

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; для них можно задать только два варианта граничных условий (ГУ): температуру или тепловые источники (КЭ типа **TUBE** еще применяется для моделирования принудительного конвекционного теплообмена). 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 (Д4.1) 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 целесообразно их вводить всегда.

5.1.2. Задание граничных условий краевой задачи стационарной теплопроводности

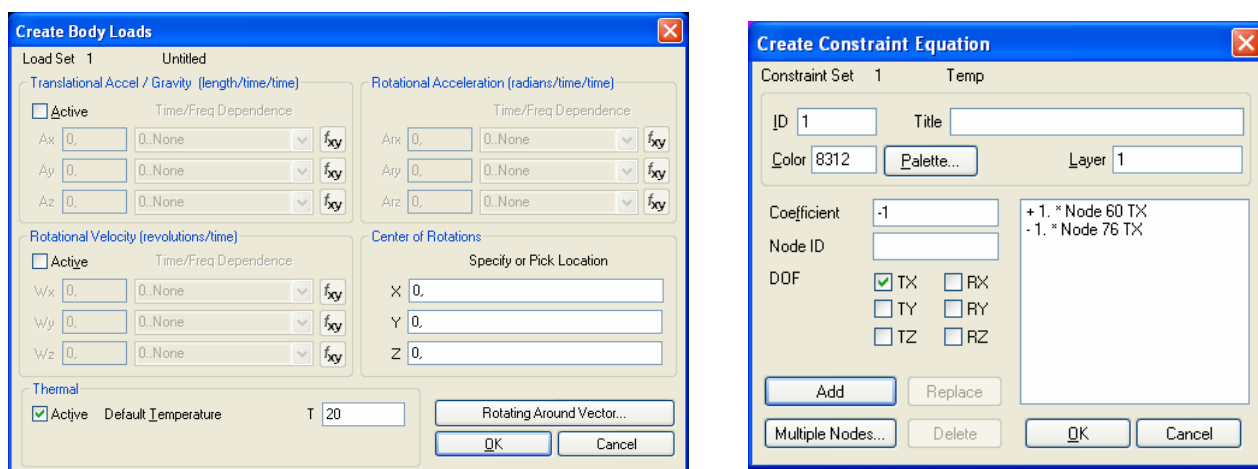
5.1.2.1. Величины для граничных условий краевой задачи теплопроводности

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 Разделе 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 ³	Вт/м ³
Тепловой поток (Heat Flux)	W/m ²	Вт/м ²
Направленный тепловой поток (Heat Flux, Directional)	W/m ²	Вт/м ²
Свободная конвекция (Free Convection)	W/m ²	Вт/м ²
Силовая конвекция (Force Convection)	W/m ²	Вт/м ²
Излучение (радиация) с пространство (Radiation to Space)	W/m ²	Вт/м ²
Радиационное окружение (Radiation Enclosure)	W/m ²	Вт/м ²

Таблица 5.2. Теплофизические характеристики материалов

Коэффициент теплопроводности k (Thermal Conductivity)	W/(m °K)	Вт/(м °K)
Плотность ρ (Density)	kg/m ³	кг/м ³
Удельная теплоемкость при неизменном давлении C_p (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, α	W/(m ² °K)	Вт/(м ² °K)
Динамическая вязкость, μ	kg/(m c)	Кг(м c)
Постоянная Стефана-Больцмана: $5.668 \cdot 10^{-8}$	W/(m ² °K ⁴)	Вт/(м ² °K ⁴)
Постоянная Стефана-Больцмана: $0.1714 \cdot 10^{-8}$	Btu/h ft ² R ⁴	

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 $TY(60) - TY(76) = 0$, 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 Разделе 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 Разделе 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 Разделе 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 мощности 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 Разделе 4.1.3.

Еще один вариант – тепловой поток от дистанционного источника лучевого тепла (например, для моделирования явления суточного повышения температуры). Дается команда **Model→Load→Elemental...**, на диалоговой панели „**Create Loads ...**” (см. рис.4.3-а) выбирается „**Heat Flux**” и инициируется опция „**Directional**” (понизу панели). Задаются две величины: величина потока „**Flux**” (может быть функцией времени) и способность поверхности поглощать „**Absorptivity**” (дополнительный множитель для величины потока, в пределах 0 ... 1, может быть функцией температуры). **Внимание:** поле для введения температуры не используется.

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 (Д4.5а) 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**). 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 Разделе 4.1.3.

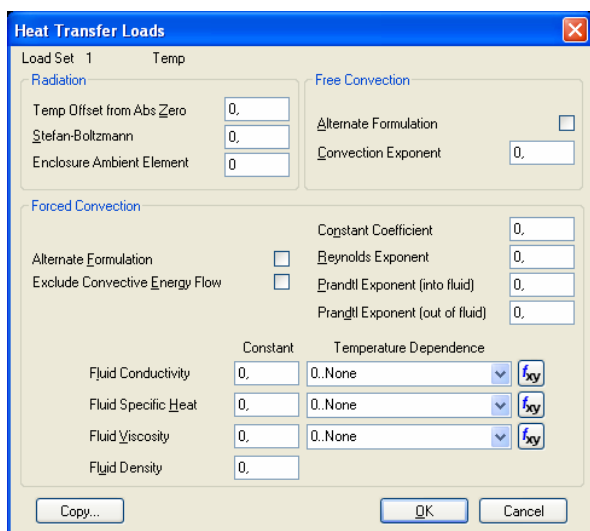


Рис.5.2. Диалоговая панель введения дополнительных характеристик тепловых потоков

TUBE. Этот поток жидкости переносит тепло (**Advection**) и осуществляет конвекционный нагрев (**Convection**) внутренней поверхности КЭ.

Одномерный поток „принудительной” конвекции в FEMAP может быть применен для задания „принудительной” одномерной конвекции от потока тепла *вдоль* поверхности, описанной *двумерными* КЭ. Он довольно сложен в реализации, задается для двумерных КЭ (**Model→Load→Elemental...**) с помощью КЭ типа **TUBE** с нулевыми диаметрами, которые созданы ранее (см. рис.5.3-а) на некотором расстоянии 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. Этот поток может переносить тепло за счет движения (**Advection**) и осуществлять конвекционный нагрев (**Convection**) поверхностей КЭ, к которым он будет „присоединен” при задании этих ГУ.

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 (см. Раздел 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 гидравли-

В FEMAP еще есть альтернативная форма для „**Free Convection**”, которая связана с использованием нелинейной зависимости (Д4.5-б) или (Д4.5-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), где в секции „**Free Convection**” – задать в поле „**Convection Exponent**” значение коэффициента μ , что фигурирует в формулах (Д4.5-б) и (Д4.5-в). Если установить опцию „**Alternate Formulation**”, то будет применяться формула (Д4.5-в).

5.1.2.5.2. Задание граничных условий „принудительного” конвекционного нагрева

Второй вариант описывает *одномерный* поток „принудительной” конвекции в КЭ типа

ческий 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....**

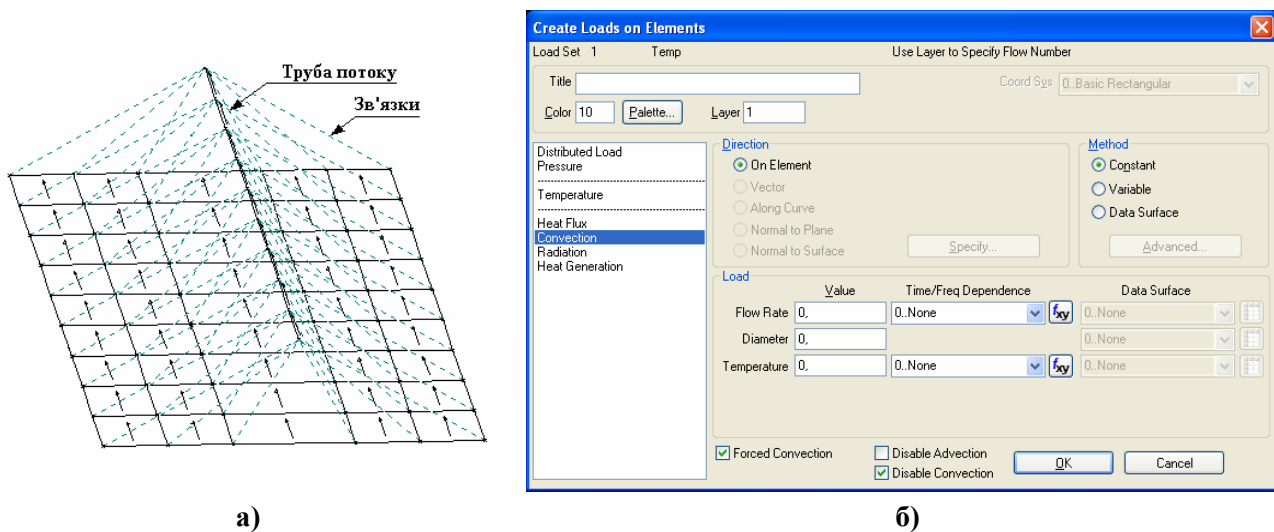


Рис.5.3. Схема „Forced Convection” (а); диалоговая панель введения условий конвекционного теплообмена типа Forced Convection для КЭ типа TUBE (б)

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.3.26-а и Раздел 3.5.9) выбрать вариант „Align First Edge to Vector” и указать направление вектора для первого ребра (**First Edge**). Таким же образом, при необходимости, нужно согласовать направление двумерных КЭ и КЭ типа **TUBE**.

Потом 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: скорость (**Flow Rate**), диаметр (**Diameter**) потока (такие же самые, что и для КЭ типа **TUBE**) и коэффициент области (**Area Factor** ≈ 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, на рабочем поле появятся линии связей (див 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).

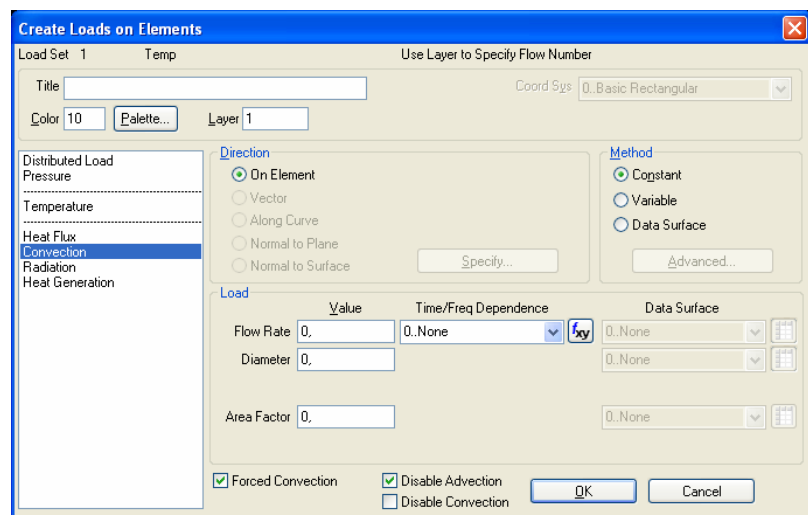


Рис.5.4. Диалоговая панель введения условий конвекционного теплообмена типа Forced Convection для двумерных КЭ на поверхности тела

Последний этап – задание свойства жидкости. Командой **Model→Load→Heat Transfer...** вызывается диалоговая панель „**Heat Transfer Loads**” (см. рис.5.2). 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**” желательно выбрать 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 γ , см. Примечание 5.4. ниже), „**Reynolds Exponent**” (степень для числа Рейнолдса), „**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 Рейнолдса $Re = VL/\nu > 2 \cdot 10^5$ (здесь L – длина поверхности тела вдоль направления потока, V и ν 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) 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).

Примечание 5.2. Вместо указанных величин, в справочниках можно найти другие характеристики: кинематическую вязкость ν и тепловую диффузию α , которые имеют одинаковую размерность m^2/s . 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 Рейнолдса $Re = Vd/\nu$, 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); применяют для жидкости.

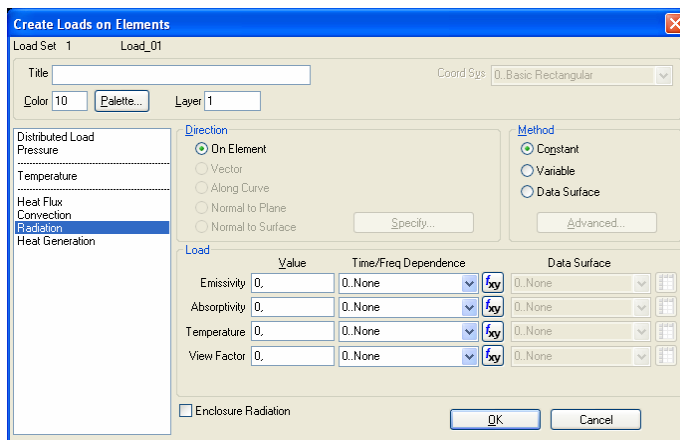
Примечание 5.4. В FEMAP могут применяться одна из двух формул для вычислений коэффициента конвекционной теплоотдачи на поверхности: $\alpha = \gamma \cdot Re^{E_{Re}} \cdot Pr^{E_{Pr}}$ или альтернативная ей $\alpha = (k/d) \cdot \gamma \cdot Re^{E_{Re}} \cdot Pr^{E_{Pr}}$, где d – гидравлический диаметр 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

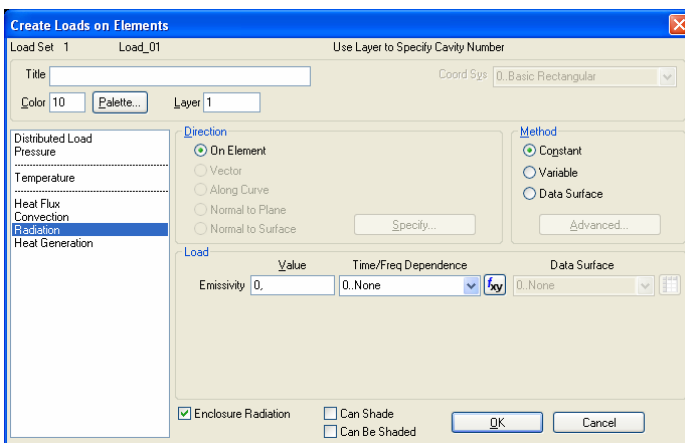
При введении условий радиационного нагрева (**Radiation**) в FEMAP также есть два варианта.

Первый описывает радиационный нагрев от отдаленного источника (например, от солнца, лампы, открытого огня). Для него вводятся значения (см. рис.5.5-а и формулу (Д4.6) 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 тела, которое нагревается (см. формулу (Д4.7) 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.



а)



б)

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

сти 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.

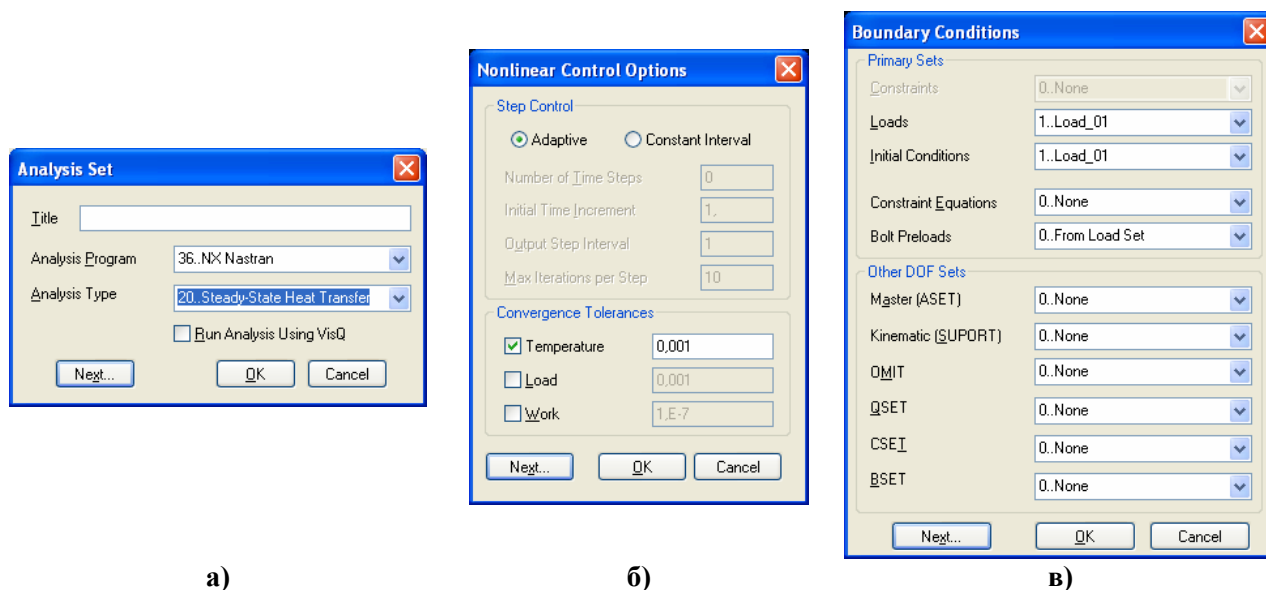
В частности, вызывается диалоговая панель „**Analysis Set Manager**”, на ней с помощью кнопки „**New...**” начинается процесс создания задания: выбирается тип задачи „**20..Steady-**

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), где в секции „**Radiation**” ввести

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?



а) б) в)
Рис.5.6. Диалоговая панель для запуска процесса расчета краевой задачи стационарной теплопроводности

В случае, когда задача является нелинейной (например, характеристики материала зависят от температуры), можно в подразделе „**NASTRAN 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.4.19-б), где, с помощью тех опций, что активны, 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 (**Constraint 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 Разделе 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;

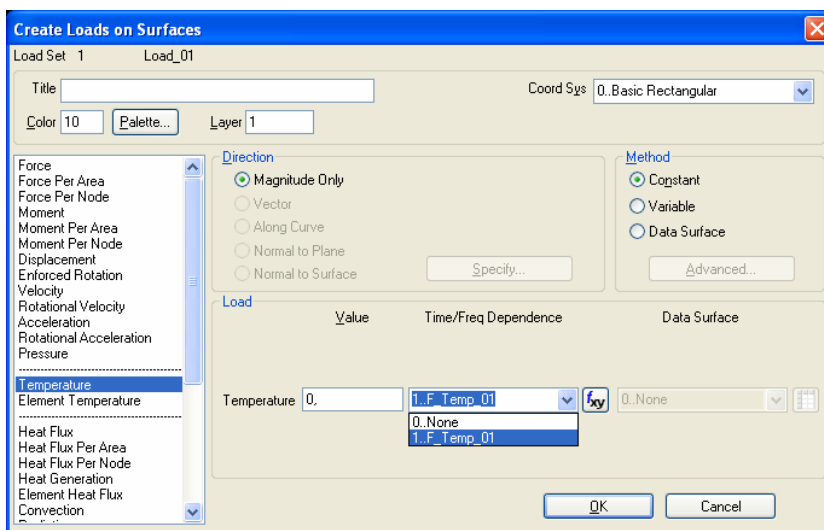
- необходимо обязательно *всем граничным условиям* назначить, от какой функции времени (**1..vs.Time**) они зависят (после введения значения граничного условия – дополнительно открыть список с названием „**Time/Freq Dependence**”, выбрать необходимую функцию (см. рис.5.7-а); или создать такую функцию 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);

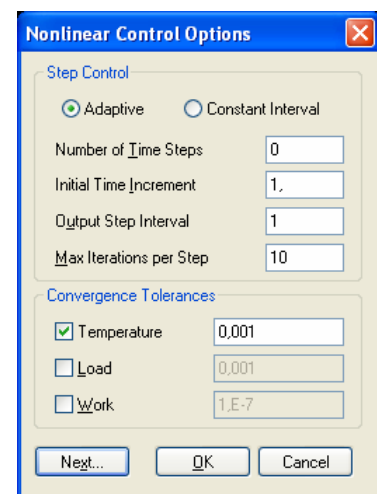
- в подразделе „**NASTRAN Nonlinear**” раздела „**Options**” необходимо вызвать диалоговую панель „**Nonlinear Control Options**” (см. рис.5.7-б). В секции „**Step Control**” становятся активными поля для введения значений количества временных шагов (**Number of Time Steps**), начального временного шага (**Initial Time Increment**) и временного интервала (в секундах) для формирования результатов расчетов (**Output Step Interval**), которые необходимо назначить. Если радиокнопкой „**Adaptive**” установить адаптивную процедуру, то Nastran проводит проверку соответствия *начального* временного шага характеристикам материала и размерам КЭ по формуле (Д4.39):

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

где: h – минимальный размер конечно-элементной сетки (см. Раздел Д4.6 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 Δt 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;



а)



б)

Рис.5.7. К задаче нестационарной теплопроводности:

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

- с помощью изменения значения параметра „**NDAMP**” – величины „коэффициента демпфирования” (подраздел „**NASTRAN 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 Д4.6 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.4.19-б), 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).