

# ARDEREA ÎN FOCARE TUNEL CONICE

Nicolae ANTONESCU, Dumitru P. STANESCU, Nicolae N. ANTONESCU, Lelia OLEA

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII, București

**Abstract.** Conical tunnel burning chambers represent an upgrade of cylindrical tunnel burning chambers in the direction of widening the flame stability domain and decreasing the hydraulic losses. The results obtained on an experimental installation show a stable burning process at a thermal load of  $18 \text{ MW/m}^2$  and a possible variation of the thermal load in the domain 1 to 1/10. The hydraulic losses are significantly decreased by comparison with the cylindrical chamber in the same inflow conditions. Temperature variation in several cross sections are graphically presented. There are also described the main phases of the burning process from the flammable mixture injection till flame stabilization. It is foreseen a wide technical application of these type of burning chambers in the energetical field and also for gases with variable burning properties as for example the gases resulted from the closed waste landfills. A suitable application will also be for the mobile burning installations.

## BAZELE FENOMENOLOGICE

Focarul tunel conic reprezintă o perfecționare a focarului tunel cilindric îngust, în sensul că, menținând toate avantajele intensificării procesului de ardere specific camerelor de ardere de tip tunel, poate asigura o

stabilizare a flăcării într-un domeniu larg de viteze de intrare ale amestecului combustibil și are căderi de presiune mult mai mici decât focarul tunel cilindric.

Schema funcțională a unui focar tunel conic este dată în figura 1

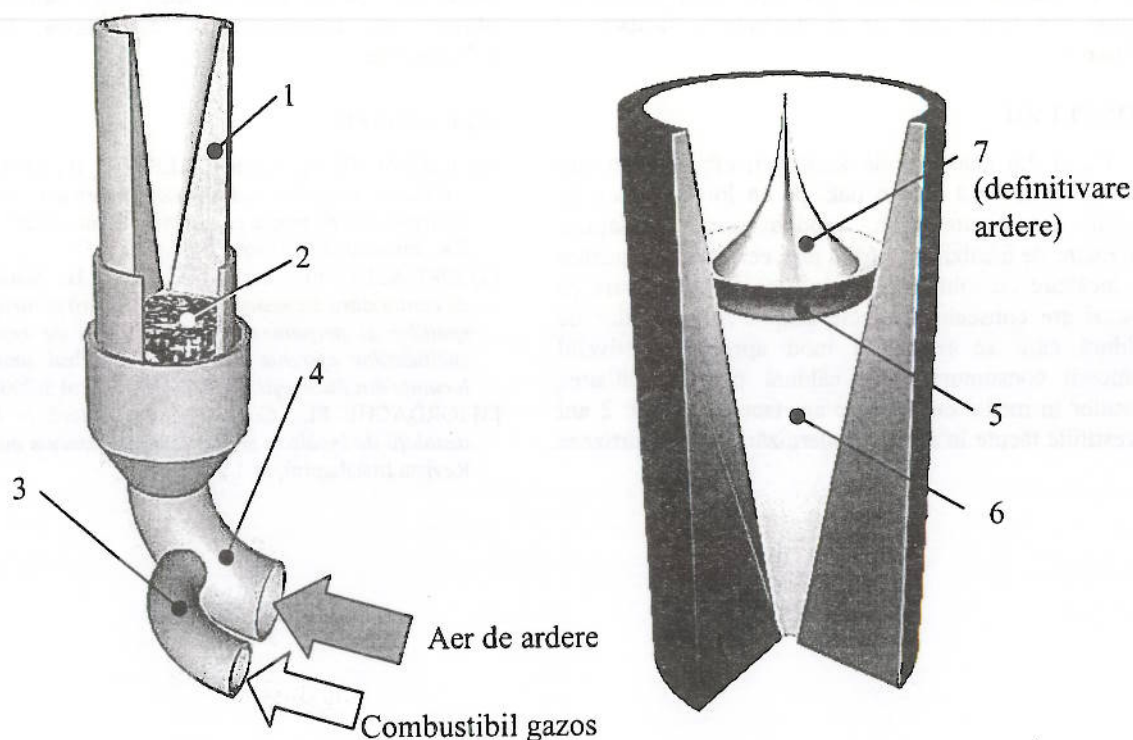


Fig.1. Focar tunel conic

- 1 – focar tunel conic; 2 – omogeneizator; 3 – admisie combustibil gazos;  
4 – admisie aer; 5 – front de flacără; 6 – zona de amestec combustibil;  
7 – zona de gaze de ardere.



Focarul tunel conic este alimentat cu amestec combustibil în domeniul dozajelor de ardere cinetică printr-un tub cilindric cu diametru mai mic decât diametrul de stingere, pentru a evita orice retur de flacără. În cazul vitezelor mari de curgere a amestecului combustibil, diametrul de stingere este mult mai mare decât diametrul de stingere static, ceea ce rezultă din analiza ecuațiilor de aprindere pentru jeturi cu viteze mari.

Amestecul combustibil este realizat într-un tronson cu umplutură neordonată de corpuri neaerodinamice. Combustibilul gazos și aerul de ardere sunt admise în capătul amonte al omogeneizatorului. Amestecul combustibil realizat trebuie să fie în domeniul amestecurilor care permit aprinderea cinetică și trebuie să fie bine omogenizat pentru ca stabilizarea în tubul focar conic să nu prezinte fluctuații (la variații de dozaj, acroșarea frontului de flacără este mai în amonte dacă dozajul se apropie de stoichiometric și mai în aval dacă dozajul se depărtează de cel stoichiometric, în oricare din sensuri, deci frontul de flacără poate să aibă pulsații la o omogenizare imperfectă).

În momentul aprinderii de la capătul deschis al tubului conic, frontul de flacără se retrage în interior pe o poziție dată de condiția ecuației de stabilitate pe pereți reci: viteza de ardere turbulentă lângă perete (luând în considerare efectul de stingere a peretelui) egală cu viteza turbulentă de ardere. În momentul imediat următor apare efectul de autoturbulență a amestecului combustibil în zona frontului de flacără, deoarece, pe o lungime mică de focar, focarul conic poate fi asimilat fenomenologic cu focarul cilindric. Deci, odată cu retragerea frontului de flacără în interiorul focarului tubular conic, apare fenomenul Karlowitz de mărire a vitezei de ardere turbulente datorită măririi turbulenței locale de accelerare.

Mărirea vitezei turbulente de ardere duce la o deplasare în amonte a frontului de flacără unde, datorită conicității, viteze axiale sunt mai mari și deci efectul Karlowitz este mai intens. Rezultă, în cascadă, o mărire a turbulenței și a vitezei de ardere, și o continuă deplasare spre amonte a frontului de flacără. Sistemul fiind stabil, dovedit experimental, frontul de flacără se stabilizează pe o anumită cotă axială de la intrare în tubul conic. Pe măsură ce temperatura pereților tubului crește, ca urmare a transferului de căldură de la frontul de flacără la perete, frontul de flacără se retrage și, la o temperatură a peretelui egală cu temperatura de autoaprindere a amestecului combustibil, frontul de flacără se va stabili lipit de perete, pe un diametru coresunzător noilor condiții de stabilizare. Fenomenele se succed în foarte scurt timp, datorită vitezelor mari de curgere și transferurilor foarte intense de căldură, de ordinul secundelor, astfel că experimental, în această fază de cercetări experimentale, fazele de aprindere și stabilizare nu pot fi detaliate.

Ceea ce se constată experimental este că la câteva secunde după aprinderea inițială procesul de ardere se stabilizează la o anumită cotă axială a tubului conic, adică pe un anumit cerc de periferie a conului, și rămâne stabilă în continuare pe aceeași poziție. Datorită geometriei conice a focarului, stabilizarea frontului de flacără se face autoreglat pe diverse diametre ale tubului conic. Dacă viteza amestecului combustibil este mică, diametrul de acroșare va fi mic, flacără axial mai apropiată de secțiunea de intrare. Dacă debitul este mai mare, diametrul de acroșare va fi mare, flacără axial mai depărtată de secțiunea de intrare.

Aici trebuie relevată caracteristica deosebită a focarului tunel conic, de a produce o autostabilizare a flăcării. Prin comparație, focarul tunel cilindric nu poate produce o autostabilizare deoarece, în momentul apariției intensificării turbulenței de tip Karlowitz și a măririi puternice a vitezei de ardere turbulente, frontul de flacără se deplasează în amonte fără nici o limită, ajungând la secțiunea de intrare, unde obligatoriu există o diafragmă de oprire pentru ca returnul de flacără să nu se propage spre camera de omogeneizare.

Unghiul de conicitate al focarului tunel conic este limitat de unghiul de desprindere a jetului axial liber (max.  $12^\circ$ ). Dacă unghiul este mai mare se formează periferic o recirculație de tip Craya-Courtet, care va produce o stabilizare de ardere prin recirculație și nu prin efect Karlowitz. Cu cât unghiul de desprindere va fi mai mare, cu atât fenomenul de stabilizare se va apropia mai mult de situația stabilizării în focare largi, cu viteze de ardere mai reduse și încărcări termice mai reduse ale camerei de ardere.

## INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală realizată în Laboratorul de Termotehnică al Facultății de Instalații a avut următorii parametri de execuție:

- diametrul tubului de aducțiune al amestecului combustibil: 6 mm;
- conicitatea tubului focar conic:  $12^\circ$ ;
- materialul refractar al tubului conic: fibră ceramică cu liant refractar;
- combustibil: gaz natural G20;
- dozaj: stoichiometric;
- debitul de combustibil gazos: 20 l/h;
- puterea focarului: 650 W.

În prima fază a cercetărilor s-a urmărit stabilirea câmpului de temperaturi în interiorul focarului tunel conic, ceea ce furnizează informațiile de bază privind stabilizarea frontului de flacără, viteza de ardere, încărcarea specifică a secțiunii de ardere.

Au fost experimentate două valori de încărcare termică a tubului conic:

- combustibil gazos 20 l/h – 650 W
- combustibil gazos 10 l/h – 320 W

Datele experimentale sunt prezentate în tabelul 1.



Tabelul 1

Date experimentale de funcționare a focarului tunel conic(Daer = 2000 l/h, $\alpha = 1$ )													
	R=12	R=10	R=8	R=6	R=4	R=2	R=0	R=2	R=4	R=6	R=8	R=10	R=12
H=5				20	20	20	20	20	20	20			
H=10			70	90	70	90	70	90	70	90	70		
H=15			590	830	803	860	783	860	807	830	590		
H=20			1010	1160	1400	1430	1450	1430	1400	1160	1010		
H=25		1050	1340	1440	1540	1580	1600	1580	1540	1440	1340	1050	
H=30		930	1180	1380	1500	1550	1560	1550	1500	1380	1180	930	
H=35		730	1050	1260	1440	1490	1530	1490	1440	1260	1050	730	
H=40	620	920	1220	1390	1460	1500	1530	1500	1460	1390	1220	920	620

Din valorile experimentale rezultă configurația frontului de flacără și configurația zonei de terminare a arderii prezentate în figura 2.

Se remarcă în primul rând intensificarea foarte mare a procesului de ardere, conturul de aprindere fiind situat la o cotă de 15 mm de la admisia amestecului combustibil în focar. Pe peretele tubului conic apare o scădere a temperaturii sub limita de aprindere din cauza efectului de perete rece. La distanța de cca 2 mm de la perete (ceea ce coincide cu grosimea minimă de aprindere) temperatura crește la nivelul temperaturii de aprindere. Se observă o zonă relativ plată de temperaturi de 800 °C pe secțiunea tubului, ceea ce arată că aprinderea se face pe un front plan de flacără.

Explicația acestei forme specifice de front de flacără este dată de forma conică a tubului, formă care face ca jetul de amestec combustibil să aibă viteze mai

reduse în centrul tubului și deci flacăra, în loc să fie ascuțită central, ca la tuburile cilindrice, este aplatisată. Prezența pe o secțiune plată a frontului de flacără este o indicație destul de clară că egalitatea dintre viteza de ardere și viteza de înaintare se produce pe o secțiune plată. Fenomenul contribuie la obținerea de încărcări termice foarte mari la acest tip de focar. Pentru focarul experimentat pe secțiunea de stabilizare de 1,2 cm<sup>2</sup> și un debit de amestec combustibil de 2200 dm<sup>3</sup>/h rezultă o viteză de înaintare, egală cu viteza de ardere, de 5,09 m/s. Față de viteza normală de ardere stoichiometrică a metanului,  $u_0 = 0,36$  m/s, rezultă o intensificare a procesului de ardere de 14 ori, ceea ce este o cifră normală pentru ardere în focare tunel.

Pentru verificarea repetabilității proceselor și la debite, respectiv viteze, mai mici ale amestecului combustibil, s-a experimentat focarul conic la un debit de două ori mai mic decât cel anterior.

Datele experimentale sunt prezentate în tabelul 2.

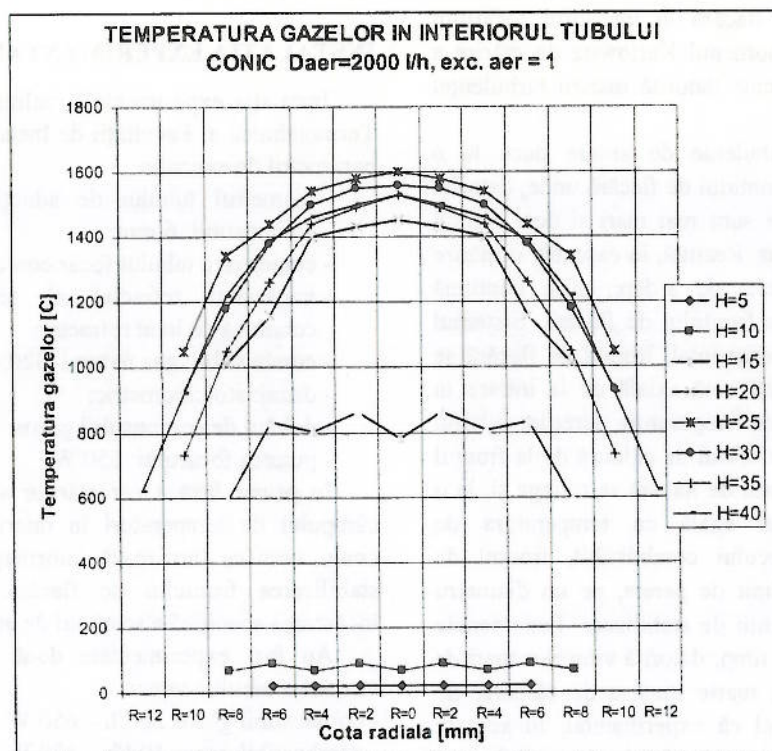


Fig.2. Câmpul de temperaturi în focarul tunel conic – debit mare.

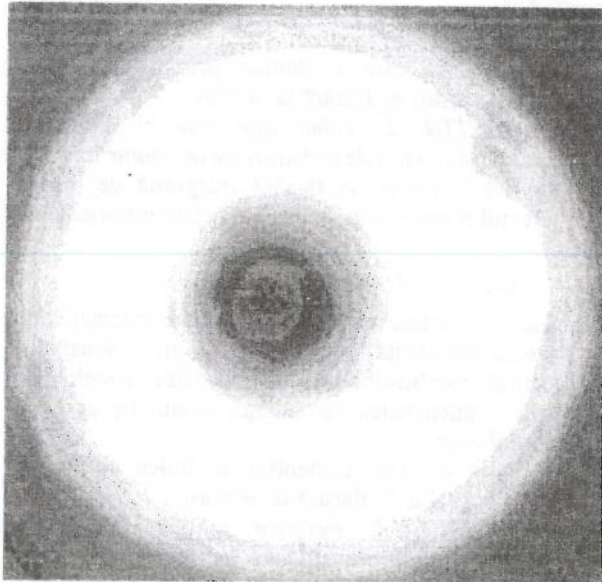


Fig. 3. Spectru de culoare ardere în focar conic.

**Tabelul 2**

**Date experimentale de funcționare a focarului tunel conic ( $Da_{er} = 1000 \text{ l/h}, \alpha = 1$ )**

	R=12	R=10	R=8	R=6	R=4	R=2	R=0	R=2	R=4	R=6	R=8	R=10	R=12
H=5				20	20	20	20	20	20	20			
H=10			80	80	80	80	70	80	80	80	80		
H=15			730	780	820	820	844	820	820	780	730		
H=20			1030	1230	1320	1400	1430	1400	1320	1230	1030		
H=25		980	1120	1280	1390	1430	1460	1430	1390	1280	1120	980	
H=30		1120	1300	1390	1440	1460	1440	1460	1440	1390	1300	1120	
H=35		810	1010	1250	1330	1390	1440	1390	1330	1250	1010	810	
H=40	600	730	930	1070	1200	1300	1360	1300	1200	1070	930	730	600

Rezultatele sunt prezentate în diagramele din figura 4

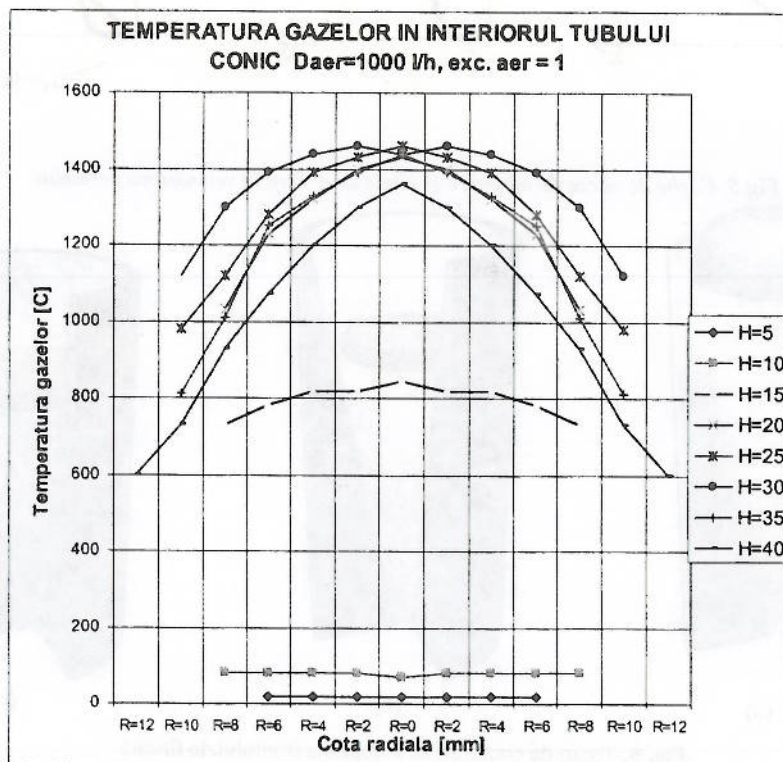


Fig.4. Câmpul de temperaturi în focarul tunel conic - debit mic.



Rezultatele atestă același tip de proces, cu aceleași caracteristici de stabilitate și intensificare a procesului de ardere.

Pe baza rezultatelor experimentale se poate deduce procesul fizic de stabilizare a arderii în focarul tunel conic.

**PROCESUL DE STABILIZARE A FRONTULUI DE FLACĂRĂ.**

**MOMENTUL 1. Tubul este rece și amestecul combustibil este aprins din exterior.**

Frontul de flacără se retrage în tub deoarece sunt condiții de retur de flacără, adică în secțiune există cel puțin un contur pe care viteza de ardere turbulentă a flăcării libere  $u_T$  este mai mare decât viteza de înaintare a amestecului combustibil  $w$  pe conturul respectiv.

Gradientul vitezei de înaintare a amestecului combustibil în vecinătatea peretelui poate fi acceptat liniar cu relația:

$$g_T = 0,023 w_m^{1,8} v^{0,8} / D^{0,2} ;$$

Gradientul vitezei turbulente de ardere are două domenii:

- lângă perete, pe o distanță denumită distanța de stingere a peretelui,  $u_0 = 0$  și implicit  $u_T = 0$ ;
- dincolo de distanța de stingere a peretelui viteza de ardere variază cu temperatura după relația exponențială  $(u_{T1} / u_{T2}) = (u_{01} / u_{02}) = (T_1 / T_2)^{1,4}$ .

Curbele de variație ale celor două viteze lângă perete sunt ilustrate în figura 5.

În figura 6a este evidențiat primul contur de acroșare a frontului de flacără la  $w = u_T$ .

**MOMENTUL 2. Tubul este rece și amestecul combustibil are condiții de stabilizare pe un contur interior.**

Datorită condiției de flacără mărginită de pereți, apare efectul Karlowitz de mărire a vitezei turbulente de ardere:

$$u_{TK} / u_T = [\varepsilon + 1/1,74 (\rho_1 - \rho_2) / \rho_2 u_0] / \varepsilon$$

unde  $u_{TK}$  este viteza turbulentă de ardere intensificată;  $u_T$  - viteza turbulentă de ardere liberă;  $\rho_1$  - densitatea amestecului combustibil;  $\rho_2$  - densitatea gazelor de ardere;  $\varepsilon$  - intensitatea turbulenței jetului de amestec combustibil rece.

În figura 6b este evidențiat al doilea contur de acroșare a frontului de flacără la  $w = u_{TK}$ .

**MOMENTUL 3. Peretele tubului este cald, datorită transferului de căldură de la flacără, cu o temperatură peste temperatura de autoaprindere a amestecului combustibil metan-aer, 780 °C, și amestecul combustibil are condiții de stabilizare pe un contur interior lipit de perete.** În aceste condiții la fenomenul de stabilizare prin egalitatea vitezei de înaintare și vitezei de ardere se adaugă fenomenul de stabilizare pe perete cald de aprindere.

În figura 6c este evidențiat al treilea contur de acroșare a frontului de flacără, lipit de perete.

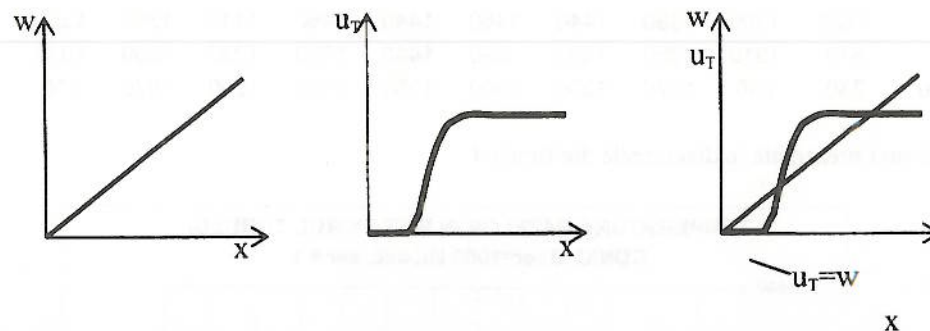


Fig. 5. Curbe de viteze de înaintare și viteze de ardere în vecinătatea peretelui.

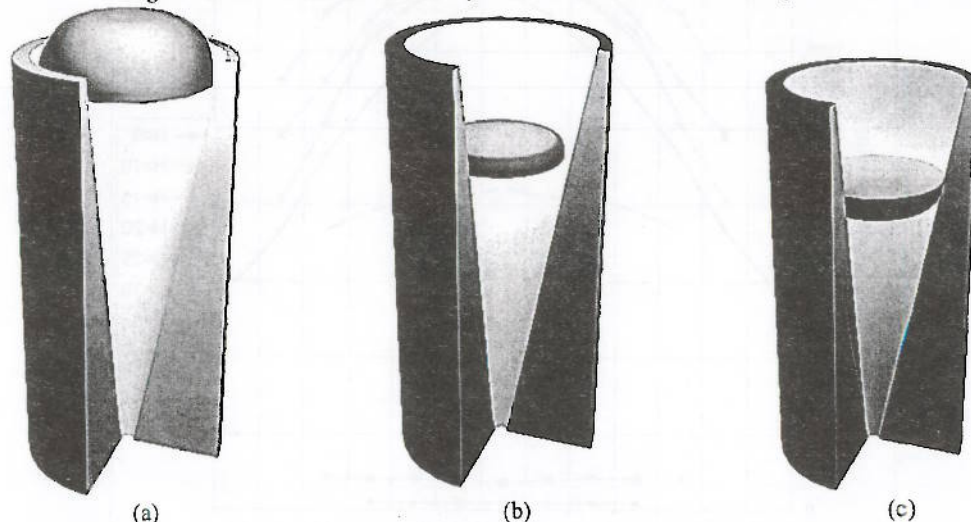


Fig. 6. Tipuri de contururi de acroșare a frontului de flacără.



## CIFRE CARACTERISTICE – CALITĂȚILE FOCARULUI TUNEL CONIC

Intensificarea mare a procesului de ardere în tubul focar conic face ca viteza de ardere să ajungă la valori foarte mari, de ordinul 5 m/s. Incărcarea termică pe secțiune este în aceste condiții  $q_s = 18 \text{ MW/m}^2$ .

Aprinderea focarului tubular conic se face foarte stabil deoarece forma conică face să apară condiții foarte stabile de aprindere într-o anumită secțiune, ceea ce nu se întâmplă la nici un alt tip de focar, totdeauna fiind necesari stabilizatori.

Se obține o flacără plană, deosebit de stabilă. Practic nu sunt posibile returnările de flacără caracteristice focarelor tunel cilindrice unde este necesară o diafragmă de intrare pentru limitarea returnului la secțiunea inițială.

Forma conică a tubului focar face posibilă o plajă de variație de sarcină foarte mare, practic egal cu raportul dintre suprafața de ieșire a tubului conic raportat la suprafața tubului de intrare a amestecului combustibil. Astfel de plaje de variație a sarcinii nu se întâlnesc la nici un focar (indicii uzuali sunt de 2 pentru focare clasice și 5 pentru focarele ciclon).

Pierderile de sarcină ale focarului sunt relativ mici, față de focarele tunel cilindrice, datorită micșorării vitezei de curgere în porțiunile evazate ale focarului.

## CONCLUZII

Arderea în focare tunel conice aduce importante perfecționări la tehnica arderii în tunele înguste, unde intensificarea procesului de ardere se face preponderent prin autoturbulizarea flăcării în frontul de ardere. Perfecționarea principală a acestui nou sistem de ardere

consistă în autoreglajul stabilizării frontului de flacără într-un domeniu foarte larg de viteze și dozaie ale amestecului combustibil, frontul de flacără având posibilitatea să se acroșeze la diferite distanțe de duza de intrare, respectiv la diferite secțiuni ale tubului conic. Decurge din aceasta și avantajul de a avea căderi de presiune mult mai mici în arzător deoarece, după frontul de flacără gazele de ardere se încetinesc progresiv.

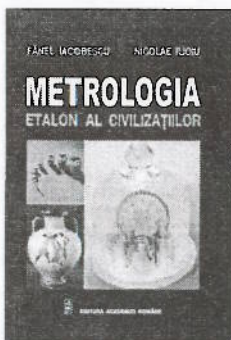
Aplicarea tehnică a focarului tunel conic este deosebit de largă datorită gabaritelor mici, ca urmare a încărcărilor termice foarte mari, datorită plajei foarte largi de stabilitate și datorită costului redus ca urmare a simplității constructive.

Preconizăm primele aplicații la focare de cazane, la focare pentru cuptoare sau alte instalații tehnologice și, în special, datorită rapidității de răspuns, chiar la camere de ardere pentru turbine de gaze.

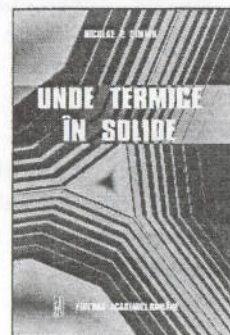
## BIBLIOGRAFIE

- [1] ANTONESCU N., STĂNESCU P.D., ANTONESCU N.N., *Procese de ardere - Bazele fizice și experimentale*, Editura MATRIX, București, 2003.
- [2] ANTONESCU N., *Ardere și depoluare în procese de ardere*, Edit. UTC, 1996.
- [3] ANTONESCU N., *Arderea cu stabilizare periferică în focarele tunel. Studii și Cercetări de Energetică* (Edit. Academiei) XII, ser.B, nr.4, p. 416–434.
- [4] ANTONESCU N., *Calculul procesului de ardere și al vitezei de ardere în focarul tunel. Studii și Cercetări de Energetică* (Edit. Academiei) XIII, ser.B, nr.2, p. 217–225.
- [5] ANTONESCU N., *Unele aspecte privind calculul și îmbunătățirea funcționării focarelor tubulare*. *ENERGETICA*, XI, nr.10, p. 504–509.

## NOI APARIȚII LA EDITURA ACADEMIEI ROMÂNE



- Fănel IACOBESCU, Nicolae ILIEȘIU  
Metrologia – etalon al civilizațiilor  
416 p., 200 000 lei/ex.



- Nicolae P. SIMION  
Unde termice în solide  
232 p., 70 000 lei/ex.