

Damian TOMAS

Fabryka Kotłów RAFAKO S.A., Racibórz

## OSIĄGNIĘCIA RAFAKO W ZAKRESIE REDUKCJI EMISJI TLENKÓW AZOTU

**Streszczenie.** W opracowaniu omówiono osiągnięcia RAFAKO w dziedzinie obniżenia emisji  $\text{NO}_x$  dla kotłów węglowych z palnikami tangencjalnymi. Dokonano przeglądu różnych wariantów palników tangencjalnych, przypomniano stosowane młyny, omówiono potencjalne negatywne zjawiska mogące wystąpić w niskoemisyjnym palenisku. Przedstawiono teoretyczne zależności wpływające na redukcję tlenków azotu i przełożono je na zasady projektowania. Realizację zasad projektowania podano na przykładzie dwóch uruchomionych obiektów, zaprezentowano uzyskane dobre wyniki. Na koniec podano warianty nowej generacji palników niskoemisyjnych przewidziane do stosowania przez RAFAKO.

## ACHIEVEMENTS OF RAFAKO REGARDING REDUCTION OF NITROGEN OXIDES EMISSION

**Summary.** The paper discusses achievements of Rafako regarding reduction of  $\text{NO}_x$  emission for coal fired boilers with tangential burners. A review of various options of tangential burners was made, applied mills were listed and potential negative phenomena, which may occur in a low  $\text{NO}_x$  furnace, were discussed. Theoretical correlations affecting reduction of nitrogen oxides were presented and rendered into design principles. Accomplishment of design principles was shown on the example of two started units and good results obtained were presented. Options of a new generation of low  $\text{NO}_x$  burners were shown at the end, which are planned to be used by Rafako.

## LEISTUNGEN DER FIRMA RAFAKO IM BEREICH DER REDUKTION VON STICKSTOFFOXIDEEMISSIONEN

**Zusammenfassung.** In der Arbeit wurden die Leistungen Rafako's im Bereich der  $\text{NO}_x$  - Emissionbegrenzungen bei Kohlenkesseln mit Tangentialbrennern besprochen. Dabei wurden verschiedene Entwicklungsvarianten der Tangentialbrenner dargestellt, eingesetzt

Mühlen erwähnt und potentielle negative, bei emissionsarmer Feuerung auftretende Erscheinungen Besprochen. Dargestellt wurden theoretische Relationen, die die Reduktion von Stickstoffoxiden beeinflussen. Diese Relationen wurden auf die Konstruktionsprinzipien übertragen. Die Abwicklung der Konstruktionsprinzipien wurde am Beispiel von zwei in Betrieb genommenen Anlagen geschildert; dabei wurden die guten Ergebnisse präsentiert. Zum Schluß wurden die Varianten der emissionsarmen Brenner neuer Generation, die von Rafako zum Einsatz vorgesehen sind, angegeben.

## I. WPROWADZENIE

### 1. Referencje RAFAKO

RAFAKO na przełomie lat 1989/90 rozpoczęło prace projektowe związane z obniżeniem emisji  $\text{NO}_x$  metodami paleniskowymi. Opóźnienie naszego kraju w stosunku do czołowych państw świata, w których problem ochrony środowiska miał już wysoką rangę, sięgało wtedy kilkanaście lat (ok. 15 lat w stosunku do Japonii i ok. 10 lat w stosunku do USA i Niemiec). Pierwsze nasze projekty (El. Dolna Odra K4 i WP-120) zostały wykonane jeszcze przed ogłoszeniem Rozporządzenia Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 12.02. 1990. Rozporządzenie to, nakazujące po 1997 r. limit emisji  $\text{NO}_x$  dla wszystkich jednostek opalanych pyłem węglowym poniżej 170 g/GJ, zmobilizowało inwestorów do modernizacji palenisk w celu uzyskania tego limitu odpowiednio wcześniej. Nasza lista referencyjna liczy obecnie 35 jednostek zakontraktowanych, w tym 22 pracujących, dalsze modernizacje są zaoferowane. Rafako może oferować niskoemisyjne paleniska dla węgla kamiennego i brunatnego, na suche i ciekłe odprowadzenie żużla, ale również na olej i gaz w oparciu o palniki importowane.

### 2. Palniki

Specjalnością RAFAKO są niskoemisyjne paleniska z palnikami tangencyjnymi, które rozwijamy samodzielnie. Generalnie dla wszystkich obiektów, których modernizację zaprojektowaliśmy po ogłoszeniu Rozporządzenia, spełniamy wymagania obowiązujące od roku 1998.

Modernizację palenisk frontowych z palnikami wirowymi realizujemy korzystając z kupionych w 1992 r. dwóch licencji na produkcję palników wirowych, tj. typu Babcock Energy Ltd i typu ECOENERGIA. Szczególnie ten pierwszy typ jest godny zarekomendowania. Dwa kotły z palnikami tego typu są w fazie optymalizacji, trzeci w montażu.

### 3. Młyny

W rozwiązaniach zagranicznych palenisk niskoemisyjnych stosowane są prawie wyłącznie młyny średniobieżne z suszeniem węgla powietrzem i ze stosowanymi bardzo dobrymi przemiałami; na ogół dzięki zastosowanym od-

siewaczom dynamicznym. W nielicznych przypadkach stosowane są młyny bębnowe nowej generacji, również z suszeniem powietrzem i o bardzo miłym pyłu.

W warunkach krajowych wymagania stawiane nam przez inwestorów są znacznie trudniejsze, ponieważ chcą oni utrzymać istniejące młyny, mimo iż niejednokrotnie nie są one wskazane dla tych palenisk. Rozwiązania nasze sprawdziły się zarówno dla instalacji z młynami średniobieżnymi (typu RP i MKM), z powietrzem jako czynnikiem suszącym, ale również z młynami bębnowymi starej generacji z suszeniem mieszaniną spalin i powietrza, przy dość grubym przemiele. Stosunkowo najmniej korzystne są młyny wentylatorowe, z suszeniem mieszaniną spalin i powietrza i z uzyskiwanym grubym przemielem.

#### 4. Spalanie

Mechanizm spalania w palniku niskoemisyjnym dla różnych czynników suszących młyna różni się dość istotnie. Częściowy udział spalin do młyna, inertyzującego czynnika dla zapłonu, powoduje wzrost temperatury na wylocie z komory paleniskowej oraz zawartości koksu w popiele w stosunku do paleniska konwencjonalnego. Przy suszeniu węgla powietrzem i względnie dobrym przemielem, na wylocie z komory paleniskowej otrzymujemy nieco niższe temperatury spalin w stosunku do palenisk konwencjonalnych. Zbyt duży niedomiar powietrza w palniku może jednak tę zależność odwrócić.

#### 5. Zjawiska negatywne towarzyszące niskoemisijnemu spalaniu

Paleniska niskoemisyjne narażone są na niekorzystne zjawiska, takie jak: szlakowanie, korozję wysokotemperaturową, zbyt wysoką zawartość części palnych w popiele lotnym, wysoką emisję CO. Stwierdza się, że w naszych zmodernizowanych kotłach szlakowanie paleniska nie występuje (poza jednym przypadkiem z bardzo nieszczelnym paleniskiem). Niskonadmiarowe spalanie powoduje, że w komorze paleniskowej występuje większe zagrożenie korozją wysokotemperaturową niż to było dotychczas. Z tego względu w bieżącym roku RAFAKO prowadzi akcję opomiarowania ekranów kotłów zmodernizowanych króćcami, przez które będzie się mierzyć zawartości CO i O<sub>2</sub> w strefach przyściennych. Na podstawie tych pomiarów zostaną wykonane „mapy” najbardziej zagrożonych miejsc, w których trzeba będzie okresowo kontrolować grubość ścianki rur.

W dotychczasowych kontraktach na niskoemisyjne paleniska gwarantowaliśmy emisję CO nie większą niż 250 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup> ss. Taką normę mają kraje zachodnie o najbardziej rygorystycznych przepisach ekologicznych. Polskie przepisy państwowe nie stawiają wymagań dla CO.

Dla kotłów stosunkowo niskich mieliśmy się dotąd w powyższym zakresie, kotły zaś wysokie mają na ogół śladowe CO. W ostatnim okresie zostaliśmy zaskoczeni wymaganiami, jakie postawiło nam kilku naszych klientów, aby zagwarantować emisję CO na poziomie 50 – 60 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup>, tj. 5-krotnie

nizszą niż przyjęta w świecie. Takie bowiem wymagania postawiły inwestorom lokalne władze ekologiczne. Dodać należy, że wymagania powyższe dotyczą na ogół kotłów małych o stosunkowo niskich komorach paleniskowych. Aby spełnić powyższe wymaganie, należałoby znacznie podwyższyć kocioł, co praktycznie jest równoważne z jego wymianą.

W ten sposób Polska może zostać jedynym w świecie krajem, w którym wymieniać się będzie kotły ze względu na emisję CO. W nowej sytuacji wydaje się celowe, aby centralne władze ekologiczne uzupełniły Rozporządzenie z 1990 r. o dopuszczalną emisję CO.

## 6. Zakres modernizacji oferowanej przez RAFAKO

RAFAKO rozwiązuje kompleksowo problemy związane z redukcją NO<sub>x</sub>. Niżej przedstawiono typowy zakres modernizacji:

- poprawa szczelności kotła,
- wymiana palników,
- zabudowa dysz OFA i / lub SOFA,
- zmiany w ekranach,
- modernizacja młynów,
- modernizacja przewodów pyłowych,
- modernizacja wentylatorów powietrza i wentylatorów młynowych,
- ewentualna modernizacja przegrzewaczy (dobudowa),
- ewentualna modernizacja podgrzewaczy powietrza,
- modernizacja przewodów powietrza i klap regulacyjnych,
- modernizacja AKPiA w oparciu o wytyczne RAFAKO,
- nowe wytyczne do uruchomienia i prowadzenia kotła,
- precyzyjna regulacja i optymalizacja po rozruchu (wyk. RAFAKO bazując na własnym sprzęcie).

## 7. Kompleks parametrów wpływających na zredukowaną wielkość emisji NO<sub>x</sub>

Uzyskanie właściwej emisji NO<sub>x</sub> związane jest z całą gamą parametrów technicznych, wśród których do głównych zaliczyć należy:

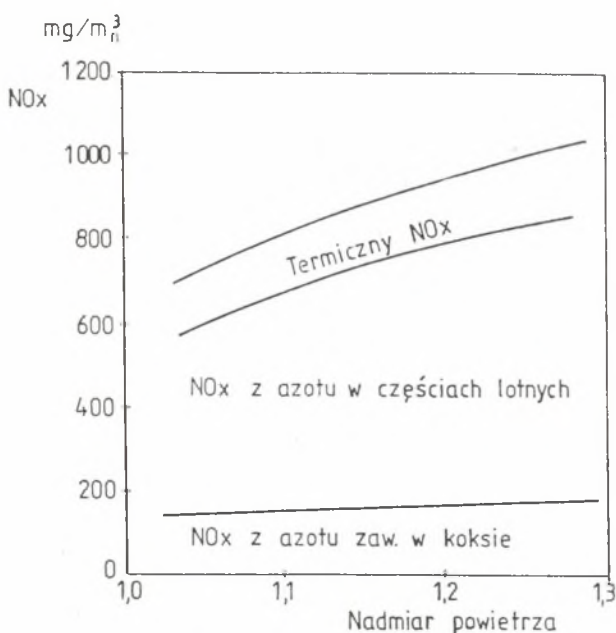
- a) parametry węglowe, w tym wszystkie parametry fizyczne jak i wiele chemicznych,
- b) parametry pyłu (jakość przemiału, koncentracja, wentylacja, rozdział pyłu i czynnika nośnego),
- c) odpowiednia geometria komory paleniskowej (obciążenia cieplne, czasy pobytu, lokalizacja palników w komorze paleniskowej, itd.),
- d) parametry konstrukcyjne palnika (wysokość, szerokość, podziałka sekcji, podziały w obrębie pojedynczego palnika),
- e) parametry kinetyczne w palniku (szybkości, stosunki prędkości, rozdziały powietrza i pyłu, liczba wiru, itd.),
- f) problemy bilansowe powietrza w obrębie komory paleniskowej.

## II. PROCESY ZACHODZĄCE W NISKOEMISYJNYM PALENISKU

1. W referacie podano w uproszczonej formie jedynie podstawowe zależności zachodzące w palenisku niskoemisyjnym, mające wpływ na poziom emitowanego przez kocioł tlenu azotu. Podane zależności mają być pomocne w uzasadnieniu dalej przytoczonych zasad projektowania palenisk niskoemisyjnych.

2. Udział azotu w węglu surowym wynosi od 0,5 do 2% (w węglach polskich do 1,2%). Ulega on w znacznym stopniu przekształceniu w komorach paleniskowych kotłów na tlenek NO. W paleniskach kotłów węglowych zachodzą **dwie grupy reakcji** decydujących o poziomie **wytworzonego NO**:

- reakcje **termicznego NO**, w których źródłem tlenu jest cząsteczkowy  $N_2$  z powietrza do spalania, a głównym parametrem wpływającym na jego poziom jest temperatura płomienia,
- reakcje **paliwowego NO**, w których źródłem NO jest azot chemicznie związany w związkach organicznych paliwa. Głównym parametrem wpływającym na poziom NO jest stężenie  $O_2$ .



Rys. 1. Źródła emitowanego NO<sub>x</sub> (przykład)

Fig. 1. Sources of NO<sub>x</sub> emission



Proces tworzenia się termicznego NO przebiega wg reakcji:



Udział termicznego NO w paleniskach węglowych z suchym odprowadzeniem żużla stanowi zaledwie od 20 – 30% całego wytworzonego tlenku. Dominujące w tworzeniu NO<sub>x</sub> są więc reakcje paliwowego NO. Główną rolę w powstawaniu NO paliwowego odgrywiają części lotne. Udział NO w częściach lotnych może stanowić 60 i więcej % całości wytworzonego NO<sub>x</sub>.

Przy szybkim nagrzewaniu cząstek węgla (piroliza) w zakresie temperatur 600 – 1000°C następuje wydzielanie w postaci gazowej następujących związków azotu:

- cyjanowodoru HCN,
- amoniaku NH<sub>3</sub>.

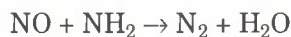
Ilość wydzielonych związków rośnie wraz ze wzrostem temperatury, szybkością nagrzewania i zmniejszaniem średnicy cząstki pyłu. Związki te reagują następnie do NO lub N<sub>2</sub>, w zależności od ilości tlenu.



Rys. 2. Schematyczny bilans azotu paliwowego przy pirolizie

Fig. 2. Schematic balance of nitrogen in fuel during pyrolysis

Przy dostatecznej ilości tlenu HCN może przereagować docelowo poprzez serię reakcji do NO [6]. Amoniak NH<sub>3</sub> ulega utlenieniu do NH<sub>2</sub>, który wg [4] jest podstawowym rodnikiem redukującym powstałe w płomieniu NO do N<sub>2</sub> wg reakcji zachodzącej z niedomiarem tlenu:



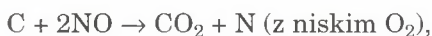
Aby ograniczyć ilość NO powstałego z części lotnych należy prowadzić proces spalania z ilością powietrza pierwotnego mniejszą od stechiometrycznej dla spalania części lotnych [5].

- Pozostała ilość NO paliwowego pochodzi z azotu pozostałego w koksie, przy czym reakcje tego azotu przebiegają równolegle ze spalaniem węgla. Według [6] 30 do 70% azotu zawartego w koksie przechodzi w postać gazowego HCN, który szybko jest przekształcany do NO.
- Wymienione 3 fazy powstawania tlenków paliwowych (wydzielanie w częściach lotnych + reakcje po wydzieleniu + reakcje azotu z koksu) mogą przebiegać po sobie lub równolegle.

3. Emisja NO z paleniska jest wypadkową reakcji tworzenia NO i redukcji NO.

Tlenki termiczne, tlenki z części lotnych oraz z koksu mogą zostać częściowo zredukowane w komorze paleniskowej, a reduktorami są:

- koks, przy czym redukcja występuje na jego powierzchni wg reakcji:



- rodnik  $\text{NH}_2$  (reakcja opisana w pkt. 2).

**Redukcja przez koks** zależy od koncentracji koksu, zawartości  $\text{O}_2$ , temperatury płomienia, czasu pobytu. Im wyższa koncentracja koksu i temperatura, dłuższy czas pobytu oraz niższe  $\text{O}_2$ , tym więcej NO redukuje się do  $\text{N}_2$ .

**Optymalną redukcję NO** można by uzyskać przez zastosowanie jako reduktora gazu ziemnego, jednak jest on praktycznie w krajowych warunkach niedostępny.

4. W paleniskach niskoemisyjnych **wymaga się pyłu o drobnej granulacji**, znacznie bardziej miękkiego niż w paleniskach konwencjonalnych. Drobny przemiał jest wymagany dla stabilnego zapłonu, dla uzyskania części palnych w popiele lotnym poniżej 5%, ale również dla zapewnienia szybkiego spalania części lotnych i szybkiej pirolizy.

Drobno zmielone ziarna mają większy stosunek powierzchni do masy, stąd ogrzewają się i odgazowują szybciej, zapewniając spalanie ziaren koksu jednocześnie z częściami lotnymi. Pozwala to przy spalaniu podstechiometrycznym w palenisku na redukcję pozostałych tlenków azotu. Aczkolwiek szybsza reakcja z tlenem powoduje powstawanie więcej NO, powstaje jednak również więcej rodnika  $\text{NH}_2$ . W efekcie przeważa efekt redukujący. Stąd w takich samych paleniskach i dla tych samych paliw emisja NO dla przemiału drobnego jest nieco niższa niż dla przemiału grubszego.

### III. ZASADY PROJEKTOWANIA PALENISK TANGENCJALNYCH Z NISKĄ EMISJĄ $\text{NO}_x$

1. Na podstawie podanych zależności teoretycznych można przyjąć, że systemy spalania niskoemisyjnego oparte są na trzech głównych zasadach [1]:

**A. Obniżenie maksymalnych temperatur płomienia i w palenisku.**

## **B. Redukcja stężenia tlenu wzdłuż drogi spalania.**

### **C. Podtrzymywanie stężenia rodników w płomieniu.**

Przy zachowaniu powyższych zasad wymagane jest jednocześnie, aby spalanie było zupełne, a straty niecałkowitego spalania na podobnym poziomie jak w paleniskach konwencjonalnych. W praktyce w większości przypadków musi dojść do pewnego kompromisu w tych wymaganiach, co oznacza, że występuje zarówno powiększona zawartość części palnych w popiele lotnym, jak i zauważalna zawartość CO w spalinach wylotowych z kotła.

2. Zasady wymienione w pkt. A, B, C można przełożyć na poniższe **zależności konstrukcyjno-eksploatacyjne przy projektowaniu niskoemisyjnych palenisk tangencjalnych:**

- 1) Powiększona powierzchnia przekroju paleniska (realizuje zasadę A)
- 2) Większe rozstawienie dysz pyłowych palnika (realizuje zasadę A)
- 3) Stopniowanie powietrza w strefie palnika (pozwala na realizację zasad B i C)
- 4) Stopniowanie powietrza w palenisku nad palnikiem (pozwala na realizację zasad B i C)
- 5) Stopniowanie paliwa (pozwala na realizację zasad B i C)
- 6) Polepszony przemiał pyłu węglowego (pozwala na realizację zasad A, B, C).

Zrealizowanie zależności z pkt. 1) jest możliwe tylko dla kotła nowo projektowanego. Pozostałe zależności (pkt. 2) ÷ 6)) możliwe są do zrealizowania w zakresie typowego retrofitu.

## **IV. PRZEGLĄD MOŻLIWOŚCI REALIZACJI ZASAD REDUKCJI NO<sub>x</sub> NA PRZYKŁADZIE ZMODERNIZOWANYCH KOTŁÓW W DWÓCH ELEKTROWNIACH**

1. Dla przeanalizowania możliwości zrealizowania podanych w rozdziale III.2, pkt 1) do 6) zależności konstrukcyjno-eksploatacyjnych palenisk wykonano porównanie rozwiązań zmodernizowanych palenisk dla dwóch pracujących elektrowni. Celowo wybrano przy tym kotły w Elektrowni DOLNA Odra (bloki 200 MW) i w Elektrowni OPOLE (bloki 360 MW). Obydwie elektrownie spalają podobne węgle, mają po 5 młynów (różnego typu), a parametry geometryczne, kinetyczne i cieplne komór paleniskowych tych kotłów różnią się znacznie. Elektrownie te zostały zaprojektowane pierwotnie na zupełnie inne wymagania, natomiast wymagania odnośnie do emisji NO<sub>x</sub> są podobne.

W tablicy 1 podano porównanie charakterystycznych parametrów węgla.



**Tablica 1**

**Porównanie charakterystycznych parametrów węgla dwóch elektrowni**

Wielkość	Oznaczenie	Jednostka	Elektrownie	
			DOLNA ODRA (K7)	OPOLE (K1)
Wartość opałowa	$Q^r$	MJ/kg	23	23 ÷ 27
Wilgoć całkowita	$W^r$	%	6	10 ÷ 8
Popiół	$A^r$	%	24	18 ÷ 8
Części lotne	$V^{daf}$	%	36	38 ÷ 39
Stos. węgiel związany częściolotne	$\frac{C_{fix}}{V}$	–	1,76	1,6 ÷ 1,65
Azot	$N^{daf}$	%	1,4	1,3 ÷ 1,5
Chlor	Cl	%	0,32	nie mierzony

## 2. ANALIZA ZALEŻNOŚCI PODANYCH W ROZDZIALE III.2

### Powiększona powierzchnia przekroju paleniska i większa wysokość palnika

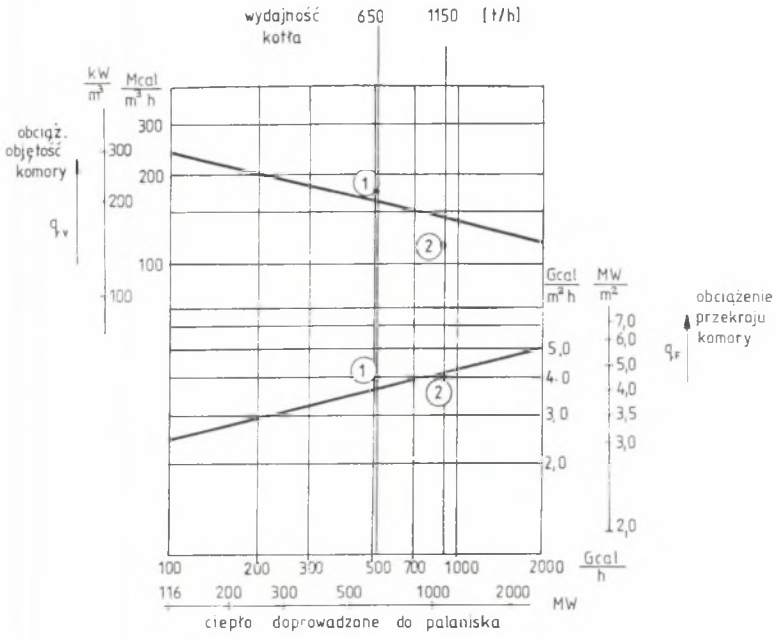
Obydwa te parametry geometryczne mają wpływ na poziom temperatur w komorze paleniskowej. Porównanie komór paleniskowych obydwu kotłów przedstawia rys. 3 i tabl. 2.

### Stopniowanie powietrza w strefie palnika

Stopniowanie powietrza w strefie palnika pozwala na zapewnienie stref z niedoborem tlenu, co wpływa korzystnie na powstanie rodników wpływających na redukcję  $NO_x$ , oddziałuje też korzystnie na szybkość zapłonu pyłu. Stopniowanie powietrza w strefie palnika może być realizowane poprzez podział dyszy powietrza wtórnego na sekcje, zastosowanie koncentrycznego wpływu części lub całości powietrza itp.

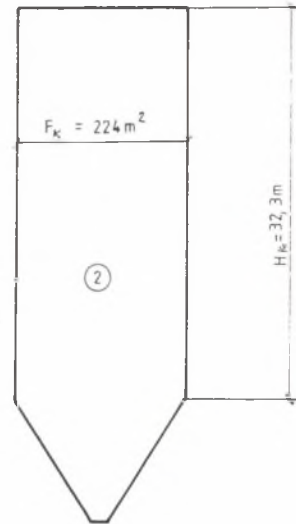
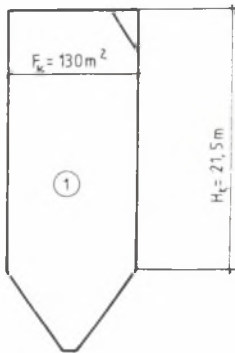
### Sposób realizacji

EL. DOLNA ODRA (Modern.)	EL. OPOLE (Modern.)
1. Zastosowano podział dysz w poziomie na 2 części (rys. 4b)	1. Dla K1, K2 zastosowano wpływ strefowy powietrza wtórnego przez zastosowanie przegród pionowych (rys. 5a, 6a)
2. Zastosowano koncentryczny wpływ powietrza z 1 części dyszy powietrza (rys. 4b)	2. Dla K3, K4 zastosowano po części wpływ strefowy, zaś w części drugiej dyszy powietrza wpływ koncentryczny (rys. 5b, 6b)



① KOCIOŁ OP-650 EL. DOLNA ODRA

② KOCIOŁ BP-1150 EL. OPOLE



Rys. 3. Porównanie głównych zależności geometrycznych i cieplnych w komorze paleniskowej dwóch kotłów

Fig. 3. Comparison of general geometrical and thermal values in combustion chamber of two boilers

**Tablica 2**

**Porównanie parametrów charakterystycznych paleniska**

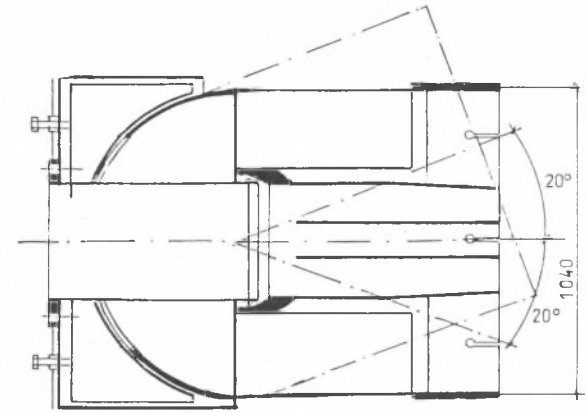
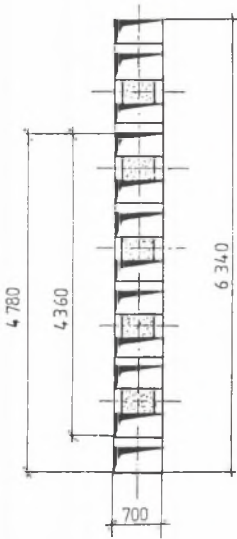
Lp.	Parametr		Jedn.	Elektrownie	
				DOLNA ODRA K7	OPOLE K1
1	Moc bloku N		MW <sub>el</sub>	200	360
2	Obciążenie przekroju		$\frac{MW}{m^2}$	4,6	4,4
3	Obciążenie pasa palnikowego		$\frac{MW}{m^2}$	2,36	1,88
	$q_{paln}$	○ ● ● ●			
		● ● ○ ●			
4	Nadmiary powietrza w palniku głównym $n_{paln}$		—	0,97	1,05
	na wylocie z komory paleniskowej $n_{k.pal.}$		—	1,17	1,25
5	Czas pobytu w komorze paleniskowej dla redukcji		sek	1,28	1,13
	$\tau_1$	○ ● ● ●			
		● ● ○ ●			
6	Czas pobytu w komorze paleniskowej dla dopalania $\tau_2$		sek	1,16	1,62

#### Ocena parametrów

EL. DOLNA ODRA (Modern.)	EL. OPOLE (Modern.)
1. Przekrój komory zdecydowanie za mały dla niskoemisyjnego paleniska	1. Przekrój komory duży, odpowiedni dla niskoemisyjnego paleniska
2. Wysokość palnika niska mimo powiększenia w stosunku do palnika konwencjonalnego	2. Wysokość palnika niższa niż stosowana w rozwiązaniach zagranicznych

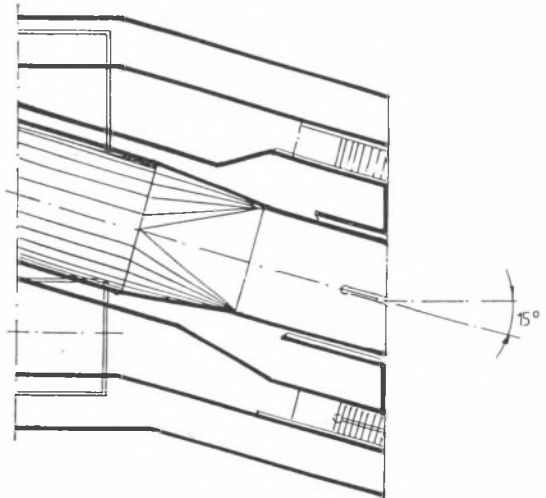
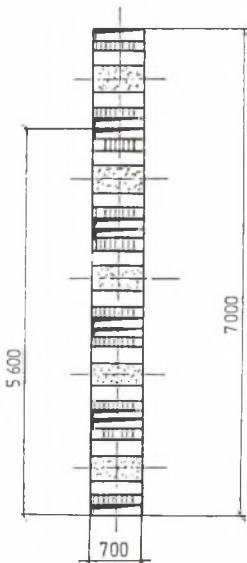
#### Stopniowanie powietrza w palenisku

Należy do głównych parametrów wpływających na jakość płomienia, na powstawanie rodników i w efekcie na wielkość emitowanego NO<sub>x</sub>. Niestety,



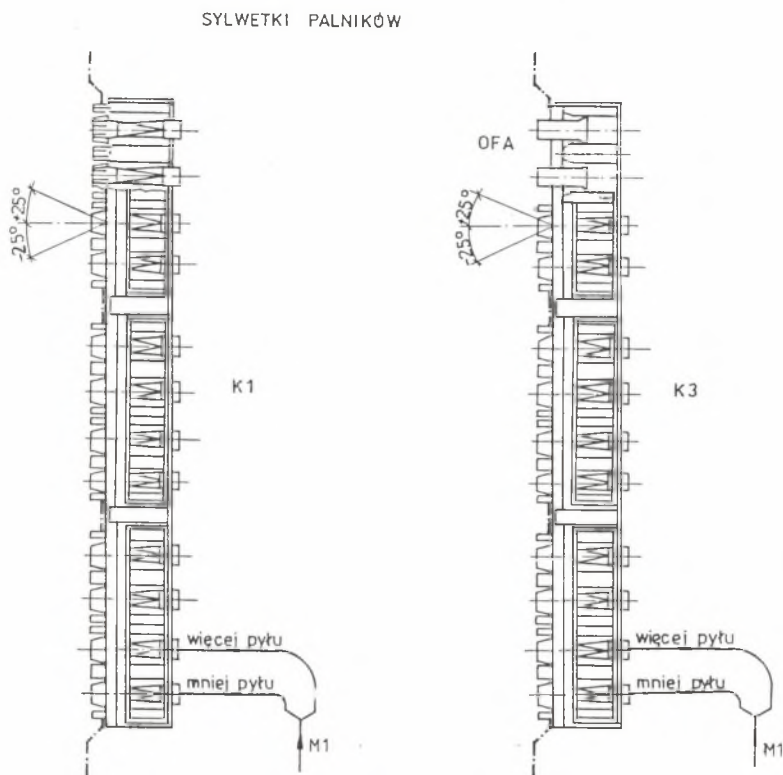
a. PALNIK KONWENCJONALNY

b. PALNIK NISKOEMISYJNY



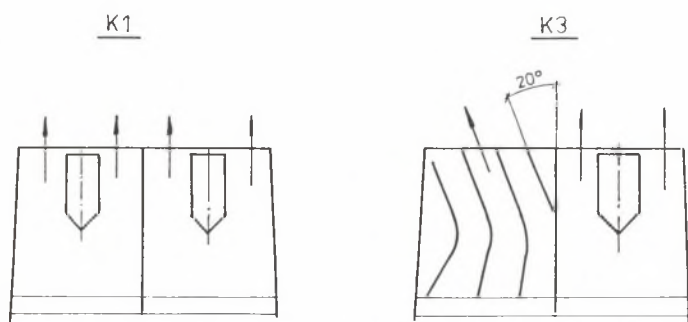
Rys. 4. EL. DOLNA ODRA – Porównanie dwóch typów palników

Fig. 4. DOLNA ODRA P.S. – Comparison of two burner types



Rys. 5. EL. OPOLE – Porównanie palników K1 i K3

Fig. 5. OPOLE P.S. – Comparison of burners K1 and K3



Rys. 6. EL. OPOLE – Dysza powietrza (przekrój poziomy)

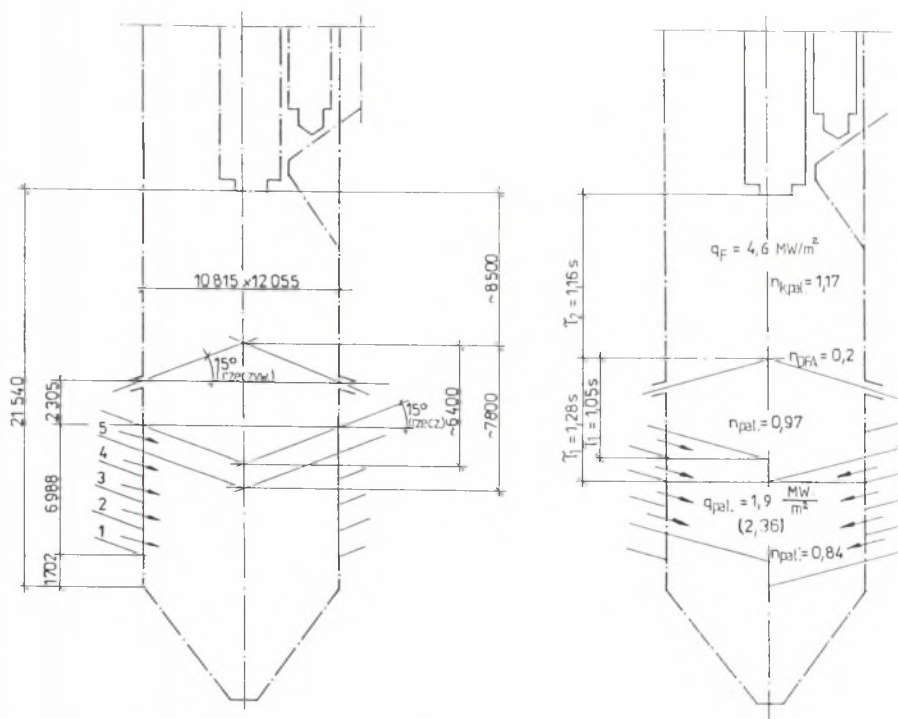
Fig. 6. OPOLE P.S. – Air nozzle



może oddziaływać również w sposób zasadniczy na szlakowanie, korozję, zawartość CO w spalinach i części palne w popiele lotnym. Jest realizowane w postaci dysz OFA, SOFA, UFA itp. Ilość powietrza do OFA waha się od 10 + 25% ilości stechiometrycznej, a powietrza do SOFA 15 + 20%. Przy jednoczesnym występowaniu obu systemów suma nie przekracza 35%.

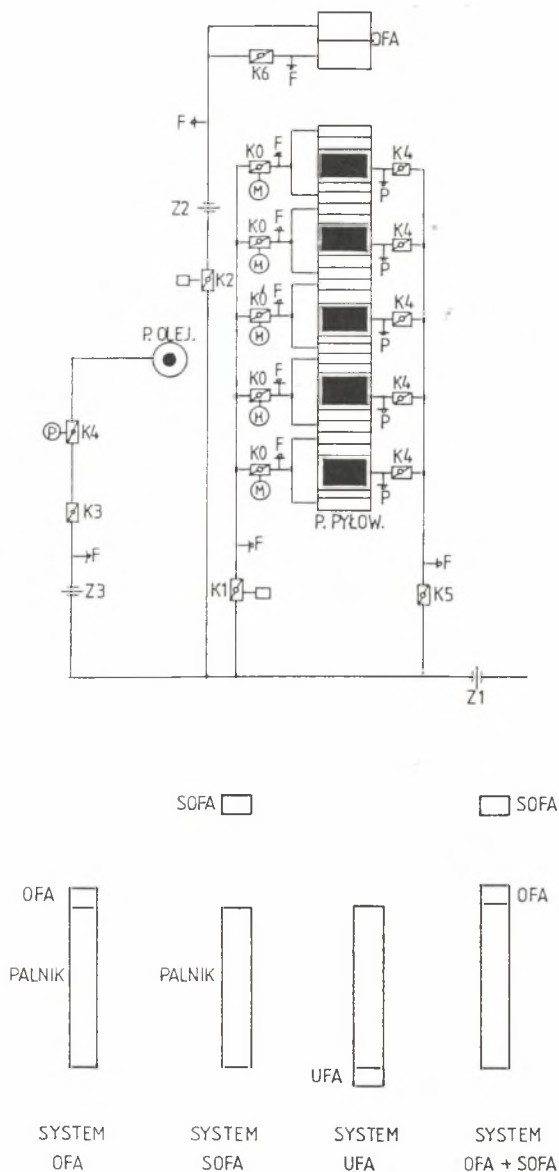
### Sposób realizacji

EL. DOLNA ODRA (Modern.)	EL. OPOLE (Modern.)
1. Dla K4 zastosowano SOFA na 15% powietrza (modernizacja nie zakończona)	1. Dla K1 i K2 zastosowano SOFA na $n = 20\%$
2. Dla K7 i 8 zastosowano SOFA $n_{SOFA} = 20\%$ (rys. 7 i 8) i quasi OFA (UFA), o nadmiarze – $n_{OFA} = 10\%$	2. Dla K7 i K8 zastosowano SOFA na $n = 20\%$ i OFA na $n = 10\%$ (rys. 9, 10, 11)



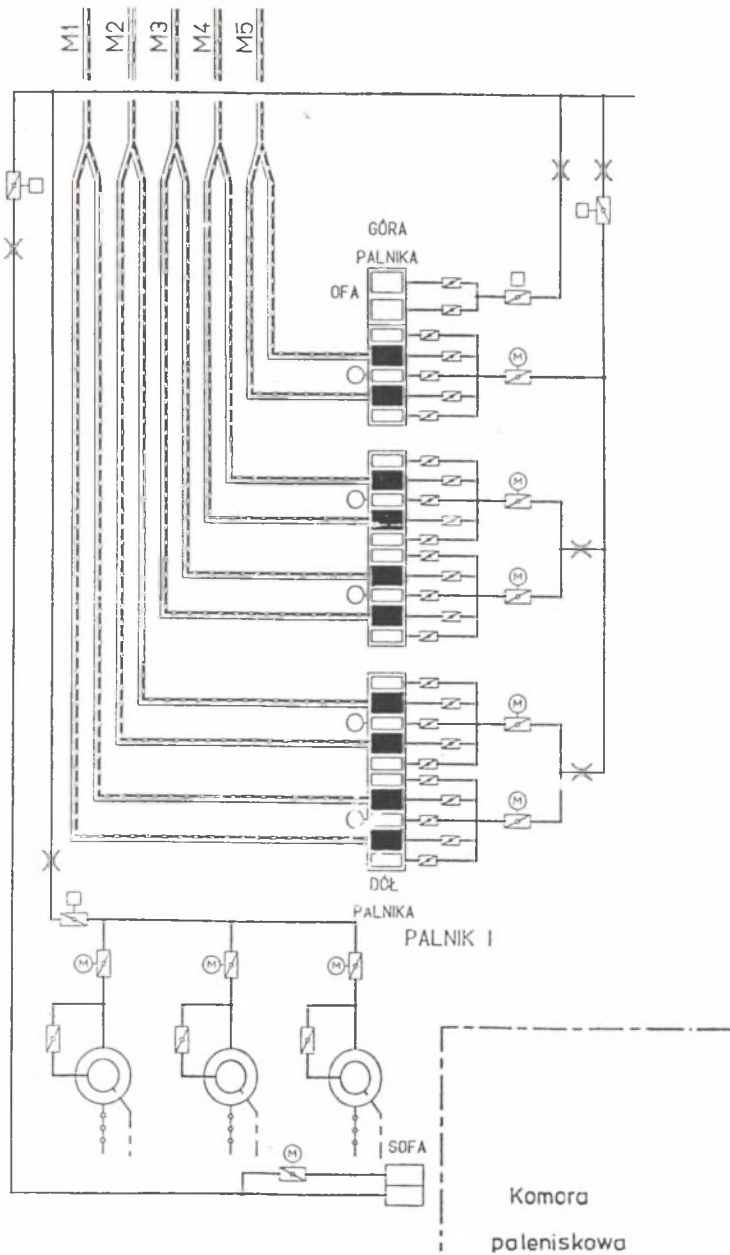
Rys. 7. EL. DOLNA ODRA – Zestawienie wielkości geometrycznych, cieplnych i kinetycznych w komorze paleniskowej

Fig. 7. Geometrical, thermal and kinetic values arrangement in combustion chamber



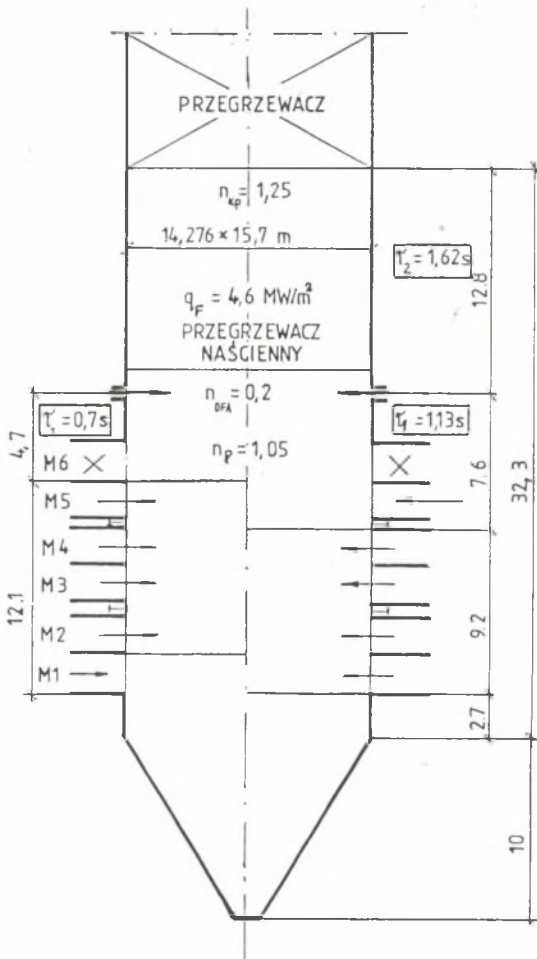
Rys. 8. EL. DOLNA ODRA, K7 – Schemat naroża palnikowego wraz z opomiarowaniem i organami regulacyjnymi. Objaśnienie oznaczeń stopniowania powietrza

Fig. 8. The burner region of boiler K7. Explanation of air gradations designation



Rys. 9. EL. OPOLE, K3 – Schemat naroża palnikowego

Fig. 9. Sketch of burner corner



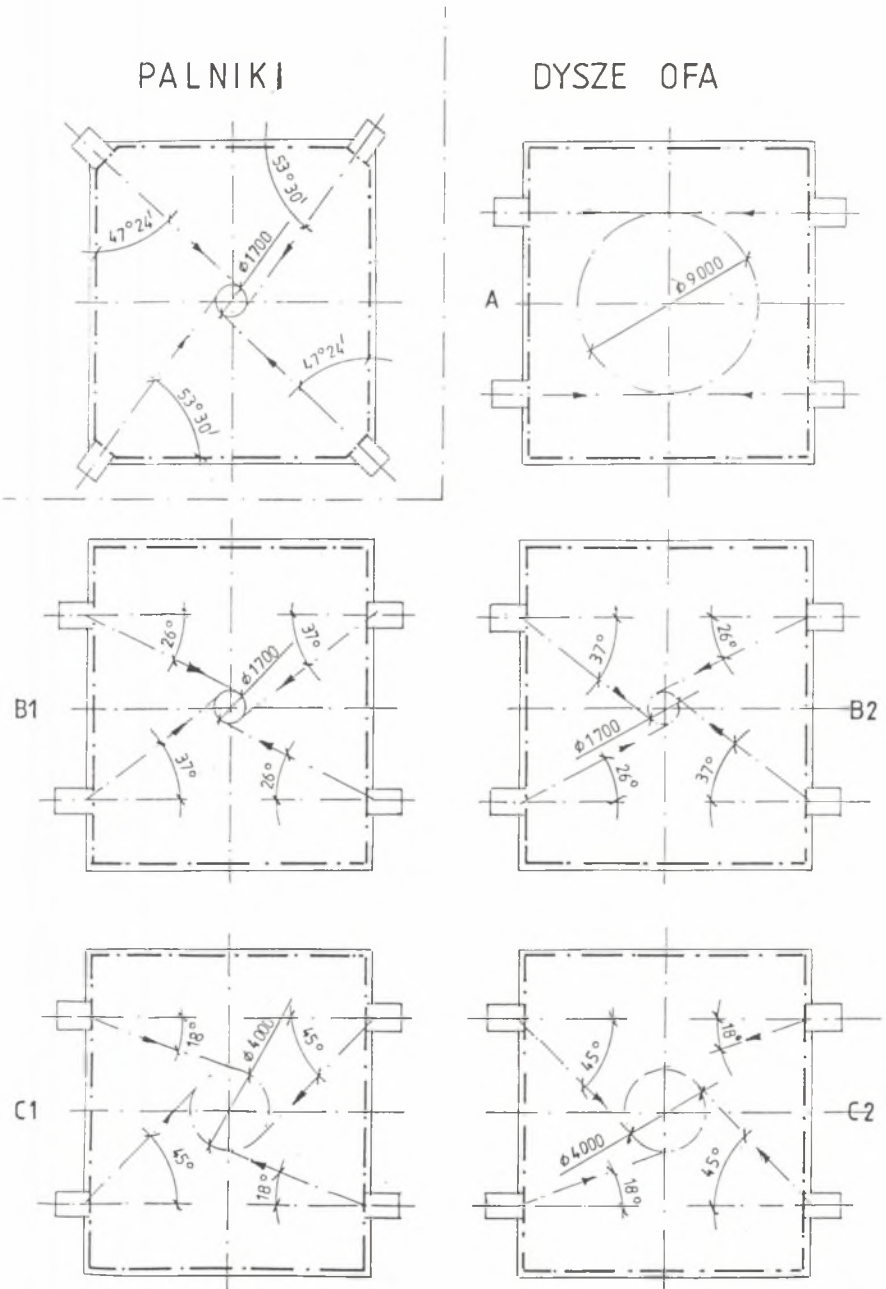
Rys. 10. EL. OPOLE (K1) – Parametry charakterystyczne komory paleniskowej

Fig. 10. OPOLE P.S. (K1) – Characteristic parameters of comb. chamber

### Stopniowanie paliwa w strefie palnika

Technologia ta może być realizowana różnymi sposobami:

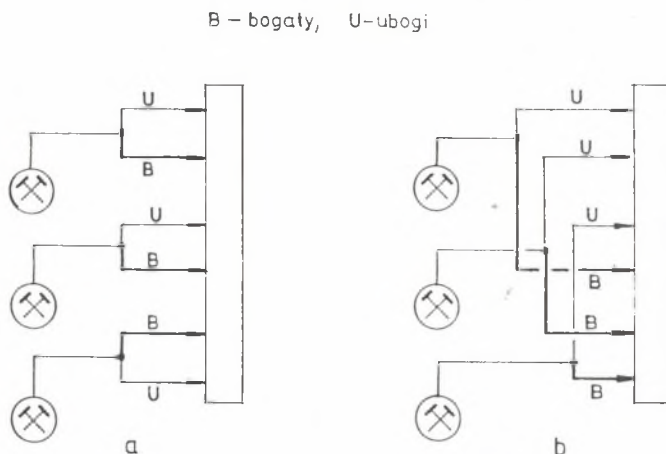
- przez pionową asymetrię dysz pyłowych jednego palnika. Uzyskuje się przez to dysze paliwa ubogie w tlen, zwiększające tworzenie rodników,
- przez rozdział pyłu o różnej koncentracji do dwóch sąsiednich dysz palnika jednego młyna. Uzyskuje się przez to strumienie bogate i ubogie w paliwo (palnik PM), rys. 12.



Rys. 11. EL. OPOLE – Dyspozycja palników i dysz SOFA

Fig. 11. OPOLE P.S. – Burners and SOFA settings





Rys. 12. Warianty rozdziału w palnikach typu PM

Fig. 12. Alternatives p.f. distribution in PM burners

– przez zróżnicowanie obciążenia młynów (wyższe dla dyszy najniższej)

#### Sposób realizacji

EL. DOLNA ODRA (modern.)	EL. OPOLE (modern.)
1. Zastosowano zróżnicowane obciążenie młynów	1. Zastosowano zróżnicowane koncentracje w pionie (dla jednego palnika) i w poziomie (między palnikami)

#### Polepszony przemiał pyłu węglowego

Miałki pył pozwala na osiągnięcie nieco niższej emisji  $\text{NO}_x$ , umożliwia spalanie podstechiometryczne, uzyskanie niskiej zawartości części palnych w popiele. Rozwiązania zachodnie i japońskie preferują odsiewacze dynamiczne, zapewniające pozostałość na sicie 150 mikronów równą 0%.

W rozwiązaniach krajowych dla młynów średniobieżnych poprawa przemiału jest uzyskiwana przez modernizację separatorów statycznych lub dodatkowo układu miącego. W pojedynczych przypadkach stosowane są również odsiewacze dynamiczne.

## Sposób realizacji

EL. DOLNA ODRA	EL. OPOLE
1. Zastosowano młyny MKM-25 ze zmodernizowanymi odsiewaczami, dające przemiały: R <sub>90</sub> = ok. 24% (...30%) R <sub>200</sub> = ok. 1% (...3%)	2. Zastosowano młyny rolkowe RP-1043x nie modernizowane, dające bardzo dobry przemiał: R <sub>90</sub> < 20% (...12%) R <sub>200</sub> < 1% (...0,3%)

## 3. Osiągi obydwu kotłów

## EL. DOLNA ODRA

W pierwszym modernizowanym kotle nr 4 uzyskano redukcję NO<sub>x</sub> ok. 50%, mimo to norma 1998 r. przy niekorzystnych wariantach pracy młynów jest nieco przekroczona [9]. W r. 1995 przewidujemy dokończenie modernizacji K4. Kolejne modernizacje przeprowadzono dla kotłów nr 7 i 8, w których dokonano korzystnych zmian konstrukcyjnych. Uzyskano bardzo dobre wyniki, przedstawione na rys. 13, przy redukcji zbliżonej do 70%, [10], [11].

Bardzo dobre wyniki uzyskano w całym zakresie obciążeń kotła. Podkreślić należy utrzymanie korzystnego poziomu emisji przy niskich obciążeniach kotła, co stanowi w wielu zagranicznych rozwiązaniach problem trudny do opanowania.

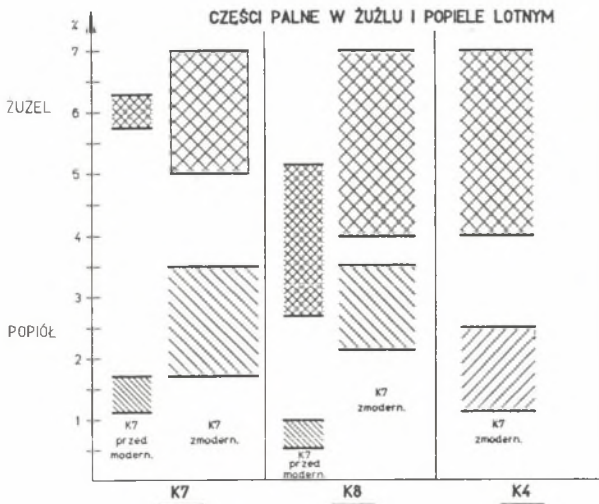
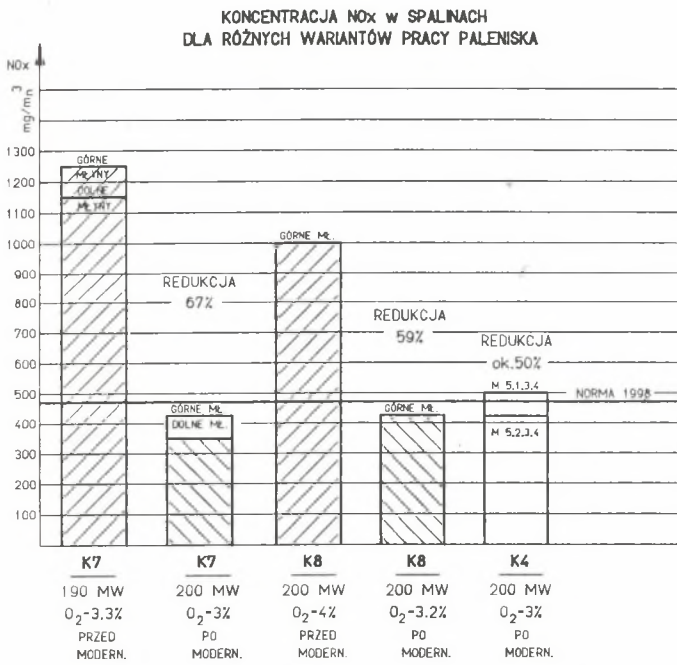
W tabl. 3 podano wpływ wariantów pracy młynów na wielkość emisji NO<sub>x</sub>, dokumentując ponownie wyniki z rys. 13.

Tablica 3

EL. DOLNA ODRA  
Wpływ wariantów pracy młynów na emisję NO<sub>x</sub>

Wariant pracy młynów	Czynne dysze palnika	Zawartość O <sub>2</sub> [%]	NO <sub>x</sub> (O <sub>2</sub> = 6%) (mg/m <sub>n</sub> <sup>3</sup> ss)
M 1, 2, 3, 4	○ ● ● ●	3,0	320
M 2, 3, 4, 5	● ● ● ○	3,0	409
M 1, 2, 4, 5	● ○ ● ●	3,0	380

Bardzo niską emisję NO<sub>x</sub> potwierdziły również kompleksowe badania kotła przeprowadzone przez Instytut Energetyki w maju 1994 r. [12], [13], [14].



Rys. 13. EL. DOLNA Odra – Porównanie efektów modernizacji paleniska

Fig. 13. DOLNA Odra P.S. – Comparison of the effects on modified combustion chambers

## EL. OPOLE

Modernizacja paleniska K1 została przeprowadzona na już zmontowanym kotle, przed jego pierwszym uruchomieniem. Z konieczności zakres modernizacji nie mógł być zbyt wielki. Kocioł posiada 6 młynów (2 rezerwowe), przy czym jeszcze przed uruchomieniem przyjęto, że młyn zasilający najwyższy palnik w zasadzie nie będzie uruchamiany (tylko w specjalnych stanach awaryjnych). Istniejący przegrzewacz naścienny w górze komory paleniskowej limitował poziom zabudowy dysz SOFA.

Szacuje się, że gdyby nie wprowadzić paleniskowych rozwiązań obniżających  $\text{NO}_x$ , stężenie tlenków azotu wahałoby się w zależności od wariantu pracy młyna na poziomie  $650 \div 950 \text{ mg/m}_n^3$  ss, ( $\text{O}_2 = 6\%$ ). Zastosowane rozwiązania obniżające emisję bez SOFA obniżyły ten parametr do poziomu  $550 \div 850 \text{ mg/m}_n^3$  ss.




Redukcję pozostałą uzyskano instalacją SOFA i poprawieniem przemiału w młynach. W efekcie całościowym uzyskano obniżenie  $\text{NO}_x$  do poziomu  $280 \div 400 \text{ mg/m}_n^3$  przy zawartości części palnych w popiele lotnym średnio  $3\%$  (...  $5\%$ ) i zadowalającej zawartości tlenu węgla (poniżej  $150 \text{ mg/m}_n^3$ ).

Szczegółowe wyniki uzyskane na K1 podaje tabl. 4.

Tablica 4

## EL. OPOLE

## Wpływ wariantów pracy młynów na osiągi paleniska niskoemisyjnego (K1)

Wariant pracy młynów	Czynne dysze palnika	Zawartość $\text{O}_2$ [%]	Stężenie $\text{NO}_x$ [ $\text{mg/m}_n^3$ ] ( $\text{O}_2 = 6\%$ )	Zawartość części palnych w popiele [%]	Zawartość CO [ $\text{mg/m}_n^3$ ] ( $\text{O}_2 = 6\%$ )
M 1, 2, 3, 4		4,2	280	3,1	75 ÷ 120
M 2, 3, 4, 5		4,2	340 ÷ 400	3 ÷ 5	
M 1, 2, 4, 5		4,27	250 ÷ 300	3,3 ÷ 3,6	

Wyniki na K2 są jeszcze lepsze.

## V. MOŻLIWOŚĆ REDUKCJI NO<sub>x</sub> DLA RÓŻNYCH ROZWIĄZAŃ PALENISK TANGENCJALNYCH (odniesione do O<sub>2</sub> = 6%)

1. KONWENCJONALNE PALENISKO TANGENC.	
(dla dużych i małych komór)	: 800 ÷ 1200 mg/m <sub>n</sub> <sup>3</sup>
2. KONWENCJONALNE PALENISKO + SOFA	: 400 ÷ 650
3. KONWENCJONALNE PALENISKO + OFA + SOFA	: 350 ÷ 550
4. PALNIK KONCENTRYCZNY + OFA + SOFA + OBNIŻONY NADMIAR POWIETRZA	: 300 ÷ 450
5. PALNIK ASYMETRYCZNY W PIONIE + SOFA	: 400 ÷ 450
6. PALNIK PM + OFA + SOFA	: 300 + 400
7. POPRAWA PRZEMIAŁU DO POZIOMU UZY- SKIWANEGO W ODSIEWACZACH DYNAMI- CZNYCH	: redukcja o dalsze ok. 50 mg/ m <sub>n</sub> <sup>3</sup>

Osiągi podane w pkt. 2, 3, 4 znalazły potwierdzenie w rozwiązaniach RAFAKO. Aktualnie realizowane są w RAFAKO projekty dla wersji 6. Z zestawienia wynika, że stosując odpowiednio szeroki zakres modernizacji paleniska możliwe jest uzyskanie stężeń NO<sub>x</sub> jeszcze niższych od obowiązujących po 1997 r., tj. na poziomie poniżej 400 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup> (140 g/GJ).

W miarę jak kraje UNII EUROPEJSKIEJ będą obniżały swoje normy, RAFAKO zmierzać będzie w paleniskach tangencjalnych do emisji na poziomie 300 + 350 mg/m<sub>n</sub><sup>3</sup> (ok. 120 g/GJ).

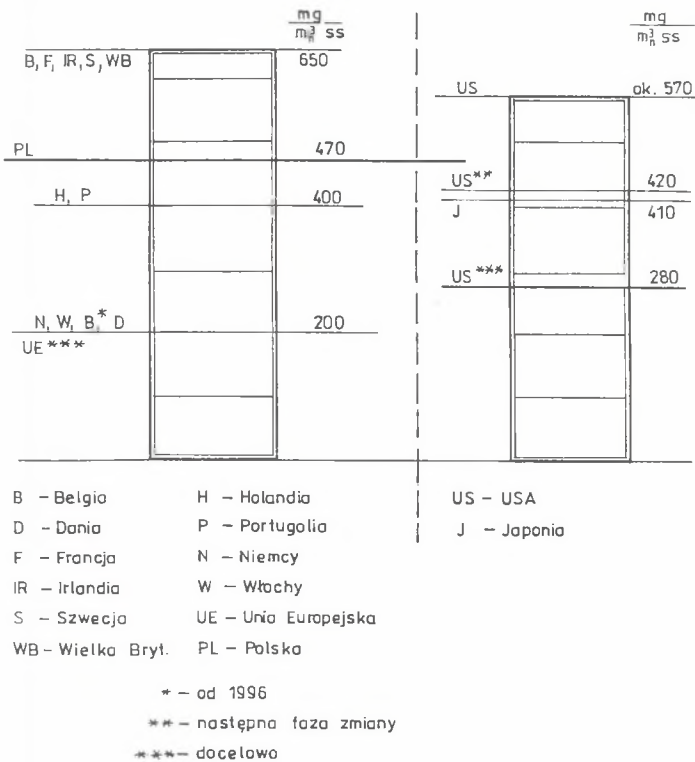
Nasze opracowania teoretyczne związane z możliwościami obniżenia NO<sub>x</sub> oraz osiagi między innymi na kotłach w El. Opole i El. Dolna Odra wykazują, że możliwości takie istnieją.

## PODSUMOWANIE

Czteroletnie prace w RAFAKO, związane z obniżaniem emisji NO<sub>x</sub> w kotłach węglowych, zaowocowały zaprojektowaniem kilkudziesięciu jednostek, z których większość jest już uruchomiona. Specjalnością RAFAKO są niskoemisyjne palniki strumieniowe własnej konstrukcji, pracujące w układzie tangencjalnym. RAFAKO projektuje i przeprowadza kompleksową modernizację kotłów, obejmującą: instalacje pyłowe, młyny, instalacje powietrzne, część ciśnieniową kotła, automatykę, itd.

Poprawne rezultaty w zakresie redukcji NO<sub>x</sub>, tj. uzyskanie emisji poniżej 170 g/GJ, obowiązującej po 1997 r., uzyskano w większości obiektów, mimo stosowania różnego typu młynów (średniobieżne, wentylatorowe, bębnowo-kulowe), nieraz bardzo niekorzystnych w technice niskoemisyjnego spalania.





Rys. 14. Przegląd wielkości dopuszczalnych emisji NO<sub>x</sub> dla nowych bloków w krajach Unii Europejskiej, USA i Japonii, wg [2]

Fig. 14. Retrospection of permitted NO<sub>x</sub> emissions for new units in European Union countries, USA and Japan

Przytoczone osiągi w El. Dolna Odra i El. Opole dokumentują nasze możliwości. Dla najnowszych projektów RAFAKO spodziewane są emisje na poziomie 140 g/GJ i niżej.

## LITERATURA

- [1] Kuiper H.: Low NO<sub>x</sub> tangential firing. (Artykuł konferencyjny 1993 r.).
- [2] Salvaderi L. i inni: Emission control comparison of the US and Western European approaches.
- [3] Gaujacq G. i inni: Flue gas treatment test in boiler furnaces (artykuł konferencyjny 1993 r.)

- [4] Albrecht W.: NO<sub>x</sub> – Emissionen aus Kohlenstaubflammen VGB 1992, nr 7.
- [5] Wróblewska V. i inni: Palniki pyłowe o niskiej emisji NO<sub>x</sub>. Energetyka, 1993, nr 3.
- [6] Ferens W. i inni: Rozpoznanie literaturowe i analiza modeli matematycznych powstawania NO<sub>x</sub> w turbulentnym płomieniu pyłowym. ITC i MP Politechniki Wrocławskiej. Sprawozdanie nr 50/92.
- [7] Tomas D.: Osiągnięcia i zamierzenia RAFAKO S.A. w redukcji emisji NO<sub>x</sub> dla kotłów węglowych, styczeń 1994 (nie publikowane).
- [8] Tomas D.: Przegląd możliwości obniżenia tlenków azotu emitowanych z kotłów węglowych. Propozycje RAFAKO, październik 1988 (nie publikowane).
- [9] Wyniki pomiarów stężenia NO<sub>x</sub> w spalinach z kotła OP-650 (K4) w El. Dolna Odra. RAFAKO – ENERGO, luty 1994.
- [10] Sprawozdanie robocze z prac regulacyjnych, badań optymalizacyjnych i pomiarów instalacji młynowej kotłów OP-650 nr 7 i 8 w El. Dolna Odra z zastosowanymi palnikami niskoemisyjnymi. RAFAKO – ENERGO, styczeń 1994.
- [11] Wykonanie pomiarów wentylatorów powietrza, szczelności podgrzewaczy powietrza oraz emisji NO<sub>x</sub> w kotłach OP-650 nr 4, 7 i 8 w El. Dolna Odra, Instytut Energetyki, czerwiec 1993.
- [12] Ocena warunków pracy kotła OP-650-050 nr 7 w El. Dolna Odra po modernizacji i zabudowie palników niskoemisyjnych. Instytut Energetyki, maj 1994.
- [13] Ocena warunków pracy kotła OP-650-050 Nr 8 w El. Dolna Odra po modernizacji i zabudowie palników niskoemisyjnych. Instytut Energetyki, maj 1994.
- [14] Kompleksowe badania kotła OP-650-050 nr 8 w El. Dolna Odra. Instytut Energetyki, maj 1994.
- [15] Sprawozdanie z I etapu badań optymalizujących proces spalania w kotle nr 1 El. Opole. Energopomiar, lipiec 1993.
- [16] Sprawozdanie z badań zespołów młynowych I bloku El. Opole. INTROL Opole, wrzesień 1993.
- [17] Sprawozdanie z pomiarów składu spalin w warstwie przyściennej kotła BP-1150 nr 1 w El. Opole. Energopomiar, styczeń 1994.
- [18] Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dn. 12.02.1990.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik CWYNAR

Wpłynęło do Redakcji 25.08.1994 r.

**Abstract**

The four years of research work on  $\text{NO}_x$  reduction in the coal fired boilers contributed to the designs of dozens of units. A vast majority of them have already been put into operation.

RAFAKO S.A. specializes in low  $\text{NO}_x$  jet burners of its own design which operate in the tangential arrangement.

RAFAKO S.A. designs and makes complete modernizations of boilers. The include pulverized coal installations, air systems, boiler pressure part, control and instrumentation equipment, etc. Satisfactory results in  $\text{NO}_x$  reduction, i.e. getting below 170 g/GJ (this emission level is obligatory after the year 1997) have been achieved on most of the units despite the application of various types of mills, sometimes not very favourable to the low  $\text{NO}_x$  firing techniques.

The aforementioned figures from Dolna Odra and Opole Power Stations considerably lower from 170 g/GJ provide the evidence for our capabilities. In our latest projects we expect to lower the emission down to 140 g/GJ or even lower, thanks to application of better, more modern solutions, which are listed at the end of the paper.