

## MODYFIKACJA PROCESU SPALANIA W CELU REDUKCJI TLENKÓW AZOTU

BARBARA BIAŁECKA

Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice

Keywords: ecology, boiler, reburning process, nitrogen oxide, reduction.

### COMBUSTION MODIFICATION FOR NO<sub>x</sub> REDUCTION

The work concerns an important in our times problem related to different areas as ecology, economy and proper use of energy resources: reduction of NO<sub>x</sub> by reburning process. The main goal of the work was to develop the technology of NO<sub>x</sub> reduction during zone combustion of coal and mine gas with process optimal conditions determination in power boilers in aspect of environmental protection.

In the work was presented:

- investigation of numeric model of zone combustion of coal and mine gas;
- applied combustion research of the boiler OCG-64 produce on RAFAKO.

#### Streszczenie

W pracy podjęto aktualne i ważne zagadnienie obejmujące swym zasięgiem ekologię, gospodarkę oraz racjonalne wykorzystanie pierwotnych nośników energii. W publikacji przedstawiono w ogólnym zarysie opracowany własny model redukcji tlenków azotu w procesie strefowego spalania węgla i gazu z odmetanowania kopalń (reburning) oraz praktyczne aspekty realizacji strefowego spalania przez modernizację spalania węgla i gazu w funkcjonujących od lat w energetyce kotłach pyłowych OCG-64, wyprodukowanych przez RAFAKO.

#### WPROWADZENIE

Opracowanie podstaw technologii umożliwiającej obniżenie emisji tlenków azotu z procesu spalania węgla przy równoczesnym wykorzystaniu energii zawartej w gazie z odmetanowania kopalń, a tym samym obniżeniu emisji metanu do atmosfery, jest rozwiązaniem pozwalającym poprawić polski bilans energetyczny oraz sprostać rosnącym wymaganiom ochrony środowiska przy stosunkowo niskich nakładach finansowych. Niniejsza praca stanowi przyczynek do opracowania technologii strefowego spalania węgla i gazu kopal-

nianego w polskich warunkach. W kraju nie prowadzono do tej pory prac nad strefowym spalaniem węgla i gazu z odmetanowania kopalń. Metoda ta umożliwiająca zaadaptowanie jej do obecnie pracujących kotłów pyłowych (po stosunkowo niewielkich zmianach modernizacyjnych) oraz jednocześnie wykorzystanie węgla i metanu, a także zapewniająca wysoką skuteczność redukcji  $\text{NO}_x$  (60–70%), wydaje się szczególnie atrakcyjna w Górnośląskim Okręgu Przemysłowym.

Celem pracy było zastosowanie metody strefowego spalania węgla i gazu kopalnianego w kotle energetycznym oraz eksperymentalne określenie możliwości redukcji tlenków azotu w tym procesie.

Niniejsza praca zawiera wyniki symulacji procesu strefowego spalania węgla i gazu z odmetanowania kopalń, wykonanej programem komputerowym umożliwiającym obliczanie profili stężeń produktów w funkcji składu spalin, ilości gazu węglowodorowego i powietrza dopalającego dla określonych temperatur i czasów reakcji. Rozważania teoretyczne i obliczenia przeprowadzono dla polskich węgla energetycznych i gazu metanowego pozyskiwanego z eksploatowanych pokładów węgla Rybnickiego Okręgu Węglowego (ROW), co stworzyło możliwość wykorzystania wyników obliczeń do opracowania konkretnego rozwiązania dla jednej z elektrociepłowni tego rejonu. Zawarto tu również wyniki doświadczeń i prac modernizacyjnych kotła dwupaliwowego pozwalające na optymalizację procesu strefowego spalania.

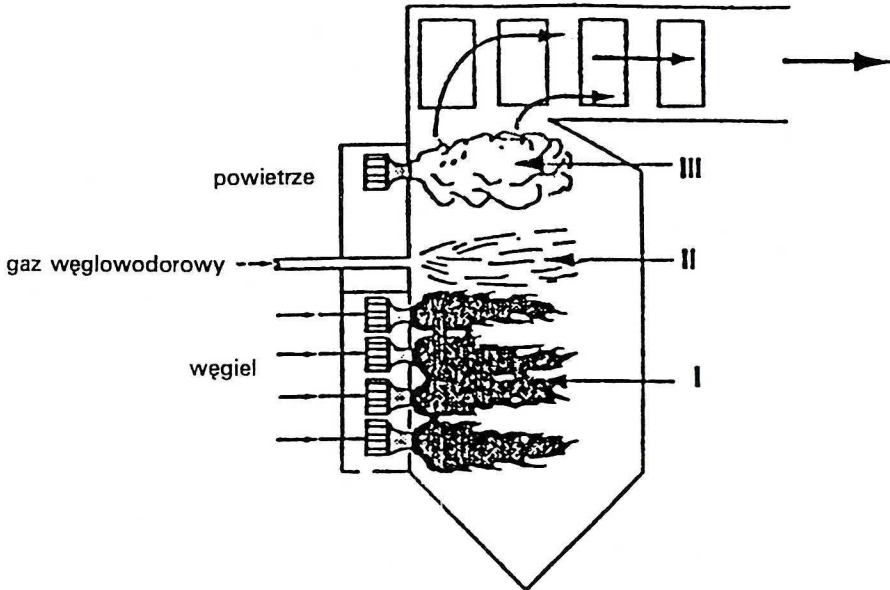
## BADANIA MODELOWE

### STREFOWE SPALANIE WĘGLA I GAZU WĘGLOWODOROWEGO – PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA MODELU PROCESU

Wspólne spalanie węgla i gazu węglowodorowego prowadzące do redukcji  $\text{NO}_x$  jest technologicznie realizowane przez tak zwane spalanie strefowe. W kotle energetycznym można wyodrębnić trzy strefy tworzenia się mieszaniny palnej (Rys. 1) pod kątem kolejności zjawisk pośrednich:

- strefa I – spalanie pyłu węglowego – tworzenie się pierwotnych tlenków azotu;
- strefa II (redukcja) – dodawanie gazu węglowodorowego – gaz ten utleniając się staje się źródłem rodników węglowodorowych, które szybko reagują z  $\text{NO}_x$ , głównie do  $\text{N}_2$ ,  $\text{HCN}$  i  $\text{NH}_3$ ;
- strefa III (dopalenie) – dodawanie powietrza uzupełniającego proces spalania – tworzenie się wtórnych tlenków azotu z  $\text{N}_2$ ,  $\text{HCN}$  i  $\text{NH}_3$ .

W pracach modelowania strefowego spalania węgla i gazu z odmetanowania kopalń nie rozważono procesu spalania pyłu węglowego, traktując skład spalin z I strefy (dla danego rodzaju węgla, współczynnika nadmiaru powietrza i temperatury) jako dane wejściowe do opracowanego modelu, skupiono się natomiast na strefie II i III, gdyż znajomość kinetyki reakcji zachodzących w tych strefach jest decydująca z punktu widzenia mechanizmu redukcji tlenków azotu.



Rys. 1. Schemat spalania gazu węglowodorowego w kotle pyłowym: I – strefa spalania węgla, II – strefa redukcji NO<sub>x</sub>, III – strefa dopalania

Natural gas combustion in coal fired boiler: I – coal combustion zone, II – reduction zone NO<sub>x</sub>, III – burn-out zone

Jako istotne dla procesu redukcji tlenków azotu zidentyfikowano 124 reakcje między 40 cząsteczkami chemicznymi [1–3, 7–9, 11, 12, 14, 15, 17, 21, 22]. Dla wybranych reakcji skorelowano dane kinetyczne i ujęto je w postaci równań matematycznych, a na ich podstawie opracowano model procesu strefowego spalania węgla i gazu węglowodorowego.

Przyjęty model kinetyki redukcji NO<sub>x</sub> był podstawą autorskiego programu komputerowego umożliwiającego analizę stadiów pośrednich procesu redukcji, a także obliczanie profili stężeń końcowych produktów spalania w funkcji temperatury oraz czasu reakcji dla danych parametrów wejściowych (składy spalin, gazu węglowodorowego i czynnika dopalającego, współczynniki nadmiaru powietrza i temperatury w strefie redukcji i dopalania) [4–6, 18].

#### KOMPUTEROWA SYMULACJA PROCESU STREFOWEGO SPALANIA WĘGLA I GAZU KOPALNIANEGO

Opracowany model procesu i metodykę obliczania redukcji tlenków azotu w procesie strefowego spalania węgla i gazu węglowodorowego zastosowano do oszacowania stopnia redukcji NO<sub>x</sub> powstałych w wyniku spalania węgla z KWK „Borynia” o początkowej zawartości azotu 1,16% wag. Właściwości analizowanego węgla przedstawiono w tabeli 1.

Jako czynnik redukujący zastosowano gaz metanowy pozyskiwany z eksploatowanych pokładów węgla ROW o składzie podanym w tabeli 2.



Tabela 1. Analiza węgla  
Analysis of coal

| Analiza elementarna<br>Proxanal analysis |                                   | Analiza techniczna<br>Ultanal analysis                         |            |
|--|-----------------------------------|--|------------|
| Rodzaj oznaczenia<br>Type of analysis    | (stan suchy %)<br>(wt % dry base) | Rodzaj oznaczenia<br>Type of analysis                          | (%)<br>(%) |
| Popiół<br>Ash                            | 6,4                               | Wilgoć<br>Moisture   | 1,37       |
| Węgiel<br>Coal                           | 82,54                             | Węgiel (daf)<br>Coal (daf)                                     | 65,69      |
| Wodór<br>Hydrogen                        | 4,69                              | Części lotne (daf)<br>Volatile matter (daf)                    | 28,07      |
| Azot<br>Nitrogen                         | 1,16                              | Popiół (daf)<br>Ash (daf)                                      | 6,24       |
| Siarka<br>Sulfur                         | 0,76                              |  |            |
| Tlen<br>Oxygen                           | 4,61                              | daf – substancja sucha i bezpopiołowa<br>daf – dry, ash – free |            |

Tabela 2. Analiza gazu metanowego  
Analysis of coal bed methane

| Rodzaj oznaczenia<br>Type of analysis                   | (% obj.)<br>(% vol.) |
|---|----------------------|
| Metan<br>Methane  | 50,89                |
| Azot<br>Nitrogen  | 40,39                |
| Dwutlenek węgla<br>Carbon dioxide                       | 1,37                 |
| Tlen<br>Oxygen  | 7,35                 |
| Wartość opałowa 17 980 MJ/Nm <sup>3</sup><br>Heat value |                      |

W celu ustalenia optymalnych warunków prowadzenia procesu redukcji tlenków azotu przeprowadzono obliczenia dla zmieniających się w szerokich granicach parametrów procesowych, dobranych na podstawie przeprowadzonych obliczeń wstępnych, jak i rozeznania literaturowego [3, 10, 13, 16, 19, 20].

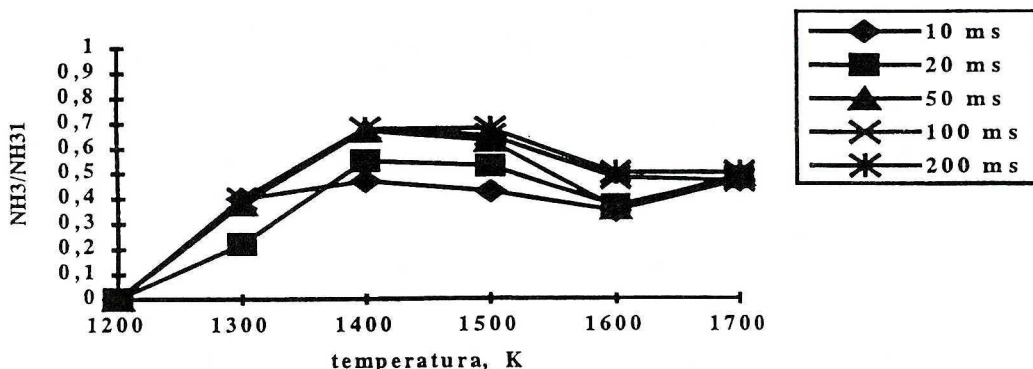
Do obliczeń skuteczności procesu redukcji przyjęto następujące założenia:  
– całkowite wstępne wymieszanie reagentów;

- zakres analizowanych współczynników nadmiaru powietrza 0,9 – 1,2;
- zakres badanych temperatur 1200 – 1700 K;
- zakres badanych czasów reakcji 10 – 200 ms;
- analizowany zakres energii chemicznej paliwa doprowadzonej do kotła z gazem kopalnianym 10 – 30%.

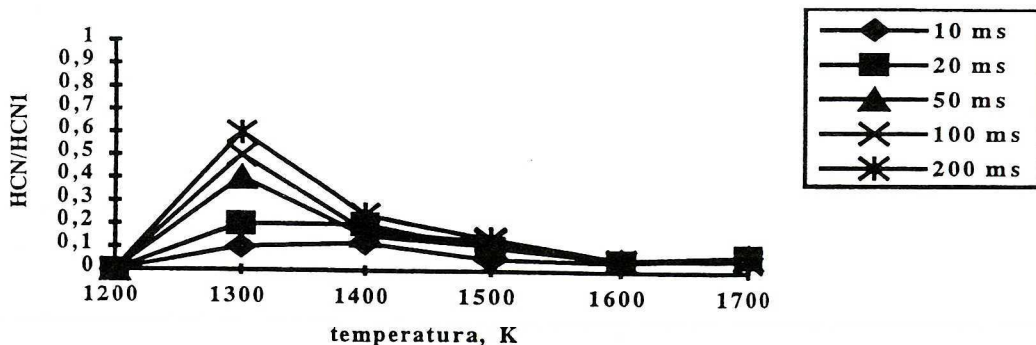
Wyniki obliczeń modelowych przedstawiono graficznie na rysunkach 2–7, przy czym:

– ograniczono się do prezentacji tylko tych wyników, które wskazują najbardziej istotne zmiany stężeń, tj. stężeń tlenków azotu, amoniaku i cyjanowodoru, nie uwzględniono natomiast azotu cząsteczkowego, produktów pośrednich reakcji oraz substancji, których stężenia są pomijalnie małe (np. NCO, HNCO, NH<sub>2</sub>);

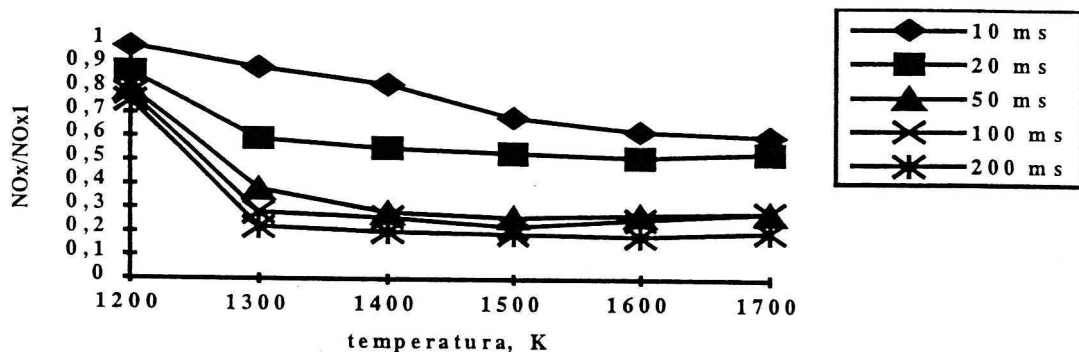
– wybrano do prezentacji wyniki charakteryzujące się największą skutecznością redukcji tlenków azotu, to jest w strefie redukcji (Rys. 2–4) dla współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda = 1,1$ , natomiast w strefie dopalania (Rys. 5–7) dla  $\lambda = 1,2$ .



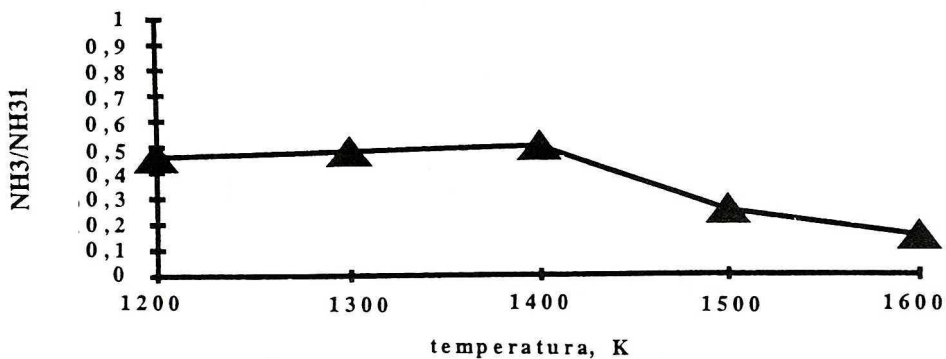
Rys. 2. Wpływ temperatury i czasu reakcji na zmiany stężeń NH<sub>3</sub> – strefa redukcji  
Influence of temperature and residence time on NH<sub>3</sub> concentration – reduction zone



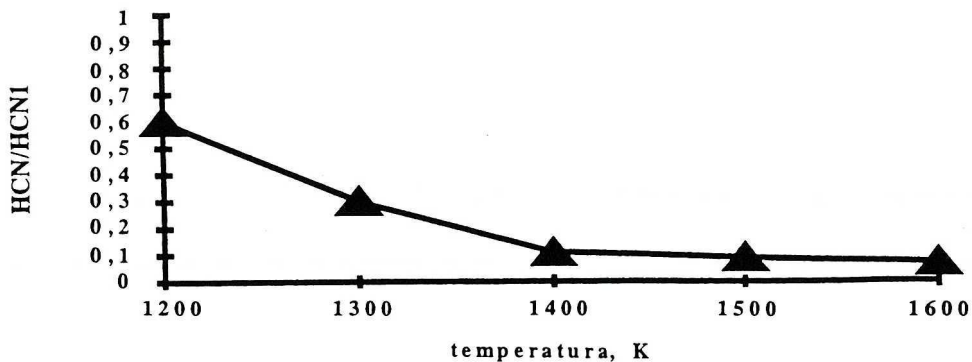
Rys. 3. Wpływ temperatury i czasu reakcji na zmiany stężeń HCN – strefa redukcji  
Influence of temperature and residence time on HCN concentration – reduction zone



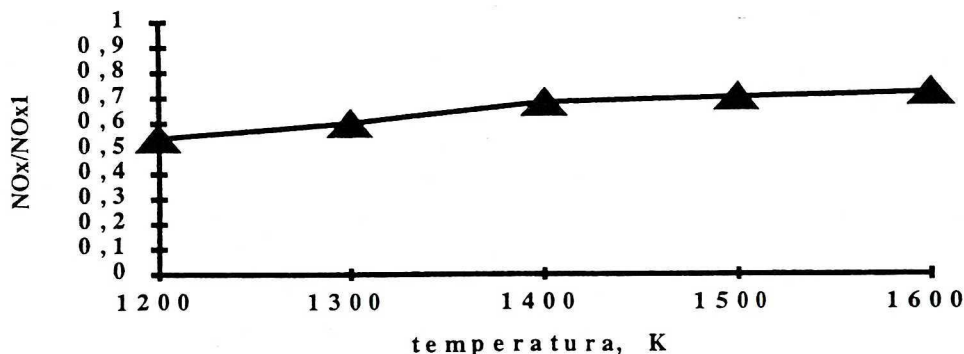
Rys. 4. Wpływ temperatury i czasu reakcji na zmiany stężeń NO<sub>x</sub> – strefa redukcji  
Influence of temperature and residence time on NO<sub>x</sub> concentration – reduction zone



Rys. 5. Wpływ temperatury na zmiany stężeń NH<sub>3</sub> w strefie dopalania – czas reakcji 200 ms  
Influence of temperature on NH<sub>3</sub> concentration in burn-out zone – reaction time 200 ms



Rys. 6. Wpływ temperatury na zmiany stężeń HCN w strefie dopalania – czas reakcji 200 ms  
Influence of temperature on HCN concentration in burn-out zone – reaction time 200 ms



Rys. 7. Wpływ temperatury na zmiany stężeń NO<sub>x</sub> w strefie dopalania – czas reakcji 200 ms  
Influence of temperature on NO<sub>x</sub> concentration in burn-out zone – reaction time 200 ms

Uzyskane w wyniku symulacji procesu spalania zmiany stężeń poszczególnych reagentów przedstawiono na rysunkach w postaci ilorazów opisanych poniżej:

- NH<sub>3</sub>/NH<sub>31</sub> – stężenie NH<sub>3</sub> w danej strefie w warunkach prowadzenia procesu do stężenia na wejściu do tej strefy;
- HCN/HCN1 – stężenie HCN w danej strefie w warunkach prowadzenia procesu do stężenia na wejściu do tej strefy;
- NO<sub>x</sub>/NO<sub>x1</sub> – suma stężeń tlenków azotu (NO<sub>2</sub> + NO + N<sub>2</sub>O) w danej strefie i parametrach procesu do sumy stężeń tlenków azotu na wejściu do tej strefy.

#### DYSKUSJA WYNIKÓW

Z przeprowadzonych rozważań teoretycznych i obliczeń modelowych wynika, że gaz z odmetanowania kopalń wprowadzony do drugiej strefy spalania jest czynnikiem korzystnie zmieniającym przebieg procesu oraz skład finalnych produktów spalania pod kątem ograniczenia obciążenia tym procesem środowiska naturalnego. Głównymi parametrami procesu redukcji tlenków azotu są: skład paliwa podstawowego – węgla, skład gazu węglowodorowego, nadmiar powietrza, czas reakcji, temperatura.

Analizując wyniki obliczeń dla niniejszego przykładu można sformułować zamieszczone poniżej zależności.

#### Strefa redukcji (Rys. 2–4):

1) spalanie węgla oraz gazu o zawartości CH<sub>4</sub> ok. 50% obj. powoduje, że w strefie redukcji, w temperaturze 1300 K, obniżanie zawartości tlenków azotu przebiega z dużą skutecznością, wynoszącą maksymalnie dla czasu reakcji 200 ms ok. 75%;

2) stwierdzono silną zależność między stopniem redukcji tlenków azotu a temperaturą i czasem reakcji:



– redukcja  $\text{NO}_x$  wzrasta wraz z czasem reakcji; zalecane czasy reakcji powinny mieścić się w granicach 100–200 ms, wówczas osiągniata jest bowiem duża efektywność procesu redukcji w niższych temperaturach;

– optymalna temperatura dla strefy redukcji wyznaczona obliczeniowo powinna wynosić od 1400 do 1500 K;

3) azot z tlenku azotu reaguje głównie do HCN, tylko z nieznaczonej części tworzy się  $\text{NH}_3$ ;

4) maksymalną redukcję wynoszącą 80% osiągnięto w temperaturach 1400–1500 K przy czasie reakcji 200 ms dla współczynnika nadmiaru powietrza  $\lambda = 1,1$  w przypadku, gdy 18% energii chemicznej doprowadzonej do kotła pochodzi z gazu kopalnianego.

**W strefie dopalania (Rys. 5–7):**

1) wzrastają stężenia  $\text{NO}$  i  $\text{NO}_2$  w stosunku do strefy redukcji, maleją natomiast stężenia HCN i  $\text{NH}_3$ ;

2) optymalna temperatura wynosi 1200 K, wzrost temperatury powoduje wzrost stężeń tlenków azotu.

Podsumowując wyniki obliczeń w strefie dopalania, można stwierdzić 55% maksymalne obniżenie stężeń tlenków azotu w spalinach w temperaturze 1200 K przy współczynniku nadmiaru powietrza  $\lambda = 1,2$ .

Dane uzyskane z modelowania potwierdziły skuteczność metody strefowego spalania węgla i gazu z odmetanowania kopalń i uzasadniały podjęcie prób na wybranym obiekcie w celu opracowania przemysłowego, proekologicznego rozwiązania nowego sposobu spalania węgla dla procesów energetycznych i ciepłowniczych.

## CZĘŚĆ BADAWCZO-DOŚWIADCZALNA

Przedmiotem tego etapu pracy była modernizacja procesu wspólnego spalania węgla i gazu kopalnianego. Wykorzystano takie rozwiązanie wprowadzania do kotła paliwa gazowego i powietrza dopalającego, które przesunęło chemizm i kinetykę spalania w kierunku redukcji wytworzonych tlenków azotu. Metodę strefowego spalania zastosowano w elektrociepłowni dysponującej czterema kotłami OCG-64 pyłowymi, cyklonowymi z możliwością spalania w nich gazu metanowego, co pozwoliło obniżyć koszty zastosowania metody strefowego spalania o nakłady związane z budową instalacji gazowej.

### CHARAKTERYSTYKA URZĄDZENIA KOTŁOWEGO

Zastosowano kocioł OCG-64 parowy, walczakowy, opromieniowany, cyklonowy, pyłowo-gazowy. Ma on poziome palenisko cyklonowe przystosowane do spalania pyłu węglowego w czterech palnikach pyłowych. Dodatkowo zabudo-



wano pięć palników gazowych (jeden rozpałkowy, a pozostałe cztery rozmieszczone parami na przeciwległych ścianach na różnej wysokości komory), przystosowanych do spalania gazu kopalnianego. Kocioł zbudowany jest w układzie dwuciągowym z całkowicie ekranowaną komorą dopalania i wychładzania. Część ciśnieniowa kotła zabezpieczona jest trzema zaworami bezpieczeństwa. W skład urządzenia kotłowego wchodzi ponadto następujące elementy:

- trójstopniowe przegrzewacze pary,
- podgrzewacz wody zabudowany w ciągu konwekcyjnym kotła,
- wentylator ciągu – opromieniowany wyposażony w nastawne łopatki na wlocie spalin na wirnik,
- wentylator poddmuchu promieniowy wyposażony w aparat kierowniczy nastawny na ssaniu,
- instalacja powietrza do spalania zapewniająca jego prawidłowy rozdział do spalania gazu oraz pyłu węglowego.

Analizie poddano poszczególne zespoły instalacji kotłowej, mogące mieć wpływ na jego stabilną pracę, a tym samym na utrzymanie optymalnych pod względem emisji  $\text{NO}_x$  parametrów pracy kotła. Urządzenia kotłowe podczas badań były obsługiwane przez personel ruchowy w analogiczny sposób, jak podczas normalnej eksploatacji. W trakcie badań spalano węgiel z KWK „Borynia” oraz gaz kopalniany ze Stacji Odmetanowania Kopalń o charakterystyce podanej w tabelach 1 i 2.

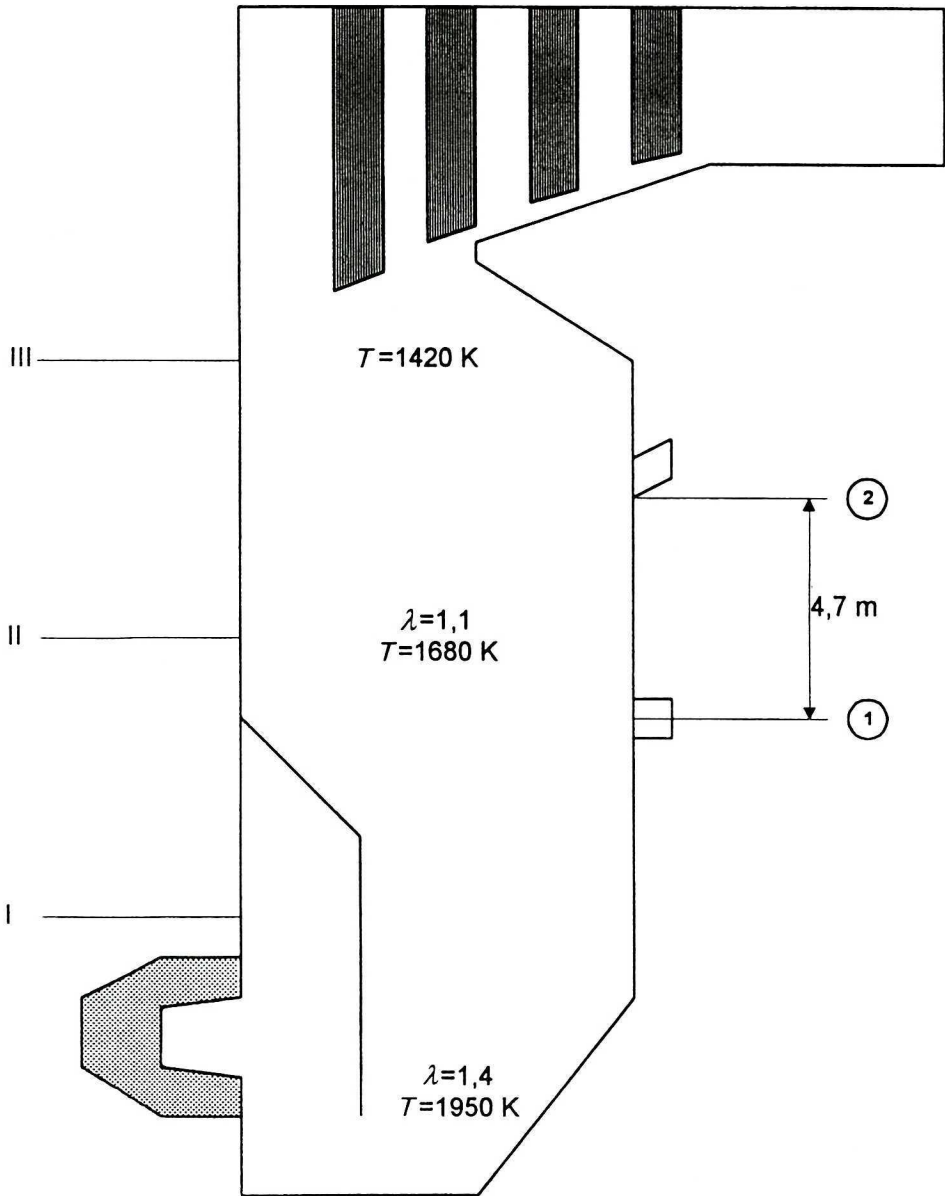
Stężenia tlenków azotu przed optymalizacją procesu spalania i modernizacją instalacji kotłowej przyjmowały wartości 800–1500  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

Utrzymywane parametry pracy kotła wynikały z zastosowanego programu badań, przy czym uwzględniono potrzeby technologiczne i ruchowe elektrociepłowni (np. utrzymanie spływu ciekłego żużla).

#### MODERNIZACJA KOTŁA OCG-64

Przeprowadzone prace wstępne obejmujące badania bilansowe, pomiary rozplywu powietrza w kotle, optymalizację procesu spalania dały podstawy techniczne do opracowania założeń modernizacji procesu spalania w tego typu kotłach, spełniającej warunki spalania strefowego. Należy podkreślić, że badania wstępne umożliwiły zaproponowanie kierownictwu elektrociepłowni zmian organizacji procesu spalania, które po realizacji pozwoliły na uzyskanie znacznego obniżenia emisji tlenków azotu – do poziomu ok. 500  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

W celu dalszego obniżenia emisji tlenków azotu wykonano modernizację kotła obejmującą zabudowę dysz powietrza dopalającego wraz z układem kierowniczym umożliwiającym regulowanie wypływu powietrza z dysz w płaszczyźnie pionowej i poziomej. Dysze powietrza dopalającego zabudowano u góry komory paleniskowej po dwie na lewej i prawej ścianie komory. Ze względu na wykorzystanie do zabudowy dysz nieczynnych wzierników, wyeliminowano



Rys. 8. Schemat strefowego spalania w pyłowym kotle cyklonowym OCG-64: I – strefa spalania węgla; II – strefa redukcji  $\text{NO}_x$ , III – strefa dopalania, 1 – palniki gazowe; 2 – dysze powietrza dopalającego

Diagram of gas reburning system in a coal-fired cyclone boiler OCG-64: I – coal combustion zone; II – reduction zone; III – burn-out zone; 1 – gas reburning injectors; 2 – overfire air injectors

konieczność zmian konstrukcyjnych w części ciśnieniowej kotła, co znacznie ułatwiło techniczne przeprowadzenie modernizacji i obniżyło jej koszty. Powietrze z kanałów gorącego powietrza za podgrzewaczem dopływa do dysz przez zwężki pomiarowe. Kierunek wypływu powietrza z dysz jest regulowany w płasz-

czyźnie poziomej w zakresie do  $20^\circ$  oraz w płaszczyźnie pionowej ok  $15^\circ$ . Sposób doprowadzenia powietrza umożliwia wytworzenie w komorze paleniskowej wiru poprawiającego warunki spalania.

Zapewnienie skuteczności wdrożenia metody strefowego spalania węgla i gazu kopalnianego wymaga zastosowania regulacji dopływu powietrza do każdej ze stref spalania. Z przeprowadzonych w kotłach OCG-64 badań wynika, że w komorze cyklonowej ze względu na konieczność ciągłości eksploatacji niemożliwe jest stworzenie atmosfery redukcyjnej, w strefie reburningu natomiast oraz w strefie dopalania możliwe jest sterowanie ilością powietrza w celu redukcji powstałych w procesie spalania węgla znacznych ilości tlenków azotu. Umieszczenie dysz powietrza dopalającego, zastosowane nadmiary powietrza i osiągnięte w trakcie badań temperatury w komorze paleniskowej przedstawiono na rysunku 8.

Analiza danych doświadczalnych wskazuje na znaczne różnice między wynikami obliczeń modelowych a wynikami pomiarów. Ogólnie, powodem tych rozbieżności jest różnica między zastosowanym modelem (idealne wymieszanie reagentów, stała temperatura w danej strefie, znane rozptyły powietrza w poszczególnych strefach kotła) a rzeczywistymi warunkami eksperymentu, dostępnym do badań kotłem i wynikającymi stąd ograniczeniami. Szczególne utrudnienia w prowadzeniu procesu zgodnie z założeniami strefowego spalania powodował brak stałej kontroli ilości podawanego do kotła powietrza, a także brak możliwości odczytu w nastawni podstawowych wskazań eksploatacyjnych. Niemniej jednak doświadczenia potwierdziły możliwość znacznej redukcji tlenków azotu z procesu spalania węgla przy zastosowaniu reburningu gazem kopalnianym.

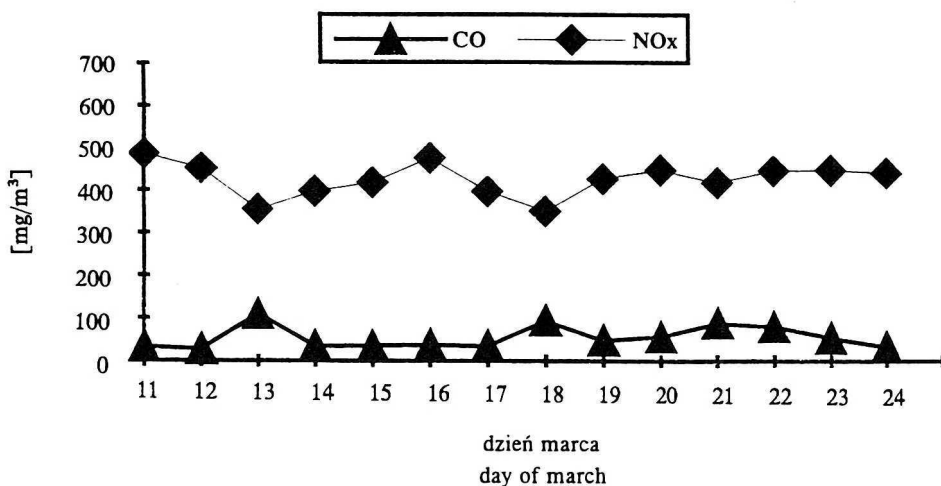
#### BADANIA EMISJI TLENKÓW AZOTU PO MODERNIZACJI KOTŁA

Po zabudowie dysz powietrza dopalającego wykonano tygodniowy cykl badań sprawdzających efektywność zastosowanego rozwiązania modernizacyjnego. Przykładowe wyniki czternastodniowych badań przedstawiono graficznie na rysunku 9 (wartości stężeń  $\text{NO}_x$  i CO podano w  $\text{mg}/\text{m}^3$  suchych spalin w warunkach normalnych, przy 6% zawartości  $\text{O}_2$  w gazach odlotowych). Przeprowadzone próby i pomiary wykazały zmniejszoną koncentrację tlenków azotu w spalinach po modernizacji instalacji kotłowej. Koncentracje  $\text{NO}_x$  w spalinach mierzono jednocześnie dwoma przyrządami wyposażonymi w czujniki elektrochemiczne. Przy zmiennych parametrach pracy kotła wynikających z warunków zasilania, takich jak koncentracja pyłu węglowego, prędkość wypływu paliwa i powietrza oraz obciążenia kotła, poziom emisji  $\text{NO}_x$  zmieniał się w granicach  $300 - 450 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Podczas stabilnej pracy kotła oraz przy utrzymywaniu zalecanych reżimów technologicznych emisja tlenków azotu malała do poziomu  $350 - 400 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Przeprowadzone, w trakcie stabilnej pracy kotła pomiary wykazały, że:

– zmodernizowana instalacja kotłowa osiągała podstawowe parametry eksploatacyjne;



- poziom  $\text{NO}_x$  jest zmienny w różnych warunkach eksploatacji kotła;
- maksymalne redukcje  $\text{NO}_x$  uzyskuje się w przypadku 20% udziału gazu kopalnianego w energii chemicznej doprowadzonej do kotła;
- zawartość części palnych w popiele wynosiła około 10%, a zawartość CO w spalinach generalnie nie przekraczała  $100 \text{ mg/m}^3$  – omawiane wyniki nie odbiegają w sposób istotny od wartości uzyskiwanych w trakcie bieżącej eksploatacji kotła;
- dalsze zwiększenie efektu obniżenia emisji  $\text{NO}_x$  nie jest możliwe bez zastosowania automatycznej regulacji rozplywu powietrza.



Rys. 9. Średnia emisja CO i  $\text{NO}_x$  uzyskana w trakcie 14-dniowego testu  
Average CO and  $\text{NO}_x$  emission during a 14 day testing period

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Pracę realizowano dwuetapowo:

- w pierwszym etapie opracowano model procesu strefowego spalania węgla i gazu z odmetanowania kopalń oraz przeprowadzono obliczenia optymalnych parametrów procesu spalania w aspekcie redukcji tlenków azotu,
- etap drugi obejmował wykonanie modernizacji kotła oraz przeprowadzenie badań i analizy weryfikacyjnej proponowanej metody spalania.

Przy realizacji prac zmierzających do obniżenia emisji tlenków azotu z kotłów OCG-64 już w trakcie badań wstępnych, polegających na regulacji, optymalizacji i zmianach w organizacji procesu spalania, uzyskano znaczne obniżenie emisji tlenków azotu do poziomu  $500 \text{ mg/m}^3$ .

Modernizacja eksploatowanej instalacji kotłowej polegała (oprócz wykonania prac związanych ze zmianą organizacji i optymalizacją procesu spalania) na zamontowaniu ponad palnikami gazowymi dysz powietrza dodatkowego. Jak wynika z przeprowadzonych badań w skali technicznej, modernizacja kotła umożliwiła realizację procesu spalania metodą strefową, co pozwoliło na ob-

nizienie emisji tlenków azotu z poziomu 800–1500 mg/m<sup>3</sup> do 300–450 mg/m<sup>3</sup>, a tym samym na sprostanie aktualnym wymogom przepisów ochrony środowiska obowiązującym od 1998 roku.

Oprócz realnych korzyści dla środowiska, zastosowanie metody strefowego spalania pozwala na osiągnięcie wymiernych korzyści ekonomicznych związanych z obniżeniem opłat ekologicznych.

Z przeprowadzonych analiz ekonomicznych [5] wynika, że zastosowanie wariantu modernizacyjnego jest ekonomicznie uzasadnione w przypadku, gdy na terenie elektrociepłowni dostępna jest instalacja gazu węglowodorowego. Wydaje się, że szczególne znaczenie wariant ten może mieć na terenie GOP, gdzie w elektrociepłowniach kopalnianych są zainstalowane kotły dwupaliwowe oraz dostępny jest gaz kopalniany (w ramach Centralnej Stacji Odmetanowania Kopalń).

Część wyników prezentowanych w niniejszej publikacji stanowi fragment prac badawczych wykonanych w trakcie realizacji projektu celowego nr 8T10B04497C/3724 pt.: „Wykorzystanie gazów kopalnianych do procesu proekologicznego, strefowego spalania węgla w kotle energetycznym” dofinansowanego przez KBN.

#### LITERATURA

- [1] Abras T., P. Costen, F.C. Lockwood, C.A. Romo-Millares: *The effect of particle size on NO formation in a large-scale pulverized coal-fired laboratory furnace: measurements and modeling*, Combustion and Flame, **93**, 316–326 (1993).
- [2] Bechtold J.K., C.K. Law: *The structure of premixed methane-air flames with large activation energy*, Combustion and Flame, **97** (3), 317–374 (1994).
- [3] Beer J.: *Minimizing NO<sub>x</sub> emissions from stationary combustion; reaction engineering methodology*, Chemical Engineering Science, **49**, 4067–4083 (1995).
- [4] Białecka B.: *Możliwość wykorzystania gazów kopalnianych do redukcji NO<sub>x</sub> w procesie spalania węgla*, Ochrona Powietrza i Problemy Odpadów, **2**, 1995.
- [5] Białecka B.: *Proekologiczne spalanie węgla i gazu z odmetanowania kopalń – model procesu*, Praca Naukowa Głównego Instytutu Górnictwa nr 819, Katowice 1996.
- [6] Białecka B.: *Wykorzystanie gazów kopalnianych do procesu proekologicznego, strefowego spalania węgla w kotle energetycznym*, Sprawozdanie z realizacji projektu celowego nr 8T10B04497C/3724, GIG, Katowice 1999.
- [7] Burch T.E., Chen Wei-Yen, T.W. Lester: *Interaction of fuel nitrogen with nitric oxide during reburning with coal*, Combustion and Flame, **98** (4), 391–402 (1994).
- [8] Glarborg P., N.I. Lilleheie: *A reduced mechanism for nitrogen chemistry in methane combustion*, Proceedings of Twenty-Fourth International Symposium on Combustion, July 5–10, Sydney 1992, 51.
- [9] Glarborg P., J.A. Miller, R.J. Kee: *Kinetic modeling and sensitivity analysis of nitrogen oxide formation in well-stirred reactors*, Combustion and Flame, **65**, 177–197 (1986).
- [10] Gusew I.N., L.I. Zajczik, N.J. Kudrjawcew: *Modelirowanie obrazowania oksydów azota pri szigani twierdowo topliwa w topocznych kamerach*, Tieploenergietika, **1**, (1993).
- [11] Hulgaard T., P. Glarborg, K. Dam-Johansen: *Formation of N<sub>2</sub>O during the homogeneous oxidation of HCN and NH<sub>3</sub> – an experimental and theoretical study*, Second Nordic Conference of Control of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> Emission from Combustion of Solid Fuels, November 12–13, Lyngby, 1990.
- [12] Hunter T.B., H. Wang, T.A. Litzinger, M. Frenklach: *The oxidation of methane at elevated pressures: experiments and modeling*, Combustion and Flame, **97**, 201–224 (1994).

- [13] Kilpen P., P. Glarborg, M. Hupa: *Reburning Chemistry – Kinetic modeling study*, Ind. Eng. Chem. Res., **31**, 1490–1502 (1992).
- [14] Kolb T., P. Jansohn, W. Luecker: *Reduction of NO<sub>x</sub> emission in turbulent combustion by fuel-staging*, Twenty Int. Symposium on Combustion, Malmo 1988.
- [15] Krammer G.F., A.F. Sarofim: *Combustion-influence of nitric oxide and nitrogen on nitrous oxide*, Combustion and Flame, **97** (1), 118–124 (1994).
- [16] Kristensen P.G., P. Glarborg, J.E. Johnsson: *Reburning rich-lean kinetics*, Gas Research Conference (Int), November 16–19, Florida 1992.
- [17] Mertens J.D., A.Y. Chang, R.K. Hanson, C.T. Bowman, D.A. Masten: *Tube study of the reactions of NH with NO, O<sub>2</sub> and O*, Int. J. Chem. Kinet. **23**, 173–209 (1991).
- [18] Pilch-Kowalczyk A.: *Określenie ekonomicznie efektywnych metod energetycznego zagospodarowania gazów kopalnianych w zależności od stopnia koncentracji metanu*, Dokumentacja GIG nr 25.4, Katowice 1993.
- [19] Rhime J.M., R.J. Tucker: *Modelling of gas-fired furnaces and boilers*, McGraw-Hill Book Company, New York 1991.
- [20] Rosliakow P.W., A.W. Burkowa: *Optimalnyje uslowija erealizacji tiechnologi stupienczato-wo sziganija topliwa s wwodom azot soderżawczich wieszcziestw w wostanowitielnuju gorjenija*, Tieploenergietyka, **2** (1993).
- [21] Williams B.A., J.W. Fleming: *Comparison of species profiles between O<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> oxidizers in premixed methane flames*, Combustion and Flame, **100** (4), 571–591 (1995).
- [22] Zeldowicz Ya.B., P. Sandovnikov: *Oxidation of nitrogen in combustion*, Academy of Science USSR, Acta physicochim., **21**, Moscow 1947.

Wpłynęło: 6 kwietnia 1999, zaakceptowano do druku: 20 grudnia 1999.