



## **Badania energo-ekologicznych wskaźników pracy kotłów przy spalaniu paliwa ze sterowanym resztkowym niedopałem chemicznym**

*Aleksander Szkarowski, Sylwia Janta-Lipińska*  
*Politechnika Koszalińska*

### **1. Wstęp**

Zagadnienie poprawy wskaźników spalania paliwa w kotłach i piecach przemysłowych tradycyjnie rozpatruje się osobno pod względem sprawności jego zużycia lub ekologiczności. Autorska metoda optymalizacji według kryterium energo-ekologicznego [6, 8] przewiduje wspólne rozwiązywanie obu zagadnień: maksymalizowania sprawności zużycia paliwa i minimalizowania szkody wyrządzonej środowisku [8], określając to mianem „jakość spalania paliwa”. W przypadku kotłów grzewczych i przemysłowych jednym z najprostszych, najtańszych i jednocześnie wysokoefektywnych sposobów takiej optymalizacji jest spalanie paliwa ze sterowanym resztkowym niedopałem chemicznym [1].

Wartość energo-ekologicznego kryterium jakości spalania paliwa zależy od wielu czynników wpływu, wśród których należy wymienić:

- przepływ gazu i odpowiednio moc kotła,
- zużycie powietrza na spalanie i sposób jego doprowadzania do paleniska,
- współczynnik nadmiaru powietrza i jego zmiana wzdłuż traktu gazo-spalinowego,
- temperatura powietrza,
- temperatura paliwa,
- wartość opałowa paliwa,
- stopień zanieczyszczenia powierzchni ogrzewanych,
- sprawność wymiany ciepła powierzchni kotła.

Czynniki te w większości są niezależne, ale skutek niesamowitej złożoności procesów paleniskowych ulegają interakcji, co bardzo komplikuje zagadnienie optymalizacji.

Lecz atutem omawianej metody jest właśnie to, że pozwala ona poprawiać wskaźniki spalania paliwa w wybranym kierunku i w zależności od wybranych czynników wpływu, nie pogarszając przy tym innych charakterystyk pracy urządzeń. Niniejszy artykuł podsumowuje wyniki optymalizacji pracy kotłów pod względem zmniejszenia emisji tlenków azotu ( $\text{NO}_x$ ) i tlenku węgla (CO) ze spalinami do atmosfery.

Wstępnie opracowany model fizyko-matematyczny zmiany parametrów pracy kotła [7] pozwolił określić główne czynniki, które wywierają wpływ na emisję  $\text{NO}_x$  i CO. Są nimi:

- obciążenie (moc) kotła,
- współczynnik nadmiaru powietrza,
- stopień zanieczyszczenia powierzchni ekranowych paleniska,
- zasysanie powietrza przez nieszczelności paleniska.

Rozpatrywanie przebiegu procesów zachodzących w palenisku kotła świadczy, że decydujący i bezpośredni wpływ na emisje  $\text{NO}_x$  i CO wywiera obciążenie kotła oraz współczynnik nadmiaru powietrza podawanego przez palnik. Teoretycznie udowodniono także, że stopień zanieczyszczenia powierzchni ekranowych paleniska może wpływać pośrednio na średnią całkową temperaturę w strefie aktywnego spalania (SAS) a co za tym idzie na szybkość przebiegu reakcji chemicznych. Natomiast zasysanie powietrza przez nieszczelności zmienia wartość średniego współczynnika nadmiaru powietrza w palenisku, co może wywierać wpływ na procesy zachodzące w strefie aktywnego spalania.

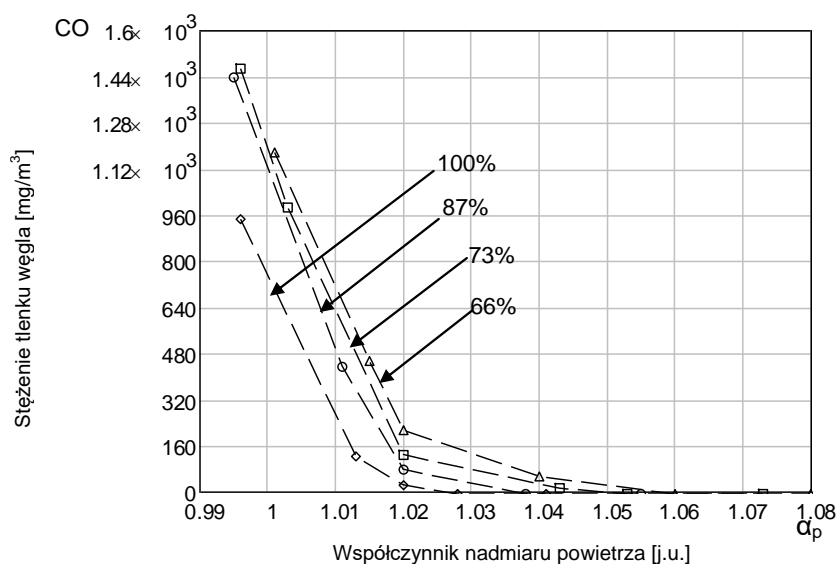
Określenie faktycznego stopnia wpływu powyższych czynników na powstawanie i emisję szkodliwych składników spalin do atmosfery wymagało dalszych badań doświadczalnych.

## **2. Badanie wpływu nadmiaru powietrza i wydajności kotła na powstawanie CO i $\text{NO}_x$**

W pierwszym etapie prac doświadczalnych badano wpływ charakteru dostarczania powietrza do strefy spalania i mocy kotła na emisję CO i  $\text{NO}_x$ . Nie bez znaczenia był także rodzaj palników, gdyż mogło to

zmieniać wskaźniki pracy tego samego kotła. W tym celu przy kilku różnych obciążeniach kotła zmieniano współczynnik nadmiaru powietrza za paleniskiem poprzez regulację ciśnienia powietrza przed palnikiem. Jako obiekt badań wybrano jednakowe kotły parowe DKVR-20-13 wyposażone w różne palniki nadmuchowe. Wyniki uzyskanych rezultatów dla kotła z trzema palnikami GMGB-5,6 przedstawione zostały na rys. 1 i 2.

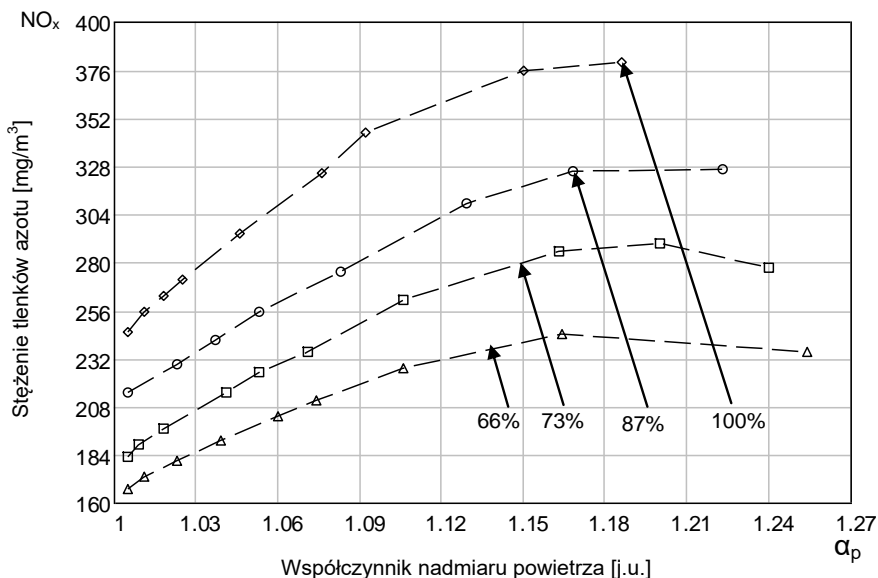
Jak widać na rys. 1, zależność emisji CO od współczynnika nadmiaru powietrza ma charakter monolitycznie ubywający, co odpowiada wzrostowi stężenia wolnego tlenu w strefie spalania. Natomiast ze zwiększeniem obciążenia kotła polepsza się jakość mieszania strug gazu i powietrza, rośnie średnia całkowita temperatura płomienia i lokalne temperatury w nim. To wszystko powoduje zwiększenie szybkości chemicznych reakcji spalania i obniżenie zawartości CO przy jednakowych wartościach współczynnika nadmiaru powietrza.



**Rys. 1.** Zależność stężenia tlenku węgla w spalinach od współczynnika nadmiaru powietrza i obciążenia kotła dla palnika GMGB-5,6

**Fig. 1.** Dependence of the carbon monoxide emission from factor of air excess ratio and boiler output for the burner GMGB-5,6

Zależność emisji tlenków azotu od obciążenia kotła (w przeliczeniu na  $\text{NO}_2$ ) jest prawie liniowa (rys. 2). Zmniejszenie obciążenia o 34% (ze 100 do 66% mocy nominalnej) powoduje zmniejszenie stężenia  $\text{NO}_x$  o ok. 35% (z 383 do 247  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) przy współczynniku nadmiaru powietrza 1,16–1,19 oraz o ok. 33% (z 250 do 168  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) przy  $\alpha = 1,01$ . Badania przy tak niskim nadmiarze powietrza możliwe były dzięki metodzie spalania ze sterowanym resztkowym niedopalek chemicznym przy zastosowaniu analizy jakości spalania według kryterium energoekologicznego.



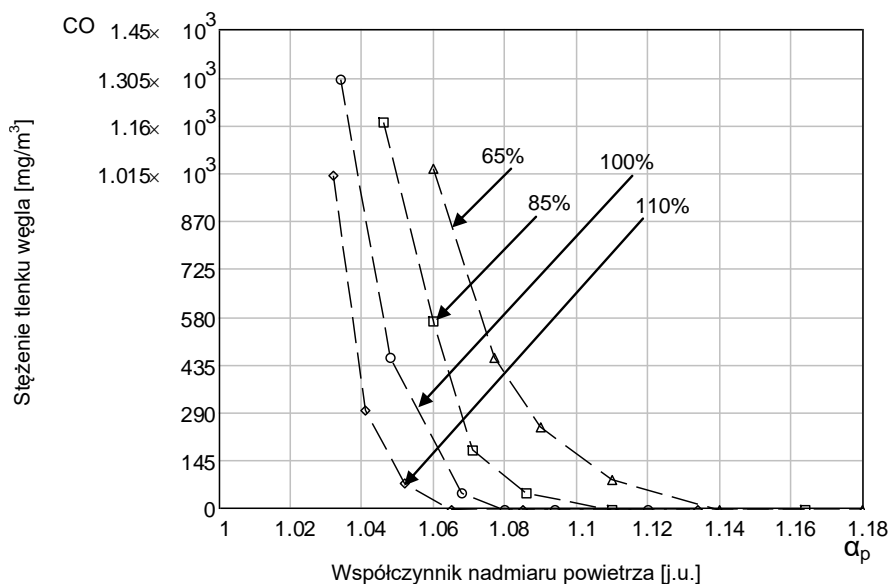
**Rys. 2.** Zależność stężenia tlenków azotu w spalinach od współczynnika nadmiaru powietrza dla palnika typu GMGB-5,6

**Fig. 2.** Dependence of the nitrogen oxides emission from the factor of air excess ratio for the burner GMGB-5,6

Redukcję emisji  $\text{NO}_x$  wraz ze zmniejszeniem mocy kotła można wyjaśnić wpływem obniżającej się średniej całkowitej temperatury w SAS na skutek wzrostu względnego odprowadzania ciepła od płomienia do ekranów, a także przez zmniejszenie natężenia cieplnego w objętości paleniska.

Rys. 2 pokazuje również, że w zależności od  $\alpha$  stężenie  $\text{NO}_x$  najpierw rośnie (w przedziale  $\alpha$  od 1,01 do ok. 1,20), a przy dalszym zwiększaniu nadmiaru powietrza zaczyna się obniżać. Taki charakter zależności  $\text{NO}_x = f(\alpha)$  w całości odpowiada podstawom „termicznej” teorii powstawania tlenków azotu (tzw. teoria Zeldowicza). Zwiększenie emisji  $\text{NO}_x$  na wschodzącej części krzywych spowodowane jest podwyższeniem temperatury w strefie ich intensywnej generacji. Nie bez znaczenia jest także towarzyszący temu wzrost stężenia wolnego tlenu w płomieniu. Przy dalszym zwiększaniu  $\alpha$  temperatura w strefie spalania zaczyna szybko się obniżać na skutek rozcięczenia produktów spalania powietrzem, które nie bierze udziału w spalaniu.

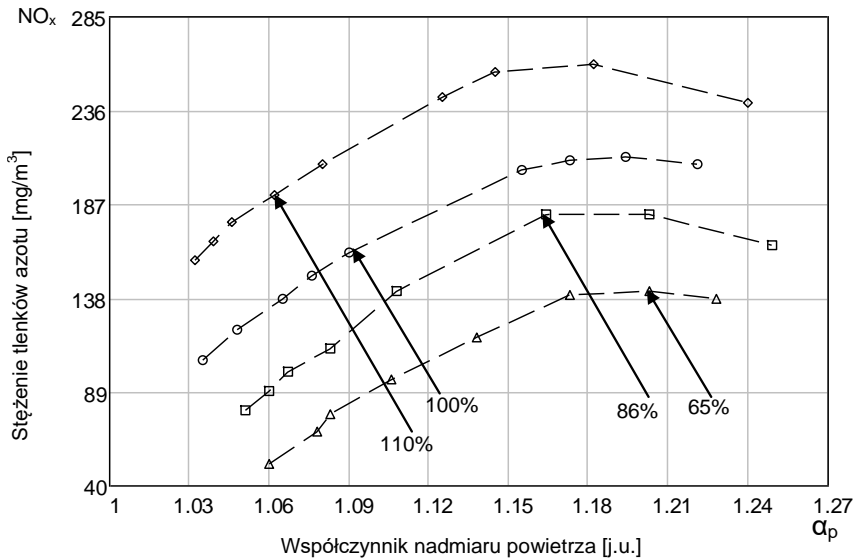
Na rys. 3 i 4 przedstawiono analogiczne dane pomiarów stężenia CO i  $\text{NO}_x$  w spalinach dla kotła DKVR-20-13 z trzema palnikami typu GMG-5M.



**Rys. 3.** Zależność stężenia tlenku węgla w spalinach od współczynnika nadmiaru powietrza i obciążenia kotła dla palnika typu GMG-5M

**Fig. 3.** Dependence of the carbon monoxide emission from factor of air excess ratio and boiler output for the burner GMG-5M

Zastosowanie złożonego sposobu rozprowadzania strug gazu (osiowo i od środka w poprzek zawieranego strumienia powietrza) w palnikach typu GMG-M, zapewnia bardziej łagodny pochylony profil zależności  $CO = f(\alpha)$ . W porównaniu z palnikami GMGB osiowy sposób rozprowadzania części paliwa przedłuża proces zmieszania gazu z powietrzem. Na skutek tego sam proces spalania nieco się wydłuża, co obniża średnią całkowitą temperaturę płomienia oraz szybkość przebiegu chemicznych reakcji spalania. Wymaga to także pewnego zwiększenia stężenia tlenu w strefie spalania. Dlatego palniki typu GMG-M zapewniają zupełne spalanie paliwa przy wyższych nadmiarach powietrza w porównaniu z palnikami typu GMGB.



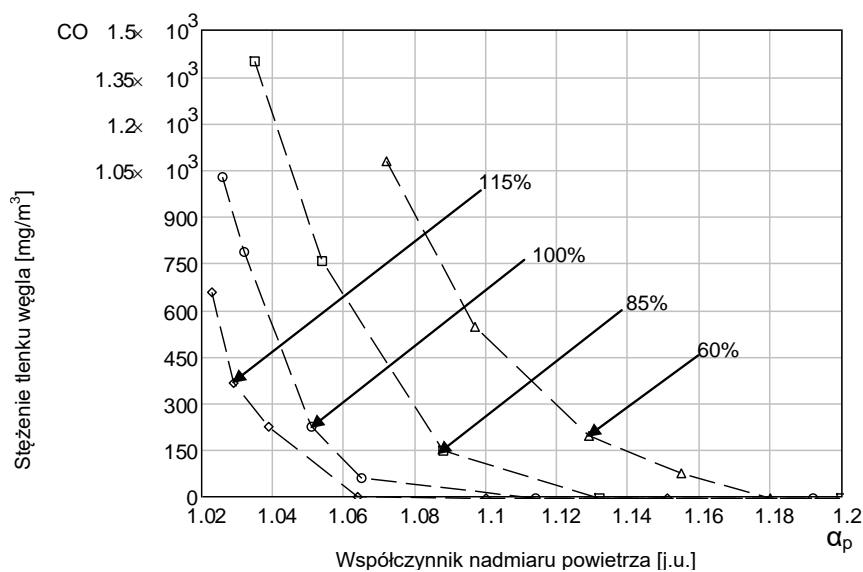
**Rys. 4.** Zależność stężenia tlenków azotu od współczynnika nadmiaru powietrza i obciążenia kotła dla palnika typu GMG-5M

**Fig. 4.** Dependence of the nitrogen oxides emission from the factor of air excess ratio for the burner GMG-5M

Na przykład przy obciążeniu kotła 65–66% stężenie CO na poziomie  $100 \text{ mg/m}^3$  dla palnika GMGB-5,6 odpowiada wartości współczynnika nadmiaru powietrza 1,03, natomiast dla palnika GMG-5M taka zupełność spalania możliwa jest przy  $\alpha = 1,11$ .

Bez wątpliwości wywiera to wpływ na sprawność zużycia paliwa. Jednak porównanie ekologicznych wskaźników spalania z uwzględnieniem temperaturowego poziomu płomienia i przeważającego wpływu średniej całkowitej temperatury na powstawanie tlenków azotu w strefie małych wartości  $\alpha$  [5] wykazuje niższą toksyczność produktów spalania palników GMG-M dzięki mniejszej emisji  $\text{NO}_x$  przy jednakowych obciążeniach kotła i nadmiarach powietrza w SAS. Zależność obrazującą wpływ obciążenia kotła i nadmiaru powietrza w strefie spalania na emisję tlenków azotu dla palnika typu GMG-5M pokazano na rys. 4.

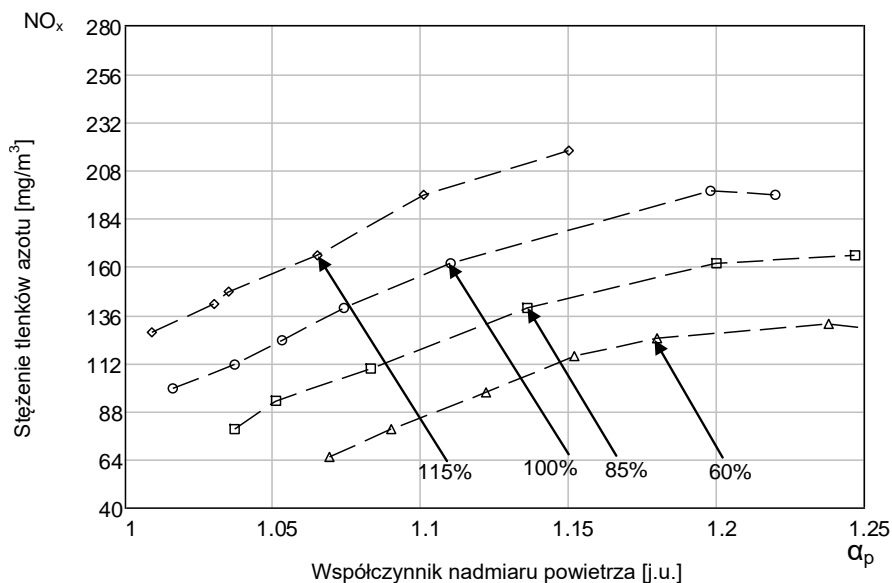
Na rys. 5 i 6 pokazano zależność emisji CO i  $\text{NO}_x$  od  $\alpha$  oraz od obciążenia kotła DKVR-20-13 wyposażonego w dwa palniki GMG-7. Palnik typu GMG ma wyłącznie osiowe rozprawdzanie strug gazowych w kierunku osi zawirowanego strumienia powietrza, w związku z czym proces zmieszania paliwa z powietrzem jest bardziej wydłużony w porównaniu z palnikami GMGM i GMGB a więc potrzebuje on zwiększonych roboczych nadmiarów powietrza.



**Rys. 5.** Zależności stężenia tlenku węgla od współczynnika nadmiaru powietrza i obciążenia kotła DKVR-20-13 z palnikami GMG-7

**Fig. 5.** Dependence of the carbon monoxide emission from factor of air excess ratio and boiler output for the boiler DKVR-20-13 with burners GMG-7

Najbardziej widoczne jest to przy małych obciążeniach kotła. Płomień jest wówczas mniej jednorodny i bardziej rozciągnięty. Poziom maksymalnych temperatur w takim płomieniu jest niższy, co warunkuje mniejszą emisję  $\text{NO}_x$  (rys. 6).



**Rys. 6.** Zależność stężenia tlenków azotu od współczynnika nadmiaru powietrza i obciążenia kotła DKVR-20-13 z palnikami GMG-7

**Rys. 6.** Dependence of the nitrogen oxides emission from the factor of air excess ratio and boiler output for the boiler DKVR-20-13 with burners GMG-7

### 3. Badanie wpływu zasysania powietrza i stopnia zanieczyszczenia ekranów na emisję $\text{NO}_x$ i CO

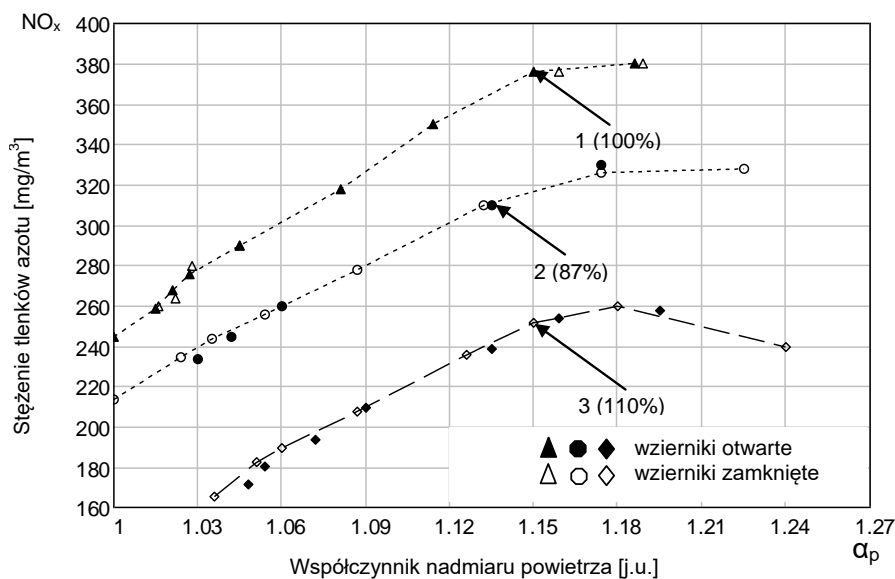
W praktyce eksploatacji kotłów, na skutek stałych wibracji mechanicznych, pulsacji ciśnienia oraz lekkich wybuchów podczas zapłonu następuje uszkodzenie obudowy kotła i zmniejszenie szczelności paleniska. W celu symulacji takiego stanu obudowy i zbadania wpływu zasysanego przez nieszczelności powietrza na powstawanie  $\text{NO}_x$  i CO przy niezmiennych obciążeniach wykorzystano wprowadzanie dodatkowego powietrza przez boczne wzierniki na ściankach kotłów.



Żeby zwiększyć wartości zasysania powietrza ( $\Delta\alpha_p$ ) podczas eksperymentu podciśnienie w palenisku ustalano na poziomie 8–10 daPa, w porównaniu ze standardową wartością 2–3 daPa.

Na przykład, na kotle parowym DKVR-20-13 z palnikami typu GMGB-5,6 zasysanie powietrza do paleniska przy nominalnym obciążeniu z zamkniętymi i otwartymi wziernikami wynosiło odpowiednio 0,010 i 0,040, natomiast na takim samym kotle z palnikami typu GMG-5M przy obciążeniu 110% wartość ta zwiększyła się od 0,032 do 0,09. Zauważalna różnica wynika z różnego stanu technicznego kotłów.

Rys. 7 ilustruje wpływ zasysania powietrza na powstawianie  $\text{NO}_x$ . Wszystkie pomiary wykonano na wyjściu z paleniska do pęczków konwekcyjnych przy pomocy analizatora spalin TESTO-300M z górnym przedziałem 1200°C. Wartości stężenia, w celu porównywalności wyników, przeliczono na  $\alpha = 1,0$ .



**Rys. 7.** Zależność stężenia tlenków azotu od współczynnika nadmiaru powietrza, obciążenia kotła, rodzaju palnika i zasysania powietrza

**Rys. 7.** Dependence of nitrogen oxides emission from factor of air excess ratio, boiler output, type of a burner and air inleakage

Maksymalne wartości  $\text{NO}_x$  uzyskano w zakresie  $\alpha = 1,18\text{--}1,19$ , co na ogół odpowiada teorii powstawania tlenków azotu. Poziom emisji  $\text{NO}_x$  na kotle z palnikami typu GMG-5M jest wyraźnie niższy, co było już uzasadnione powyżej.

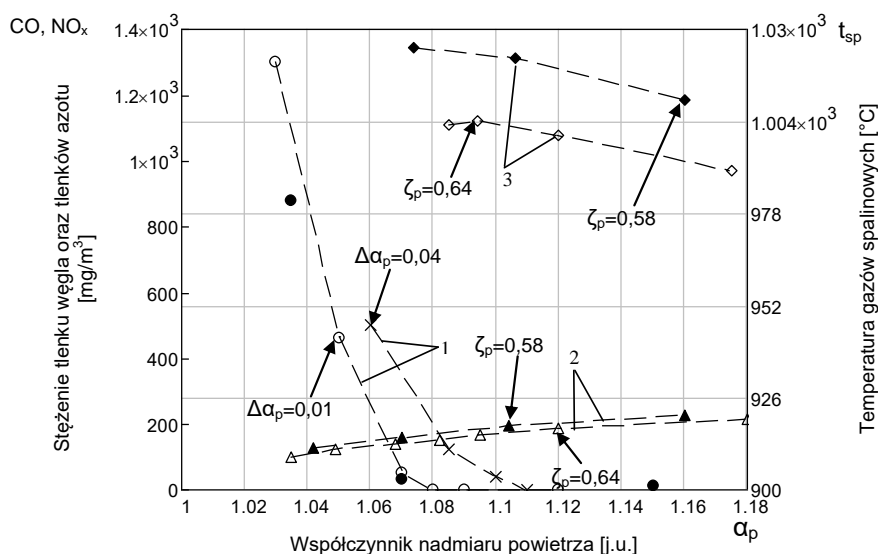
Poza tym szybkość wzrostu stężenia  $\text{NO}_x$  wraz ze zwiększeniem wartości  $\alpha$  dla palnika GMGB jest nieco wyższa w porównaniu z palnikiem typu GMG. Na ogół wnioskować można o nieistotnym wpływie  $\Delta\alpha_p$  na emisję tlenków azotu. Różnice uzyskanych wartości przy otwartych i zamkniętych wziernikach i jednakowym początkowym nadmiarze powietrza znajdują się na poziomie niepewności pomiaru badanej wartości. Brak wpływu zasysania powietrza do paleniska na emisję szkodliwych składników wyjaśnić można tranzytowym charakterem ruchu powietrza dopływającego przez nieszczelności, z pominięciem strefy aktywnego spalania [4], w której to dochodzi do intensywnego powstawania tlenku azotu.

Analizę wpływu  $\Delta\alpha_p$  na emisję CO oraz wpływu stopnia zanieczyszczenia powierzchni ekranowych na wskaźniki pracy kotła przedstawiono na rys. 8. Symulacja pogorszenia szczelności obudowy kotła była wykonywana w opisany powyżej sposób. Natomiast w celu zróżnicowania stanu zanieczyszczenia powierzchni ekranowych kocioł przez 5 dni pracował w trybie eksploatacyjnym na mazucie M-200.

Jak widać na wykresie (krzywe 1) zwiększeniu zasysania powietrza przy niezmiennym obciążeniu kotła towarzyszy pewne obniżenie stężenia CO przy jednoczesnym wzroście nadmiaru powietrza co świadczy o częściowym reagowaniu powstałego tlenku węgla z tlenem z powietrza dopływającym przez nieszczelności. Udział zasysanego powietrza uczestniczącego w dotlenianiu oszacowano na poziomie 30–50%. Przy tym nie odnotowano wpływu stopnia zanieczyszczenia powierzchni ekranowych na emisję CO dlatego wyniki pomiarów zawartości CO z tego punktu widzenia znajdują się na tej samej krzywej.

Jak już wcześniej stwierdzono powstawanie  $\text{NO}_x$  odbywa się w strefie wysokich temperatur, gdzie główną rolę odgrywa powietrze dostarczane przez palnik. Natomiast dotlenianie tlenku węgla może przebiegać przy znacznie niższych temperaturach rzędu 550–600°C [2]. Taki poziom temperatur występuje w pęczkach konwekcyjnych. Jednak czas reakcji dotleniania CO do  $\text{CO}_2$  przy niskich temperaturach i małych stę-

zeniach w granicach  $C_{CO} = 0,001\text{--}0,01\%$  obj. i  $C_{CO_2} = 0,5\text{--}3\%$  obj. jest kilkakrotnie większy niż czas przebywania spalin w pęczkach konwekcyjnych. Wówczas warunki panujące w komorze dopalania gdzie poziom temperatury wynosi  $900\text{--}1200^\circ\text{C}$  i występuje nierównomierność rozdziału zasysanego powietrza w przekroju strumienia sprzyja częściowemu dotlenianiu. Dlatego uznano, że dotlenianie CO na skutek zasysania powietrza do paleniska odbywa się głównie w palenisku, co było potwierdzone pomiarami za kotłem.



**Rys. 8.** Zależność wskaźników jakości spalania paliwa od zasysania powietrza oraz stopnia zanieczyszczenia powierzchni ekranowych: 1 – stężenie CO w spalinach; 2 – stężenie  $\text{NO}_x$  w spalinach; 3 – temperatura gazów spalinowych  
**Fig. 8.** Dependence of indicators of fuel burning quality from the factor of air leakage in a fire chamber and water wall fouling rate: 1 – CO emission; 2 –  $\text{NO}_x$  emission; 3 – temperature of burning products

Badania eksperymentalne wpływu stopnia zanieczyszczenia ekranowych powierzchni ogrzewanych i co za tym idzie prędkości schładzania produktów spalania na temperaturę spalin (krzywe 3) oraz emisję  $\text{NO}_x$  (krzywe 2) prowadzone były także na kotle DKVR-20-13. W celu oszacowania stopnia zanieczyszczenia ekranów kotła wykorzystano obli-

czeniowy współczynnik uwzględniający zmniejszenie pobierania ciepła ( $\zeta_p$ ), określany za pomocą równań bilansu cieplnego oraz wymiany ciepła [3] przy znanej temperaturze na wyjściu z paleniska.

Na podstawie uzyskanych danych widać, że podczas pracy kotła znajdującego się w stanie eksploatacyjnym, temperatura spalin za paleniskiem wahała się w przedziale 991–1004°C przy obciążeniu 100%. Obliczeniowa wartość współczynnika  $\zeta_p$  w tych warunkach wyniosła 0,64. Natomiast po wymuszonym dodatkowym zanieczyszczeniu powierzchni pobierających ciepło poprzez pracę na mazucie, na skutek zmniejszenia średniej termicznej sprawności ekranów, temperatura spalin za paleniskiem wzrosła średnio o 20–21°C i wynosiła wówczas 1011–1025°C przy porównywalnych wartościach współczynnika nadmiaru powietrza. Odpowiadało to wartości  $\zeta_p = 0,58$ .

Wyznaczenie wartości średniej całkowitej temperatury w strefie aktywnego spalania (SAS) za pomocą opracowanego modelu fizyko-matematycznego [7] pokazało, że jej wartość na skutek zmniejszenia odprowadzania ciepła wzrosła z 1168 do 1240°C czyli o 72°C.

Dla porównania można tutaj podać, że cała zmiana średniej całkowitej temperatury w tej strefie przy  $\zeta_p = 0,64$  w zależności od obciążenia, stanowiła 80°C, natomiast wzrost stężenia  $\text{NO}_x$  wyniósł średnio 12–18 mg/m<sup>3</sup>.

#### 4. Wnioski

Na podstawie opracowanego modelu fizyko-matematycznego zmiany parametrów pracy kotła ustalono, że wśród czynników wpływających na wartość emisji  $\text{NO}_x$  i CO znajdują się: obciążenie kotła, współczynnik nadmiaru powietrza podawanego przez palnik, stopień zanieczyszczenia powierzchni ekranowych paleniska oraz zasysanie powietrza przez nieszczelności.

Badania mające na celu doświadczalne określenie tych zależności przeprowadzono na kotle parowym DKVR-20-13 z różnego rodzaju palnikami, gdyż jak stwierdzono na podstawie wstępnych analiz ich różnorodność wpływała na zmianę wskaźników pracy samego kotła.

Jak pokazały wyniki tych badań bezpośredni wpływ na wielkość emisji CO wywiera obciążenie kotła, którego zwiększenie polepsza jakość mieszania strug gazu i powietrza, powodując wzrost średniej cał-

kowej temperatury płomienia i lokalnych temperatur oraz szybkości chemicznych reakcji spalania. Uwarunkowuje to zmniejszenie stężenia CO, przy takich samych wartościach współczynnika nadmiaru powietrza. Badania na trzech rodzajach palników wykazały, że palniki posiadające wyłącznie osiowe rozprawdzanie strug gazowych, mają bardziej wydłużony proces zmieszania paliwa z powietrzem, w związku z czym potrzebują zwiększonych roboczych nadmiarów powietrza.

Redukcję emisji NO<sub>x</sub> wraz ze zmniejszeniem mocy kotła wyjaśnia się wpływem obniżającej się średniej temperatury w strefie spalania. Przy małych obciążeniach kotła, kiedy to płomień jest mniej jednorodny i bardziej rozciągnięty, poziom maksymalnych temperatur w płomieniu jest niższy, a zatem ma miejsce i niższa emisja NO<sub>x</sub>, mimo, że stężenie wolnego tlenu w strefie spalania przy tym rośnie.

Wzrost zasysania powietrza do paleniska nie wywiera istotnego wpływu na emisje NO<sub>x</sub>, gdyż powietrze to nie trafia do strefy intensywnej generacji tlenków azotu. Natomiast pewna część tego powietrza (do 50%) bierze udział w dotlenianiu CO i przyczynia się do zmniejszenia emisji tego składnika spalin.

## Literatura

1. **Барышев В.И., Белосельский Б.С., Зенькевич Л.А., Шпилевская Л.И.:** *Снижение выброса окислов азота с помощью регулируемого остаточного химического недожога.* Теплоэнергетика, №4, 58–60 (1996).
2. **Козлов Г.И.:** *Исследование некоторых суммарных кинетических закономерностей горения метана.* Автореф, дис. канд. техн. наук / АН СССР Энергет. ин-т, М., 159 (1959).
3. *Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод).*– Изд. 3-е, перераб. И дополненное. СПб.: ВТИ, 260 (1998).
4. **Павлов В.А., Штейнер И.Н.:** *Условия оптимизации процессов сжигания жидкого топлива и газов в энергетических установках.* Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 118 (1984).
5. **Сигал И.Я.:** *Защита воздушного бассейна при сжигании топлива.*– Л.: Недра. Ленингр. отд-ние, 312 (1988).
6. **Szkarowski A., Janta-Lipińska S.:** *Fuel combustion optimizing by regulated level of chemical underburn.* Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Volume II, Cracow-Gliwice, 807–813 (2008).

7. **Szkarowski A., Janta-Lipińska S.:** *Modelowanie optymalnego spalania paliwa w kotłach przemysłowo-grzewczych*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 13, 511–525 (2011).
8. **Szkarowski A., Janta-Lipińska S.:** *Optymalizacja pracy kotłów metodą sterowanego poziomu niezupełności spalania*. Polityka energetyczna, tom 12, zeszyt 1, 129–136 (2009).

## **Examination of Boiler Operation Energy-ecological Indicators During Fuel Burning with Controlled Residual Chemical Underburn**

### **Abstract**

The issue of better fuel burning in boilers has usually been considered separately in terms of efficiency or fuel consumption ecological aspect. The authors have developed an efficiently ascertainable method of boiler fuel combustion according to the energy-ecological criterion, which provides for solution of both issues at the same time. In case of heating and industrial boilers, where the mentioned method has been applied, the controlled residual chemical underburn during fuel burning was considered as the simplest, cheapest and, at the same time, highly efficient way of such optimization.

The authors have determined, using a physical & mathematical model developed by them, that among the factors having impact on the energy-ecological criterion value there are: boiler power, excess air ratio, heating surface soiling degree and air suction via furnace leaks.

Impact of the above fuel combustion characteristics on CO and NO<sub>x</sub> emission was examined during the experimental research work. The type of burner, which could have impact on the boiler operation indicators, was also significant. DKVR 20-13 steam boilers equipped with various injection burners were examined.

Figures 1 and 2 show the relationship between CO and NO<sub>x</sub> concentrations and excess air ratio as well as furnace loading for GMGB-5,6 burners. The research work performed has shown that along with the boiler loading and excess air factor increase, CO content in flue gas decreases, whereas NO<sub>x</sub> emission decreases with excess air factor and boiler loading decrease.

Figures 3 and 4 demonstrate analogous test results for boilers with GMG-5M burners.

Figures 5 and 6 show the relationship between CO as well as NO<sub>x</sub> concentrations and the excess air and loading increase of boiler with GMG-7 burners. With increase of the excess air ratio and boiler loading, CO concentration in

flue gas decreases. On the other hand, decrease of nitrogen oxides concentration occurs in the same way as for the previously tested burner types due to decrease of the excess air ratio and boiler loading value.

Figure 7 demonstrates, on the other hand, a relationship between nitrogen oxides concentration and the excess air ratio, boiler loading, burner type and air suction volume. Air suction into the furnace at proper loading, with closed and opened peep-holes, amounts respectively to 0.01–0.04 for GMGB burners and 0.032–0.09 for GMG-m burners; nitrogen oxides concentration increase rate for GMGB burners (curves 1 and 2) is slightly higher compared with GMG-m burners.

Figure 8 illustrates the dependence of the fuel burning quality indicators (i.e. carbon oxide and nitrogen oxides concentration) and flue gas temperature on air suction and the degree of screen surfaces soiling. Increased air suction at constant boiler loading is accompanied by certain decrease of CO concentration with simultaneous increase of the excess air ratio. On the other hand, temperature of flue gas behind the furnace depends on the degree of screen surfaces soiling. Due to decrease of the average screens efficiency, flue gas temperature behind the furnace increases, on average, by 20–21°C whereas nitrogen oxide concentration decreases with reduction of the excess air ratio.

Based on the above results, the authors have established and implemented the best possible modes of industrial and heating boiler operation in terms of the energy-ecological criterion.