

# ANALIZA EXERGOECONOMICĂ A PROCESELOR DE TRATARE TERMICĂ – FACTOR IMPORTANT ÎN ANALIZA CALITĂȚII PROCESELOR INDUSTRIALE

**Ing. Natalia BEGLET,**  
Universitatea „Dunărea de Jos”,  
Galați

Consultant la S.A. TERMOCOM,  
Chișinău. Este doctorand la Universitatea  
„Dunărea de Jos” din Galați și lector  
asistent la Universitatea Tehnică a  
Moldovei din Chișinău.



**Ing. Serghei PALAȘ,**  
Universitatea „Dunărea de Jos”,  
Galați

Consultant la S.A. CET-2 – Chișinău.  
Este doctorand la Universitatea „Dunărea  
de Jos” din Galați și lector asistent la  
Universitatea Tehnică a Moldovei  
din Chișinău.



**REZUMAT.** Dezvoltarea metalurgiei a dus la necesitatea sporirii productivității, a ridicării calității produselor, micșorarea consumului de combustibil, ceea ce a pus noi de probleme, iar rezolvarea acestora contribuie la perfecționarea proceselor existente și, posibil, la introducerea unor noi soluții. *Analiza exergetică* permite să se țină cont nu numai de caracteristicile cantitative, ci și de caracteristicile calitative ale resurselor energetice disponibile în diferite elemente ale instalației, de nivelul lor de perfecțiune și de ireversibilitatea proceselor individuale din aceste elemente și din instalație. La ora actuală este acceptată ideea că exergia este mărimea cea mai indicată pentru analiza eficienței proceselor termodinamice, întrucât exprimă calitatea energiilor care evoluează în sistemul considerat, adică măsoară valoarea termodinamică adevărată a energiilor sau valoarea de utilizare a acestora. *Analiza exergoeconomică* propune ca și costurile din ecuația bilanțurilor de cost să se exprime în funcție de fluxurile de exergie ale consumurilor și produselor sistemului. *Analiza exergoeconomică* este un procedeu de analiză complex, deoarece combină analiza exergetică, ce permite a recomanda soluții de perfecționare termodinamică, și analiza economică, ce dă posibilitatea de a arăta costul măsurilor tehnice adoptate în caz de modernizare și rețehnologizare a întreprinderilor metalurgice. Ea indică posibilitățile de reducere a costurilor produselor finite, în cazul dat ale produselor metalurgice, alegând soluția optimă ce ține cont de factorii termo-economici, precum și de siguranța exploatării. *Analiza exergoeconomică* cuprinde elemente de termodinamică, de economie, de analiză matematică, studii de durabilitate ș.a., ceea ce dă posibilitatea utilizării ei la efectuarea studiilor asupra diferitor întreprinderi energofage. Prin urmare, analiza exergoeconomică constituie un instrument important în analiza calității proceselor industriale.

**ABSTRACT.** The concept of exergoeconomic analysis is defined and applied to industrial processes. The study discusses the meaning of the choice of definition of efficiency, system limitations and problem definition. The exergoeconomic flows for a steel plant are presented. The aim of this report is to show the simplicity and the value of using the concept of exergoeconomic analysis when analyzing industrial processes and to develop conventions and standards within the field. The large losses which are revealed in an exergy treatment of a process should be seen as a challenge to achieve technical improvements, not as an insurmountable obstacle. The method presented in this report is also valuable for long-term planning of, for example, research efforts on more efficient allocation of resources, since it reveals the real losses.

## 1. INTRODUCERE

Dezvoltarea metalurgiei a dus la necesitatea sporirii productivității, a ridicării calității produselor, a micșorării consumului de combustibil, ceea ce a pus noi probleme, iar rezolvarea acestora contribuie la perfecționarea proceselor existente și, posibil, introducerea unor noi soluții.

*Analiza exergetică* permite să se țină cont nu numai de caracteristicile cantitative, ci și de caracteristicile calitative ale resurselor energetice disponibile în diferite elemente ale instalației, de nivelul lor de perfecțiune și de ireversibilitatea proceselor individuale din aceste elemente și din instalație [1-5].

La ora actuală este acceptată ideea că exergia este mă-

rimea cea mai indicată pentru analiza eficienței proceselor termodinamice, întrucât exprimă calitatea energiilor care evoluează în sistemul considerat, adică măsoară valoarea termodinamică adevărată a energiilor sau valoarea de utilizare a acestora. *Analiza exergoeconomică* propune ca și costurile din ecuația bilanțurilor de cost să se exprime în funcție de fluxurile de exergie ale consumurilor și produselor sistemului.

## 2. ANALIZA EXERGETICĂ A UNUI CUPTOR CU PROPULSIE

Bilanțul exergetic este descris de ecuația [2]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{ch} + \dot{E}_{f.c.} + \dot{E}_{f.a.} + \dot{E}_{ch.m.} + \dot{E}_{f.m.} + \dot{E}_{ex} = \\ = \dot{E}_{p.t.} + \dot{E}_{end} + \dot{E}_{s.c.} + \dot{E}_{g.a.} + \sum \dot{E}_{teh} + \dot{E}_{D,ar} + \dot{E}_{D,\Delta T} \end{aligned}$$

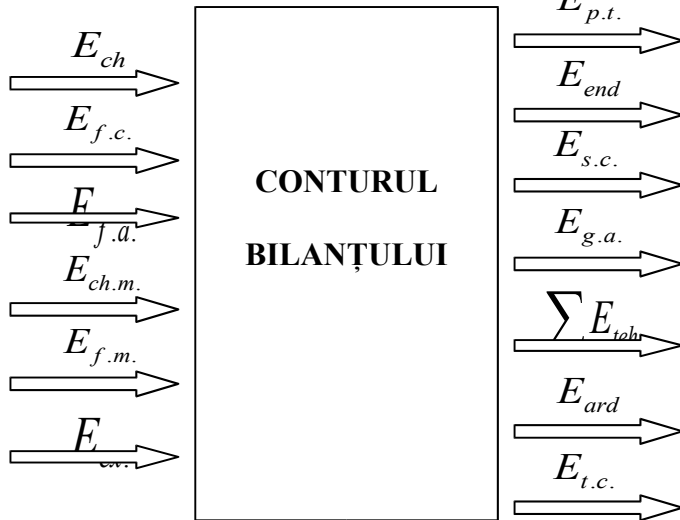


Fig. 1. Bilanțul exergetic al unui cuptor.

Se stabilesc, de asemenea, ecuațiile:

$$\dot{E}_{comb} = \dot{E}_{ch} + \dot{E}_{f.c.} = \dot{B} \cdot (e_{ch} + e_f)$$

$$\dot{E}_m = \dot{E}_{ch.m.} + \dot{E}_{f.m.} = \dot{B} \cdot (e_{ch} + e_f)$$

Consumul de exergie pentru încălzirea produsului tehnologic este:

$$\dot{E}_{p.t.} = \dot{E}_{ch.p.t.} + \dot{E}_{f.p.t.} = \dot{B} \cdot (e_{ch} + e_f)$$

Pierderile de exergie cu gazele de ardere sunt:

$$\dot{E}_{g.a.} = \dot{B} \cdot V_{g.a.} \cdot e_{g.a.} \quad (5)$$

Consumul de energie pentru încălzirea deșeurilor tehnologice este:

$$\sum \dot{E}_{teh} = \sum (\dot{G}_{teh} \cdot e_{teh}) \quad (6)$$

Distrugerile de exergie din cauza ireversibilității proceselor de ardere sunt:

$$\dot{E}_{D,ar} = \dot{B} (e_{ch} + V_a \cdot e_a - V_{g.a.} \cdot e_{g.a.}) \quad (7)$$

Distrugerile de exergie cauzate de ireversibilitatea procesului de schimb de căldură sunt:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{D,\Delta T} = \dot{E}_{g.a.}^{int} - \dot{E}_{g.a.}^{ies} - \dot{E}_{p.t.} - \dot{E}_{s.c.} = \\ = \dot{B} \cdot V_{g.a.} (e_{g.a.}^{int} - e_{g.a.}^{ies}) - \dot{E}_{p.t.} - \dot{E}_{s.c.} \end{aligned} \quad (8)$$

### 3. CALCULUL BILANȚULUI EXERGETIC

Bilanțului exergetic [9] este efectuat pentru cuptorul cu propulsie și rezultatele calculelor sunt prezentate în tabelul 1 și schematizate în figura 2.

### 4. ANALIZA EXERGOECONOMICĂ. BILANȚUL COSTURILOR EXERGETICE

La ora actuală este acceptată ideea că exergia este mărimea cea mai indicată pentru analiza eficienței proceselor termodinamice, întrucât exprimă calitatea energiilor care evoluează în sistemul considerat, adică măsoară valoarea termodinamică adevărată a energiilor sau valoarea de utilizare a acestora [7].

Metoda analizei exergoeconomice propune ca și costurile din ecuația bilanțurilor de cost să se exprime în funcție de fluxurile de exergie ale consumurilor și produselor sistemului.

Ținând seama că sistemul termoenergetic considerat consumă  $n$  fluxuri de exergie și produce  $m$  fluxuri exergetice, ecuația bilanțului exergoeconomic capătă forma:

$$\sum_{k=1}^m c_{pk} \cdot \dot{E}_{pk} = \sum_{k=1}^n c_{ck} \cdot \dot{E}_{ck} + \dot{Z} + \dot{Z}_M \quad (9)$$

În această ecuație de bilanț al costurilor exergetice, ratele de amortizare și de exploatare și întreținere, pentru instalația de bază și pentru instalațiile de protecție a mediului, exprimate prin  $\dot{Z}$  și, respectiv, prin  $\dot{Z}_M$  sunt cunoscute, având aceleași valori indiferent de regimul de funcționare al sistemului termoenergetic. Exergiile consumurilor,  $\dot{E}_{ck}$ , și ale produselor,  $\dot{E}_{pk}$ , pot fi determinate cu ajutorul analizei exergetice a sistemului, acestea având valori variabile în funcție de regimul de lucru.

Costurile specifice ale exergiilor consumate,  $c_{ck}$ , sunt mărimi cunoscute, determinate de piața de aprovizionare (cazul combustibililor), sau determinate din analiza sistemelor termoenergetice din care acestea provin (cazul consumurilor de căldură sau de lucru mecanic)[8].

În relația (9), singurele necunoscute sunt costurile specifice ale exergiilor produselor finale,  $c_{pk}$ , care vor trebui determinate și care depind de regimul de lucru al sistemului termodinamic.

Pentru dezvoltarea analizei exergoeconomice se va ține seama că fluxurile exergetice ale consumurilor și ale produselor, care intervin în ecuația de bilanț al costurilor, sunt legate între ele prin ecuația de bilanț exergetic, în care intervin și distrugerile și pierderile de exergie. Prin combinarea ecuației de bilanț exergetic cu ecuația de bilanț al costurilor va rezulta o dependență între costurile și imperfecțiunile termodinamice ale proceselor care se desfășoară în sistemul termodinamic, astfel încât se vor putea evalua efectele economice ale distrugerilor și pierderilor de exergie. În același timp se va putea urmări evoluția ponderilor costurilor de protecție a mediului în costurile specifice ale produselor finale.

**CONTRIBUȚIA LUI J.M. JURAN LA DEZVOLTAREA CALITOLOGIEI ȘTIINȚIFICE**

Pe baza analizei exergoeconomice a unui cuptor se poate determina costul exergetic al produsului principal:

$$c_{p.t.} \cdot \dot{E}_{p.t.} = c_{ecomb} (\dot{E}_{p.t.} + \dot{E}_{end} + \dot{E}_{s.c.} + \dot{E}_{g.a.} + \sum \dot{E}_{teh} + \dot{E}_{D,ar} + \dot{E}_{D,\Delta T}) + \dot{Z} + \dot{Z}_M \quad (10)$$

Tabelul 1. Bilanțul exergetic al cuptorului cu propulsie

Căldura introdusă	kW	%	Căldura consumată	kW	%
Exergia chimică a combustibilului, $E_{ch}$	41722,2	88,1	Exergia metalului $E_{p.t.}$	17222,2	36,4
Exergia aerului $E_{f.a.}$	2000,0	4,3	Exergia gazelor evac, $E_{g.a.}$	8638,9	18,2
Exergia reacțiilor exotermice, $E_{ex}$	3611,1	7,6	Exergia oxidării metalului (țunderul), $E_t$	666,7	1,4
			Pierderi de exergie prin pereți, $E_{m.a.}$	1388,9	2,9
			Pierderi de exergie cu gazele prin neetansit., $E_{ne}$	500,0	1,1
			Pierderi de exergie cu apa de răcire elem. $E_{a.r.}$	2277,8	4,8
			Distrugerii de exergie prin ireversib. arderii $E_{ard}$	7277,8	15,4
			Distrugerii de exergie prin ireversib. schimbului de căldură $E_{t.c.}$	9361,0	19,8
<b>TOTAL</b>	<b>47333,3</b>	<b>100</b>	<b>TOTAL</b>	<b>47333,3</b>	<b>100</b>

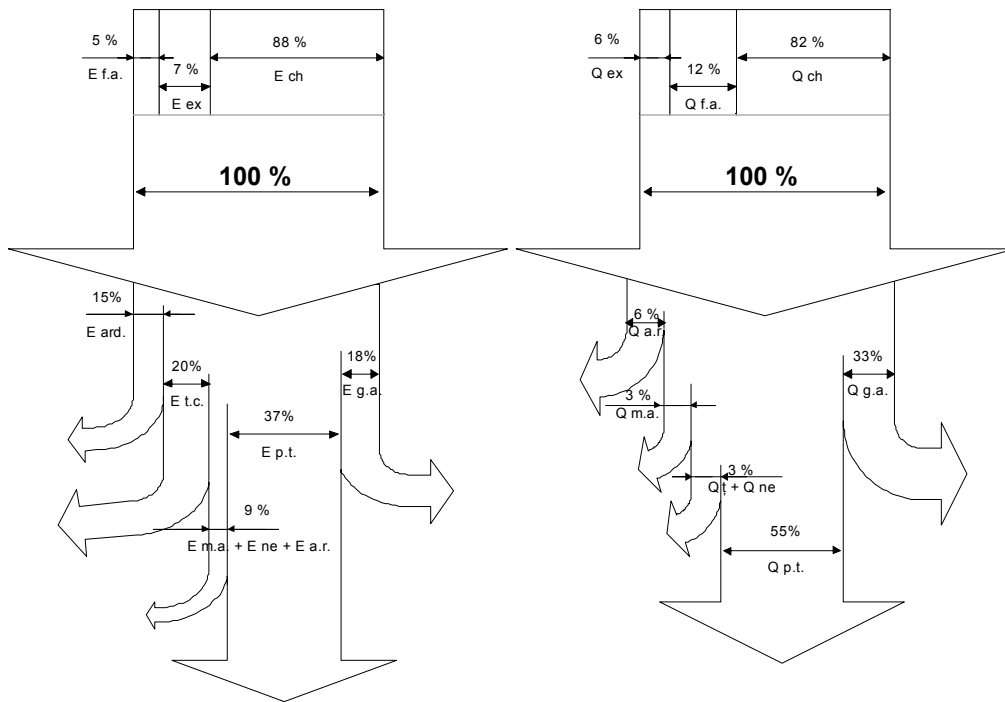


Fig. 2. Diagrama Grassman și Sankey.

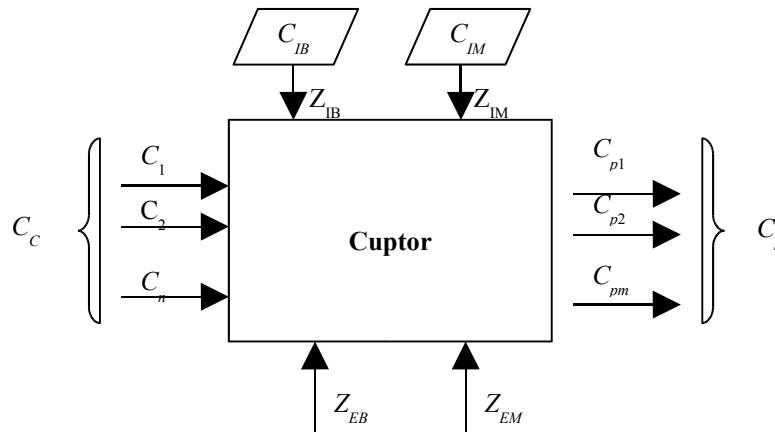


Fig. 3. Schema generală de analiză economică a unui cuptor.

Tabelul 2. Bilanțul costurilor exergetice

Costuri	lei/kg
Combustibil	25000
Costuri nonexergetice	2000000
Pentru protecția mediului	200000
<b>Costuri exergetice</b>	
Pentru combustibil	759,62
Pentru distrugerile de exegie prin ardere	131,60
Pentru distrugerile de exegie prin t.c.	170,43
Pentru metal	2076,20

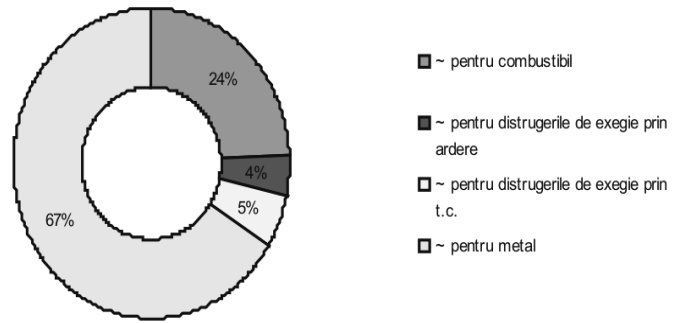


Fig. 4. Bilanțul costurilor exergetice.

Costul exergetic al distrugerilor cauzate de ireversibilitatea procesului de ardere:

$$C_{D,ar} = c_{ecomb} \cdot \dot{E}_{D,ar} \text{ [lei/s]} \quad (11)$$

Costul exergetic al distrugerilor cauzate de ireversibilitatea procesului de transfer de căldură la diferențe finite de temperaturi este, în lei/s:

$$C_{D,\Delta T} = c_{ecomb} \cdot \dot{E}_{D,\Delta T} \text{ [lei/s]} \quad (12)$$

Costul exergetic al procesului tehnologic va fi:

$$c_{p.t.} = \frac{c_{ecomb} (\dot{E}_{p.t.} + \dot{E}_{end} + \dot{E}_{s.c.} + \dot{E}_{g.a.} + \sum \dot{E}_{teh} + \dot{E}_{D,ar} + \dot{E}_{D,\Delta T}) + \dot{Z} + \dot{Z}_M}{\dot{E}_{p.t.}} \quad (13)$$

Pentru a determina costurile exergetice raportate la 1 kg de metal produs raportăm ecuațiile (11) – (13) la productivitatea cuptorului și obținem rezultatul în lei/kg metal.

Bilanțul costurilor exergetice este prezentat în tabelul 2 și în figura 4.

## CONCLUZII

Analiza exergoeconomică este un procedeu de analiză complex, deoarece combină analiza exergetică, ce permite a recomanda soluții de perfecționare termodinamică a lor, și analiza economică, ce dă posibilitatea de a arăta costul măsurilor tehnice adoptate în caz de modernizare,

și re tehnologizare a întreprinderilor metalurgice. Analiza exergoeconomică arată posibilitățile de reducere a costurilor produselor finite, în cazul dat ale produselor metalurgice, alegând soluția optimă, ci ține cont de factorii termo-economici, precum și de siguranța exploatării. Analiza exergoeconomică cuprinde elemente de termodinamică, de economie, de analiză matematică, studii de durabilitate ș.a., ceea ce dă posibilitatea utilizării ei la efectuarea studiilor asupra diferitor întreprinderi energofage.

Analiza exergoeconomică constituie un instrument important în analiza calității proceselor industriale.

## BIBLIOGRAFIE

1. Szargut Ia., Petelea R., *Exergy*, M.:Energia, 1968.
2. Sidelikovskii L., *Cazane – utilizatoare și tehnologii utilizatoare de energie*, M.: Energoatomizdat, 1989.
3. Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M., *Thermal Design & Optimization*, John Wiley & Sons, 1996.
4. Szargut J., *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*, Hemisphere Pub., 1988.
5. Kotas I.J., *The exergy method of thermal plant analysis*, Butter Worths, London, 1985
6. Бродянский В., *Эксергетический метод термодинамического анализа*, Энергия, Москва, 1973.
7. Ioniță C.I., *Analiză exergoeconomică și optimizare*, Revista TERMOTEHNICA, anul IV, nr.2/2001, pag.10-17.
8. Panait T., *Exergoeconomia sistemelor termoenergetice*, Ed. Fundației Universiatre „Dunărea de Jos”, Galați, 2003.
9. Natalia Begleț, Serghei Palaș, *Analiza exergetică a funcționării unui cuptor cu propulsie*, Conferința ETCN-2003, București.