A XI-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești",
SEBEȘ, 2011

DETERMINAREA CONDUCTIVITĂȚII TERMICE A MATERIALELOR DE CONSTRUCȚII

Lucia VÎLCEANU, Mihaela FLORI, Vasile PUȚAN

ABOUT THE DETERMINATION OF BUILDING MATERIALS' THERMAL CONDUCTIVITY

The paper introduces an experimental method of determining the thermal conductivity of building materials. The installation we have created is based on the Fouriér law allows the determination of the thermal conductivity of the building materials' which the test bars are made of, and implicitly, theirs identification. This method does not allow an observation of the variation of thermal conductivity with respect to temperature for the material under question, the result of the analysis being in fact a mean value of thermal conductivity.

Keywords: conductivity, thermocouples, thermal conductivity, thermal gradient
Cuvinte cheie: conductivitate, termocupluri, conducție termică, gradient termic

1. Introducere

Relația de bază a transferului conductiv de căldură a fost stabilită pe cale experimentală în anul 1882 de către Fouriér. Legea care-i poartă numele a fost verificată de numeroase experimente ulterioare şi niciodată infirmată. Conductivitatea termică λ [W/mK] reprezintă densitatea fluxului de căldură ce traversează o suprafață izotermă la un gradient de temperatură de **1** ^{o}C/m. Deoarece, la transmiterea căldurii, existența unui gradient termic presupune temperaturi diferite în diferite puncte, ne interesează în mod deosebit variația conductivității termice cu

temperatura. Cercetările experimentale au arătat că pentru majoritatea substanțelor variația lui λ cu temperatura poate fi aproximată printr-o funcție liniară de forma:

$$\lambda = \lambda_0 \left[1 + \beta\left(t - t_0\right)\right] \quad \left[\frac{W}{m \cdot K}\right] \qquad (1)$$

unde λ_0 corespunde unei temperaturi de referință t_0, iar β este un coeficient caracteristic fiecărui material. Coeficientul β pentru corpurile solide poate fi pozitiv sau negativ în funcție de natura corpului.

O privire de ansamblu asupra valorilor conductivității termice a materialelor solide, lichide şi gazoase rezultă din Fig.1. Pentru materialele de construcție λ se încadrează în intervalul (0,02…3) W/(mK) şi depinde mult de structura materialului, de porozitatea şi de umiditatea acestuia. Valorile cresc cu creşterea temperaturii. La aceste materiale se observă, de asemenea, o creştere a lui λ cu creşterea densității.

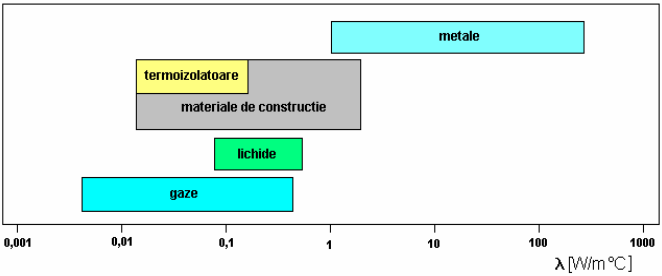

Fig. 1 Spectrul de valori pentru conductivitatea termică a diverselor categorii de substanțe

2. Considerații teoretice privind determinarea conductivității termice a materialelor de construcții

Cunoaşterea coeficientului global de transfer termic **k** [W/m^2·K] şi a conductivității termice λ [W/m·K] se impune în multe domenii ale tehnicii şi în special în cazul izolațiilor termice, schimbul de căldură dintre părțile componente ale diverselor instalații şi mediul înconjurător constituind o problemă deosebit de importantă.

Schimbul global de căldură ce are loc între două fluide despărțite printr-un perete neomogen (figura 2) poate fi realizat din următoarea succesiune a transferului termic: convecție şi radiație între fluidul **1** de temperatură $t_{f1}>t_{p1}$ şi suprafața **B** a peretelui având temperatura t_{p1}; conducție termică prin peretele neomogen format din straturile de grosime d_1, d_2,..., d_n având conductivitățile termice λ_1, λ_2,..., λ_n şi

transferul termic prin convecție şi radiație de la suprafața **C** a peretelui de temperatură t_{pn+1} la fluidul **2**, având temperatura $t_{f2} < t_{pn+1}$.

În cadrul schimbului global de căldură, aportul radiației termice la transmiterea căldurii se ia în considerare prin coeficientul de transfer termic de suprafață prin radiatie α_{rad}, rezultând valoarea coeficientului de transfer termic de suprafață α:

$$\alpha = \alpha_{conv} + \alpha_{rad} \ \ [W/m^2 \cdot K] \qquad (2)$$

unde: α_{conv} [W/m^2·K] - este coeficientul de convecție termică.

Astfel, transferul de căldură prin convecție şi radiație între fluidul **1** şi peretele **B**, respectiv între peretele **C** şi fluidul **2**, se înlocuieşte cu un transfer de căldură de suprafață. Rezultă că transferul de căldură dintre fluidul **1** şi suprafața **B** a peretelui va fi:

$$\dot{Q}_{f1} = \alpha_1 \cdot A \cdot \left(t_{f1} - t_{p1}\right) \ \ [W] \qquad (3)$$

unde: α_1 [W/m^2 K] - este coeficientul de transfer termic de suprafață de la fluidul **1** la perete.

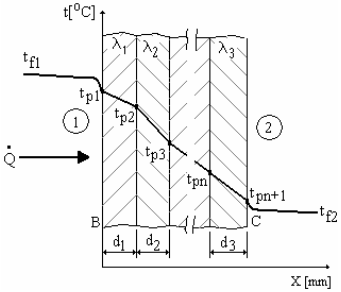

Fig. 2 Distribuția temperaturii între fluide despărțite printr-un perete plan neomogen

Din relația (3) rezultă:

$$t_{f1} - t_{p1} = \frac{\dot{Q}_{f1}}{\alpha_1 \cdot A} \qquad (4)$$

Conform legii lui Fouriér, fluxul de căldură transmis prin primul strat al peretelui este dat de relația:

$$\dot{Q}_1 = \frac{\lambda_1}{d_1} \cdot A \cdot \left(t_{p1} - t_{p2}\right) \qquad (5)$$

unde: λ_1 [W/mK] - este conductivitatea termică a primului strat din perete.

Diferența de temperatură în stratul de grosime $\mathbf{d_1}$ al peretelui se obține din relația (5):

$$t_{p1} - t_{p2} = \frac{d_1}{\lambda_1 \cdot A} \cdot \dot{Q}_1 \ \ [°C] \qquad (6)$$

În mod analog, rezultă:

$$t_{p2} - t_{p3} = \frac{d_2}{\lambda_2 \cdot A} \cdot \dot{Q}_2 \qquad (7) \qquad \ldots \qquad t_{pn} - t_{pn+1} = \frac{d_n}{\lambda_n \cdot A} \cdot \dot{Q}_n \qquad (8)$$

Prin asemănare cu relația (4) se exprimă diferența dintre temperatura suprafeței **C** şi temperatura fluidului *2*:

$$t_{pn} - t_{f2} = \frac{\dot{Q}_{f2}}{\alpha_2 \cdot A} \qquad (9)$$

Considerând procesul de transmitere a căldurii staționar, adică

$\dot{Q}_{f1} = \dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = ... = \dot{Q}_n = \dot{Q}_{f2} = \dot{Q}$, şi adunând relațiile (4), (6) şi (8), rezultă:

$$t_{f1} - t_{f2} = \frac{\dot{Q}}{A}\left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + ... + \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}\right] \text{ [°C]} \qquad (10)$$

Din relația (10) rezultă:

$$\dot{Q} = A \cdot \left(t_{f1} - t_{f2}\right) \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = k \cdot A \cdot \left(t_{f1} - t_{f2}\right) \qquad (11)$$

unde:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \left[W / m^2 \cdot K\right] \qquad (12)$$

se numeşte *coeficient global de transfer termic*.

Dacă se consideră numai procesul de transmitere a căldurii prin conducție în interiorul peretelui neomogen, din însumarea relațiilor (6)…(8), rezultă:

$$t_{p1} - t_{pn+1} = \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i} \qquad (13)$$

de unde :

$$\dot{Q} = A \cdot \left(t_{p1} - t_{pn+1}\right) \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i}} = \frac{\lambda_e}{d} \cdot A \cdot \left(t_{p1} - t_{pn+1}\right) \text{ [W]} \qquad (14)$$

Conductivitatea termică echivalentă a peretelui cu grosimea totală **d** [m] va fi:

$$\lambda_e = \frac{d}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\lambda_i}} \text{ [W/m·K]} \qquad (15)$$

În situația în care peretele este format dintr-un singur tip de material, relația (14) devine:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot \left(t_{p1} - t_{p2}\right) \text{ [W]} \qquad (16)$$

unde: λ [W/m·K] şi **d** [m] reprezintă conductivitatea termică a materialului peretelui, respectiv grosimea peretelui, iar t_{p1} şi t_{p2} [^{0}C], temperaturile pe cele două fețe exterioare ale peretelui.

Astfel, conductivitatea termică va fi:

$$\lambda = \frac{\dot{Q} \cdot d}{A \cdot \left(t_{p1} - t_{p2}\right)} \qquad (17)$$

În tabelul 1 sunt înscrise valori (din literatura de specialitate) ale conductivității termice specifice unor materiale de construcție.

Tabelul 1

Material	Conductivitatea termică **λ [W/m·K]**	Material	Conductivitatea termică **λ [W/m·K]**
Beton	1,45	Poliuretan	0,018
Cărămidă	0,90	Polistiren extrudat	0,035
BCA	0,40	Polistiren expandat	0,040
Lemn placat	0,10	Vată minerală	0,041
Lemn de stejar	0,37	Plută	0,045
Lemn de pin	0,28	Piatră	2,90

3. Schema instalației experimentale

În funcție de starea de agregare a materialului analizat există diverse metode experimentale de determinare a conductivității termice. În cazul materialelor solide, cea mai cunoscută metodă constă în măsurarea diferenței de temperatură pe fețele unei epruvete paralelipipedice cunoscând valoarea fluxului termic care o traversează.

Instalația experimentală (figura 3) se compune dintr-un vas calorimetric (1) încălzit prin intermediul unei rezistențe electrice (2). Temperatura pe fețele exterioare ale epruvetelor (3) se determină cu ajutorul a trei termocupluri (T_1-T_3) cuplate fiecare la logometre. Modul de amplasare al celor 3 termocupluri se poate observa în figura 3.

Fluxul de căldură $\dot{Q}$ [W] va traversa epruvetele de jos în sus, iar valoarea acestuia se va determina în funcție de tensiunea şi intensitatea curentului electric folosit pentru încălzirea rezistenței electrice (2) cu relația:

$$\dot{Q} = U \cdot I \quad [W] \qquad (18)$$

Epruvetele cu suprafața de 150x150 mm au practicate pe fețele exterioare câte un canal pentru fixarea termocuplurilor astfel încât contactul între două epruvete suprapuse să se realizeze perfect.

Determinările experimentale vor începe după ce în vasul calorimetric s-a ajuns la starea de echilibru termic. În acest scop, încălzirea va începe cu câteva minute înainte de înregistrarea datelor experimentale.

După obținerea regimului staționar de transfer de căldură, se determină consumul de energie electrică prin măsurarea intensității **I** [A]

şi a tensiunii **U** [V] curentului electric de alimentare a plăcii de încălzire din vasul calorimetric, cu ajutorul unui multimetru.

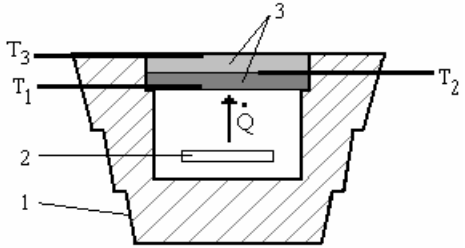

Fig. 3

Schema instalației experimentale:
1 – vas calorimetric;
2 – placă de încălzire;
3 – epruvete; T_1, T_2 şi T_3 – termocupluri

Pentru simplificare, se consideră că întreg fluxul termic degajat de rezistența electrică traversează secțiunea epruvetei.

4. Concluzii

■ Autorii lucrării au conceput şi realizat practic un stand experimental care permite determinarea conductivității termice a unor materiale de construcții din care sunt confecționate epruvetele (3). Standul experimental se află în dotarea laboratorului de *Termotehnică şi agregate termice* al Facultății de Inginerie din Hunedoara, permițând realizarea de către studenți de măsurători efective cu ajutorul acestuia.

■ Precizia măsurătorilor este afectată de soluțiile alese pentru izolarea termică a instalației față de mediul ambiant, subliniindu-se faptul că fluxul de căldură s-a considerat unidimensional şi staționar.

■ După stabilirea echilibrului termic, valoarea lui λ determinată cu relația (18) corespunde temperaturii medii din instalație.

BIBLIOGRAFIE

[1] Puțan, V., *Agregate termice*, Editura Cermi, Iaşi, 2008.
[2] Vîlceanu, L., Flori, M., *Termotehnică. Aplicații practice*, Îndrumar laborator, Editura ”Politehnica” Timişoara, 2009.
[3] Vîlceanu, L., *Transfer de căldură şi instalații termice*, Editura Cermi, Iaşi, 2008.

Conf.Dr.Ing. Lucia VÎLCEANU, lucia.vilceanu@fih.upt.ro
Asist.Dr.Ing. Mihaela FLORI, mihaela.flori@fih.upt.ro
Şef lucr.Dr.Ing. Vasile PUȚAN, vasile.putan@fih.upt.ro
Universitatea ”Politehnica” din Timişoara, Facultatea de Inginerie Hunedoara,
Hunedoara, str. Revoluției, nr.5, cod 331128
membri AGIR

A XI-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești",
SEBEȘ, 2011

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A PERFORMANȚELOR GENERATORULUI DE AER CALD TIP A20

Florin MĂRCUȚ, Mihai JĂDĂNEANȚ

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE PERFORMANCE OF COMBUSTION HEATER TYPE A20

This paper presents experimental determination of the performance of combustion heater A20. The experimental work presented method and results of these determinations.

Keywords: hot air generators, experimental measurements
Cuvinte cheie: generatoare de aer cald, măsurători experimentale

1. Determinări experimentale şi calcule efectuate pentru determinarea performanțelor generatorului de aer cald A20

Determinarea performanțelor generatorului de aer cald presupune determinarea puterii termice, debitul de aer cald, creşterea temperaturii aerului, temperatura maximă a aerului cald, randamentul şi determinarea calității arderii prin determinarea noxelor şi a indicelui de fum a gazelor de ardere evacuate de instalație conform Directivei nr.56/2001/CE.

Determinările s-au realizat pe standul de probă a generatoarelor de aer cald existent la firma Mecord.

Determinările experimentale s-au realizat pe un generator de aer cald tip A20 (figura 1) cu tensiunea nominală de 12 V care utilizează combustibil lichid motorină.

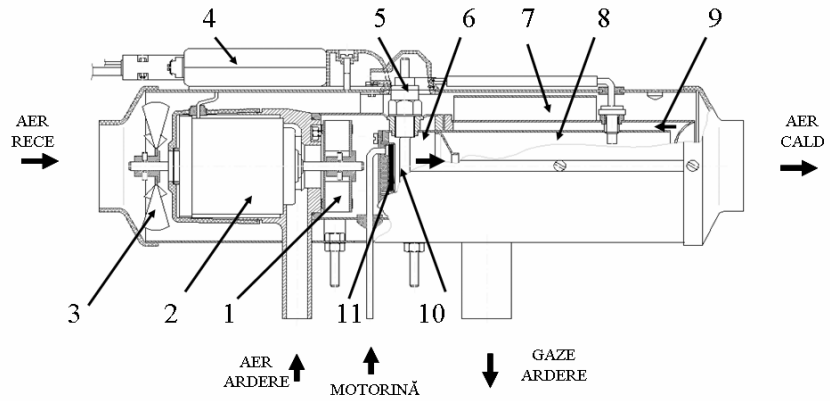

Fig. 1 Generator de aer cald tip A20
(1-compresor, 2-motor, 3-ventilator, 4-automatizare, 5-bujie, 6-camera de ardere, 7-cazan, 8-tub de flacără, 9-întoarcerea gazelor de ardere, 10-cap incandescent, 11-vaporizator)

2. Metoda de determinare experimentală a puterii termice, debitul de aer cald, creşterea de temperatură a aerului şi a randamentului

Metoda de determinare experimentală este prezentată tabelar (tabelul 1) şi constă în măsurarea valorilor parametrilor de funcționare şi determinarea prin calcul a caracteristicilor generatorului de aer cald.

Tabelul 1

Mărimea măsurată sau calculată	**Mod de obținere**
Frecvența pompei (Hz)	măsurare
Turația motorului (rot/min)	măsurare
Tensiunea de alimentare (V)	măsurare
Temperatura aer la intrarea, t_{ar} (^{0}C)	măsurare
Temperatura aer cald, t_{ac} (^{0}C)	măsurare
Diferența de temperatură intrare-ieşire, (^{0}C)	t_{ac} - t_{ar}
Viteza aerului măsurată cu anemometrul	măsurare
Viteza aerului la ieşire w_{ac} (m/s)	Diagrama anemometrului
Diametrul interior al secțiunii de ieşire a aerului cald D_i (mm)	măsurare

Secțiunea de ieşire S_a (m^2)	(π x D_i^2)/(4 x 10^6)
Debitul volumic de aer calculat (m^3/h)	3600 x $S_a w_{ac}$
Densitatea aerului la ieşire ρ_{ac} (Kg/m^3)	tabele termotehnice
Debitul masic de aer D_a (Kg/h)	$D_a = S_a w_{ac} \rho_{ac}$
Temperatura medie aer în generator (^{0}C)	$(t_{ac} + t_{ar})/ 2$
Căldura specifică la t. medie c_{pa} (J/KgK)	tabele termotehnice
Puterea termică a instalației P_t (W)	$\frac{D_a c_{pa}(t_{ac} - t_{ar})}{3600}$
Randamentul generatorului η_d	$\frac{D_a c_{pa}(t_{ac} - t_{ar})}{1000 \times \rho_m C_h Q_d}$

Căldura disponibilă şi densitatea motorinei sunt:

$$Q_d \cong Q_i = 41850 \quad \text{kJ/kg} \qquad (1)$$

$$\rho_m = 0{,}880 \quad \text{kg/l} \qquad (2)$$

Determinările experimentale s-au realizat pentru măsurarea puterii termice pe treapta de putere maximă, pentru trei valori ale tensiunii electrice de alimentare, şi pe treapta de putere minimă la tensiunea nominală.

Rezultatele obținute au fost înregistrate în tabelul 2:

Tabelul 2

Mărimea măsurată sau calculată	**$P_{maximă}$**	**$P_{maximă}$**	**$P_{maximă}$**	**$P_{minimă}$**
Frecvența pompei (Hz)	3,96	3,97	3,96	2,30
Turația motorului (rot/min)	5750	9250	6600	4700
Tensiunea de alimentare (V)	10,5	18	12,2	12,2
Temperatura aer la intrare, t_{ar} (^{0}C)	22	23	22	22
Temperatura aerului cald, t_{ac} (^{0}C)	104	73	92	78
Diferența de temperatură intrare-ieşire, (^{0}C)	82	50	70	56
Viteza aerului (div/min)	390	560	440	300
Viteza aerului la ieşire w_{ac} (m/s)	6,8	9.4	7,6	5,2
Diametrul interior al secțiunii de ieşire a aerului cald D_i (mm)	63	63	63	63
Secțiunea de ieşire S_a (m^2)	0,00312	0,00312	0,00312	0,00312
Debitul volumic de aer (m^3/h)	76,2	105	85,4	58,5

Densitatea aerului la ieşire ρ_{ac} (kg/m^3)	0,939	1,100	0,960	1,010
Debitul masic de aer D_a (kg/h)	71,6	115,5	82,0	59,0
Temperatura medie a aerului în generator t_m (^{0}C)	63	48	57	50
Căldura specifică la temperatura medie c_{pa} (J/kg×K)	1009	1008	1009	1008
Puterea termică a instalației P_t (W)	1638	1601	1605	923
Randamentul generatorului η_d	0,728	0,711	0,713	0,750

Tabelul 3

	Consumul orar (l/h)		
Tensiunea de alimentare (V)	10,5	18	12,2
Treapta 1-minimă	0,12	0,12	0,12
Treapta 2	0,14	0,14	0,14
Treapta 3	0,165	0,165	0,165
Treapta 4	0,190	0,190	0,190
Treapta 5-maximă	0,22	0,22	0,22

Se constată că valorile măsurate ale consumurilor orare de motorină (tabelul 3) nu diferă funcție de tensiunile de alimentare.

Acest aspect se explică prin faptul că blocul electronic asigură aceeaşi frecvență de acționare a pompei de motorină cu piston, indiferent de tensiunile de alimentare.

Această situație nu este convenabilă, deoarece suflanta îşi modifică turația funcție de tensiunile de alimentare, modificându-se şi coeficientul excesului de aer, debitele de motorină fiind cvasi constante.

Pentru a combate această situație este necesar să se asigure la optimizarea procesului de ardere un exces de aer acoperitor la tensiunea electrică minim admisă de funcționare a generatorului de aer cald.

În tabelul 4 s-au înregistrat şi temperaturile gazelor de evacuare.

Tabelul 4

12,2 V	**t_g (^{0}C)**
Treapta 1- minimă	244
Treapta 2	326
Treapta 3	300
Treapta 4	331
Treapta 5 - maximă	327

3. Determinarea calității arderii

Determinarea calității arderii s-a realizat prin determinarea noxelor şi a indicelui de fum a gazelor de ardere evacuate de instalație conform Directivei nr.56/2001/CE.

S-au făcut determinări pentru toate cele 5 trepte de funcționare programate (tabelul 5).

Tabelul 5

	Unități Bacarach	**HC (ppm)**	**NOx (ppm)**	**CO (ppm)**
Valori admise de Directiva CE	Max.4	Max.100	Max.200	Max1000
Treapta 1	3	9	173	32
Treapta 2	3	5	185	45
Treapta 3	3	3	186	48
Treapta 4	3	3	190	35
Treapta 5	2	0	193	5

Calitatea arderii se încadrează în valorile admise de prevederile Directivei 56/2001/CE.

Pentru obținerea valorilor măsurate s-a utilizat următoarea aparatură:

- termometru electronic cu termocuple cromel-alumel
- analizor de gaze
- anemometru
- multimetru electronic
- frecvențmetru
- turometru
- cronometru
- eprubetă gradată
- aparat determinare indice de fum
- stand probe generatoare aer cald

BIBLIOGRAFIE

[1] Baehr, H.D., Stephan, K., *Heat and mass transfer*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
[2] Ionel, I., Ungureanu, C., Bisorca, D., *Termoenergetica şi mediul*, Editura Politehnica Timişoara, 2006.
[3] Leca, A., ş.a., *Transfer de căldură şi masă*, Editura tehnică, Bucureşti, 1998.

[4] Mărcuț, F., Jădăneanț, M., *Combustion research in burner with fuel distribution on standing vaporizer for combustion heaters*, Cofret 2008, 4-eme edition du Colloque Francophone en Energie, Environnement, Economie et Thermodynamique, 11-13 Juin 2008, Ecole des Mines de Nantes, ISBN 2.6905267.61.5.
[5] Bejan, M., *În lumea unităților de măsură.* Ediția a doua revăzută şi adăugită. Editura Academiei Române şi Editura AGIR, Bucureşti, 2005.

Drd.Ing. Florin MĂRCUȚ,
Universitatea „Politehnica” Timişoara,
e-mail: florin.marcut@yahoo.com
Prof.Dr.Ing. Mihai JĂDĂNEANȚ,
Facultatea de Mecanică, Universitatea ”Politehnica” din Timişoara,
membru AGIR
e-mail: mihai_jadaneant@yahoo.com; mihai.jadaneant@mec.upt.ro