

Controlul arderii

(note de curs)

Cuprins

Cuprins	2
1.1 Generalitati	3
1.2 Controlul analitic-experimental. Analizorul pentru analiza gazelor de ardere ..	3
1.2.1 Realizarea măsurărilor	7
1.2.2 Realizarea calculelor	9
1.3 Controlul grafic-experimental	12
1.4 Diagrama entalpie-temperatură (h-t)	16
Referințe bibliografice	23

1.1 Generalitati

Arderea este un proces fizico-chimic extrem de complex, care depinde de condițiile în care se desfășoară, de natura combustibilului, de caracteristicile consumatorului de căldură și de alți factori, fiind practic imposibilă o ardere perfectă. Gradul în care se apropie însă de perfecțiune, este determinat prin controlul arderii. Controlul arderii nu se poate realiza fără determinarea experimentală a compoziției gazelor de ardere și prin determinarea analitică sau grafică a coeficientului excesului de aer. Totodată, în această etapă se apreciază și randamentul arderii.

Pe baza constatărilor efectuate se pot stabili măsuri în vederea îmbunătățirii, sau optimizării procesului de ardere.

De exemplu, absența carbonului și a oxidului de carbon din gazele de ardere denotă o ardere perfectă, dar prezența acestor elemente indică imperfecțiuni. Prezența unor elemente combustibile în gazele de ardere, chiar în proporții reduse, indică o ardere imperfectă din punct de vedere chimic.

Experimental, s-a constatat că prin controlul excesului de aer, de exemplu, se poate îmbunătăți calitatea procesului de ardere.

Compoziția gazelor de ardere se verifică experimental, prin prelevarea unor probe de gaze arse. Pe conducta de legătură dintre priza de prelevare a sondei de gaze arse și aparatul care efectuează o analiza chimică a compoziției, denumit *analizor de gaze*, se produce și condensarea vaporilor de apă conținuți de aceste gaze, odată cu răcirea gazelor.

Acesta este motivul pentru care se efectuează de fapt *analiza compoziției gazelor de ardere uscate*, de aceea, în relațiile de calcul se va asocia fiecărui element chimic indicele u.

1.2 Controlul analitic-experimental. Analizorul pentru analiza gazelor de ardere

Prin controlul analitic-experimental se urmărește determinarea experimentală a compoziției gazelor de ardere, după care pe baza rezultatelor experimentale se va efectua calculul analitic al coeficientului de exces de aer, și al celorlalte mărimi de interes.

Un analizor de gaze (Fig. 1) poate măsura concentrația gazelor de ardere și eficiența arderii având cel puțin trei senzori:

- senzorul de temperatură,
- senzorul de O₂
- senzorul de CO.



Fig. 1 Exemplu de analizor de gaze

Pe lângă aceștia, pentru o analiză mai detaliată a procesului de ardere, de obicei analizoarele de gaze de ardere mai au de obicei senzori pentru determinarea concentrației oxizilor de azot (NO_x) și dioxid de sulf (SO_2).

Cu aceste valori măsurate se pot calcula toate celelalte mărimi care apar în buletinul de analiză a gazelor de ardere din Fig. 2.

Mai jos sunt prezentate câteva exemple de buletine de analiză (Fig. 2), furnizate de analizorul de gaze, rezultate în urma analizei gazelor de ardere rezultate în urma arderii gazului metan și a lemnului pentru trei cazuri diferite de instalații de ardere.

COMBUSTIBIL Gaz metan	COMBUSTIBIL Gaz metan	COMBUSTIBIL Lemn
O ₂ 3.0 %	O ₂ 5.2 %	O ₂ 12.0 %
CO 0 ppm	CO+ 2.912 %	CO+ 0.048 %
t gaze 164 °C	t gaze 344 °C	t gaze 130 °C
CO ₂ 10.2 %	CO ₂ 8.9 %	CO ₂ 8.7 %
Pierd. 6.6 %	Pierd. 16.0 %	Pierd. 8.0 %
NO 44 ppm	NO 6 ppm	NO 18 ppm
SO ₂ 0 ppm	SO ₂ 0 ppm	SO ₂ 0 ppm
NO _x 45 ppm	NO _x 6 ppm	NO _x 18 ppm
Lambda 1.17	Lambda 1.33	Lambda 2.33
t aer 19.6 °C	t aer 28.9 °C	t aer 23.0 °C
dif t 144.4 °C	dif t 315.1 °C	dif t 107.0 °C
Tiraj -----mbar	Tiraj -----mbar	Tiraj -----mbar
Random 93.4 %	Random 84.0 %	Random 92.0 %
Pct c 55.1 °C	Pct c 52.5 °C	Pct c ----- °C
Ref O ₂ 3.0 %	Ref O ₂ 3.0 %	Ref O ₂ 3.0 %
t cazan 0 °C	t cazan 0 °C	t cazan 0 °C
indice f -----	indice f -----	indice f -----
Reziduu -----	Reziduu -----	Reziduu -----

a

b

c

Fig. 2 Exemple de buletine de analiză pentru gaze de ardere

În primul buletin de analiză a gazelor de ardere (Fig. 2a), se observă că concentrația de CO este 0, ceea ce este puțin probabil pentru cazul unei măsurări corecte. Acest buletin de analiză corespunde analizei gazelor de ardere pentru cazul unui cazan de apă alimentat cu gaz metan.

Al doilea buletin de analiză corespunde gazelor de ardere pentru cazul unui cazan de abur saturat alimentat cu gaz metan (Fig. 2b). Se observă că nivelul de CO este foarte ridicat, ceea ce indică o funcționare defectuoasă a acestuia. Totodată, se observă o valoare ridicată a temperaturii gazelor de ardere, ceea ce întărește concluzia de mai sus.

Al treilea buletin de analize (Fig. 2c) corespunde analizei gazelor de ardere unei centrale pe lemn.

Analizorul de gaze va analiza un volum V_g'' de gaze uscate de ardere, cunoscut. Volumele parțiale ale componentelor, satisfac în consecință relația:

$$V_{CO_{2u}} + V_{O_{2u}} + V_{CO_u} + V_{N_{2u}} + V_{SO_{2u}} = V_g''$$

Coeficientul de exces de aer se poate obține prin următoarea relație:

$$\lambda = \frac{L}{L - L_{ex}}$$

unde L_{ex} este aerul în exces.

Cantitatea de aer care a participat la procesul de ardere poate să fie determinată, neglijând azotul conținut de combustibil (datorită concentrației volumice foarte scăzute în majoritatea combustibililor), cunoscând participația volumică a azotului în aer (79 %) prin:

$$L = \frac{V_{N_2}}{0,79}$$

Dacă în gazele de ardere există oxigen, aceasta se poate explica fie prin arderea incompletă a carbonului (în cazul în care a fost furnizat doar aerul minim necesar arderii combustibilului), caz în care există și monoxid de carbon (CO), fie prin prezența aerului în exces. În consecință, cunoscând participația volumică a oxigenului în aer, se poate determina excesul de aer, utilizând relația:

$$L_{ex} = \frac{V_{O_2} - 0,5V_{CO}}{0,21}$$

Relația de calcul pentru valoarea coeficientului de exces de aer în funcție de concentrația volumică a componentelor din gazele de ardere se poate obține cu relația:

$$\lambda = \frac{\frac{V_{N_2}}{0,79}}{\frac{V_{N_2}}{0,79} - \frac{V_{O_2} - 0,5V_{CO}}{0,21}}$$

relație echivalentă cu:

$$\lambda = \frac{V_{N_2}}{V_{N_2} - 3,76(V_{O_2} - 0,5V_{CO})}$$

Dacă se împarte această relație la volumul de gaze uscate de ardere, analizat, se obține relația pentru calculul excesului de aer în funcție numai de participațiile volumice obținute experimental prin analiza compoziției chimice a gazelor de ardere, sub forma:

$$\lambda = \frac{(n_2)_u}{(n_2)_u - 3,76[(o_2)_u - 0,5(co)_u]}$$

Participația volumică a N₂ se poate calcula cu următoarea relație:

$$(n_2)_u = 1 - [(co_2)_u + (co)_u + (o_2)_u + (so_2)_u]$$

Laboratorul de combustie și instalații de ardere dispune de analizorul MAXILYZER NG. Pentru o mai bună înțelegere a modului în care funcționează analizoarele de gaze, în continuare sunt prezentate sub formă tabelară valorile măsurate și cele calculate care caracterizează analizorul de gaze MAXILYZER NG[1]:

Tabel 1. Capabilități analizor de gaze Maxilyzer NG

	Mărime	Explicație	Afișare
Valori măsurate	T gaze	Temperatura gazelor arse	°C - °F
	T aer	Temperatura aerului	°C - °F
	O ₂	Conținut oxigen în gazele de ardere	vol - %
	CO	Conținut monoxid de carbon	ppm-mg/m ₃ -mg/kWh-mg/MJ
	CO max	Conținut monoxid de carbon maxim	ppm - vol - %
	tiraj	Tiraj coș	hPa
	NO	Conținut monoxid de azot	ppm-mg/m ₃ -mg/kWh-mg/MJ
	SO ₂	Conținut dioxid de sulf	ppm-mg/m ₃ -mg/kWh-mg/MJ
	NO ₂	Conținut dioxid de azot	ppm-mg/m ₃ -mg/kWh-mg/MJ
	COhigh	Conținut monoxid carbon valori înalte	vol. - %
Valori calculate	CO ₂	Dioxid de carbon	vol. - %
	Randam.	Eficiența tehnică a sistemului de ardere	%
	Lambda	Excesul de aer	λ
	qA	Pierderi	%
	Pct.c	Punct de rouă specific combustibilului	°C - °F
	Dif.t	Temperatura diferențială (Tgaze – Taer)	°C - °F

	NOx	Oxid de azot	ppm-mg/m ³ -mg/kWh-mg/MJ
	EB	Emisii, referitor la conținutul de oxigen - numai în legătură cu combustibili solizi	ppm

Măsurarea temperaturii se realizează cu un termocuplu tip K (NiCr-Ni).

Măsurarea tuturor compuşilor rezultați în urma arderii se realizează cu ajutorul unor celule electrochimice.

Presiunea se măsoară cu un element piezorezistiv cu compensarea internă a temperaturii.

1.2.1 Realizarea măsurărilor

Gazele de ardere sunt prelevate cu ajutorul unei sonde extractive. Un volum reprezentativ din gazele de ardere este extras din gazele de ardere și este condus printr-un filtru și un separator de condens extern cu ajutorul unui dispozitiv de antrenare pentru gaze (ventilator) către senzori.

În filtru, gazele de ardere sunt curățate de eventualele particule existente în componența acestora. Odată cu răcirea gazelor de ardere are loc și condensarea vaporilor de apă din gazele de ardere când temperatura acestora scade sub temperatura punctului de rouă. Sensorii analizorului de gaze vor analiza astfel gazele de ardere uscate provenite din procesul de ardere.

După pornirea aparatului și a programului pentru măsurarea gazelor de ardere are loc de regulă o faza generală de calibrare automată.

Senzorul standard pentru CO cu compensarea dinamică de H₂ este protejat automat la atingerea limitei nominale de măsurare (>4.000 ppm) printr-o pompă de spălare separată. Astfel, se alimentează aer proaspăt, suficient din mediul ambiant, acestui senzor. Reluarea automată a măsurării are loc după scăderea valorilor sub pragul de 1.600 ppm. În timpul fazei active de spălare nu sunt influențate valorile rămase (în afara de CO).

În cazul în care concentrația volumică măsurată în gazele de ardere este foarte mică, se utilizează ca unitate de măsura ppm (parți pe milion) în loc de procent. O corespondența între acestea poate fi urmărită în Tabel 2.

Tabel 2. Corespondența ppm - %

0.001 ppm	0.0000001 %
1 ppm	0.0001%
100 ppm	0.01%
10000 ppm	1 %

1.2.1.1 Senzori electrochimici

În general, în cazul analizoarelor de gaze portabile, pentru măsurarea concentrației componentelor din gazele de ardere se utilizează senzori electrochimici. Aceștia sunt utilizați pentru determinarea concentrației de oxigen, monoxid de carbon, dioxid de sulf și oxizi de azot.

Senzorii electrochimici sunt compuși din doi sau trei electrozi, (numărul acestora depinzând de componența din gazele de ardere măsurată) care sunt imersați într-o soluție electrolică apoasă. Senzorii sunt sigilați la exterior cu o membrană permeabilă pentru gaze.

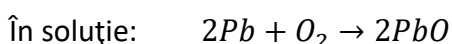
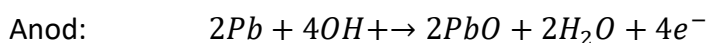
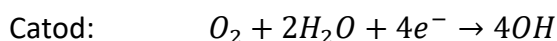
1.2.1.2 Senzorul electrochimic pentru măsurarea concentrației de oxigen - cu doi electrozi

Moleculele de oxigen din gazele de ardere trec prin membrană și ajung în zona catodului senzorului. Datorită compoziției materialelor din catod, au loc reacții chimice având ca rezultat eliberarea de ioni de OH de la catod. Ionii liberi migrează prin electrolitul lichid până la anodul senzorului generând astfel un curent electric în circuitul electric extern, care este proporțional cu concentrația de oxigen măsurată în gazele de ardere (Fig. 3).

Acest curent creează o cădere de tensiune pe rezistorul R, care este de fapt semnalul de măsurare care este folosit pentru procesarea electronică.

Rezistorul este un termistor cu un coeficient de temperatură negativ, NTC. El servește pentru a compensa influențele de temperatură și, prin urmare, asigură o performanță stabilă pentru senzorul termic.

Reacțiile chimice din corpul senzorului sunt [2]:



Datorită faptului că, chiar și în perioada de nefuncționare a senzorului, acesta este expus în aer, care conține oxigen, reacțiile chimice nu pot fi oprite, ceea ce duce la o durată de viață de aproximativ 3 ani, sau chiar mai puțin, chiar și dacă analizorul de gaze nu este utilizat.

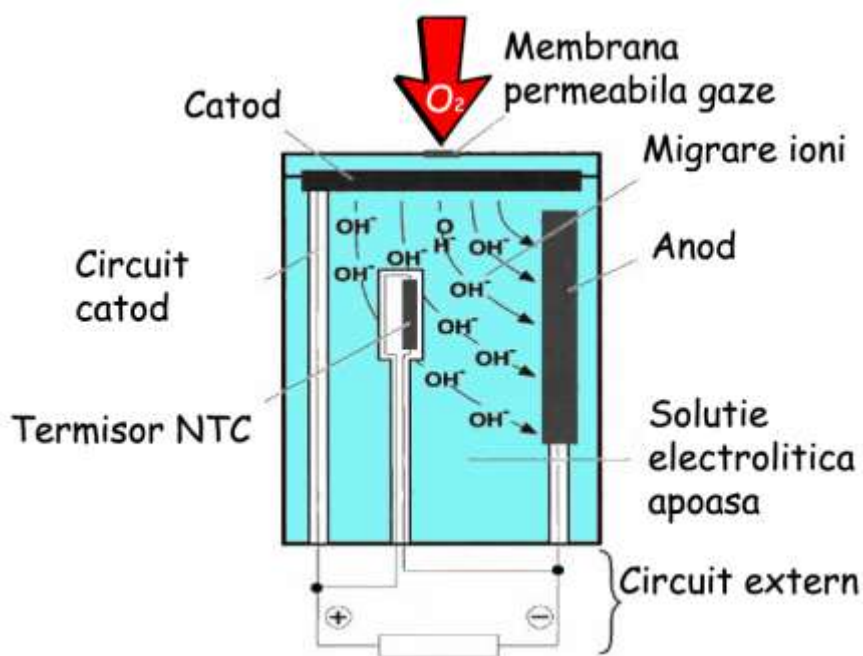


Fig. 3 Principiu funcționare senzor oxigen, după [2]

1.2.1.3 Senzori electrochimici pentru măsurarea concentrației de CO, SO₂ și NO_x

Pentru a determina concentrația unor gaze din gazele de ardere cum ar fi CO, SO₂ sau NO_x, se utilizează senzori cu trei electrozi.

Principiul de funcționare este explicat în cele ce urmează cu ajutorul senzorului de CO, ca de exemplu, (Fig. 4).

Moleculele de monoxid de carbon (CO) trec prin membrana permeabilă pentru gaz către electrodul de detectare al senzorului. În această zonă are loc o reacție chimică, care are ca rezultat formarea de ioni pozitivi de hidrogen care migrează din electrodul de detectare către un contraelectrod.

În zona contraelectrodului are loc o a doua reacție chimică cu ajutorul oxigenului furnizat de aer curat. Această a doua reacție produce un curent care va circula în circuitul exterior. Intensitatea acestui curent electric depinde de concentrația de monoxid de carbon din gazele de ardere. Electrocul de referință este utilizat pentru stabilizarea semnalului senzorului.

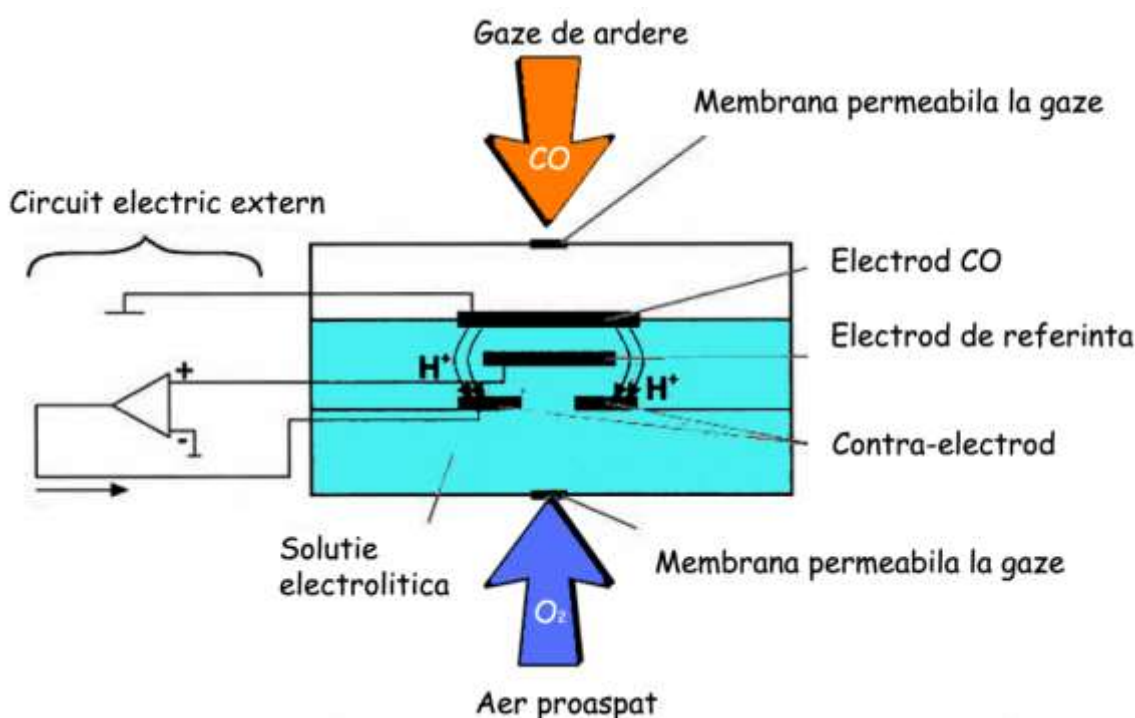
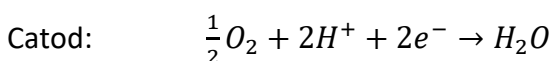
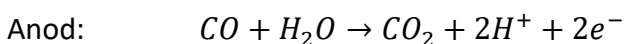


Fig. 4 Principiu funcționare senzor CO, după [2]

Reacțiile chimice din corpul senzorului sunt [2]:



Acest tip de senzor are o durată de viață de aproximativ 2 ani.

1.2.2 Realizarea calculelor

1.2.2.1 Calculul valorii de CO₂

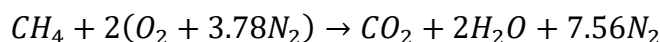
$$CO_2 = CO_{2max} \times \frac{21 - O_2}{21} \quad [\%]$$

unde CO_{2max} reprezintă valoarea maximă de CO_2 specifică fiecărui combustibil, în %, O_2 reprezintă conținutul de oxigen măsurat în gazele de ardere, în %, 21 reprezintă participația volumică de oxigen în aer, în %.

Un calcul rapid pentru evaluarea valorii maxime a dioxidului de carbon, pentru diverse tipuri de hidrocarburi, se poate realiza cu următoarea relație:

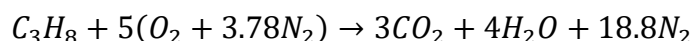
$$CO_{2max} = \frac{\text{Nr. de molecule de } CO_2 \text{ rezultate la arderea completă a comb.}}{(\text{Nr. molecule } CO_2 + \text{Nr. molecule } N_2) \text{ din produsii de reacție}}$$

Exemplu: a) arderea metanului



$$CO_{2max} = \frac{1}{1 + 7.56} = 11.74\% \sim 11.8\%$$

b) arderea propanului



$$CO_{2max} = \frac{3}{3 + 18.8} = 13.76\% \sim 13.8\%$$

Tabel 3. Valoare maximă CO_2 pentru diverși combustibili

Combustibil	CO_{2max} [%]
Metan	11.8
Propan	13.8
GPL	13.9
Butan	13.9
Motorină	15.1
CLU	15.8
Ulei combustibil	15.7
Lemn	19.7
Antracit	19.1
Lignit	18.4

1.2.2.2 Calculul pierderilor pentru combustibili lichizi și gazoși

În cazul în care se măsoară concentrația de oxigen din gazele de ardere (marea majoritate a analizoarelor de gaze măsoară concentrația de oxigen), relația pe care o utilizează analizorul de gaze poate fi:

$$qA = (T.Gas - T.Luft) \times \left(\frac{A1}{21 - O_2} + B \right) \text{ [%]}$$

În cazul în care se măsoară concentrația de dioxid de carbon din gazele de ardere, relația de calcul pentru determinarea acestuia este:

$$qA = (T. Gas - T. Luft) \times \left(\frac{A2}{CO_2} + B \right) \text{ [%]}$$

unde $T. Gas$ reprezintă temperatura gazelor de ardere, în °C,

$T. Luft$ reprezintă temperatura aerului, în °C,

$A1, A2, B$ reprezintă constante specifice fiecărui combustibil și derivă din compoziția chimică a combustibilului (constantele lui Siegert).

Tabel 4. Constantele specifice pentru diverși combustibili lichizi și gazoși

Combustibil	A1	A2	B
Gaz natural	0.66	0.38	0.01
Propan	0.63	0.42	0.008
Ulei combustibil	0.68	NA	0.007
GPL	0.63	NA	0.008
Motorină	0.68	0.5	0.007
CLU	0.68	0.52	0.007

1.2.2.3 Calculul pierderilor pentru combustibili solizi

$$qA = f \times \frac{(T. Gas - T. Luft)}{CO_2}$$

Tabel 5. Constanta specifică pentru diverși combustibili solizi

Combustibil	f
Lemn	0.74
Briquete de cărbune	0.75
Cărbune brun	0.9
Antracit	0.6

1.2.2.4 Calculul excesului de aer

$$\lambda = \frac{CO_{2max}}{CO_2} = \frac{21}{21 - O_2}$$

1.2.2.5 Calculul randamentului

$$\eta = 100 - qA \text{ [%]}$$

1.2.2.6 Conversia din ppm în mg/m³

În marea majoritate a cazurilor, analizoarele de gaze furnizează informații despre concentrațiile de compuși măsurate din punct de vedere volumic, utilizând ca unitate de măsură ppm (părți pe milion).

O conversie a acestei mărimi de măsură din punct de vedere volumic în mărimi masice poate fi realizată cu următoarea relație:

$$M = V \times \frac{Mg}{22.414} \left[\frac{mg}{m^3} \right]$$

unde V reprezintă concentrația volumică de substanță, în ppm;

M_g este Masa Molară a substanței, în g/mol;

Tabel 6. Conversia din ppm în mg/m³

0°C	101325 Pa
1 ppm	$\frac{mg}{m^3}$
C	0.54
CO	1.25
CO ₂	1.96
NO	1.34
NO ₂	2.05
NO _x	2.05
HCl	1.63
HF	0.89
H ₂ S	1.52
NH ₃	0.76
SO ₂	2.86
SO ₃	3.57
CH ₄	0.72

1.3 Controlul grafic-experimental

Prin controlul grafic-experimental al arderii, se înțelege stabilirea experimentală a compoziției gazelor de ardere, urmată de determinarea grafică a coeficientului de exces de aer, precum și a dioxidului de carbon din gazele de ardere.

Pentru fiecare tip de combustibil a fost trasată câte o diagramă care permite stabilirea pe cale grafică a unei legături între compoziția chimică a gazelor de ardere și excesul de aer corespunzător acelei compoziții. Această diagramă poartă denumirea de triunghiul arderii, sau diagrama Ostwald.

Compoziția gazelor de ardere pentru orice proces de ardere este caracterizată printr-un punct care se găsește în interiorul triunghiului arderii (Fig. 5).

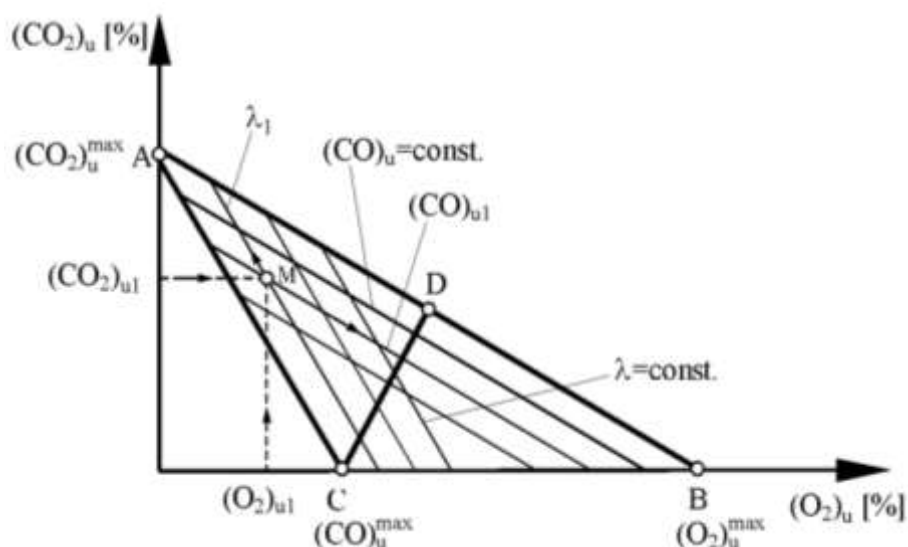


Fig. 5 Triunghiul arderii / Diagrama Ostwald [3]

Pe abscisă este reprezentată participația volumică a O_2 din gazele de ardere, iar pe ordonată participația volumică a CO_2 .

Pe această diagramă există patru puncte care caracterizează limitele între care poate exista o compoziție a gazelor de ardere.

Punctul A din Diagrama Ostwald (Fig. 5) reprezintă cazul arderii teoretice perfecte, complete fără exces de aer, arderea stoechiometrică ($\lambda=1$). Se observă în acest caz, că în gazele de ardere nu există O_2 , iar CO_2 are valoarea maximă.

Punctul B reprezintă cazul arderii teoretice complete, cu exces de aer infinit. Se observă în acest caz, că în gazele de ardere există 21% O_2 , iar valoarea CO_2 tinde spre zero, datorită diluării cu aerul în exces.

Punctul C reprezintă cazul arderii teoretice incomplete fără exces de aer ($\lambda=1$) în care concentrația de oxigen în gazele de ardere este 0, iar concentrația de monoxid de carbon este maximă.

Punctul D reprezintă cazul arderii complete cu exces de aer și se găsește la intersecția dintre dreapta AB și perpendiculara ridicată din punctul C pe AB.

În Fig. 5 se observă că arderea completă o regăsim pe dreapta AB, pentru diferiți coeficienți de exces de aer. Dreapta AB corespunde unei concentrații volumice de CO egală cu zero.

Analizele gazelor de ardere se pot verifica prin utilizarea unei asemenea diagrame pentru un anumit tip de combustibil, verificându-se poziția unui punct corespunzător acelor rezultate pe diagrama Ostwald.

O analiză corectă a gazelor de ardere cu ajutorul unui analizor de gaze trebuie efectuată prin medierea rezultatelor mai multor măsurări (și eliminarea acelor care sunt departe de această medie), pentru a exclude posibilitatea măsurării eronate a acestora (de exemplu, sonda de prelevare a probei nu a fost ventilată bine înaintea măsurărilor).

De exemplu, în cazul în care punctul care rezultă în urma măsurărilor, se găsește în mod repetat în afara triunghiului, atunci cu certitudine determinările experimentale sunt eronate, iar aparatul va trebui trimis pentru o verificare a stării tehnice a acestuia, eventual pentru o reetalonare.

Triunghiul arderii construit pentru gazul metan poate fi urmărit în Fig. 6.

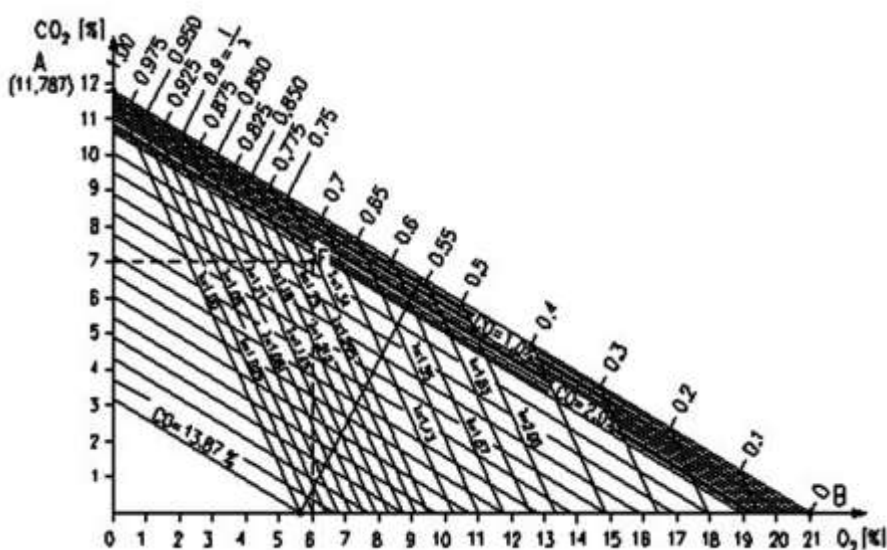


Fig. 6 Triunghiul arderii pentru gazul metan [4]

Calculul valorii maxime a concentrației de CO₂ pentru construcția diagramei Ostwald

Punctul A este situat pe ordonată la [3]:

$$y_A = (CO_2)_u^{\max} = \frac{V_{CO_2}^{\max}}{V_g^u} 100 \quad [\%]$$

unde $V_{CO_2}^{\max}$ este volumul de CO₂ rezultat la ardere completă a unității de combustibil.

Pentru combustibili solizi și lichizi

Volumul maxim de dioxid de carbon necesar pentru calculul punctului A de pe diagrama Ostwald, în cazul combustibililor solizi și lichizi, se poate calcula cu următoarea relație:

$$V_{CO_2}^{\max} = 1,867c \left[\frac{m_N^3}{kg} \right]$$

Volumul gazelor de ardere uscate, se poate calcula cu relația:

$$V_g^u = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} \left[\frac{m_N^3}{kg} \right]$$

unde volumele de dioxid de sulf și de azot se pot calcula cu relațiile de mai jos:

$$V_{SO_2} = 0,7s \left[\frac{m_N^3}{kg} \right]$$

$$V_{N_2} = 0,79 L_{\min} \left[\frac{m_N^3}{kg} \right]$$

Pentru combustibili gazoși

Volumul maxim de dioxid de carbon necesar pentru calculul punctului A de pe diagrama Ostwald, în cazul combustibililor gazoși, se poate calcula cu următoarea relație:

$$V_{CO_2}^{\max} = (co) + \sum m(c_m h_n) + (CO_2) \left[\frac{m_N^3}{m_N^3} \right]$$

iar volumul gazelor de ardere uscate, cu relația:

$$V_g^u = V_{CO_2} + (n_2) + V_{N_2} \left[\frac{m_N^3}{m_N^3} \right]$$

Calculul valorii maxime a concentrației de CO pentru construcția diagramei Ostwald

Dreptele paralele cu AB, reprezintă drepte de concentrație de CO constantă. Valoarea CO va fi crescătoare între dreapta AB și origine. Valoarea maximă a concentrației volumice de CO în gazele de ardere se obține pentru dreapta paralelă cu AB și care trece prin punctul C (Fig. 5), care se calculează cu relația [3]:

$$(O_2)_u^{CO} = \frac{V_{O_2}^{CO}}{V_g^{CO}} 100 \quad [\%]$$

Pentru combustibili solizi și lichizi

Volumul maxim de monoxid de carbon necesar pentru calculul punctului C de pe abscisă, pe diagrama Ostwald, în cazul combustibililor solizi și lichizi, se poate calcula cu următoarea relație:

$$V_{O_2}^{CO} = 0,2I \left(L_{\min} - \frac{1}{0,21} \frac{22,414}{2 \cdot 12} c \right) \left[\frac{m_N^3}{kg} \right]$$

iar volumul gazelor de ardere uscată, se poate calcula cu relația:

$$V_g^{CO} = 1,867c + 0,7s + 0,79 L_{\min} \left[\frac{m_N^3}{kg} \right].$$

Pentru combustibili gazoși

Volumul maxim de monoxid de carbon necesar pentru calculul punctului C de pe abscisă, pe diagrama Ostwald, în cazul combustibililor gazoși, se poate calcula cu următoarea relație:

$$V_{O_2}^{CO} = 0,2I \left[L_{\min} - \frac{1}{0,21} \sum \left(\frac{m}{2} + \frac{n}{4} \right) (c_m h_n) \right] \left[\frac{m_N^3}{m_N^3} \right],$$

iar

$$V_g^{CO} = \sum m(c_m h_n) + (CO) + (CO_2) + 0,79 L_{\min} \left[\frac{m_N^3}{m_N^3} \right].$$

Dreapta CA corespunde valorii coeficientului de exces de aer $\lambda=1$. Dreptele paralele cu aceasta, reprezintă drepte de $\lambda = \text{constant}$. Valoarea coeficientului de exces de aer va fi crescătoare între dreapta CA și dreapta care este paralelă cu aceasta și care trece prin punctul B.

Diagrama de ardere se construiește pentru fiecare tip de combustibil care are o anumită compoziție gravimetrică sau volumetrică. Dacă se schimbă valoarea compoziției unui singur element care participă în procesul de ardere, triunghiul arderii nu mai este valabil.

Acesta este motivul pentru care diagrama Ostwald, se construiește pentru combustibili ale căror compoziții rămân constante în timp, cum ar fi combustibilii lichizi și gazoși.

În cazul combustibililor solizi nu se recomandă trasarea unui asemenea triunghi, deoarece compoziția variază în timp (de ex: umiditatea higroscopică scade în timp, ceea ce duce la variația valorilor concentrațiilor tuturor celorlalte elemente).

Avantajele utilizării acestei diagrame este că pe lângă faptul că se poate verifica rapid calitatea arderii, utilizând această diagramă se poate verifica mai ales starea calității măsurărilor efectuate cu un analizor de gaze.

În urma analizei compoziției gazelor de ardere se obține un punct care definește procesul respectiv de ardere, iar acel punct trebuie să se găsească întotdeauna în interiorul triunghiului arderii, sau la limită pe dreapta AB.

De regulă, din analiza compoziției gazelor de ardere se va determina participația volumică a oxigenului, și a monoxidului de carbon. Urmează identificarea pe triunghiul arderii a punctului care corespunde condițiilor în care are loc arderea în instalația analizată, având ca și coordonate aceste mărimi. După aceasta, se poate determina grafic participația dioxidului de carbon, respectiv valoarea coeficientului de exces de aer.

Cunoscând poziția punctului caracteristic arderii, se poate stabili direcția în care trebuie acționat pentru micșorarea concentrației de monoxid de carbon, prin asigurarea unei valori a excesului de aer, care să asigure în același timp și o temperatură acceptabilă a gazelor de ardere.

O diagramă Ostwald pentru un combustibil lichid ușor (CLU) poate fi observată în Fig. 7:

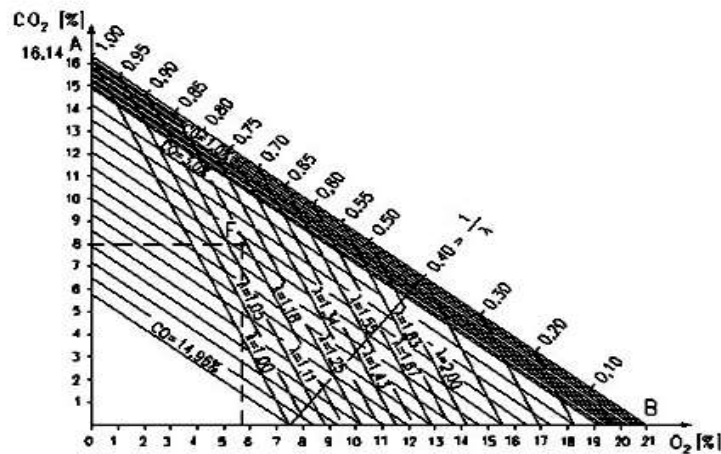


Fig. 7 Triunghiul arderii pentru CLU [4]

1.4 Diagrama entalpie-temperatură (h-t)

Legătura dintre cantitatea de căldură conținută în gazele de ardere și temperatura acestora este dată de diagrama entalpie-temperatură (h-t).

Diagrama entalpie-temperatură reprezintă graficul de variație a entalpiei gazelor rezultate din arderea unității de cantitate de combustibil, în funcție de temperatura acestora, și de coeficientul excesului de aer.

Dacă se cunoaște entalpia fiecărui component din gazele de ardere, entalpia gazelor de ardere se poate calcula cu relația:

$$h = h_{CO_2} + h_{H_2O} + h_{SO_2} + h_{N_2} + h_{aer}^{ex} \left[\frac{kJ}{kgcb} \right]$$

în care înlocuind entalpiile compuşilor din gazele de ardere se obține pentru combustibili solizi și lichizi:

$$h = V_{CO_2} c_{p_{CO_2}} t + V_{H_2O} (r_v + c_{p_{H_2O}} t) + V_{SO_2} c_{p_{SO_2}} t + V_{N_2} c_{p_{N_2}} t + (\lambda - 1) L_{min} c_{p_{aer}} t \left[\frac{kJ}{kgcb} \right]$$

unde c_p reprezintă căldura specifică volumică medie, la presiune constantă a fiecărui component în parte [kJ/(m³_N K)], în intervalul de temperaturi 0°C...t°C

V reprezintă volumul fiecărui component din gazele de ardere [m³_N/kgcb].

Trasarea diagramei entalpie-temperatură (h-t) se realizează prin puncte, pentru mai multe valori ale temperaturilor gazelor de ardere (t) și pentru diferite valori ale excesului de aer (λ).

Pentru un șir de valori ale temperaturii (t), se determină valorile căldurilor specifice medii utilizând diagrame, tabele sau relații de calcul.

Cunoscând compoziția gazelor de ardere, se pot calcula valorile entalpiilor (h) corespunzătoare, iar apoi prin puncte se trasează curbele obținute. Alura diagramei entalpie-temperatură (h-t) este prezentată în figura următoare.

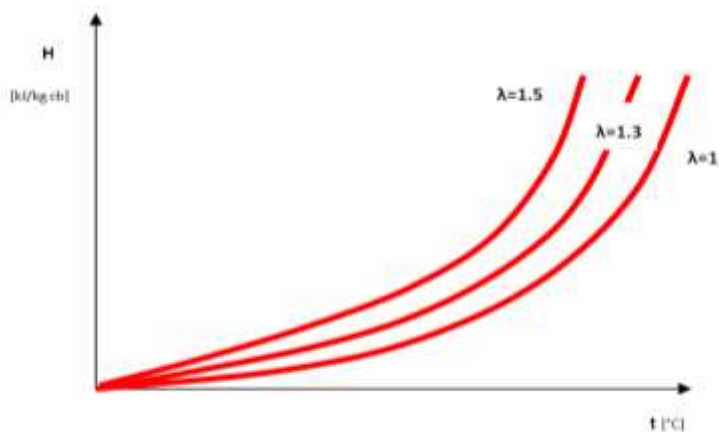


Fig. 8 Variația coeficientului de exces de aer în diagrama entalpie-temperatură pentru gazele de ardere

Experimental s-a constatat că determinarea compoziției gazelor de ardere are o importanță mult mai redusă decât determinarea temperaturii, astfel încât s-a putut realiza o singură diagramă H-t pentru toți combustibilii, indiferent dacă sunt solizi, lichizi sau gazoși, pentru determinarea entalpiei gazelor de ardere (H) fiind importanta doar cunoașterea temperaturii (t) și a excesului de aer (λ).

Compoziția gazelor de ardere are o importanță mult mai redusă datorită faptului că în acestea se găsește N_2 în proporție foarte mare (~80%), ceea ce face ca influența celorlalte elemente din gazele de ardere să fie relativ mică.

Anexa 1. Proprietăți gaze de ardere în condiții normale

Tipul de gaz	Azot N ₂	Dioxid de carbon CO ₂	Oxigen O ₂	Vapori de apa H ₂ O	Dioxid de sulf SO ₂	Aer uscat
Masa molară M [kg/kmol]	28.013	44.009	31.998	18.0153	64.059	28.963
Densitate normală ρ [kg/m ³]	1.25	1.977	1.429	0.804	2.931	1.293
Constanta de gaz perfect R [J/kgK]	296.66	187.63	259.58	461.5	125.56	287.1
Viscozitate dinamică μ [Pa s · 10 ⁵]	1.667	1.370	1.926	0.922	1.170	1.724
Constanta Sutherland C	102	270	126	961	306	-
Căldura specifică c J/kgK	1038.7	816.5	914.8	1492	1740	1004
Conductivitate termică λ W/mK	0.024	0.015	0.024	0.033	0.212	0.024

Anexa 2. Valori căldura specifică și entalpii gaze de ardere în funcție de temperatură, pentru produșii de reacție

(raportat la volumul gazelor)

	CO ₂		SO ₂		N ₂		H ₂ O		CO		O ₂		Aer umed	
	M=44 kg/kmol		M=64 kg/kmol		M=28 kg/kmol		M=18 kg/kmol		M=28 kg/kmol		M=32 kg/kmol		M=28.7 kg/kmol	
t	c _p	h	c _p	h	c _p	h	c _p	h	c _p	h	c _p	h	c _p	h
°C	$\frac{kJ}{m^3 K}$	$\frac{kJ}{m^3}$	$\frac{kJ}{m^3 K}$	$\frac{kJ}{m^3}$	$\frac{kJ}{m^3 K}$	$\frac{kJ}{m^3}$	$\frac{kJ}{m^3 K}$	$\frac{kJ}{m^3}$	$\frac{kJ}{m^3 K}$	$\frac{kJ}{m^3}$	$\frac{kJ}{m^3 K}$	$\frac{kJ}{m^3}$	$\frac{kJ}{m^3 K}$	$\frac{kJ}{m^3}$
0	1.399	0	1.733	0	1.294	0	1.493	0	1.298	0	1.306	0	1.32	0
100	1.7	170	1.813	181.3	1.296	129.6	1.507	150.7	1.302	130.2	1.319	131.9	1.325	132.5
200	1.788	357.6	1.868	377.6	1.298	259.6	1.524	304.8	1.306	261.3	1.336	267.2	1.33	266
300	1.853	539.9	1.953	586.6	1.306	391.5	1.541	462.2	1.313	394.4	1.357	404.1	1.343	402.9
400	1.903	772	2.012	807.2	1.315	525.9	1.566	626.3	1.327	530.9	1.377	551	1.35	540
500	1.989	991.1	2.06	1034.1	1.327	663.4	1.591	795.5	1.344	672	1.398	699.2	1.365	682.5
600	2.013	1225.9	2.114	1265.6	1.34	803.9	1.616	969.7	1.357	813.9	1.415	849.1	1.38	828
700	2.089	1462.4	2.152	1506.1	1.352	946.6	1.641	1148.9	1.373	961.3	1.436	1005.3	1.395	976.5
800	2.098	1678.1	2.181	1743.1	1.365	1091.9	1.666	1333.1	1.386	1108.7	1.449	1158.9	1.41	1124
900	2.169	1951.9	2.213	1993.3	1.377	1239.7	1.696	1526.1	1.398	1258.6	1.465	1318.8	1.425	1282
1000	2.202	2202.3	2.236	2235.8	1.39	1390	1.725	1725	1.411	1410.9	1.478	1477.9	1.435	1435
1100	2.236	2459.3	2.261	2487	1.403	1542.8	1.75	1929	1.424	1565.9	1.491	1639.6	1.458	1603.8
1200	2.263	2715.3	2.278	2733.1	1.415	1695.2	1.775	2130.2	1.436	1723.3	1.503	1803.7	1.465	1758
1300	2.29	2977.2	2.299	2938.1	1.424	1830.7	1.805	2345.9	1.449	1883.2	1.511	1964.9	1.473	1914.9

1400	2.313	3241.4	2.319	3247.3	1.436	2010.5	1.83	2561.5	1.457	2039.8	1.52	2127.7	1.482	2074.8
1500	2.336	3504.4	2.34	3510.6	1.444	2166.7	1.855	2782.1	1.465	2193.1	1.528	2292.3	1.494	2241
1600	2.356	3770.6	2.361	3778.2	1.453	2324.5	1.876	3001.1	1.474	2398	1.537	2438.3	1.503	2401.3
1700	2.378	4035.7	2.382	4049.9	1.461	2484	1.901	3231.4	1.484	2519.6	1.545	2626.4	1.51	2576
1800	2.391	4301	-	-	1.47	2615.2	1.922	3459.1	1.491	2682.9	1.553	2796	1.52	2736
1900	2.407	4572	-	-	1.474	2801.3	1.943	3691.1	1.499	2817.9	1.562	2967.2	1.524	2943.6
2000	2.424	4818.3	-	-	1.482	2961.3	1.964	3927.2	1.503	3006.1	1.57	3140.1	1.53	3050
2100	2.437	5116.3	-	-	1.491	3130.1	1.995	4167.5	1.511	3174	1.574	3303.9	1.535	3231.2
2200	2.449	5388.1	-	-	1.495	3288.3	2.001	4404.5	1.516	3334.4	1.583	3481.7	1.541	3385.2
2300	2.462	5660.6	-	-	1.501	3457	2.018	4643.2	1.52	3495.6	1.591	3639.3	1.552	3570.2
2400	2.47	5920.1	-	-	1.507	3617.4	2.035	4881.8	1.528	3667.6	1.595	3828.4	1.557	3737.8
2500	2.483	6209	-	-	1.511	3778.6	2.052	5128.8	1.532	3830.9	1.604	4005.9	1.564	3904.2
2600	2.52	6552.3	-	-	1.52	3951.5	2.065	5375.9	1.537	3995	1.608	4153.1	-	-
2700	2.533	6837	-	-	1.528	4126.1	2.085	5631.2	1.545	4171.3	1.616	4362.6	-	-
2800	2.546	7123.9	-	-	1.537	4307	2.102	5886.6	1.551	4330.1	1.624	4546.2	-	-
2900	2.558	7419	-	-	1.545	4479.9	2.114	6133.7	1.562	4530.1	1.629	4722.7	-	-
3000	2.571	7712.1	-	-	1.549	4647.3	2.127	6340.7	1.57	4710.2	1.637	4911.1	-	-

Anexa 3. Valori căldura specifică și entalpii gaze de ardere în funcție de temperatură, pentru produșii de reacție

(raportat la masa gazelor - sursa EES - Engineering Equation Solver)

t	CO ₂		SO ₂		N ₂		H ₂ O		CO		O ₂	
	c _p	h	c _p	h	c _p	h	c _p	h	c _p	h	c _p	h
°C	$\frac{kJ}{kgK}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kgK}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kgK}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kgK}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kgK}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kgK}$	$\frac{kJ}{kg}$
0	0.8268	0	0.6078	0	1.035	0	1.8591	0	1.041	264.5	0.9287	23.11
100	0.9193	87.4	0.6641	64	1.041	104.11	1.8765	187.65	1.039	368.5	0.9318	69.33
200	0.9971	183.31	0.7114	133	1.05	208.57	1.8977	379.54	1.039	472.4	0.9647	164.1
300	1.061	286.31	0.7507	206	1.07	314.47	1.9189	575.54	1.040	576.4	0.9971	262.2
400	1.114	395.21	0.7827	282	1.095	422.77	1.9500	779.88	1.042	680.5	1.025	363.4
500	1.159	508.91	0.8082	362	1.12	533.57	1.9811	990.57	1.049	784.8	1.048	467
600	1.196	626.71	0.8281	444	1.143	646.67	2.0123	1207.49	1.048	889.5	1.067	572.7
700	1.227	747.81	0.8431	527	1.164	762.07	2.0434	1430.63	1.051	994.4	1.083	680.3
800	1.253	871.91	0.854	612	1.182	879.37	2.0745	1660.00			1.097	789.3
900			0.8617	698	1.199	998.47	2.1119	1900.33			1.11	899.7
1000			0.867	789	1.213	1119	2.1480	2148.00			1.121	1011
1100			0.8706	872	1.226	1241	2.1791	2402.03			1.131	1124
1200			0.8734	959	1.238	1364	2.2103	2652.57			1.141	1237
1300			0.8762	1046	1.248	1489	2.2476	2921.16			1.149	1352
1400			0.8798	1134	1.257	1614	2.2788	3189.63			1.158	1467
1500			0.885	1222	1.266	1740	2.3099	3464.33			1.165	1584
1600			0.8925	1311	1.273	1867	2.3360	3737.03			1.173	1700

1700			0.9033	1401	1.28	1995	2.3672	4023.80			1.18	1818
1800			0.9181	1492	1.286	2123	2.3933	4307.34			1.187	1936
1900			0.9377	1585	1.292	2252	2.4195	4596.23			1.194	2056
2000			0.963	1680	1.297	2381	2.4456	4890.23			1.201	2175
2100			0.9946	1777	1.302	2511	2.4842	5189.45			1.207	2296
2200			1.034	1879	1.306	2642	2.4917	5484.57			1.214	2417
2300			1.081	1984	1.31	2773	2.5129	5781.81			1.22	2538
2400			1.136	2095	1.314	2904	2.5340	6078.92			1.227	2661
2500			1.202	2212	1.317	3035	2.5552	6386.49			1.233	2784
2600			1.278	2336	1.321	3167	2.5714	6694.18			1.239	2907
2700			1.365	2468	1.324	3300	2.5963	7012.08			1.246	3032
2800			1.464	2609	1.326	3432	2.6175	7330.11			1.252	3156
2900			1.576	2761	1.329	3565	2.6324	7637.81			1.258	3282
3000			1.702	2925	1.332	3698	2.6486	7895.57			1.265	3408

Referințe bibliografice

1. AfrisoEuroIndex, *Instructiuni de utilizare - Maxilyzer NG*. 2009.
2. Testo, *Flue Gas Analysis in Industry - Practical guide for Emission and Process Measurements*. 2004.
3. Madarasan T. and Balan M., *Termodinamica Tehnica*. Ed. Sincron, 1999.
4. Madarasan T., et al., *Indrumator pentru Lucrari de Termotehnica si Masini Termice*. Editura Todesco,, 2006.