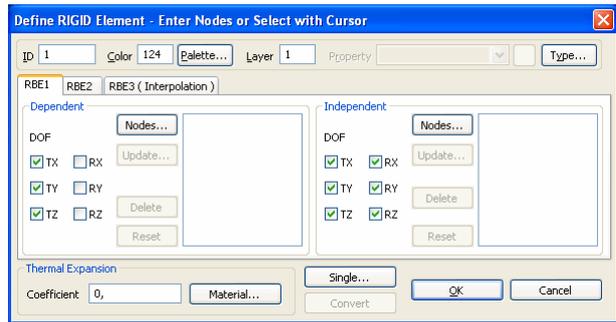
форму КЭ: „Brick” (гексаэдр, 6 граней), „Wedge” (призма с треугольной основой, 5 граней) или „Tetra” (тетраэдр, 4 грани);

- ввести номера узлов, на основе которых будет создаваться КЭ (рис.3.18), причем для всех типов КЭ, кроме случая, изображенного на рис.3.18-г, если оставить поля с номерами узлов пустыми, то после команды „OK” появится стандартный диалог выбора узлов. **Внимание:** порядок назначения номеров узлов должен соответствовать шаблону нумерации узлов в КЭ (см. Приложение 3);

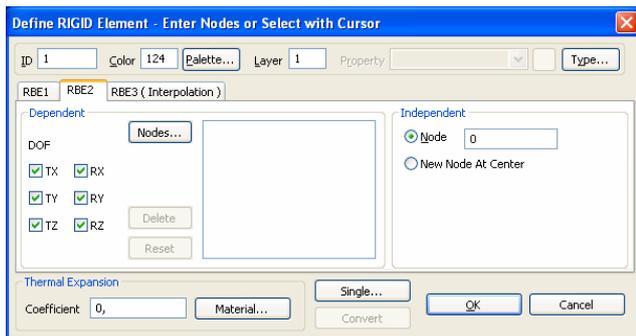
- для КЭ типа **SLIDE LINE** (см. рис.3.18-г) сформировать наборы *ведущих* (кнопка „Master Node...”) и *ведомых* (кнопка „Slave Node...”) узлов, причем каждый такой набор должен иметь одинаковое количество узлов, а направление обхода – против часовой стрелки. **Внимание:** а) плоскость, в которой расположен этот (плоский) КЭ – только **XY**, поэтому, если нужно, необходимо ввести локальную систему; б) этот КЭ в своей плоскости должен быть „растянут” вдоль *всей возможной поверхности* контакта. Подробнее – в Разделе 8.1;



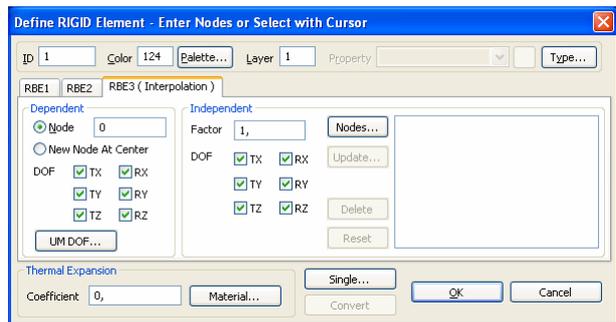
а)



б)



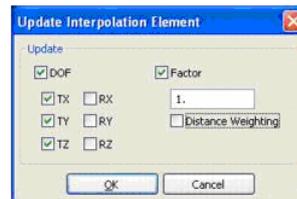
в)



г)



д)



е)

Рис.3.19. Характерный вид диалоговых панелей:

а) – задание запрещенных степеней свободы на концах КЭ; б, в, г) – создание КЭ типа RIGID

- для КЭ типа **RIGID** есть три варианта (см. рис.3.19-б,в,г). КЭ типа **RBE1** могут вводить связи произвольного количества узлов КЭС. С помощью кнопок „Nodes...” следует в секциях сформировать списки „зависимых” (**Dependent**) и „независимых” (**Independent**) узлов, назначить им связываемые степени свободы (**DOF**), причем *общее количество DOF „независимых” узлов должно быть равным шести*; назначить коэффициент теплового расширения в поле „Coefficient” или скопировать его значение из базы материалов с помощью кнопки „Material...”. КЭ типа **RBE2** могут связываться с одним „независимым” узлом КЭС, причем опция „New Node At Center” позволяет создать новый узел в геометрическом центре „зависимых” узлов. Кнопка „Single...” вызовет панель, изображенную на рис.3.19-д. КЭ типа **RBE3** моделирует перемещение, интерполированное из перемещений связанных узлов как

среднее взвешенное, причем весовой коэффициент можно назначить для каждого „независимого” узла. Кнопка „**UM DOF**” позволяет назначить для КЭ типа **RBE3** дополнительное „**DOF**” (для ликвидации некоторых проблем, описанных в руководстве **Nastran Quick Reference Guide**). Опция „**Distance Weighting**” позволяет назначать весовой коэффициент в зависимости от расстояний. Опция „**Convert**” позволяет преобразовать КЭ из типа **RBE2** в тип **RBE3** или наоборот. Более подробно об этом типе КЭ – в Разделе ПЗ.4.3. О другом варианте создания связей – в Разделе 6.1.2.4.

3.4.2 Создание конечно-элементной сетки на основе опорных узлов

В FEMAP есть инструменты создания КЭС на основе малого количества опорных узлов. Это такие варианты:

- **Mesh→Between...** (между угловыми узлами): одномерная (между двумя), двумерная (между тремя или четырьмя) или трехмерная (между 4...8) узлами КЭС первого или второго порядка аппроксимации. КЭ создаются на основе параметрического описания линии, поверхности или объема. Вызывается диалоговая панель „**Generate Between Corners**” (см. рис.3.20-а). На ней в секции „**Node and Element Options**” кроме уже известных есть опция „**GenClockwise**” (генерировать узлы по часовой стрелке – для цилиндрической и сферической систем координат); в секции „**Generate**” нужно указать, что создавать: узлы, КЭ (если узлы уже есть) или одновременно узлы и КЭ (**Both**); в секции „**Corners**” – количество опорных узлов; в секции „**Mesh Size**” – количество узлов (**#Nodes**) и параметры (**Bias**) увеличения размеров КЭ (здесь направление **Dir1** – от 1-го до 2-го узла), а также можно установить опцию „**Geometric Bias**” (геометрическая пропорция). Если создаются только КЭ (узлы уже есть), то нужно будет указать первый узел (**First Corner Node**), приращение номеров (**Node Increment**) и их количество (**#Nodes**). Форма КЭ зависит от размерности, выбирается в секции „**Element Shape**”: для одномерного – линия (**Line**), для двумерного – треугольник (**Tri**) или четырехугольник (**Quad**), для трехмерного – как в Разделе 3.3.2.7. Номера опорных узлов можно ввести в соответствующие поля секции „**Corner Nodes**”, или, если оставить поля с номерами узлов пустыми, то после команды „**OK**” появится стандартный диалог выбора узлов. **Внимание:** порядок расположения узлов – против часовой стрелки, а для трехмерной – как на рис.2.17;

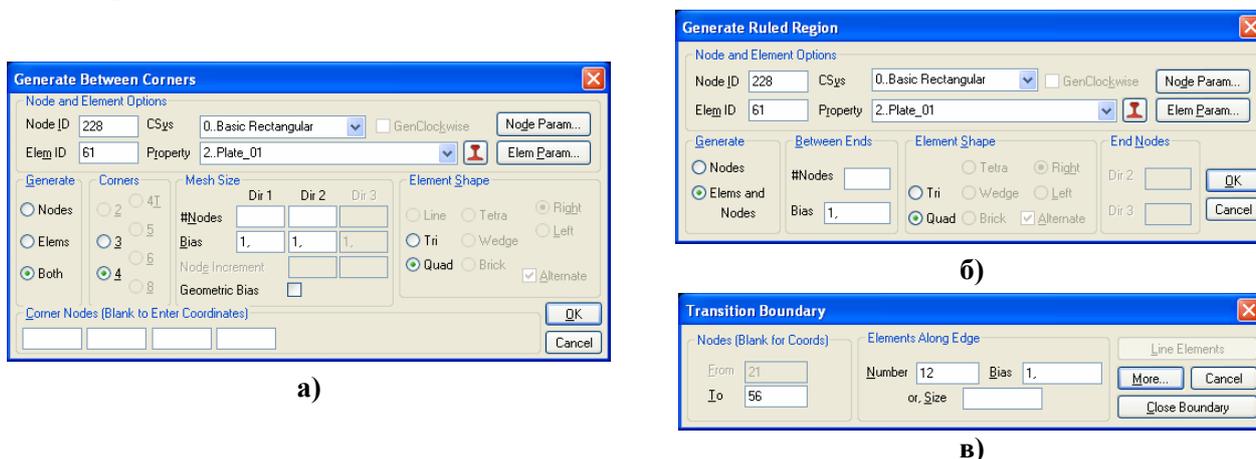


Рис.3.20. Характерный вид диалоговых панелей создания КЭ:

а) – между угловыми узлами; б) – между двух групп узлов; в) – двумерной нерегулярной между угловыми узлами с разметкой контура

- **Mesh→Region...** (между двух групп противостоящих узлов, причем группы имеют одинаковое количество узлов): сначала выбираются узлы 1-ой группы, потом (в том же порядке!) – 2-ой. Появляется диалоговая панель „**Generate Ruled Region**” (см. рис.3.20-б), на которой вводятся необходимые данные. **Внимание:** значения в полях „**Dir 2**” и „**Dir 3**” (когда они активны) должны быть равны количеству узлов в этих направлениях. В результате пространство между группами узлов заполняется КЭ выбранного типа, первого или второго порядка аппроксимации в зависимости от „**Property**” и выбранного количества узлов. КЭ

создаются на основе параметрического описания линии, поверхности или объема. #Nodes – количество узлов в направлении от одной группы узлов ко второй, включая узлы этих групп;

- **Mesh→Transition...** (создание нерегулярной двумерной КЭС на основе 3-х или 4-х угловых узлов и разметки контура): на диалоговой панели „**Transition Boundary**” (см. рис.3.20-в), указываются начальный (**From**) и конечный (**To**) углы (узлы) будущего контура, количество КЭ вдоль (прямой) линии контура, коэффициент увеличения размера КЭ (**Bias**) или ориентировочный размер КЭ (**Size**). Подается команда продолжения (кнопкой „**More...**”) или, на заключительном этапе, – „закрытия” контура „**Close Boundary**” (становится активной на третьем контуре). Появится диалоговая панель „**Generate Boundary Mesh**” (аналогичная панели, изображенной на рис.3.14-а, но с меньшим набором опций), где назначается или выбирается „**Property**” КЭ. **Внимание:** если этой процедурой КЭ добавляются в уже существующую КЭС, то на стыке возникают совпадающие узлы, их нужно объединить аналогично рассмотренном в Разделе 2.2.6.3. для точек (команда **Tools→Check Coincident Nodes...**).

3.4.3 Создание конечно-элементной сетки на основе операций выдавливания, вращения и вытягивания

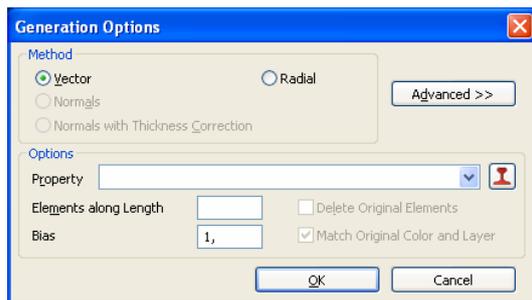
В FEMAP есть инструменты создания КЭС на основе операций выдавливания (команда **Mesh→Extrude→**), вращения (**Mesh→Revolve→**) и вытягивания (**Mesh→Sweep→**). Основой для создания КЭС являются кривые с *разметкой* количества КЭ (**→Curve...**), КЭ низшей размерности (**→Elements...**) или поверхности КЭ (**→Element Face...**).

Это такие варианты:

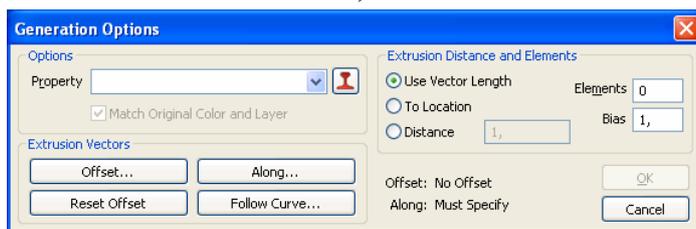
- „выдавливание” двумерных КЭ как результат заполнения конечными элементами поверхности, которая образовывается при перемещении кривых (команда **Mesh→Extrude→Curve...**). Выбираются кривые с *разметкой* количества КЭ (могут иметь ранее созданные КЭ, которые назовем „опорными”), появляется диалоговая панель „**Generation Options**” (см. рис.3.21-а). Нужно выбрать ранее созданный вариант свойства *двумерного* КЭ или задать новый (кнопка ) , ввести количество КЭ вдоль направления выдавливания (**Elements along Length**) и выбрать метод задания направления. Если дать команду „**OK**” для варианта „**Vector**”, то появится стандартный диалог задания *направления* вектором, причем указанная *длина* этого вектора будет длиной выдавливания. После этого будут созданы (выдавлены) новые КЭ с *равномерным* шагом. Если вместо „**OK**” инициировать кнопку „**Advanced>>**”, панель „**Generation Options**” модифицируется (см. рис.3.21-б). На ней можно дополнительно установить: увеличение размера КЭ в направлении выдавливания (в поле „**Bias**”), направление выдавливания *вектором* (с помощью кнопки „**Along...**”) или *вдоль* прежде созданных (желательно – размеченных под количество КЭ) *линий* (прямых или кривых, с помощью кнопки „**Follow Curve...**”). Если направление указывается вектором (не кривой), то длину выдавливания можно установить: длиной вектора (**Use Vector Length**); существующим объектом (**To Location**), причем появится стандартное диалоговое окно для выбора объекта (точки, узла и т.п.), а реальная длина выдавливания определяется проекцией положения объекта на направление вектора; величиной „**Distance**” (введенная длина вектора будет игнорироваться). С помощью кнопки „**Offset...**” можно указать (вектором) расстояние от выбранных кривых (с „опорными” КЭ), на котором будут создаваться новые КЭ. Когда все необходимые назначения будут сделаны, становится активной кнопка „**OK**”. После создания КЭ снова появится диалоговая панель „**Generation Options**” для продолжения процесса, причем база начала создания новых КЭ будет перенесена на конец предварительно созданных КЭ. **Внимание:** если были „опорные” КЭ, то они не удаляются, а созданные двумерные КЭ будут иметь первый порядок аппроксимации;

- „выдавливание” двумерных или трехмерных (**Mesh→Extrude→Element...**) КЭ из ранее созданных одномерных или двумерных КЭ соответственно. Выбираются „опорные” *однотипные* КЭ, появляется диалоговая панель „**Generation Options**” (см. рис.3.21-а), на которой уже будут доступны опции секции „**Parameters**”, где можно выбрать вариант „**Match Original Entities**” (цвет и уровень новых КЭ будут соответствовать „опорным” КЭ) или „**Use**

Current Setting” (использовать текущие назначения в „**Property**”). Если опорные КЭ – одномерные, то следующие действия – аналогичны описанным выше. Если опорные КЭ – двумерные, то направление можно выбирать не только вектором, но и нормалью к их поверхности (**Normals**) или нормалью с коррекцией толщины КЭ, что создаются, вдоль всей поверхности (**Normals with Thickness Correction**). Последнее имеет значение для двумерных КЭ на криволинейной поверхности. Когда направление задается нормалью, еще будет необходимо задать длину вытеснения (на появившейся панели „**Offset Extrusion**”), причем знак „+” или „-” укажет направление процесса выдавливания. Если активизировать опцию „**Delete Original Elements**” (удалить оригинальные КЭ), после создания новых КЭ появится запрос: удалять их, или нет. **Внимание:** порядок аппроксимации КЭ (первый или второй, т.е. „**Parabolic**”) определяется „опорными” КЭ и „**Property**”;



а)



б)

Рис.3.21. Диалоговые панели опций выдавливания КЭ

осью вращения, хотя и могут на ней заканчиваться;

- на основе процедуры *вытягивания*, которая почти аналогична процедуре выдавливания, описанной выше, с одним отличием: траектория создания КЭ задается заранее созданными *размеченными непрерывными* линиями. Есть вариант вытягивания КЭ с применением линий (команда **Mesh→Sweep→Curve...**) или одномерных или двумерных КЭ (команда **Mesh→Sweep→Element...**). Сначала (соответственно команде) выбираются „опорные” кривые или *однотипные* КЭ, потом – кривые будущей траектории. Появляется диалоговая панель „**Generation Options**” (см. рис.3.22), на которой почти все опции рассмотрены выше.

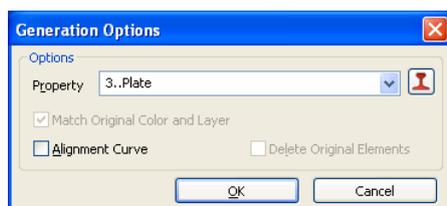


Рис.3.22. Диалоговая панель опций вытягивания КЭ

Отличие от случая **Mesh→Extrude→...** состоит в том, что ребра новых КЭ будут *касательными* к траектории перемещения. Опцию „**Alignment Curve**” нужно активизировать, когда траектория перемещения – пространственная *не плоская* кривая, чтобы задать дополнительный объект (линию), относительно которой будут ориентироваться создающиеся КЭ (**alignment** – выравнивание).

Еще есть возможность проводить описанные выше процедуры выдавливания, вращения и вытягивания, когда опорными объектами являются поверхности двумерных или трехмерных КЭ (**Mesh→Sweep→Element Face...**), которые выбираются с помощью диалога „**Select Element Faces**” (см. рис.3.23-а). На ней ID КЭ и номер его стороны можно вводить в список:

- на основе процедуры *вращения*, когда основой являются ранее созданные и размеченные кривые (команда **Mesh→Revolve→Curves...**) или одномерные или двумерные КЭ (команда **Mesh→Revolve→Elements...**). Выбираются *незамкнутые* кривые или „опорные” КЭ, появляется описанная выше диалоговая панель „**Generation Options**” (см. рис.3.21-а). После проведения всех назначений и команды „**OK**” указывается вектор, относительно которого проводить вращение, а также угол вращения (**Rotation Angle**) и, если нужно, смещение (**Translation Distance**) *последних* узлов новых КЭ вдоль указанного вектора (винтообразное вращение). **Внимание:** опорные объекты не должны пересекаться с

- путем выбора КЭ на рабочей плоскости „мышью”;
- набором на клавиатуре нужных номеров и команды „<<Add” (добавить);
- группой КЭ с одинаковым номером поверхности КЭ: кнопкой „Multiple...” вызывает стандартный диалог выбора КЭ, после чего появляется диалоговая панель „Face Selection for Elemental Loads” (см. рис.3.23-б), где номер поверхности КЭ вводится в поле „Face”.

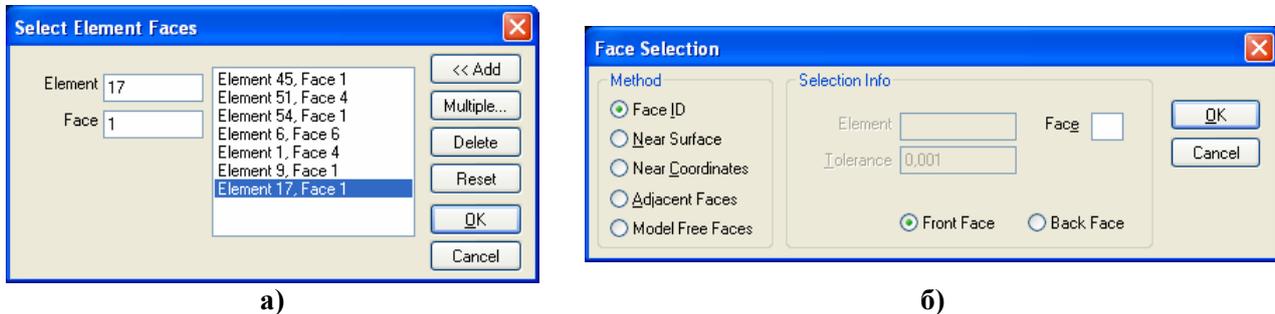


Рис.3.23. Диалоговые панели выбора поверхностей КЭ

Внимание: при выдавливании или вытягивании трехмерных КЭ из двумерных КЭ с кривой поверхностью или вдоль *нелинейной* кривой проводится соответствующее корректирование длин ребер новых трехмерных КЭ, которое не всегда геометрически возможно (отрицательная длина является ошибкой).

3.4.4 Создание трехмерной конечно-элементной сетки на основе двумерных конечных элементов

Трехмерную *тетрагональную* КЭС можно получить на основе двумерной КЭС, которая создает *замкнутое* пространство. Дается команда **Mesh→Geometry→Solids from Elements...**, выбираются „опорные” КЭ (часто это все КЭ), появляется уже знакомая диалоговая панель „Automatic Mesh Sizing” (см. рис.3.16-а). Параметры, что задаются на ней, рассмотрены в Разделе 3.3.1.1. После команды „OK” (на создание КЭС) может появиться панель с вопросом: превращать ли исходные КЭ в треугольные. Если не согласиться, то КЭС создаваться не будет.

С помощью команды **Mesh→Geometry→HexMesh from Elements...** можно создать *гексагональную* КЭС или КЭ в виде *шестигранных* и *пятигранных* призм на основе двумерной КЭС в составе четырехугольных или треугольных КЭ соответственно, причем должно быть одно или большее количество *пар* поверхностей, между которыми создается новая КЭС в виде указанного количества слоев КЭ.

Поверхности каждой пары не должны лежать в одной плоскости. На них нужно иметь двумерную КЭС, с подобным заполнением и с одинаковым количеством КЭ. Сначала выбираются КЭ из поверхностей „основы” (**Elements on Base**), потом – соответствующие им КЭ из „верхних” поверхностей (**Elements on Top**). Поскольку порядок следования КЭ при выборе не имеет значения, то удобно установить метод выбора КЭ как „КЭ на поверхности” (**on Surface**). Впрочем, не всегда нужны все КЭ, что есть на поверхности.

Когда все необходимые КЭ выбраны, появляется вопрос „**OK to Automatically match Top and Bottom Meshes ?**” (автоматизировать нахождение КЭС обеих слоев ?), на которое можно дать ответ „Да” или „Нет”. Если „Нет”, то придется дополнительно выбирать один из узлов где-то *на границе* поверхности „основы”, потом – *соответствующий* ему узел на границе „верхней” поверхности. В конце указывается количество слоев КЭ, что будет помещено между поверхностями (**Layers Between Base and Top**). Все опорные двумерные КЭ автоматически удаляются.

Внимание: каждая порция КЭ, созданных описанным выше образом, является *отдельным* блоком КЭ. Для соединения КЭ в единую КЭС нужно объединить совпадающие узлы, аналогично рассмотренному в Разделе 2.2.6.3 для точек (команда **Tools→Check Coincident Nodes...**).

3.5 Модификация конечно-элементной модели тела

Довольно часто созданную КЭС нужно модифицировать: вводить дополнительные связи, изменять размеры КЭ, объединять их или, наоборот, разделять на несколько новых КЭ и т.п.

3.5.1 Создание связей между узлами

Как это было указано в Разделе 1.6, если задача характеризуется полной циклической симметрией, когда циклически повторяются как геометрия, так и условия нагрузки, то необходимо моделировать лишь характерную часть конструкции (вырезать поверхностями), создавать такую КЭС, чтобы узлы на этих поверхностях расположились одинаково, потом для соответствующих узлов КЭС на этих поверхностях вводить связи (чтобы они имели одинаковые решения). Есть и другие случаи, когда необходимо создавать связи между узлами.

Внимание: чтобы эти связи потом не мешали изображению КЭС, целесообразно для них заранее создать отдельный уровень (**Layers**), который потом при создании связей выбирать с помощью кнопки „**Elem Param...**”.

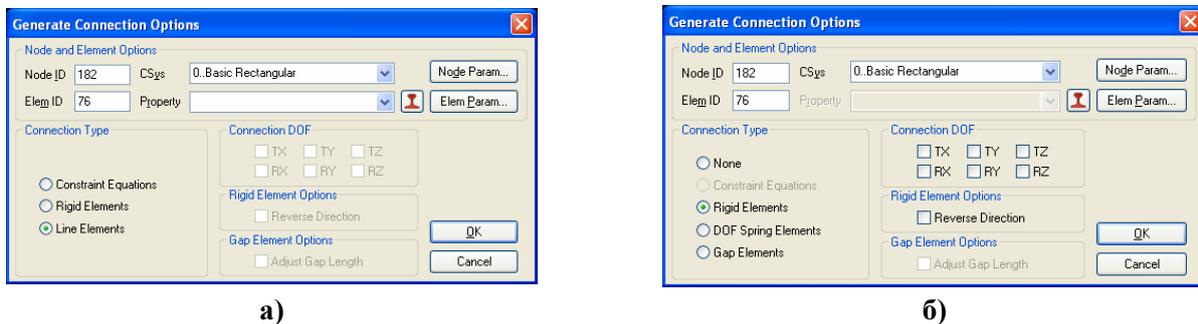


Рис.3.24. Характерный вид диалоговых панелей создания связей для команд:
а) – **Closest Link...** и **Multiple...**; б) – **Unzip...** и **Coincident Link...**

Диалоговая панель „**Generate Connection Options**” (см. рис.3.24) – почти одинаковая для всех команд группы **Mesh→Connect**. На ней в секции „**Connection Type**” выбирается тип связи: „**None**”, „**Constraint Equations**” (формульный) или один из типов КЭ („**Rigid**”, „**Line**”, „**DOF Spring**” или „**Gap**”); назначается „**Property**” (надо выбрать или создать). Для жесткого КЭ „**Rigid**” еще необходимо назначить связываемые степени свободы. Чтобы формульная связь была активной, необходимо заранее командой **Model→Constraint→Equation** задать формулу (см. Раздел 5.1.2.3). Для КЭ типа „**Rigid**” есть опция „**Reverse Directory**” (изменить направление), а для КЭ типа **GAP** – „**Adjust Gap Length**” (приспособить размер зазора).

Итак, для создания связей между узлами есть группа команд **Mesh→Connect→**, которые различаются способом выбора узлов (указанную общую часть команды опускаем):

- **Closest Link...** (близкая связь): поочередно выбираются узлы двух групп, между которыми попарно по принципу „близкого узла” будут создаваться связи;
- **Multiple...** (множественная связь): после назначения свойств связи в диалоговом режиме указываются пары узлов, что связываются;
- **Unzip...** (разъединение): выбираются КЭ, потом – их *общие* узлы, что будут разъединяться, потом указываются свойства связей между выбранными узлами. Команду обычно применяют для разъединения КЭС тела на связанные или несвязанные (**None**) части;
- **Coincident Link...** (в совпадающих узлах: выбираются узлы, назначается максимальное расстояние между узлами, которые будут связаны).

3.5.2 Редактирование конечно-элементной сетки

В FEMAP редактирование реализовано только для сеток из двумерных КЭ. Есть два режима: „**Interactive**” и „**Split**”.

Командой **Mesh→Editing→Interactive...** вызывается диалоговая панель „**Mesh Editing**” (см. рис.3.25-а). На ней выбирается один из вариантов разделения КЭ на несколько КЭ,

потом на рабочем поле FEMAP с помощью „мыши” выбирается нужный КЭ и нажимается левая кнопка „мыши” – КЭ визуально делится на части. Кнопка „Undo” отменяет разделение последнего КЭ. Если опцию „Merge” сделать активной, то будут объединены все совпадающие узлы КЭС. Реальное разделение проводится после команды „Done”.

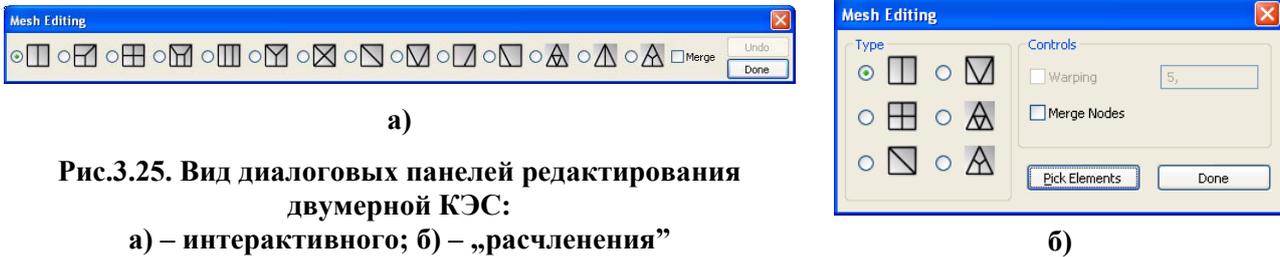


Рис.3.25. Вид диалоговых панелей редактирования двумерной КЭС:

а) – интерактивного; б) – „расчленения”

Командой **Mesh→Editing→Split...** вызывается несколько другая диалоговая панель, но с тем же названием (см. рис.3.25-б). На ней также выбирается один из вариантов разделения КЭ на несколько КЭ, потом кнопкой „Pick Element” вызывается стандартная панель для выбора КЭ. Назначение опции „Merge Nodes” такое же, как и опции „Merge” на рис.3.25-а. Когда пополам делятся КЭ с 4-мя углами, то становится доступной опция „Warping”, назначение которой подробно описано в Разделе 3.6.4. Реальное разделение проводится после команды „Done”.

Внимание: наличие в КЭС тела „висячих” узлов (узел на границе двух КЭ является узлом лишь одного из этих КЭ) равнозначно наличию разреза (трещины) в теле, что приводит к локальному очень значительному концентратору напряжений.

3.5.3 Перегенерация и очистка конечно-элементной сетки

В FEMAP регенерация реализована только для двумерных КЭС.

Командами (общую часть команды **Mesh→Remesh→** опускаем): **Refine...** (размельчать); **Update...** (обновлять) или **Unrefine...** (укрупнять) вызывается панель для выбора КЭ (можно пользоваться протягиванием „мыши” с прижатой клавишей „Shift”). Потом для одномерных КЭ достаточно ввести коэффициент уменьшения (целое число >1) / увеличения (<1) размера КЭ. Для других типов КЭ появляется диалоговая панель „Refinement and Remeshing Options” (см. рис.3.26-а). На ней выбирается соответствующее действие (опции „Refine”, „Remesh” или „Unrefine”), указывается коэффициент уменьшения / увеличения размера КЭС „Refinement Ratio” и величина угла разрыва „Break Angle” (только для „Unrefine”). **Внимание:** если значение этого угла будет выше некоторого критического (зависит от геометрии тела в окрестности внешних углов), то такой внешний угол тела может быть „срезан”. Опция „Delete Original Nodes and Elements” установлена по умолчанию.

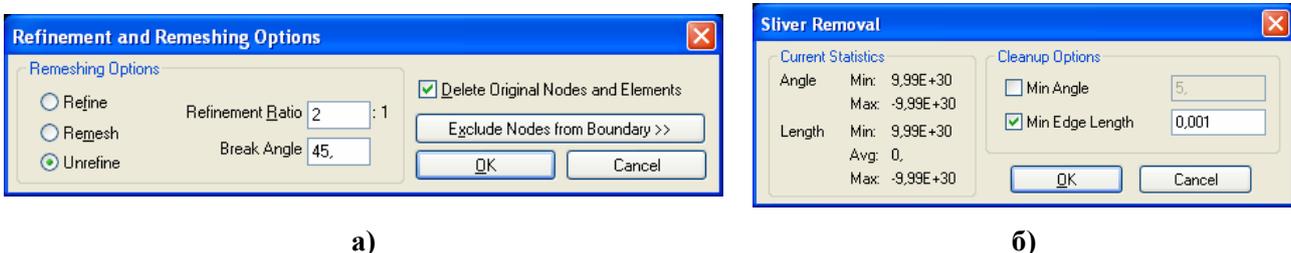


Рис.3.26. Вид диалоговых панелей: а) – регенерации КЭ; б) – удаления очень малых КЭ

Кнопкой „Exclude Nodes From Boundary” можно вызвать стандартный диалог выбора узлов на контуре области выбранных КЭ, которые будут удалены в процессе регенерации КЭС. После команды „OK” появляется панель для выбора узлов на контуре области выбранных КЭ, расстояние между которыми будет обязательно уменьшаться или увеличиваться. **Внимание:** именно эти выбранные узлы будут значительно влиять на результат регенерации КЭС. Потом может появиться диалоговая панель „Generate Boundary Mesh”, идентичная изображенной на рис.3.14-а, где можно изменить любые параметры будущей КЭС. Ре-

зультат – новая КЭС вместо тех КЭ, что были выбраны, причем совпадающих узлов не возникает.

Командами **Mesh→Remesh→Cleanup Slivers...** и **Mesh→Remesh→Edge Removal...** можно удалить очень маленькие КЭ и КЭ с короткими гранями соответственно. В обоих случаях сначала выбираются КЭ, среди которых будет проводиться процедура. В первом случае появляется диалоговая панель „**Sliver Removal**” (см. рис.3.26-б), где необходимо указать критические размеры угла и длины ребра (приведена соответствующая статистика). Во втором случае появляется диалоговая панель для выбора двух угловых узлов: „**From**” и „**To**” на короткой грани, причем удаляться будет узел „**To**”, после чего примыкающие КЭ обновятся.

3.5.4 Преобразования конечно-элементной сетки в STL-моделях

Импортированные **STL-модели** тела описываются треугольными плоскостями, которые в FEMAP воспринимаются как поверхностные КЭ типа **PLOT PLANAR**. Т.е. геометрических объектов тела (точек, кривых, поверхностей и т.п.) совсем нет. В таком случае в FEMAP есть возможность создать трехмерную КЭС: командой **Mesh→Geometry→Solid from Elements...** Однако построенная таким образом КЭС будет некачественной. Поэтому в FEMAP есть инструменты для переработки поверхностных КЭ **STL-модели**, которые вызываются группой команд **Mesh→Remesh→**:

- **Build Remeshing Regions...** (построить области регенерации): выбираются КЭ (обычно – все), указывается угловой параметр (**Angle Tolerance**), что определяет градацию областей, которые будут создаваться. Эти области получают разную окраску, они являются плоскостями или комбинациями близких по ориентации плоскостей, которые объединяют некоторое количество КЭ **STL-модели**;

- **Edit Remeshing Regions...** (редактировать области регенерации): в диалоговом режиме указывается номер КЭ **STL-модели** (**Move Elem**) и номер КЭ региона другой окраски, в который он будет перемещен. **Внимание:** для удобства выполнения этой процедуры каждый регион автоматически помещено в отдельный уровень (**Layer**);

- **Mesh Remeshing Regions...** (перегенерация): появляется информация о максимальном размере будущих КЭ (можно отредактировать), потом – обычная диалоговая панель создания двумерных КЭ (см. рис.3.14-а), с помощью которой создается *новая* КЭС из КЭ типа **PLOT ONLY**;

- **Convert Facets...** (конвертировать грани). Она используется тогда, когда поверхность тела „собрана” из треугольных поверхностных КЭ и все описанные выше методы перестройки КЭС не срабатывают. Тогда этой командой гарантировано создается поверхностная сетка из треугольных КЭ, которую потом можно изменять командами **Mesh→Remesh→**.

Полученная КЭС будет значительно лучше, чем исходная, но и она может иметь очень вытянутые КЭ. **Внимание:** КЭС обязательно нужно очистить (см. Раздел 3.5.3), можно еще ее отредактировать и перенумеровать (см. Разделы 3.5.3 и 3.5.8), даже назначить кое-где другие координаты узлов КЭ (**Modify→Edit→Node...**). Последнее действие – создание трехмерной КЭС командой **Mesh→Geometry→Solid from Elements...** (объемные КЭ от поверхностных КЭ).

3.5.5 Создание ребер жесткости

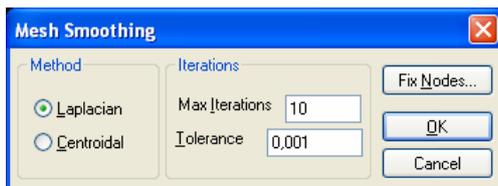
Дополнительные ребра жесткости – обычное конструктивное решение. В FEMAP конечные элементы, что их моделируют, создаются командой **Mesh→Edge Members...** Появляется диалог выбора КЭ, к которым эти ребра будут „прикрепляться”, потом – диалог выбора/назначения „**Property**” ребер жесткости, потом – диалог выбора опорных узлов. Если эти ребра – балочного типа, то дополнительно появится диалог назначения направления оси **Y** сечения КЭ (см. Приложение 3). Целесообразно поместить „**Property**” ребер жесткости на отдельный уровень (**Layer**), чтобы обеспечить удобный доступ к ним в дальнейшем. Для трехмерной КЭС ребра жесткости могут создаваться в виде одномерных или двумерных КЭ.

Внимание: FEMAP создает одномерные ребра жесткости на *всех* ребрах КЭ, что содержат указанные узлы. Поэтому после создания их нужно просмотреть и удалить лишние.

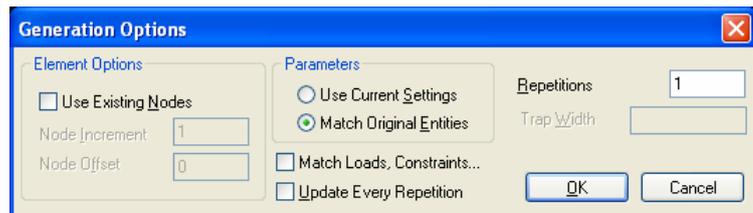
Для смещения КЭ, что моделируют ребра жесткости, в пространстве, удобно пользоваться командой **Modify**→**Update Element**→**Line Element Offset...** (см. Раздел 3.5.9).

3.5.6 Сглаживание конечно-элементной сетки

Иногда улучшение КЭС можно получить вследствие процедуры **Mesh**→**Smooth...** (только для двумерной или трехмерной КЭС). Сначала нужно выбрать КЭ, что будут принимать участие в процессе сглаживания КЭС, потом на соответствующей панели (см. рис.3.27-а) – выбрать метод (**Laplacian** или **Centroidal**) и параметры итерационного процесса. Еще с помощью кнопки „**Fix Nodes**” можно указать узлы, которые не будут изменять свои координаты. **Внимание:** эта процедура может дать неожиданные результаты, особенно для трехмерной КЭС!



а)



б)

Рис.3.27. Диалоговые панели: а) – сглаживания КЭ; б) – копирования КЭ

3.5.7 Операции манипулирования узлами и конечными элементами

Несколько операций копирования узлов и КЭ **Mesh**→ (**Copy...**, **Radial Copy...**, **Scale...**, **Rotate...** и **Reflect...**) аналогичны по выполнению операциям копирования геометрических объектов, изложенным в Разделе 2.2.6.1. После выбора объектов появляется диалоговая панель „**Generation Options**” (см. рис.3.27-б). На ней для КЭ будут активны все опции, а для узлов – только опции секции „**Parameters**”, а также опции „**Update Every Repetition**” и „**Repetitions**”. Объяснения к опциям см. в Разделе 2.2.6.1. В частности, опция этой диалоговой панели: „**Match Loads, Constraints...**” позволяет переносить граничные условия из оригинальных объектов (узлов, КЭ) на вновь созданные.

Несколько операций меню „**Modify**”: перемещение (**Move To...**, **MoveBy...**), вращение (**Rotate To...**, **RotateBy...**), выравнивание (**Align...**), масштабирование (**Scale...**), редактирование (**Edit...**), изменение цвета (**Color...**) и перемещение на другие уровни (**Layer...**) узлов и КЭ аналогичны по выполнению соответствующим операциям для геометрических объектов, изложенным в Разделах 2.2.6.2 и (об „**Layer...**”) 1.7.1.

Внимание: после этих операций могут появляться совпадающие узлы и КЭ. Их нужно объединить (узлы – аналогично описанному в Разделе 2.2.6.3 для точек, КЭ – по процедуре Раздела 3.6.2), иначе КЭС тела будет „разорванной”, а будущее решение краевой задачи – неверным.

3.5.8 Изменение нумерации объектов конечно-элементной сетки тела

Команды **Modify**→**Renumber**→ (**Coord Sys...**, **Node...**, **Element...**, **Material...** или **Property...**) сначала вызывают стандартную диалоговую панель для выбора объектов, потом – панель „**Renumber To**” (см. рис.3.28, для КЭ). На ней указывается:

- новый начальный номер объектов (**Starting ID**) и шаг изменения номеров (**Increment**);

- критерий сортировки: по идентификатору (**Original ID**), порядком выбора (**Selection Order**), цветом (**Color**), уровнем (**Layer**), типом (**Type**), „свойством” (**Property**), минимальным номером узла в каждом КЭ (**Minimum Node ID**), порядком положения вдоль указанной координаты (**X**, **Y**, **Z**) указанной системы координат (**CSys**) соответственно теку-

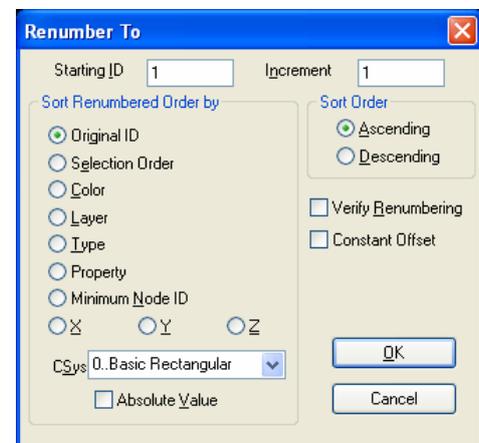


Рис.3.28. Диалоговая панель перенумерования КЭ

щему значению или по модулю (опция **Absolute Value**). Значения будут упорядочены по нарастанию (**Ascending**) или убыванию (**Descending**). Опция „**Verify Renumber**” позволяет просмотреть список соответствия, а „**Constant Offset**” – изменить все номера на величину, указанную как „**Starting ID**”.

3.5.9 Команды изменения параметров конечно-элементной сетки тела

Командой **Modify→Edit→Node...** можно изменить все параметры выбранных узлов (поочередно): координатную систему для вывода результатов, координаты, цвет изображения, уровень, запрещенные степени свободы и т.п.

Командами **Modify→Update Other→ (Node Definition CSys..., Output CSys... и Perm Constraint...)** можно изменить для выбранных узлов, соответственно, координатные системы: исходную и для вывода результатов, а также запрещенные степени свободы.

Командой **Modify→Edit→Element...** можно изменить некоторые параметры выбранных КЭ (поочередно): количество (очертания КЭ) и номера узлов, которые его создают, уровень „**Property**”.

Более значительное количество параметров для *нескольких* выбранных КЭ можно изменить одновременно с помощью группы команд **Modify→Update Elements→**: тип КЭ (**Type...**); описание КЭ (**Formulation...**, для программ **Nastran**, **FEMAP Structural**, **DYNA**, **ABAQUS**); „свойства” КЭ (**Property ID...**); материал КЭ (**Material ID...**); угол ориентации оси упругой симметрии характеристик анизотропного материала двумерных КЭ (**Material Angle...**); ориентацию (**Line Element Orientation...**), смещение (**Line Element Offsets...**) или степени свободы концов (**Beam/Bar Releases...**) сечения одномерных КЭ типов **BAR**, **BEAM** и **CURVED BEAM**; направление (**Line Element Reverse Direction...** и **Reverse Normal/Orient First Edge...**); порядок аппроксимации в КЭ (**Linear/Parabolic Order...**); проверить промежуточные узлы (**Midside Nodes...**); разделить четырехугольные КЭ на треугольные (**Split Quads...**); изменить толщину или смещение двумерных КЭ (**Adjust Plate Thickness/Offset...**).

Здесь большинство параметров и действий знакомы. Приведем лишь дополнительные сведения.

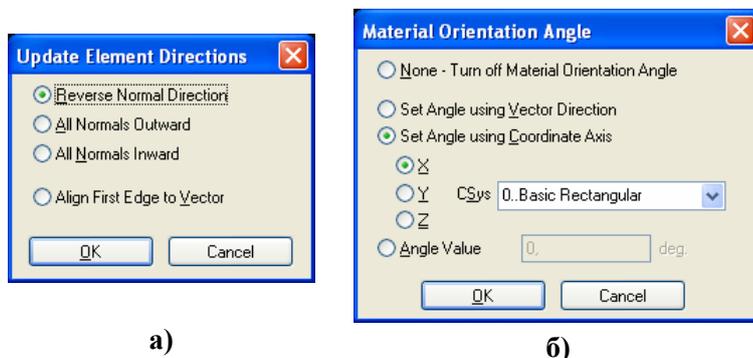


Рис.3.29. Диалоговые панели изменения:

а) – направления КЭ; б) – ориентации материала в КЭ

или „**All Normals Inward**”. Все внешние или внутренние нормали на сторонах выбранных КЭ будут согласованы;

- „**Align First Edge to Vector**”. Порядок нумерации узлов в КЭ изменится так, чтобы первое ребро КЭ (с узлами позиций 1 и 2) было сориентировано в направлении указанного вектора.

Угол ориентации оси упругой симметрии характеристик анизотропного материала двумерных КЭ (**Material Angle...**) может изменяться (см. рис.3.29-б): вдоль осей КЭ (**None – Turn of Material Orientation Angle**), указывается вектором (**Set Angle Using Vector Direction**), вдоль глобальных координат (**Set Angle Using Coordinate Axis**) или углом ТИТА (**Angle Value**, см. Приложение 3).

Направление (**Reverse Normal/Orient First Edge...**) в двумерных КЭ можно изменять с помощью опций (см. рис.3.29-а):

- „**Reverse Normal Direction**”. Порядок нумерации узлов в КЭ изменяется таким образом, что двумерные переворачиваются „кверху дном” („inside-out”). **Внимание:** если к КЭ была приложена нагрузка, направление ее действия изменится на противоположное;

- „**All Normals Outward**”

При изменении порядка аппроксимации в КЭ (**Linear/Parabolic Order...**) на второй (**Parabolic Element**) автоматически создаются новые узлы, а при изменении на первый (**Linear Element**) промежуточные узлы удаляются только из КЭ. **Внимание:** поэтому в обоих случаях необходимо потом дать команду на удаление избыточных узлов (**Delete→Model→Nodes...**) и нахождение и соединение совпадающих узлов (**Tools→Check→Coincident Nodes...**).

По команде (**Midside Nodes...**) проверяются и корректируются (при необходимости) положения (координаты) промежуточных узлов. **Внимание:** промежуточные узлы, что лежали на *криволинейной* поверхности, займут новое, действительное промежуточное (между угловыми узлами) положение, поэтому точность аппроксимации геометрии криволинейной поверхности снизится.

На диалоговой панели (см. рис.3.30), что вызывается командой **Adjust Plate Thickness / Offset...**, указывается параметр КЭ, который изменяется: толщина (**Thickness**) или смещение (**Offset**). По методу „**Vary Between Nodes**” указанные значения (**Value**) изменяются от узла (**From Node**) к другим узлам КЭ линейно, пропорционально расстоянию между этим узлом и узлом в поле „**To Node**”; по методу „**Equations or Constant**” переменная „**i**” указывает на номер узла или КЭ при перемене толщины или смещения соответственно.

Если установлена опция „**Average for Each Element**”, то толщина рассчитывается относительно координаты центра КЭ и назначается всем узлам КЭ одинаковой, если нет – все узлы могут иметь свои значения. В секции „**Limits (Blank to Skip)**” можно указать точность вычисления (**Tolerance**), минимальные и максимальные значения, которые могут подвергаться модификации. При выполнении этой команды будут создаваться новые „**Property**”, с одинаковыми названиями, но под разными номерами.

Для КЭ типа **BEAM** первого порядка аппроксимации есть еще команда **Modify→Update Elements→Beam Warping...** (искривление балки, см. рис.3.31-а). Если после команды выбрано несколько КЭ, то будет активной только секция „**Add/Modify Warping**” с опциями: „**None**” (удалить точки деформирования из концов выбранных КЭ), „**Continuous**” (создать узлы/скалярные точки (на концах КЭ) таким образом, чтобы изгиб был непрерывным), „**All Continuous**” (как предыдущая, но дополнительно это свойство переходит на КЭ, сопредельные с выбранными), „**Discontinuous**” (отменить непрерывность), а также радиокнопками „**Node Type**”, которые могут выбираться как „**Node**” (узлы) или „**Scalar Point**” (скалярные точки). Если после команды выбран один КЭ, то будет активной и секция „**Edit Single**” с опцией „**Edit Warping DOF**”, которая позволяет назначить номера узлов для „**EndA**” и „**EndB**” (т.е. на концах КЭ).

Команда **Modify→Update Element→Remove Cross Section** позволяет исправить „**Property**” КЭ типа **BEAM** или **BAR** с иным образом заданными осями сечения, которые были получены из файла результатов от другой процессорной программы (как КЭ типа

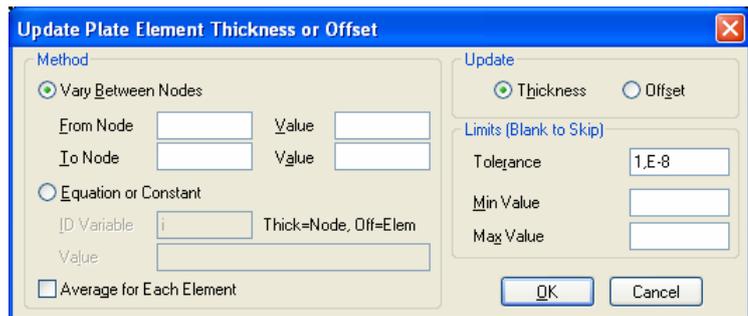


Рис.3.30. Диалоговая панель изменения толщины или смещения в двумерных КЭ



а)



б)

Рис.3.31. Диалоговые панели: а) – редактирования искривления балки; б) – задания коэффициента температурного расширения

PBEAML или **PBARL**). Это касается значений напряжений в точках сечения. Нуждается только в выборе КЭ.

Команда **Modify**→**Update Element**→**Rigid Thermal Expansion...** позволяет изменить во всех выбранных КЭ типа **RIGID** значение коэффициента температурного расширения. После выбора КЭ появляется диалоговая панель „**Update Rigid Element**” (см. рис.3.31-б), где, кроме поля для коэффициента, есть еще кнопка „**Material...**”, которая позволяет выбрать материал, из которого будет введено новое значение коэффициента для КЭ типа **RIGID**.

3.6 Контроль параметров конечно-элементной модели тела

После создания более или менее сложной КЭС желательно провести контроль ее параметров. Если этого не сделать, можно совсем не получить результатов расчетов (фатальные ошибки) или получить некачественные результаты, например, локальные концентрации напряжений там, где их не должно быть. Это может быть следствием наличия совпадающих узлов и КЭ, разорванной КЭС, почти вырожденных КЭ, ошибок при задании характеристик материалов, свойств КЭ и т.п. (ошибки в начальных и граничных условиях тоже возможны, но здесь их не рассматриваем). Итак, контроль параметров созданной КЭС – очень полезная процедура.

3.6.1 Контроль функций, характеристик материалов и свойств конечных элементов

Функции, характеристики материалов и „свойства” (**Property**) КЭ можно просмотреть в *списке*: с помощью команды **List**→**Model**→ (**Function...**, **Material...** или **Property...**) выбрать все (**Select All**) или часть, получить и просмотреть список и решить, есть ли в списке лишние наборы (запомнить их **ID**), правильные ли в них значения.

Если есть лишние – их желательно удалить: дать команду **Delete**→**Model**→ (**Function...**, **Material...** или **Property...**), указать **ID** удаляемого набора (выбрать все), удалить.

Для исправления ошибок в значениях есть команда **Modify**→**Edit**→ (**Function...**, **Material...** или **Property...**): указать **ID** редактируемого набора, провести исправления.

3.6.2 Контроль совпадающих узлов и конечных элементов

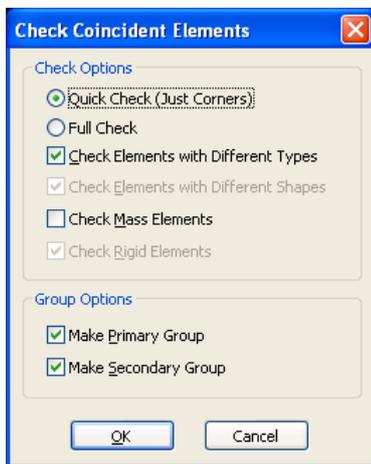


Рис.3.32. Диалоговая панель контроля совпадающих КЭ

Контроль совпадающих узлов проводится аналогично описанному в Разделе 2.2.6.3 для точек. Добавим, что на панели „**Check/Merge Coincident**” (см. рис.2.27-а) для узлов активен список „**Move To**” с такими значениями: „**Current Location**” (сохранить местоположение узла), „**Lower ID**” (сохранить узел (из совпадающих) с самым меньшим номером), „**Higher ID**” (сохранить узел (из совпадающих) с самым большим номером), „**Midpoint**” (переместить сохраненный узел в среднее меж совпадающими узлами положение).

Внимание: целесообразно сначала просмотреть список совпадающих узлов, лишь потом принимать решение об их объединении.

Совпадающие КЭ – это КЭ, что имеют одинаковый перечень узлов. Контроль таких КЭ имеет некоторые особенности. Командой **Tools**→**Check**→**Coincident Elem...** (выбрать все КЭ), вызывается диалоговая панель (см. рис.3.32), на которой

есть опции „**Check Elements with Different Types**”, „**Check Elements with Different Shapes**” и „**Check Mass Elements**” (проверять КЭ разных типов, разной формы и массовые соответственно). Списки совпадающих КЭ можно просто просмотреть или, установив опции „**Make Primary Group**” и „**Make Secondary Group**” (создать первичную и вторичную группы), внести в группы. Первичная группа содержит наименьшие номера совпадающих КЭ, вторичная – последние. Эту вторичную группу КЭ можно удалить целиком командой **Delete**→**Group...** (указать **ID** группы). Отдельные КЭ можно удалять командой **Delete**→**Model**→**Element...**

3.6.3 Контроль расположения узлов на заданной плоскости

Командой **Tools**→**Check**→**Planar...** сначала вызывается стандартная диалоговая панель для выбора узлов, потом появляется панель „**Check Planarity of Nodes**” (см. рис.3.33-а). На ней указывается максимально допустимое расстояние узлов от плоскости (**Max Allowable Distance from Plane**). Если выбрать опцию „**Move Nodes Closer than Allowable Distance onto Plane**”, то все узлы, расположенные не дальше указанного расстояния, будут спроектированы на плоскость. Плоскость задается автоматически тремя первыми выбранными узлами (не должны лежать на линии), или в стандартном диалоге, когда установлена опция „**Specify Plane Manually**”.

3.6.4 Контроль геометрических параметров конечных элементов

Командой **Tools**→**Check**→**Element Quality...** (качество КЭ) сначала вызывается стандартная диалоговая панель для выбора КЭ, потом появляется панель „**Check Element Quality**” (см. рис.3.33-б). На ней можно назначить к проверке геометрические параметры КЭ и установить предельные значения:

- „**Aspect Ratio**”: отношение наиболее длинного ребра КЭ к кратчайшему (значение 100:1 и больше вызывает фатальную ошибку при решении задачи; значение 10:1 обеспечивает удовлетворительные, а 1:1 – наилучшие результаты);

- „**Taper**” (только для КЭ с четырехугольными гранями): отношение противоположных ребер (длинного к менее короткому), так называемое сужение;

- „**Alternate Taper**” = $\max \{ (A_i - A_{cp}) / A_{cp} \}$, где A_i – площади 4-х треугольников (см. рис.3.34-а), A_{cp} – средняя площадь этих треугольников (только для КЭ с четырехугольными гранями);

- „**Internal Angles**”: отклонение внутренних углов от оптимальных (от 60 градусов для треугольных и от 90 градусов для четырехугольных граней КЭ);

- „**Warping**” (искривление: максимальный угол между нормальными к центрам треугольников на четырехугольных гранях КЭ (см. рис.3.34-б);

- „**Nastran Warping**” (искривление: отношение отклонений узлов 4-х угольного двумерного КЭ к сумме диагоналей. Если КЭ не искривлен, то результат равен нулю;

- „**Tet Collapse**” (вырождение тетраэдра в виде иглообразности или сплюсненности): наибольшее отношение между величинами всех 4-х высот тетраэдра (КЭ), см. рис.3.34-в;

- „**Jacobian**” (якобиан): сравнение формы реального КЭ с формой идеального КЭ соответствующего типа (только для КЭ типа **Shell** (3, 4 или 8 узлов), **Tetrahedral** (4 или 10 узлов), **Hexahedral** (8 или 20 узлов). В КЭ **Tetrahedral** и **Hexahedral** положение промежуточных узлов в анализе не учитывается. Идеальный показатель = 0.0, наихудший = 1.0 (нулевая площадь или объем КЭ), а также 2.0. **Внимание:** значения 1.0 и 2.0 указывают, что фатальная

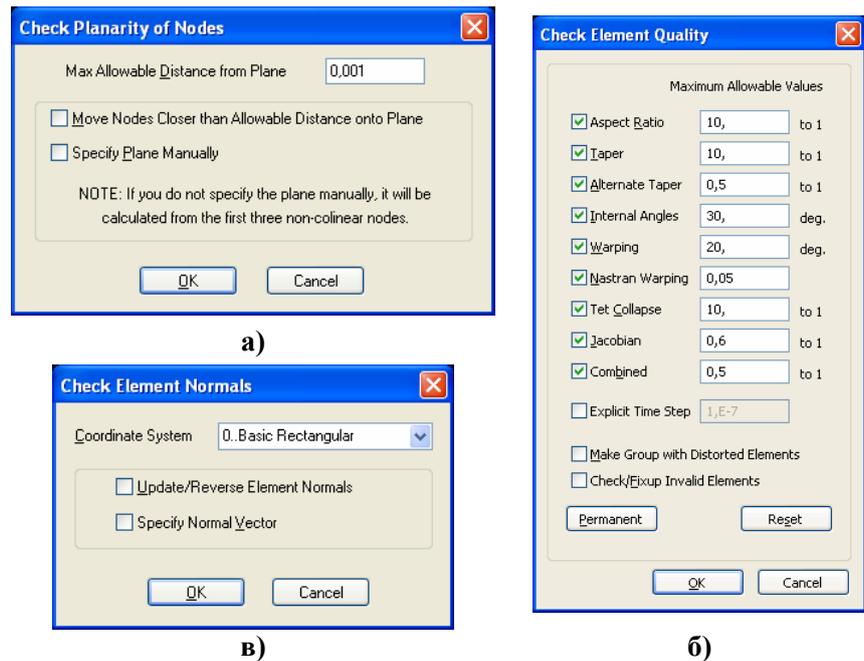


Рис.3.33. Вид диалоговых панелей контроля: а) – плоскостности поверхности КЭ; б) – геометрических параметров КЭ; в) – направлений нормалей к поверхностям двумерных КЭ

ошибка при попытке проведения счета задачи гарантирована. При значении 2.0 КЭ определен не полностью, вывернут наизнанку (отрицательная площадь или объем), очень искривлен или имеет промежуточный узел, слишком сдвинутый в направлении углового узла;

- „**Combined**” (комбинированный, по 7-ми вышеприведенным показателям): значение от 0.0 (хорошо) до 1.0 (плохо).

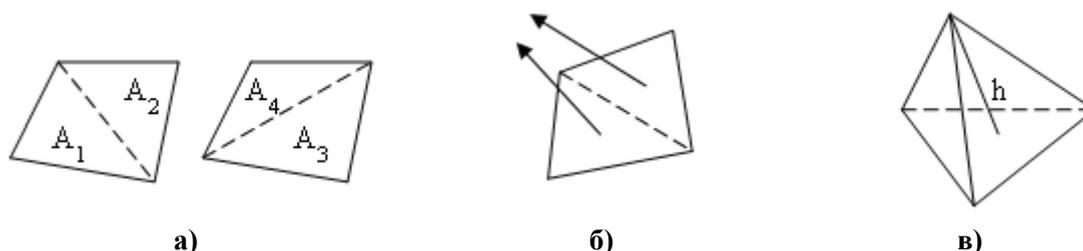


Рис.3.34. Контроль геометрических параметров конечных элементов: а) – „Alternate Taper”; б) – „Warping”; в) – „Tet Collapse”

Если установить опцию „**Make Group with Distorted Elements**”, будет создана группа из КЭ, параметры геометрии которых не удовлетворяют указанным критериям (для дальнейшего исправления). Опция „**Check/Fixup Invalid Elements**” позволяет провести дополнительную проверку качества КЭ (нулевая длина ребра, отсутствие узлов, соответствие типа, двойные противоречивые назначения и т.п.). Опция „**Explicit Time Step...**” позволяет оценить соответствие временного шага размерам КЭ в динамических процессах с точки зрения прохождения упругих волн.

Отчет о выявленных недостатках КЭС появится на поле текстовых сообщений.

Командой **Tools→Check→Normals...** (нормали) сначала вызывается стандартная диалоговая панель для выбора КЭ (только двумерные), потом появляется панель „**Check Element Normals**” (см. рис.3.33-в). Опция „**Update/Reverse Element Normals**” указывает на необходимость изменить направление нормали к грани КЭ в противоположную сторону. Желательное направление нормали является тем, что имеет выбранный КЭ с наименьшим ID, или указывается дополнительно вектором после включения опции „**Specify Normal Vector**”. Отчет о проведенных изменениях появится на поле текстовых сообщений.

Через диалоговую панель „**Geometry/Model**” (см. Раздел 1.5 и рис.1.7-б) можно настроить (для всех вновь открывающихся проектов), какие геометрические параметры КЭ и какие предельные значения будут контролироваться.

Примечание 3.1. Для двумерных и трехмерных задач (тел) преимущество надо отдавать КЭ второго порядка аппроксимации с четырехугольными гранями, с приблизительно одинаковыми размерами ребер в КЭ, с углами, приближенными к оптимальным. Второй порядок аппроксимации приводит к увеличению времени для решения системы алгебраических уравнений, порождаемой методом конечных элементов, но при одинаковом количестве КЭ повышает точность полученных результатов (доказано, что так называемая p -сходимость быстрее n -сходимости).

Примечание 3.2. К сожалению, успешное прохождение контроля геометрических параметров конечных элементов, рассмотренное в данном разделе, не гарантирует от фатальной ошибки при попытке решить краевую задачу. Причина в том, что в Femap при контроле, для ускорения процесса контроля, используется не вся информация об КЭ, а лишь основная, в частности, не используются промежуточные узлы (например, в ANSYS контроль более качественный).