

**ARZĂTOR PENTRU CUPTOARE
DE ÎNCĂLZIRE TIP CAMERĂ
DIN INDUSTRIA SIDERURGICĂ
CU EMISII REDUSE DE NO_x**

**BURNER FOR CHAMBER TYPE HEATING
FURNACES FOR THE IRON AND STEEL
INDUSTRY WITH LOW EMISSIONS
OF POLLUTANTS**

Gh. SURUGIU¹, L. PĂUNESCU²

**¹Inspecția de Stat pentru Controlul Cazanelor, Recipientelor sub Presiune
și Instalațiilor de Ridicat București
²Cermax 2000 Patents SRL București**

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

REZUMAT / ABSTRACT

În lucrare este prezentat un nou arzător care funcționează cu gaz natural și aer de combustie preîncălzit la 400°C destinat cuptoarelor de încălzire tip cameră din industria siderurgică. Arzătorul, cu puterea termică nominală de 150 kW, a fost conceput și realizat pentru a înlocui actualele arzătoare TRICEM 15, utilizate pe scară largă în România, caracterizate prin emisii de NO_x peste limitele maxime admise de normele legale. Emisiile de NO_x ale noului arzător sunt mult sub limita maximă admisă de 350 mg/Nm³, având valori de 172 - 201 mg/Nm³ pe întregul domeniu de funcționare.

The paper presents a new burner which operates with natural gas and combustion air preheated at 400°C for chamber type heating furnaces from the iron and steel industry. The burner, with the nominal thermal power of 150 kW, was conceived and achieved to replace the current TRICEM 15 burners, used on a large scale in Romania, characterized by NO_x emissions over the maximum limits allowed by the lawful norms. The NO_x emissions of the new burner are much below the maximum limit allowed of 350 mg/Nm³, having values of 172 - 201 mg/Nm³ on the whole domain of operation.

Key words: burner, natural gas, heating furnace, emission, pollutant

1. INTRODUCERE

Oxizii de azot, denumiți global NO_x, constituie poluanți periculoși pentru mediul ambiant. Sursa principală de formare a NO_x o reprezintă procesele de ardere în prezența aerului, specifice motoarelor autovehiculelor în trafic, activităților industriale, producerii energiei electrice în termocentrale etc. Oxizii de azot sunt responsabili pentru formarea smogului în zonele industriale și urbane, a ploilor acide, deteriorarea calității apei, efectul de seră etc. Sănătatea populației expuse acestui tip de noxe este afectată grav, prin dificultăți respiratorii, iritații ale căilor respiratorii, disfuncții ale plămânilor. Animalele suferă de boli pulmonare și reducerea imunității, iar vegetația este distrusă prin moartea țesuturilor plantelor [1].

1. INTRODUCTION

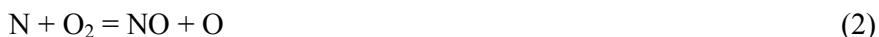
The nitrogen oxides, called globally NO_x, constitute environmentally hazardous pollutants. The main source of NO_x formation is the combustion processes in the air, specific vehicles engines in traffic, industrial activities, electricity production in thermal power stations etc. The nitrogen oxides are responsible for smog formation in industrial and urban areas, acid rains, deteriorating of the water quality, greenhouse effect etc. The health of the population exposed to this type of pollutants is gravely affected, by breathing difficulties, respiratory irritations, dysfunctions of the lungs. Animals suffer from the lung disease and reducing of immunity and vegetation is destroyed by the tissues death of the plants [1].

Datorită efectelor nocive pe care le au oxizii de azot asupra mediului, au fost reglementate prin lege nivelele limită admisibile pentru concentrația NO_x în atmosferă. Astfel, în România, prin Legea nr. 104/2011 este stabilită valoarea maximă admisibilă a NO_x emis în atmosferă la 350 mg/Nm^3 (pentru 3% procente volumetric de oxigen în gazele arse) [1].

2. MECANISMUL FORMĂRII OXIZILOR DE AZOT ȘI FACTORII CARE ÎL INFLUENȚEAZĂ

În general, procesul de formare a NO_x se datorează fie condițiilor termice (temperatură ridicată de peste 1000°C a procesului de ardere), prin care azotul din aerul de combustie reacționează chimic cu oxigenul în exces provenit din aer [2], fie conținutului de azot al combustibilului, prin care azotul din combustibil reacționează cu oxigenul în exces provenit din aer [1].

Procesul de formare a NO_x este, în principal, rezultatul desfășurării a trei reacții chimice, care împreună constituie așa numitul mecanism Zeldovich [3]:



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

Producerea NO_x este uzual dominantă la temperaturi de peste 1400 K , atingând potențialul maxim la peste 1900 K [3].

Factorii care influențează mecanismul formării oxizilor de azot sunt:

- Gradul de preamestecare a combustibilului cu aerul de combustie (ca raport între cantitatea de aer primar introdus direct la amestecare și aerul total necesar arderii) influențează cinetica proceselor prin probabilitatea ciocnirilor moleculelor sau atomilor de oxigen (formați prin disociere) cu moleculele de azot. Un grad redus de preamestecare contribuie la emisii reduse de NO_x .
- Temperatura reală de ardere a combustibilului influențează direct proporțional viteza de reacție dintre oxigen și azot și, deci, formarea NO_x . Concomitent, temperatura de ardere înaltă provoacă atomizarea moleculelor de oxigen, prin disociere termică și, în consecință, intensificarea reacțiilor de formare a NO_x .
- Coeficientul de exces de aer (α) al procesului de ardere contribuie la creșterea cantității de NO_x de

Because of the harmful effects of nitrogen oxides on the environment, the allowable limit levels for the NO_x concentrations in atmosphere were regulated by law. Thus, in Romania, by the Law no. 104/2011 is established the allowable maximum value of NO_x emitted into the atmosphere at 350 mg/Nm^3 (for 3% volumetric percentage of oxygen in waste gas) [1].

2. THE MECHANISM OF THE NITROGEN OXIDES FORMATION AND THE FACTORS WHICH INFLUENCE IT

Generally, the NO_x formation process is due either the thermal conditions (high temperature of over 1000°C of the combustion process), through which the nitrogen from the combustion air reacts chemically with oxygen in excess coming from the air [2], or the nitrogen content of the fuel, through which the nitrogen from the fuel reacts with oxygen in excess coming from the air [1].

The NO_x formation process is, mainly, the result of three chemical reactions, which together constitute so-called Zeldovich mechanism [3]:

The strong triple bond from the nitrogen molecule requires high temperature for its breaking and the equation (1) will determine the NO_x formation rate. The NO_x production is usually dominant at temperatures of over 1400 K , reaching the maximum potential at over 1900 K [3].

The factors which influence the nitrogen formation mechanism are:

- *The premixing degree of the fuel with the combustion air (as ratio between the primary air amount entered directly at the mixing and the whole air necessary for combustion) influences the processes kinetics by probability of collisions between the oxygen molecules or atoms (formed by dissociation) and the nitrogen molecules. A low premixing degree contributes to low NO_x emissions.*
- *The real combustion temperature influences directly proportional the reaction rate between oxygen and nitrogen and, then, the NO_x formation. Simultaneously, the high combustion temperature causes the atomization of oxygen molecules, by thermal dissociation and, accordingly, the intensification of the NO_x formation reactions.*
- *The coefficient of air excess (α) of the combustion process contributes to the NO_x amount increasing*

la 100 mg/m^3 la 140 mg/m^3 , în intervalul de valori ale coeficientului α 1,0-1,2 și, respectiv, diminuarea cantității de NO_x până la 80 mg/m^3 , pentru valori ale coeficientului α cuprinse între 1,2-1,6 [2]. Creșterea NO_x până la $\alpha = 1,2$ se datorează îmbunătățirii condițiilor cinetice ale arderii (creșterea numărului de molecule de oxigen în sistem și, deci, creșterea probabilității ciocnirii acestora cu molecula de azot).

Scăderea cantității de NO_x la valori ale α mai mari de 1,2 se explică prin influența creșterii excesului de aer asupra diminuării temperaturii de ardere.

- Recircularea gazelor arse produse de flacără, prin întoarcerea lor la baza flăcării, conduce la reducerea emisiilor de NO_x , datorită micșorării temperaturii de ardere și reducerii concentrației celor doi reactanți O_2 și N_2 odată cu mărirea volumului de gaze în zona de ardere [2].

3. DESCRIEREA ARZĂTORULUI PENTRU CUPTOARE DE ÎNCĂLZIRE TIP CAMERĂ

Noul arzător pentru cuptoare de încălzire tip cameră din industria siderurgică a fost conceput și realizat pentru a înlocui arzătoarele TRICEM utilizate pe scară largă în industria din România, caracterizate prin emisii ridicate de oxizi de azot (NO_x).

Noul arzător a fost proiectat pentru funcționarea cu gaz natural și aer de combustie preîncălzit până la temperatura de 400°C . Realizat pentru puterea termică nominală de 150 kW, arzătorul se compune din următoarele piese:

- Stabilizatorul de flacără, care este o piesă tubulară cu diametrul interior de 25 mm. În partea sa frontală, piesa are o formă tronconică plină, cu baza mare în capul stabilizatorului. Pentru distribuția gazului natural în curentul de aer de combustie primar, sunt prevăzute 8 orificii radiale $\varnothing 2,5 \text{ mm}$, la capătul anterior al părții tubulare.
- Ajutajul de aer este piesa care permite distribuția aerului de combustie în două etape succesive: aerul primar, care intră prin patru orificii $\varnothing 15 \text{ mm}$ poziționate la capătul posterior al piesei și străbate spațiul cilindric inelar dintre suprafața exterioară a tubulaturii stabilizatorului de flacără și suprafața interioară a sectorului tubular al ajutajului și aerul secundar, care intră prin 16 orificii $\varnothing 9 \text{ mm}$ dispuse axial periferic în corpul părții frontale a ajutajului. Partea frontală a acestuia are o formă tronconică urmată de o parte cilindrică la un diametru aproape dublu față de diametrul tronsonului tubular. Cele 16 orificii sunt practicate în zona de îmbinare dintre partea tronconică și baza părții cilindrice.

from 100 mg/m^3 to 140 mg/m^3 , in the values range of a coefficient 1.0-1.2 and, respectively, the diminishing of the NO_x amount up to 80 mg/m^3 , for values of a coefficient between 1.2-1.6 [2]. The NO_x increasing up to $\alpha = 1.2$ is due to the improvement of the kinetics conditions of combustion (increasing of the number of oxygen molecules in system and, then, increasing of probability of their collision with the nitrogen molecule).

The decreasing of NO_x amount to α values of over 1.2 is explainable by the influence of air excess increasing on decreasing of the combustion temperature.

- *The recirculation of waste gas produced in the flame, by its return at the flame base, leads to the reduction of NO_x emissions, because the decreasing of combustion temperature and reduction of concentration of the two reactants O_2 and N_2 with the increasing of the gases volume in combustion area [2].*

3. DESCRIPTION OF THE BURNER FOR CHAMBER TYPE HEATING FURNACES

The new burner for chamber type heating furnaces from the iron and steel industry was conceived and achieved to replace the TRICEM burners used on a large scale in the Romanian industry, characterized by high emissions of nitrogen oxides (NO_x).

The new burner was designed to operate with natural gas and combustion air preheated up to 400°C . Achieved for the nominal thermal power of 150 kW, the burner is composed from the following pieces:

- *The flame stabilizer, which is a tubular piece with the inner diameter of 25 mm. In its front side, the piece has a filled truncated cone shape with the large base in the head of stabilizer. For distribution of natural gas in the primary combustion air current, are foreseen 8 radial orifices $\varnothing 2.5 \text{ mm}$, at the outer end of the tubular part.*
- *The air nozzle is the piece which allows distribution of combustion air in two successive stages: the primary air, which enters through four orifices $\varnothing 15 \text{ mm}$ placed at the posterior end of the piece and crosses the annular cylindrical space between the outer surface of the flame stabilizer piping and the inner surface of the tubular sector of the nozzle and the secondary air, which enters through 16 orifices $\varnothing 9 \text{ mm}$ placed axial peripheral in the body of the front side of the nozzle. Its front side has a truncated cone shape continued by a cylindrical part at a nearly double diameter compared to the diameter of the tubular section. The 16 orifices are performed in the jointing area between the truncated cone*

- Corpul arzătorului constituie carcasa metalică a acestui echipament, alcătuit dintr-o parte cilindrică cu diametrul \varnothing 180 mm, în care pătrunde aerul cald insuflat printr-un racord și o altă parte cilindrică, frontală, cu diametrul \varnothing 95 mm. Prin spațiul inelar existent între partea cilindrică frontală a corpului arzătorului și partea cilindrică frontală a ajutorului de aer trece aerul terțiar necesar arderii.
- Piatra ceramică a arzătorului, executată din beton refractar superaluminos, este piesa prin care se propagă flacăra. Forma canalului axial prin care se dezvoltă flacăra și care constituie camera de ardere a arzătorului, este tronconică, cu baza mare în poziția frontală.

Arzătorul utilizează aer de combustie preîncălzit la maxim 400°C într-un recuperator de căldură existent, plasat pe traseul de evacuare a gazelor arse din cuptor.

Principiul funcțional al arzătorului este prezentat în cele ce urmează.

Combustibilul (gazul natural) este introdus în corpul arzătorului prin capătul posterior al stabilizatorului de flacăra și este distribuit în zona de amestec cu aerul primar prin intermediul orificiilor radiale. Aerul de combustie cald intră în corpul arzătorului prin racordul acestuia. O parte din volumul de aer intră prin orificiile de la capătul posterior al ajutorului de aer și parcurge spațiul cilindric inelar dintre sectoarele tubulare ale stabilizatorului de flacăra și ajutorul de aer. La contactul dintre jeturile radiale de combustibil și aerul primar se produce aprinderea amestecului combustibil. Flacăra se propagă prin spațiul interior tronconic dintre stabilizator și ajutor. La ieșirea din capul tronconic al stabilizatorului, flacăra are tendința de a se reîntoarce la baza zonei de propagare datorită suprafeței metalice fierbinți a capului tronconic. Are loc, astfel, o recirculare a flăcării care, pe de o parte, contribuie la creșterea stabilității flăcării în funcționare și, pe de altă parte, influențează favorabil asupra reducerii emisiei de NO_x . Flacăra produsă în prima treaptă de amestec dintre gazul natural și aerul primar este o flacăra reducătoare, dezvoltată în condițiile unei cantități insuficiente de aer. Aerul secundar și, în final, aerul terțiar participă la procesul de ardere, distribuția etapizată a aerului contribuind la reducerea emisiilor de NO_x .

În **Figura 1** este prezentat principiul constructiv și funcțional al arzătorului conceput pentru funcționarea cu emisii reduse de NO_x .

part and the base of the cylindrical part.

- *The burner body constitutes the metal casing of this equipment, compound by a cylindrical part with the diameter \varnothing 180 mm, in which enters the warm air instilled through a connection and an other front cylindrical part, with the diameter \varnothing 95 mm. By the existing annular space between the front cylindrical side of the burner body and the front cylindrical side of the air nozzle crosses the tertiary air necessary for combustion.*
- *The ceramic stone of the burner, performed from a super aluminous refractory concrete, is the piece through which the flame is propagated. The shape of the axial channel through which is developed the flame and which constitutes the combustion chamber of the burner, is truncated cone, with the large base in the front position.*

The burner uses combustion air preheated at the maximum 400°C in an existing heat recuperator placed on the exit route of waste gas from the furnace.

The functional principle of the burner is presented as follows.

The fuel (natural gas) is introduced in the burner body through the posterior end of the flame stabilizer and is distributed in the mixing area with the primary air through radial orifices. The warm combustion air enters in the burner body through its connection. One part of the air volume enters through the orifices from the posterior end of the air nozzle and crosses the annular cylindrical space between the tubular sectors of the flame stabilizer and the air nozzle. At the contact between the fuel radial jets and the primary air, the ignition of the combustible mixture is produced. The flame is propagated through the truncated cone inner space between stabilizer and nozzle. At the exit from the truncated cone head of the stabilizer, the flame tends to return at the base of the propagation area, due to the hot metal surface of the truncated cone head. Thus, there are a flame recirculation which, on the one hand, contributes to the increasing of the flame stability in operation and, on an other hand, influences favorable on the reduction of the NO_x emission. The flame produced during of the first mixing stage between the natural gas and the primary air is a reducing flame, developed in the condition of an insufficient amount of air. The secondary air and, finally, the tertiary air participate in the combustion process, the stepwise distribution of air contributing to the reduction of the NO_x emissions.

*In **Figure 1** is presented the constructive and functional principle of the burner conceived to operate with low NO_x emissions.*

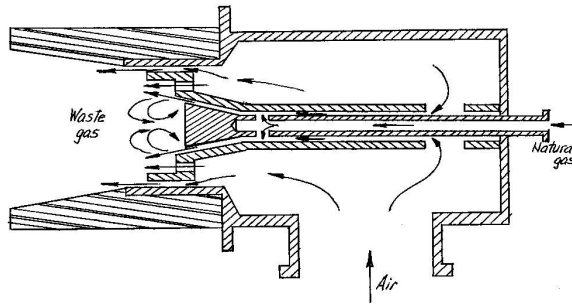


Fig. 1. Principiul constructiv și funcțional al arzătorului cu emisii reduse de noxe
The constructive and functional principle of the burner with low emissions of pollutants

4. METODOLOGIA EXPERIMENTĂRII

Determinarea caracteristicilor și parametrilor funcționali ai arzătorului prototip de 150 kW s-a efectuat pe un stand de încercări de la Institutul de Cercetări Metalurgice București. Arzătorul a fost alimentat cu gaz natural din conducta generală de alimentare a halei la presiunea de 50 mbar, pe racordul de intrare a combustibilului în corpul arzătorului fiind prevăzută o diafragmă pentru măsurarea debitului orar și un manometru tip Bourdon pentru măsurarea presiunii înaintea intrării gazului natural în arzător.

Aerul de combustie, furnizat de un ventilator de aer cu debitul de 1000 m³/h și presiunea de 600 mm col. H₂O, a fost preîncălzit la 400°C într-un schimbător de căldură alimentat independent cu gaz natural. Debitul orar de aer a fost măsurat cu ajutorul unei diafragme montate la intrarea în preîncălzitor. Măsurarea presiunii aerului la intrarea în arzător s-a realizat cu un manometru tip U cu apă.

Analiza chimică a gazelor arse rezultate din procesul de ardere s-a efectuat prin prelevarea probelor din zona vârfului vizibil al flăcării (unde procesul de ardere al combustibilului este practic încheiat) cu sonda analizorului digital TESTO-350. Se determină concentrațiile volumetrice ale CO, O₂, CH₄, NO_x și CO₂ din gazele arse uscate. De asemenea, în timpul funcționării arzătorului, după stabilizarea fiecărui regim termic și determinarea parametrilor funcționali precizați mai sus, s-au măsurat temperatura flăcării (cu un termocuplu Pt-Rh-Pt) și lungimea acesteia de la ieșirea din camera de ardere ceramică până în vârful vizibil.

Metodologia măsurării parametrilor funcționali ai arzătorului constă în următorii pași:

- Efectuarea reglajelor debitelor de gaz natural și aer de combustie corespunzătoare regimului termic nominal, adică debitul de gaz natural de 15 Nm³/h și debitul de aer corespunzător unui coeficient de exces de aer cât mai mic (apropiat de $\alpha = 1$), care

4. EXPERIMENTAL METHODOLOGY

The determination of characteristics and functional parameters of the prototype burner of 150 kW was carried out on a testing stand in the Metallurgical Research Institute of Bucharest. The burner was supplied with natural gas from the general supply pipe of the hall at the pressure of 50 mbar, on the connection of fuel entrance in the burner body being provided with a diaphragm to measure the hourly flow and a manometer Bourdon type to measure the pressure before the natural gas entering into the burner.

The combustion air, provided by an air ventilator with the flow of 1000 m³/h and the pressure of 600 mm H₂O column, was preheated at 400°C into a heat exchanger powered independently with natural gas. The hourly flow of air was measured with a diaphragm fitted at the entrance into the preheater. The measurement of the air pressure at the entrance into the burner was carried out with a U type manometer with water.

The chemical analyze of waste gas resulted from the combustion process was carried out by taking the samples from the head area of the visible flame (where the fuel combustion process is practically finished) with the sensor of the digital analyzer TESTO-350. They are determined the volumetric concentrations of CO, O₂, CH₄, NO_x and CO₂ of the dry waste gas. Also, during the operation of the burner after the stabilization of the each thermal regime and the determination of the functional parameters mentioned above, they were measured the flame temperature (with a Pt-Rh-Pt thermocouple) and its length from the exit from the ceramic combustion chamber up to the visible head.

The measurement methodology of the burner functional parameters consists in the following steps:

- *Making the adjustments of the flows of natural gas and combustion air corresponding to the nominal thermal regime, i. e. the natural gas flow of 15 Nm³/h and the air flow corresponding to a*

asigură un conținut minim de CO în gazele arse (determinat prin analize chimice instantanee ale gazelor).

- Efectuarea altor reglaje ale debitelor de combustibil și aer inferioare regimului nominal, conform aceluiași proceduri, până la atingerea valorii minime a debitului de gaz natural sub care se produce stingerea flăcării.
- Pentru determinarea valorii maxime a debitului de gaz natural la care arzătorul poate funcționa în condiții de siguranță și stabilitate, se deschid succesiv robinetele de gaz natural și aer peste valorile corespunzătoare regimului nominal, până când flacăra își pierde stabilitatea în funcționare și se stinge. Se notează parametrii funcționali ai arzătorului corespunzător regimului termic care precede începerea instabilității funcționale.

coefficient of air excess as low as possible (close to $\alpha = 1$), which assures a minimum content of CO in waste gas (determined by instant chemical analyzes of the gases).

- *Making of other adjustments of fuel and air flows lower compared to the nominal regime, according to the same proceedings, until reaching the minimum value of the natural gas flow below which the flame is extinguished.*
- *To determine the maximum value of the natural gas flow at which the burner can operate safety and stability, they are opened successively the natural gas and air taps over the values corresponding to the nominal regime until the flame loses its stability in operation and extinguishes. They are noted the functional parameters of the burner corresponding to the thermal regime which precedes the commencement of the functional instability.*

5. REZULTATE EXPERIMENTALE

Arzătorul prototip cu puterea termică nominală de 150 kW a fost testat pe un stand de încercări de la Institutul de Cercetări Metalurgice București, conform metodologiei de experimentare descrise mai sus.

În **Tabelul 1** sunt prezentate rezultatele experimentale obținute.

5. EXPERIMENTAL RESULTS

*The prototype burner with the nominal thermal power of 150 kW was tested on a testing stand in the Metallurgical Research Institute of Bucharest, according to the experimentation methodology described above. In **Table 1** are presented the experimental results.*

Tabelul 1. Rezultate experimentale
Table 1. Experimental results

Natural gas		Combustion air			Coeffi- cient of air excess	Chemical composition of waste gas				Flame tempe- rature [°C]	Flame length [m]
Flow [Nm ³ /h]	Pressure [mbar]	Flow [Nm ³ /h]	Pressure [mm H ₂ O column]	Tem- pera- ture [°C]		CO ₂ [%]	O ₂ [%]	CO [mg/Nm ³]	NO _x [mg/Nm ³]		
18.5	38.0	179.6	182	400	1.02	1.5	0.7	28	201	1580	0.65
15.0	25.0	145.7	92	400	1.02	1.5	0.7	26	188	1550	0.60
12.0	16.9	117.7	59	400	1.03	1.4	0.9	34	186	1520	0.50
9.0	11.3	90.0	41	400	1.05	1.1	1.2	39	184	1490	0.35
7.0	7.5	70.6	30	400	1.06	0.9	1.5	49	176	1460	0.30
5.0	5.0	51.4	21	400	1.08	0.6	1.9	67	172	1440	0.20
3.7	3.6	39.5	15	400	1.12	0.9	2.4	90	177	1430	0.15

Conform datelor din **Tabelul 1**, valorile debitului orar de gaz natural sunt cuprinse într-un interval foarte larg între limita minimă (3,7 Nm³/h) și cea maximă (18,5 Nm³/h), explicabil prin existența a trei trepte distincte de amestec între combustibil și aer. Coeficientul de exces de aer are valori foarte mici, în condițiile în care emisiile de CO se mențin în limite reduse, ceea ce indică faptul că soluțiile adoptate prin proiectare permit un foarte bun amestec între combustibil și aerul de combustie în zona de ardere.

Temperatura flăcării atinge valori înalte, care ajung până la 1580°C la debitul maxim de gaz natural și

*According to the data from **Table 1**, the values of the hourly flow of natural gas are contained in a very wide range between the minimum limit (3.7 Nm³/h) and the maximum (18.5 Nm³/h), explained by the existence of three distinct mixing stages between fuel and air. The coefficient of air excess has very low values, in conditions of maintaining the CO emissions in low limits, which indicates that the solutions adopted by design allow a very good mixing between fuel and combustion air in the combustion area.*

The flame temperature reaches high values, up to 1580°C at the maximum flow of natural gas and

1550°C la debitul nominal, reducându-se odată cu scăderea debitului de combustibil. Din punctul de vedere al emisiilor de NO_x, acest nivel ridicat al temperaturii de ardere la regimurile termice mari este dezavantajos conform teoriei privind mecanismul de formare și factorii care influențează NO_x (vezi capitolul 2). Conform aceleași teorii, creșterea excesului de aer (până la $\alpha = 1,2$) favorizează nivelul emisiilor de NO_x, ceea ce înseamnă că la valorile coeficientului α corespunzătoare regimurilor termice mari ($\alpha = 1,02-1,03$), emisiile de NO_x sunt diminuate. Dintre factorii care influențează formarea NO_x, temperatura de ardere și excesul de aer constituie variabile ale procesului de ardere. Cei doi factori au influențe total opuse în intervalul regimurilor termice ale arzătorului, ponderea mai importantă având-o temperatura de ardere. Ceilalți doi factori, enumerați anterior, ar putea avea o influență mai însemnată asupra diminuării emisiilor de NO_x, cu precădere la regimurile termice mari, comparativ cu regimurile termice minime, deoarece volumele mult mai mici de combustibil și aer, care participă la ardere în același spațiu interior al arzătorului, au o probabilitate mult diminuată de a se amesteca în condiții acceptabile. Conform datelor din **Tabelul 1**, valorile emisiilor de NO_x au o tendință ușor descrescătoare de la debitul maxim de gaz natural către cel minim. Totuși, datorită compensării efectelor factorilor care influențează formarea NO_x (în special, a temperaturii de ardere și excesului de aer), se remarcă o relativă nivelare a valorii emisiilor de NO_x pe întregul domeniu de funcționare al arzătorului. Emisiile de NO_x se încadrează într-un interval destul de restrâns între 172-201 mg/Nm³. Comparativ cu limita maximă admisă de normele legale, de 350 mg/Nm³, se poate concluziona că emisiile de NO_x ale arzătorului sunt la un nivel scăzut în întregul domeniu de funcționare.

În **Tabelul 2** sunt prezentate caracteristicile și parametrii funcționali ai arzătorului de 150 kW.

*1550°C at the nominal flow, decreasing with the decrease of the fuel flow. In terms of the NO_x emissions, this high level of the combustion temperature at the high thermal regimes is disadvantageous according to the theory on the formation mechanism and the factors which influence the NO_x emissions (see Chapter 2). According to the same theory, the increasing of the air excess (up to $\alpha = 1.2$) favours the level of the NO_x emissions, which means that at the values of α coefficient corresponding to the high thermal regimes ($\alpha = 1.02-1.03$), the NO_x emissions are diminished. Between the factors which influence the NO_x formation, the combustion temperature and the air excess constitute variables of the combustion process. The two factors have opposing influences in the range of the burner thermal regimes, the most important share having the combustion temperature. The other two factors, mentioned above, could have a significant influence on reducing the NO_x emissions, especially, at the high thermal regimes, compared to the minimum thermal regimes, because the much smaller volumes of fuel and air, which participate in combustion in the same inner space of the burner, have a much diminished probability to mixing on acceptable terms. As the data from **Table 1**, the values of NO_x emissions tend down slightly from the maximum flow of natural gas to the minimum. However, due to compensation effects of factors which influence the NO_x formation (especially, the combustion temperature and the air excess), is distinguished a relative leveling of the value of the NO_x emissions on the whole domain of the burner operation. The NO_x emissions are included in a rather small range between 172-201 mg/Nm³. Compared to the maximum limit allowed by the lawful norms, of 350 mg/Nm³, it can be concluded that the NO_x emissions of the burner have a low level on the whole domain of operation.*

*In **Table 2** are presented the characteristics and the functional parameters of the 150 kW burner.*

Tabelul 2. Caracteristicile și parametrii funcționali ai arzătorului
Table 2. Characteristics and functional parameters of the burner

Name	Unit	Value
Thermal power of the burner	kW	150
Hourly flow of natural gas:		
- maximum	Nm ³ /h	18.5
- nominal	Nm ³ /h	15.0
- minimum	Nm ³ /h	3.7
Natural gas pressure:		
- maximum	mbar	38.0
- nominal	mbar	25.0
- minimum	mbar	3.6
Hourly flow of the combustion air:		
- at the maximum thermal regime	Nm ³ /h	179.6
- at the nominal thermal regime	Nm ³ /h	145.7
- at the minimum thermal regime	Nm ³ /h	39.5

Name	Unit	Value
Combustion air pressure:		
- at the maximum thermal regime	mm H ₂ O col.	182
- at the nominal thermal regime	mm H ₂ O col.	92
- at the minimum thermal regime	mm H ₂ O col.	15
Combustion air temperature	°C	400
Coefficient of air excess:		
- at the maximum thermal regime	-	1.02
- at the nominal regime	-	1.02
- at the minimum regime	-	1.12
Flame temperature:		
- at the maximum thermal regime	°C	1580
- at the nominal regime	°C	1550
- at the minimum thermal regime	°C	1430
Flame length:		
- at the maximum thermal regime	m	0.65
- at the nominal thermal regime	m	0.60
- at the minimum thermal regime	m	0,15
The range of the CO emissions	mg/Nm ³	28 - 90
The range of the NO _x emissions	mg/Nm ³	172 - 201

5. IMPACTUL ASUPRA MEDIULUI

După cum s-a precizat mai sus, arzătorul conceput și realizat de autorii lucrării este destinat înlocuirii arzătorului TRICEM 15 utilizat pe scară largă la cuptoare de încălzire tip cameră din industria siderurgică românească. Măsurători efectuate asupra emisiilor de noxe ale arzătorului de referință la funcționarea în condiții similare de preîncălzire a aerului de combustie (400°C) au indicat următoarele rezultate: emisiile de CO se încadrează în intervalul 47-122 mg/Nm³, iar cele de NO_x sunt cuprinse între 325-640 mg/Nm³. Dacă emisiile de CO sunt mici, în special la funcționarea la debitul nominal de combustibil (15 Nm³/h), depășirea limitei maxime admise de lege (100 mg/Nm³, conform Ordinului nr. 462/1993 al Ministerului Mediului din România) realizându-se doar la funcționarea la debite mici de combustibil, în schimb intervalul emisiilor de NO_x depășește în mod evident limita maximă admisă de 350 mg/Nm³.

Așadar, cel puțin din punct de vedere ecologic, se justifică înlocuirea arzătoarelor de tip TRICEM la cuptoarele de încălzire din industria siderurgică.

În prezent, patru arzătoare de tipul celui testat pe standul de încercări, ale cărui caracteristici tehnice sunt prezentate în **Tabelul 2**, echipează un cuptor de încălzire tip cameră de 6 m², pentru forjare și funcționează la ArcelorMittal Galati.

Din datele furnizate de beneficiar, rezultă că emisiile de noxe și, în special, cele de NO_x, se situează sub limitele maxime admise de lege, conform caracteristicilor tehnice ale arzătorului din **Tabelul 2**.

5. THE IMPACT ON ENVIRONMENT

As noted above, the burner conceived and achieved by the authors' of this paper is destined to replace the TRICEM 15 burner used on a large scale at the chamber type heating furnaces in the Romanian iron and steel industry. Measurements carried out on the pollutants emissions of the reference burner at the operation in similar conditions of preheating of the combustion air (400°C) indicated the following results: the CO emissions are included in the range 47-122 mg/Nm³ and the NO_x are comprised between 325-640 mg/Nm³. If the CO emissions are low, especially, at the operation with the fuel nominal flow (15 Nm³/h), the exceeding of the maximum limit allowed by law (100 mg/Nm³, according to the Order no. 462/1993 of the Romanian Environment Ministry) carrying only at the operation with low fuel flow, in exchange, the NO_x emissions range exceed evidently the maximum limit allowed of 350 mg/Nm³.

Therefore, at least on ecology terms, is justified to replace the TRICEM type burners at the heating furnaces in the iron and steel industry.

*Now, four burners of the type of that tested on the testing stand, whose technical characteristics are presented in **Table 2**, equip a chamber type heating furnace (of 6 m²), for forging and operate in ArcelorMittal Galati.*

*From the data provided by the beneficiary, results that the pollutants emissions and, especially, the NO_x, is placed below the maximum limits allowed by law, according to the technical characteristics of the burner from **Table 2**.*

6. CONCLUZII

1. Principalul obiectiv al cercetării prezentate în lucrare îl constituie găsirea soluțiilor tehnice optime în vederea diminuării emisiilor de oxizi de azot (NO_x) ale arzătoarelor utilizate la cuptoare de încălzire tip cameră din industria siderurgică.
2. Factorii care influențează mecanismul formării oxizilor de azot sunt: gradul de preamestecare a combustibilului cu aerul de combustie, temperatura de ardere a combustibilului, excesul de aer și recircularea gazelor arse în zona de ardere.
3. Soluțiile adoptate pentru noul arzător sunt: distribuția în zona de ardere a aerului de combustie în trei trepte de amestecare cu combustibilul, asigurarea, prin proiectarea pieselor arzătorului, a unui foarte bun amestec între combustibil și aer, astfel încât arderea combustibilului să fie completă la coeficienți de exces de aer foarte mici, crearea condițiilor pentru recircularea gazelor arse la baza flăcării, prin dimensionarea adecvată a capului frontal al stabilizatorului de flăcără.
4. Testarea arzătorului prototip, cu puterea termică nominală de 150 kW și aer preîncălzit la 400°C, s-a efectuat în baza experimentală a Institutului de Cercetări Metalurgice București și rezultatele experimentale au confirmat corectitudinea alegerii soluțiilor tehnice. Astfel, în condițiile obținerii unor temperaturi înalte ale flăcării, de peste 1550°C, emisiile de noxe au avut valori mult sub nivelele maxime admise de lege: 26 mg CO/Nm^3 și 188 mg NO_x/Nm^3 la regimul termic nominal, față de limitele admise de 100 mg CO/Nm^3 și 350 mg NO_x/Nm^3 .
5. Noul arzător de 150 kW a fost conceput pentru a înlocui arzătoarele de tip TRICEM cu aceeași putere termică nominală, caracterizate prin emisii mari de NO_x .
6. În prezent, patru arzătoare de tipul celui testat pe standul de încercări funcționează la ArcelorMittal Galați, pe un cuptor de încălzire tip cameră de 6 m². Emisiile de noxe și, în special, cele de NO_x se situează sub limitele maxime admise de normele legale.

6. CONCLUSIONS

1. The main objective of the research presented in the paper constitutes the finding of the optimum technical solutions to diminish the nitrogen oxides (NO_x) emissions of the burner used at the chamber type heating furnaces in the iron and steel industry.
2. The factors which influence the mechanism of nitrogen oxides formation are: the premixing degree of the fuel with the combustion air, the combustion temperature of fuel, the air excess and the waste gas recirculation in the combustion area.
3. The solutions adopted for the new burner are: distribution in the combustion area of the combustion air in the three mixing stages with the fuel, assuring, by the burner pieces design, of a very good mixing between fuel and air, so that the fuel combustion to be complete at very low coefficients of air excess, the creation of conditions for recirculation of waste gas at the flame base, by the adequate sizing of the front head of the flame stabilizer.
4. The testing of the prototype burner, with the nominal thermal power of 150 kW and air preheated at 400°C, was carried out in the experimental base of the Metallurgical Research Institute Bucharest and the experimental results confirmed the correctness of the technical solutions selecting. Thus, in the conditions of obtaining high temperature of flame, of over 1550°C, the pollutions emissions had values much below the maximum levels allowed by law: 26 mg CO/Nm^3 and 188 mg NO_x/Nm^3 at the nominal thermal regime, compared to the allowable limits of 100 mg CO/Nm^3 and 350 mg NO_x/Nm^3 .
5. The new burner of 150 kW was conceived to replace the TRICEM type burners with the same nominal thermal power, characterized by high NO_x emissions.
6. Now, four burners of the type of that tested on the testing stand operate in ArcelorMittal Galați, on a chamber type heating furnace of 6 m². The emissions of pollutants and, especially, the NO_x are placed below the maximum limits allowed by the lawful norms.

BIBLIOGRAFIE / REFERENCES

- [1] L. PĂUNESCU, A. GABA, M.P. MUNTEANU - *Instalație de ardere cu conținut redus de NO_x în gazele arse pentru industria metalurgică*, Cercetări Metalurgice și de Noi Materiale, vol. XXIII, nr. 2, pag. 23-33, 2015.
- [2] Maria NICOLAE, A. NICOLAE, P. TUDOR, M. LICURICI, C. MĂNDRU, A. IOANA - *Dezvoltare durabilă în siderurgie prin valorificarea materialelor secundare*, Editura Printech, București, 2004.
- [3] C. SCHWERDT - *Modeling NO_x - formation in combustion processes*, Lund Institute of Technology, Sweden, June 2006. <http://www.control.lth.se>