ДОКУМЕНТАЦИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

„Софтвер за прорачун температурног поља конструкција – РАК-Т“

Аутори техничког решења

- *Др Мирослав Живковић, ред. проф.*
- *Др Радован Славковић, ред. проф.*
- *Др Милош Којић, ред. проф. у пензији, дописни члан САНУ*
- *Др Ненад Грујовић, ред. проф.*
- *Др Снежана Вуловић, доцент*
- *Ненад Бусарац, истраживач-сарадник*
- *Марко Топаловић, истраживач-сарадник*

Наручилац техничког решења

- Министарства за образовање, науку и технолошки развој Републике Србије

Корисник техничког решења

- Милановић Инжењеринг, Крагујевац

Година када је техничко решење урађено

- 2011-2012

Техничко решење прихватили-користе

- Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
- Милановић Инжењеринг, Крагујевац

Начин верификације резултата

- Резултати су верификовани поређењем са аналитичким решењима и нумеричким резултатима које дају други софтвери

Начин коришћења техничког решења

- Развијени софтвер за прорачун температурног поља конструкција ПАК-Т, примењује се на Факултету инжењерских наука у оквиру наставе и истраживања. Такође, софтвер се користи за прорачун температурног поља конструкција у индустрији

Област технике на коју се техничко решење односи

- Рачунска механика

1. Опис проблема који се решава техничким решењем

Техничко решење, софтвер ПАК-Т, припада области научно-техничких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера. Софтвером ПАК-Т се, решавањем линеарних и нелинеарних проблема провођења топлоте, одређује поље температуре у констуркцији. Прорачуном добијено поље температуре може да се користи у термоеластичној или термопластичној анализи у софтверу за анализу констукција ПАК-С.

Посебни захтеви за решавање наведених проблема јављају се у области аутомобилске технике, војног машинства, проблема термо и нуклеарних електрана, анализа топлотних цеви и измењивача топлоте, у металургији.

2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења

Развијени софтвер је на нивоу познатих светских софтвера (NASTRAN, ANSYS, ABAQUS). Код већине комерцијалних софтвера прорачун провођења топлоте кроз чврста тела се заснива на Фуријевом закону и једначина баланса. Примена методе коначних елемената је опште прихваћена прорачунска методологија у прорачуну провођења топлоте. Развој могућности које пружају савремени компјутери великог капацитета су омогућили имплементацију солвера за рад на више процесорским машинама.

При развоју софтвера ПАК-Т коришћене су стандардне методе решавања једначина. Такође, имплементиран је већи број структурних коначних елемената, са различитим бројем контурних чворова и међучворова.

3. Суштина техничког решења

На основу савремених научних сазнања из области прорачуна простирања топлоте кроз чврста тела развијен је домаћи софтвер за одређивање поља температуре при општим граничним условима. Материјалне константе тела: коефицијент провођења, специфична топлота, могу бити произвољне нелинеарне функције температуре. Распоред температуре у конструкцији је неопходан за решавање неспрегнутих проблема термоеластичности и термопластичности, код конструкција које су изложене дуготрајном механичком и термичком оптерећењу или код појединих технолошких операција где се врши израда делова на повишеним температурама.

Развијени софтвер је једноставан за употребу и подржан комплетном пратећом документацијом, одржавањем и обуком. Посебно је значајно то што развијени софтвер у изворном коду може бити доступан заинтересованим истраживачима како у нашој земљи тако и у иностранству за потребе даљих истраживања.

4. Детаљан опис техничког решења

Развоју софтвера претходила је детаљна теоријска анализа заснована на примени методе коначних елемената на провођење топлоте [1-4].

Овде су дате основне поставке провођења топлоте методом коначних елемената. Подразумева се имплицитна формулација, тј. формулација у којој се услови баланса постављају за крај временског корака интеграције [2]. У области провођења топлоте користи се Фуријеов закон, према коме се може успоставити релација између топлотног флукса $\mathbf{q}_n$ и градијента температуре ∇T, облика

$$\mathbf{q}_n = -\mathbf{k}\nabla T \tag{1}$$

Овде је $\mathbf{k}$ матрица материјалних коефицијената провођења топлоте или кондуктивности. Дијагонални чланови матрице коефицијената кондуктивности у случају ортотропног материјала су k_x, k_y и k_z. За случај изотропног материјала $k_x = k_y = k_z = k$.
Диференцијални облик једначине провођења топлоте је

$$-\rho c \frac{dT}{dt} + \nabla^T \left(\mathbf{k}\nabla T\right) + q = 0 \tag{2}$$

где су: ρ густина материјала, c специфична топлора, T температура, t време и q топлотни извор или понор. Сматра се да је $q > 0$ у случају топлотног извора, а $q < 0$ у случају топлотног понора.

Уколико се температура у тачкама материјала мења у току времена, температурско поље је нестационарно, а ако су температуре константне - ради се о стационарном пољу. За стационарни проблем имамо да је $dT/dt = 0$, па једначине (2) постаје

$$\nabla^T \left(\mathbf{k}\nabla T\right) + q = 0 \tag{3}$$

У случају када нема топлотног извора, онда је у претходним једначинама $q = 0$.

Опште решење диференцијалне једначине провођења топлоте садржи неодређене функције и константе. У практичном решавању проблема тражи се оно решење за температурско поље $T(x, y, z, t)$ које задовољава дате почетне и граничне услове. За задате почетне и граничне услове постоји јединствено решење. Почетни услови се задају само за нестационарне проблеме. Они подразумевају да је расподела температура у почетном тренутку, $t = 0$, позната, тј. $T(x, y, z, 0) = f_0(x, y, z)$, где је $f_0(x, y, z)$ дата функција координата тачака материјала.

Гранични услови у општем случају могу бити:

а) задата температура на делу S_1 $\quad T = T_S(x, y, z, t)$

б) задат флукс на делу S_2 $\quad q_n = q_n(x, y, z, t)$

ц) задат прелаз топлоте (конвекција) на делу S_3 $\quad q_h = h(T_0 - T_S)$

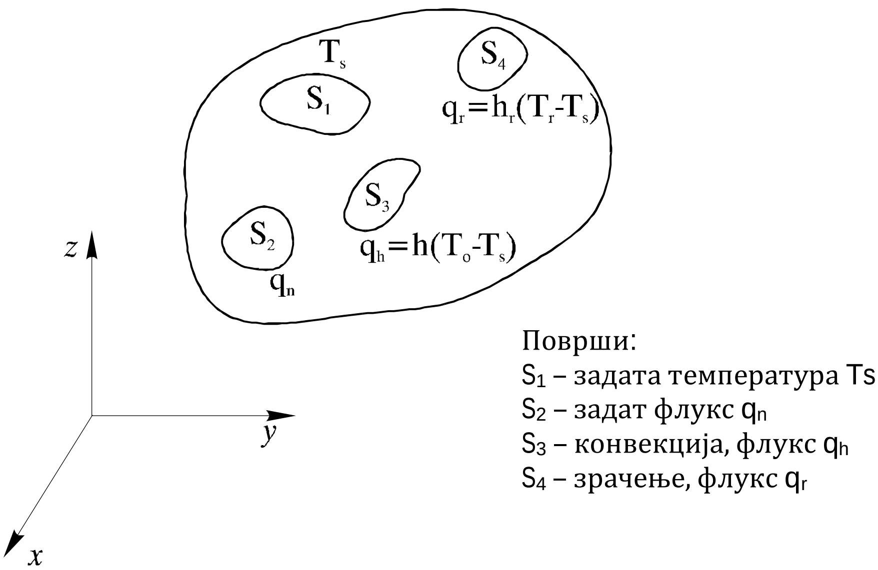
д) задато зрачење (радијација) на делу S_4 $\quad q_r = h_r(T_r - T_S)$

где су S_1, S_2, S_3 и S_4 делови површине S, како је симболички представљено на слици 1.
У овим изразима T_s је температура на површини, q_n, q_h и q_r су флуксеви кроз површину, T_0 је температура околине, h је коефицијент прелаза (конвекције), h_r је коефицијент зрачења, а T_r је температура извора зрачења. Коефицијент конвекције зависи од материјала тела и материјала околне средине. Коефицијент зрачења се може изразити у облику

$$h_r = \bar{h}_r \left(T_r^2 + T_s^2\right)\left(T_r + T_s\right) \tag{4}$$

при чему се коефицијент $\bar{h}_r$ одређује на основу Стефан-Болцманове (Stefan-Boltzmann) константе, емисивности извора зрачења и материјала тела, и геометријских фактора облика и међусобног положаја извора зрачења и тела. Из (4) се види да је h_r функција температуре површине тела, $h_r = h_r(T_s)$.

У случају када материјалне карактеристике не зависе од температуре и не постоји зрачење као гранични услов, проблем је линеаран, јер су све диференцијалне једначине, којима се описује закон провођења топлоте и гранични услови, линеарне по температури.



Слика 1. Гранични услови за провођење топлоте кроз чврсто тело

Применом Галеркиновог поступка изводе се инкременталне једначине за коначни елемент и за конструкцију. У складу са једначином (2) можемо писати

$$-\int_V \rho c h_I \frac{dT}{dt} dV + \int_V \left[h_I \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial}{\partial x_j}\left(k_j \frac{\partial T}{\partial x_j}\right)\right] dV + \int_V h_I q dV = 0 \qquad I = 1,2,\ldots,N \quad (5)$$

где су h_I интерполационе функције за коначни елемент. Овде је V запремина коначног елемента, а за елемент усвајамо 3Д изопараметарски коначни елемент дефинисан у [1]. Температура T у тачки елемента одређеној природним координатама ξ,η,ζ дата је као

$$T(\xi,\eta,\zeta,t) = \sum_{I=1}^{N} h_I T^I \quad (6)$$

или, матрично,

$$T = \mathbf{HT} \quad (7)$$

где су $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & \ldots & h_N \end{bmatrix}$ и $\mathbf{T}^T = \begin{bmatrix} T^1 & T^2 & \ldots & T^N \end{bmatrix}$ вектори интерполационих функција и температура у чворовима, респективно. Приметимо да су температуре у чворовима, у случају нестационарног провођења топлоте, функције времена.

Заменом интерполације за температуре (6) у други интеграл једначине (5) и применом Гаусеове теореме добијамо

$$\int_V \left[h_I \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial}{\partial x_j}\left(k_j h_{J,j}\right)\right] dV T^J = -\int_V \left(\sum_{j=1}^{3} k_j h_{I,j} h_{J,j}\right) dV T^J + \int_S \left[h_I^s \sum_{j=1}^{3} k_j \frac{\partial T}{\partial x_j} n_j \right] dS \quad (8)$$

У случају да је на површини елемента задат топлотни флукс q_n може се писати

$$\int_S \left[h_I^s \sum_{j=1}^{3} k_j \frac{\partial T}{\partial x_j} n_j \right] dS = \int_S h_I^s q_n dS = Q_I^{q_n} \quad (9)$$

где су $Q_I^{q_n}$ компоненте вектора топлотног флукса, а h_I^s интерполационе функције на површини S. Ако је на површини S задат прелаз топлоте (конвекција) може се писати

$$\int_S \left[h_I^s \sum_{j=1}^{3} k_j \frac{\partial T}{\partial x_j} n_j \right] dS = \int_S h_I^s h\left(T_o - T_s\right) dS = -K_{IJ}^h T^J + Q_I^h \quad (10)$$

У последњој једначини подразумева се сабирање по поновљеном индексу $J\left(J=1,2,\ldots,N\right)$, а коефицијенти K_{IJ}^{h} матрице конвекције и вектор конвекције Q_{I}^{h}, су $\mathrm{K}_{IJ}^{h}=\int_{S} h \mathrm{h}_{I}^{s}\mathrm{h}_{J}^{s} dS$ и $\mathrm{Q}_{I}^{h}=\int_{S} h \mathrm{h}_{I}^{s} T_{o} dS$.

По аналогији са једначином (10), у случају граничног услова зрачења, имамо

$$\int_{S}\left[\mathrm{h}_{I}\sum_{j=1}^{3}\mathrm{k}_{j}\frac{\partial T}{\partial \mathrm{x}_{j}}\mathrm{n}_{j}\right]dS=\int_{S}\mathrm{h}_{I}^{s}h_{r}\left(T_{r}-T_{s}\right)dS=-\mathrm{K}_{IJ}^{r}\mathrm{T}^{J}+\mathrm{Q}_{I}^{r} \tag{11}$$

где су $\mathrm{K}_{IJ}^{r}=\int_{S} h_{r}\mathrm{h}_{I}^{s}\mathrm{h}_{J}^{s} dS$ и $\mathrm{Q}_{I}^{r}=\int_{S} h_{r}\mathrm{h}_{I}^{s} T_{r} dS$.

На основу претходних једначина следи систем једначина облика,

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{T}}+\mathbf{K}\mathbf{T}=\mathbf{Q} \tag{12}$$

где су компоненте матрица $\mathbf{C}$ и $\mathbf{K}$ и вектора $\mathbf{Q}$ одређени као

$$\mathrm{C}_{IJ}=\int_{V}\rho c \mathrm{h}_{I}\mathrm{h}_{J} dV \tag{13}$$

$$\mathrm{K}_{IJ}=\mathrm{K}_{IJ}^{k}+\mathrm{K}_{IJ}^{h}+\mathrm{K}_{IJ}^{r} \tag{14}$$

$$\mathrm{Q}_{I}=\mathrm{Q}_{I}^{q}+\mathrm{Q}_{I}^{q_n}+\mathrm{Q}_{I}^{h}+\mathrm{Q}_{I}^{r} \tag{15}$$

Коефицијенти K_{IJ}^{k} представљају матрицу провођења топлоте (кондукције),

$$\mathrm{K}_{IJ}^{k}=\int_{V}\left(\sum_{j=1}^{3}\mathrm{k}_{j}\mathrm{h}_{I,j}\mathrm{h}_{J,j}\right)dV=\int_{V}\left(\mathrm{k}_{x}\mathrm{h}_{I,x}\mathrm{h}_{J,x}+\mathrm{k}_{y}\mathrm{h}_{I,y}\mathrm{h}_{J,y}+\mathrm{k}_{z}\mathrm{h}_{I,z}\mathrm{h}_{J,z}\right)dV \tag{16}$$

где су изводи интерполационих функција по декартовим координатама означени као $\mathrm{h}_{I,x}=\partial \mathrm{h}_{I}/\partial \mathrm{x},\ldots,\mathrm{h}_{J,z}=\partial \mathrm{h}_{J}/\partial \mathrm{z}$. Матрице C_{IJ} и K_{IJ} су симетричне. Вектор запреминског извора или понора рачуна се као Q_{I}^{q} је

$$\mathrm{Q}_{I}^{q}=\int_{V}\mathrm{h}_{I} q dV . \tag{17}$$

Коришћењем интерполационе матрице $\mathbf{H}$, дефинисане вектором-врстом, матрице и векторе у једначини (12) можемо написати у облику

$$\mathbf{K}^{k}=\int_{V}\mathbf{B}^{T}\mathbf{k}\mathbf{B} dV \tag{18}$$

$$\mathbf{K}^{h}=\int_{S} h \mathbf{H}^{sT}\mathbf{H}^{s} dS \tag{19}$$

$$\mathbf{K}^{r}=\int_{S} h_{r}\mathbf{H}^{sT}\mathbf{H}^{s} dV \tag{20}$$

$$\mathbf{C}=\int_{V}\rho c \mathbf{H}^{T}\mathbf{H} dV \tag{21}$$

$$\mathbf{Q}^{q}=\int_{V} q \mathbf{H}^{T} dV \tag{22}$$

$$\mathbf{Q}^{q_n}=\int_{S} q_{n}\mathbf{H}^{sT} dS \tag{23}$$

$$\mathbf{Q}^{h}=\int_{S} h T_{o}\mathbf{H}^{sT} dS \tag{24}$$

$$\mathbf{Q}^{r}=\int_{S} h_{r} T_{r}\mathbf{H}^{sT} dS \tag{25}$$

Матрице (вектори-врсте) $\mathbf{H}^{s}$ садрже површинске интерполационе функције h_{I}^{s}. Матрица $\mathbf{B}$ у (18) је облика

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^1 & \mathbf{B}^2 & \dots & \mathbf{B}^N \end{bmatrix} \tag{26}$$

где је подматрица за чвор "I"

$$\mathbf{B}^I = \begin{bmatrix} \mathrm{h}_{I,x} \\ \mathrm{h}_{I,y} \\ \mathrm{h}_{I,z} \end{bmatrix} \tag{27}$$

Једначина (12) представља једначину баланса енергије коначног елемента у случају 3Д нестационарног провођења топлоте. Укупан број ових једначина једнак је броју чворова елемента, а редни број једначине одређен је индексом I. Сваком чвору одговара једна вредност температуре. Уколико се ради о 2Д, или о линијском провођењу топлоте, горњи изрази остају непромењени, осим што се интеграли по запремини V практично своде на интеграле по површини A или дужини L коначног елемента. Наравно, интерполационе функције h_I имају за 2Д и 1Д одговарајуће облике.

У случају стационарних проблема $\dot{T} = \partial T / \partial t = 0$, па једначина баланса (12) добија облик

$$\mathbf{KT} = \mathbf{Q} \tag{28}$$

Решавање једначина баланса конструкције. У случају нестационарног провођења топлоте када материјалне константе не зависе од температуре и када не постоји зрачење као гранични услова проблем је линеаран, па се примењује следећи поступак решавања једначине (12). За усвојени корак временске интеграције Δt, једначину (12) можемо написати у облику

$$\frac{1}{\Delta t}\mathbf{C}({}^{t+\Delta t}\mathbf{T} - {}^{t}\mathbf{T}) + \mathbf{K}\,{}^{t+\Delta t}\mathbf{T} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{Q} \tag{29}$$

где су ${}^{t}\mathbf{T}$ и ${}^{t+\Delta t}\mathbf{T}$ вектори температуре у чворовима, на почетку и на крају корака интеграције Δt, а ${}^{t+\Delta t}\mathbf{Q}$ је вектор одређен за крај временског корака (време $t + \Delta t$). Из ове једначине следи решење за ${}^{t+\Delta t}\mathbf{T}$:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{T} = \hat{\mathbf{K}}^{-1}\,{}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{Q}} \tag{30}$$

где су

$$\hat{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + \frac{1}{\Delta t}\mathbf{C} \tag{31}$$

и

$$\hat{\mathbf{Q}} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{Q} + \frac{1}{\Delta t}\mathbf{C}\,{}^{t}\mathbf{T} \tag{32}$$

У практичној примени се врши само једном инверзија матрице $\hat{\mathbf{K}}$ (јер је константна), а вектор десне стране ${}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{Q}}$ се израчунава за сваки корак интеграције. За стационарни проблем и у случају када материјалне константе не зависе од температуре, решење за температуре $\mathbf{T}$ се добија из једначине (28).

Уколико материјалне константе c, k_j, h зависе од температуре или постоји зрачење као гранични услов проблем је нелинеаран и неопходан је итеративни поступак за решавање система једначина у временском кораку. Температура на крају корака се изражава преко текуће вредности и прираштаја у итерацији,

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{T} = {}^{t}\mathbf{T}^{(i-1)} + \Delta\mathbf{T}^{(i)} \tag{33}$$

где је i текући број итерације. Такође, извод по времену из једначине (12) може се написати преко Ојлерове шеме унапред:

$${}^{t+\Delta t}\dot{\mathbf{T}} = \frac{{}^{t}\mathbf{T}^{(i-1)} + \Delta\mathbf{T}^{(i)}}{\Delta t} \tag{34}$$

Заменом температура (33) и (34) у једначину (12) имамо једначину за i-ту итерацију

$$\frac{1}{\Delta t}\mathbf{C}^{(i-1)}\left({}^{t+\Delta t}\mathbf{T}^{(i-1)} - {}^{t}\mathbf{T} + \Delta\mathbf{T}^{(i)}\right) + \mathbf{K}^{(i-1)}\left({}^{t+\Delta t}\mathbf{T}^{(i-1)} + \Delta\mathbf{T}^{(i)}\right) = {}^{t+\Delta t}\mathbf{Q}^{(i-1)} \qquad (35)$$

Решење једначине (35) по прираштају $\Delta\mathbf{T}^{(i)}$ је

$$\Delta\mathbf{T}^{(i)} = \left(\hat{\mathbf{K}}^{(i-1)}\right)^{-1}\, {}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{Q}}^{(i-1)} \qquad (36)$$

где су

$$\hat{\mathbf{K}}^{(i-1)} = \mathbf{K}^{(i-1)} + \frac{1}{\Delta t}\mathbf{C}^{(i-1)} \qquad (37)$$

и

$${}^{t+\Delta t}\hat{\mathbf{Q}}^{(i-1)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{Q}^{(i-1)} - \mathbf{K}^{(i-1)}\, {}^{t+\Delta t}\mathbf{T}^{(i-1)} - \frac{1}{\Delta t}\mathbf{C}^{(i-1)}\left({}^{t+\Delta t}\mathbf{T}^{(i-1)} - {}^{t}\mathbf{T}\right) \qquad (38)$$

Итеративни поступак се наставља све док прираштај температуре у чворовима не буде довољно мали, док не задовољи постављени услов конвергенције

$$\frac{\left\|\Delta\mathbf{T}^{(i)}\right\|}{\left\|\Delta\mathbf{T}^{(1)}\right\|} \le \varepsilon_r \qquad (39)$$

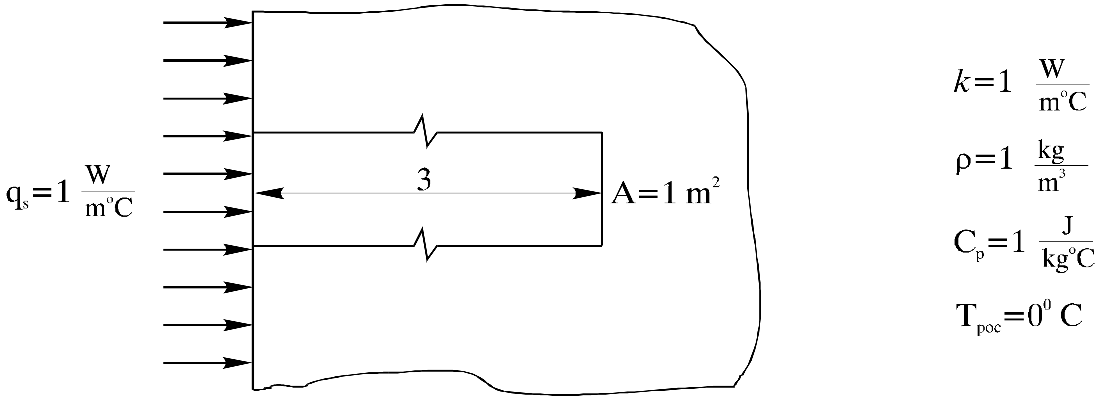
где је ε_r изабрана толеранција за релативну грешку.

У случају нелинеарног стационарног провођења топлоте, у једначини (35), односно у (37) и (38), се изостављају чланови који садрже матрицу $\mathbf{C}^{(i-1)}$, а прираштаји $\Delta\mathbf{T}^{(i)}$ се одређују из (36).
У програм ПАК-Т је уграђен солвер MUMPS за паралелно решавање система једначина. Упутство за примену софтвера ПАК-Т [6] урађено је по узору на упутства светски признатих софтвера као што су FEMAP, NASTRAN, ANSYS, ABAQUS.

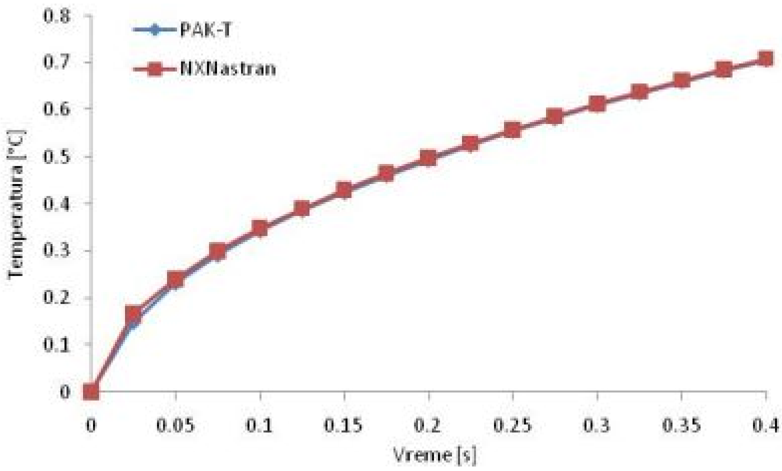
У току развоја софтвера ПАК-Т [5] обрађен је велики број теоријских примера из провођења топлоте, са циљем да се верификују нумерички резултати добијени софтверским пакетом. Прво су урађени тест примери за које постоје аналитичка решења. Исти тест примери су решени са софтвером ПАК-Т као и са комерцијалним софтверима (NASTRAN, ABAQUS). Утврђено је да се добијени резултати добро слажу.

Након верификације софтвера на тест примерима који су једноставни али у пракси неопходни за верификацију софтвера, софтвер је примењен за решавање сложених реалних проблема као што су одређивање температурног поља појединих елемената термо-блокова ЕПС-а. Овде је приказана анализа кућишта редуктора.

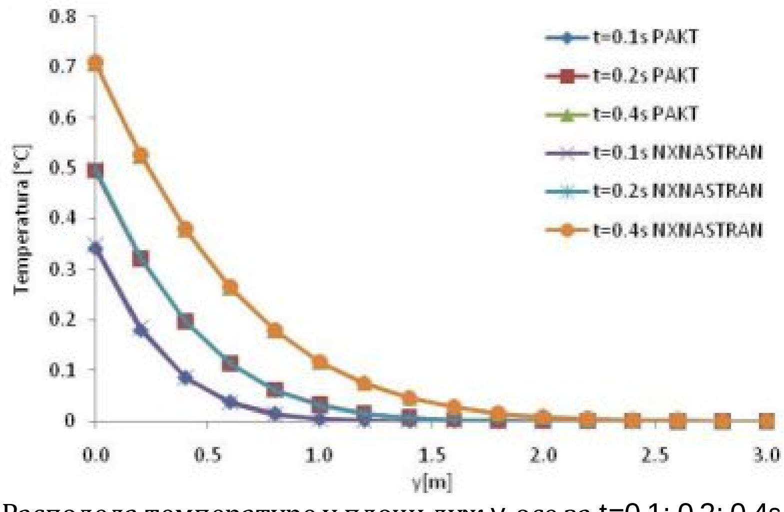
Пример 1 - Нестационарно провођење топлоте кроз полу-бесконачан простор. На слици 2 су приказани геометријски, материјални подаци и оптерећења. Пример је коришћен за проверу програма у решавању линеарних нестационарних проблема провођења топлоте. Полу-бесконачан простор има почетну темературу једнаку нули. У тренутку $t = 0$ на његовој површини почиње да делује јединични површински топлотни флукс q_s. Проблем је моделиран са петнаест 3Д елемената, једнаке дужине. Проблем је решен у 16 временских корака $t = 0.025$. Промена температуре на површини полупростора у току времена, добијена програмом ПАК-Т и НХНастран-ом, је приказана на слици 3. Распоред температуре по дубини полупростора у различитим временским тренуцима приказан је на слици 4.



Слика 2. Нестационарно провођење топлоте кроз полу-бесконачан зид; геометрија и материјални подаци

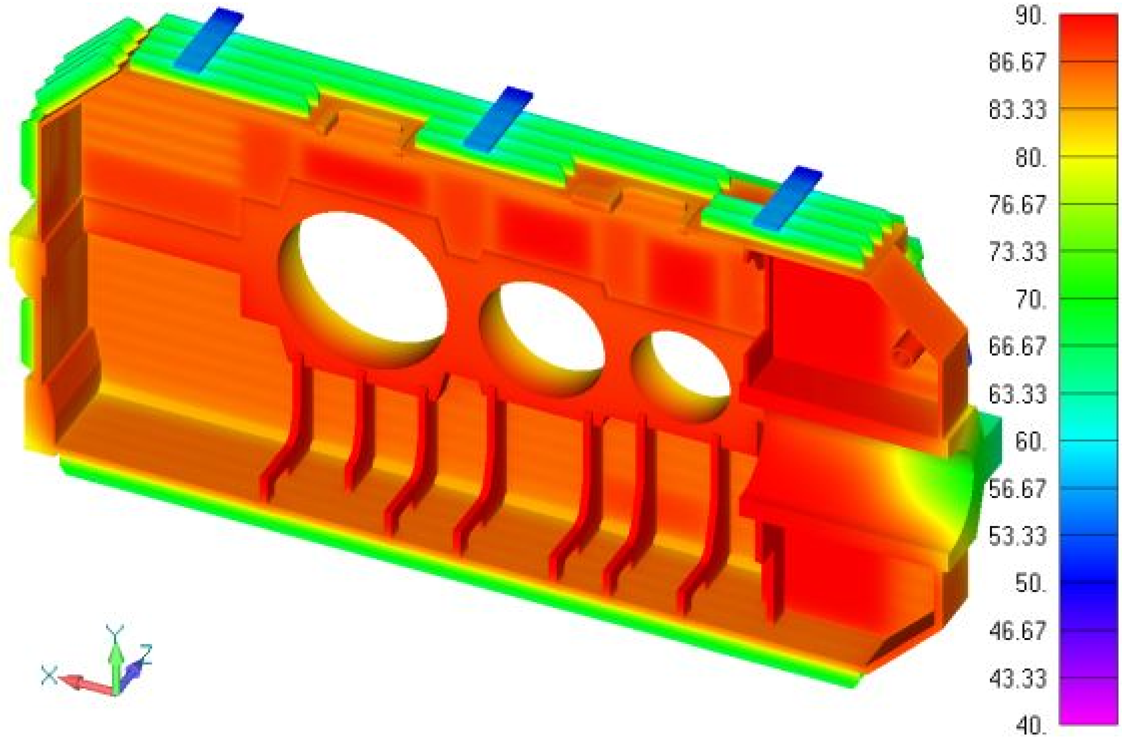


Слика 3. Температура на граници у зависности од времена

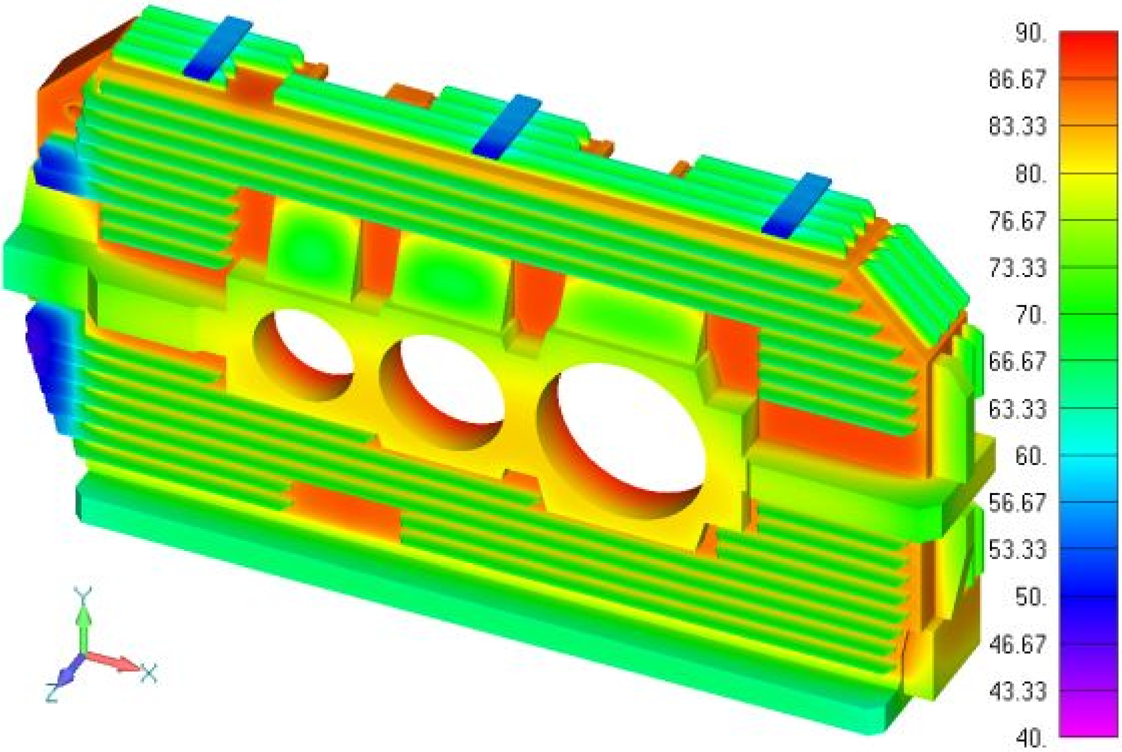


Слика 4. Расподела температуре у плочи дуж y-осе за t=0,1; 0,2; 0,4s

Пример 2 – Принудно хлађење кућишта редуктора. Анализирано је кућиште редуктора велике снаге који се користи на површинским коповима [7]. Анализом редуктора је требало одредити начин принудног хлађења кућишта редуктора при коме се одводи целокупна генерисана количина топлоте (40 kW), тј. требало је одредити потребну брзину струјања ваздуха при принудном хлађењу кућишта редуктора. Разматрано је више случајева вентилатоског хлађења (принудна конвекције). На сликама 5 и 6 је приказано поље температуре на унутрашњој и спољашњој површини кућишта за случај када је коефицијент прелаза топлоте са кућишта на околни ваздух h = 40 W/m²K (принудна конвекција при брзини ваздуха v = 15 m/s). У случају принудне конвекције када је h = 40 W/m²K топлотни капацитет редуктора је 43 kW и задовољен је постављен захтев.



Слика 5. Поље температуре на унутрашњој површини, h=40W/m²K



Слика 7. Поље температуре спољашњој површини, h=40W/m²K

Софтвер ПАК-Т је расположив за комерцијалну употребу, на домаћем и страном тржишту, у индустрији. Такође, софтвер ПАК-Т је могуће користити на техничким факултетима за потребе истраживања и едукације.

5. **Литература**

1. Bathe K. J., (1996), Finite Element Procedures, Prentice Hall, New Jersey.
2. Којић М., Славковић Р., Живковић М., Грујовић Н., Метод коначних елемената I, Машински факултет, Крагујевац 2010.
3. Polivka R. M., Wilson E. L., *Finite element analysis of nonlinear heat transfer problems,* Ph thesis, University of California, Berkley, 1976.
4. Živković M., (1989), *Rešavanje nelinearnih termo-mehaničkih problema konstrukcija metodom konačnih elemenata,* Magistarski rad, Mašinski fakultet, Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac.
5. Živković, M., Kojić, M., Slavković, R., Grujović, N. (2012). PAK-T - Program for FE Heat Transfer Analysis of Solids and Structures, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Serbia
6. Živković, M., Kojić, M., Slavković, R., Grujović, N. (2012). User manual and examples for PAK-T – Program for FE Heat Transfer Analysis of Solids and Structures, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Serbia
7. Živković, M., Janošević M., Vulović S., Busarac N., Topalović M., Thermal analysis of high power reduction gearbox, COMETA, 1st International Scientific Conference, 28-30. November, Jahorina, 2012.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Крагујевцу бр 01-1/3150-2 од 23.11.2012. године именовани смо за рецензенте предлога техничког решења:

„***Софтвер за прорачун температурног поља конструкција*** **- ПАК-Т**“

аутора: *др Мирослав Живковић, ред. проф., др Радован Славковић, ред. проф., др Милош Којић, ред. проф. у пензији, дописни члан САНУ, др Ненад Грујовић, ред. проф., др Снежана Вуловић, доцент, Ненад Бусарац истраживач-сарадник, Марко Топаловић, истраживач-сарадник.*

На основу предлога овог техничког решења подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

Техничко решење „***Софтвер за прорачун температурног поља конструкција*** **- ПАК-Т**“ аутора: *др Мирослав Живковић, ред. проф., др Радован Славковић, ред. проф., др Милош Којић, ред. проф. у пензији, дописни члан САНУ, др Ненад Грујовић, ред. проф., др Снежана Вуловић, доцент, Ненад Бусарац истраживач-сарадник, Марко Топаловић, истраживач-сарадник,* реализовано 2011-2012 године, приказано је на 10 страница формата А4, писаних 11 фонтом, 1 проредом, садржи 6 слика. Састоји се од следећих поглавља:

1. Опис проблема који се решава техничким решењем
2. Стање решености проблема у свету – приказ и анализа постојећих решења
3. Суштина техничког решења
4. Детаљан опис техничког решења
5. Литература

Техничко решење припада области научно-технолошких услуга, пројектовање и развој компјутерског софтвера (класа 42).

Наручилац техничког решења је **Министарство за образовање, науку и технолошки развој Републике Србије**, реализовано је у оквиру рада не пројекту: ***ТР32036 Развој софтвера за развој софтвера за мултидисциплинарне проблеме, 2010-2014.***

Примена предложеног техничког решења реализована је у предузећу **“Милановић Инжењеринг”**, Крагујевац.

МИШЉЕЊЕ

*Аутори техничког решења „**Софтвер за прорачун температурног поља конструкција** - **ПАК-Т**“ су приказали стање решености проблема у свету и у нашој земљи, и детаљно описали развијени софтвер. Техничко решење поседује стручну компоненту, представља заокружени резултат и има научно-истраживачки допринос. Резултати техничког решења излагани су на научним скуповима и публиковани у радовима.*

Развијени софтвер је написан у FORTRAN-у на основу теоријских формулација провођења топлоте, изведених за нумеричку интеграцију применом методе коначних елемената.

На основу описа техничког решења могу се донети следећи закључци:

1. *Софтвер ПАК-Т је развијен за потребе стационарног и нестационарног, линеарног и нелинеарног провођења топлоте, са могућношћу задавања почетних и граничних услова (конвекција, радијација, флукс, задата температура).*
2. *Развијени софтвер ПАК-Т у поређењу са другим комерцијалним софтверима који су били доступни, има сличне могућности и даје поуздане резултате при нумеричким прорачунима температурног поља.*
3. *Упутство је урађено по узору на упутства познатих произвођача комерцијалних софтвера, а која подразумевају: теоријске поставке, упутства за коришћење софтвера, као и упутства са урађеним примерима.*
4. *Развијени софтвер ПАК-Т даје могућност нумеричког прорачуна температурског поља реалних конструкција, произвољног облика, чиме се превазилазе ограничења апроксимативних аналитичких решења примењивих само на једноставне геометријске облике.*

„***Софтвер за прорачун температурног поља конструкција*- ПАК-Т**“ *има значајно место у нумеричкој анализи температурског поља конструкција. Са задовољством предлажемо да се „****Софтвер за прорачун температурног поља конструкција* - ПАК-Т**“ *прихвати као техничко решење - нови софтвер - М85 према класификацији из Правилника о поступку и начину вредновања, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача („Сл. гласник РС“, бр. 32/2008).*

14.12.2012., у Крагујевцу

Др Милорад Бојић, ред. проф.

Др Небојша Лукић, ред. проф.

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
Факултет инжењерских наука
Број: ТР-68/2012
20. 12. 2012. године
Крагујевац

Наставно-научно веће Факултета инжењерских наука у Крагујевцу на својој седници од 20. 12. 2012. године на основу члана 205. Статута Факултета инжењерских наука, донело је

О Д Л У К У

Усвајају се позитивне рецензије техничког решења **„Софтвер за прорачун температурног поља конструкција - ПАК-Т"**, аутора **др Мирослава Живковића**, редовног професора, **др Радована Славковића**, редовног професора, **др Милоша Којића**, редовног професора у пензији, дописног члана САНУ, **др Ненада Грујовића**, редовног професора, **др Снежане Вуловић**, доцента, **Ненада Бусарца**, истраживача сарадника и **Марка Топаловића**, истраживача сарадника.

Решење припада класи **М85**, према класификацији из Правилника о поступку, начину вредновању, и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача („Сл. Гласник РС" - бр. 38/2008).

Рецезенти су:

1. **Др Милорад Бојић**, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Крагујевац,
   Ужа научна област: Термодинамика и термотехника
2. **Др Небојша Лукић**, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Крагујевац,
   Ужа научна област: Термодинамика и термотехника.

Достављено:
- Ауторима
- Архиви

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Др Мирослав Бабић, редовни професор

Projektovanje •
Inzenjering •
Tretman voda •
Masinska proizvodnja •

Milanović inženjering d.o.o.,Sobovica bb-34 321 Cerovac, Kragujevac, Srbija

Број: 84/13
Датум: 30.01.2013. год.

ПРЕДМЕТ: Техничко решење – Софтвер:
Софтвер за прорачун температурног поља конструкција ПАК-Т

Овим се потврђују следеће чињенице у вези предметног техничког решења:

Врста техничког решења:
Софтвер (М85)

Назив техничког решења:
Софтвер за прорачун температурног поља конструкција ПАК-Т

Аутори техничког решења:
Др Мирослав Живковић, ред. проф.
Др Радован Славковић, ред. проф.
Др Милош Којић, ред. проф. у пензији, дописни члан САНУ
Др Ненад Грујовић, ред. проф.
Др Снежана Вуловић, доцент
Ненад Бусарац, истраживач-сарадник
Марко Топаловић, истраживач-сарадник

Корисник техничког решења:
Милановић Инжењеринг, Крагујевац

Година израде:
2011. – 2012. година

Примена техничког решења:
Развијени софтвер за прорачун температурног поља конструкција ПАК-Т је примењен у:
1. Термичком прорачуну изолованог зида цистерне за транспорт течног алуминијума
2. Термичком прорачуну изолованог зида цеви паровода

Напомена:
Техничко решење софтвер за прорачун температурног поља конструкција ПАК-Т развијено је оквиру пројекта ТР32036 - Развој софтвера за решавање спрегнутих мултифизичких проблема, који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја, уз партиципацију Милановић Инжењеринг д.о.о.

Директор
Братислав Милановић