

**INSTALAȚIE DE ARDERE
CU CONȚINUT REDUS DE NO_x
ÎN GAZELE ARSE
PENTRU INDUSTRIA METALURGICĂ**

**COMBUSTION INSTALLATION
WITH LOW NO_x IN WASTE GASES
FOR METALLURGY**

A. GABA¹, L. PĂUNESCU², M.P. MUNTEANU³

¹Universitatea Valahia Târgoviște

²CERMAX 2000 PATENTS SRL București

³Institutul de Cercetări Metalurgice București

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

REZUMAT / ABSTRACT

În lucrare sunt abordate probleme legate de reducerea emisiilor de noxe (NO_x, CO) din gazele arse rezultate în urma proceselor de ardere ale cuptoarelor de încălzire din industria metalurgică. Ținând seama de metodele cunoscute pe plan mondial, colectivul de autori a re-proiectat un tip de arzător existent, utilizând metoda distribuției etapizate a combustibilului (gaz natural, respectiv, gaz de cocs) și aerului de combustie. Rezultatele experimentale au confirmat justetea soluției tehnice, emisiile de NO_x și CO fiind diminuate sub valorile limită admise de legislație.

The paper approaches issues related to reducing emissions of pollutants (NO_x, CO) in waste gases resulting from combustion processes of heating furnaces in metallurgy. Considering the methods known worldwide, the authors' team redesigned an existing type of burner using the method of staged distribution of fuel (natural gas, respectively, coke gas) and combustion air. The experimental results confirmed the effectiveness of the technical solution, the NO_x and CO emissions being reduced under the limit values admitted by legislation.

Key words: nitrogen oxides, carbon monoxide, burner, staged distribution, environment

1. INTRODUCERE

Oxizii de azot, denumiți global NO_x și care includ în proporție dominantă monoxidul de azot (NO), în mai mică măsură dioxidul de azot (NO₂) și în proporții foarte mici alte tipuri de oxizi de azot (N₂O, N₂O₄, N₂O₅), constituie poluanți periculoși pentru mediul ambiant.

Aceștia se formează în procese de combustie care utilizează drept comburant aerul, fiind cel mai adesea rezultatul activităților industriale, producerii energiei electrice în termocentrale, funcționării motoarelor cu ardere internă ale autovehiculelor în trafic etc.

Formarea oxizilor de azot este favorizată de temperaturi ridicate la care se desfășoară procesul de ardere, de durata de menținere a acestor temperaturi, nivelul ridicat de turbulență și cantitatea mare de oxigen în exces față de necesarul stoichiometric al procesului de ardere.

1. INTRODUCTION

The nitrogen oxides, overall named NO_x and which include in dominant proportion nitrogen monoxide (NO), to a lesser extent nitrogen dioxide (NO₂) and in very small proportions other nitrogen oxides types (N₂O, N₂O₄, N₂O₅), constitute dangerous pollutants for the environment.

They are formed in combustion processes that use air as comburent, being most often the result of industrial activities, electricity production in power plants, operation of internal combustion engines of vehicles in traffic etc.

The formation of nitrogen oxides is favored by high temperatures at which the combustion process takes place, duration of maintaining these temperatures, the high level of turbulence and the large amount of oxygen in excess toward of stoichiometric requirement of the combustion process.

Oxizii de azot sunt responsabili pentru formarea smogului în zonele industriale și urbane, a ploilor acide, deteriorarea calității apei, efectul de seră etc. Populația expusă acestui tip de noxe poate avea dificultăți respiratorii, iritații ale căilor respiratorii, disfuncții ale plămânilor. Vegetația este afectată prin moartea țesuturilor plantelor, iar animalele suferă de boli pulmonare și reducerea imunității.

Datorită efectelor nocive pe care le au oxizii de azot asupra mediului au fost reglementate prin lege nivele limită admisibile pentru concentrația NO_x în atmosferă.

Astfel, în România, prin Legea nr. 104/2011 este stabilit nivelul maxim admisibil al NO_x emis în atmosferă la valoarea de 350 mg/Nm^3 (pentru 3% vol. de oxigen în gazele arse) [1].

2. MECANISMUL FORMĂRII OXIZILOR DE AZOT

În general, procesul de formare a NO_x se datorează fie condițiilor termice (temperatură ridicată a procesului de ardere), prin care azotul din aerul de combustie reacționează cu oxigenul în exces provenit din aer, fie conținutului de azot al combustibilului, prin care azotul din combustibil reacționează cu oxigenul în exces provenit din aer.

Primul tip de formare a NO_x , datorat condițiilor termice, a fost studiat în profunzime și este foarte bine înțeles. Formarea NO_x necesită temperaturi foarte înalte și depinde exponențial de temperatură. Deoarece procesul se desfășoară foarte neregulat, așa numitele "puncte fierbinți", zone locale cu temperaturi mai înalte decât medie a procesului, pot produce efecte foarte diferite în ceea ce privește cantitatea de NO_x rezultată.

Alți factori importanți care influențează formarea NO_x sunt: durata de menținere a combustiei la temperatură înaltă, gradul de turbulență a reacției de combustie și cantitatea de oxigen în exces.

Procesul de formare a NO_x este, în principal, rezultatul desfășurării a trei reacții chimice, care împreună constituie așa numitul mecanism Zeldovich [2]:



Puternica triplă legătură în molecula de azot necesită temperatură înaltă pentru rupere și ecuația (1) va determina rata de formare a NO_x .

Producerea NO_x termic este uzual dominantă la temperaturi de peste 1400 K, atingând potențialul maxim la peste 1900 K [2].

The nitrogen oxides are responsible for smog in industrial and urban areas, acid rain, deterioration of water quality, greenhouse effect etc. Population exposed to this type of pollutants can have respiratory difficulties, respiratory irritations, lungs dysfunctions. Vegetation is affected by plants tissue death and animals suffer from lung diseases and reduction of immunity.

Because of their harmful effects on the environment of nitrogen oxides, allowable limits for NO_x concentration level in the atmosphere have been regulated by law.

Thus, in Romania, by Law no. 104/2011, it sets the maximum allowable NO_x in atmosphere at the value of 350 mg/Nm^3 (for 3% vol. oxygen in waste gases) [1].

2. MECHANISM OF NITROGEN OXIDES FORMATION

Generally, the process of NO_x formation is due either to thermal conditions (high temperature of combustion process), through which nitrogen from combustion air reacts with oxygen in excess in air, or to nitrogen content of fuel, through which nitrogen from fuel reacts with oxygen in excess in air.

The first NO_x formation type, due the thermal conditions, has been studied deeply and is very well understood. NO_x formation requires very high temperatures and depends exponentially on temperature. Because the process is very irregular, so-called "hot spots", local areas with temperatures higher than the average temperature of the process, can produce very different effects on the amount of NO_x resulted.

Other important factors that influence NO_x formation are: duration of maintaining the high temperature combustion, the degree of turbulence of the combustion reaction and the amount of oxygen in excess.

The NO_x formation process is, mainly, the result of three chemical equations which together contribute the so-called Zeldovich mechanism [2]:

The strong triple connection in nitrogen molecule requires high temperature for breaking and equation (1) will determine NO_x formation rate.

NO_x thermal production is usually dominant at temperatures of over 1400 K, reaching the maximum potential at over 1900 K [2].

3. METODE DE REDUCERE A EMISIILOR NO_x ÎN INSTALAȚII DE ARDERE

Conform literaturii de specialitate [3], una din metodele importante utilizate pentru emisii reduse de NO_x ale arzătoarelor este distribuția etapizată a aerului de combustie. Arzătoarele sunt proiectate să distribuie aer în trei trepte, dintre care ultima distribuție se realizează în zona de reducere a flăcării, după suficient timp de la realizarea primului contact dintre combustibil și aerul primar, care produce amorsarea arderii. Distribuția controlată a aerului terțiar contribuie la reducerea emisiilor de NO_x și nu produce schimbări globale semnificative asupra performanțelor arzătorului. În general, proporții mai mari de aer distribuit etapizat conduce la diminuări ale emisiilor de NO_x.

O altă metodă pentru reducerea emisiilor de NO_x este metoda distribuției etapizate a combustibilului [3]. Prin această metodă, o parte a combustibilului și întreaga cantitate necesară de aer sunt amestecate în prima zonă de ardere. În această zonă se produce combustia rapidă într-o atmosferă săracă din punct de vedere energetic, cu un nivel ridicat al excesului de aer, ceea ce conduce la diminuarea temperaturii flăcării și, implicit, emisii reduse de NO_x.

Combustibilul pentru cea de-a doua etapă de ardere este injectat în zona de ardere la presiune ridicată, prin mai multe diuze poziționate radial. Datorită vitezei ridicate, combustibilul antrenează gaze arse și asigură amestecul rapid cu produsele de ardere din prima etapă.

Gazele arse intrate favorizează debitul de gaze recirculate, care oferă mai multe avantaje:

- temperatura de ardere în cea de-a doua zonă de combustie este diminuată;
- transferul de căldură are loc între zonele de ardere primară și secundară, temperatura de ardere fiind redusă;
- produsele de ardere antrenate reduc presiunea parțială a oxigenului la un nivel mai redus decât s-ar întâlni în mod normal; aceasta întârzie formarea NO_z din cauza scăderii disponibilului de oxigen.

Conform [4], reducerile emisiilor de NO_x sunt de peste 75% pentru arzătoare proiectate să distribuie combustibilul etapizat, comparativ cu arzătoarele convenționale.

Spre deosebire de NO_x datorat condițiilor termice, a cărui formare este favorizată de temperatura înaltă a desfășurării procesului de ardere, în cazul NO_x datorat prezenței azotului în componența combustibilului, formarea NO_x depinde într-o mică măsură de temperatură, dar este influențată puternic de disponibilul de oxigen în exces din aerul de combustie. Așadar, reducând temperatura maximă a flăcării se reduce posibilitatea formării NO_x datorat condițiilor

3. METHODS OF NO_x EMISSIONS REDUCTION IN COMBUSTION INSTALLATIONS

According to literature [3], one of the important methods used for low NO_x emissions of burners is the staged distribution of combustion air. Burners are designed to distribute air in three stages of which the last distribution is achieved in the reduction area of flame, after sufficient time to achieve the first contact between fuel and primary air, which produce the ignition of combustion. The controlled distribution of the tertiary air contributes to reduce NO_x emissions and does not produce significant overall changes on burner performances. Generally, larger proportions of air staged distributed leads to diminishing of NO_x emissions.

Another method for reducing NO_x emissions is the method of staged distribution of fuel [3]. By this method, a part of fuel and the overall required air amount are mixed in the first combustion area. In this area the rapid combustion is produced into a low energy atmosphere, with a high level of air excess, leading to diminishing of flame temperature and, implicitly, low NO_x emissions.

The fuel for the second combustion stage is injected into the combustion area, at a high pressure, through more radial nozzles. Due to the high speed, the fuel entrains waste gases and assures rapidly the mixture with the combustion products of the first stage.

The entered waste gases favors the recirculated flow gases, that offer more advantages:

- *the combustion temperature in the second combustion area is diminished;*
- *the heat transfer takes place between the primary and second combustion area, the combustion temperature being reduced;*
- *the entrained combustion products reduce the partial pressure of oxygen to a lower level than would normally meet; this delays the NO_x formation because the reducing of available oxygen.*

According to [4], the reducing of NO_x emissions are of over 75% for burners designed to staged distribute the fuel, compared to the conventional burners.

Unlike the NO_x term, whose formation is favored by the high temperature of combustion process, in the case of NO_x due to the nitrogen presence in the fuel composition, NO_x formation depends on the temperature in a small measure, but is strongly influenced by the available oxygen in excess from the combustion air. Therefore, reducing maximum flame temperature is diminished the possibility of NO_x therm formation, but has a little impact on reducing NO_x due

termice, dar are un impact mic asupra reducerii NO_x datorat prezenței azotului în combustibil, care este, în principal, dependent de stoechiometria locală [3].

Controlul tehnic al emisiilor de NO_x pentru surse staționare operează fie prin suprapresiunea formării NO_x , fie prin îndepărtarea fizică sau chimică a NO_x din gazele arse.

Tehnicile importante de reducere a formării NO_x , cunoscute pe plan mondial și precizate în literatură [3], sunt:

a. Modificarea procesului de ardere:

- menținerea la un nivel redus a coeficientului de exces de aer de combustie;
- recircularea gazelor arse;
- distribuția etapizată a aerului și combustibilului în arzător;
- utilizarea catalizatorilor.

b. Utilizarea combustibililor cu conținut redus de azot:

- înlocuirea combustibililor cu conținut ridicat de azot cu alți combustibili corespunzători;
- reducerea conținutului de azot din combustibil.

Condițiile de formare a NO_x pot fi contracarate prin următoarele metode tehnice:

- reducerea nivelului azotului în zona de temperatură maximă a flăcării;
- reducerea nivelului oxigenului în exces în zona de temperatură maximă a flăcării;
- retragerea vârfului de temperatură a flăcării din zona de ardere și reducerea duratei de menținere a acestuia.

4. ADAPTAREA CONSTRUCTIVĂ ȘI FUNCȚIONALĂ A UNUI TIP DE ARZĂTOR DIN INDUSTRIA METALURGICĂ PENTRU FUNCȚIONAREA CU EMISII REDUSE DE NO_x

4.1. Generalități

Sectorul laminoare din industria metalurgică dispune de cuptoare de încălzire (cu propulsie și cu vatră pășitoare), de mari capacități, echipate cu un număr mare de arzătoare. Obiectivul cercetării prezentate în lucrarea de față constă în adaptarea arzătoarelor de tipul JC (cu jet central de combustibil), cu care sunt dotate cuptoarele cu propulsie din ArcelorMittal Galați. La alegerea soluției constructive și funcționale a acestui tip de arzător s-a ținut seama de necesitatea îmbunătățirii randamentului arderii prin reducerea semnificativă a noxelor din gazele arse (NO_x , CO), în condițiile menținerii caracteristicilor radiante ale flăcării, solicitate din punct de vedere tehnologic. Măsurători efectuate la arzătoarele existente (de referință) au indicat valori ridicate ale acestor noxe ($400 - 450 \text{ mg NO}_x / \text{Nm}^3$ și $300 - 500 \text{ mg CO} / \text{Nm}^3$, la funcționarea la debitul nominal de gaz natural de $160 \text{ Nm}^3 / \text{h}$ și respectiv, $500 - 550 \text{ mg NO}_x / \text{Nm}^3$ și $460 - 570 \text{ mg CO} / \text{Nm}^3$, la funcționarea la debitul

to the presence of nitrogen in fuel, which is, mainly, dependent upon the local stoichiometry [3].

Technical control of NO_x emissions for stationary sources operates either by overpressure of NO_x formation, either by physical or chemical removal of NO_x from waste gases.

The important techniques to reduce NO_x formation, known worldwide and quoted in the literature [3], are:

a. Modifying the combustion process:

- maintaining a low coefficient of excess combustion air;*
- waste gases recycling;*
- use of catalysts.*

b. Use of fuels with low nitrogen:

- replacement of fuels with high nitrogen content to other corresponding fuels;*
- reducing the nitrogen content of fuel.*

The conditions of NO_x formation can be countered by the following technical methods:

- reducing the level of nitrogen in the maximum temperature area of the flame;*
- reducing the level of oxygen in excess in the maximum temperature area of the flame;*
- withdrawal of the peak temperature of flame in the combustion zone and reducing the duration of its maintenance.*

4. CONSTRUCTIVE AND FUNCTIONAL ADAPTATION OF A TYPE OF BURNER IN METALLURGY FOR OPERATING WITH LOW NO_x EMISSIONS

4.1. Generalities

Rolling mills sector of metallurgy is endowed with heating furnaces (continuous discharge heating furnaces and stepping hearth furnaces), of high capacities, equipped with a great number of burners. The research objective presented in this paper is to adapt burners JC type (with central jet of fuel) which continuous discharge heating furnaces in ArcelorMittal Galati. At the choice of constructive and functional solution of this burner type it was considered the need to improve the combustion efficiency by significantly reducing the pollutants in waste gases (NO_x , CO), while keeping the radiant characteristics of flame, technological required. Measurements carried out at existing burners (of reference) showed high levels of these pollutants ($400 - 450 \text{ mg NO}_x / \text{Nm}^3$ and $300 - 500 \text{ mg CO} / \text{Nm}^3$, at the functioning of natural gas at the nominal flow rate of $160 \text{ Nm}^3 / \text{h}$ and, respectively, $500 - 550 \text{ mg NO}_x / \text{Nm}^3$ and $460 - 570 \text{ mg CO} / \text{Nm}^3$, at the

nominal de gaz de cocs de 340 Nm³/h).

Reducerea emisiilor de NO_x și CO ale arzătoarelor sub limitele admise de legislație (adică, 350 mg NO_x / Nm³ și 100 mg CO / Nm³ [5]) este posibilă prin realizarea distribuției în trepte a combustibilului (atât a gazului natural, cât și a gazului de cocs, ca posibil înlocuitor) și a aerului de combustie.

4.2. Descrierea soluției constructive și a principiului funcțional

Arzătorul adaptat cerințelor energetice și ecologice precizate mai sus se compune din următoarele părți componente (vezi **Figura 1**):

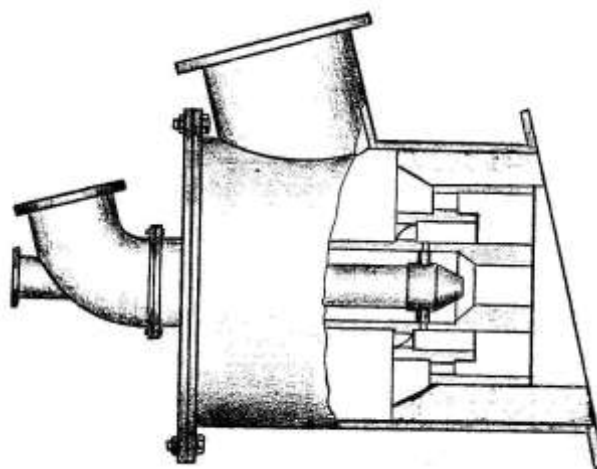


Fig. 1. Arzător adaptat pentru funcționarea cu noxe reduse
Burner adapted to operate with low pollutions

a. Corpul arzătorului, nemodificat față de piesa originală, este o construcție sudată din tablă de oțel OL 37.2k, ștampată la interior cu beton refractar.

b. Diuza de gaz natural este un subansamblu compus din două elemente constructive:

- diuza propriu-zisă, executată din oțel refractar, având patru orificii radiale echidistante Φ 21 mm și un orificiu axial Φ 51,5 mm; diuza este dimensionată pentru un debit orar nominal de gaz natural de 160 Nm³/h;
- racorduri radiale, în număr de patru, sudate în dreptul orificiilor radiale.

c. Diuza de gaz de cocs este o piesă executată din oțel refractar, care devine operativă la funcționarea arzătorului pe gaz de cocs, după blindarea alimentării cu gaz natural. Piesa are un orificiu axial central de Φ 81 mm și 8 orificii radiale Φ 23,5 mm, pentru distribuția în trepte a gazului de cocs. Diuza este dimensionată pentru un debit orar nominal de gaz de cocs de 340 Nm³/h (puterea calorifică inferioară a gazului de cocs este 16.740 kJ/Nm³).

d. Conducta de gaz natural de Φ 83 x 6 mm asigură alimentarea cu acest combustibil și se sudează la capătul său frontal cu diuza de gaz natural.

functioning of coke gas at the nominal flow rate of 340 Nm³/h).

The reduction of NO_x and CO emissions of burners under limits permitted by law (i. e. 350 mg NO_x/Nm³ and 100 mg CO / Nm³ [5]) is possible by achieving staged distribution of fuel (both natural gas and coke gas, as a possible replacement) and combustion air.

4.2. Description of constructive solution and functional principle

*The burner adapted energy and ecological requirements specified above consists of the following components (see **Figure 1**):*

a. The burner body, unmodified compared to the original piece, is a welded construction from steel plate OL 37.2k, stamped inside with refractory concrete.

b. Natural gas nozzle is a subassembly composed of two constructive elements:

- *nozzle itself, performed of refractory steel, having four equidistant radial holes Φ 21 mm and an axial hole Φ 51.5 mm; the nozzle is dimensioned for a nominal hourly flow of natural gas of 160 Nm³/h;*
- *four radial connections welded in the radial holes area.*

c. Coke gas nozzle is a piece performed of refractory steel, which becomes operative at burner function on coke gas, after blocking of natural gas supply. The piece has a central axial hole of Φ 81 mm and 8 radial holes Φ 23.5 mm, for staged distribution of coke gas. The nozzle is dimensioned for a nominal hourly flow of coke gas of 340 Nm³/h (the lower calorific power of coke gas is 16,700 kJ/Nm³).

d. The natural gas pipe of Φ 83 x 6 mm assures this fuel supply and is welded at its frontal end with the natural gas nozzle.

e. Conducta de gaz de cocs din țevă 168 x 8 mm se sudează la capătul frontal cu diuza de gaz de cocs și asigură alimentarea arzătorului cu acest combustibil.

f. Diuza de aer de combustie este o construcție sudată, care se compune din patru virole concentrice, cea mai mică având rol de suport, fiind confecționată din OL 37.2k, iar celelalte trei constituind ajutajele de aer primar, aer secundar treapta I și aer secundar treapta II, fiind confecționate din oțel inoxidabil refractar. Între suport și ajutajul de aer primar sunt sudate 16 nervuri înclinate la 45° față de direcția de propagare a aerului, iar între celelalte ajutaje sunt sudate piese prevăzute cu orificii axiale echidistante, câte 8 orificii de Φ 21 mm pentru ajutajul de aer secundar treapta I și, respectiv, pentru ajutajul de aer secundar treapta II.

g. Căptușeala refractară din beton refractar asigură etanșeitatea între diuza de aer de combustie și interiorul zonei frontale a corpului arzătorului.

Celelalte componente ale arzătorului adaptat rămân nemodificate.

Principiul funcțional al arzătorului este următorul:

Pentru asigurarea unei flăcări cu emisie de radiație termică mare distribuția combustibilului (fie gaz natural, fie gaz de cocs) se realizează în două etape:

- prima etapă constă în asigurarea unui amestec între combustibilul distribuit radial și jetul inelar de aer, care se aprinde;
- a doua etapă constă în distribuția unui jet central de combustibil în interiorul jetului inelar de amestec.

Datorită temperaturii dezvoltate în jetul aprins inelar, se produce cracarea hidrocarburilor din jetul de combustibil central (descompunerea în carbon și hidrogen), urmată de polimerizarea carbonului cu degajarea unei luminozități puternice, care determină creșterea coeficientului de emisivitate a flăcării. Radiația este evident mult mai puternică în cazul gazului natural, care conține aproape integral CH_4 , în timp ce în cazul gazului de cocs este mai puțin evidentă din cauza procentului mai redus de hidrocarburi din compoziția combustibilului.

Procentual, 60% din debitul total de combustibil se distribuie prin orificiul central axial și 40% se distribuie radial.

Aerul de combustie este și el distribuit în două etape:

- 75% din debitul total de aer este distribuit într-un jet inelar turbionat, care întâlnește jeturile radiale de combustibil;
- 25% din debitul total de aer este distribuit periferic, având rolul lungirii flăcării, prin orificii axiale, în două trepte.

În **Figura 2** se prezintă principiul funcțional al arzătorului.

e. The coke gas pipe of Φ 168 x 8 mm is welded at its frontal end with the coke gas nozzle and assures burner supply with this fuel.

f. Combustion air nozzle is a welded construction, which consists of four concentric shell rings, the smallest having support role, made of OL 37.2k and the other three being primary air nozzle, secondary air stage I and II nozzles, made of stainless refractory steel. Between support and primary air nozzle are welded 16 ribs inclined at 45° to the direction of air propagation and between the other nozzles are welded pieces with equidistant axial holes, each 8 holes of Φ 21 mm for the secondary air stage I nozzle and, respectively, for the secondary air stage II nozzle.

g. Refractory lining of refractory concrete assures tightness between the combustion air nozzle and the inside of frontal area of body burner.

The other components of the adapted burner remain unchanged.

The functional principle of the burner is the following: To assure a flame with high emission of thermal radiation, the fuel (either natural gas, either coke gas) distribution is achieved in two stages:

- the first stage consists in providing a mixture of the fuel radial distributed and the annular air jet, which is ignited;*
- the second stage consists in distribution of a fuel central jet inside the annular jet of mixture.*

Due to the temperature developed in the annular ignited jet, occurs the hydrocarbon cracking from the fuel central jet (decomposition in carbon and hydrogen), followed by polymerization of carbon, with the release of strong brightness, which determines increasing of the emissivity coefficient of flame. Radiation is obviously much more stronger in the case of natural gas, which contains almost entirely CH_4 , while, in the case of coke gas, is less obvious due to the lower percentage of hydrocarbons of the fuel composition.

In percentage term, 60% of the total fuel flow is distributed through the central axial hole and 40% is radially distributed.

The combustion air is distributed too, in two stages:

- 75% of the total air flow is distributed in a swirled annular jet, which meets the fuel radial jets;*
- 25% of the total air flow is peripheral distributed, having the role of flame extension through axial holes, in two stages.*

*In **Figure 2** is shown the functional principle of burner.*

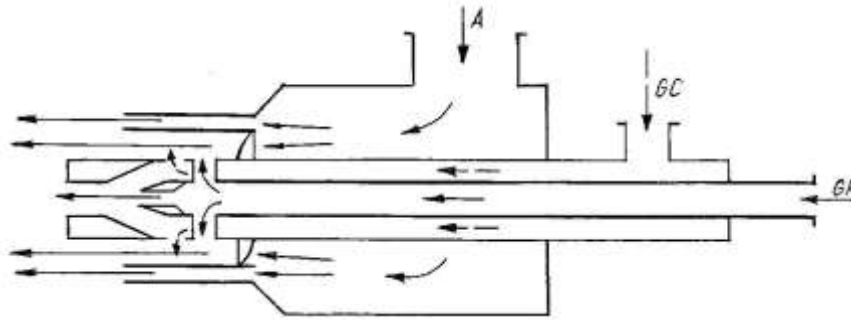


Fig. 2. Principiul funcțional al arzătorului

The functional principle of burner

GN - gaz natural / natural gas; GC - gaz de cocs / coke gas; A - aer de combustie / combustion air

5. METODOLOGIA EXPERIMENTĂRII

Experimentarea arzătorului adaptat s-a efectuat la Combinatul Siderurgic ArcelorMittal Galați pentru funcționarea cu gaz natural și, respectiv, cu gaz de cocs. Aerul de combustie utilizat la arzător a fost preîncălzit la 250°C.

În timpul experimentărilor au fost determinați următorii parametri funcționali:

- debitul orar și presiunea de alimentare a gazului natural;
- debitul orar, presiunea și temperatura aerului de combustie;
- debitul orar și presiunea de alimentare a gazului de cocs;
- compoziția chimică a gazelor arse;
- temperatura și lungimea flăcării.

Aparatura de măsură utilizată a fost următoarea:

- debitmetru și contor de gaze naturale;
- debitmetru și contor pentru aerul de combustie;
- debitmetru de gaz de cocs;
- manometre diferențiale tip U cu apă pentru măsurarea presiunii gazului natural, gazului de cocs și aerului de combustie la intrarea în arzător;
- termocuplu Fe - constantan (0 - 1000°C) pentru măsurarea temperaturii aerului de combustie;
- termocuplu Pt-Rh 13 (0 - 1800°C) pentru măsurarea temperaturii flăcării;
- analizor cu celule electrochimice tip TESTO-350 pentru măsurarea compoziției gazelor arse (O₂, CO și NO_x);
- analizor în infraroșu tip INFRALYT - 2020 pentru măsurarea concentrației CO₂ din gazele arse.

Măsurătorile s-au efectuat pornind de la stabilirea regimurilor nominale de funcționare a arzătorului, separate pentru cele două tipuri de combustibil utilizat. Debitul de aer de combustie a fost redus până la valoarea minimă a coeficientului de exces de aer, la care valoarea concentrației de CO în gazele arse se menține la un nivel moderat și sub care aceasta are o tendință clară de creștere. Aceleași reglaje se efectuează treptat pentru debite de combustibil

5. EXPERIMENTATION METHODOLOGY

The experimentation of adapted burner was carried out in ArcelorMittal Galati steel plant for operating with natural gas and, respectively, with coke gas. The combustion air used into burner was preheated at 250°C.

In experiments, were determined the following functional parameters:

- hourly flow and supply pressure of natural gas;
- hourly flow, pressure and temperature of combustion air;
- hourly flow and supply pressure of coke gas;
- chemical composition of burned gases;
- temperature and length of the flame.

The used measuring equipment was the following:

- flowmeter and meter of natural gas;
- flowmeter and meter of combustion air;
- flowmeter of coke gas;
- differential manometers U type with water for measuring the pressure of natural gas, coke gas and combustion air at the entrance into burner;
- thermocouple Fe-constantan (0 - 1000°C) for temperature measuring of combustion air;
- thermocouple Pt-Rh 13 (0 - 1800°C) for flame temperature measuring;
- analyser with electrochemical cells TESTO - 350 type for measuring of waste gases composition (O₂, CO and NO_x);
- analyser in the infrared INFRALYT - 2020 type for measuring of CO₂ concentration in waste gases.

Measurements were conducted starting from establishing nominal operating regimes of burner, separately for both types of investigated fuel. The combustion air flow was reduced to the minimum value of the coefficient of excess air, at which the CO concentration value in waste gases remains at a moderate level and under which this has a clear increasing trend. The same adjustments are made gradually for fuel flows inferior to the nominal flow, until the flame is extinguished, indicating that

inferioare debitului nominal, până când flacăra se stinge, indicând atingerea limitei minime de funcționare. De asemenea, se determină regimul maxim de funcționare al arzătorului, indicat de instabilitatea flăcării și tendința de rupere a acesteia. Pentru fiecare regim termic stabil în intervalul minim – maxim de funcționare s-au efectuat măsurătorile precizate mai sus.

6. REZULTATELE EXPERIMENTALE ȘI INTERPRETAREA LOR

În **Tabelul 1** sunt prezentate rezultatele experimentale ale testării arzătorului la funcționarea cu gaz natural și aer de combustie preîncălzit la 250°C.

Tabelul 1. Rezultatele experimentării arzătorului la funcționarea cu gaz natural
Table 1. Experimental results of burner at the operation of natural gas

Natural gas		Combustion air			Waste gases composition				Coeffi- cient of air excess	Flame tem- perature (°C)	Flame length (m)
Flow (Nm ³ /h)	Pressure (mm col. H ₂ O)	Flow (Nm ³ /h)	Pressure (mm col. H ₂ O)	Tempe- rature (°C)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)			
200	260	2000	140	250	11.2	1.2	69	200			
160	180	1600	90	250	11.2	1.2	63	187	1.05	1590	2.8
150	161	1542	84	250	10.7	1.8	59	184	1.08	1530	2.7
135	139	1401	71	250	10.6	2.0	54	177	1.09	1500	2.4
130	130	1361	65	250	10.5	2.0	53	170	1.10	1460	2.2
120	109	1279	60	250	10.4	2.2	50	163	1.12	1430	2.0
107	81	1151	46	250	10.3	2.3	43	152	1.13	1410	1.4
60	42	729	21	250	9.9	3.3	38	116	1.16	1370	0.9

Tabelul 2 prezintă rezultatele experimentale ale testării arzătorului la funcționarea cu gaz de cocs și aer de combustie preîncălzit la 250°C.

minimum operating limit is reached. Also, is determined the maximum operating regime of burner, indicated by flame instability and its breaking trend. For each stable thermal regime in the minimum - maximum range of operation were carried out measurements specified above.

6. EXPERIMENTAL RESULTS AND THEIR INTERPRETATION

In Table 1 are shown the experimental results of the burner testing at the operation of natural gas and combustion air preheated to 250°C.

Tabelul 2. Rezultatele experimentării arzătorului la funcționarea cu gaz de cocs
Table 2. Experimental results of burner at the operation of coke gas

Natural gas		Combustion air			Waste gases composition				Coeffi- cient of air excess	Flame tem- perature (°C)	Flame length (m)
Flow (Nm ³ /h)	Pressure (mm col. H ₂ O)	Flow (Nm ³ /h)	Pressure (mm col. H ₂ O)	Tempe- rature (°C)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)			
425	232	1940	123	250	8.7	2.9	84	285	1.15	1580	3.4
340	164	1552	85	250	8.7	3.0	77	281	1.15	1560	3.1
318	150	1489	77	250	8.4	3.4	74	279	1.18	1540	2.9
285	119	1345	64	250	8.3	3.6	69	275	1.19	1520	2.8
230	90	1095	45	250	8.2	3.9	64	275	1.20	1500	2.7
210	76	1017	40	250	8.1	4.1	62	271	1.22	1460	2.3
130	50	635	19	250	8.1	4.2	54	270	1.23	1430	1.5

Analizând rezultatele experimentale din cele două tabele rezultă următoarele:

Metoda distribuției etapizate a combustibilului și aerului, aplicată în cazul arzătorului reproiectat, și-a demonstrat eficiența tehnică în privința reducerii concentrației noxelor (CO, NO_x) din gazele arse. Atât în cazul utilizării gazului natural, cât și a gazului de cocs, valorile concentrațiilor celor două noxe sunt situate sub limitele maxime admise de legislația în vigoare, adică sub 100 mg/Nm³ pentru CO și sub 350 mg/Nm³ pentru NO_x [5].

La funcționarea cu gaz natural, emisia CO variază între 38 - 69 mg/Nm³ în intervalul minim-maxim al regimului termic, valorile crescând odată cu scăderea coeficientului de exces de aer. În cazul funcționării cu gaz de cocs, emisia CO variază între 54 - 84 mg/Nm³, creșterea valorilor corespunzând scăderii excesului de aer.

La funcționarea cu gaz natural, emisia de NO_x este influențată în mod evident de creșterea temperaturii flăcării, dar și de diminuarea excesului de aer, atingând valoarea maximă de 200 mg/Nm³ la 1610°C și coeficientul de exces de aer de 1,05 și valoarea minimă de 116 mg/Nm³ la 1370°C și coeficientul de exces de aer 1,16.

Spre deosebire, la funcționarea cu gaz de cocs, care este un combustibil rezidual ce conține azot în proporție de circa 14%, concentrațiile NO_x nu sunt influențate în mod evident de variația temperaturii flăcării. În schimb, formarea NO_x este favorizată de disponibilitatea de oxigen în exces din aerul de combustie.

Ca rezultat al acestor două influențe, de sens contrar, valorile concentrației NO_x în gazele arse se situează într-un domeniu restrâns (270 - 285 mg/Nm³) în intervalul minim - maxim de funcționare a arzătorului.

7. IMPACTUL ASUPRA MEDIULUI

După cum a rezultat în urma testării arzătorului reproiectat, sistemul distribuției etapizate a combustibilului și aerului de combustie are un efect semnificativ asupra emisiilor de NO_x și CO în gazele arse.

Comparativ cu nivelul emisiilor arzătoarelor de referință, mult peste limitele maxime admisibile, reducerile de noxe determinate experimental la arzătorul reproiectat sunt mari, atât la funcționarea cu gaz natural, cât și la funcționarea alternativă cu gaz de cocs.

În **Tabelul 3** se prezintă comparativ valorile emisiilor de noxe din gazele arse măsurate la funcționarea arzătorului la regimul nominal cu gaz natural (160 Nm³/h) și, respectiv, gaz de cocs (340 Nm³/h).

Analyzing experimental results from the two table result the following:

The method of staged distribution of fuel and air, applied in the case of redesigned burner, has demonstrated its technical efficiency on reducing pollutants concentration (CO, NO_x) of waste gases. Both in case of using natural gas and coke gas, the values of the two pollutants concentrations are below the permissible limits by legislation, i. e. under 100 mg/Nm³ for CO and under 350 mg/Nm³ for NO_x [5].

At the natural gas operation, CO emission varies between 38 - 69 mg/Nm³ in the minimum – maximum range of thermal regime, the values increasing with decreasing of coefficient of air excess. In the case of coke gas operating, CO emission varies between 54 – 84 mg/Nm³, the value increasing corresponding to the decreasing of air excess.

At the natural gas operating, NO_x emission is obviously influenced the flame temperature increasing, but the air excess diminishing, too, reaching the maximum value of 200 mg/Nm³ at 1610°C and coefficient of air excess of 1.16.

Unlike, at the coke gas operating, which is a residual fuel containing nitrogen at a rate of about 14%, NO_x concentrations are not obviously influenced by the flame temperature variation. Instead, NO_x formation is favored by available oxygen in excess in combustion air.

As result of these two opposite influences, the values of NO_x concentration in waste gases are situated in a narrow field (270 - 285 mg/Nm³) in the minimum – maximum range of the burner operating.

7. THE IMPACT ON THE ENVIRONMENT

As a result of the redesigned burner testing, the system of staged distribution of fuel and combustion air has a significant effect on NO_x and CO emissions in waste gases.

Compared to emissions level of reference burners, well above the maximum allowable, the pollutants reductions experimentally determined for the redesigned burner are large, both at natural gas operating and coke gas alternative operating.

*In **Table 3** are comparatively shown the values of pollutants emissions in waste gases measured at the burner operating in the nominal regime with natural gas (160 Nm³/h) and, respectively, coke gas (340 Nm³/h).*

Tabelul 3. Valorile emisiilor de NO_x și CO în gazele arse
 Table 3. Values of NO_x and CO emissions in waste gases

Used fuel	Redesigned burner		Reference burner		Maximum admitted limit	
	NO _x (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)
Natural gas	187	63	400 - 450	300 - 500	350	100
Coke gas	281	77	500 - 550	460 - 570		

După cum rezultă din **Tabelul 3**, emisiile de NO_x și CO ale arzătoarelor existente la cuptoarele de încălzire de la ArcelorMittal Galați depășesc cu mult limitele admise de legislație.

Prin aplicarea metodelor cunoscute de reducere a emisiilor de noxe la arzătorul reproiectat, valorile acestor noxe sunt foarte mult diminuate, atât față de situația de referință, cât și față de limitele maxime admise.

8. CONCLUZII

1. Obiectivul cercetării, ale cărei rezultate sunt prezentate în lucrare, este reducerea emisiilor de oxizi de azot (NO_x) și monoxid de carbon din gazele arse ale cuptoarelor utilizate în industria metalurgică la cuptoare cu propulsie și cu vatră pășitoare de capacități mari.
2. Fiind considerate noxe periculoase față de mediul înconjurător, legislația în vigoare stipulează valori maxime admise ale acestora (350 mgNO_x/Nm³ și 100 mg CO/Nm³), care sunt depășite cu mult de arzătoarele existente la cuptoarele metalurgice.
3. Cunoscând factorii care influențează formarea acestor noxe (în special, a NO_x), s-a reproiectat un tip de arzător industrial prin utilizarea distribuției etapizate a combustibilului și aerului de combustie.
4. Experimentările s-au efectuat la ArcelorMittal Galați în condițiile funcționării arzătorului alternativ cu gaz natural și, respectiv, cu gaz de cocs (utilizat ca posibil înlocuitor).
5. Rezultatele experimentale confirmă justetea soluției tehnice adoptate, emisiile de NO_x și CO fiind diminuate până la valori de maximum 200 mg NO_x/Nm³ și 69 mg CO/Nm³, la utilizarea gazului natural și maximum 285 mg NO_x/Nm³ și 84 mg CO/Nm³, la utilizarea gazului de cocs.

According to **Table 3**, NO_x and CO emissions of existing burners of heating furnaces in ArcelorMittal Galati for exceed the maximum admitted limits of legislation.

By applying the known methods of reducing the pollutants emissions of redesigned burner, the values of these pollutants are very much diminished, both compared to the reference situation and the maximum admitted limits.

8. CONCLUSIONS

1. The research objective, of which results are presented in the paper, is reduction of emissions of nitrogen oxides (NO_x) and carbon monoxide in waste gases of burners used in metallurgy on continuous discharge heating and steeping hearth furnaces of high capacities.
2. Being considered environmentally hazardous pollutants, the legislation stipulates their maximum admitted values (350 mg NO_x/Nm³ and 100 mg CO/Nm³), which are far exceeded by the burners existing on metallurgical furnaces.
3. Knowing the factors that influence the formation of these pollutants (especially, NO_x), it was redesigned an industrial burner type by using the staged distribution of fuel and combustion air.
4. Experiments were conducted in ArcelorMittal Galati steel plant in conditions of alternately operation burner with natural gas and, respectively, coke gas (used as possible replacement).
5. Experimental results confirm the justness of adopted technical solution, NO_x and CO emissions being reduced up to values of maximum 200 mg NO_x/Nm³ and 69 mg CO/Nm³ for using the natural gas and maximum 285 mg NO_x/Nm³ and 84 mg CO/Nm³ for using the coke gas.

BIBLIOGRAFIE / REFERENCES

- [1] * * * - Calitate aer - *Rețeaua națională de monitorizare*, Ministerul Mediului și Pădurilor din România.
<http://www.calitateaer.ro>
- [2] **C. SCHWERDT** - *Modeling NO_x - formation in combustion processes*, Lund Institute of Technology, Sweden, June 2006.
<http://www.control.lth.se>
- [3] **A.A. SIDDIQI, J.W. TENINI** - *Coping with air pollution*, Hydrocarbon Processing, pp. 123-129, November 1984.
- [4] **R.T. WAIDEL, D.N. PRICE, P.S. TISH, M.L. HALPRIN** - *Advanced burner technology for stringent NO_x regulations*, Presented at the American Petroleum Institute Midyear Refining Meeting, Joint Meeting of the Subcommittee on Heat Transfer Equipment, Orlando, USA, May 8, 1990.
- [5] * * * - Legea nr. 104 / 2011.