ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ENERGETYKA z. 120 Nr kol. 1260

Andrzej KAPITANIAK, Sławomir DECZYŃSKI
Instytut Techniki Cieplnej, Łódź

EMISJA TLENKÓW AZOTU Z IMPORTOWANYCH KOTŁÓW GRZEWCZYCH Z PALNIKAMI BLOKOWYMI OPALANYCH PALIWAMI GAZOWYMI I CIEKŁYMI

Streszczenie. Na tle warunków tworzenia się tlenków azotu omówiono wymagane zmiany w konstrukcji kotłów grzewczych z blokowymi palnikami olejowymi i gazowymi wprowadzone w celu dalszego ograniczenia NO_x. Przedstawiono wyniki stężeń i emisji NO_x z kilku importowanych kotłów z różnym układem komory paleniskowej (gorącą lub chłodzoną wodą) i konstrukcji palników.

NITRIC OXIDES EMISSION FROM IMPORTED OIL/GAS – FIRED CENTRAL HEATING BOILERS WITH BLOCK – BURNERS

Summary. Against a background of nitric oxides formation, the requirements of design modification for distinct reduction of NO_x emited from oil/gas – fired central heating boilers have been presented and analysed. Some results of NO_x concentration into flue gases (mg/m^3 by O_2 = 3%) and NO_x emission (g/GJ) obtained during tests of the imported boilers with block – burners have been presented. It was considered several boiler designs with hot and water – cooling combustion chambers and different oil/gas burners.

STICKOXIDEMISSION AUS IMPORTIERTEN HEIZKESSELN MIT DEN BLOCKBRENNERN FÜR FLÜSSIGE BRENNSTOFFE UND GAS

Zusammenfassung. Auf Grund der Bildungsmechanismen von Stickstoffoxiden werden neue Massnahmen zur Reduzierung der NO_x Emission aus Heizkessel mit Gebläsebrennern vorgestellt und analisiert. Einige Ergebnissen von NO_x Konzentration (mg/m^3 bei O_2 = 3%) und NO_x Emission (g/GJ) aus importierenden Heizkessel werden vorgestellt. Die Untersuchungen enthalten Heizkessel mit „heisser" und „kalter" Brennkammer und ausgerüstet mit verschiedenen Öl/Gasbrenner Typen.

1. WSTĘP

Obok priorytetowych problemów ekologicznych związanych z eksploatacją kotłów energetycznych i przemysłowych, niepomijalne jest także zapewnienie minimalizacji emisji NO_x wydzielanej przez bardzo dużą liczbę instalowanych kotłów grzewczych o mocach 10 kW 1,0 MW[1)] [1]. Ostatnio obserwuje się wzmożony import wodnych niskotemperaturowych kotłów grzewczych opalanych gazem i olejem. Niektóre z tych urządzeń (na ogół tańsze) nie odpowiadają już wymaganiom ochrony środowiska obowiązującym w krajach Unii Europejskiej, ale część innych importowanych stanowi przykład zaawansowanej techniki sprostającej ostrym kryteriom ekologicznym (tabl. 1).

Tablica 1

Dopuszczalne stężenie i emisje NO_x (przeliczone do NO_2) dla kotłów grzewczych z palnikami blokowymi

Wymaganie	NO_x			
	mg/kWh	g/GJ	ppm O_2 = 0%	mg/m^3 O_2 = 3%
DIN 4702 Teil 1				
olej EL (moc do 2 MW)	260	72,2	148	260
gaz ziemny (moc do 350 kW)	150	41,7	85	150
gaz ziemny (moc 350 ÷ 2000 kW)	200	55,6	114	200
Znak Blauer Engel				
RAUL–UZ–9 olej EL (moc do 120 kW)	140	38,9	81	140
RAL–UZ–46 olej EL (palnik integralnie związany z kotłem, moc do 120 kW)	130	36,1	75	130
RAL–UZ–41 gaz ziemny (moc do 2 MW)	100	27,8	57	100
Dla aglomeracji Hamburga (moc do 1 MW)				
olej EL	98	27,2	55	98
gaz ziemny	62	17,2	35	62
LRV–92 (dane szwajcarskie)				
olej EL	120	33,3	68	120
gaz ziemny	80	22,2	45	80
Wymagania polskie [2]				
dla kotłów o mocach 0,2 ÷ 50 MW (grupa C)			178[1)]	313[1)]
olej opałowy	324	90	192[2)]	338[2)]
gaz ziemny	126	35	63[3)]	125[3)]

1) Przyjęto dla oleju opałowego lekkiego wg WT–MZRiP – 225: V^t_{ss} = 10,26 m^3/kg, λ = 1,154, Q^r_i = 0,04159 GJ/kg, V^t_p = 11,130 m^3/kg.

2) Przyjęto dla oleju Ekoglin: V^t_{ss} = 9,72 m^3/kg, λ =1,152, Q^r_i = 0.0427 GJ/kg, V^t_p = 10,670 m^3/kg.

3) Przyjęto dla gazu ziemnego GZ–50: V^t_{ss} = 8,8387 m^3/m^3, λ = 1,15, Q^r_i = 0,03499 GJ/m^3, V^t_p = 9,340 m^3/m^3.

1) Aktualnie obowiązujące przepisy o ochronie powietrza [2] dotyczą kotłów o mocach powyżej 22 kW.

Układy konstrukcyjne palników gazowych iniektorowych stosowanych w kotłach grzewczych mniejszych mocy i osiągane emisje i stężenia NO_x były ostatnio publikowane [3, 4]. Rozwijając zbliżoną tematykę przedstawiono, na tle nowoczesnych rozwiązań kotłów grzewczych z palnikami blokowymi (i powierzchniowymi ze wstępnym wymieszaniem gaz – powietrze), wyniki pomiarów stężeń i emisji NO_x wywiązywanych przy spalaniu oleju napędowego i lekkiego (opałowego) oraz gazu ziemnego GZ–50.

2. TLENKI AZOTU I MOŻLIWOŚCI OGRANICZENIA W KOTŁACH GRZEWCZYCH

Mechanizmy tworzenia się tlenków azotu zostały już dość wszechstronnie omówione w wielu publikacjach, np. [3, 5, 6].

Problem ten skrótowo można przedstawić następująco:

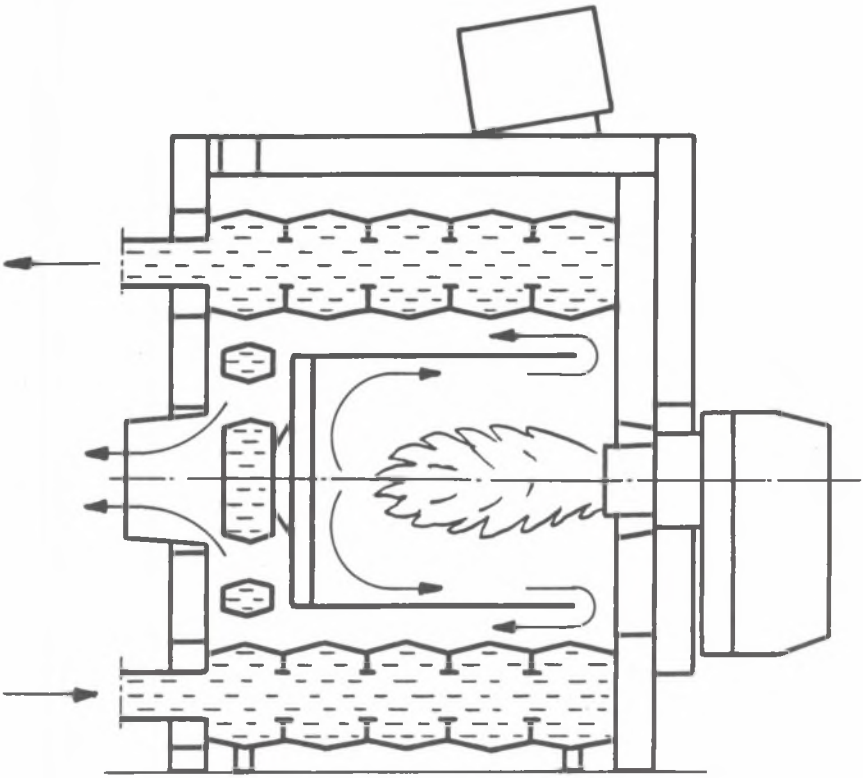
Podczas procesów spalania występują także reakcje pomiędzy azotem i tlenem. Powstałe produkty, oznaczone jako NO_x, obejmują głównie tlenek azotu NO i dwutlenek azotu NO_2. Tlenek azotu jest bezbarwnym toksycznym gazem o dużej zdolności wchodzenia w reakcje z innymi związkami. Łączy się on z wolnym tlenem atomowym, tworząc również szkodliwy NO_2. Tlenki azotu, obok tlenków siarki, powodują powstawanie tzw. "kwaśnych deszczy" i mogą tworzyć agresywny kwas HNO_3. Ponadto w połączeniu ze związkami węglowodorów zanieczyszczają atmosferę.

Azot w procesach spalania pochodzi z paliwa i powietrza. Wyróżnia się trzy podstawowe mechanizmy powstawania NO_x:

- paliwowy NO_x występuje w wyniku reakcji pomiędzy organicznie związanym azotem w paliwie a tlenem, pochodzącym z powietrza. Proces tworzenia tych tlenków zaczyna się przy temperaturze 1070 K. W odniesieniu do omawianych tu rodzajów paliw, paliwowy NO_x występuje tylko przy spalaniu ciężkiego oleju opałowego, a przy olejach napędowych i lekkich opalowych prawie się nie tworzy ze względu na bardzo mały udział azotu w tych paliwach. Nie występuje natomiast w spalinach z gazu ziemnego, ponieważ azot w nim nie jest organicznie związany z metanem;
- szybki NO_x (prompt NO_x) tworzy się równolegle z powstawaniem termicznego NO z azotu zawartego w powietrzu. Występuje w rejonie konturu płomienia w wyniku reakcji pomiędzy tlenem a węglowodorami. Kinetyka reakcji zależy od stosunków stechiometrycznych i temperatury;
- termiczny NO wywiązujący się z azotu doprowadzonego z powietrzem przy temperaturach powyżej 1570 K i zależy od koncentracji tlenu atomowego i czasu przebywania składników reakcji w strefie podwyższonych temperatur. Przy spalaniu olejów i gazu ziemnego występuje zawsze termiczny tlenek azotu, który jest głównym składnikiem NO_x.

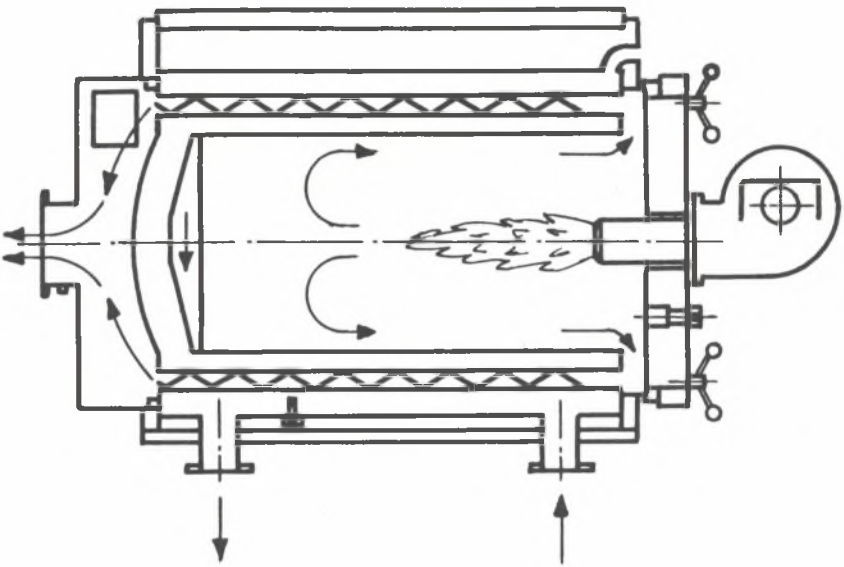
Temperatura płomienia ma największy wpływ na tworzenie się NO_x, które osiąga max przy 2170 K. Także wydłużony czas przebywania reagentów w rejonach wysokich temperatur, tj. w komorze paleniskowej, prowadzi do podwyższenia koncentracji NO_x. Następnym czynnikiem sprzyjającym powstawaniu tlenków azotu jest zwiększona koncentracja tlenu (wysokie ciśnienie cząstkowe). Należy tu jednak zauważyć, że w praktyce ze wzrostem liczby nadmiaru powietrza spada temperatura procesu, co w konsekwencji może ograniczyć NO_x.

Współcześnie eksploatowana większość kotłów grzewczych, opalanych olejem lub gazem, odznacza się bardzo wysoką sprawnością cieplną 89 ÷ 92%. Uzyskano to głównie przez stosowanie: komór paleniskowych, w których zazwyczaj następuje zawracanie płomienia (rys. 1 i 2), optymalnych układów



Rys. 1. Typowy kocioł grzewczy Stiebel żeliwny członowy z nawrotem płomienia w komorze paleniskowej tzw. gorącej

Fig. 1. Typical central heating boiler made from cast iron with reversal flame in hot combustion chamber



Rys. 2. Kocioł grzewczy stalowy TZAR–500 z nawrotem płomienia w komorze paleniskowej ze ściankami chłodzonymi wodą

Fig. 2. Steel central heating boiler with reversal flame in combustion chamber with water – walls

powierzchni ogrzewalnych (np. ożebrowanie ścianek od strony przepływu spalin, wstawki turbulentne w płomieniówkach kotłów stalowych) i szczelnie owiniętej z właściwych tworzyw izolacji cieplnej oraz palników zapewniających zupełne spalanie przy optymalnej niskiej liczbie nadmiaru powietrza. Ponadto kotły te są w pełni zautomatyzowane (sporadycznie są półautomatyczne) i posiadają rozbudowane systemy regulacyjno–zabezpieczające.

Opisane powyżej zalety ekonomicznej pracy kotłów nie zabezpieczają jednak optymalnej minimalnej emisji NO_x, ponieważ w takiej komorze paleniskowej, tzw. „gorącej", występują wysokie obciążenia cieplne i stosunkowo długi jest czas przebywania składników reakcji Zeldowicza w strefie wysokich temperatur.

Celem zabezpieczenia korzystniejszych warunków w aspekcie ekologicznym wprowadzono w ostatnich latach nieco inne rozwiązania w konstrukcji kotłów grzewczych ograniczające tworzenie się NO_x:

a) Obniżenie temperatury spalania przez wychłodzenie płomienia[1)] w komorze paleniskowej ze ściankami omywanymi wodą.

[1)] W palnikach gazowych iniektorowych problem ten zrealizowano przez wprowadzenie do przestrzeni płomieni elementów kantalowych wychładzających płomień [3, 4]

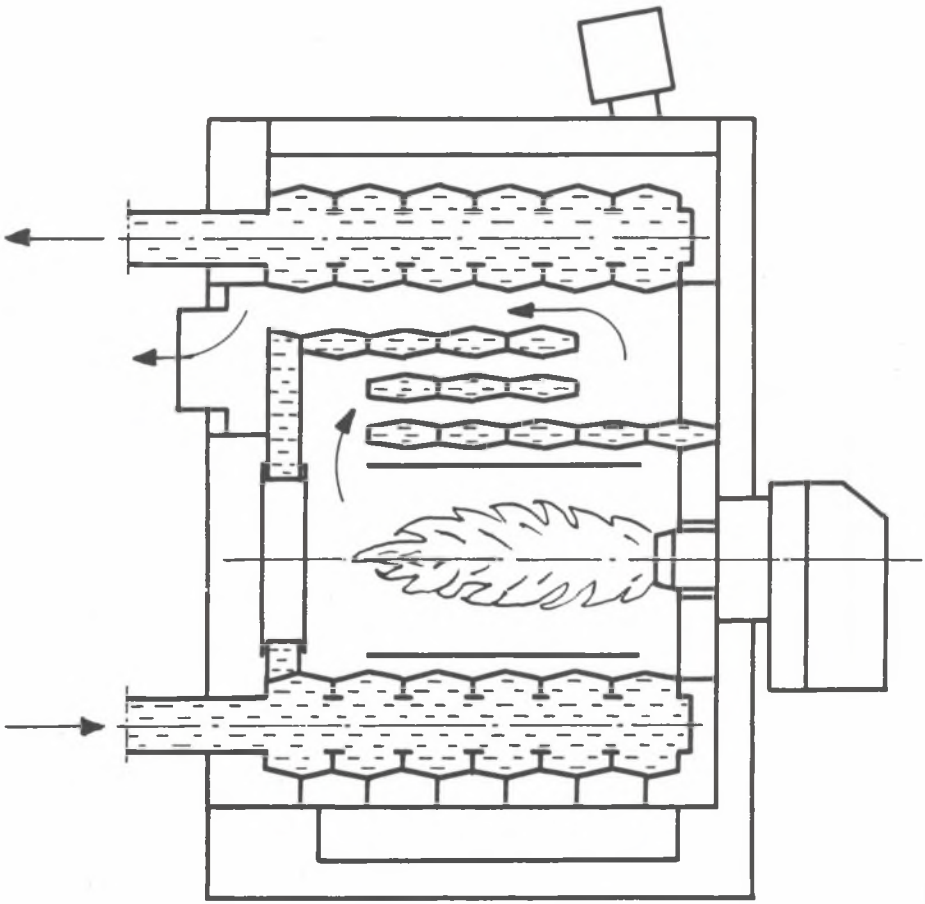
b) Skrócenie czasu przebywania reagentów w strefie wysokich temperatur przez zmianę układu kanałów spalinowych i konfiguracji komory paleniskowej.
c) Zastosowanie specjalnych palników, np. ze wstawką, umożliwiającą recyrkulację spalin z konturu płomienia i zmieszanie ich z doprowadzonym powietrzem (także spalanie dwustrefowe).
d) Projektowe przystosowanie kotłów do pracy z regulacją mocy cieplnej, np. dwustopniowej 60% i 100% zamiast układu „włącz – wyłącz". Przez zmniejszenie liczby rozruchów palnika ogranicza się emisję, ponieważ w momencie startu emisja gwałtownie wzrasta w stosunku do stanu przy pracy ustalonej.

W rozwiązaniach praktycznych często łączy się przedsięwzięcia wymienione w pkt. a ÷ c. Przykładem ekologicznego nowoczesnego kotła jest układ trzyciągowy z jednokrotnym przepływem płomienia i spalin przez komorę paleniskową ze ściankami chłodzonymi wodą (rys 3). Następuje tu skrócenie czasu przebywania reagentów w obszarze formowania się płomienia, a tworzące się gorące spaliny po wlocie do konwekcyjnych powierzchni ogrzewalnych (drugi i trzeci ciąg) szybko ulegają wychłodzeniu.

Często, szczególnie przy spalaniu oleju, w układach kotłów żeliwowych wg rys. 3 zachowuje się cylindryczną wstawkę ze stali wysokogatunkowej, co w pewnym stopniu ogranicza chłodzenie, ale może wywołać recyrkulację spalin do czoła płomienia.

Innym rozwiązaniem dotyczącym konstrukcji palnika jest zastosowanie recyrkulacji spalin w powiązaniu ze spalaniem dwustrefowym (rys. 4). W pierwszej fazie powietrze w ruchu wirowym miesza się z promieniowo dopływającym gazem, tworząc w płomieniu obszar o zróżnicowanych stosunkach gaz – powietrze. Pełne rozwinięcie płomienia następuje w kołowej komorze paleniskowej, a przez otworki w powierzchni stożkowej wycinka rury palnika (przed wkładką dodatkową) dopływają recyrkulacyjne spaliny wychładzające płomień.

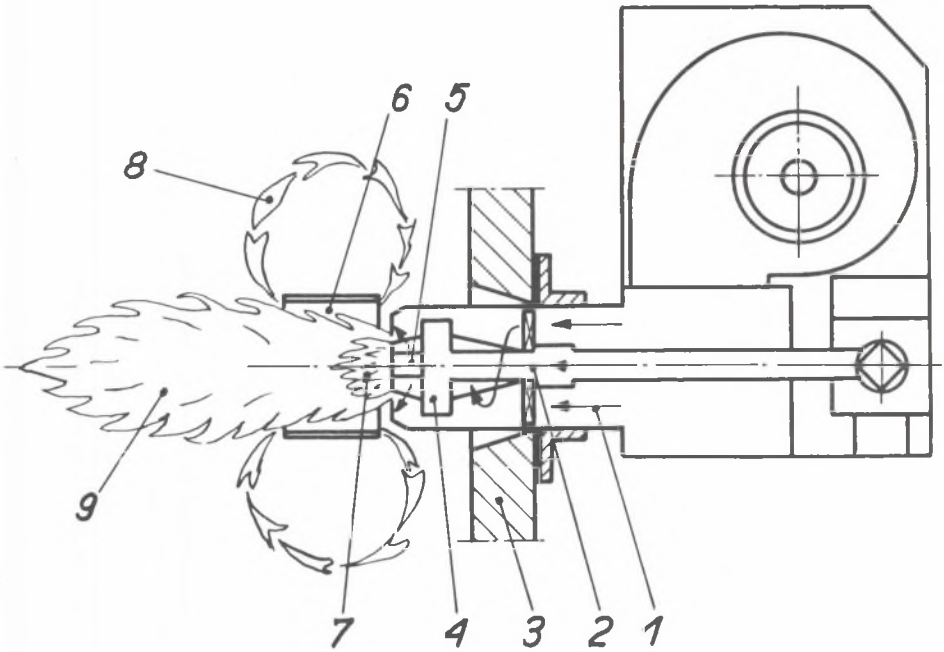
Ciekawe, ze względów ekologicznych, jest także rozwiązanie powstałe z modyfikacji gazowych palników iniektorowych [4]. Palnik gazowy powierzchniowy z wentylatorem i wstępnym wymieszaniem strumieni gazu i powietrza zastosowała firma Stiebel Eltron (Hydrotherm) w kotłach Eurotemp Turbo (HET) o mocach do 40 kW. Wentylator promieniowy zapewnia dopływ całkowitej ilości powietrza potrzebnego do spalania. Powietrze to miesza się z gazem, wypływającym z dyszy o sześciu otworach w rurze wstępnego mieszania, przed wlotem do palnika. Silnik wentylatora posiada elektroniczny układ regulacji prędkości obrotowej i jej kontrolę. Zapewnia to utrzymanie właściwych obrotów wentylatora podczas zapłonu oraz pracy przy dwóch stopniach mocy cieplnej. Zastosowano także regulator stosunku gaz – powietrze uzależniający właściwą propozycję strumienia tych



Rys. 3. Kocioł grzewczy żeliwny członowy RU–15G trzyciągowy z jednokrotnym przepływem spalin przez komorę paleniskową

Fig. 3. Three – pass central heating boiler RU–15G with single flame flow in combustion chamber

czynników. Schemat palnika pokazano na rys. 5. Powierzchnia czynna palnika pokryta jest metalizowaną matą włókninową o działaniu katalizującym, prowadzącym do skrócenia płomienia.



Rys. 4. Gazowy palnik blokowy ze spalaniem dwustopniowym i z recyrkulacją spalin: 1 – powietrze do spalania, 2 – dopływ gazu, 3 – ściana przednia, 4 – kolektor pierścieniowy rozprowadzenia gazu, 5 – powierzchnia ze szczelinami dla wypływu gazu, 6 – wkładka dodatkowa, 7 – obszar o zróżnicowanych stosunkach gaz – powietrze, 8 – recyrkulacja spalin z konturu płomienia, 9 – strefa dopalania

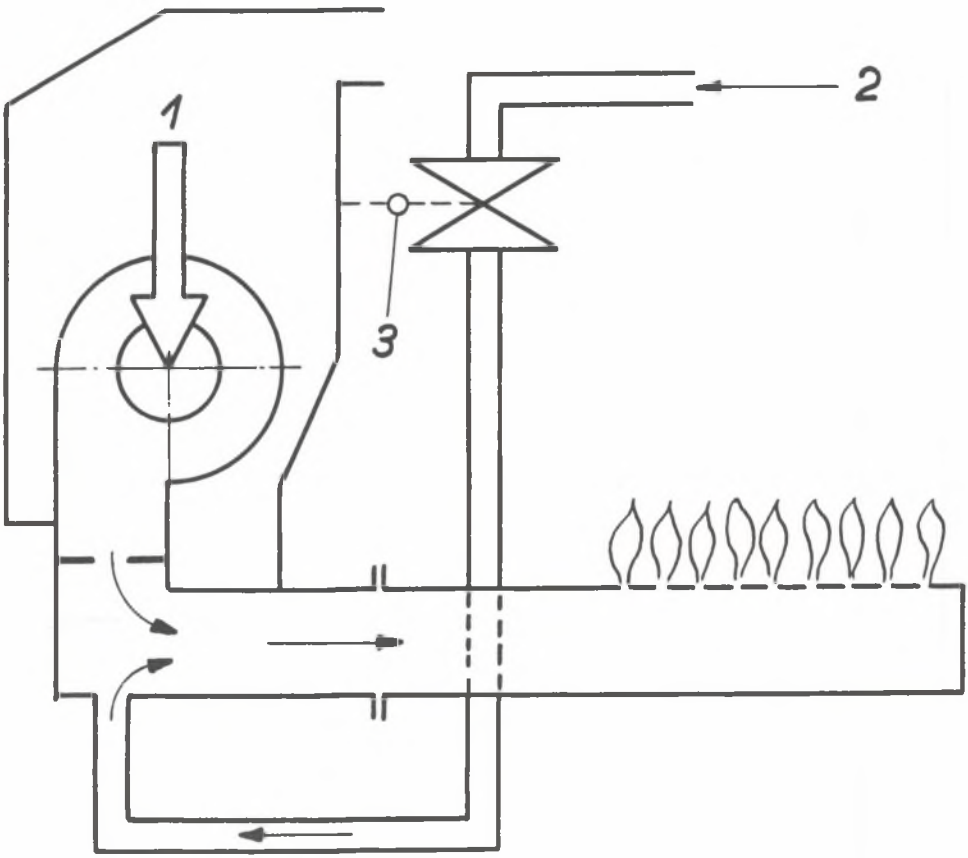
Fig. 4. Gas block–burner with two–stage combustion and flue gas recirculation: 1 – combusion air, 2 – gas inlet, 3 – frontal wall, 4 – ring collector, 5 – gas slots, 6 – additional insert, 7 – diversifiet air/gas ratio area, 8 – flue gas recirculation from flame, 9 – after burning zone

3. WYNIKI STĘŻEŃ I EMISJI NO_X

W celu zobrazowania poziomu emisji NO_x, wydzielanych z importowanych kotłów grzewczych z palnikami blokowymi, przedstawiono szereg wyników uzyskanych podczas badań atestacyjnych lub prób regulacji procesu spalania. Wyniki podano oddzielnie dla spalania oleju i gazu ziemnego.

Stężenia i emisje NO_x, przedstawione na rys. 6, dotyczą następujących kotłów opalanych olejem:

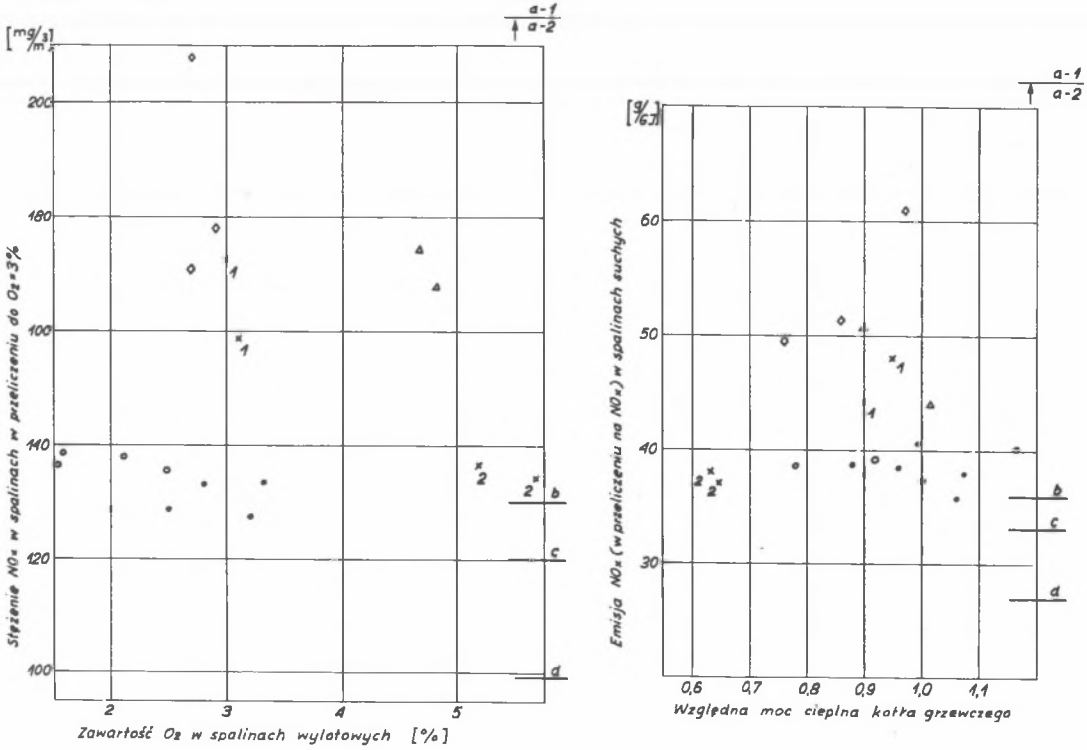
– kotła OTS–32 o mocy 32 kW z palnikiem SLV–10 opalanego olejem napędowym (układ konwencjonalny),



Rys. 5. Palnik gazowy z wentylatorem i wstępnym wymieszaniem gazu z powietrzem stosowany w kotłach HET: 1 – powietrze, 2 – gaz, 3 – regulator stosunku gaz – powietrze

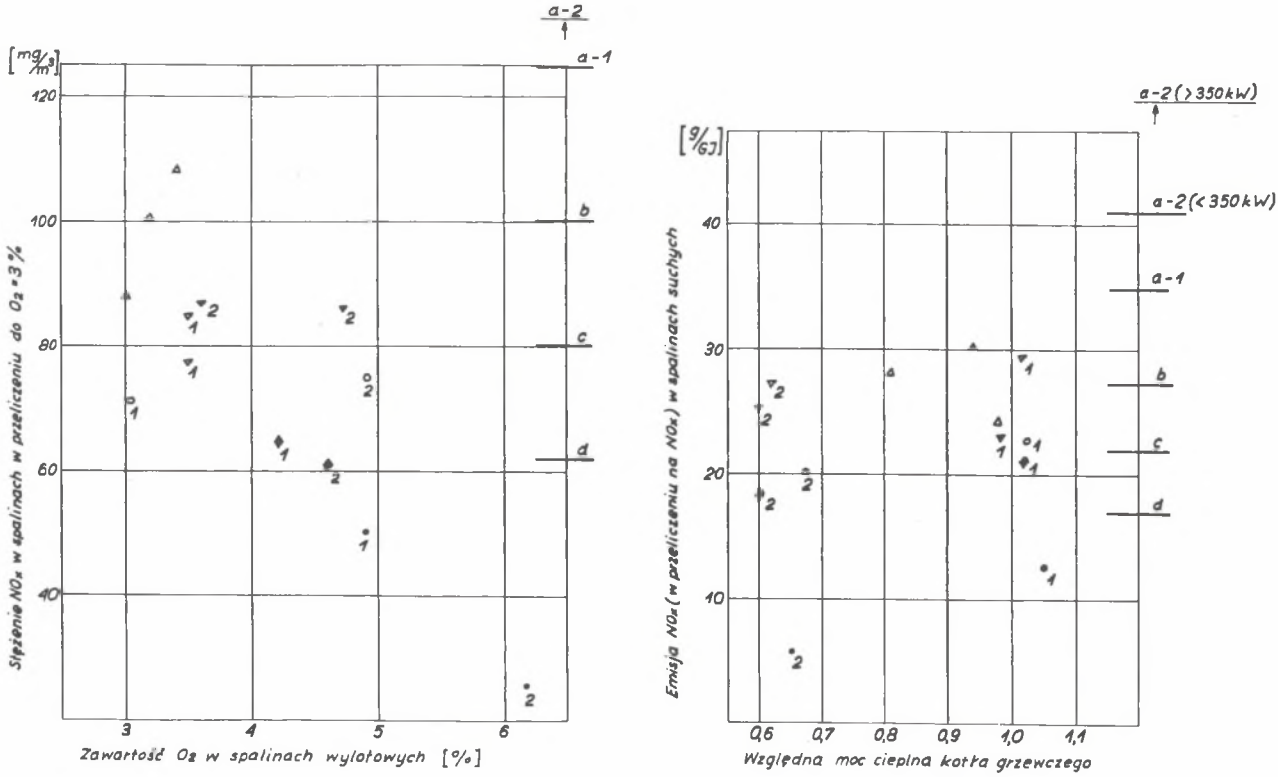
Fig. 5. Gas burner with fan and gas/air premixing used in boilers of type HET: 1 – air, 2 – gas, 3 – gas/air ratio adjustment

- kotła UNIT–HYD 20 o mocy 23 kW z palnikiem HD–1 opalanego olejem napędowym (układ konwencjonalny),
- kotła TZAR–500 o mocy 580 kW KRL–402 N opalanego olejem opałowym Ekoglin (układ wg rys. 2, dwustopniowa regulacja mocy),
- kotła F–300/13 o mocy 540 kW z palnikiem HLZ 950 C opalanego lekkim olejem opałowym (układ wg rys. 1),
- kotła JS–2101/21U o mocy 27 kW z palnikiem blokowym (układ wg rys. 1).



Rys. 6. Stężenia i emisje NO_x przy spalaniu olejów: – kocioł OTS–32, Δ – kocioł UNIT–HYD 20, X – kocioł TZAR–500, O – kocioł F–300/13, • – kocioł Jd–2102/21U, 1 – moc nominalna, 2 – moc częściowa (dotyczy kotła TZAR–500), (a–1) – wymagania polskie 313 mg/m^3, 90 g/GJ: (a–2) – DIN 4702 Teil 1 260 mg/m^3, 72 g/GJ; (b) – RAL–UZ46 130 mg/m^3, 36 g/GJ; (c) – LRV–92 120 mg/m^3, 33 g/GJ; (d) – aglomeracja Hamburga 98 mg/m^3, 27 g/GJ

Fig. 6. Results of NO_x – concentration and NO_x – emission from oil – fired boilers: 1 – full power rating, 2 – partial power rating (a–2) DIN 4702 requirement, (b) RAL–UZ–46 requirement, (c) LRV–92 requirement for city Hamburg



Rys. 7. Stężenia i emisje NO_x przy spalaniu gazu ziemnego GZ–50: Δ – kocioł F–300/13, O – kocioł F–200/GNT, ∇ – kocioł Stiebel, – kocioł RU–15–G, • – kocioł HET24/40, 1 – moc nominalna, 2 – moc częściowa, (a–1) – wymagania polskie 125 mg/m^3, 35 g/GJ; (a–2) – DIN 4702 Teil 1 moc 350 kW – 150 mg/m^3, 2 g/GJ; moc 350 kW – 200 mg/m^3, 56g/GJ; (b) – RAL–UZ–41 100 mg/m^3, 28 g/GJ; (c) – LRV–92 80 mg/m^3, 22 g/GJ; (d) – aglomeracja Hamburga 62 mg/m^3, 17 g/GJ

Fig. 7. Results of NO_x – concentration and NO_x – emission from natural gas–fired boilers; designations, see fig. 6.

Stężenie i emisje NO_x zebrane na rys. 7 dotyczą kotłów opalanych gazem ziemnym GZ–50:

- kotła F–300/13 o mocy 540 kW z palnikiem MG2Z–L–N (układ wg rys. 1),
- kotła F–200/GNT o mocy 185 kW z palnikiem RG–30Z–L–N (układ wg rys. 1),
- kotła Stiebel o mocy 520 kW z palnikiem Elco (układ wg rys. 1),
- kotła RU 15–G o mocy 500 kW z palnikiem Elco (układ wg rys. 3),
- kotła HET 24/40–Turbo o mocy 40 kW z palnikiem powierzchniowym (wg rys. 5). (Układ członów usytuowanych nad sobą).

4. UWAGI KOŃCOWE

1. Przedstawione na rys. 6 i 7 wyniki stężeń i emisji NO_x wykazują, że rozpatrywane kotły z importu spełniają wymagania krajowe [2] i normę DIN–4702, Teil 1.
2. Uwzględniając aktualne zaostrzone przepisy w UE, np. „Blauer Engel" i LRV–92 (Schweizer Luftrein–halte Verordnung) można stwierdzić, że:
   - analizowane kotły grzewcze z olejowymi palnikami blokowymi na ogół nie spełniają tych wymagań,
   - wymagania te są spełnione przez gazowe kotły grzewcze wg rys. 3 i z palnikiem powierzchniowym (rys. 5) oraz częściowo przez niektóre kotły wg rys. 1.
3. Wymagania najbardziej ostre (Hamburger Werte–Forderprogramm) dotrzymały jedynie opalane gazem kotły HET–24/40 i przy mocy częściowej kocioł wg rys. 3.
4. Opisane przedsięwzięcia konstrukcyjne zmierzające do wydatnego ograniczenia tworzenia się NO_x zostały potwierdzone wynikami podanymi na rys. 6 i 7. Zbyt mała jeszcze liczba badanych jednostek kotłowych nie pozwala na szersze uogólnienia i jednoznaczną rekomendację danego rozwiązania konstrukcyjnego.
5. W świetle przytoczonych wyników widać, że tylko część importowanych kotłów grzewczych spełnia zaostrzone przepisy o ochronie powietrza w UE. Nasze wymagania dotyczące kotłów o mocy powyżej 200 kW [2] należałoby rozszerzyć także na mniejsze moce oraz zróżnicować i ewentualnie zaostrzyć wymagania szczegółowe. Należy uwzględnić fakt, że bardzo liczne kotły grzewcze, pracujące w sezonie grzewczym na obszarach miejskich i ich obrzeżach oraz w rejonach leczniczo–klimatycznych, wpływają znacząco na poziom emisji wydzielanych tlenków azotu do atmosfery. Dlatego celowe jest w kotłach grzewczych projektowe ograniczenie emisji substancji szkodliwych, w tym NO_x.

LITERATURA

[1] Ekspertyza zespołu autorów pod redakcją J.Tomeczka: Spalanie paliw ze szczególnym uwzględnieniem problemów ekologicznych. PAN, Komitet Termodynamiki i Spalania. Warszawa 1992.
[2] Rozporządzenie MOŚZNiL nr 12 z dnia 09.02.12 w sprawie ochrony powietrza przed zanieczyszczeniami (Dz. Ustaw nr 15/90).
[3] Kapitaniak A., Deczyński S.: Zastosowanie elementów konstrukcyjnych wychładzających płomień w celu ograniczenia tworzenia się termicznych tlenków azotu w urządzeniach grzewczych opalanych gazem. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Cieplne Maszyny Przepływowe nr 104, 1993.
[4] Kapitaniak A., Deczyński S.: Modyfikacja gazowych palników i niektórych kotłów grzewczych w celu dotrzymania emisji NO_x według rygorystycznych wymagań obowiązujących w zachodniej Europie. II Ogólnopolska Konferencja nt. „Gospodarka cieplna i eksploatacja pieców przemysłowych". Politechnika Częstochowska, 1994.
[5] Wheeler W.H.: Chemical and Engineering Aspects of Low NO_x–Concentration. The Chemical Engineer, November, 1980.
[6] Kapitaniak A.: Metody przedsięwzięć pierwotnych ograniczenia emisji tlenków azotu podczas pracy wytwornic pary. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Cieplne Maszyny Przepływowe nr 100, 1990.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik CWYNAR

Wpłynęło do Redakcji 6.08.1994 r.

Abstract

Against a background of nitric oxides formation, the requirements of design modification for distinct reduction of NO_x in flue gases from oil/gas–fired central heating boilers have been presented and analysed. The consideration about design problems comprised: typical central heating boilers made from cast iron and from steel with hot and cooling combustion chamber. The boilers had two – or three – pass designs of heating surfaces. The location of flames were reversal into combustion chamber or as single flow without curvature. Some pictorial schemes of the above described boilers, block–burner with two-stage combustion and gas burner with premixing of gas/air have been given.

Some results of NO_x concentration in flue gases and NO_x emission obtained during test of the imported boilers with block–burners have been presented. These results were compared with German and Polish enviromental requirements for air protection. The lowest NO_x formation was obtained from boilers made according to Fig. 3 and with a burner showed in Fig. 5.