

Розділ 2

СТВОРЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ТІЛА

Створення геометричної моделі – важливий етап повного циклу проведення обчислення елемента конструкції.

У FEMAP 8.2 можна застосовувати одне з двох ядер (наборів команд) геометричного моделювання: **Parasolid** (фірми Electronic Data Systems Corporation (EDS), версії 14) або **ACIS** (фірми Spatial Technology, Inc., версії 8.0). Ці ядра також застосовуються в інших програмах: Unigraphics, SolidWorks, SolidEdge (ядро **Parasolid**); AutoCAD, Mechanical Desktop (ядро **ACIS**) тощо. Це забезпечує сумісність FEMAP зі вказаними та іншими програмами. За замовчанням (тобто, заздалегідь встановлене значення) у FEMAP застосовується ядро **Parasolid**, при необхідності його можна замінити на ядро **ACIS** у діалогові „**Geometry Engine**” (команда **Tools→Advanced Geometry...**).

Геометрична модель у FEMAP може мати такі об'єкти: точка, лінія (пряма або крива), поверхня (прямолінійна або криволінійна), об'єм та „тверде” тіло (різновид об'єму). Лінія спирається на точки; поверхня – на лінії та точки; об'єм – на поверхні, лінії та точки. Поверхня повинна мати замкнутий контур, створений лініями; об'єм – загальну замкнуту поверхню, створену з єдиної (куля, тор та інші) або декількох поверхонь.

Увага: неможливо видалити будь-який об'єкт, що є основою для іншого. Цю властивість можна рекомендувати для очищення моделі від вже непотрібних або помилково введених об'єктів нижчого рівня. Наприклад, після створення кривих (ліній) можна дати команду: видалити всі точки (**Delete→Geometry→Point... →Select All→OK**); після створення поверхні (поверхонь) – видалити всі лінії (**Delete→Geometry→Curve... →Select All→OK**) та потім – точки; після створення об'єму (об'ємів) – всі поверхні (**Delete→Geometry→Surface... →Select All→OK**), потім всі криві, потім всі точки.

Якщо ініціювати якийсь діалог, в якому потрібно обирати об'єкти конкретного класу (точки, лінії, поверхні, об'єми тощо), то кожний об'єкт цього типу, який є у моделі, на екрані монітору змінює зображення (виділяється, обирається), коли *мигтучий* курсор поміщено у відповідному полі діалогової панелі (для введення **ID**), а курсор „*миші*” знайде саме цей об'єкт. Тоді достатньо натиснути на ліву кнопку „миші” або клавішу „**Enter**”, щоб **ID** цього об'єкту помістився у відведене для **ID** поле на діалоговій панелі. Аналогічно, якщо потрібно ввести координати точки тіла, то (окрім введення з клавіатури) достатньо помістити *мигтучий* курсор у одно з полів для координат, навести курсор „*миші*” на відповідне місце на робочому полі та натиснути на ліву кнопку „миші” або клавішу „**Enter**”.

Після ініціації електронної кнопки  (**View Style**) на панелі динамічного меню, що з'являється (див. рис.2.1), можна обрати стиль зображення геометричної моделі:

- каркасний (**Wireframe**): зображаються точки та лінії; поверхні позначаються додатковими тонкими лініями;
- полігональний поверхневий (**Hidden** – схований): зображаються тільки границі поверхонь, причому тільки видимі;
- зображення моделі – як тверде тіло (**Solid**): заповнене кольором тоноване тривимірне, у досконалому графічному режимі (див. Розділ 1.5).

Три опції: „**Render**” (досконалий графічний режим), „**Fill**” (заповнення поверхні кольором) та „**Shading**” (тонування поверхонь) дозволяють *окремо* включати або виключати вказані інструменти.

Є два варіанта створення геометричної моделі у FEMAP:

- імпорт вже повністю або частково готової моделі та подальше її редагування;
- створення моделі „з нуля”.



Рис.2.1

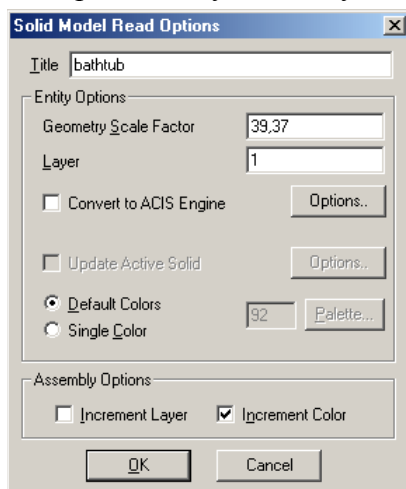
2.1. Імпорт та експорт геометричної моделі тіла

Щоб імпортувати об'єкт, необхідно у FEMAP мати *відкритий* проект: або зовсім новий (**File**→**New**), або поточний. Об'єкт, що імпортується, додається до того, що є у відкритому проекті, причому як додатковий та у активний рівень (про рівні див. у Розділі 1.7.1). Іноді зображення на робочому полі не змінюється. Щоб побачити усі об'єкти, можна рекомендувати команду „**Ctrl+G**” (регенерація всієї моделі), або викликати панель „**View Select**” (клавішею „**F5**”, або кнопкою ) , обрати для „**Model Style**” інший варіант моделі зображення, наприклад, „**Draw Model**”.

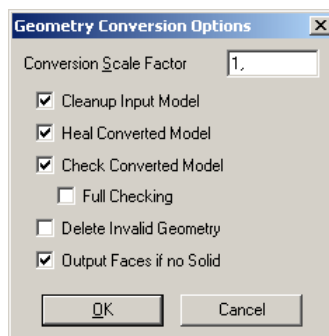
Для імпорту геометричної моделі викликається діалог „**Geometry File to Import**” (команда **File**→**Import**→**Geometry...**). Призначається тип формату файлів: **All Geometry** (усі варіанти) або конкретний тип: **ACIS** (*.SAT), **Parasolid** (*.X_T), **IGES** (*.IGS), **Stereolithography** (*.STL), **AutoCAD DXF** (*.DXF), **STEP** (*.STP), **VDA** (*.VDA), **I-DEAS** (*.IDI), **Catia** (*.MDL, *.EXP, *.DLV), **Pro/E** (*.PRT), **Solid Edge** (*.PAR) або **Unigraphics** (*.PRT). У файловій системі ПЕОМ знаходиться потрібний файл, дається команда „**Open**”.

Увага: імена файлів не повинні мати *кириличних* знаків; *версії* форматів файлів повинні відповідати можливостям FEMAP 8.2, рік розробки якого – 2002.

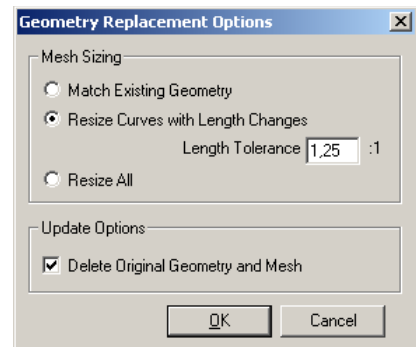
На діалоговій панелі „**Solid Model Read Option**” (див. рис.2.2-а), яка з'являється при імпортуванні геометричної моделі **Parasolid** (*.X_T), потрібно звернути увагу на значення коефіцієнту „**Solid Geometry Scale factor**” (коефіцієнту масштабу геометрії). За замовчанням він дорівнює числу **39.37**. Якщо файл, що імпортується, створено програмою FEMAP, то змінювати його не треба. Але якщо, наприклад, при імпортуванні файлу, створеного програмою **SolidWorks**, його не змінити, то міліметри будуть перетворені в дюйми. Щоб цього не відбувалося, потрібно задати величину коефіцієнта рівною 10^{3n} , де n – ціле число (... , -1, 0, 1, ...). Ще можна змінити назву проекту; номер рівня (**Layer**), до якого проводити імпорт (якщо такого рівня не було, він буде створений автоматично); колір зображення тощо.



а)



б)



в)

Рис.2.2. Діалогові панелі: а) – імпортуванні геометричної моделі Parasolid; б) – конвертування її в ядро ACIS; в) – оновлення попередньої моделі

Якщо потрібно, можна конвертувати модель до ядра **ACIS**. Для цього встановлюється опція „**Convert to ACIS Engine**”, а за допомогою кнопки „**Options**” можна викликати діалогову панель „**Geometry Conversion Options**” (див. рис.2.2-б) з опціями: „**Conversion Scale Factor**” – коефіцієнт масштабування при конвертуванні (створює можливість помістити геометричну модель у обмежений розмір середовища ACIS: до 500 одиниць); „**Clean Input Model**” – знайти та видалити надлишкові частини моделі; „**Heal Converted Model**” – „лікувати” щілини; „**Check Converted Model**” – перевірити конвертовану модель, при наявності проблем – повідомити; „**Full Checking**” – повна перевірка; „**Delete Invalid Geometry**” – видалити дефекту геометрію; „**Output Faces if no Solids**” – зберегти поверхні, що не створюють „тверде тіло”;

Якщо імпорт геометрії проводиться у проект, який вже має „тверде” тіло (**Solid**), то буде доступною опція „**Update Active Solid**” (оновити активне тверде тіло) та відповідна кнопка „**Options**”, яка викликає діалогову панель „**Geometry Replacement Options**” (див. рис.2.2-в) з опціями, що призначаються для „старої” моделі: „**Match Existing Geometry**” (не змінювати розмітку сітки CE), „**Resize Curves with Length Changes**” (змінити розмітку сітки CE на кривих, якщо довжини ліній („старого” та „нового” проектів) будуть відрізнятися (змінені) більше (в ту або іншу сторону) ніж вказана у полі „**Length Tolerance**” пропорція) або „**Resize All**” (оновити всю початкову сітку). **Увага:** таке оновлення проводиться тільки для *активного* „твердого” тіла: однакові (за типом та **ID**) об’єкти замінюються, при цьому на них переносяться всі призначення (розмітка, граничні умови тощо), але сітку CE ще потрібно створювати. Ще одна опція: „**Delete Original Geometry and Mesh**” дозволяє видалити всю „стару” геометричну модель. Ця можливість оновлення „твердого” тіла передбачена для прискорення редагування геометрії тіла із застосуванням іншої програми геометричного моделювання з ядром **Parasolid**.

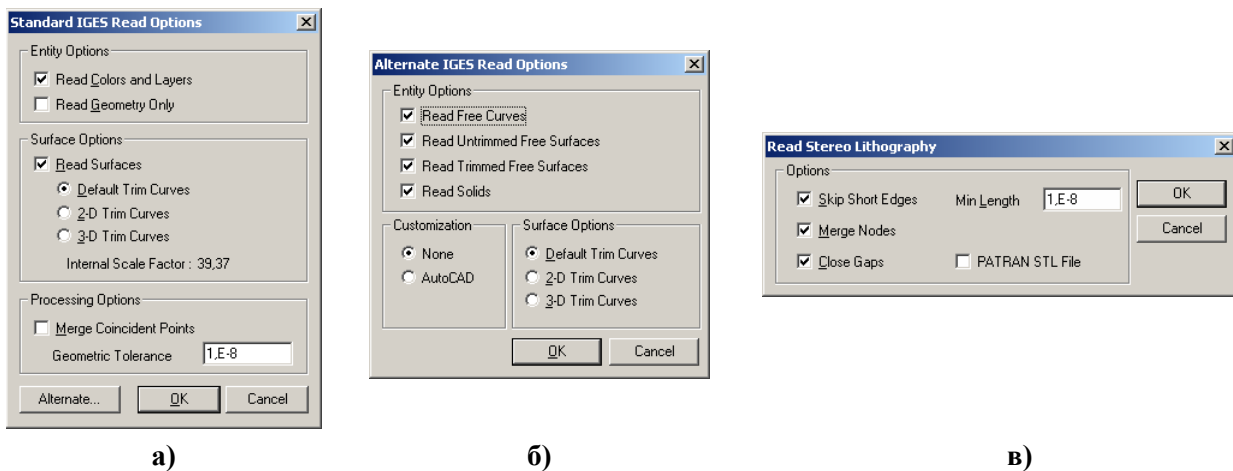


Рис.2.3. Діалогові панелі імпортуванні геометричної моделі: а) – IGES стандартне; б) - IGES альтернативне; в) – Stereo Lithography

При імпортуванні геометрії із файлів *.IGS імпортовані об’єкти, по-перше, повинні „вписатися” у куб розміром сторони 500 одиниць (інакше імпортована модель буде проблемною). Тому потрібно заздалегідь підрахувати необхідне значення коефіцієнту „**Internal Scale factor**” (скільки одиниць довжини вихідної моделі поміщується в одиниці FEMAP) та встановити його (див. Розділ 1.5). **Увага:** при цьому відстані між елементами моделі, яке заміряється за допомогою команди **Tools→Distance...**, не змінюється. По-друге, у цьому форматі „тверді тіла” (**Solid**) можуть не передаватися, та й з поверхнями можуть бути проблеми. Тому на діалоговій панелі „**IGES Read Option**”, яка з’являється при імпортуванні (див. рис.2.3-а), є три варіанта перетворення („обрізання”) поверхонь: „**Default Trim Curves**”, „**2-D Trim Curves**” та „**3-D Trim Curves**”, а також – альтернативні призначення (див. рис.2.3-б), тобто можна підібрати кращий варіант. Можна також встановити опцію об’єднання точок, що співпадають (**Merge Coincident Points**) та допуск на об’єднання (**Geometric Tolerance**). Якщо й після перетворень „тверді тіла” не з’явилися, то між поверхнями можуть бути щілини, тому необхідно задати команду для „зшивання” поверхонь: **Geometry→Solids→Stitch...** та вказати допуск на „зшивання”. Тільки потім з’являється можливість об’явити об’єм: **Geometry→Solid→Activate**. Імпортування завжди проводиться у ядро **Parasolid**, навіть якщо було встановлено ядро **ACIS**.

При імпортуванні геометрії із файлів *.STL імпортовані поверхні та об’єми описуються вузлами та трикутними поверхневими (двовимірними) скінченними елементами. На діалоговій панелі „**Read Stereo Lithography**” (див. рис.2.3-в), яка з’являється, доцільно встановити опції „**Skip Short Edges**” (відкинути короткі кромки за вказаним розміром), „**Merge Nodes**” (об’єднати вузли, що співпадають) та „**Close Gaps**” (знищити зазори). При необхідності встановлюється опція „**PATRAN STL File** (STL-файл програми **PATRAN**). Потім поверхне-

ва скінченно-елементна сітка може бути змінена командою **Mesh→Remesh...**, а об'ємна – створена командою **Mesh→Geometry→Solid from Elements...** (докладніше див. Розділ 3.6.3).

При імпортуванні геометрії із файлів ***.DXF** (файли програми AutoCAD) імпортовані поверхні та об'єми описуються каркасним чином: лініями, поверхнями та/або скінченими елементами. На діалоговій панелі (див. рис.2.4) можна використовувати такі опції: „**Read Text**” (читати текст), „**Read 3Dfaces as Elements**” (читати тривимірні грані як елементи), „**Read Polygon Meshes as Elements**” (читати комірки багатокутової сітки як елементи), „**Read Blocked Entity References**” (читати блоки), „**Read Trace Boundaries**” (читати границі смуги), „**Create Trace Centerlines**” (створити осі смуг) та „**Read Colors and Layers**” (читати кольори та рівні), причому у полі „**First Layer Number**” можна змінювати номер початкового рівня.

Опція „**Merge Coincident Points**” вказує на необхідність об'єднання точок, що співпадають із заданою точністю (значення у полі **Maximum Distance**). **Увага:** FEMAP 8.2 не зчитує зміст файлів формату ***.DXF** у повному обсязі, тобто адекватно.

При експорті геометричної моделі командою **File→Export→Geometry...** викликається діалогова панель „**Translate**” (див. рис.2.5-а), де обирається формат (залежить від того, яке ядро застосовувалося: для **Parasolid** це Parasolid XMT, Stereolithography, VRLM, STEP, IGES; для **ACIS** це SAT, Stereolithography, VRLM) та його версія. **Увага:** у форматі STEP експортуються тільки „тверді” тіла; у форматі Stereolithography – тільки двовимірні та тривимірні CE.

У випадку експорту у форматі VRML ще з'явиться діалогова панель „**VRML Export**” (див. рис.2.5-б), де можна вказати, що зберігати: „тверде” тіло (**Solid**) або сітку об'ємних скінчених елементів (**Mesh**). Для сітки CE ще можна вивести інформацію про zdeформовану модель (**Deformed**) та контурні призначення (**Contour**). У секції „**Color**” можна зробити такі призначення: „**Color Model**” (кольори моделі) „**Color Single**” (єдиний колір) та „**Color Background**” (колір фону). Останні два кольори можна ввести з клавіатури або за допомогою панелі „**Color Palette**” (див. рис.1.8-б), яка викликається кнопкою „**Palette**”.

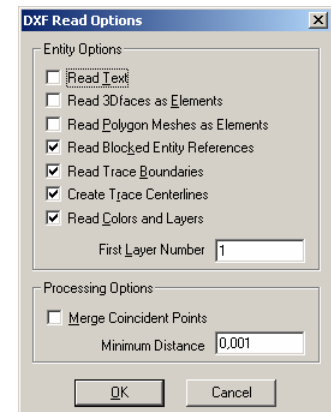
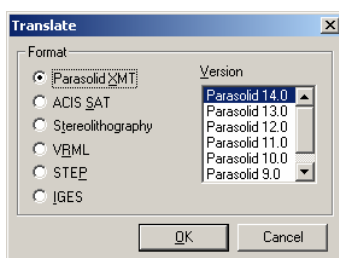
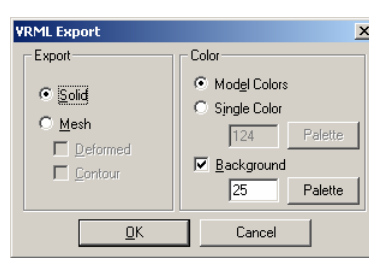


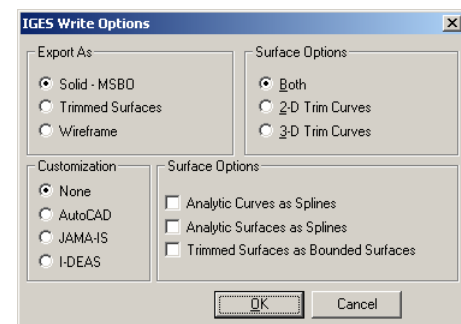
Рис.2.4. Діалогова панель імпортування геометричної моделі ***.DXF**



а)



б)



в)

Рис.2.5. Діалогові панелі експортування геометричної моделі у файли:

а) – основна панель (обрано формат Parasolid); б) – додаткова для формату ACIS SAT;

в) – додаткова для формату IGES

У випадку експорту у форматі IGES на панелі „**Translate**” з'являється кнопка „**Options...**”, яка викликає іншу панель – „**IGES Write Options**” (див. рис.2.5-в). У секції „**Export As**” встановлюється спосіб експортування геометрії: як „тверде” тіло (**Solids**), поверхнями типу 144 (**Trimmed Surfaces**) або каркасом (**Wireframe**). У секції „**Surface Options**” можна вказати, на основі яких кривих повинні описуватися поверхні: плоских (**2-D Trim Curves**), неплоских (**3-D Trim Curves**) або на обох видах (**Both**); можна встановити опції „**Analytic Curves as Splines**” та/або „**Analytic Surfaces as Splines**” (описувати криві/поверхні сплайна-

ми), „Trimmed Surfaces as Bounded Surfaces” (представити поверхні типу 144 (**Trimmed Surfaces**)) як поверхні типу 143 (**Bounded Surfaces**)). У секції „Customization” можна обрати один з варіантів CAD-систем, щоб FEMAP міг урахувати специфіку цих систем.

Для перегляду результатів експорту можна застосувати команду імпорту геометрії FEMAP (не всі формати), а також різні програми, наприклад, SolidView, SolidWorks, AutoCAD, Unigraphics тощо.

2.2. Створення геометричної моделі тіла

Починається новий проект командою **File**→**New** або **View**→**New...** (останньою можна створити декілька вікон). З'являється зображення глобальних осей та робочої площини.

2.2.1. Системи координат, орієнтація і розміри зображення, робоча площина

Для встановлення необхідної *глобальної системи координат* необхідно командою **Tools**→**Parameters...** викликати діалогову панель „Model Parameters” та обрати у списку „Coord Sys” потрібний варіант системи: декартову, циліндричну або сферичну (див. рис.2.6), причому мати на увазі, що в останніх двох системах кути задаються у градусах.

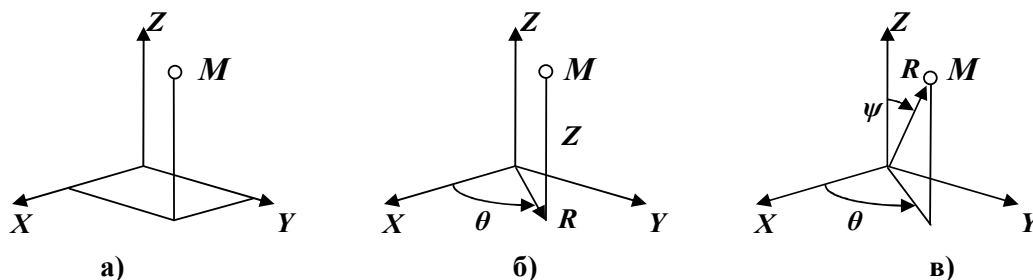


Рис.2.6. Системи координат: а) – декартова; б) – циліндрична; в) – сферична

Примітка. Іноді потрібна система координат, яка має іншу орієнтацію осей, ніж глобальна. Інструменти FEMAP для цього описані у Розділі 6.1.2.1.

У процесі побудови геометрії доволі часто необхідно зміщувати, повертати або масштабувати зображення на екрані. Усі ці дії можна виконувати після ініціації електронної кнопки  (під головним меню, зліва). На діалоговій панелі „Dynamic Display”, що з'явиться (див. рис.2.7-а), є радіокнопки для переключення режимів: „Pan” (переміщення), „Zoom” (масштабування) та „Rotate” (обертання); а також підказки, як швидко обирати різні режими без радіокнопок: натиснути клавішу „Alt” – обертання навколо осі Z; клавішу „Ctrl” – переміщення; клавішу „Shift” – масштабування (додатково потрібно натиснути на ліву кнопку „миші” та рухати курсором по екрану). Є ще опції (кнопка „Options^”): „Single Axis” – одинична вісь; „Model Axes” – осі моделі; „AutoCenter” – автоматично помістити у центр; „Use Rotation Center” – використовувати центр обертання; „Rotation Center...” – вказати центр обертання; „Rotation Axis...” – вказати вісь обертання.

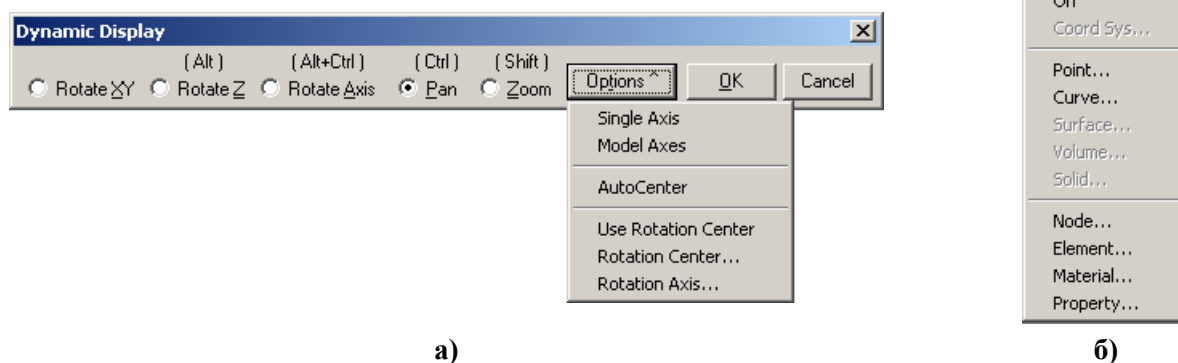


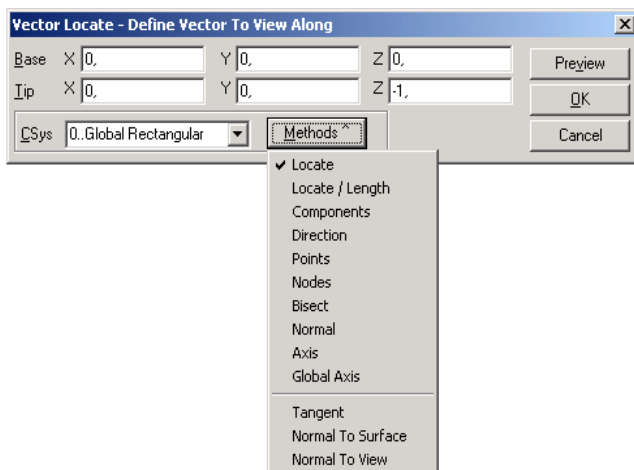
Рис.2.7. Діалогова панель динамічного керування геометричною моделлю з натиснутою кнопкою „Options^” (а); динамічна панель меню типів об'єктів (б)

Нагадаємо, що відображення будь-яких об'єктів, зокрема геометричних, можна змінити із застосуванням діалогової панелі „View Options” (командою **View**→**Options...**, або клаві-

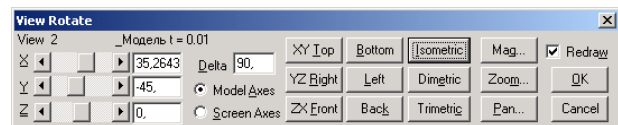
шею „F6”) – див. Розділ 1.5 та рис.1.9. Також нагадаємо, що за допомогою перемикача , що розташований у правій частині панелі стану (горизонтальна смуга понизу, той, що правіше) можна викликати динамічну панель меню (див. рис.2.7-б), на якій – обрати тип об’єкту (точки, лінії, поверхні, об’єми, скінченні елементи та їх вузли, матеріали тощо) щоб потім переглядати дані про обраний на робочому полі об’єкт цього типу.

Для повороту глобальних осей і всього зображення на робочому полі є й інші можливості:

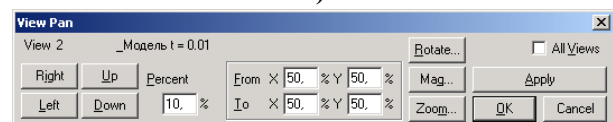
- група електронних кнопок     мнемонічного меню, розташованих нижче головного меню (див. рис.1.1). Ліва кнопка цієї групи змінює напрям повороту на протилежний;
- команда **View→Align By→Along Vector...** На діалоговій панелі, що з’явиться (див. рис.2.8-а), потрібно обрати координатну систему та метод, яким буде задаватися напрям вектора, вздовж якого буде розглядатися модель (на рис.2.8-а – **Locate**), потім ввести необхідні значення у поля, відповідні методу. Після призначень вектор можна побачити на екрані (кнопка „**Preview**”). Наприклад, у методі „**Locate**” у рядку „**Tip**” вводяться значення напрямних косинусів цього вектора, або пропорційних їм величин;
- команда **View→Rotate→Model...** (клавіша „F8”). На діалоговій панелі „**View Rotate**” (див. рис.2.8-б) можна або плавно (повзунками) або фіксовано (9-ма кнопками) встановити положення осей та зображення. З цієї панелі кнопкою „**Pan...**” викликається діалогова панель „**View Pan**” (див. рис.2.8-в) для зміни положення зображення на робочому столі; кнопкою „**Mag...**” – панель „**View Magnify**” (див. рис.2.8-г) для змінювання масштабу зображення (зокрема, кнопкою „**Fill View**” – повне зображення); кнопкою „**Zoom...**” – панель „**View Zoom**” (див. рис.2.8-д) для призначення прямокутної області на екрані, зображення з якої буде збільшено (**Zoom In**) або зменшено (**Zoom Out**) пропорційно співвідношенню розмірів прямокутної області та робочого поля (аналог кнопки ).



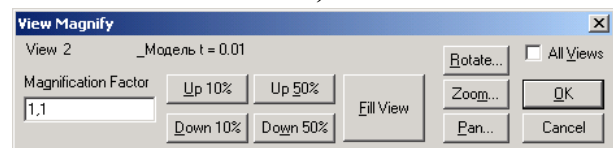
а)



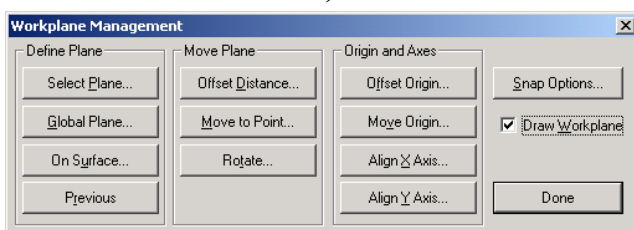
б)



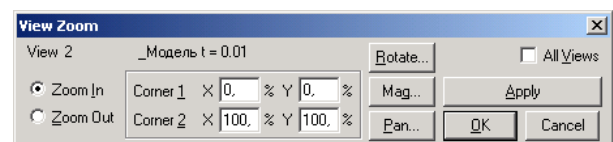
в)



г)



е)



д)

Рис.2.8. Діалогові панелі для: а) – завдання напрямку вектора; б) – повороту; в) – зміщення; г) – зміни масштабу; д) – „вирізання” зоні зображення; е) – налаштування робочої площини

Доволі часто виникає необхідність у зміні положення *робочої площини*. Нагадаємо (див. Вступ), що робоча площина (**Workplane**) – допоміжна площина з „самостійними” координатами X та Y. Її призначення – полегшення побудови геометричних об’єктів. Координати вве-

дених на робочій площині геометричних об'єктів автоматично перераховуються в поточну глобальну систему координат (**CSys**).

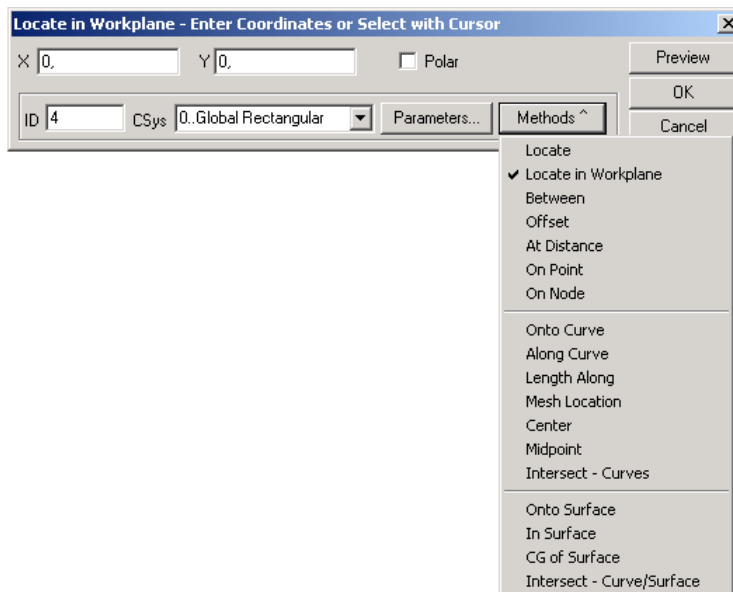
Для налаштування робочої площини та зміни її розташування викликається діалогова панель „**Workplane Management**” (клавішею „F2” або командою **Tools→Workplane...** або командою **Workplane...** після натиснення на праву кнопку „миші”) та ініціюється одна з кнопок (див. рис.2.8-е): „**Select Plane...**”, „**Global Plane**” або „**On Surface...**” (призначити положення робочої площини обраним способом); „**Offset Distance...**”, „**Move to Point...**” та „**Rotate...**” (її зміщення або повертання); „**Offset Origin...**” та „**Move Origin...**” (зміщення початку координат на робочій площині), „**Align X Axis...**” та „**Align Y Axis...**” (орієнтування координати **X** (або **Y**) робочої площини вздовж вектора, що буде вказаний). Якщо відмінити опцію „**Draw Workplane**”, то робоча площина на екрані не буде відображатися. Після ініціювання кнопки „**Snap Options...**” можна змінити оформлення робочої площини: крок, кількість рисок та стиль розмітки сітки тощо.

Для побудови геометричних об'єктів можна користуватися командами меню, відповідною панеллю з **Toolbox** (див. рис.1.2-б...е) та панеллю команд (див. рис.1.3-б...г).

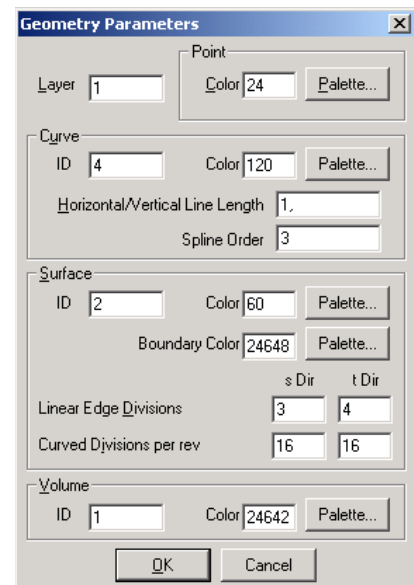
Увага: якщо після видалення будь-якого об'єкту він і надалі відображається на робочому полі, необхідно очистити файл збереження проекту (з розширенням імені **.mod**) командою **File→Rebuild...** (див. Розділ 1.4).

2.2.2. Введення точок

Точки звичайно вводять як опорні (елемент-основа) при створенні ліній та поверхонь. Точки можна вводити або окремим процесом (**Geometry→Point...**), або у процесі побудови лінії або поверхні. Наприклад, якщо потрібно задати ламану криву з декількох відрізків ліній, доцільно спочатку задати точки, потім проводити лінії через точки, що вже існують. Можна обрати такі методи (кнопка „**Methods**”) введення точки (див. рис.2.9-а):



а)



б)

Рис.2.9. Діалогові панелі: а) – для введення точок координатами, при обраному методі „**Locate in Workplane**”; б) – параметрів геометричних об'єктів

- двома координатами робочої площини (**Locate in Workplane**). Якщо встановити опцію „**Polar**”, координати точки будуть задаватися в полярній системі координат;
- трьома координатами в глобальній системі координат (**Locate**);
- посередині між двома обраними точками (**Between**);
- величинами зміщення від базової точки (**Offset**);
- на вказаній дистанції вздовж вектора (**At Distance**);
- на основі вже існуючих точки (**On Point**) або вузла (**On Node**);
- на кривій (**Onto Curve**) або на поверхні (**Onto Surface**);

- на вказаній дистанції (відсотки від довжини) від початку кривої (**Along Curve**);
- посередині кривої (**Center**) або прямої (**Midpoint**);
- на сітці (**Mesh Location**): точка отримує координати існуючої точки, найближчої до положення курсору у момент надавлювання на ліву кнопку „миші”;
- як точка перетину кривих (**Intersect – Curves**);
- в чотирьохкутній поверхні (**In Surface**): координати точки задаються параметрично, тобто частинами одиниці (**Param Loc**) вздовж координат **U** та **V** (їх початок – у куті);
- як точка перетину лінії з поверхнею (**Intersect – Curves/Surface**);
- від кінця вказаної кривої у напрямку початку цієї кривої на вказану відстань (**Length Along**);
- у геометричному центрі геометричної (не конструкційної, див. Розділ 2.2.4) поверхні (**CG of Surface**);

Кнопкою „**Parameters...**” викликається панель „**Geometry Parameters**” (див. рис.2.9-б) загального призначення. На ній можна змінити параметри точки, зокрема рівень (**Layer**) та колір зображення.

Заключні дії: або, встановивши курсор у відповідне вікно редагування, за допомогою курсору „миші” знайти відповідний об’єкт (він змінить вигляд – активізується) та натиснути на ліву кнопку „миші”, або за допомогою клавіатури ввести (відредагувати) необхідні значення координат або **ID** об’єктів.

Точки ще можна створювати операціями модифікації (однаковий для усіх команд початок **Modify**→ опускаємо) як результат:

- проектування існуючої точки (точок, вузла, вузлів) на вказану лінію або поверхню (**Project**→**Point onto Curve...** або **Project**→**Node onto Curve...**). **Увага:** вихідний об’єкт (точка, вузол, вузли) видаляється автоматично як вже непотрібний;
- переміщення у точку (**Move To...**), або у вказаному вектором напрямку (**Move By...**); опціями „**Update Coordinate**” вказується, які координати змінювати;
- повороту точки навколо вказаної осі, коли двома точками вказується кут повороту (**Rotate To...**);
- повороту точки навколо вказаної осі та одночасного її зміщення вздовж цієї осі (**Rotate By...**);
- поєднання операцій повороту та переміщення точки (**Align...**);
- масштабування координат точки (**Scale...**) за формулами типу $\bar{x} = x_0 + (x - x_0) * m_x$, де x_0 – координата базової точки, m_x – масштабний коефіцієнт;

Координати будь-якої точки можна просто редагувати (**Modify**→**Edit**→**Point...**). Ще точки можна поміщувати в різні рівні та групи (див. Розділ 1.7), робити з ними інші загальні операції модифікування (див. Розділ 2.2.6).

Коли точки вже непотрібні, їх можна видалити (**Delete**→**Geometry**→**Point...**).

2.2.3. Побудова ліній

Лінії можуть бути прямими або кривими. Криві лінії: окружність та її відрізки – дуги, а також побудовані сплайнами лінії. Можна користуватися командами меню, панелями інструментів і команд (див. рис.1.2-в та рис.1.3-б).

Докладні дані, зокрема зображення для кожного варіанту побудови ліній, можна отримати у „**Help**” MSC.vN4W: команда **Help**→**Help Topics F1**, вкладка **Contents**, розділ **Command Reference**→**Geometry**→**Creating Curves**.

2.2.3.1. Побудова прямих ліній

Прямі лінії можна проводити (однаковий для усіх команд початок **Geometry**→**Curve-Line**→ опускаємо):

- через дві точки, що створюються (**Coordinates...** чи **Project Points...**) або вже існують (**Points...**);
- через одну точку, вертикальну (**Vertical...**) або горизонтальну (**Horizontal...**) пряму, причому в обидві сторони від вказаної точки та зі загальною довжиною, що удвічі перевищує

встановлене значення на діалоговій панелі „**Geometry Parameters**” (викликається кнопкою „**Parameters**”). Вертикальна пряма паралельна глобальній осі **Y**, а горизонтальна – осі **X**;

- через точку, перпендикулярно до існуючої прямої лінії (**Perpendicular...**);
- паралельно існуючій прямій на вказаній відстані від неї (**Parallel...**);
- паралельно двом існуючим паралельним прямим посередині між ними (**Midline...**);

довжина лінії буде дорівнювати середньоарифметичному довжин опорних ліній;

- через точку під кутом до осі **X** (**At Angle...**);
- через точку під кутом до вказаної прямої лінії (**Angle to Curve...**);
- через точку та дотичною до кола (**Point and Tangent...**);
- дотичною до двох кіл (**Tangent...**);
- як контур прямокутника (**Rectangle...**): задаються два протилежних кута;
- як замкнута ламана лінія, тобто багатокутник (**Continuous...**);
- зі зміщенням від обраної існуючої прямої (**Offset...**);
- через точку паралельно вказаному вектору (**Vectored...**);

Відповідні цим командам інструменти можна ще викликати за допомогою панелі **Toolbox** (див. рис.1.2-в) або панелі команд (див. рис.1.3-б).

У кожному з варіантів можна обирати метод (електронна кнопка „**Methods**”), яким вказуються координати об’єктів. Ці методи – такі ж, що й при створенні точок. Також за допомогою кнопки „**Parameters...**” можна викликати діалогову панель „**Geometry Parameters**” (див. рис.2.9) і змінити параметри лінії. Наприклад, колір лінії.

Окрім створення, з лініями можна проводити операції модифікації:

- зміна положення лінії за допомогою редагування координат її опорних точок (**Modify→Edit→Point...**);

- видалення (відсікання) частини лінії від точки її перетинання з іншою лінією або лініями (**Modify→Trim...**): обираються дві або більше ліній, потім курсором обирається та частина лінії, яку потрібно видалити (вказується точка в околі частини, яка видаляється), та дається команда на видалення (**OK**). Якщо „прапорець” на опції „**Extended Trim**” зняти, то видалення проводиться тільки для ліній, що реально перетинаються;

- подовження лінії до точки, яка створюється проекцією іншої точки на напрям лінії (**Modify→Extend...**);

- розрізання лінії на частини точкою, яка створюється проекцією іншої точки на напрям лінії (**Modify→Break...**);

- створення загальної точки перетинання двох ліній (**Modify→Join...**) з можливістю видалення їх „зайвих” частин, що лежать за межами кута, створеного цими лініями, який містить деяку вказану точку (необхідно ініціювати опцію „**Update 1**” та/або „**Update 2**”);

- створення округлення двох ліній дугою заданого радіуса з центром, близьким до вказаної точки (**Modify→Fillet...**), з можливістю видалення їх „зайвих” частин (необхідно ініціювати опцію „**Trim Curve 1**” та/або „**Trim Curve 2**”);

- створення фаски між двох ліній вказаних розмірів (**Chamfer Length**) на кожній лінії близько до вказаної точки (**Modify→Chamfer ...**) з можливістю видалення їх „зайвих” частин (необхідно ініціювати опцію „**Trim 1**” та/або „**Trim 2**”).

Вказані операції модифікації ще можна розпочати за допомогою електронних кнопок панелі „**Point/Line**” з **Toolbox** (див. рис.1.2-в,г) та панелі команд (див. рис.1.3-е).

Ще лінії можна поміщувати в різні рівні та групи (див. Розділ 1.7), робити з ними інші загальні операції модифікування (див. Розділ 2.2.6).

Коли лінії вже непотрібні, їх можна видалити (**Delete→Geometry→Curve...**).

2.2.3.2. Побудова окружностей та їх частин (дуг)

Криві лінії у вигляді окружності або її частини (дуги) можна створювати, опираючись на декілька варіантів даних. У FEMAP ініціація відповідних процесів можлива через команди меню, електронних кнопок панелей інструментів і команд (див. рис.1.2-г та рис.1.3-в).

Для створення *дуги* (однаковий для усіх команд початок **Geometry→Curve-Arc→** опускаємо) вказуються:

- дві точки, що визначають початок та кінець дуги, та її радіус (**Radius-Start-End...**);
- центр та дві точки, що визначають початок та кінець дуги (**Center-Start-End...**), причому остання фактично визначає *напрямок* радіусу до кінця дуги (його розмір визначається відстанню між центром та першою точкою);
- дві точки, що визначають початок і кінець дуги, та кут між радіусами до цих точок (**Angle-Start-End...**);
- дві точки, що визначають центр і початок дуги, та кут (**Angle-Center-Start...**);
- дві точки, що визначають центр і початок дуги, та довжину хорди, що „стягує” дугу (**Chord-Center-Start...**);
- три точки на дузі (**Points...**);
- центр та три точки на дузі (**Center and Points...**), причому дві перші задають початок та кінець дуги, а третя точка задається наближено та вказує напрям проведення дуги: коротшим шляхом або навколо центру;
- дві точки, що визначають початок та кінець дуги, та дотичну до дуги; дотична задається вектором з кінцевої точки (**Start – End-Direction...**).

Перші 5 варіантів створюють дуги тільки у робочій площині (**Workplane**).

У кожному з варіантів можна обирати метод (електронна кнопка „**Methods**”), яким вказується об’єкт.

На лінії дуги FEMAP додатково створює від однієї до трьох опорних точок (в залежності від розміру кута дуги), а також точку – центр дуги, якщо вона не існувала.

Для створення *окружності* (однаковий для усіх команд початок **Geometry→Curve-Circle→** опускаємо) вказуються:

- центр та точка на окружності (**Center-Point...**);
- дві точки на окружності, що фактично задають її діаметр (**Diameter...**);
- центр та радіус окружності (**Center-Radius...**);
- дві точки на окружності та її радіус (**Two Points...**);
- три точки (**Points on Arc...**);
- центр та дві точки на дузі окружності (**Center and Points...**), причому остання фактично визначає *площину*, в якій створюється окружність (розмір радіусу визначається відстанню між центром та першою точкою).

Крім того, окружність створюється:

- на основі центра окружності дотичною до вказаної лінії (**Point-Tangent...**); лінія може бути прямою або кривою;
- дотичною до двох вказаних ліній (**Tangent to Curves...**), з вказаним радіусом та орієнтовними координатами центру; лінії можуть бути прямими або кривими;
- концентричною до існуючої окружності, з вказаним радіусом (**Concentric...**);

Окрім 2-х варіантів команд: **Points on Arc...** та **Center and Points...**, всі варіанти створюють окружності тільки у робочій площині (**Workplane**).

На лінії окружності FEMAP створює чотири опорні точки: одну – базову, три – додаткові через кут 90 градусів (для можливого використання), а також точку – центр окружності, якщо вона не існувала.

Ще дуги та окружності можна поміщувати в різні рівні та групи (див. Розділ 1.7), робити з ними інші загальні операції модифікування (див. Розділ 2.2.6).

2.2.3.3. Побудова ліній сплайнами

Сплайн (від англ. **Spline** – креслярський пристрій для проведення гладких кривих через задані точки, основний елемент якого – тонка металева лінійка, що розташована ребром до паперу) або сплайн-функція – крива без зломів, що апроксимує табличне задану функцію та створена з відрізків багаточленів однакової степені, які у місцях спряження мають безперервні перші, другі (найбільш поширені у застосуванні кубічні сплайни) або вищі похідні. У за-

лежності від того, які багаточлени застосовуються, розрізняють такі сплайни: **криві Без'є** (Bezier), **В-сплайни** (раціональні рівномірні), **NURBS** (Non-Uniforms Rational B-splines – нерівномірні раціональні В-сплайни) та інші.

Апроксимації еліпса, параболи, введеної формули, „дотичної” та з'єднання двох кривих у FEMAP проводяться кубічними кривими Без'є. Якщо точок більше 4-х, то застосовуються кубічні В-сплайни. Крім того, до проекту FEMAP криві NURBS можуть бути імпортовані з IGES файлу.

Для побудови сплайнової кривої необхідно не менш 4-х точок. FEMAP має й верхнє обмеження – 110 точок. При побудові сплайнів можуть створюватися додаткові контрольні точки (це робиться для еліпсу, параболи, гіперболи тощо).

У FEMAP сплайнові криві починаються та закінчуються в заданих точках, але через задані проміжні точки можуть *не проходити* (ті будуть використовуватися як контрольні – див. рис.2.10-а) або *проходити* (при цьому FEMAP використовує ці точки для того, щоб створити додаткові контрольні точки, див. рис.2.10-б). Відстань між контрольними точками впливає на викривлення сплайнової кривої: при збільшенні відстані викривлення зростає.

Підменю команди **Geometry→Curve-Spline** розділено на три секції: сплайни у **Workplane**, сплайни від аналітики (також у **Workplane**), і сплайни в тривимірному просторі. Можна користуватися панелями інструментів і команд (див. рис.1.2-д та рис.1.3-г).

Сплайнові криві створюються (однаковий для усіх команд початок **Geometry→Curve-Spline→** опускаємо):

- через контрольні точки у **Workplane** (**Project Control Points...**) та у просторі (**Control Points...**): крива не проходить через задані проміжні точки; а пари точок, що на кінцях кривої, визначають *дотичні* до кривої у кінцевих точках;
- через точки у **Workplane** (**Project Points...**) та у просторі (**Points...**): крива проходить через усі задані точки;

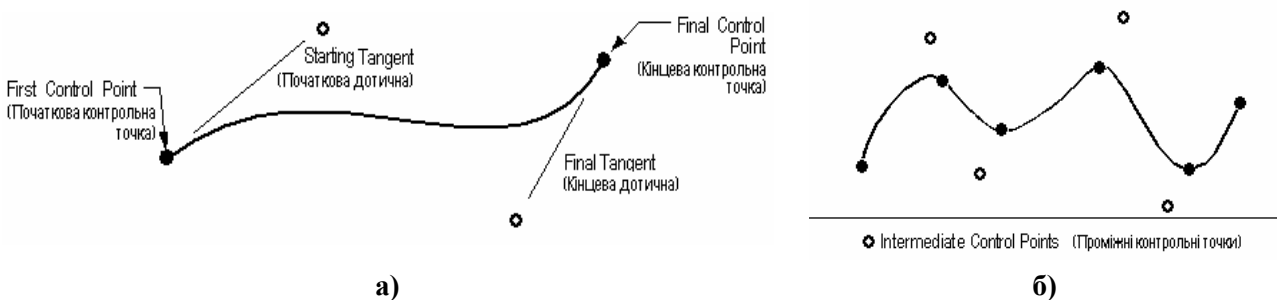


Рис.2.10. Сплайнові криві: а) через контрольні точки; б) – через точки

- у вигляді еліпса (**Ellipse...**): задаються координати центра еліпса, потім – орієнтацію більшої осі еліпса, потім – розмір більшого (**Vector Radius**) та меншого (**Other Radius**) його радіуса;
- у вигляді параболи (**Parabola...**): задаються координати вершини (**Vertex**) кривої, потім – фокусу, потім – „специфічної” точки поблизу кінця кривої (див. рис.2.11-а);

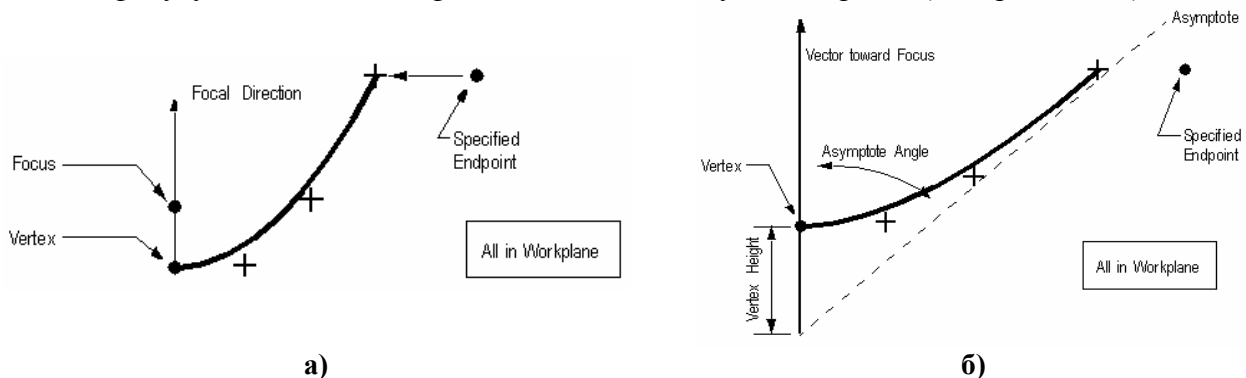


Рис.2.11. Сплайнові криві у вигляді: а) – параболи; б) – гіперболи

- у вигляді гіперболи (**Hyperbola...**): задаються координати вершини (**Vertex**) кривої, потім – напрям вектору від вершини до фокусу (**Vector toward Focus**), потім – висоту вершини (**Vertex Height**) та кут асимптотичної лінії (**Asymptote Angle**), потім – „специфічної” точки поблизу кінця кривої (див. рис.2.11-б);

- завданням коефіцієнтів (кубічні поліноми) параметрично заданої кривої (**Equation...**);

- дотичною (кінцівками) до двох векторів, початок та напрям яких послідовно задається (**Tangents...**);

- такою, що з’єднує кінцівки двох ліній (**Blend...**): обираються дві лінії, причому одночасно вказуються точки деє біля цих кінцівок;

- на вказаній відстані від *сплайнової* лінії, що існує (**Offset...**), причому додатково задається точка, яка вказує, з якого боку від сплайнової лінії, що існує, створювати нову. **Увага:** якщо помилково відстань вказати такою, яка не може існувати (занадто великою), то можна отримати не передбачувані (тобто помилкові) обрис або положення нової кривої;

- проміжної (за положенням) між двома обраними лініями (**Midspline...**);

- як такі, що „округляють” кути замкнутого контуру (**Multiple Curves...**).

При створенні сплайнових ліній кнопкою „**Parameters...**” можна викликати панель „**Geometry Parameters**” (див. рис.2.9-б) і змінити на ній рівень (**Layer**), колір зображення та порядок сплайну „**Spline Order**”.

Сплайнові лінії можна поміщувати в різні рівні та групи (див. Розділ 1.7), робити з ними інші загальні операції модифікування (див. Розділ 2.2.6).

Сплайнові лінії часто застосовують для побудови складних поверхонь, наприклад, крила та фюзеляжу літака, лопаток турбомашин, гвинтів, обводів автомобілів, навіть побутової техніки.

2.2.3.4. Побудова ліній на поверхні

Ще лінії можна створювати як (однаковий для всіх команд початок **Geometry→Curve - From Surface→** опускаємо, див. також рис.1.3-д):

- результат перетину двох поверхонь (**Intersect...**): вказуються дві поверхні, що перетинаються;

- проекція лінії на поверхню (**Project...**): вказується поверхня, потім лінія (тільки у ядрі **Parasolid**);

- проекція на поверхню лінії вздовж вектора (**Project Along Vector...**). **Увага:** після виконання цієї та попередньої (**Project...**) команди вихідну лінію не можна редагувати;

- параметрична лінія на поверхні (**Parametric Curve...**). Вказується поверхня, потім обирається метод, яким лінія „прив’язується” до поверхні, наприклад: а) через точку, що існує (**On Point**); б) на поверхні (**In Surface**) з одночасним редагуванням параметра „**Param Loc**” (U або V); в) інший метод; потім задається, який параметр (U або V) застосовується;

- результат розрізування (**Slice...**): вказується поверхня або об’єм, потім – площина, що розрізає (**Specify Cutting Plane**).

При роботі з поверхнями доцільно встановити опцію **Geometry→Curve - From Surface→Update Surfaces**, щоб їх зображення після побудови на них ліній оновлювалося автоматично.

2.2.4. Побудова поверхонь

У FEMAP є три типи поверхонь:

- *конструкційна*. Створюються та редагуються групою команд з **Geometry→Boundary Surface ►**. У FEMAP враховано те, що доволі часто поверхнева СЕС створюється (автоматично) більш вдалою (див. рис.2.12), якщо декілька геометричних поверхонь об’єднати у єдину. Це тому, що створення поверхневої СЕС проводиться від контуру поверхні. Є поняття „**Multi-surface boundaries**” („граничний контур декількох поверхонь”, коли внутрішні контури – відкинуті) та „**Underlying Surfaces**” („підкладені поверхні” – ті, на основі яких будується поверхня з **Multi-surface boundaries**). Командою **From Curves...** поверхня створюється

ся на основі ліній, які створюють замкнений контур (у Розділі 2.2.6.3 описано, як подолати проблему співпадаючих точок та ліній, яка іноді при цьому заважає); командою **From Surfaces on Solid...** – на основі обраних поверхонь „твердого” тіла. Для поверхонь, створених командою **From Surfaces on Solid...**, є ще дві команди: **Update Surfaces...** – оновити інформацію про поверхню відповідно до поточного стану „підкладених поверхонь”; **Edit Surfaces...** – приєднати до поверхні інші поверхні, що будуть обрані;

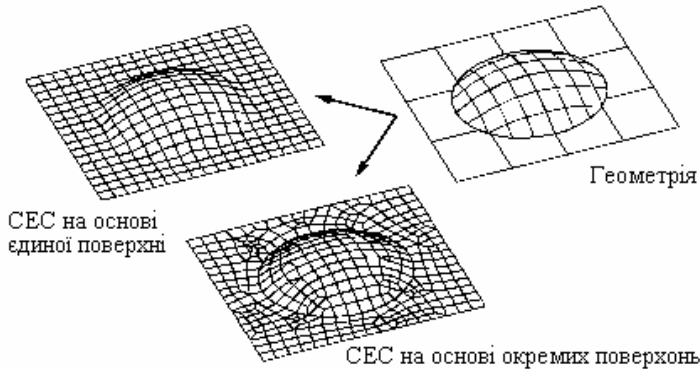


Рис.2.12. До застосування поверхонь з Multi-surface boundaries

- *серединна* поверхня, що створюється командами меню **Geometry→Midsurface...** як допоміжна для двовимірної скінченно-елементної моделі (див. Розділ 3.4.2.5);

- *звичайна* (геометричної моделі), що може створюватися різними методами командами меню **Geometry→Surface...**

Докладні дані, зокрема зображення для кожного варіанту побудови поверхонь, можна отримати у „Help” MSC.vN4W: команда **Help→Help Topics F1**, вкладка **Contents**,

розділ **Command Reference→Geometry→Creating Surfaces**.

Можна користуватися командами меню, панелями інструментів і команд (див. рис.1.2-е та рис.1.3-ж). Звичайні поверхні у FEMAP можна створювати таким чином (однаковий для усіх команд початок **Geometry→Surface→** опускаємо):

- по кутах (**Corners...**): вказуються координати трьох або чотирьох кутів поверхні, дається команда **Cancel**;
- по кромкам (**Edge Curves...**): вказуються три або чотири лінії, що створюють замкнений контур;
- по декількох лініях (**Aligned Curves...**): вказуються дві або більше лінії (прямі або криві), що *не перетинаються*. Бічні кромки створюються автоматично;
- по двом прямим або кривим лініям (**Ruled...**). Бічні кромки створюються автоматично;
- по траєкторії переміщення обраної лінії (без зломів, кусково-ломаної або замкнутої):
 - ♦ „видавлюванням” (**Extrude...**); поверхня створюється у вказаному вектором напрямку на довжину цього вектора;
 - ♦ її повертанням навколо заданої осі на вказаний кут (**Revolve...**). **Увага:** лінія, що перетинає задану вісь, нову поверхню створити не зможе;
 - ♦ вздовж раніше створеної лінії без зломів (**Sweep...**): вказуються лінія, що створює поверхню, та лінія напрямку;
- як плоска поверхня (**Plane...**): задається (обраним методом) положення та орієнтація площини у просторі, потім – її розмір у двох напрямках;
- як бокова поверхня циліндру або конусу (**Cylinder...**): задається вектор локалізації „**Locate Vector**” (початок та кінець вектору), потім – вектор напрямку до точки, з якої буде „починатися” поверхня, потім – обрати тип поверхні (циліндр або конус) та вказати зовнішні (**Outer**) радіуси при основі (**Bottom**) та вершині (**Top**) конусу (для циліндру – тільки першу величину);
- як повна сферична поверхня (**Sphere...**). Задається вектор локалізації „**Locate Vector**” (початок та кінець вектору), потім – вектор напрямку до початку поверхні, потім – радіус (кут довготи (**Longitude Angles**) та кут широти (**Latitude Angles**) не активні);
- на вказаній відстані від обраної поверхні (**Offset...**), причому то, з якого боку від обраної поверхні створювати нову, задається знаком при вказуванні величини відстані (плюс – у сторону „збільшення”). **Увага:** якщо помилково відстань вказати такою, яка не може існу-

вати (занадто великою), то можна отримати не передбачувані (тобто помилкові) обрис або положення нової поверхні.

Якщо поверхня буде створюватися на основі замкнутого контуру, можна перед цим дати команду **Geometry→Sketch...** З'явиться панель „Sketch” (тобто „начерк”). Потім користувачем створюється замкнений контур і на панелі „Sketch” натискається кнопка „Finish Sketch” – створюється поверхня.

Для поверхонь є ще дві команди: **Geometry→Surface→Convert...**, за допомогою якої обрані поверхні перетворюються з представлення **Standard**, яке є у FEMAP, в **Parasolid**, а також **Geometry→Solid→Intersect...**, яка дозволяє створювати поверхні перетину обраних „твердих” тіл.

Ще поверхні можна поміщувати в різні рівні та групи (див. Розділ 1.7), робити з ними інші загальні операції модифікування (див. Розділ 2.2.6).

Поверхні застосовують як основу для описування поверхні об'єму (**Volume**) або „твердого” тіла (**Solid**), а також для створення двовимірної або тривимірної (для тривимірної – на першому етапі, тобто у допоміжних цілях) скінченно-елементної сітки. Також їх можна використати як допоміжні об'єкти, наприклад, для побудови лінії як лінії перетину поверхонь, для побудови точки як результат проектування на поверхню іншої точки тощо.

2.2.5. Побудова об'ємів і „твердих” тіл

2.2.5.1. Побудова об'ємів

Увага: по-перше, описані нижче варіанти створення об'ємів **Surfaces...**, **Between...**, **Extrude...** та **Revolve...** працюють тільки при встановленій опції **Tools→Advanced Geometry→Standard** та **Parasolid**; по-друге, об'єми (**Volume**) можуть мати не більш 8 кутів та не більш 6 поверхонь, а також не можуть мати пустот. Це дуже знижує значення цього (**Volume**) представлення геометрії тіл, тому звичайно воно застосовується зрідка та тільки для наступної побудови скінченно-елементної сітки.

Докладні дані, зокрема зображення для кожного варіанту побудови об'ємів, можна отримати у „Help” MSC.vN4W: команда **Help→Help Topics F1**, вкладка **Contents**, розділ **Command Reference→Geometry→Creating Solids→Volumes**.

Можна користуватися командами меню, панелями інструментів і команд (див. рис.1.2-е та рис.1.3-ж). Об'єми у FEMAP можна створювати таким чином (однаковий для усіх команд початок **Geometry→Volume→** опускаємо):

- по точках у кутах (**Corners...**): вказуються координати від 4-х до 8-ми точок у порядку, вказаному на рис.2.13. Якщо введені дані не суперечливі, то об'єм створюється;

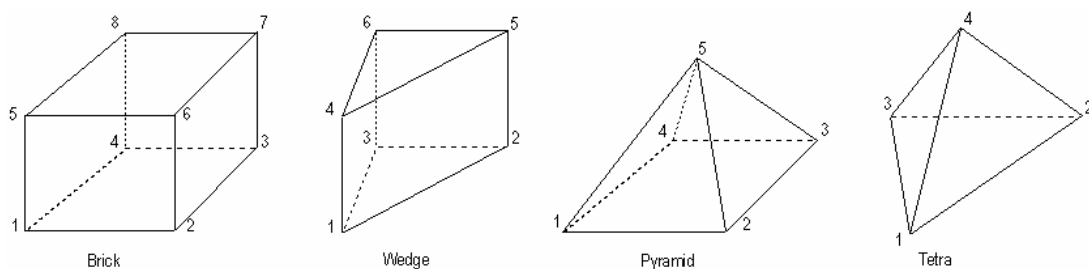


Рис.2.13. Порядок нумерації кутів об'ємних фігур (рисунок з Help)

- поверхнями (**Surfaces...**): вказується тип фігури (**Brick**, **Wedge**, **Pyramid** або **Tetra**, див. рис.2.13); як бокові (**Sides**), нижня (**Bottom**) та верхня (**Top**) обираються раніш створені поверхні, що описують замкнений простір. **Увага:** не можна застосовувати конструкційні (граничні) поверхні (див. Розділ 2.2.4), та створені командою **Geometry→Surface→Aligned Curves...**, тобто по декільком лініям;

- між двох поверхонь або між поверхнею та точкою (**Between...**): обираються раніш створені поверхні однакового типу (трикутні, чотирикутні: **2 Surface**) або поверхня та точка (**Surface and Point**);

- видавлюванням (**Extrude...**): обирається поверхня або декілька поверхонь, потім вказується вектором напрям, причому довжина цього вектора є висотою отриманої фігури або отриманих фігур;
- обертанням (**Revolve...**): обирається поверхня або декілька поверхонь, потім вказується вісь обертання, потім – кут обертання;
- як циліндр, конус або труба (**Cylinder...**): задається вектор локалізації **Locate Vector** (початок та кінець вектору), потім – вектор напрямку до точки, з якої буде „починатися” зовнішня поверхня, потім – обрати тип поверхні (циліндр, конус або труба), вказати зовнішні (**Outer**) радіуси при основі (**Bottom Outer**) та вершині (**Top Outer**) конусу (для циліндру – тільки першу величину, для труби додатково – внутрішні (**Bottom Inner** та **Top Inner**) розміри), вказати кут розвороту (360 – повний кут);
- як сфера (**Sphere...**): задається вектор локалізації **Locate Vector** (початок та кінець вектору), потім – вектор напрямку до точки, з якої буде „починатися” зовнішня поверхня, потім – радіус і початкові та кінцеві значення кутів довготи (**Longitude Angles**) та широти (**Latitude Angles**).

Об’єми можна поміщувати в різні рівні та групи (див. Розділ 1.7), робити з ними інші загальні операції модифікування (див. Розділ 2.2.6).

2.2.5.2. Побудова „твердих” тіл

Увага: „тверді” тіла (**Solid**) створюються в FEMAP за допомогою ядра **Parasolid** або ядра **ACIS**. Про встановлення типу ядра див. у Розділі 1.5 (**Geometry...**). Редагування геометричної моделі бажано проводити у „рідному” середовищі (ядрі).

На динамічній панелі команд, що викликається командами **Geometry→Solid→...**, є перемикач „**Add/Remove Material**”, який встановлює у командах (що розташовані на панелі нижче) значення „**Add**” (є „прапорець”) або „**Remove**” (немає „прапорця”) за замовчанням (яке, при бажанні, завжди можна змінити). Це буває зручно, коли виконуються в основному операції додавання або, навпаки, операції видалення.

Докладні дані, зокрема зображення для кожного варіанту побудови „твердих” тіл, можна отримати у „**Help**” MSC.vN4W: команда **Help→Help Topics F1**, вкладка **Contents**, розділ **Command Reference→Geometry→Creating Solids→Volumes**.

Можна користуватися командами меню, панелями інструментів і команд (див. рис.1.3-з). „Тверді” тіла у FEMAP можна створювати таким чином (однаковий для усіх команд початок **Geometry→Solid→** опускаємо):

- витискуванням (**Extrude...**). З’являється діалогова панель „**Extrusion Options**” (див. рис.2.14-а). На ній обирається поверхня (конструкційна – кнопкою **Boundary...** або звичайна – кнопкою **Surface**; але завжди автоматично обирається та конструкційна поверхня, що обиралася останньою). У секції „**Material**” вказується, що робити з матеріалом „твердого” тіла: це буде нове тіло (**New Solid**) або він буде доданий до існуючого (**Add – Protrusion**) або навпаки – це буде видалення матеріалу (**Remove – Hole**). У секції „**Direction**” вказується напрям (на робочому полі з’являється зображення вектора): позитивний, негативний або у обидва боки (**Both Directions**). У секції „**Length**” вказується довжина витискування. Якщо витискування – у напрямку нормалі до поверхні, то досить у вікні „**To Depth**” вказати значення. Якщо „під нахилом”, то спочатку необхідно вказати напрямок (кнопка „**Along Vector**”). Також можна у секції „**Length**” обрати „**To Location**” та дати команду „**OK**”; з’являється діалог, у якому вводиться напрямок та довжина витискування у термінах опису вектора. Опцію „**Try All**” (через все тіло) встановлюють, коли в тілі необхідно створити наскрізний отвір. За допомогою кнопки та діалогу „**Patterns**” (див. рис.2.14-б) можна на основі *однієї* поверхні одночасно створити декілька „твердих” тіл (або отворів), розташованих рядками (**Rectangular**, див. рис.2.14-в): вказується кількість у кожному напрямку (**Number**) та відстань між ними (**Spacing**); або розташованих на окружності (**Radial**, див. рис.2.14-г) з центром (**Center**) та через кут, що дорівнює результату ділення загального кута (**Total Angle**) на кількість (**Number**) таких елементів;

• поворотанням обраної поверхні (**Revolve...**): спочатку вказується вісь обертання, потім з'являється діалогова панель „**Revolve Options**”, майже тотожна панелі „**Extrusion Options**”, тільки у секції „**Length**” замість „**To Depth**” та „**Try All**” вказуються кути повороту „**Angle**” та „**Full 360**” відповідно. За допомогою кнопки „**Revolve Axis**” (замість кнопки „**Along Vector**”) можна змінити значення для вже вказаної осі обертання;

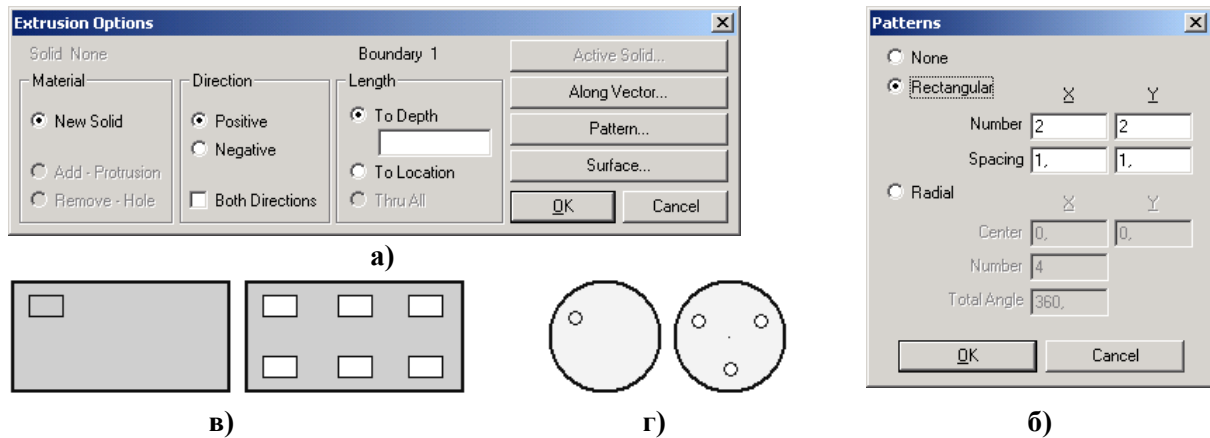


Рис.2.14. Діалогові панелі: а) – для витискування „твердого” тіла; б) – шаблони; та результати дії шаблону: в) – Rectangular; г) – Radial

• як один з примітивів (**Primitives...**): паралелепіпед (**Block**), циліндр (**Cylinder**), конус (**Cone**) та сфера (**Sphere**) – див. рис.2.15-а. Тут новому матеріалу можна призначити ім'я (**Title**). У секції „**Material**” є нова можливість: радіокнопка **Common** вкаже на створення нового тіла, що буде містити лише загальну частину того примітиву, що задається, та існуючого активного тіла (загальну частину перетинання). Тіло створюється у напрямку нормалі від робочої площини; нормаль починається з точки, вказаної у секції „**Origin**”, причому у варіанті „**Block-Center**” це є координати центру, а „**Block-Corner**” – кута паралелепіпеда. **Увага:** для конуса величина „**Bot Radius**” повинна бути більшою, ніж величина „**Top Radius**” (див. рис.2.15-а);

• як результат „зшивання” декількох поверхонь, що створюють замкнений простір (**Stitch...**): обираються поверхні, задається величину зазору між поверхнями, яка допускається (може бути ліквідованою). **Увага:** надлишкові (з обраних) поверхні будуть видалені.

Окрім вказаних дій є дії, пов'язані з модифікацією існуючих „твердих” тіл:

- знищення „твердого” тіла зі збереженням поверхонь, що містили цей простір (**Explode...**);
- округлення обраних кромek вказаним радіусом (**Fillet...**);
- створення фасок вказаним розміром на обраних кромках (**Chamfer...**);
- перетворення тіла на оболонку вказаної товщини (**Shell...**): обирається тіло, одна або декілька поверхонь для перетворення, потім вказується товщина стінки оболонки. Ті поверхні, що не обрані, залишаються без змін, а ті, що обрані – перетворюються (див. рис.2.15-б);

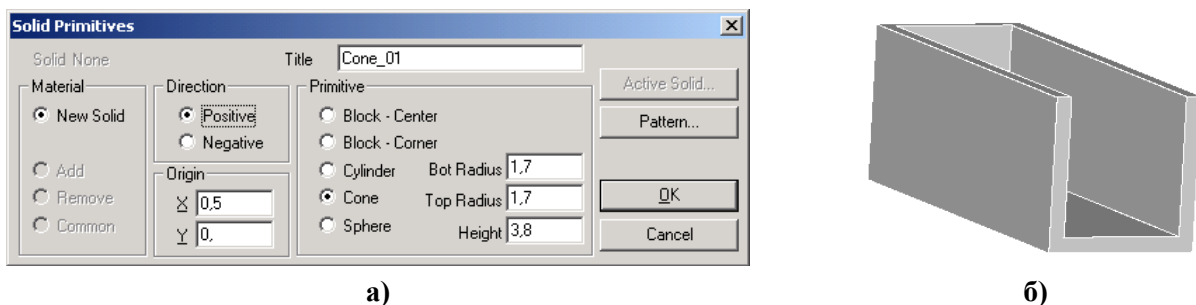


Рис.2.15. Діалогова панель створення примітивів (а); результат перетворення паралелепіпеда в оболонку командою Shell... (б)

Також є декілька команд логічних операцій з тілами:

• додавання або об'єднання декількох „твердих” тіл (**Add...**): створюється нове „тверде” тіло; ті, що увійшли у нове – знищуються. Якщо вказані тіла не перетинаються, то об'єднання не виникає. У діалогові „**Activate Solid**”, що викликається командою **Geometry→Solid→Activate...**, нове тіло має невизначену назву „**Untitled**”, яку можна змінити;

• віднімання загального для обраних тіл матеріалу (**Remove...**): вказується базове тіло (його ім'я буде надано новому) та ще одне або декілька;

• множення (**Common...**), тобто виділення загального для обраних тіл матеріалу: вказується базове тіло та ще одне або декілька; тіла, що були обрані – зникають;

• пересікання (**Intersect...**): поверхні, що співпадають (різних тіл), будуть відокремлені у нові поверхні, на яких вузли (при створенні у майбутньому СЕС) будуть мати *погоджене* положення. Це будуть різні вузли, а тіла не будуть у них зв'язані; для їх зв'язування необхідно застосувати інструменти команди **Mesh→Connection...** (див. Розділ 3.6.1) або **Tools→Check→Coincident Nodes...** (аналогічно описаному у Розділі 2.2.6.3 для точок).

До логічних операцій можна також віднести декілька операцій розсічення тіл на частки:

• розрізання площиною (**Slice...**): обирається тіло (або тіла) та призначається положення площини, що розсіче. На поверхнях тіла (тіл) з'являються нові ребра (у вигляді ліній);

• розрізання площиною „з відповідністю” (**Slice Match...**): аналогічно попередній операції, але потім при *одночасному* створенні скінченно-елементної сітки вузли на відповідних поверхнях розрізання будуть мати *погоджене* положення (додаткову інформацію див. для команди **Intersect...**);

• розрізання вздовж грані (**Slice Along Face...**): аналогічно попередній, тільки обирається (якщо вона є) грань (площина або криволінійна поверхня), вздовж якої буде розрізане тіло на частини;

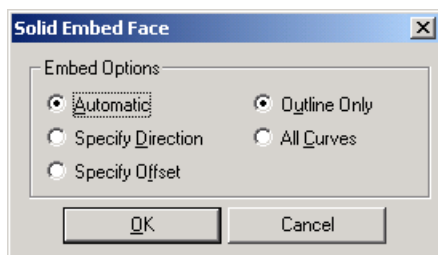
• врізання (**Embed...**): подібно до **Common...**, але *базове* тіло не зникає, а нове тіло має невизначену назву „**Untitled**”, яку можна змінити;

• врізання грані (**Embed Face...**): створення нового тіла за рахунок „матеріалу” існуючого шляхом врізання (вдавлювання) в нього обраної грані тіла. Спочатку обирається грань, що буде врізатися, потім у лівому стовпці опцій на діалоговій панелі „**Solid Embed Face**”, що з'явиться (див. рис.2.16-а), обирається один з варіантів:

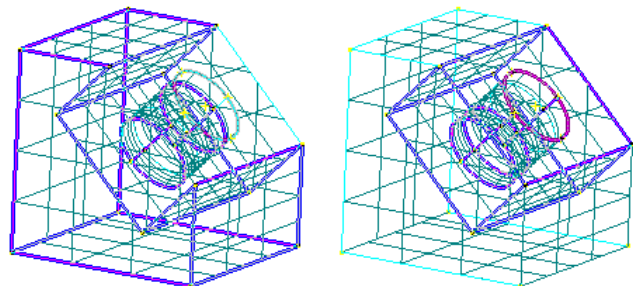
- ♦ „**Automatic**” (автоматично): у напрямку нормалі до грані, наскрізь (через все тіло);
- ♦ „**Specify Direction**” (у вказаному напрямку): додатково необхідно задати напрям та відстань (вектором);
- ♦ **Specify Offset** (на вказану відстань): у напрямку *нормалі* до грані, на вказану відстань, причому геометрія не плоскої грані при врізанні перетворюється подібно вихідної геометрії;

Буде реалізовуватися один з двох (обраний з правового стовпця) варіантів:

- ♦ **Outline Only** (тільки контур): врізається *наріжний* замкнений контур обраної грані.
- ♦ **All Curves** (усі криві): врізаються обрана грань, причому всі отвори, що на ній розташовані, будуть створювати відповідні отвори у новому тілі (див. рис.2.16-б).



а)



б)

Рис.2.16. Діалогова панель **Solid Embed Face** (а) та приклад врізання грані з неглибоким круглим заглибленням (б): створено два тіла, друге – з наскрізним отвором

Нагадаємо, що у FEMAP є ще команда **Geometry→Solid→Intersect...**, яка дозволяє створювати поверхні перетину обраних „твердих” тіл.

У процесі роботи з декількома „твердими” тілами для вибору потрібного тіла його необхідно „активізувати”: командою **Geometry→Solid→Activate...** викликається діалогова панель „**Activate Solid**”, на якій можна обрати необхідне тіло, а також змінити його назву.

Ще „тверді” тіла можна поміщувати в різні рівні та групи (див. Розділ 1.7), робити з ними інші загальні операції модифікування (див. Розділ 2.2.6).

2.2.5.3. Очищення „твердих” тіл

Остання операція, яку доцільно проводити з створеними „твердими” тілами, є їх „очищення”. Командою **Geometry→Solid→Cleanup...** викликається панель „**Select Solid(s) for Cleanup**”, обираються об’єкти для „очищення”. З’являється панель „**Solid Cleanup**”, на якій можна встановити опції „**Remove Redundant Geometry**” (видалити надлишкові об’єкти), „**Remove Sliver Surface**” (видалити обривки поверхонь: тільки для геометричного ядра **Parasolid**) та „**Check Geometry**” (контроль геометрії на її відповідність поняттю „твердого” тіла).

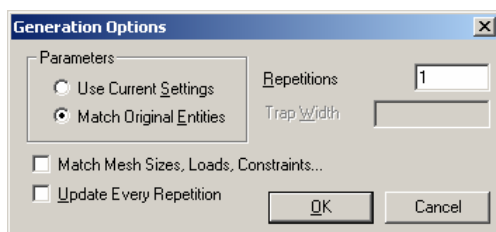
2.2.6. Загальні операції з елементами геометричної моделі

Одна із загальних операцій з елементами геометричної моделі – створення груп. Ці інструменти розглянуто у Розділі 1.7.2.

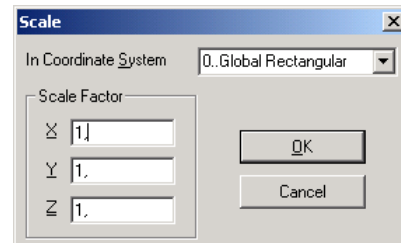
2.2.6.1. Операції копіювання

Для усіх типів геометричних об’єктів (точок, ліній, поверхонь, об’ємів та „твердих” тіл) можна робити операції копіювання (однакову частину команди **Geometry→** опускаємо):

- звичайного копіювання (**Copy...**): обирається об’єкт, з’являється діалогова панель „**Generation Options**” (див. рис.2.17-а). У секції „**Parameters**” обирається одна з радіокнопок „**Use Current Setting**” (застосувати поточні установки) або „**Match Original Entities**” (відповідати оригінальним об’єктам) та вказується кількість копій „**Repetitions**”. Якщо активізувати опцію „**Update Every Repetition**”, то для кожного екземпляру копії буде необхідно вказувати (вектором) її положення, якщо ні – всі копії будуть розташовані у однаковому напрямку на вказаній відстані одна від одної. Опція „**Match Mesh Sizes, Loads, Constraints...**” дозволяє переносити розмітку та граничні умови з оригінальних об’єктів на знов створені;



а)



б)

Рис.2.17. Діалогові панелі встановлення: а) – кількості копій та інших опцій копіювання; б) – коефіцієнтів масштабування

- радіальне копіювання (**Radial Copy...**, окрім **Solid**): все майже аналогічно **Copy...**, але зміщення проходить на відстань **Length** вздовж радіуса, що проходить через вказаний центр копіювання та поточну точку обраного об’єкта (див. рис.2.18-а);

- копіювання з одночасним масштабуванням (**Scale...**): обирається об’єкт, вказуються кількість копій та координати центра масштабування, потім – масштабні коефіцієнти для трьох координат (див. рис.2.17-б);

- копіювання з одночасним обертанням (**Rotate...**): обирається об’єкт, вказуються кількість копій та положення осі обертання, потім – кут обертання та крок зміщення при копіюванні. На рис.2.18-б точка копіювалася 19 разів навколо вертикальної осі з кутом обертання 18 градусів та кроком зміщення 0.05; потім через точки проведено сплайнову лінію (на малюнку видні автоматично створені опорні точки сплайну). Результат – повний оберт гвинтової лінії з кроком 1.0.

• копіювання (тільки одна копія) з дзеркальним відбиттям (**Reflect...**): обираються об'єкти, на панелі „**Generation Options**” вказується значення „**Trap Width**” – фільтр відстані (на рис.2.17-а цей параметр не є активним) та положення площини відбиття. Усі об'єкти, що розташовані близько до площини відбиття, копіюватися не будуть.

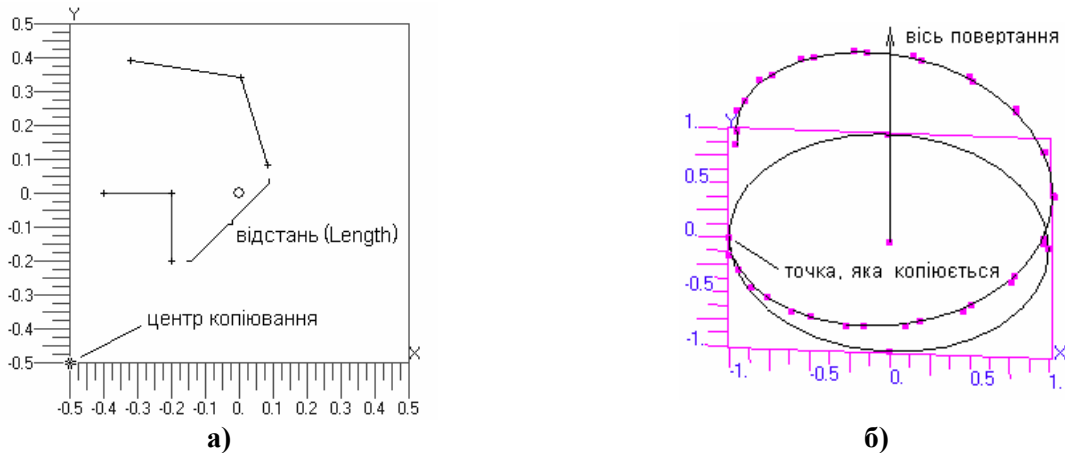


Рис.2.18. Приклади копіювання: а) – радіального ліній; б) – точки з обертанням та зміщенням, з наступним створенням сплайнової лінії

2.2.6.2. Операції модифікації

Значну частину цих операцій розглянуто у Розділі 2.2.2. про створення точок: **Modify**→**Move By...**, **Rotate To...**, **Rotate By...**, **Align...**, **Scale...** тощо. Їх застосування до інших об'єктів, не тільки геометричних, аналогічне.

Не було розглянуто такі загальні операції модифікації елементів геометричної моделі:

• переміщення у точку координатної системи (**Modify**→**Move To**→**Coord Sys...**). На відміну від переміщення точки є додаткова опція „**Move CSys, Nodes and Points which Reference modified CSys**” (Перемістити системи координат, вузли та точки, що посилаються на систему координат, яка модифікується). Якщо її обрати, то разом з координатною системою будуть переміщені усі об'єкти, що побудовані у цій системі;

- кольору зображення (**Modify**→**Color...**): обираються об'єкти, встановлюється колір;
- іншого оновлення (**Modify**→**Update Other...**). Є декілька варіантів:
 - ♦ система координат для точки (**Point Definition CSys...**): точки відносяться до обраної системи координат (звичайно використовують як підготовчу дію перед операціями переміщення, обертання тощо);
 - ♦ порядок сплайну (**BSpline Order...**): обирається сплайнова крива та змінюється порядок сплайну (від 2 до 10, але не більшої кількості точок, через які проведена крива);
 - ♦ вузли сплайну (**BSpline Knots ...**): для обраної сплайнової кривої додаються контрольні точки (**Control Points**), що змінює апроксимацію;
 - ♦ зміна напрямку кривої (**Reverse Curve...**), коли це має значення. Не застосовується для кромки поверхонь та ребер „твердих” тіл;
 - ♦ границю (помістити) на поверхню (**Boundary On Surface...**). Команда задається як заключна, коли на звичайній криволінійній поверхні за допомогою замкненого контуру створена гранична поверхня (командою **Geometry**→**Boundary Surface**). Дефект неточної відповідності двох поверхонь може виявитися після створення на поверхні скінченно-елементної сітки;
 - ♦ описування поверхні (**Surface Divisions...**): на обраній поверхні змінюється щільність сітки ліній та точність її відповідності поверхні (за замовчанням це 3x4 та 0.5%);
 - ♦ прив'язка системи координат (**CSys Definition CSys...**): майже аналогічна команді **Point Definition CSys...**, але замість точки вказується система координат.

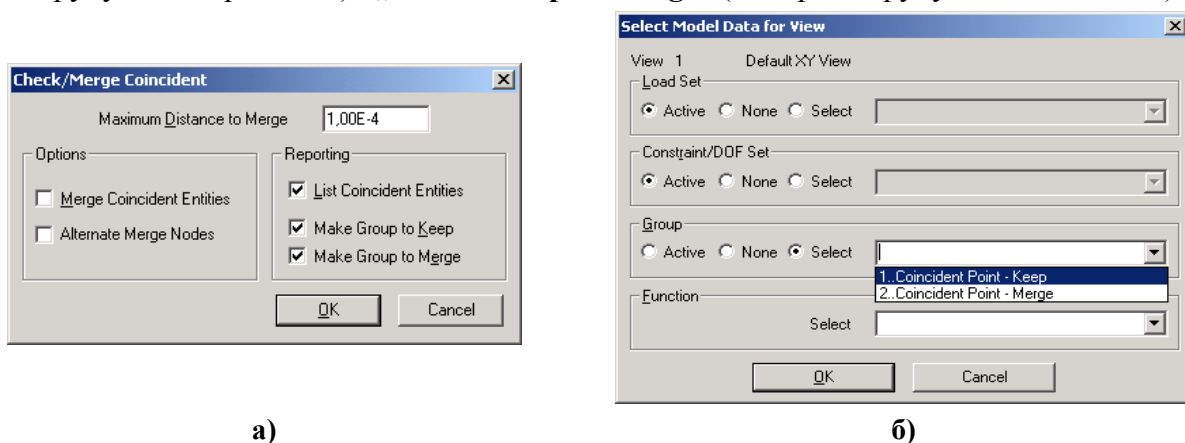
2.2.6.3. Операції контролю геометрії

Доволі часто при створенні геометричних елементів з'являються точки та лінії, що співпадають (точки – частіше). Іноді це явище – негативне, наприклад, не можна створити конструкційну поверхню (командою **Geometry→Boundary Surface...**), якщо зовні замкнений контур фактично є розірваним, оскільки лінії спираються на співпадаючі точки, або обрано одну (не ту що потрібно) із співпадаючих ліній. Іноді це явище – позитивне, наприклад, при підготовці геометрії до розв'язування контактної крайової задачі, коли точки з однаковими координатами створюють контактні пари та належать різним тілам, що контактують.

Команди виклику інструментів для виявлення співпадаючих ліній і точок та подальшої роботи з ними такі: **Tools→Check→Coincident Points...** та **Tools→Check→Coincident Curves...** Оскільки дії для виявлення співпадаючих ліній та точок – однакові, то розглянемо їх на прикладі точок.

За допомогою стандартної діалогової панелі для вибору точок створюється їх список (усі точки з прямокутної області робочої зони можна обрати з допомогою натиснутих клавіш „Shift” та лівої кнопки „миші”).

Після команди „OK” з'являється діалогова панель „Check/Merge Coincident” (див. рис.2.19-а), на якій можна призначити: допуск на пошук співпадаючих точок „Maximum Distance to Merge” та опції „Merge Coincident Entities” (Об'єднати об'єкти, що співпадають), „List Coincident Entities” (Список об'єктів, що співпадають), „Make Group to Keep” (Створити групу для збереження) і „Make Group to Merge” (Створити групу для об'єднання).



а)

б)

Рис.2.19. Діалогові панелі:

а) – призначення опцій для роботи з точками; б) – перегляду списків точок, що співпадають

Список точок, що співпадають, а також вказівка на кількість об'єднаних точок з'являється у вікні повідомлень FEMAP, буде мати приблизно такий вигляд (у дужках – відстань між точками):

Coincident Point List

Point	7	Coincident with Point	15	(	3.4986E-7	)
Point	9	Coincident with Point	8	(	0.	)

2 Point(s) Merges

Якщо усі точки, що співпадають, необхідно об'єднати, то досить встановити опцію „Merge Coincident Entities”. Якщо ні, то доцільно спочатку переглянути список точок, що співпадають, потім робити необхідні об'єднання. Створені дві групи точок, що співпадають (для збереження та для об'єднання), можна переглянути: командою **View→Select→Model Data...** викликати діалогову панель (див. рис.2.19-б), потім обрати необхідну групу. Обирати точки для об'єднання можна, обираючи у діалогі призначення точок для об'єднання групу для об'єднання (зі списку **Group**, як це зроблено на рис.2.19-в).

Якщо проведене об'єднання не задовольняє, потрібно повернутися до попереднього стану та змінити призначення у діях: обрати іншу групу вузлів, призначити інший допуск на пошук співпадаючих точок тощо.

2.2.6.4. Операції вимірювання

У FEMAP є інструменти вимірювання відстані, кутів між обраними об'єктами, довжини, площ, об'ємів, мас, моментів інерції та інших параметрів геометричних об'єктів (а також об'єктів скінченно-елементної моделі).

Командою **Tools→Distance...** (відстань) викликається стандартна діалогова панель обирання об'єктів, де за допомогою кнопки „**Method...**” встановлюється тип об'єктів, після чого послідовно обирануться два об'єкта. Результат з'являється на інформаційній панелі: пряма відстань та її розклад на глобальні осі. Аналогічні дії – при вимірюванні кута (команда **Tools→Angle...**).

Результати наступних вимірів з'являються у вікні повідомлень FEMAP. Це дві групи команд, які викликаються командами:

- **Tools→Mass Properties ►** (масові характеристики): **Measure Curves...** (довжина лінії); **Surface Area...** (площа поверхні); **Solid Properties...** (властивості „твердого” тіла: об'єм, площа поверхонь, координати центру мас, осьові моменти інерції); **Mesh Properties...** (різноманітні властивості скінченних елементів);

- **Tools→Section Properties ►** (властивості обраних перерізів відносно вектора, який буде вказаний): **Surface Properties...** (геометричних поверхонь); **Mesh Properties...** (скінченних елементів).