

## Розділ 2

# СТВОРЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ТІЛА

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

У FEMAP 8.1 можна застосовувати одне з двох ядер (наборів команд) геометричного моделювання: **Parasolid** (фірми Electronic Data Systems Corporation (EDS), версії 13) або **ACIS** (фірми Spatial Technology, Inc., версії 6.3). 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, задалегідь встановлене значення) у FEMAP застосовується ядро **Parasolid**, при необхідності його можна замінити на ядро **ACIS** у діалогу „**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 *мигтючий* 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 *мигтючий* 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**”.

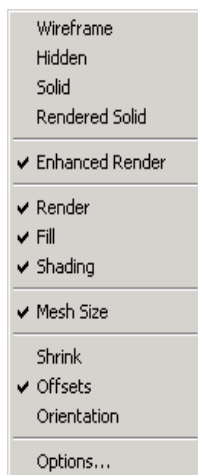



Рис.2.1


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; як *тверде тіло*: спрощене (**Solid**) або досконале (**Rendered Solid**, див. Розділ 1.5) зображення. У варіанті „**Solid**” зображення геометричної моделі створюється швидше, але може мати дефекти.

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”.

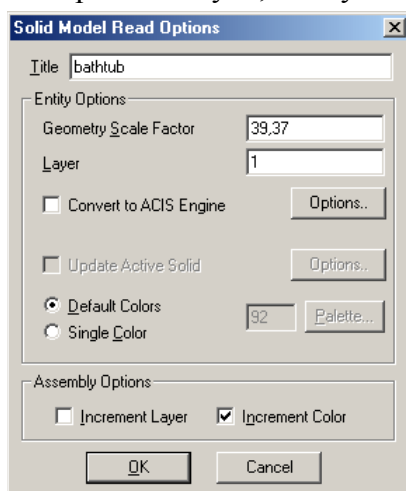
## 2.1. Імпорт та експорт геометричної моделі тіла

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**”.

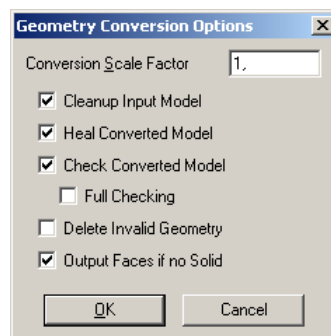
Для імпорту геометричної моделі викликається діалог „**Geometry File to Import**” (команда **File**→**Import**→**Geometry...**). Призначається тип формату файлів: **All Geometry** (усі варіанти) або конкретний тип: **ACIS** (\*.SAT), **Parasolid** (\*.X\_T), **IGES** (\*.IGS), **Stereolithography** (\*.STL), **AutoCAD DXF** (\*.DXF), **STEP** (\*.STP), **VDA** (\*.VDA), **I-DEAS** (\*.IDI), **Catia** (\*.MDL, \*.EXP, \*.DLV), **Pro/E** (\*.PRT), **Solid Edge** (\*.PAR) або **Unigraphigs** (\*.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 8.1, рік розробки якого – 2001.

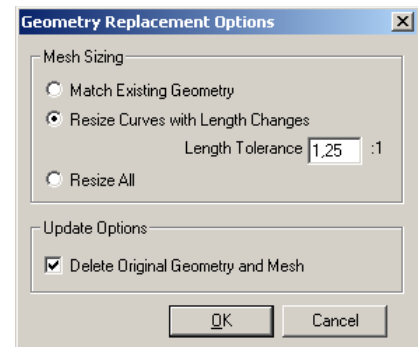
На діалоговій панелі „**Solid Model Read Option**” (див. рис.2.2-а), яка з'являється при імпортуванні геометричної моделі **Parasolid** (\*.X\_T), потрібно звернути увагу на значення коефіцієнту „**Solid Geometry Scale factor**” (коефіцієнту масштабу геометрії). За замовчанням він дорівнює числу **39.37**. 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)

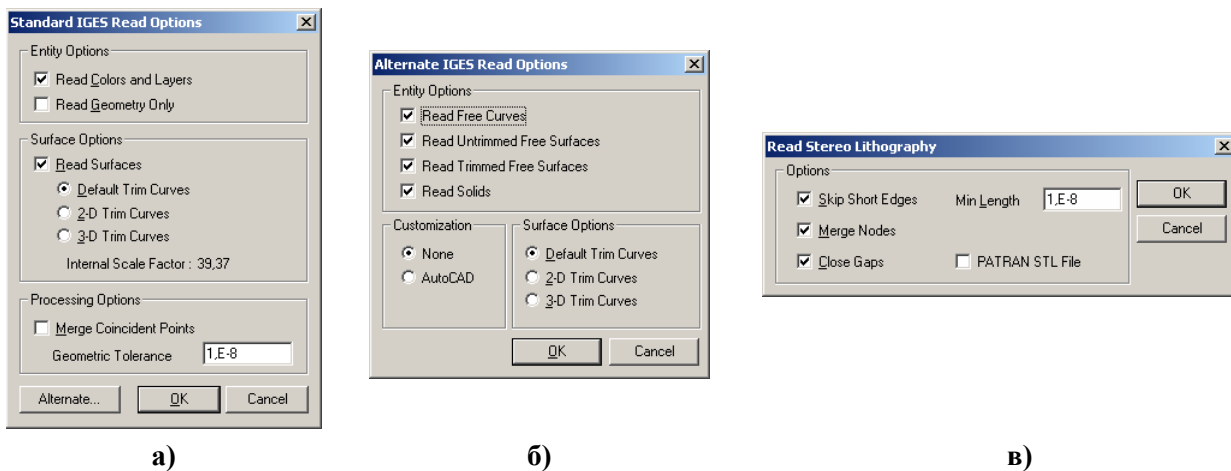


в)

**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**.



а)

б)

в)

**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 8.1 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 здеформовану 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**”.

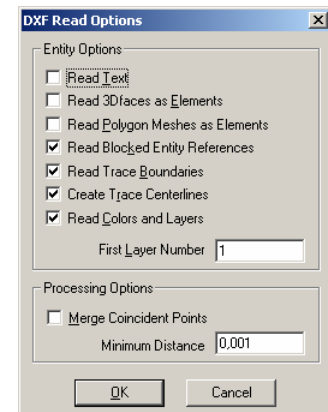
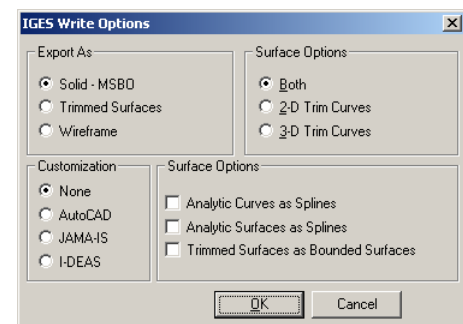
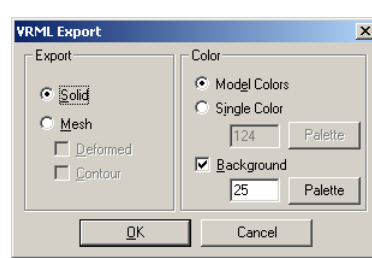
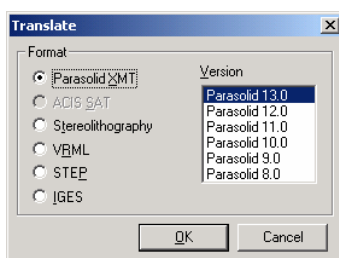


Рис.2.4. Діалогова панель імпортування геометричної моделі **\*.DXF**



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.

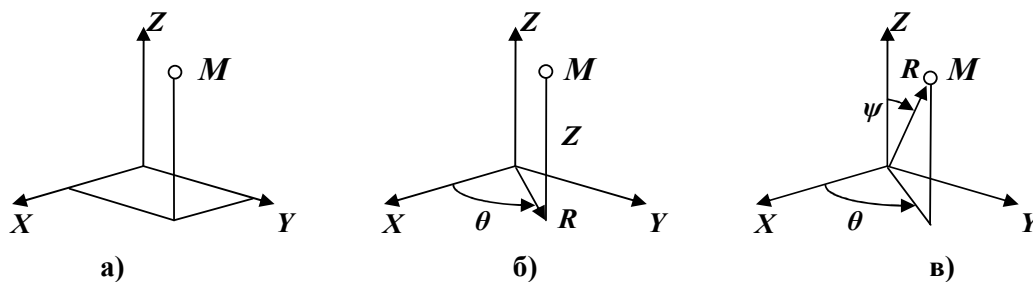



Рис.2.6. Системи координат: а) – декартова; б) – циліндрична; в) – сферична

**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.

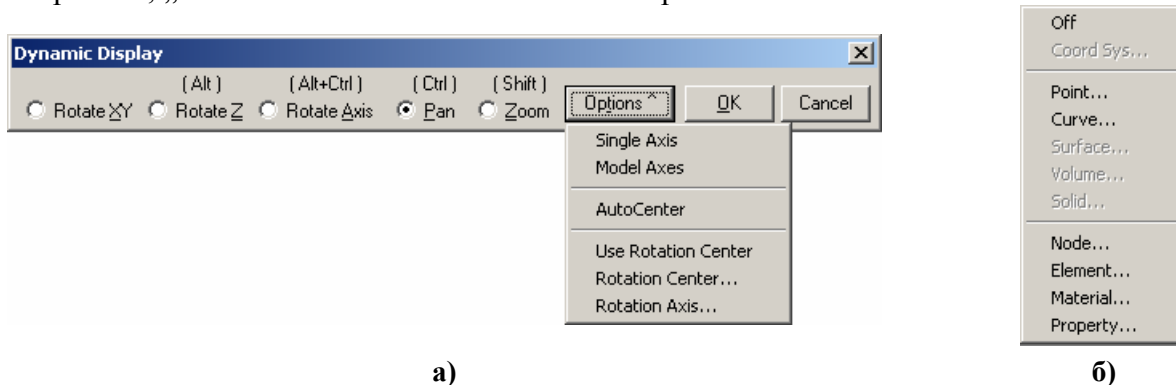


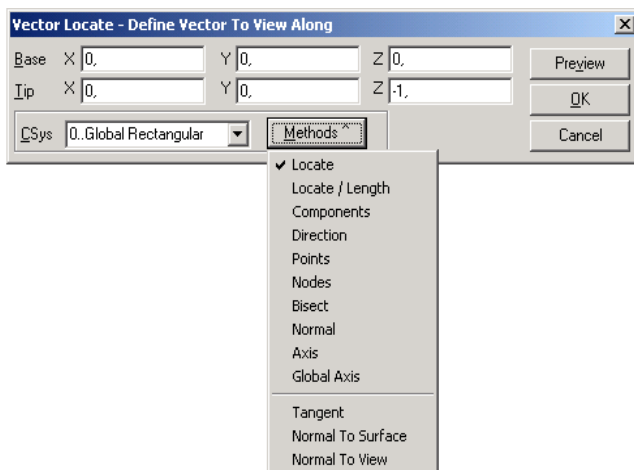
Рис.2.7. Діалогова панель динамічного керування геометричною моделлю з натиснутою кнопкою „Options^” (а); динамічна панель меню типів об'єктів (б)

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

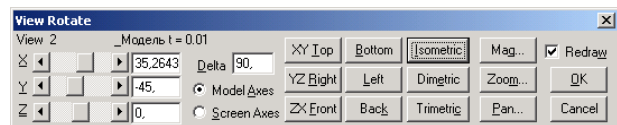
шею „F6”) – див. Розділ 1.5 та рис.1.9. Також нагадаємо, що за допомогою перемикача  Off, що розташований у правій частині панелі стану (горизонтальна смуга понизу, той, що правіше) можна викликати динамічну панель меню (див. рис.2.7-б), на якій – обрати тип об’єкту (точки, лінії, поверхні, об’єми, скінченні 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:

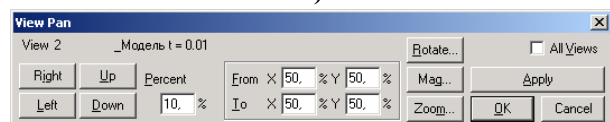
- група електронних кнопок мнемонічного меню, розташованих нижче головного меню (див. рис.1.1). Ліва кнопка цієї групи змінює напрям повороту на протилежний;
- команда **View→Align By→Along Vector...** На діалоговій панелі, що з’явиться (див. рис.2.8-а), потрібно обрати координатну систему та метод, 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 ).



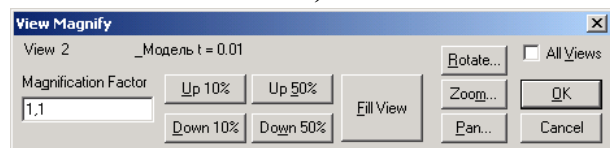
а)



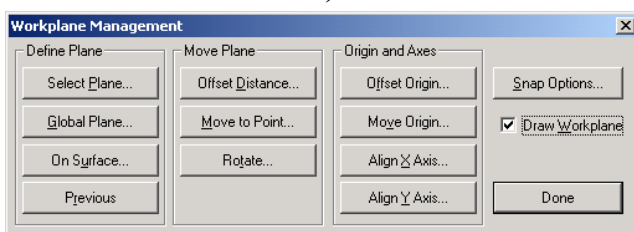
б)



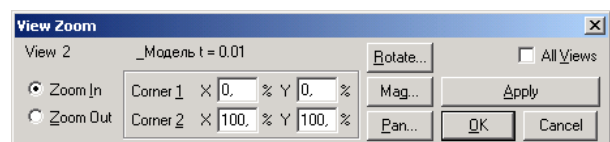
в)



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 настроювання 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):

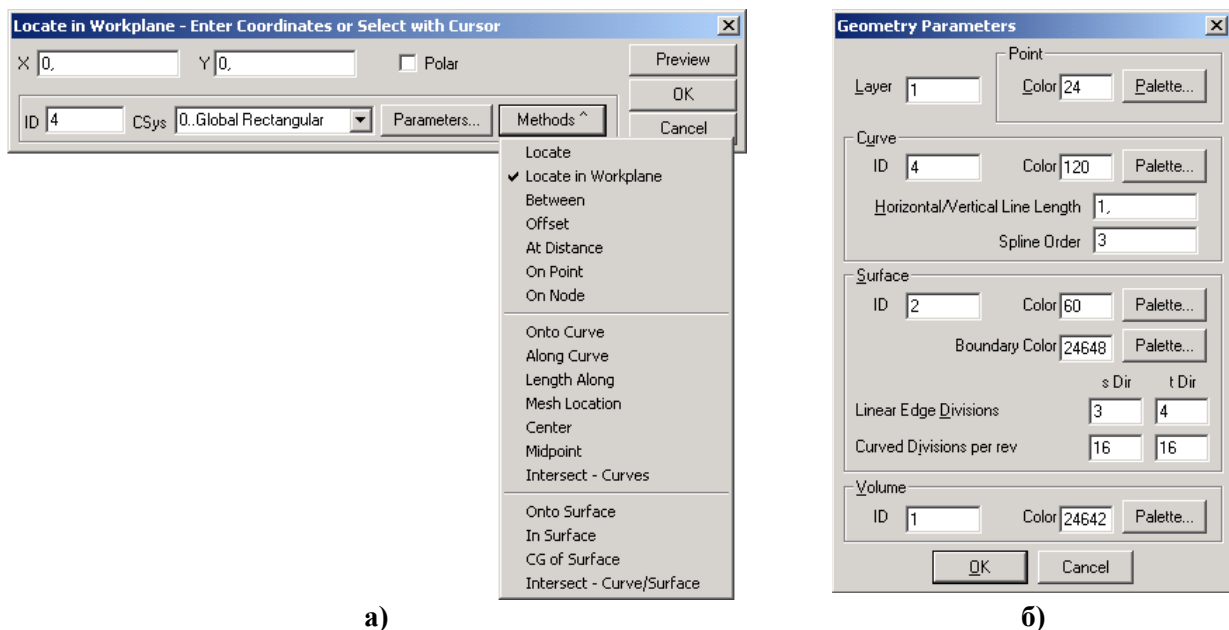


Рис.2.9. Діалогові панелі: а) – для введення точок координатами, при обраному методі „**Locate in Workplane**”; б) – параметрів геометричних об'єктів

- 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**” FEMAP: команда **Help**→**Help Topics F1**, вкладка **Contents**, розділ **FEMAP Commands**→**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→Filet...**), 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;

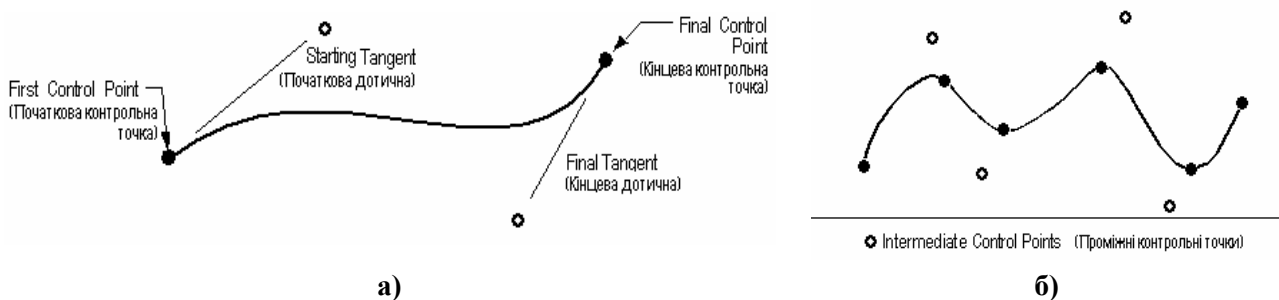


Рис.2.10. Сплайнові криві: а) через контрольні точки; б) – через точки

- 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);

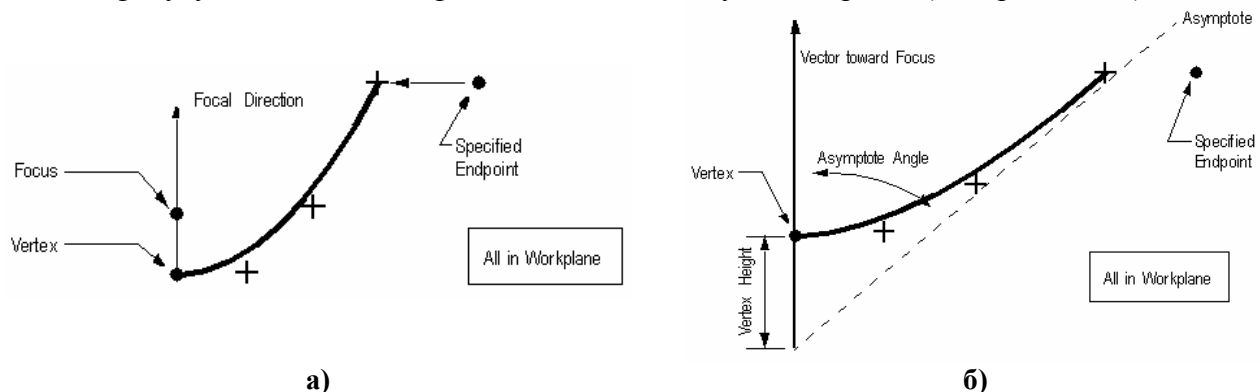


Рис.2.11. Сплайнові криві у вигляді: а) – параболи; б) – гіперболи

- 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 десь 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;

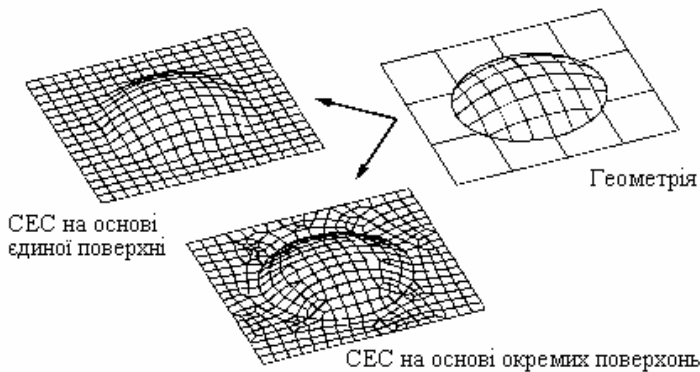


Рис.2.12. До застосування поверхонь з **Multi-surface boundaries**

- *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” FEMAP: команда **Help→Help Topics F1**, вкладка **Contents**, розділ

### FEMAP Commands→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” FEMAP: команда **Help**→**Help Topics F1**, вкладка **Contents**, розділ **FEMAP Commands**→**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;

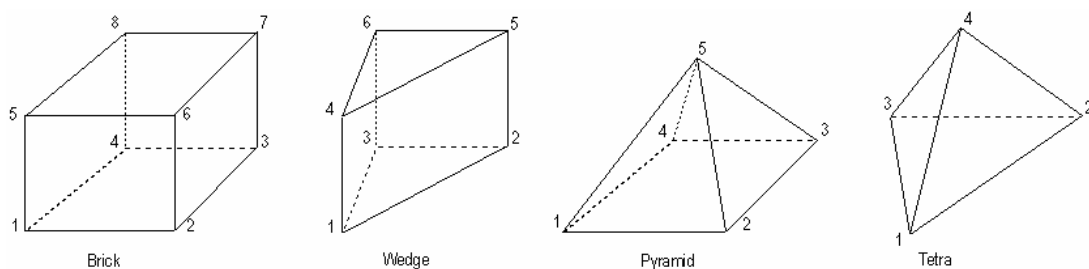


Рис.2.13. Порядок нумерації кутів об'ємних фігур (рисунок з Help)

- 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 „прапорць”) 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**” FEMAP: команда **Help→Help Topics F1**, вкладка **Contents**, розділ **FEMAP Commands→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 необхідне 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;

• повертанням 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;

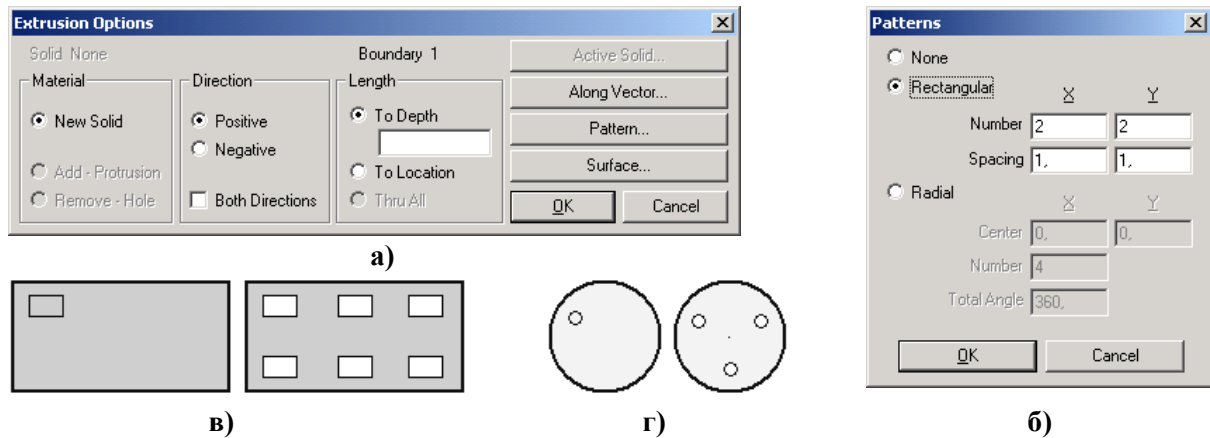


Рис.2.14. Діалогові панелі: а) – для витискування „твердого” тіла; б) – шаблони; та результати дії шаблону: в) – Rectangular; г) – Radial

• 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);

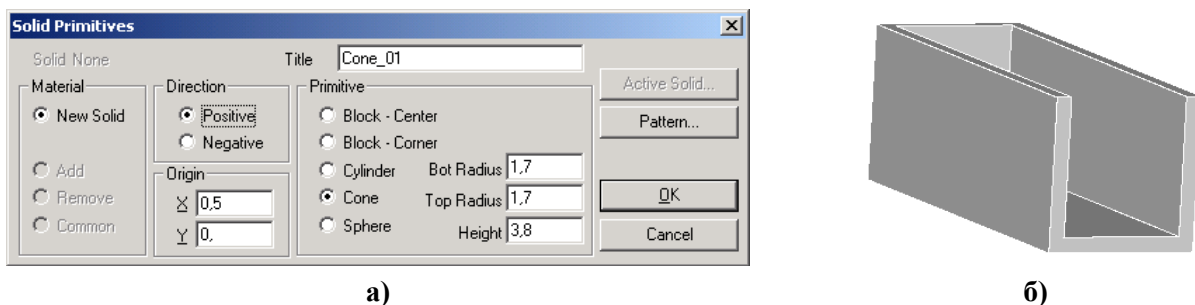


Рис.2.15. Діалогова панель створення примітивів (а); результат перетворення паралелепіпеда в оболонку командою Shell... (б)

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 діалозі „**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;

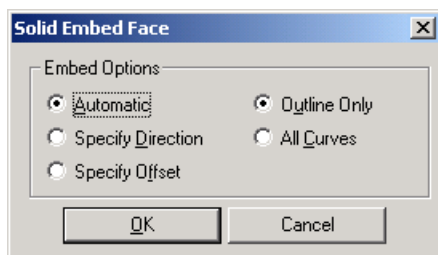
- врізання (**Embed...**): подібно до **Common...**, але *базове* тіло не зникає, а нове тіло має невизначену назву „**Untitled**”, яку можна змінити;

- 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:

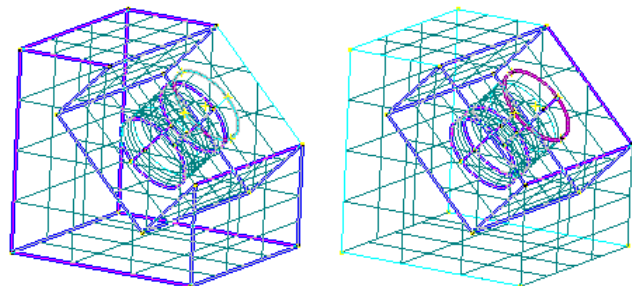
- ♦ „**Automatic**” (автоматично): у напрямку нормалі до грані, наскрізь (через все тіло);
- ♦ „**Specify Direction**” (у вказаному напрямку): додатково необхідно задати напрям та відстань (вектором);
- ♦ **Specify Offset** (на вказану відстань): у напрямку *нормалі* до грані, на вказану відстань, причому 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).

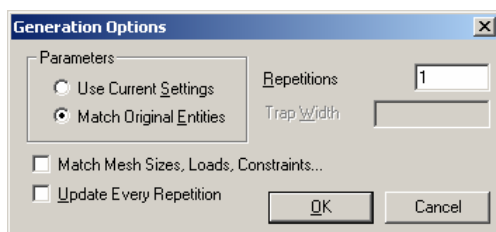
### 2.2.6. Загальні операції з елементами геометричної моделі

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

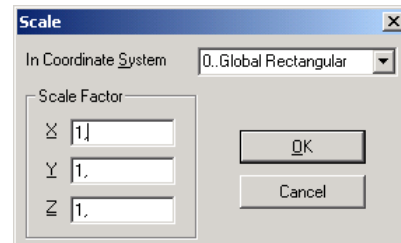
#### 2.2.6.1. Операції копіювання

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 Settings**” (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 радіусу, 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.

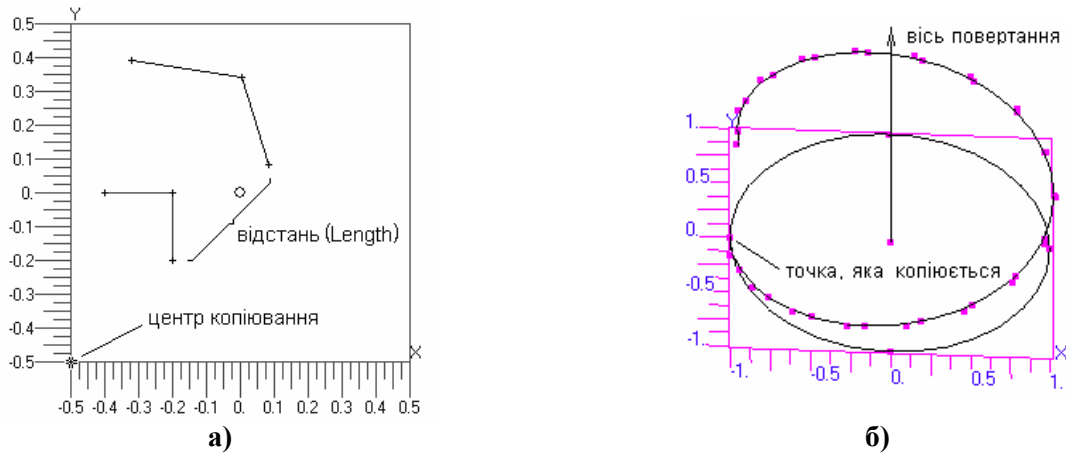


Рис.2.18. Приклади копіювання: а) – радіального ліній; б) – точки з обертанням та зміщенням, з наступним створенням сплаймової лінії

### 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 сплаймової 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 замкнутого 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.

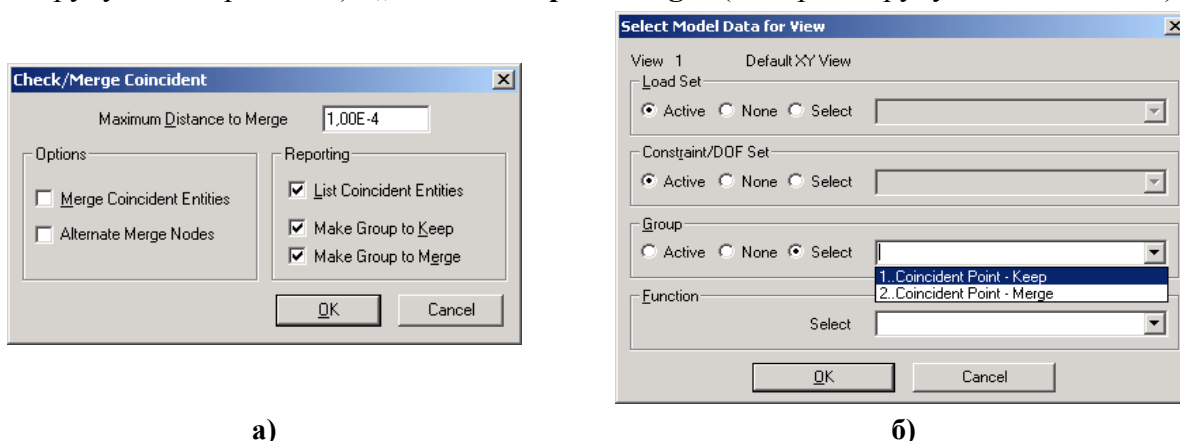
### 2.2.6.3. Операції контролю геометрії

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 діалозі 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 обираються 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).