МОДЕЛЮВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

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

Теоретичні відомості про крайові задачі теплопровідності наведені у Додатку 4. Шукана (основна) величина – температура у вузлах скінченно-елементної сітки (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) Додатка 4 (та наступних формулах) компонента $c_p \bar{\rho} (\nabla_i T) V_i$ 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. Увага: для розв'язування крайової задачі *стаціонарної* теплопровідності початкові умови не є обов'язковими, 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 в таблице 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 CE 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'єкта прикладання ГУ обирається "Temperature" або "Element Temperature", у діалоговому вікні "Value" вводиться значення температури. Якщо у секції "Method" обрати варіант "Variable", то за допомогою кнопки "Advances…", яка викликає панель "Advanced Load Methods" (див. рис.4.3-б), можна встановити змінний масштабний коефіцієнт. Якщо ГУ задається на поверхні, то у секції "Method" можна обрати варіант "Data Surface" та за допомогою кнопки у полі "Data Surface" можна задати значення на поверхні у табличному вигляді. Докладні пояснення – у Розділі 4.1.3.

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 🛛 🔀						Create Constraint Equation	
Load Set 1	Untitled					Create Constraint Equation	
C Translational A	Accel / Gravity (length/time	/time)	Rotational Acceleration (radians/time/time)		me/time)	Constraint Set 1 Temp	
Active	Time/Freq Depende	ence		Time/Freq D	ependence	ID 1 Title	
Ax 0,	0None	✓ ^f xy	Arx 0,	0None	y f _{xy}		=
Ay 0,	0None	✓ f _{xy}	Ary 0,	0None	y f _{xy}	Color 8312 Palette Layer 1	
Az 0,	0None	✓ ^f xy	Arz 0,	0None	y f _{xy}	Coefficient 1 +1 × Node 60 TX	
Rotational Velocity (revolutions/time)			Center of Rotations			Node ID	
Acti <u>v</u> e	Time/Freq Depende	ence		Specify or Pick L	ocation		
- ₩x = 0,	0None	✓ f _{xy}	X 0,				
	0None	y f _{xy}	Y 0,				
₩2 0,	0None	✓ f _{xy}	Z 0,				
Thermal						Add Replace	
Active D)efault <u>T</u> emperature	T 20		Rotating Arour	nd Vector Cancel	Multiple Nodes Delete <u>D</u> K Cancel	
	a)					ნ)	

Рис.5.1. Діалогові панелі для: а) – введення початкової температури; б) – створення рівняння зв'язку між температурами вузлів

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 CE (Element boundary con	nditions)				
Температура (Temperature)	°C, °K				
Теплове джерело або тепловий стік (Heat Generation)	W/m ³	Вт/м³			
Тепловий потік (Heat Flux)	W/m ²	Вт/м ²			
Спрямований тепловий потік (Heat Flux, Directional)	W/m ²	В т/м ²			
Вільна конвекція (Free Convection)	W/m ²	Вт/м ²			
Силова конвекція (Force Convection)	W/m ²	Вт/м ²			
Випромінювання (радіація) з простору (Radiation to Space)	W/m ²	BT/M ²			
Радіаційне оточення (Radiation Enclosure)	W/m^2	В т/м ²			

Таблиця 5.2. Теплофізичні характеристики матеріалів

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

Командою Model→Constraint→Equation... викликається діалогова панель "Create Constraint Equation" (див. рис.5.1-б), на якій вказуються: ID формули; колір зображення зв'язків; рівень (Layer); значення коефіцієнта a; номер вузла; ступені свободи DOF, що зв'язуються (для зв'язування температури вузлів тут потрібно обрати ТХ, 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 "ОК". Якщо у сумі є значна кількість вузлів з однаковими коефіцієнтами (окрім їх номерів), то можна кнопкою "Multiple Nodes…" викликати стандартний діалог обирання вузлів. У FEMAP є обмеження для кількості членів у сумі: до 70. На рис.5.1-б зображено стан діалогового вікна після подачі команди "Add" перед командою "OK", тобто після завдання рівняння TY(60) - TY(76) = 0, яке вказує, що температури вузлів 60 і 76 повинні бути однаковими.

Для повернення до попередньої ситуації на панелі 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 4.1.3. На діалоговій панелі "Create Loads ..." (див. рис.4.3-а) у списку (нижня його частина) відповідно до об'єкта прикладання ГУ обирається "Heat Generation", у діалоговому вікні "Value" вводиться значення потужності теплового джерела (додатне) або стоку (від'ємне). Якщо у секції "Method" обрати варіант "Variable", то за допомогою кнопки "Advances...", яка викликає панель "Advanced Load Methods" (див. рис.4.3-б), можна встановити змінний масштабний коефіцієнт. Якщо ГУ задається на поверхні, то у секції "Method" можна обрати варіант "Data Surface" та за допомогою кнопки у полі "Data Surface" - задати значення на поверхні у табличному вигляді. Докладні пояснення - у Розділі 4.1.3.

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 4.1.3. На діалоговій панелі "Create Loads ..." (див. рис.4.3a), коли вона викликається відповідною командою Model > Load > ..., у списку (нижня його частина) відповідно до об'єкта прикладання ГУ обирається "Heat Flux", "Heat Flux per Length", "Heat Flux per Node" або "Heat Flux per Area"; у діалоговому вікні "Value" вводиться значення потужності теплового потоку (додатне – назовні, від'ємне – усередину). Опція "Midside Nodes Adjustment" (для "Heat Flux per Node" та "Heat Flux per Area") дозволяє задіяти проміжні вузли на ребрах СЕ. Якщо у секції "Method" обрати варіант "Variable", то за допомогою кнопки "Advances...", яка викликає панель "Advanced Load Methods" (див. рис.4.3-б), можна встановити змінний масштабний коефіцієнт. Якщо ГУ задається на поверхні, то у секції "Method" можна обрати варіант "Data Surface" та за допомогою кнопки у полі "Data Surface" – задати значення на поверхні у табличному вигляді. Докладні пояснення – у Розділі 413

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" (понизу панелі). 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) Додатка 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). Якщо у секції "Method" обрати варіант "Variable", то за допомогою кнопки "Advances...", яка викликає панель "Advanced Load Methods" (див. рис.4.3-б), можна встановити змінний масштабний коефіцієнт. Якщо ГУ задається на поверхні, то у секції "Method" можна обрати варіант "Data Surface" та за допомогою кнопки у полі "Data Surface" можна задати значення на поверхні у табличному вигляді. Докладні пояснення – у Розділі 4.1.3.

Heat Transfer Loads			X
Load Set 1 Temp Radiation Temp Offset from Abs Zero (Stefan-Boltzmann (Enclosure Ambient Element (),),)	Free Convection <u>A</u> lternate Formulation <u>C</u> onvection Exponent	0,
 Forced Convection Alternate Formulation Exclude Convective Energy Flow 		Co <u>n</u> stant Coefficient <u>R</u> eynolds Exponent <u>P</u> randtl Exponent (into fluid) Pran <u>d</u> tl Exponent (out of fluid)	0, 0, 0, 0,
	Constant	Temperature Dependence	_
Fluid Conductivity	0,	0None	<mark>∼ </mark> ∫xy
Fluid Specific <u>H</u> eat	0,	0None	🗸 🖍
Fluid ⊻iscosity	0,	0None	✓ f _{xy}
Fl <u>u</u> id Density	0,		
Сору			Cancel



У FEMAP ще є альтернативна форма для "Free Convection", яка пов'язана з використанням нелінійної залежності (Д4.5-б) або (Д4.5-в) Додатка 4 (тільки для NX Nastran). Додатково до дій, викладених у попередньому абзаці, командою Model→Load→Heat Transfer... потрібно викликати діалогову панель "Heat Transfer Loads" (див. рис.5.2), де у секції "Free Convection" – задати у полі "Convection Expo**nent**" значення коефіцієнта μ , який фігурує у формулах (Д4.5-б) та (Д4.5-в). Якщо встановити опцію "Alternate Formulation", то буде застосовуватися формула (Д4.5-в).

5.1.2.5.2. Завдання граничних VMOB "примусового" конвекційного нагріву

Другий варіант описує одновимірний потік "примусової" конвекції у СЕ типу ТИВЕ. Цей потік рідини переносить тепло (Advection)

та здійснює конвекційний нагрів (Convection) внутрішньої поверхні СЕ.

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 ТUBE з нульовими діаметрами, що створені завчасно (див. рис.5.3-а) 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) поверхонь CE, *до яких він буде* "*приєднаним*" при завданні цих ΓY .

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.



Рис.5.3. Схема "Forced Convection" (a); діалогова панель введення умов конвекційного теплообміну типу Forced Convection для CE типу TUBE (б)

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 on Elements" – обрати ГУ типу "Convection", встановити опції "Forced Convection" та "Disable Convection" (зліва понизу, див. рис.5.3-б); 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 Normal/Orient First Edge..., обрати СЕ, на діалоговій панелі "Update Element Directions" (див. рис.3.26-а та Розділ 3.5.9) обрати варіант "Align First Edge to Vector" та вказати напрямок вектора для першого ребра (First Edge). Таким же чином, при необхідності, потрібно погодити напрямок двовимірних СЕ та СЕ типу TUBE.



Рис.5.4. Діалогова панель введення умов конвекційного теплообміну типу Forced Convection для двовимірних СЕ на поверхні тіла

Потім потрібно дати команду Model→Load→Elemental..., oбрати двовимірні СЕ, на діалоговій панелі "Create Loads on Elements" обрати ГУ типу "Convection", встановити опції "Forced Convection" та "Disable Advection" – зліва понизу, див. рис.5.4; ввести: швидкість (Flow Rate), діаметр (Diameter) потоку (такі ж самі, що й для СЕ типу ТИВЕ) 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 Рейнолдса (**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-а). Як застерігають у "**Help**", це відбувається не завжди, гарантовано – коли двовимірні СЕ мають чотири кута, а СЕС – регулярну структуру (див. рис.5.3-а).

Останній етап – завдання властивості рідини. Командою Model→Load→Heat Transfer... викликається діалогова панель "Heat Transfer Loads" (див. рис.5.2). На ній у стовпчику "Constant" секції "Forced Convection" вводяться значення "Fluid Conductivity" (коефіціент теплопровідності), "Fluid Specific Heat" (питома теплоємність при незмінному тиску), "Fluid Viscosity" (динамічна в'язкість) та "Fluid Density" (густина) рідини. У стовпчику "Temperature Dependence" бажано обрати функції (типу 2..vs.Temperature), що описують температурну залежність величин (оскільки, наприклад, динамічна в'язкість рідині 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" (степінь для числа Рейнолдса), "Prandtl Exponent (into fluid)" (степінь для числа Прандтля, у рідині) "Prandtl Exponent (out of fluid)" (степінь 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 Рейнолдса $\text{Re} = VL/\nu > 2 \cdot 10^5$ (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.5.2) 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).

Примітка 5.2. Замість вказаних величин, у довідниках можна знайти інші характеристики: кінематичну в'язкість ν та теплову дифузію α , які мають однакову розмірність m^2/c . 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 Рейнолдса Re = Vd/v, 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 Нусселта (Nusselt) $Nu = \alpha d / k$ є мірою відношення коефіцієнтів конвекційного теплообміну (на поверхні) та теплообміну матеріалу (у об'ємі); застосовують для рідині.

Create Loads on Elements							×	
Load Set 1 Load_01								
Title	Fitle Coord Sys D. Basic Rectangular 🗸							
Color 10 Palette Layer 1								
Distributed Load	<u>Direction</u>				Method			
Pressure	💿 On Elem	ient			Constant			
Temperature	 Vector 				 Variable 			
	🔿 Along Ci	urve.			🔘 Data Surface			
Heat Hux Convection	O Normal to Plane							
Radiation	Normal to Surface Specify Advanced							
Heat Generation	Load							
		⊻alue	Time/Freq Dependence	_	Data Surface			
	Emissivity	0,	0None 🗸	fхy	0None	~		
	Absorptivity	0,	0None 🗸	<mark>f</mark> xy	0None	v		
	Temperature	0,	0None 🗸	<mark>f</mark> xy	0None	v		
	View Factor	0,	0None 🗸	<mark>f</mark> xy	0None	v		
	Enclosure F	adiation		<u>0</u> K	Cancel			

a)

Create Loads on Elements .oad Set 1 Load 01 Use Layer to Specify Cavity Number Title Palette... Layer 1 Color 10 Method-Distributed Load Pressure On Element Constant ○ Variable Temperature 🔿 Data Surface Heat Flux Convection Radiation Heat Generation Time/Freg Dependence Data Surface ⊻alue V 😡 0..None Emissivity 0 0..None Enclosure Radiation Can Shade OK Cancel Can Be Shade

б)



Примітка 5.4. У FEMAP можуть застосовуватися одна з двох формул для обчислень коефіцієнта 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 теплообміну.

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, $0 \le e_e \le 1$), "**Тетрега**ture" (абсолютна температура тіла, що випромінює), "Absorptivity" (коефіціспроможності до поглинання, €НТ $0 \le a_e \le 1$) та "View Factor" (фактор освітленості $(0 \le f \le 1)$ 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.

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 понизу, див. рис.5.5-б) вводиться тільки значення "Emissivity" (коефіцієнт випромінювання поверхнею джерела, $0 \le e_e \le 1$), 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 опису порожнини).

На останнє у обох випадках необхідно командою Model→Load→Heat Transfer... викликати діалогову панель "Heat Transfer Loads" (див. рис.5.2), 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: $5.668 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$ або $0.1714 \cdot 10^{-8}$ Btu/h ft² R⁴). Параметр "Enclosure Ambient Element" – це ID того зовнішнього CE, що випромінює (поглинає) променеву енергію. Цей CE створюється, якщо обмежений простір (другій варіант застосування даного типу ГУ) не є замкненим; він повинен мати розміри, що на 1-2 порядку перевищують розміри CE тіла, з якими взаємодіє. Якщо простір незамкнений, а ID зовнішнього CE не задано, то вважається, що температура відкритого простору $T_a = 0$.

5.1.3. Запуск процесу розрахунку крайової задачі стаціонарної теплопровідності

Цей тип крайової задачі можна розв'язувати із застосуванням NX Nastran, а також інших аналізаторів, але розглядаємо тільки NX Nastran.

Спочатку потрібно створити завдання для проведення аналізу. Загальні відомості про це наведені у Розділі 4.2.

Зокрема, викликається діалогова панель "Analysis Set Manager", на ній за допомогою кнопки "New…" починається процес створення завдання: обирається тип задачі "20..Steady-State Heat Transfer" (див. рис.5.6-а) – стаціонарна теплопровідність. FEMAP створює стандартне завдання на розрахунок крайової задачі.

Які особливості є у завданні для стаціонарної задачі теплопровідності?

		Boundary Conditions	
	Nonlinear Control Options	Primary Sets	
	Cher Cartel	<u>C</u> onstraints C)None 🔽
	Step Control	Loads 1	Load_01 🗸 🗸
	Adaptive O Constant Interval	Initial Conditions	Load 01 🗸
Analysis Set	Number of Time Steps 0		
Title	Initial Time Increment 1.	Constraint <u>E</u> quations)None 🔽 🔽
Twe	Outout Step Interval	Bolt Preloads 0)From Load Set 🛛 🗸 🗸
Analysis <u>P</u> rogram 36NX Nastran	May Iterations per Step 10	Other DOF Sets	
Analysis Type 20Steady-State Heat Transfer		Master (ASET))None 🔽
Bun Analusis LIsing VisQ	Convergence Tolerances	Kinematic (SUPOBT)) None
	Temperature 0,001		
Ne <u>x</u> t <u>Q</u> K Cancel	Load 0,001	0 <u>M</u> IT L	JNone 💌
	<u>₩</u> ork 1.E-7	QSET C)None 🔽 🗸
		CSEI)None
	Ne <u>x</u> t <u>O</u> K Cancel	BSET	
			JNone
		Ne <u>x</u> t	<u>O</u> K Cancel
a)	ნ)		в)

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

У випадку, коли задача є нелінійною (наприклад, характеристики матеріалу залежать від температури), можна у підрозділі "NASTRAN Nonlinear" розділу "Options" викликати діалогову панель "Nonlinear Control Options" (див. рис.5.6-б). Тут для стаціонарної задачі можна змінити точність збіжності ітераційного процесу аналізу: у полях секції "Convergence Tolerances" – для температури (Temperature), по ГУ (Load) та за енергією (Work).

У підсекції "Boundary Conditions" секції "Master Requests and Conditions" можна викликати діалогову панель "Boundary Conditions" (див. рис.5.6-в), де у полях "Load" та "Constraints Equations" (навантаження та формульні зв'язки), а також "Initial Conditions" (початкові умови) обрані імена активних наборів, які можна змінити на інші (якщо інші набори створювалися).

У підсекції "Output Request" (завдання для виводу) можна викликати діалогову панель "Nastran Output Requests" (див. рис.4.19-б), де, за допомогою тих опцій, що є активними, можна вказати, для якої частки моделі виводити результати розрахунків: "0..Full Model" (повна модель) або обрати заздалегідь створену групу (вузлів або СЕ). Варіанти результатів задачі стаціонарної теплопровідності: прикладені навантаження (Applied Load), реакції зв'язків (Constraint Force), реакції зв'язків, що задані рівняннями або СЕ типу RIGID (Equation Force), температура (Temperatures), теплові потоки (Heat Flux). Інші призначення на цій панелі описані у Розділі 4.2.10.

Коли завдання створене, можна запускати процес розв'язування крайової задачі.

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 конвекийний від середовища, що взаємодіє з поверхнею тіла (для СЕ з активною опцією "Disable Advection", див. рис.5.4), та адвекційний, тобто той, що переноситься рідиною тіла (для CE з активною опцією "Disable Convection", див. рис.5.3-б).

5.2. Моделювання крайової задачі нестаціонарної теплопровідності

Порівняно зі стаціонарною задачею теплопровідності є таки 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 "Time/Freq Dependence", обрати необхідну функцію (див. рис.5.7-а); або створити таку функцію за допомогою кнопки 🖢). Звичайно це можна реально 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 створити завдання для відповідного типу задачі: команда Model-Analysis→New..., обрати у списку "Analysis Type" (аналогічно рис.5.6-а) значення "21..Transient Heat Transfer" (тобто нестаціонарна теплопровідність);

• у підрозділі "NASTRAN Nonlinear" розділу "Options" необхідно викликати діалогову панель "Nonlinear Control Options" (див. рис.5.7-б). У секції "Step Control" стають активними поля для введення значень 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 призначити. Якщо радіокнопкою "Adaptive" встановити адаптивну процедуру, то Nastran проводить перевірку відповідності початкового часового кроку характеристикам матеріалу та розмірам СЕ за формулою (Д4.39):

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

де: *h* – мінімальний розмір скінченно-елементної сітки (див. Розділ Д4.6 Додатка 4). При необхідності початковий часовий крок автоматично корегується. На подальших кроках Nastran поступово збільшує часовий крок. Якщо обрати варіант "Constant Interval", то будуть застосовуватися саме ті значення, що потрібні користувачу. Увага: дуже бажано дотримуватися цієї формульної 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). Значення "Max Iterations per Steps" (максимальна кількість ітерацій на кроці) має сенс для нелінійної задачі, коли, наприклад, характеристики матеріалу залежать від температури. Призначення секції "Convergence Tolerances" описані у попередньому Розділі;

Create Loads on Surfaces				
Load Set 1 Load_01				Nonlinear Control Options
Title Color 10 Palette	Layer 1	Step Control		
Force Per Area Force Per Node Moment Per Area Moment Per Area Extension Per State Area Moment Per Area Moment Per Area Moment Per Area Extension Per State Moment Per Area Moment Per Area Extension Per Area Moment Per Area Extension Per Area Moment Per Ar	Direction	Specify Time/Freq Dependence	Method © Constant Variable © Data Surface Advanced Data Surface	Number of <u>I</u> ime Steps 0 Initial Time Increment 1, Output Step Interval 1 Max Iterations per Step 10 Convergence Tolerances I Temperature 0,001
Temperature Element Temperature Heat Flux Per Area Heat Flux Per Aode Heat Generation Element Heat Flux Convection	Temperature 0,	1F_Temp_01 5g 0None 1F_Temp_01	0None	□ Load 0,001 □ Work 1,E-7 Negt □K Cancel
		a)		б)

Рис.5.7. До задачі нестаціонарної теплопровідності: а) – завдання функції часу до ГУ; б) – призначення умов виконання аналізу

• за допомогою зміни значення параметра "NDAMP" – величини "коефіцієнта демпфірування" (підрозділ "NASTRAN Bulk Data" розділу "Options", діалогова панель "NASTRAN Bulk Data Options" (див. рис.4.15-б)) можна у випадку застосування адаптованого часового кроку змінити розрахункову схему: від схеми Кранка-Ніколсона (NDAMP=0) до неявної схеми Ейлера (NDAMP=1). За замовчанням NDAMP=0.01. Величина NDAMP=0 відміняє це штучне "демпфірування". Рекомендуються значення від 0.0 до 0.1. Є сенс ознайомитися з Розділом Д4.6 Додатка 4. Увага: якщо для NX Nastran встановити значення NDAMP=1, то розповсюдження тепла не буде моделюватися зовсім (фатальної помилки немає);

• у підсекції "Output Request" (завдання для виводу) на діалоговій панелі "Nastran Output Requests" (див. рис.4.19-б), окрім описаних у попередньому Розділі, є активними ще дві опції результатів розрахунків: ентальпія (Enthalpy) та швидкість зміни ентальпії (Enthalpy Rate);

• потрібно дати команду Model→Load→Body..., активувати опцію "Active" (понизу діалогової панелі) і у полі "Default Temperature" встановити значення початкової для моделі температури. Потім дати команду Model→Analysis..., у підсекції "Boundary Conditions" секції "Master Requests and Conditions" викликати діалогову панель "Boundary Conditions" (див. рис.5.6-в), де у полі "Initial Conditions" (початкові умови) обрати ім'я набору, до якого уведена початкова температура. Увага: У FEMAP традиційно це не робиться автоматично, тому, якщо це не зробити користувачу, *початкова температура тіла при виконанні аналізу буде вважатися нульовою*. Є надія, що колись ця незручність буде виправленою!

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