

ANALIZA EXERGETICĂ A PROCESULUI CU GAZE ÎN CUPTOARE DE TIP TUNEL ȘI ÎN CELE CU COGENERARE INTEGRATĂ

Corina Chelmenciuc, drd.
Universitatea Tehnică a Moldovei

INTRODUCERE

Toate procesele tehnologice reale sunt procese ireversibile, aceasta fiind cauza micșorării perfecțiunii acestora. Creșterea ireversibilității duce la degradarea exergiei și transformarea unei părți a acesteia în anergie, ceea ce se răsfrânge negativ asupra eficienței energetice a procesului. De aceea, este foarte important de înțeles și depistat cauzele care duc la creșterea ireversibilității proceselor și de întreprins măsuri pentru diminuarea acesteia.

Cele mai generale cauze ale apariției ireversibilității în diverse procese și instalații sunt(1,2,3):

- schimbul de căldură dintre corpuri la diferență finită de temperatură;
- curgerea cu frecare;
- procesele de amestecare;
- procesele de laminare ale gazelor și vaporilor;
- arderea combustibililor.

În lucrare se va face analiza exergetică comparativă a proceselor de obținere a gazelor în arzătorul cuptorului de panificație PPP 3 54.211 ST și în camera motorului cu ardere internă, în cazul când acesta este integrat în instalația de panificație, în scopul reducerii reversibilităților acestui proces.

1. IREVERSIBILITATEA PROCESELOR CU GAZE ÎN CUPTOR

Unul dintre cele mai ireversibile procese care decurg în cuptoarele pe gaze naturale, reprezintă procesul de amestecare a gazelor din camera de ardere cu gaze recirculate. Ireversibilitatea termică, creșterea entropiei și respectiv pierderile de exergie asociate amestecării gazelor cresc cu pătratul diferenței de temperatură ale celor două gaze care se amestecă și căderii de presiune a ambelor curenți de gaze la trecerea prin camera de amestecare.

Cuptorul de panificație de tip PPP 3 54.211 ST, care reprezintă subiectul cercetării în lucrare, este echipat cu cameră de ardere cu arzător pe gaze naturale. Temperatura teoretică de ardere este de 1630 °C, pe când temperatura necesară a gazelor în canalele cuptorului este de cca 450 °C (fig. 1).

Se observă o diferență mare dintre temperatura gazelor în camera de ardere CA și cea necesară în canalele camerei de coacere CC. Reducerea valorii temperaturii gazelor din camera de ardere se realizează în urma procesului de amestecare a gazelor fierbinți cu gaze reci recirculate din camera de coacere în camera de amestecare CAM, a căror temperatură constituie 268 °C.

În continuare, se propune o soluție care ar

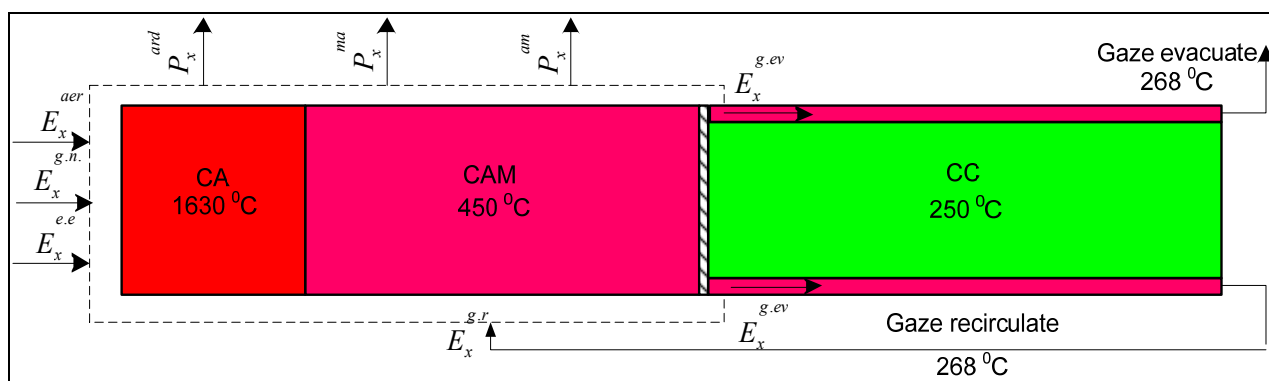


Figura 1. Prezentarea fluxurilor exergetice aferente procesului de producere a gazelor în cuptor:

E_x^{aer} – exergia aerului; $E_x^{g.n.}$ – exergia combustibilului; $E_x^{e.e.}$ – exergia energiei electrice consumată; $E_x^{g.r.}$ – exergia gazelor recirculate; $E_x^{g.ev}$ – exergia gazelor evacuate; P_x^{ard} – pierderile de exergie asociate procesului de ardere a combustibilului; P_x^{ma} – pierderile de exergie în mediul ambiant asociate procesului de transfer de căldură dintre gazele de ardere și mediul ambiant prin pereții exteriori; P_x^{am} – pierderile de exergie asociate procesului de amestecare a gazelor.

reduce pierderile de exergie asociate procesului de obținere a gazelor de o temperatură necesară efectuării procesului tehnologic în cuptoare și anume prin evitarea procesului de amestecare.

2. IDEEA ȘI BENEFICIILE INTEGRĂRII COGENERĂRII ÎN PROCESELE DE PANIFICAȚIE

Deoarece există o diferență mare, uneori chiar mai mult de 1000 °C, dintre temperatura la care se desfășoară procesul de ardere a combustibililor în camera de ardere și cea necesară desfășurării procesului tehnologic (în lucrare – coacerea pâinii), a apărut problema identificării soluțiilor cu ajutorul cărora s-ar putea valorifica căldura potențialului energetic pierdut în urma răcirii gazelor.

în cuptorul clasic va fi utilizat pentru producerea energiei electrice.

- În cazul utilizării instalațiilor cu cogenerare rezultă o *economie de combustibil*, în comparație cu generarea separată a energiei electrice și căldurii, de 25-40 %.

- *Asigurarea autonomiei energetice* parțiale sau totale a întreprinderii. În cazul expus în lucrare, energia electrică produsă ar putea fi consumată de cuptoarele electrice de panificație care, de exemplu, la Fabrica Nr.2 a SA „Franzeluța” sunt amplasate în aceeași hală cu cuptoarele PPP pe gaze naturale. Pentru întreprinderile la care energia electrică produsă va fi mai mare decât consumul intern al acestora, surplusul ar fi putut fi injectat în rețeaua externă, aducând *beneficii financiare*.

În cazul integrării MAI cu cuptorul (fig. 2), combustibilul împreună cu aerul necesar se ard în camera de ardere a MAI, în care, în urma procesului

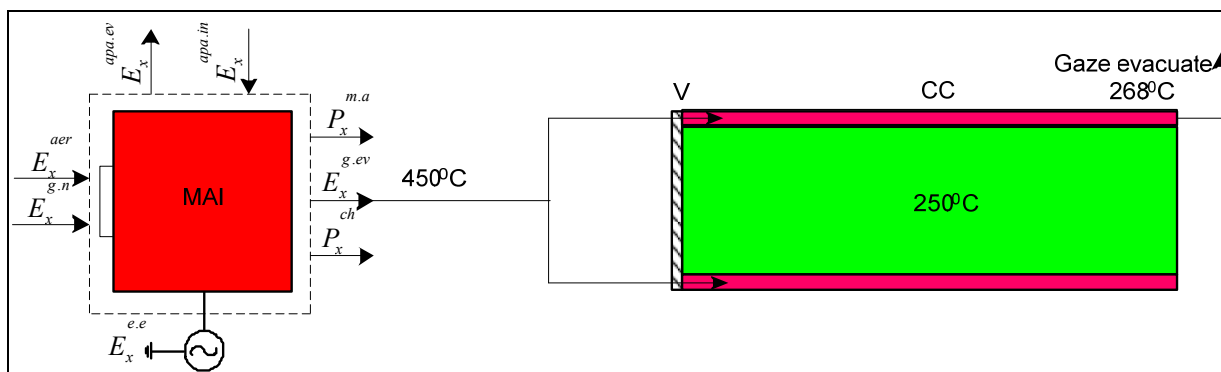


Figura 2. Prezentarea fluxurilor exergetice aferente procesului de producere a gazelor în MAI:

$E_x^{apa.in}$ - exergia apei de răcire la intrare în MAI; $E_x^{apa.ev}$ - exergia apei de răcire la ieșire din MAI;
 $E_x^{e.e}$ - exergia energiei electrice produsă; E_x^{aer} , $E_x^{g.n}$, $E_x^{g.ev}$, P_x^{ard} , P_x^{ma} , P_x^{am} - din fig. 2.

Această punere de problemă, a generat ideea conceptului integrării cogenerării în instalațiile de cuptoare de panificație (în continuare - *CogIntegr*) și anume a celor cu motor cu ardere internă (în continuare – *CogIntegr cu MAI*).

Conceptul *CogIntegr* presupune integrarea unei tehnologii de cogenerare, care utilizează în calitate de agent de lucru gaze de ardere, într-o instalație de cuptoare, sau în alt tip de instalație care la fel utilizează gazele în calitate de agent de lucru, astfel încât, se va produce energie electrică, iar gazele de ardere evacuate din instalația de cogenerare vor fi utilizate în calitate de agent termic pentru efectuarea proceselor în instalația tehnologică (în cazul dat – în cuptoare).

Beneficiile aplicării conceptului *CogIntegr*:

- *Sporirea eficienței termodinamice* a proceselor cu gaze de ardere datorită evitării procesului de amestecare a acestora. Astfel, potențialul pierdut în urma răcirii gazelor de ardere

de destindere a gazelor de ardere, se produce lucru mecanic care ulterior este transformat în energie electrică prin intermediul generatorului electric GE. Gazele de ardere evacuate din MAI, având temperatura cca. 450 °C, vor vehiculate în canalele camerei de coacere.

Mai multe detalii despre esența și beneficiile integrării cogenerării în cuptoare de panificație au fost prezentate în lucrările (4,5,6).

3. ANALIZA EXERGETICĂ A PROCESULUI CU GAZE ÎN CAMERA DE ARDERE A CUPTORULUI

Pentru a analiza procesul de producere a gazelor se va utiliza metoda exergetică, conform căreia, eficiența exergetică a procesului analizat poate fi evaluată calculând valorile exergiilor la intrare și la ieșire din conturul de referință. Astfel,

pierderile de exergie asociate procesului analizat se vor determina prin diferența valorilor exergiilor introduse și evacuate din contur.

Ca și în cazul evaluării eficienței energetice se va prezenta conturul de interes sub forma unei „cutii negre”, cu indicarea tuturor formelor de exergie introduse și evacuate din limitele acesteia (fig. 1). Suma exergiilor introduse în conturul de bilanț va fi egală cu suma exergiilor evacuate din contur plus pierderile de exergie.

Compoziția gazului natural utilizat în caliate de combustibil este indicată în tab 1, iar valorile parametrilor necesari pentru efectuarea calculului în tabelul 2.

Tabelul 1. Compoziția gazului natural.

	Simbol	Unitate	Valoare
Metan	CH ₄	%	97,102
Etan	C ₂ H ₆	%	1,438
Propan	C ₃ H ₈	%	0,460
Butan	C ₄ H ₁₀	%	0,151
Pentan	C ₅ H ₁₂	%	0,027
Hexan	C ₆ H ₁₄	%	0,009
Dioxid de carbon	CO ₂	%	0,091
Azot	N ₂	%	0,722
Căldura de ardere	Q _i	MJ/m ³	33,03

Tabelul 2. Datele inițiale pentru calculul exergetic al camerei de ardere a cuptorului PPP 3 54.211 ST.

Caracteristică	Simbol	Unitate	Valoare
Consum combustibil	B	m ³ /s	0,014
Putere echipament electric	E ^{e.e}	kW	9
Debit total gaze	\dot{V}_g^t	m ³ /s	1,36
Debit gaze recirculate	\dot{V}_g^r	m ³ /s	1,19
Temperatură gaze evacuate	T _g ^{ev}	K	723
Temperatură gaze recirculate	T _g ^r	K	541
Temperatură mediu ambiant	T _{ma}	K	297
Presiune gaze	p	kPa	110
Presiune mediu ambiant	p _{ma}	kPa	98,642
Cantitatea de substanță a CO ₂	n _{co2}	kmol	0,045
Cantitatea de substanță a N ₂	n _{N2}	kmol	0,408
Cantitatea de substanță a H ₂ O	n _{H2O}	kmol	0,096
Cantitatea de substanță a O ₂	n _{O2}	kmol	0,09

Exergia gazului natural se va determina cu ajutorul relației propuse de savanții I. Szargut și T. Střiliska (6):

$$E_x^{g.n} = \left(1,0334 + 0,0183 \frac{H}{C} - 0,0694 \frac{1}{C} \right) Q_i \cdot B, \text{ kW} \quad (1)$$

unde: H este numărul de atomi de hidrogen ai gazului natural; C - numărul de atomi de carbon ai gazului natural.

Deoarece aerul necesar arderii nu este preîncălzit, exergia aerului introdus pentru ardere este nulă.

Exergia energiei electrice este egală cu valoarea energiei electrice consumate: $E_x^{e.e} = E^{e.e}$.

Exergia gazelor de ardere recirculate sau evacuate, se va determina cu relația:

$$E_x^g = e_x \cdot \dot{V}_g, \text{ kW} \quad (2)$$

unde: e_x este exergia specifică a gazelor de ardere recirculate sau evacuate, în kJ/m³;

\dot{V}_g debitul de gaze recirculat sau evacuat, în m³/s.

Exergia specifică a gazelor de ardere, conform (7) este compusă din:

$$e_x = e_x^t + e_x^p + e_x^{ch}, \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (3)$$

Componenta termică a exergiei gazelor de ardere se va determina astfel:

$$e_x^t = c_p' \left[(T_g - T_{ma}) - T_{ma} \cdot \ln \frac{T_g}{T_{ma}} \right], \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (3)$$

unde: c_p' este căldura volumică a gazelor de ardere recirculate sau evacuate, în intervalul de temperatură $(T_g - T_{ma})$, în kJ/(m³·K);

T_g - temperatura gazelor recirculate sau evacuate, în K;

T_a - temperatura mediului ambiant, în K.

Componenta mecanică a exergiei gazelor de ardere se va determina astfel:

$$e_x^p = n \cdot R_\mu \cdot T_{ma} \cdot \ln \frac{p}{p_{ma}}, \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (4)$$

unde: n este cantitatea de substanță a gazelor de ardere, în kmol;

R_μ - constanta caracteristică a gazelor de ardere, în kJ/(kmol·K);

p - presiunea gazelor de ardere, în Pa;

p_{ma} - presiunea mediul ambiant, Pa.

Componenta chimică a exergiei gazelor de ardere se va determina astfel:

$$e_x^{ch} = R_\mu \cdot T_{ma} \left[\sum n_i \cdot \ln \frac{n_i}{n_{oi}} + \ln(1 + X_0) \right], \text{ kJ} / \text{m}^3 \quad (5)$$

unde: n_i reprezintă cantitatea de substanță a componentului i în mediul ambiant, din (7) în funcție de natura componentului, în kmol;

n_{oi} - cantitatea de substanță a componentului i în mediul ambiant, din (7) în funcție de natura componentului, în kmol;

X_0 - umiditatea aerului din mediul ambiant, conform (7) $X_0 = 0,01145 \text{ kmol}_{ap\grave{a}}/\text{kmol}_{a.u.}$.

Perfecțiunea termodinamică a procesului tehnologic analizat se caracterizează prin randamentul de perfecțiune termodinamică al acestuia γ_{ex}^{tehn} și reprezintă raportul dintre suma fluxurilor de exergie la ieșire din conturul delimitat și suma fluxurilor de exergie la intrare în contur:

$$\gamma_{ex}^{tehn} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{xi}^e}{\sum_{i=1}^n E_{xi}^i} = \frac{E_x^{g.ev}}{E_x^{g.n} + E_x^{e.e} + E_x^{g.r}} \quad (6)$$

Înlocuind valorile parametrilor din tab. 2 în relațiile (1) – (6), vom obține valorile componentelor bilanțului exergetic, cât și valoarea randamentului de perfecțiune termodinamică a procesului analizat (tab. 3)

Tabelul 3. Bilanțul exergetic al arzătorului camerei de ardere a cuptorului PPP.

Exergiile introduse în conturul de bilanț, kW	Exergiile evacuate din conturul de bilanț, kW
$E_x^{g.n} = 497 \text{ kW}$.	$E_x^{g.ev} = 349,8 \text{ kW}$.
$E_x^{e.e} = 9 \text{ kW}$.	
$E_x^{g.r} = 135 \text{ kW}$.	
\sum Energiilor introduse = 641 kW	\sum Energiilor evacuate = 349,8 kW
Pierderile de exergie = 641 kW – 349,8 kW = 291,2 kW	
Randamentul perfecțiunii termodinamice 54,6 %	

4. ANALIZA EXERGETICĂ A PROCESULUI CU GAZE ÎN MAI

A fost selectat un MAI, sarcina termică, temperatura și debitul de gaze evacuate ale căruia să coincidă cu sarcina termică, temperatura și debitul de gaze de ardere la ieșire din camera de amestec al arzătorului cuptorului de tip PPP.

Ca și în cazul cuptorului clasic, pentru a face analiza exergetică a procesului de producere a gazelor în cazul tehnologiei CogIntegr cu MAI, se delimitează prin linie întreruptă acea parte a instalației în care are loc procesul respectiv (fig. 2).

Valorile parametrilor necesari pentru efectuarea analizei exergetice a soluției CogIntegr cu MAI sunt indicate în tabelul 4.

Tabelul 4. Datele inițiale pentru calculul exergetic al camerei de ardere a MAI.

Caracteristică	Simbol	Unitate	Valoare
Putere electrică	P_e	kW	380
Sarcina termică a gazelor evacuate	Q	kW	356
Consum combustibil	B	m^3/s	0,035
Debit total gaze	\dot{V}_g^t	m^3/s	1,63
Temperatură gaze evacuate	T_g^{ev}	K	747
Fluxul termic cedat apei de răcire	Q_a	kW	327
Temperatura apei la intrare în MAI	$t^{apa.in}$	$^{\circ}\text{C}$	48
Temperatura apei la ieșire din MAI	$t^{apa.ev}$	$^{\circ}\text{C}$	70

Din analiza componentelor bilanțului exergetic indicate în fig. 2, se poate observa, că în comparație cu tehnologia clasică prezentată în fig. 1, dispăre exergia gazelor recirculate $E_x^{g.r}$, în schimb apar 2 componente noi: exergia apei la intrare în MAI $E_x^{apa.in}$ și exergia apei la ieșire din MAI $E_x^{apa.ev}$.

Exergia apei poate fi calculată cu ajutorul relației:

$$E_x^{apa} = e_x^{apa} \cdot \dot{m}_{apa}, \text{ kW} \quad (8)$$

unde: e_x^{apa} este exergia specifică a apei intrate sau evacuate, în kJ/kg ;

\dot{m}_{apa} - debitul de apă introdus sau evacuat din MAI, în kg/s .

Exergia specifică a apei poate fi determinată cu relația:

$$e_x^{apa} = h - h_{ma} - T_{ma}(s - s_{ma}), \text{ kJ}/\text{kg} \quad (9)$$

unde: h este entalpia apei, din tabele termodinamice în funcție de temperatura și presiunea apei introduse sau evacuate din MAI, în kJ/kg ;

h_{ma} - entalpia apei, din tabele termodinamice în funcție de temperatura și presiunea mediului ambiant, în kJ/kg ;

s - entropia apei, din tabele termodinamice

în funcție de temperatura și presiunea apei introduse sau evacuate din MAI, în $kJ/(kg \cdot K)$;

s_{ma} - entropia apei, din tabele termodinamice în funcție de temperatura și presiunea mediului ambiant, în $kJ/(kg \cdot K)$.

Randamentul perfecțiunii termodinamice al procesului analizat, se va calcula cu relația:

$$\gamma_{ex}^{tehn} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{xi}^e}{\sum_{i=1}^n E_{xi}^i} = \frac{E_x^{g.ev} + E_x^{e.e} + E_x^{apa.ev}}{E_x^{g.n} + E_x^{apa.in}} \quad (10)$$

Valorile componentelor bilanțului exergetic, cât și valoarea randamentului de perfecțiune termodinamică a procesului analizat au fost introduse în tab. 5.

Tabelul 5. Bilanțul exergetic al procesului de producere a gazelor în camera de ardere a MAI.

Exergiile introduse în conturul de bilanț, kW	Exergiile evacuate din conturul de bilanț, kW
$E_x^{g.n} = 1248,7 \text{ kW}$.	$E_x^{g.ev} = 450 \text{ kW}$.
$E_x^{apa.in} = 162 \text{ kW}$.	$E_x^{e.e} = 380 \text{ kW}$.
	$E_x^{apa.ev} = 199 \text{ kW}$.
\sum Energiilor introduse = 1410,7 kW	\sum Energiilor evacuate = 1029 kW
Pierderile de exergie = 1410,7 kW – 1029 kW = 381,7 kW	
Randamentul perfecțiunii termodinamice 73 %	

CONCLUZII

În rezultatul efectuării analizei exergetice ale proceselor de obținere a gazelor în cele 2 cazuri prezentate în lucrare, se poate concluziona că tehnologia de instalații de cuptoare cu cogenerare integrată este foarte oportună din punctul de vedere termodinamic și, respectiv, din punctul de vedere al eficienței energetice.

Această soluție permite evitarea pierderilor exergetice asociate procesului de asigurare a temperaturii necesare a agentului termic (prin amestecare).

În procesul de ardere a combustibilului în camera de ardere a MAI oricum vor exista ireversibilități și respectiv pierderi de exergie, dar acestea vor fi mai reduse decât în cazul camerei de ardere a cuptorului, datorită procesului de producere a energiei electrice (ca principal produs), iar gazele de ardere evacuate din MAI și utilizate ulterior pentru efectuarea procesului de coacere, vor rezulta, de fapt, ca un deșeu.

Producerea celor 2 forme de energie, după

re tehnologizarea instalației, va contribui la creșterea considerabilă a sumei fluxurilor de exergie la ieșire din instalația modernizată $\sum_{i=1}^n E_{xi}^e$ de la 349,8 kW la

1029 kW (fiindcă exergia lucrului mecanic este egală cu valoarea lucrului mecanic produs, iar exergia energiei electrice, de asemenea, este egală cu valoarea energiei electrice produse).

În cazul implementării tehnologiei CogIntegr cu MAI, randamentul perfecțiunii termodinamice al procesului de obținere a gazelor va avea o valoare mai mare decât în cazul tehnologiei clasice - 0,73 în cazul soluției CogIntegr cu MAI și 0,546 în cazul tehnologiei clasice din cuptorul PPP.

Trebuie de remarcat faptul că tehnologia propusă poate fi implementată la orice întreprindere dotată cu cuptoare pe gaze, indiferent de tipul produselor care urmează a fi tratate termic în acestea, mai ales în cazurile în care temperatura necesară a gazelor de ardere pentru efectuarea proceselor tehnologice este mult mai joasă în comparație cu temperatura de ardere a gazului natural.

Totodată, în rezultatul implementării instalației de cogenerare la întreprindere, aceasta va fi asigurată și cu energie electrică necesară pentru efectuarea altor procese tehnologice sau utilități, iar agenții de răcire ai MAI pot fi ulterior utilizați pentru satisfacerea consumului de energie termică necesară pentru prepararea semifabricatelor sau pentru igienizarea utilajelor.

Bibliografie

1. **Nerescu I., Radenco V.** Analiza exergetică a proceselor termice. București: Editura Tehnică, 1970. 173 p.
2. **Bejan A.** Termodinamica tehnică avansată. București: Editura Tehnică, 1996. 848 p.
3. **Musteață V.** Termodinamica tehnică și procese tehnologice. Chișinău: UTM, 2006. 88 p.
4. **Chelmenciuc C., Musteață V., Tcaci L.** Reducerea ireversibilității proceselor în cuptorul de coacere a pâinii. Conferința studenților, masteranzilor și doctoranzilor UTM, Chișinău, 2013. Pp.361 – 364.
5. **Chelmenciuc C.** Reducerea ireversibilității proceselor cu gaze de ardere în cuptoare de tip tunel. Buletin AGIR NR. 3, București, 2015. Pp. 155-159.
6. **Chelmenciuc C., Guțu C.** Sporirea eficienței energetice în brutării. Conferința Tehnico-științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților UTM, Chișinău, 2011. Pp. 320-323.
7. **Shargut Ya., Petela R.** Exergiya. Moskva: Energiya, 1968. 279s.

Recomandat spre publicare: 08.10.2015.