

**UTILIZAREA GAZULUI DE COCS
ÎN ARZĂTOARE RECUPERATIVE
PERFORMANTE**

**THE USE OF COKE GAS IN ADVANCED
RECUPERATIVE BURNERS**

L. PĂUNESCU¹, A. IOANA²

¹Cermax 2000 Patents SRL București

²Universitatea Politehnica București

Person contact: lucian.paunescu.cermax@gmail.com

REZUMAT / ABSTRACT

Lucrarea prezintă o soluție tehnică performantă pentru arderea gazului de cocs într-o instalație de tip recuperativ implementată la un cuptor de încălzire a semifabricatelor pentru forjare de la ArcelorMittal Galați.

În condițiile preîncălzirii atât a aerului de combustie (până la 400°C), cât și a gazului de cocs (până la 120°C), s-a obținut o reducere a consumului specific de combustibil față de instalația de ardere clasică, de referință, cu 11,8%. Datorită tehnicilor adoptate de îmbunătățire a procesului de ardere prin distribuția aerului în trei trepte de amestec, au fost diminuate emisiile de noxe (CO, NO_x, SO₂) degajate în mediul ambiant sub limitele maxime admise de normele legale.

The paper present an advanced technical solution for the combustion of coke gas in a recuperative type installation implemented in a heating furnace of semi-products for forging in ArcelorMittal Galati.

In the conditions of preheating both the combustion air (up to 400°C) and the coke gas (up to 120°C), the specific consumption of fuel was reduced with 11.8% compared to the reference classic combustion installation. Due to the adopted techniques to improve the combustion process through the air distribution in three mixing stages, the emissions of pollutants (CO, NO_x, SO₂) exhausted into the environment were diminished under the maximum limits allowed by the lawful norms.

Key words: coke gas, recuperative burner, heating furnace, waste gas, emission

1. INTRODUCERE

În urma unor procese tehnologice care implică descompunerea pirogenetică a unor combustibili solizi naturali sau gazificarea propriu-zisă a acestora, rezultă gaze, care au în compoziția lor compuși sau elemente chimice cu proprietăți combustibile (CO, CH₄, C_mH_n, H₂, H₂S, S).

Astfel, prin descompunerea pirogenetică a cărbunilor sau lemnului, rezultă gaze de cracare, gazul de cocs, gazul de semicocs, gazul de iluminat, gazul de lemn etc., iar prin gazificarea cărbunilor rezultă așa numiții combustibili de gazogen, dintre care cei mai importanți sunt gazul de aer, gazul de generator, gazul de apă, gazul de furnal și gazul de cubilou.

1. INTRODUCTION

As result of some technological processes that involve the pyrogenic decomposition of some natural solid fuels or their itself gasification, result gases, which have in their composition chemical compounds or elements with combustible properties (CO, CH₄, C_mH_n, H₂, H₂S, S).

Thus, by the pyrogenic decomposition of coals or wood result cracking gases, coke gas, semi-coke gas, lighting gas, wood gas etc. and by the coals gasification result so-named generator fuels, from which the most important are air gas, generator gas, blast furnace gas and cupola gas.

Datorită conținutului ridicat de hidrogen (49-53%) și metan (18-25%), conform datelor din **Tabelul 1**, gazul de cocs (după epurarea chimică) constituie cel mai important produs al descompunerii pirogenetice, având înglobată o cantitate de energie care variază între 14,6-18,0 MJ/Nm³.

*Due to the high content of hydrogen (49-53%) and methane (18-25%), according to the data from **Table 1**, the coke gas (after the chemical purification) constitutes the most important product of pyrogenic decomposition, having an energy content which varies between 14.6-18.0 MJ/Nm³.*

Tabelul 1. Compoziția volumetrică a gazului de cocs (%)
Table 1. Volumetric composition of coke gas (%)

H ₂ S	CO ₂	CO	O ₂	N ₂	H ₂	CH ₄	C _m H _n
3.5 - 4	1.7 - 3	5 - 8	0.5 - 1.2	12 - 15	49 - 53	18 - 25	2 - 3

Gazul de cocs se produce în timpul procesului de cocsificare a cărbunilor în absența aerului în camerele de cocsificare ale bateriilor din cocserii. Temperatura atinsă în timpul procesului fiind deosebit de ridicată (1000 – 1200°C), eliminarea componentelor volatile ale cocsului metalurgic este foarte puternică.

Conform tehnologiilor actuale, gazul brut captat din camerele de cocsificare este supus unor procese chimice de epurare, în urma cărora se obțin alte produse secundare ale cocsificării: naftalina, gudronul, amoniacul și gazul de cocs epurat. În cadrul uzinelor metalurgice integrate, gazul de cocs epurat este utilizat în mod uzual în instalații de ardere ale cuptoarelor metalurgice sau în instalații energetice, fie singur, fie împreună cu gazul natural și/sau gazul de furnal.

The coke gas is produced during the coal coking process in the absence of air in the coking chambers of the coke ovens batteries. The reached temperature during the process being extremely high (1000 - 1200°C), removing of volatile components of metallurgical coke is very intense.

As the current technologies, the raw gas captured from the coking chambers is subject to certain cleaning chemical processes, after which are obtained other secondary products of coking: naphthalene, tar, benzene, ammonia and the clean coke gas. In the integrated metallurgical plants, the clean gas is usually used in combustion installations of metallurgical furnaces or energy installations, either alone or together with natural gas and/or blast furnace gas.

2. PARTICULARITĂȚI ALE ARDERII GAZULUI DE COCS ȘI SOLUȚII ADOPTATE LA PROIECTAREA INSTALAȚIEI DE ARDERE

După cum s-a precizat mai sus, gazul de cocs are puterea calorică inferioară cuprinsă între 14,6-18,0 MJ/Nm³, adică aproximativ jumătate din valoarea puterii calorifice inferioare a gazului natural (35,5 MJ/Nm³), fiind, din punct de vedere energetic, combustibilul rezidual cel mai bogat.

Faptul că gazul de cocs, utilizat la temperatura ambiantă, poate depune prin sedimentare anumite fracții (naftalină, gudroane), impune, pe de o parte, o foarte avansată epurare a acestuia și, pe de altă parte, măsuri preventive la proiectarea instalației de ardere pentru reducerea la minimum a pericolului obturării orificiilor prin care gazul este distribuit în zona de ardere.

Dacă îndeplinirea primei cerințe are un caracter general și depinde de performanțele instalației industriale existente de epurare a gazului de cocs, cea de-a doua cerință, impusă proiectării instalației de ardere, poate fi particularizată prin soluții tehnice specifice la concepția și realizarea arzătorului performant.

Soluțiile tehnice adoptate de autorii lucrării sunt:

2. PARTICULARITIES OF THE COKE GAS COMBUSTION AND SOLUTIONS ADOPTED IN THE DESIGN OF THE COMBUSTION INSTALLATION

As specified above, the coke gas has the lower calorific power between 14.6-18.0 MJ/Nm³, i.e. about half the natural gas lower calorific power (35.5 MJ/Nm³), being, in terms of energy, the richest residual fuel.

Because the coke gas, used at the surrounding temperature, can deposit by sedimentation certain fractions (naphthalene, tars), imposes, on the one hand, its very advanced cleaning and, on the other hand, preventive measures at the design of the combustion installation to minimize the danger of clogging the orifices through which the gas is distributed in the combustion area.

If the fulfillment of the first requirement has a general character and depends of the performances of the existing industrial installation of coke gas cleaning, the second requirement, imposed to the combustion installation design, can be particularized by specific technical solutions at the conception and achievement of the advanced burner.

The technical solutions adopted by the paper authors are:

- distribuția gazului de cocs printr-o duză prevăzută cu un singur orificiu axial, de dimensiuni mai mari (practic, un limitator de debit), amplasat la capătul posterior al arzătorului, într-o poziție ușor accesibilă pentru eventuala deblocare a orificiului prin purjare cu abur (sau prin alte procedee);
- preîncălzirea gazului de cocs la peste 100°C, prin recuperarea căldurii gazelor arse, pentru eliminarea totală a posibilității depunerii prin sedimentare a naftalinei pe conducta de aducțiune sau în duză.

În vederea eficientizării procesului de recuperare a căldurii gazelor arse evacuate din cuptor s-a adoptat soluția realizării unei instalații de ardere de tip recuperativ, având recuperatorul de căldură înglobat în corpul arzătorului, soluție care permite un randament termic superior al transferului de căldură între gazele arse și aerul de combustie. Gazul de cocs este preîncălzit pe tronsonul final de evacuare a gazelor arse, după ieșirea acestora din corpul arzătorului, într-un schimbător de căldură tubular.

3. DESCRIEREA ARZĂTORULUI RECUPERATIV ALIMENTAT CU GAZ DE COCS ȘI A PRINCIPIULUI SĂU FUNCȚIONAL

Arzătorul recuperativ, care funcționează cu gaz de cocs, constituie o variantă constructivă a arzătorului recuperativ alimentat cu gaz natural realizat în România și implementat la cuptoare industriale de încălzire [1]. În general, arzătoarele de tip recuperativ performante care funcționează pe plan mondial [2], fiind alimentate cu gaz natural sau alte hidrocarburi cu puteri calorifice mai mari (propan, butan etc.), sunt utilizate în incinte de lucru cât mai etanșe (cuptoare de încălzire, instalații de uscare și încălzire a zidăriei oalelor de turnare etc.), astfel încât gazele arse rezultate din procesul de ardere să poată fi aspirate prin corpul arzătorului înaintea evacuării în atmosferă. Recuperatorul de căldură încorporat în arzător asigură preluarea căldurii gazelor arse și transferul acesteia către aerul de combustie.

Arzătorul recuperativ alimentat cu gaz de cocs este proiectat pentru implementarea la un cuptor de încălzire pentru forjă, tip cameră, cu vatră fixă, de la ArcelorMittal Galați. Cuptorul era echipat cu două arzătoare clasice, montate față în față în pereții laterali, alimentate cu gaz de cocs și aer preîncălzit într-un recuperator metalic multitubular poziționat în bolta cuptorului. Înlocuirea celor două arzătoare clasice cu arzătoare recuperative implică eliminarea recuperatorului din boltă, gazele circulând prin corpul celor două arzătoare recuperative înaintea evacuării la coș.

Principiul constructiv și funcțional al arzătorului recuperativ este prezentat în **Figura 1**.

- *distribution of coke gas by a nozzle provided with a single orifice, of larger dimensions (practically, a flow limiter), placed at the posterior end of the burner, in an easily accessible position for possible release of orifice by purging with steam (or by other methods);*
- *preheating of coke gas at over 100°C, by waste gas heat recovery, to eliminate completely the possibility to deposit the naphthalene by sedimentation on the adduction pipe or in nozzle.*

To improve the recovery process of waste gas heat exited from the furnace it was adopted the solution of achievement a recuperative type combustion installation, having the heat recuperator embedded in the burner body, solution which allows an upper efficiency of heat transfer between waste gas and combustion air. The coke gas is preheated on the final section of waste gas exhaust, after their exit from the burner body, into a tubular heat exchanger.

3. DESCRIPTION OF RECUPERATIVE BURNER POWERED WITH COKE GAS AND ITS FUNCTIONAL PRINCIPLE

The recuperative burner which operates with coke gas, constitutes a constructive variant of the recuperative burner powered with natural gas achieved in Romania and implemented at industrial heating furnaces [1]. Generally, the advanced recuperative type burners which operate worldwide [2], being powered with natural gas or other hydrocarbons with higher calorific power (propane, butane etc.), are used in working chambers with a good tightness (heating furnaces, drying and heating installations of ladles masonry etc.), so that waste gas resulted from the combustion process can be aspirated through the burner body before the exit in atmosphere. The heat recuperator embedded in the burner assures taking the waste gas heat and its transfer to the combustion air.

The recuperative burner powered with coke gas is designed to be implemented at a heating furnace for forging, chamber type, with fixed hearth, in ArcelorMittal Galati. The furnace was equipped with two classic burners, placed face to face on the lateral walls, powered with coke gas and air preheated in a multitubular metal recuperator placed in the furnace vault. The replacement of the two classic burners with recuperative burners involves the elimination of the recuperator placed in the vault, the gases circulating through the body of the two recuperative burners before the exit to chimney.

*The constructive and functional principle of the recuperative burner is presented in **Figure 1**.*

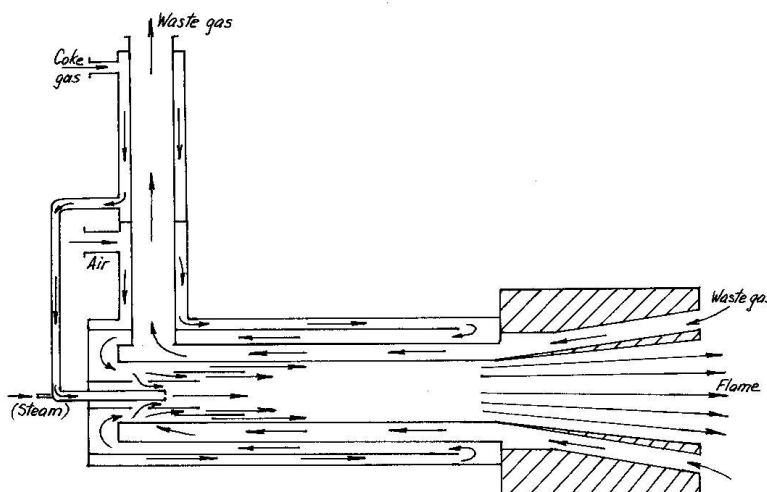


Fig. 1. Principiul constructiv și funcțional al arzătorului recuperativ
The constructive and functional principle of the recuperative burner

Conform acestei scheme, gazele arse aspirate din incinta cuptorului pătrund în corpul arzătorului prin patru canale periferice practicate în piatra ceramică a camerei de ardere și parcurg un traseu cilindric inelar pe lungimea arzătorului. La capătul posterior al arzătorului, gazele arse intră în racordul de evacuare, o construcție metalică tubulară cu pereți dubli. În spațiul inelar al acesteia este insuflat aerul de combustie rece, care, apoi, pătrunde în corpul arzătorului pe trasee cilindrice inelare concentrice, având un perete comun cu cel al deplasării gazelor arse. Circulația celor două fluide despărțite de peretele metalic comun are loc în contracurent. La capătul posterior al arzătorului, aerul de combustie pătrunde în zona centrală a acestuia, unde se produce amestecul combustibilului cu comburantul, amorsarea și dezvoltarea flăcării. Combustibilul (gazul de cocs) rece este introdus prin spațiul inelar al unui tronson al racordului de evacuare a gazelor arse, amplasat în continuarea tronsonului prin care este insuflat aerul rece. După ce se preîncălzește în acest spațiu inelar (prin convecție și radiație), gazul de cocs iese printr-o conductă situată la baza tronsonului și intră în diuza combustibilului, din care este injectat în zona de ardere printr-un jet axial. Aerul de combustie preîncălzit este distribuit în trei trepte: aerul primar, prin intermediul unor orificii radiale, asigurând prima treaptă de amestec cu combustibilul, aerul secundar, prin mai multe orificii axiale, paralele cu direcția de propagare a flăcării, realizând a doua treaptă de amestec și aerul terțiar distribuit printr-un spațiu inelar periferic, continuând cea de-a treia treaptă de amestec. Aerul terțiar se deplasează pe partea interioară a peretelui metalic cilindric, care desparte traseul acestuia de traseul gazelor arse fierbinți, care circulă în contracurent. Prin realizarea a trei trepte de amestec între combustibil și

According to this scheme, the waste gas aspirated from inside the furnace enters in the burner body through four peripheral channels performed in the ceramic stone of the combustion chamber and crosses an annular cylindrical route on the length of the burner. At the posterior end of burner, waste gas enters in the exit connection, a tubular metal construction with double walls. In its annular space is instilled the cold combustion air, which, then, enters in the burner body on concentric annular cylindrical routes, having a common wall with that of waste gas circulation. The circulation of the two fluids separated by the common metal wall takes place in counter current. At the posterior end of the burner, the combustion air enters in its central area, where is produced the mixing between fuel and comburent, the ignition and the development of the flame. The cold fuel (coke gas) is introduced through the annular space of a section of the waste gas exit connection, placed in the continuation of the section through which is instilled the cold air. After the preheating in this annular space (by convection and radiation), the coke gas exits through a pipe placed at the base of section and enters in the fuel nozzle, from which is injected in the combustion area by an axial jet. The preheated combustion air is distributed in three stage: the primary air, through some radial orifices, assuring the first mixing stage with the fuel, the secondary air, through more axial orifices, parallel with the direction of flame propagation, achieving the second mixing stage and the tertiary air distributed through a peripheral annular space, constituting the third mixing stage. The tertiary air circulates on the inner part of the cylindrical metal wall, which separates its route of the hot waste gas route, which circulates in counter current. By the achievement of

aer sunt create condițiile unei foarte bune stabilități în funcționare a flăcării și a reducerii semnificative a emisiilor de noxe (CO, NO_x, SO₂) comparativ cu arzătoarele clasice care funcționează cu gaz de cocs. Flacăra produsă în camera de ardere metalică cilindrică se dezvoltă spre capătul anterior al camerei și este evacuată din arzător cu viteză mare printr-un canal axial tronconic al pietrei ceramice.

4. METODOLOGIA EXPERIMENTĂRII

În vederea experimentării arzătorului recuperativ la funcționarea cu gaz de cocs au fost realizate două arzătoare de tipul celui descris la capitolul 3. Arzătoarele au fost montate la un cuptor de încălzire a semifabricatelor din oțeluri nealiate și slab aliate, cu suprafața utilă a vetrei de 1 m², de la ArcelorMittal Galați, în vederea forjării. Temperatura de încălzire a spațiului de lucru este de 1200-1250°C, durata de încălzire a materialului fiind de 90-120 minute. În general, se utilizează șarjă rece, productivitatea medie a cuptorului fiind de 200 kg/h.

Principala modificare constructivă a cuptorului a fost desființarea recuperatorului metalic multitubular din bolta cuptorului, rolul acestuia fiind preluat de recuperatoarele încorporate în construcția metalică a celor două arzătoare recuperative.

Gazele arse sunt evacuate prin conducte colectoare la coșul existent al cuptorului, prin ejecția realizată cu ajutorul unui ventilator de aer.

Experimentarea noilor arzătoare recuperative la funcționarea cu gaz de cocs (cu puterea calorică inferioară $H_i = 15,27 \text{ MJ/Nm}^3$) s-a efectuat în condiții industriale, cu cuptorul încărcat cu o șarjă rece de semifabricate din oțel nealiat de 400 kg.

Durata încălzirii în cuptor, conform diagramei de încălzire, a fost de 120 minute.

În timpul procesului de încălzire au fost efectuate măsurători și determinări ale următorilor parametri:

- debitul orar și presiunea gazului de cocs;
- debitul orar și presiunea aerului de combustie;
- temperatura în incinta cuptorului;
- temperatura gazelor arse la ieșirea din preîncălzitorul de gaz de cocs;
- temperatura gazului de cocs la intrarea în arzătorul propriu-zis;
- lungimea flăcării.

În afara măsurătorilor efectuate pe durata procesului de încălzire a șarjei în cuptor, s-au determinat experimental valorile debitelor orare maxime și minime de gaz de cocs și valorile corespunzătoare ale presiunii combustibilului la intrarea în corpul arzătorului.

three mixing stages between fuel and air are created the conditions of a very good flame stability in operation and significant reduction of the emissions of pollutants (CO, NO_x, SO₂) compared to the classic burners which operate with coke gas. The flame produced in the combustion cylindrical metal chamber is developed with high speed through an axial channel in the shape of a truncated cone of the ceramic stone.

4. EXPERIMENTATION METHODOLOGY

To test the recuperative burner at the operation with coke gas, two burners of the type described in Chapter 3 were achieved. The burners were fitted on a heating furnace of semi-products from unalloyed and low alloyed steel, with the useful surface of hearth of 1 m², in ArcelorMittal Galati, for forging. The heating temperature of the working space is 1200-1250°C, the duration of material heating being 90-120 minutes. Generally, is used cold charge, the average productivity of furnace being 200 kg/h.

The main constructive modification of furnace was dissolution of the multitubular metal recuperator from the furnace vault, its role being taken by the recuperators embedded in the metal construction of the two recuperative burners. Waste gas is exhausted through the collector pipes to the existing chimney of furnace, by ejection achieved with an air ventilator.

The experiments of the new recuperative burners at the operation with coke gas (with the lower calorific power $H_i = 15.27 \text{ MJ/Nm}^3$) were carried out in industrial conditions, with the furnace loaded with a cold charge of semi-products from non-alloyed steel of 400 kg. The duration of heating into the furnace, according to the heating diagram, was 120 minutes.

During the heating process were carried out measurements and determinations of the following parameters:

- *hourly flow and pressure of the coke gas;*
- *hourly flow and pressure of the combustion air;*
- *temperature inside the furnace;*
- *waste gas temperature at the exit from the coke gas preheater;*
- *coke gas temperature at the entrance in the burner itself;*
- *chemical composition of waste gas inside the furnace;*
- *length of the flame.*

Besides the measurements carried out during the charge heating process into the furnace, they were determined experimentally the values of maximum and minimum hourly flows of coke gas and the corresponding values of fuel pressure at the entrance in the burner body.

5. REZULTATELE EXPERIMENTALE

Tabelul 2 prezintă rezultatele măsurătorilor efectuate pe durata procesului de încălzire a șarjei cu arzătoarele recuperative alimentate cu gaz de cocs.

5. EXPERIMENTAL RESULTS

Table 2 presents the results of measurements carried out during the charge heating process with recuperative burners powered with coke gas.

Tabelul 2. Rezultate experimentale ale procesului de încălzire
Table 2. Experimental results of the heating process

Time [minutes]	Furnace temperature [°C]	Coke gas		Combustion air		Waste gas temperature at the exit from the coke gas preheater [°C]	Coke gas temperature [°C]	Waste gas chemical composition					
		Flow [Nm ³ /h]	Pressure [mbar]	Flow [Nm ³ /h]	Pressure [mbar]			CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [mg/Nm ³]	NO _x [mg/Nm ³]	SO ₂ [mg/Nm ³]	
0	500	32	28	86.3	12	220	20						
10	550	32	28	86.3	12	245	30						
20	610	35	33	94.4	13	270	40						
30	660	40	39	107.8	16	295	45						
40	730	40	39	107.8	16	325	50						
50	780	46	44	124.0	19	350	60	6.0	6.4	97	210	173	
60	860	49	48	132.1	22	385	70						
70	910	49	48	132.1	22	405	80						
80	950	53	53	143.0	24	425	90	5.9	6.5	88	200	160	
90	1010	54	55	145.7	25	450	100						
100	1080	60	68	161.8	29	480	105						
110	1130	66	80	177.9	36	505	110	6.1	6.3	90	207	162	
120	1200	68.8	95	185.5	40	525	120						
Average	850	49.4	-	133.2	-	370	71	6.0	6.4	91.7	205.7	165	

Conform datelor din **Tabelul 2**, procesul de încălzire a semifabricatelor, încărcate la temperatura ambiantă, începe de la temperatura cuptorului de 500°C, deoarece regimul de funcționare al acestuia este continuu. Temperatura medie a cuptorului pe durata procesului (de 120 minute) este de 850°C. Debitul orar al gazului de cocs variază în intervalul 32-68,8 Nm³/h, având o valoare medie de 49,4 Nm³/h. Debitul orar al aerului de combustie este cuprins între 86,3-185,5 Nm³/h, valoarea medie fiind de 133,2 Nm³/h. Temperatura măsurată a gazului de cocs, preîncălzit după ieșirea gazelor arse din corpul arzătorului, atinge valoarea maximă de 120°C la finalul procesului de încălzire din cuptor, valoarea medie calculată fiind de 71°C. Temperatura gazelor arse, după ieșirea din preîncălzitoarele de gaz de cocs aferente celor două arzătoare recuperative, are valori cuprinse între 220 - 525°C, cu o medie de 370°C.

Pe baza datelor rezultate din măsurători și cunoscând productivitatea cuptorului, s-a elaborat bilanțul termic al procesului de încălzire din cuptor (**Tabelul 3**), în condițiile utilizării noilor arzătoare recuperative alimentate cu gaz de cocs.

According to the data from **Table 2**, the heating process of semi-products, loaded at the surrounding temperature, begins from the furnace temperature of 500°C, because its operation regime is continuous. The average temperature of the furnace during the process (of 120 minutes) is 850°C. The hourly flow of coke gas varies in the range 32-68.8 Nm³/h, having an average value of 49.4 Nm³/h. The hourly flow of the combustion air is included between 86.3 - 185.5 Nm³/h, the average value being 133.2 Nm³/h. The measured temperature of coke gas, preheated after the exit of waste gas from the burner body, reaches the maximum value of 120°C at the final of heating process in the furnace, the calculated average value being 71°C. The waste gas temperature, after the exit from the coke gas preheaters of the two recuperative burners, has values included between 220-525°C, with an average of 370°C.

Based on the data resulted from measurements and knowing the furnace productivity, it was carried out the thermal balance of the heating process in furnace (**Table 3**), in the conditions of use the new recuperative burners powered with coke gas.

Tabelul 3. Structura bilanțului termic al cuptorului
 Table 3. The structure of thermal balance of the furnace

Inlets	kJ/kg	%	Outlet	kJ/kg	%
Chemical heat of coke gas	3772.9	99.12	Physical heat of exited materials	843.6	22.16
Physical heat of coke gas	6.9	0.18	Waste gas heat lost	250.5	6.58
Physical heat of combustion air	17.3	0.45	Heat lost through the walls of furnace	274.1	7.20
Physical heat of entered materials	9.3	0.25	Cooling water heat lost	591.6	15.54
			Heat lost by accumulation in the furnace masonry	1502.5	39.48
			Heat lost through waste gas leaks	301.5	7.92
			Error balance	42.6	1.12
Total	3806.4	100.00	Total	3806.4	100.00

Principalii indicatori tehnico-economici sunt randamentul termic și consumul specific de combustibil. Randamentul termic al procesului tehnologic se calculează cu relația [3]:

$$\eta_t = Q_u / Q_{intr} , \quad (1)$$

unde:

Q_u - căldura utilă, adică căldura fizică a semifabricatelor la ieșirea din cuptor, kJ/kg;

Q_{intr} - totalul căldurilor intrate, kJ/kg.

Deci:

$$\eta_t = 843.6 / 3806.4 = 0.2216$$

Comparativ cu randamentul termic al unui proces tehnologic similar desfășurat în cuptorul echipat cu arzătoare clasice și recuperator de căldură independent, care asigură preîncălzirea aerului de combustie la maxim 300°C ($\eta_t = 0,1947$), creșterea eficienței energetice a procesului de încălzire este semnificativă.

Consumul specific de combustibil (gaz de cocs) cu puterea calorifică inferioară de 15,27 MJ/Nm³ se calculează cu relația [3]:

$$C_{sc} = D_c / P, \text{ Nm}^3/\text{t} \quad (2)$$

unde:

D_c - debitul orar mediu de gaz de cocs pe durata procesului de încălzire, Nm³/h;

P - productivitatea cuptorului, t/h.

Deci:

$$C_{sc} = 49.4 / 0.2 = 247 \text{ Nm}^3/\text{t} \text{ (or } 3771.7 \text{ MJ/t)}$$

Consumul specific de gaz de cocs realizat cu arzătoare clasice era 280,1 Nm³/t (sau 4277 MJ/t). Așadar,

The main technical and economic indicators are the thermal efficiency and the specific consumption of fuel.

The thermal efficiency of the technological process is calculated with the formula [3]:

where:

Q_u - the useful heat, i.e. the physical heat of semi-products at the discharge from the furnace, kJ/kg;

Q_{intr} - the total entered heats, kJ/kg.

So:

Compared to the thermal efficiency of a similar technological process carried out in the furnace equipped with classic burners and an independent heat recuperator, which assures the preheating of combustion air of maximum 300°C ($\eta_t = 0.1947$), the increasing of the energy efficiency of heating process is significant.

The specific consumption of fuel (coke gas with the lower calorific power of 15.27 MJ/Nm³) is calculated with the relationship [3]:

where:

D_c - average hourly flow of the coke gas during heating process, Nm³/h;

P - furnace productivity, t/h.

So:

The specific consumption of coke gas achieved with classic burner was 280.1 Nm³/ t (or 4277 MJ/t).

prin modernizarea cuptorului de încălzire de la ArcelorMittal Galați, se obține o diminuare a consumului specific de combustibil cu 11,8%.

După cum s-a precizat la capitolul 4, s-au efectuat măsurători în condiții industriale pe cuptorul de încălzire ale parametrilor funcționali ai arzătorului recuperativ pentru identificarea caracteristicilor tehnice ale acestuia.

În **Tabelul 4** sunt prezentate aceste caracteristici.

Therefore, by the modernization of heating furnace in ArcelorMittal Galati, is obtain a diminishing of specific consumption of fuel with 11.8%.

As specified in Chapter 4, we have carried out measurements in industrial conditions on the heating furnace of the functional parameters of the recuperative burner to identify its technical characteristics.

*These characteristics are presented in **Table 4**.*

Tabelul 4. Caracteristicile tehnice ale arzătorului recuperativ
Table 4. Technical characteristics of the recuperative burner

Name	Unit	Value
Nominal thermal power	kW	105
Hourly flow of coke gas:		
- maximum	Nm ³ /h	34.4
- nominal	Nm ³ /h	25.0
- minimum	Nm ³ /h	5.0
Coke gas pressure:		
- maximum	mbar	95.0
- nominal	mbar	49.3
- minimum	mbar	3.8
Maximum preheating temperature of coke gas	°C	120
Hourly flow of combustion air:		
- maximum	Nm ³ /h	92.8
- nominal	Nm ³ /h	67.4
- minimum	Nm ³ /h	6.8
Air pressure:		
- maximum	mbar	40.0
- nominal	mbar	22.5
- minimum	mbar	2.2
Maximum preheating temperature of air in the burner body (determined by calculus)	°C	400
Coefficient of air excess	-	1.35
Maximum waste gas temperature at the exit from the coke gas preheater	°C	525
Length of the flame:		
- at the maximum thermal regime	m	0.85
- at the nominal thermal regime	m	0.70
- at the minimum thermal regime	m	0.20
Flame temperature:		
- at the maximum thermal regime	°C	1380
- at the nominal thermal regime	°C	1320
- at the minimum thermal regime	°C	730
Emissions of pollutants:		
- CO	mg/Nm ³	max. 97
- NO _x	mg/Nm ³	max. 210
- SO ₂	mg/Nm ³	max. 173

Dacă temperatura de preîncălzire a gazului de cocs înaintea intrării în focarul arzătorului a fost determinată prin măsurători efectuate cu ajutorul unui termometru introdus în conducta de aducțiune la intrarea în corpul arzătorului, temperatura de preîncălzire a aerului de combustie în corpul arzătorului nu a putut fi măsurată. De aceea, a fost

If the preheating temperature of coke gas before entering in the burner focus were determined by measurements carried out with a thermometer introduced in the adduction pipe at the entrance in burner body, the preheating temperature of combustion air in burner body could not be measured. That's why, it was necessary to determine this

necesară determinarea acestui parametru funcțional prin calcul. Metodologia de calcul este prezentată în cele ce urmează.

Se au în vedere parametrii cunoscuți ai procesului de preîncălzire a gazului de cocs:

- debitul maxim de gaz de cocs al cuptorului: $D_{gk} = 68,8 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (vezi **Tabelul 2**);
- temperatura de intrare în recuperator a gazului de cocs: $t_{gki} = 20^\circ\text{C}$ (vezi **Tabelul 2**);
- temperatura maximă de preîncălzire în recuperator a gazului de cocs: $t_{gke} = 120^\circ\text{C}$ (vezi **Tabelul 2**);
- temperatura gazelor arse la ieșirea din recuperator: $t_{gae} = 525^\circ\text{C}$ (vezi **Tabelul 2**);
- suprafața de schimb de căldură între gazele arse și gazul de cocs: $S = 0,248 \text{ m}^2$;
- coeficientul global de schimb de căldură al recuperatorului: $K = 83,7 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ (estimat prin proiectare).

Se calculează cantitatea de căldură preluată de gazul de cocs preîncălzit [4, 5]:

$$Q_{gk} = D_{gk} \cdot (c_{gke} \cdot t_{gke} - c_{gki} \cdot t_{gki}), \text{ kJ/h} \quad (3)$$

unde:

c_{gke} , c_{gki} - ăldurile specifice ale gazului de cocs la temperaturile de ieșire și, respectiv, intrare în recuperator, $\text{kJ/Nm}^3\cdot^\circ\text{C}$.

Deci:

$$Q_{gk} = 68,8 \cdot (1.409 \cdot 120 - 1.402 \cdot 20) = 9707.7 \text{ kJ/h}$$

Se determină valoarea diferenței medii logaritmice de temperatură (Δt_{med}) cu relația următoare [4]:

$$\Delta t_{med} = Q_{gk} / K \cdot S, \text{ }^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$\Delta t_{med} = 9707.7 / 83.7 \cdot 0.248 = 467^\circ\text{C}$$

Pe de altă parte, relația de calcul care definește Δt_{med} [5] este:

$$\Delta t_{med} = (t_{gai} - t_{gke} - t_{gae} + t_{gki}) / \ln [(t_{gai} - t_{gke}) / (t_{gae} - t_{gki})], \text{ }^\circ\text{C} \quad (5)$$

unde:

t_{gai} - temperatura gazelor arse la intrarea în recuperator, $^\circ\text{C}$.

Temperatura gazelor arse la intrarea în recuperator (t_{gai}) reprezintă singura necunoscută a ecuației (5). Prin rezolvarea acestei ecuații se calculează valoarea t_{gai} , aceasta fiind 549°C . Această temperatură este identică cu temperatura gazelor arse la ieșirea din corpul arzătorului recuperativ.

În continuare, se efectuează calculul transferului de căldură între gazele arse fierbinți intrate în corpul

funcțional parametru by calculus. The methodology of calculation is presented in the following.

They are taken into account the known parameters of the preheating process of coke gas:

- the maximum flow of coke gas of furnace: $D_{gk} = 68.8 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (see **Table 2**);
- temperature of entrance coke gas in recuperator: $t_{gki} = 20^\circ\text{C}$ (see **Table 2**);
- the maximum temperature of preheating the coke gas in recuperator: $t_{gke} = 120^\circ\text{C}$ (see **Table 2**);
- waste gas temperature at the exit from recuperator: $t_{gae} = 525^\circ\text{C}$ (see **Table 2**);
- surface of heat exchange between waste gas and coke gas: $S = 0.248 \text{ m}^2$;
- overall coefficient of heat exchange of recuperator: $K = 83.7 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ (estimated by design).

It is calculated the heat amount taken over by the preheated coke gas [4, 5]:

where:

c_{gke} , c_{gki} - pecific heats of cole gas at the exit temperature and, respectively, at the entrance in recuperator, $\text{kJ/Nm}^3\cdot^\circ\text{C}$.

So:

The value of logarithmic average difference of temperature (Δt_{med}) is determined with the following relationship [4]:

On the other hand, the relationship which defines Δt_{med} [5] is:

where:

t_{gai} - waste gas temperature at the entrance in recuperator, $^\circ\text{C}$.

The waste gas temperature at the entrance in recuperator (t_{gai}) represents the single unknown of equation (5). By solving this equation the value t_{gai} is calculated, being 549°C . This temperature is identical with the waste gas temperature at the exit from the recuperative burner body.

Further, is made calculus of the heat transfer between the hot waste gas entered in the burner body and

arzătorului și aerul de combustie rece.

Se cunosc următorii parametri:

- temperatura gazelor arse la intrarea în corpul arzătorului: $t_{gai} = 1200^{\circ}\text{C}$;
- temperatura gazelor arse la ieșirea din corpul arzătorului: $t_{gae} = 549^{\circ}\text{C}$ (calculată anterior);
- randamentul termic al transferului de căldură gaze arse-aer: $\eta = 0,95$;
- debitul de aer de combustie corespunzător regimului termic maxim al cuptorului:
 $D_a = 185,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$;
- temperatura aerului la intrarea în corpul arzătorului: $t_{ai} = 20^{\circ}\text{C}$;
- debitul de gaze arse aspirat prin corpul celor două arzătoare recuperative la regimul maxim al cuptorului; $D_{ga} = 93,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (se calculează ca diferență între debitul teoretic de gaze arse produse la regimul maxim, de $206,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$ și cantitatea măsurată de gaze arse pierdută prin rabufnire prin neetanșeitățile dintre ușa de încărcare și pragul ușii, de $113 \text{ Nm}^3/\text{h}$);
- suprafața totală de schimb de căldură între gazele arse și aer: $S = 1,10 \text{ m}^2$.

Ecuția bilanțului termic [3] al schimbătorului de căldură gaze arse-aer din corpul arzătoarelor este:

$$D_a \cdot (c_{ae} \cdot t_{ae} - c_{ai} \cdot t_{ai}) = \eta \cdot D_{ga} \cdot (c_{gae} - c_{gai}) \quad (6)$$

unde:

c_{ae} - căldura specifică a aerului preîncălzit în corpul arzătorului, $\text{kJ}/\text{Nm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$;

t_{ae} - temperatura aerului preîncălzit în corpul arzătorului, $^{\circ}\text{C}$.

Se are în vedere că $c_{ae} \cdot t_{ae} = i_{ae}$ (kJ/Nm^3), adică entalpia aerului preîncălzit, care este singura necunoscută a ecuației (6).

Așadar:

$$i_{ae} = [\eta \cdot D_{ga} \cdot (c_{gai} \cdot t_{gai} - c_{gae} \cdot t_{gae}) + D_a \cdot c_{ai} \cdot t_{ai}] / D_a$$

Prin înlocuirea valorilor cunoscute se obține:

$$i_{ae} = [0,95 \cdot 93,9 \cdot (1,534 \cdot 1200 - 1,429 \cdot 549) + 185,5 \cdot 1,302 \cdot 20] / 185,5 = 534 \text{ kJ}/\text{Nm}^3$$

Temperatura aerului (t_{ae}) se determină din tabele [6] în funcție de valoarea entalpiei calculate, având valoarea: $t_{ae} = 400^{\circ}\text{C}$.

Deci, cantitatea de căldură preluată de aerul de combustie este:

$$Q_a = D_a \cdot (i_{ae} - c_{ai} \cdot t_{ai}), \text{ kJ}/\text{h} \quad (7)$$

$$Q_a = 185,5 \cdot (534 - 1,302 \cdot 20) = 94226,6 \text{ kJ}/\text{h}$$

Diferența medie logaritmică de temperatură (Δt_{med}) corespunzătoare schimbătorului de căldură gaze arse-

the cold combustion air.

They are known the following parameters:

- waste gas temperature at the entrance in burner body: $t_{gai} = 1200^{\circ}\text{C}$;
- waste gas temperature at the exit from the burner body: $t_{gae} = 549^{\circ}\text{C}$ (calculate above);
- thermal efficiency of the heat transfer waste gas-air: $\eta = 0,95$;
- combustion air flow corresponding to the maximum thermal regime of the furnace:
 $D_a = 185,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$;
- air temperature at the entrance in burner body: $t_{ai} = 20^{\circ}\text{C}$;
- waste gas flow aspirated through the body of the two recuperative burners at the maximum regime of furnace: $D_{ga} = 93,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (it is calculated as difference between the theoretic flow of waste produced at the maximum regime, of $206,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$ and the measured amount of waste gas lost by outburst through the leaks between the loading door and the frame of the door, of $113 \text{ Nm}^3/\text{h}$);
- the total surface of heat exchange between waste gas and air: $S = 1,10 \text{ m}^2$.

The equation of thermal balance [3] of the heat exchanger waste gas-air from the burner body is:

where:

c_{ae} - specific heat of preheated air in the burner body, $\text{kJ}/\text{Nm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$;

t_{ae} - air temperature preheated in the burner body, $^{\circ}\text{C}$.

It is taken into account that $c_{ae} \cdot t_{ae} = i_{ae}$ (kJ/Nm^3), i.e. the preheated air enthalpy, which is the single unknown of equation (6).

Therefore:

By replacement of the known values is obtained:

The air temperature (t_{ae}) is determined from tables [6] depending on the value of calculated enthalpy, having the value: $t_{ae} = 400^{\circ}\text{C}$.

Then, the amount of heat taken over by the combustion air is:

The logarithmic average difference of temperature (Δt_{med}) corresponding to the heat exchanger waste

aer se calculează cu relația:

$$\Delta t_{med} = (t_{gai} - t_{ae} - t_{gae} + t_{ai}) / \ln [(t_{gai} - t_{ae}) / (t_{gae} - t_{ai})], \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

$$\Delta t_{med} = (1200 - 400 - 549 + 20) / \ln [(1200 - 400) / (549 - 20)] = 664^\circ\text{C}$$

Cunoscând suprafața totală de schimb de căldură între gazele arse și aer, $S = 1,10 \text{ m}^2$ (vezi **Tabelul 2**), se poate calcula valoarea coeficientului global de schimb de căldură între gaze și aer [5]:

$$K = Q_a / S \cdot \Delta t_{med}, \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$K = 94226.6 / 1.10 \cdot 664 = 129 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

Valoarea coeficientului global de schimb de căldură între gazele arse fierbinți și aerul de combustie rece se situează la un nivel înalt de performanță, confirmând faptul că proiectarea recuperatorului încorporat în corpul arzătorului recuperativ a fost realizată pentru un randament termic foarte bun.

Examinând caracteristicile și parametrii funcționali ai arzătorului recuperativ, prezentați în Tabelul 3, rezultă că acesta se încadrează în categoria arzătoarelor performante implementate în industria metalurgică. Arzătorul are o foarte bună stabilitate în funcționare într-un domeniu al debitelor de combustibil foarte larg (raportul de reglaj debit minim/debit maxim este 1/6,9). De asemenea, emisiile de noxe (CO , NO_x , SO_2) au valori suficient de reduse, încadrându-se în limitele stabilite de normele legale [7].

6. EFICIENȚA ECONOMICĂ ȘI IMPACTUL ASUPRA MEDIULUI

Analizând din punct de vedere economic eficiența noului tip de arzător recuperativ alimentat cu gaz de cocs, destinat cuptoarelor metalurgice de încălzire, trebuie să avem în vedere faptul că gazul de cocs este un gaz rezidual cu proprietăți combustibile rezultat din procesul de cocsificare a cărbunilor, adică dintr-o secvență a fluxului tehnologic specific combinatelor siderurgice integrate. Prin urmare, utilizarea acestui combustibil gazos este posibilă doar la instalațiile energo-tehnologice sau energetice din perimetrul uzinei sau, eventual, din imediata vecinătate a acesteia, în condițiile în care conducta magistrală de alimentare cu gaz de cocs poate deservi zona respectivă.

Desigur, în cadrul unui combinat siderurgic integrat nevoia de energie în instalațiile proprii este mult mai mare decât cantitățile de gaze combustibile reziduale (în categoria cărora intră gazul de cocs) rezultate din procese tehnologice interne. Prin urmare, obținerea unor economii din această categorie de combustibili este binevenită, existând posibilitatea redirectionării

gas-air is calculated with the relationship:

Knowing the total surface of heat exchange between waste gas and air, $S = 1.10 \text{ m}^2$ (see **Table 2**), it can calculate the value of the overall coefficient of heat exchange between gases and air [5]:

The value of the overall coefficient of heat exchange between the hot waste gas and the cold combustion air stands at a high level of performance, confirming that the design of the recuperator embedded in the recuperative burner body was achieved for a very high thermal efficiency.

Examining the characteristics and functional parameters of the recuperative burner, presented in **Table 3**, results that this falls into the category of advanced burners implemented in metallurgy. The burner has a very good stability in operation in a very large fuel flow area (the adjustment ratio minimum flow/ maximum flow is 1/6.9). Also, the emissions of pollutants (CO , NO_x , SO_2) have enough low values, falling in the limits established by lawful norms [7].

6. ECONOMIC EFFICIENCY AND THE IMPACT ON ENVIRONMENT

Analysing from the economic point of view the efficiency of the new type of recuperative burner powered with coke gas, destined to the heating metallurgical furnaces, must have in view that the coke gas is a waste gas with combustible properties resulted from the coking process of coals, i. e. from a stage of the technological flow, particular to the integrated iron and steel plant. Therefore, the use of this gaseous fuel is possible only at the energy-technological or energy installations from the plant perimeter, or, eventually, from its immediate vicinity, in conditions in which the main supply with coke gas can serve the area.

Certainly, in an integrated iron and steel plant the need for energy in the own installations is much higher than the amounts of waste combustible gases (in whose category is included the coke gas) resulted from internal technological processes. Therefore, obtaining of some fuel savings from this category is welcome, emphasizing the possibility to redirect the fuel to other consumers in the plant. Then, the value of

combustibilului către alți consumatori din uzină. Deci, valoarea economiei de gaz de cocs în balanța energetică a combinatului siderurgic integrat este practic nulă. El poate fi evaluat prin echivalarea conținutului de energie cu al unui combustibil primar, cumpărat din afara uzinei (exemplu: gaz natural sau cărbune).

Astfel, implementarea noului tip de arzător recuperativ alimentat cu gaz de cocs la un cuptor de încălzire a semifabricatelor pentru forjare de la ArcelorMittal Galați a evidențiat posibilitatea economisirii a 33 Nm^3 gaz de cocs/t semifabricate, adică 11,8% comparativ cu utilizarea arzătoarelor clasice la același tip de cuptor. Având în vedere că raportul puterilor calorifice între gazul de cocs și gazul natural este $15,27/35,5 = 0,43$ și cunoscând că valoarea a 1 Nm^3 gaz natural este 0,25 €, rezultă că economia de gaz de cocs obținută este echivalentă cu $14,19 \text{ Nm}^3$ gaz natural/t semifabricate și valorează 3,55 €/t semifabricate.

La o producție anuală a cuptorului de 800 t semifabricate, rezultă că valoarea economiei ajunge la 2840 €/an.

Impactul asupra mediului este mai important decât eficiența economică a implementării arzătoarelor recuperative deoarece, prin tehnicile adoptate de îmbunătățire a procesului de ardere, au fost diminuate emisiile de noxe (CO , NO_x și SO_2) degajate în atmosferă. Astfel, emisiile de CO au fost reduse la maxim 97 mg/Nm^3 , emisiile de NO_x s-au diminuat la maxim 210 mg/Nm^3 , iar cele de SO_2 au fost reduse sub 173 mg/Nm^3 , adică sub limitele maxime admise de normele legale [7].

În general, în cazul utilizării drept combustibil a gazului de cocs există probleme majore legate de cantitățile mari de emisii de noxe evacuate în atmosferă, care depășesc limitele maxime admise.

7. CONCLUZII

1. Gazul de cocs, după epurarea chimică, constituie cel mai important produs al descompunerii pirogenetice a cărbunilor, având înglobată o cantitate de energie care variază între 14,6-18,0 MJ/Nm^3 .
2. Gazul de cocs poate fi utilizat în instalații industriale de ardere doar în perimetrul combinatelor siderurgice integrate.
3. Soluțiile tehnice adoptate de autori pentru realizarea unei instalații de ardere performante alimentate cu gaz de cocs sunt: preîncălzirea aerului de combustie la maxim 400°C într-un recuperator înglobat în corpul arzătorului, preîncălzirea gazului de cocs la maxim 120°C într-un recuperator metalic tubular amplasat în continuarea racordului de evacuare a gazelor arse din arzător și distribuția aerului de combustie în focar în trei trepte de amestec cu gazul de cocs.

coke gas saving in the energy balance of the integrated iron and steel plant is practically zero. It can be evaluated equivalence of its energy content with that of a primary fuel, bought outside plant (example: natural gas or coal).

Thus, the implementation of the new type of recuperative burner powered with coke gas at a heating furnace of semi-products for forging in ArcelorMittal emphasized the opportunity to save 33 Nm^3 coke gas/t semi-products, i. e. 11.8% compared to the use of the classic burners at the same type of furnace. Considering that the calorific powers ratio between coke gas and natural gas is $15.27/35.5 = 0.43$ and knowing that the value of 1 Nm^3 natural gas is 0.25 €, results that the coke gas economy is equivalent with 14.19 Nm^3 natural gas/t semi-products and has the value of 3.55 €/t semi-products.

At an annual production of furnace of 800 t semi-products, results that the economy value reaches to 2840 €/year.

The impact on environment is more important than the economic efficiency of implementation the recuperative burners because, by the adopted techniques of improvement the combustion process, the emissions of pollutants (CO , NO_x and SO_2) exhausted in atmosphere were diminished. Thus, the CO emissions were reduced to maximum 97 mg/Nm^3 , the NO_x emissions were diminished to maximum 210 mg/Nm^3 and that of SO_2 were reduced under 173 mg/Nm^3 , i. e. under the maximum limits allowed by lawful norms [7].

Generally, by using of coke gas as fuel there are major problems in conjunction with the high amounts of emissions of pollutants exhausted in atmosphere, which exceed the allowed maximum limits.

7. CONCLUSIONS

1. The coke gas, after the chemical cleaning, constitutes the most important product of the coal pyrogenic decomposition, having an energy content which varies between 14.6-18.0 MJ/Nm^3 .
2. The coke gas can be used in industrial combustion installations only in the perimeter of the integrated iron and steel plants.
3. The technical solutions adopted by authors to achieve an advanced combustion installation powered with coke gas are: preheating at maximum 400°C of the combustion air into a recuperator embedded in the burner body, preheating at maximum 120°C of coke gas in a tubular metal recuperator placed in the continuation of the connection of waste gas exhausting from the burner and distribution of combustion air in focus in three stages of mixing with coke gas.

4. Noul tip de arzător recuperativ a fost testat în condiții industriale la un cuptor de încălzire a semifabricatelor pentru forjare, cu vatră fixă de 1 m², de la ArcelorMittal Galați.
 5. Comparativ cu utilizarea inițială a arzătoarelor clasice, implementarea arzătoarelor recuperative a condus la reducerea consumului specific de gaz de cocs de la 280,1 Nm³/t la 247 Nm³/t, adică cu 11,8% și îmbunătățirea randamentului termic al procesului tehnologic de la 0,1947 la 0,2216.
 6. Datorită tehnicilor adoptate de îmbunătățire a procesului de ardere, au fost diminuate emisiile de noxe (CO, NO_x, SO₂) degajate în mediul ambiant sub limitele maxime admise de normele legale.
4. *The new type of recuperative burner was tested in industrial conditions at a heating furnace of semi-products for forging, with fixed hearth of 1 m², in ArcelorMittal Galati.*
 5. *Compared to the initial using of classic burners, the implementation of recuperative burners leads to the reduction of specific consumption of coke gas from 280.1 Nm³/t to 247 Nm³/t, i.e. with 11.8% and the improvement of the thermal efficiency of the technological process from 0.1947 to 0.2216.*
 6. *Due to the adopted techniques of improvement of combustion process, the emissions of pollutants (CO, NO_x, SO₂) exhausted in the environment were diminished under the maximum limits allowed by the lawful norms.*

BIBLIOGRAFIE / REFERENCES

- [1] **Gh. SURUGIU, L. PĂUNESCU, A. GABA** - *Arzător recuperativ performant pentru cuptoare de încălzire*, Cercetări Metalurgice și de Noi Materiale, vol. XXIII, nr. 3, 2015.
- [2] * * * - *Hotwork recuperative burner (HRB)*, Talec Combustion Company, 2015.
<http://www.taleccombustion.co.za>
- [3] * * * - *Normativ privind întocmirea și analiza bilanșurilor energetice* - PE 902/86, ICEMENERG, București, 1995 (reeditat).
- [4] **D. ȘTEFĂNESCU, M. MARINESCU, A. DĂNESCU** - *Transferul de căldură în tehnică*, vol. I, Editura Tehnică, București, 1982.
- [5] **A. GABA** - *Transferul de căldură în instalații industriale*, Editura Biblioteca, Târgoviște, 2004.
- [6] **K. RAŽNJEVIĆ** - *Tabele și diagrame termodinamice*, Editura Tehnică, București, 1978.
- [7] * * * - *Ordinul nr. 462*, Ministerul Apelor, Pădurilor și Protecției Mediului, Guvernul României, București, 1993.