

Розділ 5

МОДЕЛЮВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

Крайова задача про тепловий стан (ТС) для крайових задачах про напружено-деформований стан (НДС) твердих тіл носить допоміжний, але важливий характер, оскільки ТС сильно впливає на НДС усього тіла.

Теоретичні відомості про крайові задачі теплопровідності наведені у Додатку 4. Шука-на (основна) величина – температура у вузлах СЕС, всі інші – похідні від неї.

Увага: для розрахунків ТС можна застосовувати не всі типи СЕ, а тільки **ROD, TUBE, BAR, BEAM** (одновимірні); **PLATE, MEMBRANE, PLANE STRAIN** (двовимірні); **SOLID** та **AXISYMMETRIC** (тривимірні та вісесиметричні). При цьому всі одновимірні типи СЕ приводять до однакових результатів незалежно від форми та розмірів перерізу; для них можна задати тільки два варіанта граничних умов (ГУ): температуру або теплові джерела (СЕ типу **TUBE** ще застосовується для моделювання примусового конвекційного теплообміну). Всі двовимірні типи СЕ теж приводять до однакових результатів, причому температура по товщині СЕ – незмінна. Якщо у СЕС моделі є СЕ інших типів, то вони ігноруються, а СЕ типу **SPRING** та **DOFSpring** з ненульовою жорсткістю викликають фатальну помилку.

Загальні відомості щодо завдання граничних умов викладено у Розділі 4. Нижче викладемо лише специфічну інформацію про моделювання крайових задач теплопровідності.

5.1. Моделювання крайової задачі стаціонарної теплопровідності

Будемо вважати, що скінченно-елементна модель для задачі теплопровідності вже створена (див. Розділ 3). Для твердого тіла у формулі (Д4.1) Додатку 4 (та наступних формулах) компонента $c_p \bar{\rho} (\nabla_j T) V_j$ відсутня.

Початкові та граничні умови для крайових задач теплопровідності у FEMAP створюються командами **Model→Load→** (див. Розділ 4.1).

5.1.1. Завдання початкових умов крайової задачі теплопровідності

Командою **Model→Load→Body...** викликається діалогова панель „**Create Body Loads**” (див. рис.5.1-а). На ній (зліва понизу) активізується поле „**Default Temperature**”, в яке вводиться значення початкової температури, яка призначається для усіх вузлів СЕС. „**Reference Temperature**” – температура, при якій у тілі не виникають температурних деформацій. **Увага:** для розв’язування крайової задачі *стаціонарної* теплопровідності початкові умови не обов’язкові, але можуть знадобитися у подальшому, тому доцільно їх вводити завжди.

5.1.2. Завдання граничних умов крайової задачі стаціонарної теплопровідності

5.1.2.1. Величини для граничних умов крайової задачі теплопровідності

Граничними умовами (ГУ) задачі теплопровідності можуть бути величини, що наведені у таблиці 5.1. Теплофізичні характеристики матеріалів наведені в Розділі 3.1 і в таблиці 5.2.

5.1.2.2. Завдання граничних умов першого роду

ГУ 1-го роду – це відома температура. У FEMAP може задаватися у вузлах, точках, на кривих, поверхнях або СЕ за правилами, викладеними в Розділі 4.1. На діалоговій панелі „**Create Loads ...**” (див. рис.4.3-а) у списку (центральна його частина) відповідно до об’єкту прикладання ГУ обирається „**Temperature**” або „**Element Temperature**”, у діалоговому вікні „**Value**” вводиться значення температури. За допомогою кнопки „**Advances...**” можна встановити змінний масштабний коефіцієнт.

Ще один варіант завдання ГУ у вигляді температури – за допомогою зв’язків між вузлами, які задаються за формулою $\sum a_i T_i = 0$, де T_i – температура i -го вузла, a_i – призначені коефіцієнти. Звичайно його застосовують, коли потрібно, щоб температура декількох вузлів була однаковою.

Create Body Loads

Load Set 1 Load_01

☐ Active Acceleration

Translation/Gravity (length/time/time) X [0] Y [0] Z [0]

Rotation (radians/time/time) Ax [0] Ay [0] Az [0]

☐ Active Velocity

Rotation (rev/time) Wx [0] Wy [0] Wz [0]

Origin

Center of Rotations X [0] Y [0] Z [0]

☒ Active Thermal

Default Temperature T [293]

Reference Temperature RefT [293]

OK Cancel

а)

Heat Transfer Loads

Load Set 1 Load_01

Radiation

Temp Offset from Abs Zero [0]

Stefan-Boltzmann [0]

Enclosure Ambient Element [0]

Free Convection

Alternate Formulation ☐

Convection Exponent [0]

Forced Convection

Alternate Formulation ☐

Exclude Convective Energy Flow ☐

Constant Coefficient [0]

Reynolds Exponent [0]

Prandtl Exponent (into fluid) [0]

Prandtl Exponent (out of fluid) [0]

Fluid Conductivity [0] Constant [0] Temperature Dependence [0]

Fluid Specific Heat [0] [0] None

Fluid Viscosity [0] [0] None

Fluid Density [0]

Copy... OK Cancel

б)

Рис.5.1. Діалогові панелі для введення:

а) – початкової температури; б) – додаткових характеристик теплових потоків

Таблиця 5.1. Типові величини для граничних умов тривимірної СЕС

Вузлові граничні умови (Nodal boundary conditions)		
Температура (Temperature)	°C, °K	
Теплове джерело або тепловий стік (Heat Generation)	W	Вт
Тепловий потік (Heat Flux)	W	Вт
Граничні умови СЕ (Element boundary conditions)		
Температура (Temperature)	°C, °K	
Теплове джерело або тепловий стік (Heat Generation)	W/m ³	Вт/м ³
Тепловий потік (Heat Flux)	W/m ²	Вт/м ²
Спрямований тепловий потік (Directional Heat Flux)	W/m ²	Вт/м ²
Вільна конвекція (Free Convection)	W/m ²	Вт/м ²
Силовa конвекція (Force Convection)	W/m ²	Вт/м ²
Випромінювання (радіація) з простору (Radiation to Space)	W/m ²	Вт/м ²
Радіаційне оточення (Radiation Enclosure)	W/m ²	Вт/м ²

Таблиця 5.2. Теплофізичні характеристики матеріалів

Коефіцієнт теплопровідності k (Thermal Conductivity)	W/(m °K)	Вт/(м °K)
Щільність ρ (Density)	kg/m ³	кг/м ³
Питома теплоємність при незмінному тиску C_p (Specific Heat)	J/(kg °K)	Дж/(кг °K)
Ентальпія (Enthalpy)	J/kg	Дж/кг
Схована теплота (Latent Heat)	J/kg	Дж/кг
Коефіцієнт конвекційної тепловіддачі на поверхні α	W/(m ² °K)	Вт/(м ² °K)
Динамічна в'язкість, μ	kg/(m c)	Кг/(м c)
Постійна Стефана-Больцмана: $5.668 \cdot 10^{-8}$	W/(m ² °K ⁴)	Вт/(м ² °K ⁴)
Постійна Стефана-Больцмана: $0.1714 \cdot 10^{-8}$	Btu/h ft ² R ⁴	

Командою **Model→Constraint→Equation...** викликається діалогова панель „**Create Constraint Equation**” (див. рис.5.2), на якій вказуються: **ID** формули; колір зображення зв'язків; рівень (**Layer**); значення коефіцієнту a_i ; номер вузла; ступені свободи **DOF**, що зв'язуються (для зв'язування температури вузлів тут потрібно обрати **TX**, інакше буде фатальна помилка). Дається команда „**Add**” (додати) і вказана інформація з'являється у великому вікні діалогової панелі. Коли усі компоненти даної суми набрані, дається команда „**OK**”. Якщо у сумі є значна кількість вузлів з однаковими призначеннями (окрім їх номерів), то мож-

на кнопкою „**Multiple Nodes...**” викликати стандартний діалог обирання вузлів. У FEMAP є обмеження для кількості членів у сумі: до 70. На рис.5.2 зображено стан діалогового вікна після подання команди „**Add**” перед командою „**OK**”, тобто після завдання рівняння $T_Y(75) - T_Y(24) = 0$, яке вказує, що температура вузлів 75 і 24 повинні бути однаковими.

Для повернення до попередньої ситуації є кнопка „**Replace**”, для видалення непотрібних або помилково набраних компонентів суми – команда „**Delete**”.

5.1.2.3. Завдання граничних умов у вигляді теплового джерела або стоку тепла

У FEMAP теплове джерело (стік тепла) може задаватися у вузлах, точках, на кривих, поверхнях або СЕ за правилами, викладеними у Розділі 4.1.1. На діалоговій панелі „**Create Loads ...**” (див. рис.4.3-а) у списку (нижня його частина) відповідно до об'єкту прикладання ГУ обирається „**Heat Generation**” або „**Element Heat Generation**”, у діалоговому вікні „**Value**” вводиться значення потужності теплового джерела (додатне) або стоку (від'ємне). За допомогою кнопки „**Advances...**” можна встановити змінний масштабний коефіцієнт.

5.1.2.4. Завдання граничних умов за тепловим потоком

У FEMAP тепловий потік може задаватися у вузлах, точках, на кривих, поверхнях або СЕ за правилами, викладеними у Розділі 4.1.1. На діалоговій панелі „**Create Loads ...**” (див. рис.4.3-а), коли вона викликається відповідною командою **Model→Load→...**, у списку (нижня його частина) відповідно до об'єкту прикладання ГУ обирається „**Heat Flux**”, „**Heat Flux per Length**”, „**Heat Flux per Node**” або „**Element Heat Flux**”; у діалоговому вікні „**Value**” вводиться значення потужності теплового потоку (додатне – назовні, від'ємне – усередину). За допомогою кнопки „**Advances...**” можна встановити змінний масштабний коефіцієнт.

Ще один варіант – тепловий потік від дистанційного джерела променевого тепла (наприклад, для моделювання явища добового підвищення температури). Дається команда **Model→Load→Elemental...**, на діалоговій панелі „**Create Loads ...**” (див. рис.4.3-а) обирається „**Heat Flux**” та ініціюється опція „**Directional**”. Задаються *дві* величини: величина потоку „**Flux**” (може бути функцією часу) та спроможність поверхні поглинати „**Absorptivity**” (додатковий множник для величини потоку, в межах 0...1, може бути функцією температури). **Увага:** поле для введення температури не використовується.

5.1.2.5. Завдання граничних умов конвекційного нагріву

При введенні умов конвекційного нагріву (**Convection**) у FEMAP є два варіанта.

5.1.2.5.1. Завдання граничних умов „вільного” конвекційного нагріву

Перший варіант описує конвекційний нагрів загального випадку (**Free Convection**), тобто від газу або рідини, що вільно „омиває” обрану поверхню тіла або його частину. Це відповідає формулі (Д4.5а) Додатку 4. Для нього (див. рис.4.3-а) вводяться: „**Coefficient**” (коефіцієнт конвекційної тепловіддачі на поверхні), який може бути функцією температури (**2..vs.Temperature**); та температура газу або рідини, що „омиває” тіло (**Temperature**), яка може бути функцією часу (**1..vs.Time**).

У FEMAP ще є альтернативна форма для „**Free Convection**”, яка пов'язана з використанням нелінійної залежності (Д4.5б) або (Д4.5в) Додатку 4 (тільки для MSC.Nastran). *Додатково* до дій, викладених у попередньому абзаці, командою **Model→Load→Heat Transfer...** потрібно викликати діалогову панель „**Heat Transfer Loads**” (див. рис.5.1-б), де у секції „**Free Convection**” – задати у полі „**Convection Exponent**” значення коефіцієнта μ , який фігурує у формулах (Д4.5б) та (Д4.5в). Якщо встановити опцію „**Alternate Formula-tion**”, то буде застосовуватися формула (Д4.5в).

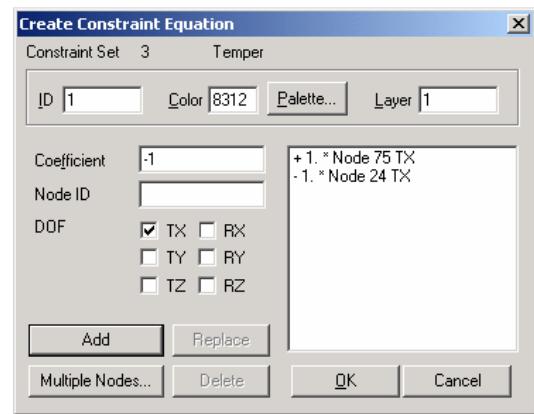


Рис.5.2. Діалогова панель створення рівняння зв'язку між температурами вузлів

5.1.2.5.2. Завдання граничних умов „примусового” конвекційного нагріву

Другий варіант описує *одновимірний* потік „примусової” конвекції у СЕ типу **TUBE**. Цей потік рідини переносить тепло (**Advection**) та здійснює конвекційний нагрів (**Convection**) внутрішньої поверхні СЕ.

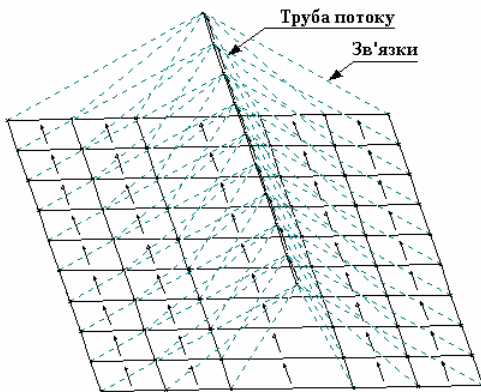


Рис.5.3. Схема „Forced Convection”

Одновимірний потік „примусової” конвекції у FEMAP може бути застосованим для завдання „примусової” одновимірної конвекції від потоку тепла *вздовж* поверхні, описаної *двовимірними* СЕ. Він досить складний у реалізації, задається для двовимірних СЕ (**Model→Load→Elemental...**) за допомогою СЕ типу **TUBE** з *нульовими діаметрами*, що створені завчасно (див. рис.5.3) на деякій відстані від поверхні тіла (якщо СЕ моделюють реальну трубу, то потрібно задати реальні діаметри). **Увага:** ці СЕ *необхідно* помістити в *окремий* рівень (**Layer**), щоб потім можна було створити логічний зв'язок з ними. Цей потік може переносити тепло за рахунок руху (**Advection**) та здійснювати конвекційний нагрів (**Convection**) по-

верхонь СЕ, до яких він буде „приєднаним” при завданні цих ГУ.

Примітка 5.1. Якщо такі ГУ необхідно задати на поверхнях тривимірних СЕ, то потрібно на вузлах цих поверхонь створити додаткові двовимірні СЕ типу **PLOT ONLY**, які й використовувати для завдання ГУ.

Отже, спочатку необхідно створити новий рівень (див. Розділ 1.7.1) та зробити його активним. Потім на деякій відстані від поверхні тіла – провести лінію, на якій створити СЕ типу **TUBE** з нульовими або реальними діаметрами. Потім після команди **Model→Load→Elemental...** – обрати СЕ типу **TUBE**, а на діалоговій панелі „**Create Loads ...**” – обрати ГУ типу „**Convection**”, встановити опції „**Forced Convection**” та „**Disable Convection**” (зліва понижу, див. рис.5.4-а); ввести: швидкість (**Flow Rate**) та гідравлічний діаметр (**Diameter**) потоку. Температуру (**Temperature**) тут задавати не треба. Вона задається у вузлі *на початку* ланцюга СЕ типу **TUBE** за допомогою команди **Model→Load→Nodal...**

Теплова конвекція повинна діяти на грань №1 (**Face1**) двовимірного СЕ, причому у напрямку від середини ребра першого до середини ребра третього (або до протилежного кута трикутного СЕ). Щоб усім потрібним СЕ задати однакову орієнтацію, потрібно дати команду **Modify→Update Elements→Reverse...**, обрати СЕ, на діалоговій панелі „**Update Element Directions**” (див. рис.3.25 та Розділ 3.5.9) обрати варіант „**Align First Edge to Vector**” та вказати напрямок вектору для першого ребра (**First Edge**). Таким же чином, при необхідності, потрібно погодити напрямок двовимірних СЕ та СЕ типу **TUBE**.

Потім потрібно обрати двовимірні СЕ (команда **Model→Load→Elemental...**), на діалоговій панелі „**Create Loads ...**” обрати ГУ типу „**Convection**”, встановити опції „**Forced Convection**” та „**Disable Advection**” – зліва понижу, див. рис.5.4-б; ввести: швидкість (**Flow Rate**), діаметр (**Diameter**) потоку (такі ж самі, що й для СЕ типу **TUBE**) та коефіцієнт області (**Area Factor** ≈ 1). Цей коефіцієнт дорівнює відношенню площі поверхні тіла, на яку повинна діяти умова конвекційного теплообміну, до реальної площі поверхонь СЕ. На основі цих даних FEMAP обчислює числа Рейнольдса (**Reynolds**) і Прандтля (**Prandtl**), а потім – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі між тепловим потоком у трубі та поверхнею тіла. **Увага:** для „зчеплення” даних потрібно вказати той номер рівня (**Layer**), у якому заданий потік (у такий спосіб можна задавати декілька потоків). Якщо „зчеплення” відбулося, на робочому полі з'являться лінії зв'язків (див. рис.5.3). Як застерігають у „**Help**”, це відбувається не завжди, гарантовано – коли двовимірні СЕ мають чотири кута, а СЕС – регулярну структуру (див. рис.5.3).

Останній етап – завдання властивості рідини. Командою **Model→Load→Heat Transfer...** викликається діалогова панель „**Heat Transfer Loads**” (див. рис.5.1-б). На ній у стовп-

чику „Constant” секції „Forced Convection” вводяться значення „Fluid Conductivity” (коефіцієнт теплопровідності), „Fluid Specific Heat” (питома теплоємність при незмінному тиску), „Fluid Viscosity” (динамічна в’язкість) та „Fluid Density” (щільність) рідини. У стовпчику „Temperature Dependence” бажано обрати заздалегідь створені функції (типу **2.vs.Temperature**), що описують температурну залежність величин (оскільки, наприклад, динамічна в’язкість рідини дуже швидко зменшується при підвищенні температури). Інший варіант – задавати властивості рідини для температури, *середньої* від початкової температури потоку та поверхні тіла.

Ще вводяться значення „Constant Coefficient” (коефіцієнт γ , див. Примітку 5.4. нижче), „Reynolds Exponent” (ступінь для числа Рейнольдса), „Prandtl Exponent (into fluid)” (ступінь для числа Прандтля, у рідині) „Prandtl Exponent (out of fluid)” (ступінь для числа Прандтля, за межами рідини). Ці величини у FEMAP перераховуються в інші, потрібні для описання конвекційного теплообміну (див. Примітку 5.4).

Якщо виявиться, що число Рейнольдса $Re = VL/\nu > 2 \cdot 10^5$ (тут L – довжина поверхні тіла вздовж напрямку потоку, V та ν пояснені нижче в Примітці 5.3), то течія потоку рідини в трубі буде мати турбулентний характер, що потребує застосування *альтернативної* формули (див. Примітку 5.4): на діалоговій панелі „Heat Transfer Loads” (див. рис.5.1-б) у секції „Forced Convection” необхідно ініціювати опцію „Alternate Formulation”.

Якщо рідина не рухається, то у секції „Forced Convection” потрібно встановити опцію „Exclude Convective Energy Flow” (відключити конвекційний потік енергії).

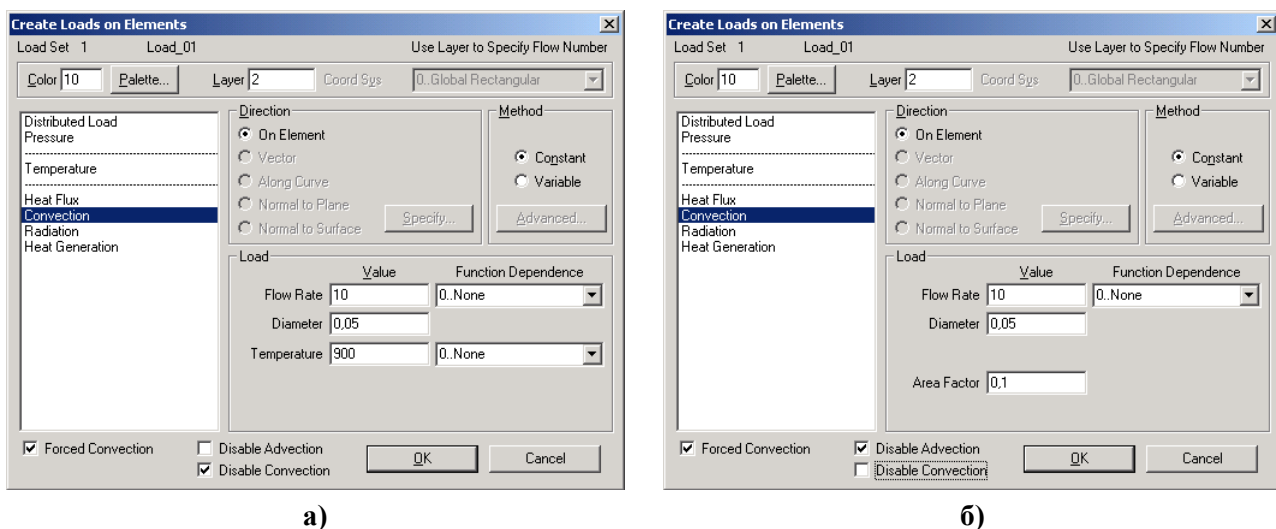


Рис.5.4. Діалогові панелі введення умов конвекційного теплообміну типу Forced Convection для СЕ: а) – типу TUBE; б) – двовимірних на поверхні тіла

Примітка 5.2. Замість вказаних величин, у довідниках можна знайти інші характеристики: кінематична в’язкість ν та теплова дифузія α , які мають однакову розмірність m^2/s . Відомі зв’язки між цими величинами та іншими: $\nu = \mu / \rho$ та $\alpha = k / (\rho \cdot C_p)$, а також те, що у рідин звичайно кінематична в’язкість дуже швидко зменшується при підвищенні температури, а теплова дифузія – незначно збільшується.

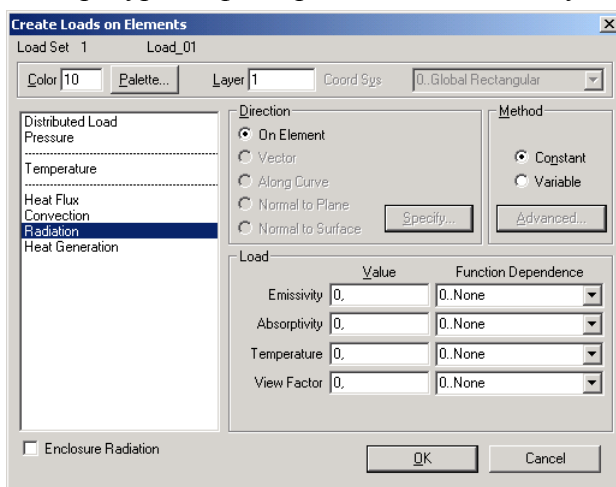
Примітка 5.3. Число Рейнольдса $Re = Vd/\nu$, де V – швидкість переміщення рідини далеко від пограничного шару; d – характерний розмір тіла, що переміщується у рідині (для трубчастого перерізу будь-якого профілю $d = \sqrt{4A/\pi}$ зветься гідравлічним діаметром, де A – площа цього перерізу). Воно характеризує відношення сил інерції до сил в’язкості. Число Прандтля $Pr = \mu \cdot C_p / k$ є мірою відношення дисипації імпульсу до дисипації тепла. Звичайно ці числа застосовують для виявлення *подібності* різних потоків. Число Нуссельта (Nusselt) $Nu = \alpha d / k$ є мірою відношення коефіцієнтів конвекційного теплообміну (на поверхні) та теплообміну матеріалу (у об’ємі); застосовують для рідини.

Примітка 5.4. У FEMAP можуть застосовуватися одна з двох формул для обчислень коефіцієнту конвекційної тепловіддачі на поверхні: $\alpha = \gamma \cdot \text{Re}^{E_{\text{Re}}} \cdot \text{Pr}^{E_{\text{Pr}}}$ або альтернативна їй $\alpha = (k/d) \cdot \gamma \cdot \text{Re}^{E_{\text{Re}}} \cdot \text{Pr}^{E_{\text{Pr}}}$, де d – гідравлічний діаметр потоку; E_{Re} та E_{Pr} – значення степенів (так званих експонент) для чисел Рейнолдса та Прандтля при конвекційному теплообміні.

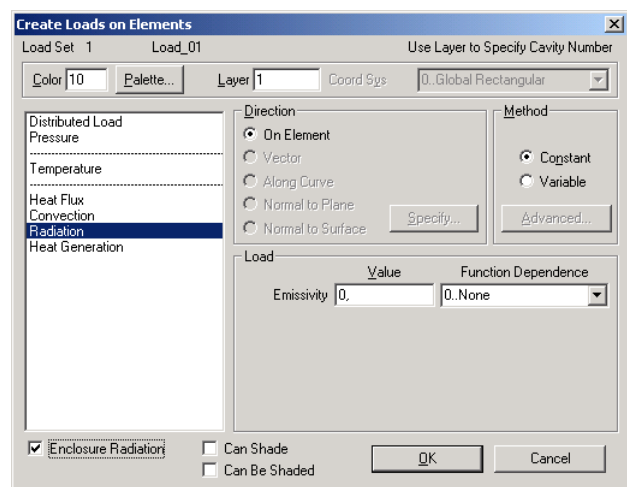
5.1.2.6. Завдання граничних умов радіаційного нагріву

При введенні умов радіаційного нагріву (**Radiation**) у FEMAP також є два варіанта.

Перший описує радіаційний нагрів від віддаленого джерела (наприклад, від сонця, лампи, відкритого вогню). Для нього вводяться значення (див. рис.5.5-а та формулу (Д4.6) у Додатку 4): „**Emissivity**” (коефіцієнт випромінювання поверхнею джерела, $0 \leq e_e \leq 1$), „**Temperature**” (абсолютна температура тіла, що випромінює), „**Absorptivity**” (коефіцієнт спроможності до поглинання, $0 \leq a_e \leq 1$) та „**View Factor**” (фактор освітленості ($0 \leq f \leq 1$) поверхні тіла, що нагрівається (див. формулу (Д4.7) у Додатку 4), або, за іншою назвою – кутовий коефіцієнт випромінювання). Коефіцієнти e_e та a_e можуть бути функціями температури, а температура та фактор освітленості – часу.



а)



б)

Рис.5.5. Діалогові панелі введення радіаційного нагріву:

а) – від віддаленого джерела; б) - від інших поверхонь того ж тіла

Другий варіант описує радіаційний нагрів поверхонь у обмеженому просторі, зокрема й від інших поверхонь того ж тіла (що розраховується). Для нього (варіант обирається опцією „**Enclosure Radiation**” – зліва внизу, див. рис.5.5-б) вводиться тільки значення „**Emissivity**” (коефіцієнт випромінювання поверхнею джерела, $0 \leq e_e \leq 1$), оскільки прийнято, що спроможності до поглинання та випромінювання – однакові ($e_e = a_e$, тобто немає втрат енергії), а інші величини – розраховуються. На тій же панелі можна встановити опції „**Can Shade**” (тінь) та/або „**Can Be Shaded**” (може бути тінь). Якщо таких обмежених просторів – декілька, то для кожного з них потрібно створити рівень (**Layer**), де й задавати умови радіаційного навантаження, про що на діалоговій панелі (див. рис.5.5-б) є нагадування (вверху правіше): „**Use Layer to Specify Cavity Number**” (використовуйте рівень для описування порожнини).

На останнє у обох випадках необхідно командою **Model**→**Load**→**Heat Transfer...** викликати діалогову панель „**Heat Transfer Loads**” (див. рис.5.1-б), де у секції „**Radiation**” ввести значення: „**Temp Offset from Abs Zero**” (різниця між нулем температурної системи, що використовується, та абсолютним нулем), „**Stefan-Boltzmann**” (постійна Стефана-Больцмана: $5.668 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ або $0.1714 \cdot 10^{-8} \text{ Btu/h ft}^2 \text{ R}^4$). Параметр „**Enclosure Ambient Element**” – це ID того зовнішнього СЕ, що випромінює (поглинає) променеву енергію. Цей СЕ створюється, якщо обмежений простір (другий варіант застосування даного типу ГУ) не є замкненим; він повинен мати розміри, що на 1-2 порядку перевищують розміри СЕ тіла, з

якими взаємодіє. Якщо простір незамкнений, а **ID** зовнішнього СЕ не задано, то вважається, що температура відкритого простору $T_a = 0$.

5.1.3. Запуск процесу розрахунку крайової задачі стаціонарної теплопровідності

При запуску процесу розрахунку крайової задачі необхідно призначити відповідний тип задачі. Дається команда **File→Analyze...**, створюється файл з розширенням імені **.dat**, обирається у списку „**Analysis Type**” (див. рис.5.6) значення „**20.. Steady-State Heat Transfer**” (стаціонарна теплопровідність). У полях „**Load**” та „**Constraints**” (навантаження та закріплення), а також „**Initial Conditions**” (початкові умови), повинне з’явитися ім’я *активного* набору навантаження, яке можна змінити на інше (якщо інші набори створювалися). У секції „**Output Request**” (завдання для виводу) можна обрати тип набору результатів: стандартний, тільки температура, температура та потік або усі вектори. Там же можна призначити завчасно створену групу, в яку буде поміщено результати.

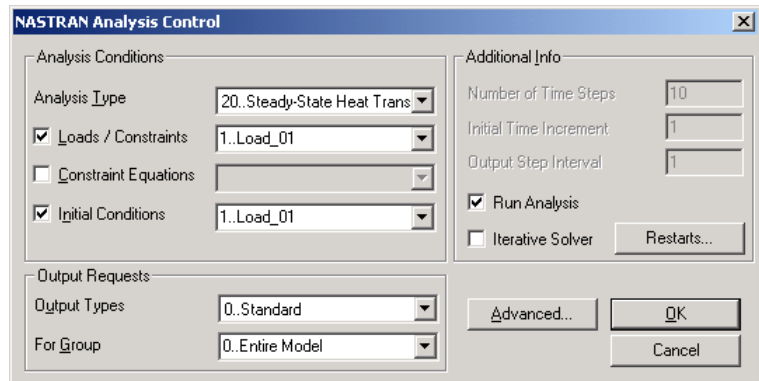


Рис.5.6. Діалогова панель запуску процесу розрахунку крайової задачі стаціонарної теплопровідності

Але є й додаткові можливості, пов’язані з кнопкою „**Advanced...**”. Вони описані у Розділі 4.2. Зокрема, якщо задача – нелінійна, то може з’явиться необхідність змінити умови збіжності (див. Розділ 4.2.3.2. та рис.4.9-а).

Цей тип крайової задачі можна розв’язувати із застосуванням внутрішнього аналізатора FEMAP з назвою FEMAP Structural. Для цього потрібно спочатку створити шаблон аналізу (див. Розділ 4.2.5).

Якщо у моделі задавалися ГУ вільної та примусової конвекції, то з’явиться діалогова панель „**Factor to Disable Forced Convection**”, де потрібно ввести лише одне мале число (за замовчанням це 0.001). Цей коефіцієнт використовується програмою для розділення теплового потоку на *конвекційний* від середовища, що взаємодії з поверхнею тіла (для СЕ з активною опцією „**Disable Advection**”, див. рис.5.4-б), та *адвекційний*, тобто той, що переноситься рідиною тіла (для СЕ з активною опцією „**Disable Convection**”, див. рис.5.4-а).

5.2. Моделювання крайової задачі нестационарної теплопровідності

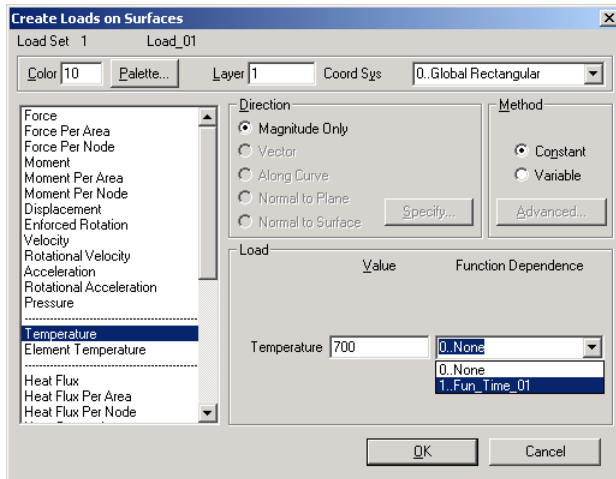
Порівняно зі стаціонарною задачею теплопровідності є такі особливості:

- необхідно обов’язково задати функцію (або декілька функцій) часу, тобто типу **1..vs.Time**, значення якої (яких) будуть масштабом для граничних умов задачі. Якщо змін у часі немає, то функція повинна мати значення, що дорівнює одиниці на усьому протязі часу;
- необхідно обов’язково усім граничним умовам призначити, від якої функції часу (**1..vs.Time**) вони залежать (після введення значення граничної умови – додатково відкрити список з назвою „**Function Dependence**”, обрати необхідну функцію, див. рис.5.7-а). Звичайно це можна зробити лише при первинному призначенні граничних умов, оскільки шляхом їх редагування зробити це майже ніколи не вдається (таких вузлів або сторін – багато). Тобто при необхідності модифікувати – спочатку видалити, потім призначити знов;
- необхідно призначити відповідний тип задачі: команда **File→Analyze...**, обрати у списку „**Analysis Type**” (див. рис.5.7-б) значення „**21..Transient Heat Transfer**” (тобто нестационарна теплопровідність). У секції значень „**Additional Info**” з’являться значення кількості часових кроків (**Number of Time Steps**), початкового часового кроку (**Initial Time Increment**) та часового інтервалу (у секундах) для формування результатів розрахунків (**Output Step Interval**), які необхідно уточнити за допомогою кнопки „**Estimate**”. При цьому програмою

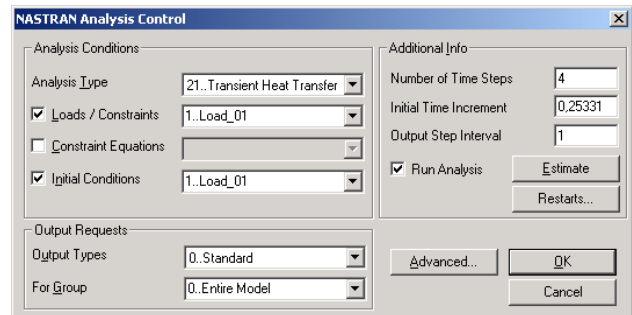
проводиться перевірка відповідності характеристик матеріалу, розмірів СЕ та часових кроків, тобто умови узгодженості за формулою (Д4.39) для *початкового* часового кроку:

$$\text{Initial Time Increment} = \Delta t \leq (h^2 c \bar{\rho} / \lambda) / 10,$$

де: h – мінімальний розмір скінченно-елементної сітки (див. Розділ Д4.6 Додатків). При необхідності останні автоматично корегуються. Якщо необхідно, є можливість повернутися до тих значень, що потрібні користувачу. **Увага:** дуже бажано дотримуватися цієї рекомендації, навіть посилювати її: ще зменшувати крок Δt у 2..10 разів, інакше у зоні швидких змін граничних умов розв’язок задачі буде мати нефізичне зменшення температури замість її підвищення (або навпаки);



а)



б)

Рис.5.7. До задачі нестационарної теплопровідності:

а) – завдання функції часу до ГУ; б) – призначення умов виконання аналізу

- після проведення розрахунків з’являються *декілька* наборів результатів (відповідають часовим крокам розрахунку). Цей факт необхідно врахувати при аналізуванні результатів (див. Розділ 8).