

## Раздел 5

# МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Краевая задача о тепловом состоянии (ТС) для краевых задачах о напряженно-деформированном состоянии (НДС) твердых тел носит вспомогательный, но важный характер, поскольку ТС сильно влияет на НДС всего тела.

Теоретические сведения о краевых задачах теплопроводности приведены в Приложении 4. Искомая (основная) величина – температура в узлах конечно-элементной сетки (КЭС), все другие – производные от нее.

**Внимание:** для расчетов ТС можно применять не все типы КЭ, а только **ROD, TUBE, BAR, BEAM** (одномерные); **PLATE, MEMBRANE, PLANE STRAIN** (двумерные); **SOLID** и **AXISYMMETRIC** (трехмерные и осесимметричные). При этом все одномерные типы КЭ приводят к одинаковым результатам независимо от формы и размеров сечения. Все двумерные типы КЭ тоже приводят к одинаковым результатам, причем температура по толщине КЭ – неизменна. Если в КЭС модели есть КЭ других типов, то они игнорируются, а КЭ типа **SPRING** и **DOFSpring** с ненулевой жесткостью вызывают фатальную ошибку.

Общие сведения относительно задания граничных условий изложены в Разделе 4. Ниже изложим лишь специфическую информацию о моделировании краевых задач теплопроводности.

### 5.1 Моделирование краевой задачи стационарной теплопроводности

Будем считать, что конечно-элементная модель для задачи теплопроводности уже создана (см. Раздел 3). Для твердого тела в формуле (П4.1) Приложения 4 (и в последующих формулах) компонента  $c_p \bar{\rho} (\nabla_j T) V_j$  отсутствует.

Начальные и граничные условия для краевых задач теплопроводности в FEMAP создаются командами **Model**→**Load**→ (см. Раздел 4.1).

#### 5.1.1 Задание начальных условий краевой задачи теплопроводности

Командой **Model**→**Load**→**Body...** вызывается диалоговая панель „**Create Body Loads**” (см. рис.5.1-а). На ней (слева внизу) активизируется поле „**Default Temperature**”, куда вводится значение начальной температуры, которая назначается для *всех* узлов КЭС.

**Внимание:**

– для решения краевой задачи *стационарной* теплопроводности начальные условия не обязательны, но могут понадобиться в дальнейшем, поэтому их целесообразно вводить;

– если в дальнейшем, при создании задания на счет (см. п.5.1.3), в диалоговой панели „**Boundary Conditions**” (см. рис.4.19-а или рис.5.6-в) не выбрать соответствующий начальным значениям набор в поле „**Initial Conditions**”, то FEMAP автоматически установит *нулевые* начальные значения.

#### 5.1.2 Задание граничных условий краевой задачи стационарной теплопроводности

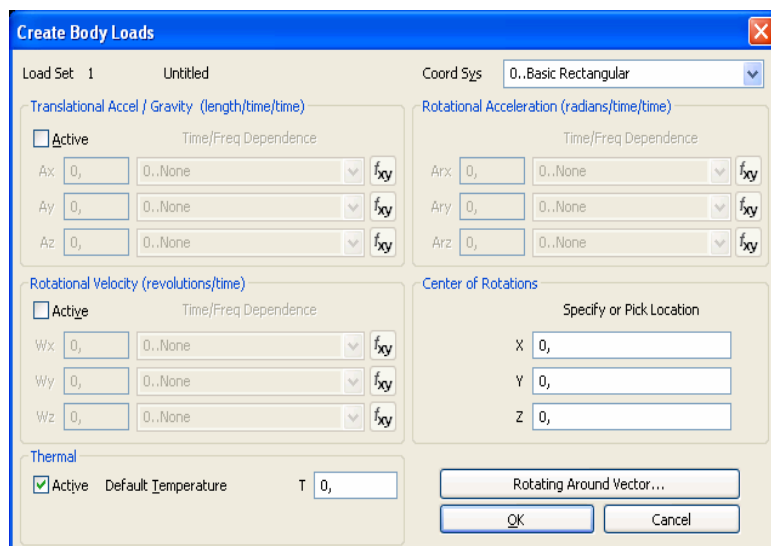
##### 5.1.2.1 Величины для граничных условий краевой задачи теплопроводности

Граничными условиями (ГУ) задачи теплопроводности могут быть величины, которые приведены в таблице 5.1. Теплофизические характеристики материалов приведены в Разделе 3.1 и в таблице 5.2.

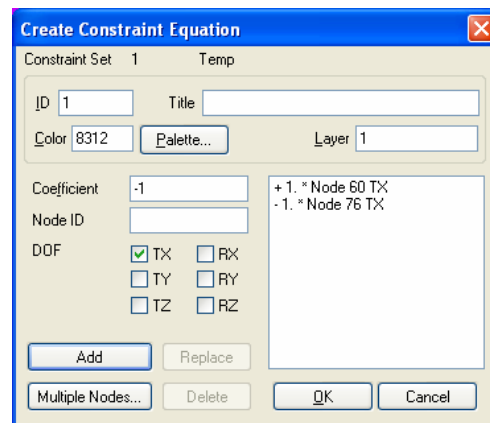
##### 5.1.2.2 Задание граничных условий первого рода

ГУ 1-го рода – это известная температура. В FEMAP может задаваться в узлах, точках, на кривых, поверхностях или КЭ по правилам, изложенным в Разделе 4.1. На диалоговой панели „**Create Loads ...**” (см. рис.4.3-а) в списке (центральная его часть) в соответствии с объектом приложения ГУ выбирается „**Temperature**” или „**Element Temperature**”, в диалоговом

окне „Value” вводится значение температуры. Если в секции „Method” выбрать вариант „Variable”, то с помощью кнопки „Advances...”, вызывающей панель „Advanced Load Methods” (см. рис.4.3-б), можно установить переменный масштабный коэффициент. Если ГУ задается на поверхности, то в секции „Method” можно выбрать вариант „Data Surface” и с помощью кнопки в поле „Data Surface” можно задать значения на поверхности в табличном виде. Подробные объяснения – в п.4.1.3.



а)



б)

Рис.5.1. Диалоговые панели для: а) – введения начальной температуры; б) – создания уравнения связи между температурами узлов

Таблица 5.1. Типичные величины для граничных условий трехмерной КЭС

Узловые граничные условия (Nodal boundary conditions)		
Температура (Temperature)	°C, °K	
Тепловой источник или тепловой сток (Heat Generation)	W	Вт
Тепловой поток (Heat Flux)	W	Вт
Граничные условия КЭ (Element boundary conditions)		
Температура (Temperature)	°C, °K	
Тепловой источник или тепловой сток (Heat Generation)	W/m <sup>3</sup>	Вт/м <sup>3</sup>
Тепловой поток (Heat Flux)	W/m <sup>2</sup>	Вт/м <sup>2</sup>
Направленный тепловой поток (Heat Flux, Directional)	W/m <sup>2</sup>	Вт/м <sup>2</sup>
Свободная конвекция (Free Convection)	W/m <sup>2</sup>	Вт/м <sup>2</sup>
Силовая конвекция (Force Convection)	W/m <sup>2</sup>	Вт/м <sup>2</sup>
Излучение (радиация) с пространство (Radiation to Space)	W/m <sup>2</sup>	Вт/м <sup>2</sup>
Радиационное окружение (Radiation Enclosure)	W/m <sup>2</sup>	Вт/м <sup>2</sup>

Таблица 5.2. Теплофизические характеристики материалов

Коэффициент теплопроводности <i>k</i> (Thermal Conductivity)	W/(m °K)	Вт/(м °K)
Плотность $\rho$ (Density)	kg/m <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>
Удельная теплоемкость при неизменном давлении <i>C<sub>p</sub></i> (Specific Heat)	J/(kg °K)	Дж/(кг °K)
Энтальпия (Enthalpy)	J/kg	Дж/кг
Скрытая теплота (Latent Heat)	J/kg	Дж/кг
Коэффициент конвекционной теплоотдачи на поверхности, $\alpha$	W/(m <sup>2</sup> °K)	Вт/(м <sup>2</sup> °K)
Динамическая вязкость, $\mu$	kg/(m c)	Кг/(м c)
Постоянная Стефана-Больцмана: $5.668 \cdot 10^{-8}$	W/(m <sup>2</sup> °K <sup>4</sup> )	Вт/(м <sup>2</sup> °K <sup>4</sup> )
Постоянная Стефана-Больцмана: $0.1714 \cdot 10^{-8}$	Btu/h ft <sup>2</sup> R <sup>4</sup>	

Еще один вариант задания ГУ в виде температуры – с помощью связей между узлами, которые задаются по формуле  $\sum a_i T_i = 0$ , где  $T_i$  – температура  $i$ -го узла,  $a_i$  – назначенные коэффициенты. Обычно его применяют, когда необходимо, чтобы температура нескольких узлов была одинаковой.

Командой **Model**→**Constraint**→**Equation...** вызывается диалоговая панель „**Create Constraint Equation**” (см. рис.5.1-б), на которой указываются: **ID** формулы; цвет изображения связей; уровень (**Layer**); значение коэффициента  $a_i$ ; номер узла; степени свободы **DOF**, что связываются (для связывания температуры узлов здесь нужно выбрать **TX**, иначе будет фатальная ошибка). Дается команда „**Add**” (прибавить) и указанная информация появляется в большом окне диалоговой панели. Когда все компоненты данной суммы набраны, дается команда „**OK**”. Если в сумме есть значительное количество узлов с одинаковыми коэффициентами (кроме их номеров), то можно кнопкой „**Multiple Nodes...**” вызвать стандартный диалог выбора узлов. В FEMAP есть ограничения для количества членов в сумме: до 70. На рис.5.1-б изображено состояние диалогового окна после подачи команды „**Add**” перед командой „**OK**”, т.е. после задания уравнения  $TU(60) - TU(76) = 0$ , которое указывает, что температуры узлов 60 и 76 должны быть одинаковыми.

Для возвращения к предыдущей ситуации на панели есть кнопка „**Replace**”, для удаления ненужных или по ошибке набранных компонентов суммы – команда „**Delete**”.

### 5.1.2.3 Задание граничных условий в виде теплового источника или стока тепла

В FEMAP тепловой источник (сток тепла) может задаваться в узлах, точках, на кривых, поверхностях или КЭ по правилам, изложенным в п.4.1.3. На диалоговой панели „**Create Loads ...**” (см. рис.4.3-а) в списке (нижняя его часть) в соответствии с объектом приложения ГУ выбирается „**Heat Generation**”, в диалоговом окне „**Value**” вводится значение мощности теплового источника (положительное) или стока (отрицательное). Если в секции „**Method**” выбрать вариант „**Variable**”, то с помощью кнопки „**Advances...**”, которая вызывает панель „**Advanced Load Methods**” (см. рис.4.3-б), можно установить переменный масштабный коэффициент. Если ГУ задается на поверхности, то в секции „**Method**” можно выбрать вариант „**Data Surface**” и с помощью кнопки в поле „**Data Surface**” – задать значения на поверхности в табличном виде. Подробные объяснения – в п.4.1.3.

### 5.1.2.4 Задание граничных условий по тепловому потоку

В FEMAP тепловой поток может задаваться в узлах, точках, на кривых, поверхностях или КЭ по правилам, изложенным в п.4.1.3. На диалоговой панели „**Create Loads ...**” (см. рис.4.3-а), когда она вызывается соответствующей командой **Model**→**Load**→**...**, в списке (нижняя его часть) в соответствии с объектом приложения ГУ выбирается „**Heat Flux**”, „**Heat Flux per Length**”, „**Heat Flux per Node**” или „**Heat Flux per Area**”; в диалоговом окне „**Value**” вводится значение скорости (**Rate of Flux**) теплового потока (положительное – наружу, отрицательное – внутрь). Опция „**Midside Nodes Adjustment**” (для „**Heat Flux per Node**” и „**Heat Flux per Area**”) позволяет задействовать промежуточные узлы на ребрах КЭ. Если в секции „**Method**” выбрать вариант „**Variable**”, то с помощью кнопки „**Advances...**”, вызывающей панель „**Advanced Load Methods**” (см. рис.4.3-б), можно установить переменный масштабный коэффициент. Если ГУ задается на поверхности, то в секции „**Method**” можно выбрать вариант „**Data Surface**” и с помощью кнопки в поле „**Data Surface**” – задать значения на поверхности в табличном виде. Подробные объяснения – в п.4.1.3.

Альтернативный вариант – тепловой поток от дистанционного источника лучевого тепла (например, для моделирования явления суточного повышения температуры). Дается команда **Model**→**Load**→**Elemental...**, после выбора КЭ на появившейся диалоговой панели „**Create Loads ...**” (см. рис.4.3-а) выбирается „**Heat Flux**” и инициируется опция „**Directional**” (внизу панели). Задаются три величины: величина потока „**Flux**” (может быть функцией времени), способность поверхности поглощать „**Absorptivity**” (дополнительный множитель для величины потока, в пределах 0 ... 1, может быть функцией температуры), температура поверхности. Затем еще потребуется ввести направление потока через компоненты вектора или

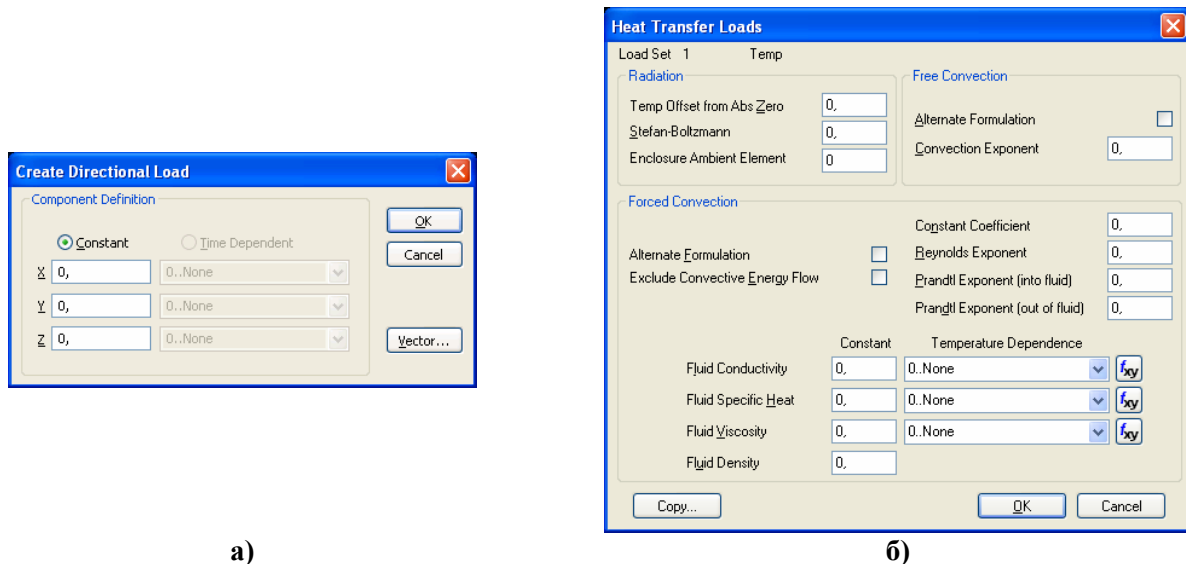
зависящие от времени функции (см. рис.5.2-а), а также номер поверхности КЭ, на которую действует тепловой поток.

### 5.1.2.5 Задание граничных условий конвекционного нагрева

При введении условий конвекционного нагрева (**Convection**) в FEMAP есть два варианта.

#### 5.1.2.5.1 Задание граничных условий „свободного” конвекционного нагрева

Первый вариант описывает конвекционный нагрев общего случая (**Free Convection**), т.е. от газа или жидкости, что свободно „омывает” выбранную поверхность тела или его часть. Это соответствует формуле (П4.5а) Приложения 4. Для него (см. рис.4.3-а) вводятся: „**Coefficient**” (коэффициент конвекционной теплоотдачи на поверхности), который может быть функцией температуры (**2..vs.Temperature**); и температура газа или жидкости, что „омывает” тело (**Temperature**), которая может быть функцией времени (**1..vs.Time**). Опцией „**On Plate Back Face**” можно изменить грань плоского КЭ на обратную. Если в секции „**Method**” выбрать вариант „**Variable**”, то с помощью кнопки „**Advances...**”, вызывающей панель „**Advanced Load Methods**” (см. рис.4.3-б), можно установить переменный масштабный коэффициент. Если ГУ задается на поверхности, то в секции „**Method**” можно выбрать вариант „**Data Surface**” и с помощью кнопки в поле „**Data Surface**” – задать значения на поверхности в табличном виде. Подробные объяснения – в п.4.1.3.



а)

б)

Рис.5.2. Диалоговые панели: а) – задания направления теплового потока; б) – введения дополнительных характеристик тепловых потоков

В FEMAP еще есть альтернативная форма для „**Free Convection**”, которая связана с использованием нелинейной зависимости (П4.5-б) или (П4.5-в) Приложения 4 (только для NX Nastran). Дополнительно к действиям, изложенным в предыдущем абзаце, командой **Model**→**Load**→**Heat Transfer...** нужно вызвать диалоговую панель „**Heat Transfer Loads**” (см. рис.5.2-б), где в секции „**Free Convection**” – задать в поле „**Convection Exponent**” значение коэффициента  $\mu$ , что фигурирует в формулах (П4.5-б) и (П4.5-в). Если установить опцию „**Alternate Formulation**”, то будет применяться формула (П4.5-в).

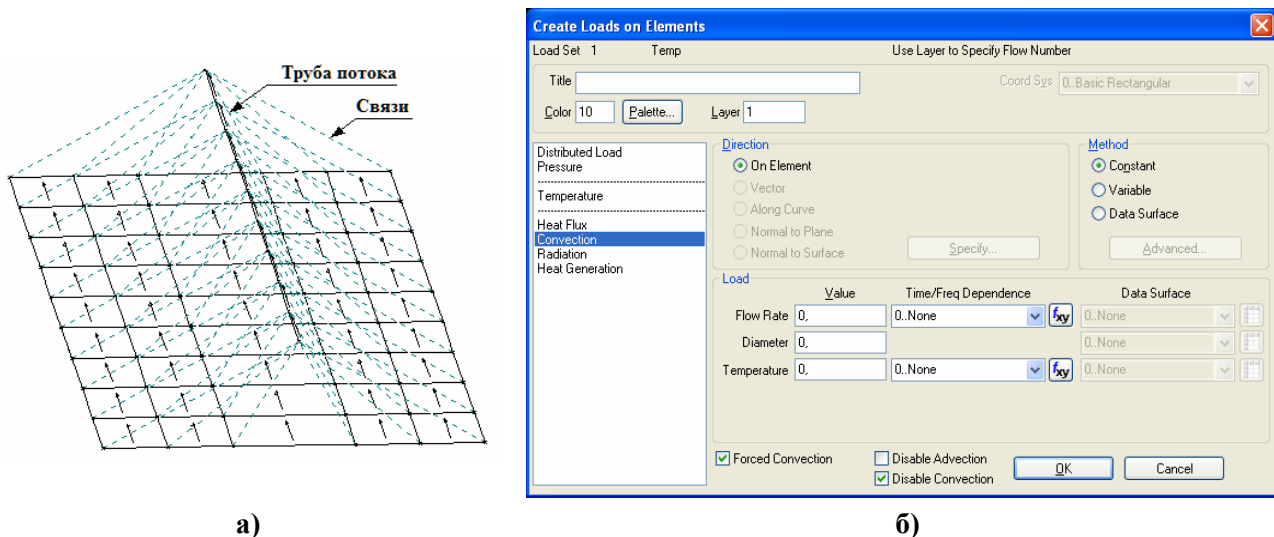
#### 5.1.2.5.2 Задание граничных условий „принудительного” конвекционного нагрева

Второй вариант описывает *одномерный* поток „принудительной” конвекции от КЭ типа **TUBE** к поверхности тела, описанной *двумерными* КЭ. Этот одномерный поток жидкости переносит тепло (**Advection**) и осуществляет конвекционный нагрев (**Convection**) поверхностей КЭ, к которым он будет „присоединен” при задании этих ГУ.

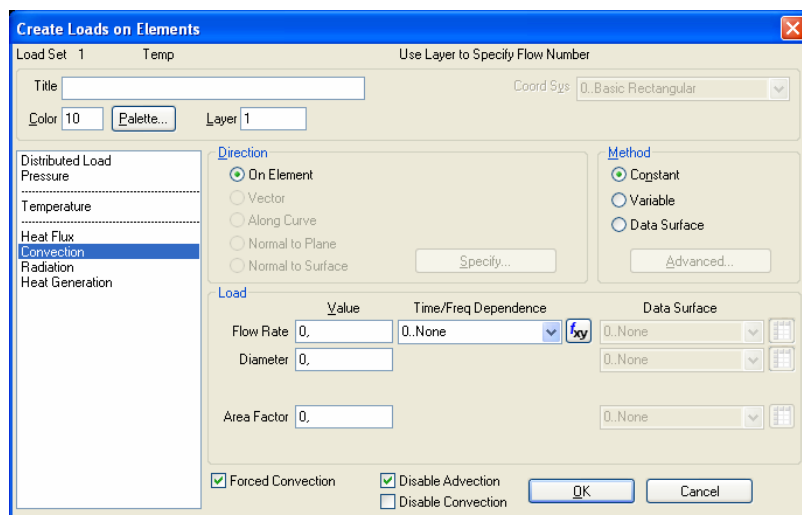
КЭ типа **TUBE** создаются с нулевыми диаметрами на некотором расстоянии (см. рис.5.3-а) от поверхности тела (если КЭ моделируют реальную трубу, то нужно задать реальные диаметры). **Внимание:** эти КЭ необходимо поместить в *отдельный уровень (Layer)*, чтобы потом можно было создать логическую связь с ними.

**Примечание 5.1.** Если такие ГУ необходимо задать на поверхностях трехмерных КЭ, то нужно на узлах этих поверхностей создать дополнительные двумерные КЭ типа **PLOT ONLY**, которые и использовать для задания ГУ.

Итак, сначала необходимо создать новый уровень (**Layer**, см. п.1.7.1) и сделать его активным. Потом на некотором расстоянии от поверхности тела – провести линию, на которой создать КЭ типа **TUBE** с нулевыми или реальными диаметрами. Потом после команды **Model→Load→Elemental...** – выбрать КЭ типа **TUBE**, а на диалоговой панели „**Create Loads on Elements**” – выбрать ГУ типа „**Convection**”, установить опции „**Forced Convection**” и „**Disable Convection**” (слева внизу, см. рис.5.3-б); ввести: скорость (**Flow Rate**) и гидравлический диаметр (**Diameter**) потока. Температуру (**Temperature**) здесь задавать не надо. Она задается в узле *в начале* цепи КЭ типа **TUBE** с помощью команды **Model→Load→Nodal...**



**Рис.5.3.** Схема „**Forced Convection**” (а); диалоговая панель введения условий конвекционного теплообмена типа **Forced Convection** для КЭ типа **TUBE** (б)



**Рис.5.4.** Диалоговая панель введения условий конвекционного теплообмена типа **Forced Convection** для двумерных КЭ на поверхности тела

при необходимости, нужно согласовать направление двумерных КЭ по отношению к КЭ типа **TUBE**.

Затем нужно дать команду **Model→Load→Elemental...**, выбрать *двумерные* КЭ, на диалоговой панели „**Create Loads on Elements**” выбрать ГУ типа „**Convection**”, установить опции „**Forced Convection**” и „**Disable Advection**” – слева внизу, см. рис.5.4; ввести: ско-

Тепловая конвекция должна действовать на грань №1 (**Face1**) двумерного КЭ, причем в направлении от середины ребра первого к середине ребра третьего (или к противоположному углу треугольного КЭ). Чтобы всем нужным КЭ задать одинаковую ориентацию, нужно дать команду **Modify→Update Elements→Reverse Normal/Orient First Edge...**, выбрать КЭ, на диалоговой панели „**Update Element Directions**” (см. рис.3.29-а в п.3.5.9) выбрать вариант „**Align First Edge to Vector**” и указать направление вектора для первого ребра (**First Edge**). Таким же образом,

рость (**Flow Rate**), диаметр (**Diameter**) потока (такие же самые, что и для КЭ типа **TUBE**) и коэффициент области (**Area Factor**  $\approx 1$ ). Этот коэффициент равен отношению площади поверхности тела, на которую должно действовать условие конвекционного теплообмена, к реальной площади поверхностей КЭ. На основе этих данных FEMAP вычисляет числа Рейнольдса (**Reynolds**) и Прандтля (**Prandtl**), а потом – коэффициент конвекционной теплоотдачи между тепловым потоком в трубе и поверхностью тела. **Внимание:** для „сцепления” данных нужно указать тот номер уровня (**Layer**), в котором задан поток (таким образом можно задавать несколько потоков). Если „сцепление” состоялось, то при запуске задачи на счет (точнее – при записи задания в файл задания для **Nastran** с расширением имени **.dat**) на рабочем поле появятся изображения линий связи (см. рис.5.3-а). Как предупреждают в „**Help**”, это происходит не всегда, гарантировано – когда двумерные КЭ имеют четыре угла, а КЭС – регулярную структуру (см. рис.5.3-а).

Последний этап – задание свойства жидкости. Командою **Model**→**Load**→**Heat Transfer...** (в „**Help**” ошибочно указана команда **Model**→**Load**→**Body**) вызывается диалоговая панель „**Heat Transfer Loads**” (см. рис.5.2-б). На ней в столбце „**Constant**” секции „**Forced Convection**” вводятся значения „**Fluid Conductivity**” (коэффициент теплопроводности), „**Fluid Specific Heat**” (удельная теплоемкость при неизменном давлении), „**Fluid Viscosity**” (динамическая вязкость) и „**Fluid Density**” (плотность) жидкости. В столбце „**Temperature Dependence**” желательнее выбрать/задать функции (типа **2.vs.Temperature**), что описывают температурную зависимость величин (поскольку, например, динамическая вязкость жидкости очень быстро уменьшается при повышении температуры). Другой вариант – задавать свойства жидкости для температуры, *средней* от начальной температуры потока и поверхности тела.

Еще вводятся значения „**Constant Coefficient**” (коэффициент  $\gamma$ , см. Примечание 5.4. ниже), „**Reynolds Exponent**” (степень для числа Рейнольдса), „**Prandtl Exponent (into fluid)**” (степень для числа Прандтля, в жидкости) „**Prandtl Exponent (out of fluid)**” (степень для числа Прандтля, за пределами жидкости). Эти величины в FEMAP пересчитываются в другие, необходимые для описания конвекционного теплообмена (см. Примечание 5.4).

Если окажется, что число Рейнольдса  $Re = VL/\nu > 2 \cdot 10^5$  (здесь  $L$  – длина поверхности тела вдоль направления потока,  $V$  и  $\nu$  объяснены ниже в Примечании 5.3), то течение потока жидкости в трубе будет иметь турбулентный характер, который нуждается в применении *альтернативной* формулы (см. Примечание 5.4): на диалоговой панели „**Heat Transfer Loads**” (см. рис.5.2-б) в секции „**Forced Convection**” необходимо инициировать опцию „**Alternate Formulation**”.

Если жидкость не движется, то в секции „**Forced Convection**” нужно установить опцию „**Exclude Convective Energy Flow**” (отключить конвекционный поток энергии).

В заключение отметим, что таких потоков можно моделировать несколько, только необходимо их создавать в разных слоях (для правильного „сцепления”).

**Примечание 5.2.** Вместо указанных величин, в справочниках можно найти другие характеристики: кинематическую вязкость  $\nu$  и тепловую диффузию  $\alpha$ , которые имеют одинаковую размерность  $m^2/c$ . Известны связи между этими величинами и другими:  $\nu = \mu/\rho$  и  $\alpha = k/(\rho \cdot C_p)$ , а также то, что у жидкостей обычно кинематическая вязкость очень быстро уменьшается при повышении температуры, а тепловая диффузия – незначительно увеличивается.

**Примечание 5.3.** Число Рейнольдса  $Re = Vd/\nu$ , где  $V$  – скорость перемещения жидкости далеко от пограничного слоя;  $d$  – характерный размер тела, которое перемещается в жидкости (для трубчатого сечения любого профиля  $d = \sqrt{4A/\pi}$  носит название гидравлического диаметра, где  $A$  – площадь этого сечения). Оно характеризует отношение сил инерции к силам вязкости. Число Прандтля  $Pr = \mu \cdot C_p/k$  является мерой отношения диссипации импульса к диссипации тепла. Обычно эти числа применяют для выявления *сходства* разных

потоков. Число Нуссельта (Nusselt)  $Nu = \alpha d / k$  является мерой отношения коэффициентов конвекционного теплообмена (на поверхности) и теплообмена материала (в объеме); применяются для жидкости.

**Примечание 5.4.** В FEMAP могут применяться одна из двух формул для вычислений коэффициента конвекционной теплоотдачи на поверхности:  $\alpha = \gamma \cdot Re^{E_{Re}} \cdot Pr^{E_{Pr}}$  или альтернативная ей  $\alpha = (k/d) \cdot \gamma \cdot Re^{E_{Re}} \cdot Pr^{E_{Pr}}$ , где  $d$  – гидравлический диаметр потока;  $E_{Re}$  и  $E_{Pr}$  – значения степеней (так называемых экспонент) для чисел Рейнолдса и Прандтля при конвекционном теплообмене.

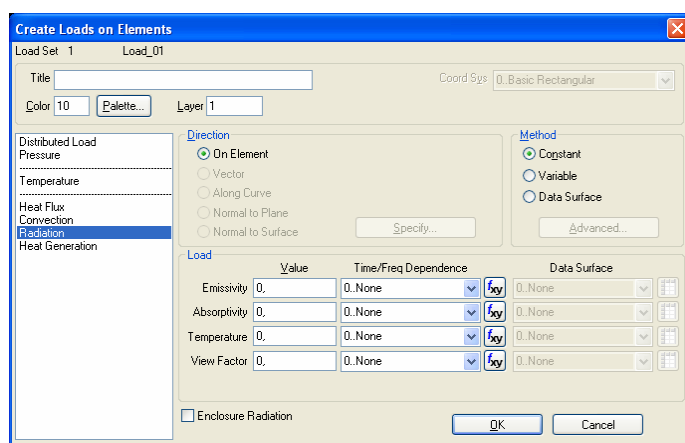
### 5.1.2.6 Задание граничных условий радиационного нагрева

При введении условий радиационного нагрева (**Radiation**) в FEMAP также есть два варианта.

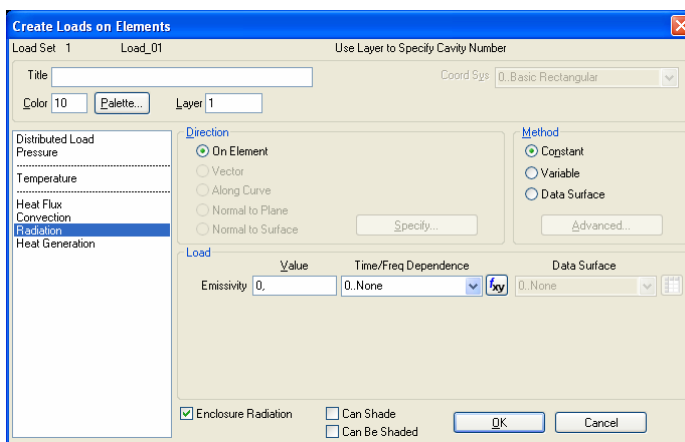
Первый описывает радиационный нагрев от отдаленного источника (например, от солнца, лампы, открытого огня). Для него вводятся значения (см. рис.5.5-а и формулу (П4.6) в Приложении 4): „**Emissivity**” (коэффициент излучения поверхностью источника,  $0 \leq e_e \leq 1$ ), „**Temperature**” (абсолютная температура излучающего тела), „**Absorptivity**” (коэффициент способности к поглощению,  $0 \leq a_e \leq 1$ ) и „**View Factor**” (фактор освещенности ( $0 \leq f \leq 1$ ) поверхности нагреваемого тела (см. формулу (П4.7) в Приложении 4), или, другое название – угловой коэффициент излучения). Коэффициенты  $e_e$  и  $a_e$  могут быть функциями температуры, а температура и фактор освещенности – времени.

Второй вариант описывает радиационный нагрев поверхностей в ограниченном пространстве, в частности и от других поверхностей того же тела (что рассчитывается). Для него (вариант выбирается опцией „**Enclosure Radiation**” – слева внизу, см. рис.5.5-б) вводится только значение „**Emissivity**” (коэффициент излучения поверхностью источника,  $0 \leq e_e \leq 1$ ), поскольку принято, что способности к поглощению и излучению – одинаковы ( $e_e = a_e$ , т.е. нет потерь энергии), а другие величины – рассчитываются. На той же панели можно установить опции „**Can Shade**” (тень) и/или „**Can Be Shaded**” (может быть тень). Если таких ограниченных пространств – несколько, то для каждого из них нужно создать уровень (**Layer**), где и задавать условия радиационной нагрузки, о чем на диалоговой панели (см. рис.5.5-б) есть напоминания (вверху справа): „**Use Layer to Specify Cavity Number**” (используйте уровень для описания пустоты).

В заключение в *обоих* случаях необходимо командой **Model**→**Load**→**Heat Transfer...** вызвать диалоговую панель „**Heat Transfer Loads**” (см. рис.5.2-б), где в секции „**Radiation**”



а)



б)

**Рис.5.5.** Диалоговые панели введения радиационного нагрева: а) – от отдаленного источника; б) – от других поверхностей того же тела

ввести значение: „**Temp Offset from Abs Zero**” (разность между нулем температурной системы, что используется, и абсолютным нулем), „**Stefan-Boltzmann**” (постоянная Стефана-Больцмана:  $5.668 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  или  $0.1714 \cdot 10^{-8} \text{ Btu/h ft}^2 \text{ R}^4$ ). Параметр „**Enclosure Ambient Element**” – это **ID** того *внешнего* КЭ, что излучает (поглощает) лучевую энергию. Этот КЭ создается, если ограниченное пространство (второй вариант применения данного типа ГУ) не является замкнутым; он должен иметь размеры, на 1-2 порядка превышающие размеры КЭ тела, с которыми взаимодействует. Если пространство не замкнуто, а **ID** внешнего КЭ не задано, то считается, что температура открытого пространства  $T_a = 0$ .

### 5.1.3 Запуск процесса расчета краевой задачи стационарной теплопроводности

Этот тип краевой задачи можно решать с применением NX Nastran, а также других анализаторов, но рассматриваем только NX Nastran.

Сначала нужно создать задание для проведения анализа. Общие сведения об этом приведены в Разделе 4.2.

В частности, вызывается диалоговая панель „**Analysis Set Manager**”, на ней с помощью кнопки „**New...**” начинается процесс создания задания: выбирается тип задачи „**20..Steady-State Heat Transfer**” (см. рис.5.6-а) – стационарная теплопроводность. FEMAP создает стандартное задание на расчет краевой задачи.

Какие особенности есть в задании для стационарной задачи теплопроводности?

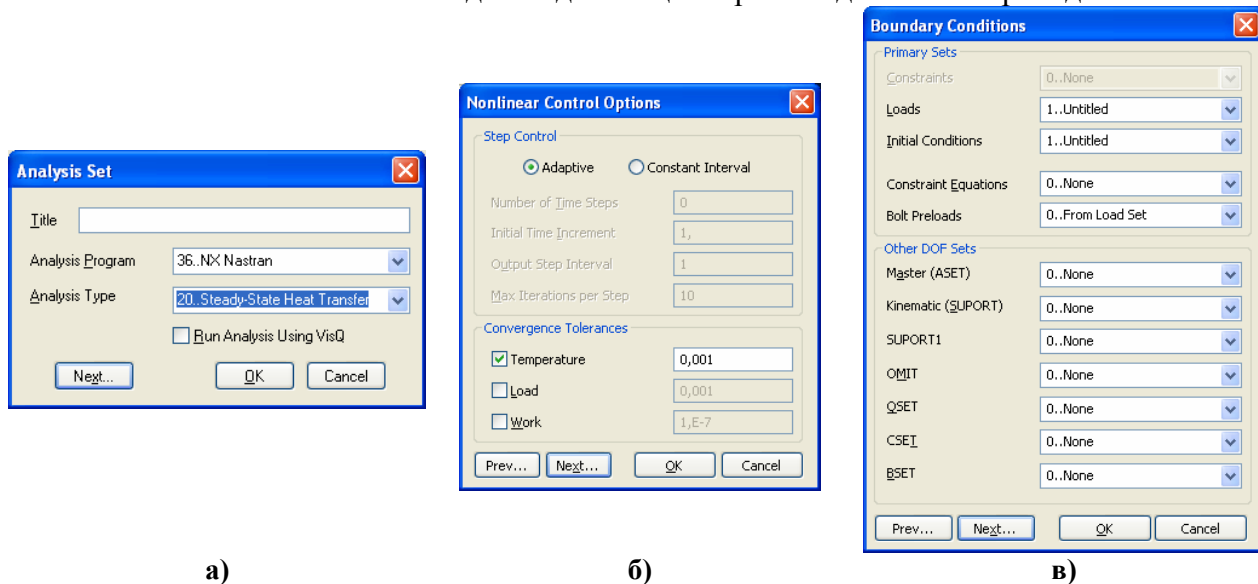


Рис.5.6. Диалоговые панели для создания задания расчета краевой задачи стационарной теплопроводности

В случае, когда задача является нелинейной (например, характеристики материала зависят от температуры), можно в подразделе „**Nonlinear**” раздела „**Options**” вызвать диалоговую панель „**Nonlinear Control Options**” (см. рис.5.6-б). Здесь для стационарной задачи можно изменить точность сходимости итерационного процесса анализа: в полях секции „**Convergence Tolerances**” – для температуры (**Temperature**), по ГУ (**Load**) и по энергии (**Work**).

В подсекции „**Boundary Conditions**” секции „**Master Requests and Conditions**” можно вызвать диалоговую панель „**Boundary Conditions**” (см. рис.5.6-в), где в полях „**Load**” и „**Constraints Equations**” (нагрузка и формульные связи), а также „**Initial Conditions**” (начальные условия) выбраны имена *активных* наборов, которые можно изменить на другие (если другие наборы создавались).

В подсекции „**Output Request**” (задания для вывода) можно вызвать диалоговую панель „**Nastran Output Requests**” (см. рис.6.6-в), где, с помощью активных опций можно указать, для какой части модели выводить результаты расчетов: „**0..Full Model**” (полная модель) или выбрать заранее созданную группу (узлов или КЭ). Варианты результатов задачи стационарной теплопроводности: приложенные нагрузки (**Applied Load**), реакции связей (**Con-**




**straint Force**), реакции связей, что заданы уравнениями или КЭ типа **RIGID (Equation Force)**, температура (**Temperatures**), тепловые потоки (**Heat Flux**). Другие назначения на этой панели описаны в п.4.2.10.

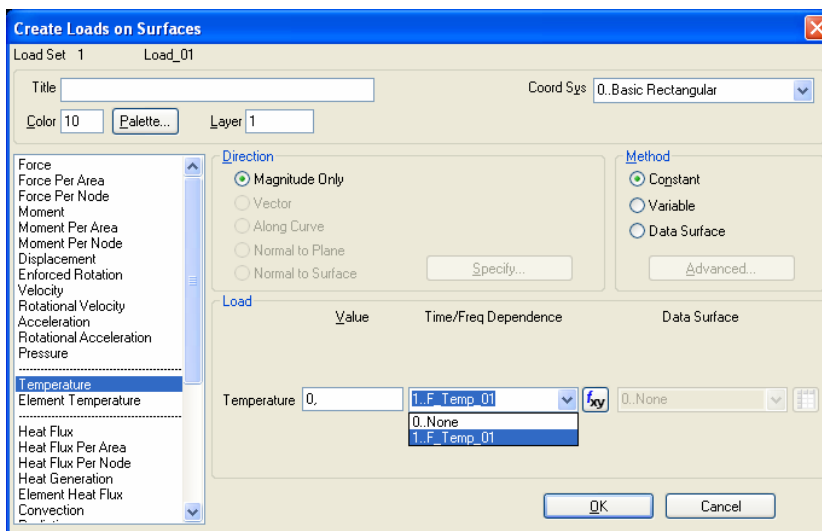
Когда задание создано, можно запускать процесс решения краевой задачи.

Если в модели задавались ГУ свободной и принудительной конвекции, то появится диалоговая панель „**Factor to Disable Forced Convection**”, где нужно ввести лишь одно малое число (по умолчанию это 0.001). Этот коэффициент используется программой для разделения теплового потока на *конвекционный* от среды, что взаимодействует с поверхностью тела (для КЭ с активной опцией „**Disable Advection**”, см. рис.5.4), и *адвекционный*, т.е. тот, что переносится жидкостью тела (для КЭ с активной опцией „**Disable Convection**”, см. рис.5.3-б).

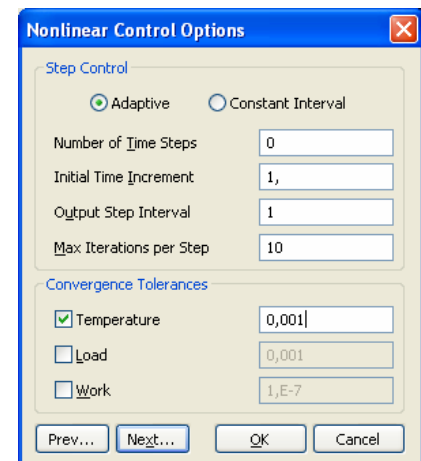
## 5.2 Моделирование краевой задачи нестационарной теплопроводности

По сравнению со стационарной задачей теплопроводности есть такие особенности:

- необходимо обязательно задать функцию (или несколько функций) времени, т.е. типа **1..vs.Time**, значение которой (которых) будет являться *масштабом* для граничных условий задачи. Если изменений во времени нет, то функция должна иметь значения, равные единице на всем протяжении времени;
- необходимо обязательно *всем граничным условиям* назначить, от какой функции времени (**1..vs.Time**) они зависят (после введения значения граничного условия – дополнительно открыть список с названием „**Time/Freq Dependence**”, выбрать необходимую функцию (см. рис.5.7-а); или создать такую функцию с помощью кнопки ). Обычно это реально можно сделать лишь при первичном назначении граничных условий, поскольку путем их редактирования сделать это почти никогда не удастся (таких узлов или сторон – много). Т.е. при необходимости модифицировать – сначала удалить, потом назначить снова;
- необходимо создать задание для соответствующего типа задачи: команда **Model**→**Analysis**→**New...**, выбрать в списке „**Analysis Type**” (аналогично рис.5.6-а) значение „**21..Transient Heat Transfer**” (т.е. нестационарная теплопроводность);



а)



б)

Рис.5.7. К задаче нестационарной теплопроводности:

а) – задание функции времени к ГУ; б) – назначение условий выполнения анализа

• в подразделе „**Nonlinear**” раздела „**Options**” необходимо вызвать диалоговую панель „**Nonlinear Control Options**” (см. рис.5.7-б). В секции „**Step Control**” становятся активными поля для введения значений количества временных шагов (**Number of Time Steps**), начального временного шага (**Initial Time Increment**) и временного интервала (в секундах) для формирования результатов расчетов (**Output Step Interval**), которые необходимо назначить. Если радиокнопкою „**Adaptive**” установить адаптивную процедуру, то Nastran проводит про-

верку соответствия *начального* временного шага характеристикам материала и размерам КЭ по формуле (П4.39), т.е.:

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

где:  $h$  – минимальный размер конечно-элементной сетки (см. Раздел П4.6 Приложения 4). При необходимости начальный временной шаг автоматически корректируется. На дальнейших шагах Nastran постепенно увеличивает временной шаг. Если выбрать вариант „**Constant Interval**”, то будут применяться именно те значения, которые нужны пользователю. **Внимание:** очень желательно придерживаться этой формульной рекомендации, даже усилить ее: еще уменьшать шаг  $\Delta t$  в 2...10 раз, иначе в зоне быстрых изменений граничных условий решение задачи будет иметь нефизичное уменьшение температуры вместо ее повышения (или наоборот). Значение „**Max Iterations per Steps**” (максимальное количество итераций на шаге) имеет смысл для нелинейной задачи, когда, например, характеристики материала зависят от температуры. Назначения в секции „**Convergence Tolerances**” описаны в предыдущем Разделе;

- с помощью изменения значения параметра „**NDAMP**” – величины „коэффициента демпфирования” (подраздел „**Bulk Data**” раздела „**Options**”, диалоговая панель „**Nastran Bulk Data Options**” (см. рис.4.15-б)) можно в случае применения адаптированного временного шага изменить расчетную схему: от схемы Кранка-Николсона (**NDAMP=0**) до неявной схемы Эйлера (**NDAMP=1**). По умолчанию **NDAMP=0.01**. Величина **NDAMP=0** отменяет это искусственное „демпфирование”. Рекомендуются значения от 0.0 до 0.1. Есть смысл ознакомиться с Разделом П4.6 Приложения 4. **Внимание:** если для NX Nastran установить значение **NDAMP=1**, то распространение тепла не будет моделироваться совсем (фатальной ошибки нет!);

- в подсекции „**Output Request**” (задание для вывода) на диалоговой панели „**Nastran Output Requests**” (см. рис.6.6-в), кроме описанных в предыдущем Разделе, активны еще две опции результатов расчетов: энтальпия (**Enthalpy**) и скорость изменения энтальпии (**Enthalpy Rate**);

- нужно дать команду **Model→Load→Body...**, активировать опцию „**Active**” (внизу диалоговой панели) и в поле „**Default Temperature**” установить значение начальной для модели температуры. Потом дать команду **Model→Analysis...**, в подсекции „**Boundary Conditions**” секции „**Master Requests and Conditions**” вызвать диалоговую панель „**Boundary Conditions**” (см. рис.5.6-в), где в поле „**Initial Conditions**” (начальные условия) выбрать имя набора, в который введена начальная температура. **Внимание:** В FEMAP традиционно это не делается автоматически, поэтому, если это не сделать пользователю, *начальная температура тела при выполнении анализа будет считаться нулевой*. Есть надежда, что когда-нибудь это неудобство будет исправлено!

- после проведения расчетов появляются *несколько* наборов результатов (соответствуют временным шагам расчета). Этот факт необходимо учесть при анализе результатов (см. Раздел 8).