



Obniżenie emisji tlenków azotu z kotłów DKVR

Aleksander Szkarowski^{,**}, Sylwia Janta-Lipińska^{*}, Renata Gawin^{*}*

^{}Politechnika Koszalińska*

*^{**}St. Petersburg Polytechnic University*

1. Wstęp

Ilość parowych kotłów DKVR o wydajności 2,5-20 t/h, znajdujących się w eksploatacji szacuje się na dziesiątki tysięcy i są one nadal produkowane. Jednym z powodów takiej popularności jest ich unikatowy zakres regulacji mocy – od 50 do 140%. W literaturze technicznej i naukowej brakuje jednak informacji o konkretnych metodach zmniejszenia emisji tlenków azotu dla kotłów o podobnej konstrukcji.

Zadaniem zespołu autorów było opracowanie i wdrożenie środków obniżenia emisji tlenków azotu do atmosfery dla kotłów DKVR-20-13 zainstalowanych w kotłowni S.A. Russkije Samocwiety w Petersburgu. Wstępnie zakładano obniżenie tejsze emisji o 30%.

Zasadniczym problemem badań okazała się kwestia poziomu odniesienia, od którego to liczy się wspomniane obniżenie emisji. Autorzy podjęli decyzję, aby za taki poziom przyjąć faktyczną maksymalną emisję z weryfikacją maksymalnej dopuszczalnej emisji NO_x wg wymagań ekologicznych stawianych tego typu urządzeniom.

Praca została oparta na następujących wstępnych założeniach:

1. Bardziej efektywnymi są kombinowane środki zmniejszenia emisji tlenków azotu do atmosfery wykorzystujące różne czynniki wpływu na intensywność ich generacji.
2. Zmniejszenie emisji NO_x nie powinno obniżać sprawności kotłów ani zupełności spalania paliwa.

3. W każdym przypadku wymagana jest inwentaryzacja i analiza pracy kotłów w celu ewentualnej optymalizacji (zmniejszenie zasysania powietrza, optymalizacje trybów pracy itp.)
4. Wstępna analiza teoretyczna i własne doświadczenie zespołu badawczego pozwala polecić dla kotłów DKVR metodę wtryskiwania pary do strefy spalania lub recyrkulację spalin. Oczekiwany efekt dla kotłów parowych – to co najmniej 30% zmniejszenia emisji NO_x .

2. Charakterystyka obiektu badań

Kotły DKVR-20-13, to kotły dwuwalczkowe wodnorurowe pionowe z podłużnym usytuowaniem walczków. Nominalna wydajność 20 t/h, z możliwością sforsowania do 40%. Maksymalne nadciśnienie pary wynosi 1,3 MPa. Każdy kocioł wyposażony jest w trzy palniki gazowo-mazutowe GMGB-5,6. Palniki przeznaczone są do spalania gazu ziemnego o niskim ciśnieniu i wyposażone są we wtryskiwacze mazutu o rozpylaniu parowo-mechanicznym.

Indywidualna instalacja wentylatorowo-wyciągowa każdego kotła składa się z wentylatora nadmuchowego VD-10 ($V = 24000 \text{ m}^3/\text{h}$; $H = 13 \text{ kPa}$; $N = 20 \text{ kW}$; $n = 730 \text{ min}^{-1}$) i wentylatora wyciągowego D-10 ($V = 50 \text{ m}^3/\text{h}$; $H = 75 \text{ kPa}$; $N = 30 \text{ kW}$; $n = 600 \text{ min}^{-1}$).

Każdy kocioł wyposażony jest w indywidualny ekonomizer o powierzchni ogrzewanej 808 m^2 , nieodłączany po wodzie i spalinach. Spaliny odprowadzane są do atmosfery przez wspólny komin wykonany z cegły o średnicy 1150 mm i wysokości 45 m.

Praca kotłowni przewiduje wykorzystanie mazutu jako paliwa rezerwowego i jest on wykorzystywany skrajnie rzadko. Dlatego celem pracy było opracowanie i wdrożenie systemu zmniejszenia emisji tlenków azotu podczas spalania gazu z możliwością płynnego przejścia na spalanie mazutu bez jakichkolwiek zakłóceń i przeszkód.

3. Metody określania emisji NO_x

Wstępnie oszacowano maksymalną obliczeniową emisję tlenków azotu zgodnie z metodyką (Сборник (1986)). Ilość NO_x emitowaną do atmosfery [g/s] w przeliczeniu na NO_2 określa się za pomocą wzoru:

$$P_{\text{NO}_2} = 0,001 \cdot B \cdot Q_d \cdot K_{\text{NO}_2} \cdot (1 - \beta), \quad (1)$$

gdzie:

B – zużycie paliwa (gaz ziemny wysokometanowy) [l/s], które dla kotła DKVR-20-13 przy obciążeniu nominalnym wynosi 417 l/s;

Q_d – wartość opałowa paliwa przyjmowana 33,5 MJ/m³;

K_{NO_2} – współczynnik opisujący intensywność generacji NO_x w odniesieniu do 1 GJ ciepła [kg/GJ], który zgodnie z (Сборник (1986)) dla kotła DKVR-20-13 wynosi 0,11 kg/GJ;

β – współczynnik uwzględniający wpływ środków technicznych obniżających emisję NO_x (w stanie eksploatacyjnym $\beta = 0$).

A zatem:

$$P_{NO_2} = 0,001 \cdot 417 \cdot 33,5 \cdot 0,11 \cdot 1 = 1,633 \text{ g/s.}$$

Taki poziom można uważać za wstępne oszacowanie emisji. Za bardziej wiarygodny poziom odniesienia, w stosunku, do którego określa się działanie środków ekologicznych uznano rzeczywistą maksymalną emisję.

4. Opracowanie wariantów zmniejszenia emisji NO_x

Recyrkulacja spalin. Wymagany poziom recyrkulacji stanowi ok. 15% objętości spalin (Барышев В. и др. (1996), Кузнецова Н. и др. (1973)). Dla kotła DKVR w trybie nominalnym wynosi to $V_r = 1,17 \text{ m}^3/\text{s}$. Zakładając prędkość gazów w przewodach do 8 m/s określono przekrój przewodu recyrkulacyjnego $F_r = 0,146 \text{ m}^2$ (350×450 mm). Według wykonanych pomiarów i szkicu projektu długość dodatkowych przewodów recyrkulacji dla trzech kotłów wyniosłaby 96 m. Wówczas wymagana powierzchnia blachy wyniosłaby odpowiednio 153,6 m², a jej masa przy grubości 2 mm – 2670 kg. Ten sposób opracowany został wstępnie, ale nie został jednak uznany za wart realizacji i dalszych badań przedstawionych w niniejszej publikacji.

Wtrysk pary wodnej. Optymalna ilość pary wtryskiwana do strefy spalania wynosi ok. 1% masy strumienia doprowadzanego na spalanie powietrza (Szkarowski 1997, 2001, 2002). Strumień objętości powietrza dla kotła w trybie nominalnym wynosi 4,61 m³/s, co odpowiada strumieniowi masy 5,68 kg/s (przy 20°C). W związku powyższym stru-

mień masy pary wodnej wyniesie 0,057 kg/s lub 205 kg/h. Odpowiada to wartości stosunku wodno-paliwowego (*WPS*):

$$WPS = \frac{M_p}{M_g} = 0,18 \quad (2)$$

gdzie:

M_p – strumień masy wtryskiwanej pary wodnej;

M_g – strumień masy paliwa (gazu).

Z tego widać, że ewentualne obniżenie sprawności kotła nie przekroczy 1 %, co w całości może być zrekompensowane poprzez optymalizację trybu pracy kotła, a mianowicie – poprzez towarzyszące wtryskowi wilgoci zmniejszenie nadmiaru powietrza. Rozważanie zalet i wad dwóch powyższych metod pozwoliło wnioskować:

1. Metoda recyrkulacji w porównaniu z wtryskiem wilgoci charakteryzuje się znaczną materiałochłonnością oraz problemami ze względu na montaż dodatkowych przewodów w kotłowni.
2. Zapewniając podobny efekt zmniejszenia emisji NO_x recyrkulacja nie zmniejsza sumarycznego wskaźnika toksyczności spalin (ze względu na niedopał chemiczny).
3. W związku z powyższym do dalszego opracowania i wdrożenia przyjęto metodę wtryskiwania pary wodnej do strefy spalania.

Podjęciu takiej decyzji sprzyjała możliwość wykorzystania wtryskiwaczy mazutu palników GMGB-5,6 jako urządzeń do wtryskiwania pary wodnej (Pavlenko et al. 2014). Takie rozwiązanie minimalizuje wymagane prace montażowe (dodatkowo konieczne jest jedynie niewielkie orurowanie w obrębie wtryskiwaczy).

Wstępna obserwacja chmury parowej przy wykorzystaniu standardowego rozpryskiwacza potwierdziła, że znajduje się ona w wymaganym miejscu jądra płomienia. Ewentualne zmiany lub zamianę nasadki rozpylającej należało ustalić w trakcie badań.

Dodatkowe wyposażenie polegało na wykonaniu łącznika pomiędzy przewodem parowym a mazutowym, armatury i ciśnieniomierzy o odpowiednich przedziałach pomiarów. Taki układ pozwalał na doprowadzanie wilgoci zarówno przez kanał parowy jak i mazutowy głowicy

rozpylającej. W trakcie badań udowodniono, że przy ciśnieniu pary do 0,8 MPa wymagana efektywność zmniejszenia emisji tlenków azotu w całym zakresie regulacji kotła mogła być zapewniona przy wykorzystaniu wyłącznie kanału parowego.

Inwentaryzacja kotłowni. W związku z możliwością odchyień od dokumentacji projektowej i w celu zapewnienia większej wiarygodności dokonywanych obliczeń, a także prac montażowych i badawczych wykonano inwentaryzację konstrukcji budowlanych oraz sprzętu podstawowego i pomocniczego kotłowni. Ogólny stan techniczny sprzętu i orurowania kotłowni oceniono jako dobry. Kotły wyposażone były w układy automatyki bezpieczeństwa i regulacji, które znajdowały się w dobrym stanie eksploatacyjnym.

Podczas inwentaryzacji kotłowni ustalone zostały faktyczne poziomy emisji tlenków azotu, które tylko w trybach pracy sforsowanych okazały się porównywalne z maksymalnymi obliczeniowymi.

5. Badania eksperymentalne

W pierwszej kolejności podjęto się zbadania możliwości optymalizacji trybów pracy kotłów pod względem zmniejszenia emisji tlenków azotu. Zgodnie z danymi literaturowymi pozwala to obniżyć emisję NO_x o 3-5% od poziomu faktycznego w trybie nominalnym (Szarowski et al. 2009, 2011, 2013, Szkarowski 2003). Głównymi środkami optymalizacji było dokładniejsze ustalenie ciśnienia powietrza przed palnikiem i podciśnienia w palenisku.

Następnie wykonano badania opracowanego systemu zdławienia emisji tlenków azotu według następującego programu.

Doprowadzenie pary do strefy spalania w celu zmniejszenia intensywności generacji NO_x wykonywano poprzez wtryskiwacze mazutu palników GMGB-5,6. W celu uzyskania optymalnego wyniku (maksymalnego zmniejszenia emisji NO_x przy minimalnym zużyciu pary i minimalnym wpływie na sprawność kotła) zmieniano:

- typ i wymiary głowic rozpylających;
- kształt chmury parowej;
- miejsce doprowadzania pary do strefy spalania;
- ilość (ciśnienie) pary i stosunek jego strumieni doprowadzanych przez różne elementy głowicy do różnych stref płomienia.

Zrealizowanie powyższego programu badań pozwoliło na określenie optymalnych konstruktywnych i reżimowych parametrów systemu zdławienia emisji NO_x .

6. Wyniki badań

Uzyskane w trakcie badań wyniki poddano analizie (Szkarowski et al. 2015) a następnie obróbce statystycznej. Emisję NO_x przedstawia się:

- jako wartość obiektywną [mg/m^3] (w przeliczeniu na $\alpha = 1$ w celu wykluczenia wpływu rozcieńczania spalin na wyniki);
- w przeliczeniu na masową emisję tlenków azotu [g/s], ponieważ ten wskaźnik charakteryzuje bezwzględny wpływ emisji szkodliwych składników spalin na zanieczyszczenie atmosfery.

Podczas przeprowadzania analizy wyników badań rozpatrywano trzy poziomy ewentualnego wpływu emisji ze spalinami kotłów na zanieczyszczenia atmosfery:

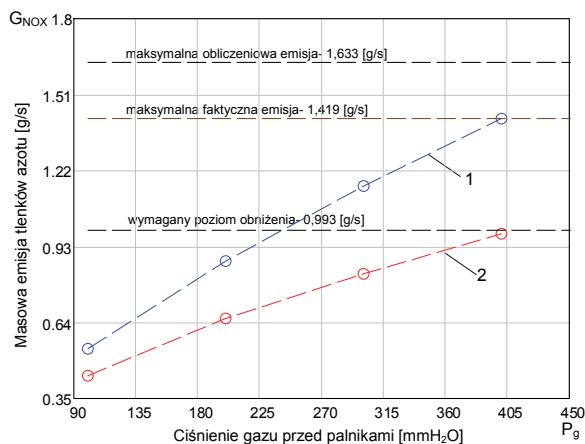
1. Maksymalny obliczeniowy poziom emisji, który dla kotłów DKVR wynosił 1,633 g/s.
2. Maksymalny faktyczny poziom określony doświadczalnie podczas inwentaryzacji kotłów, przy praktycznie osiąganym maksymalnym trybach ich pracy, który wynosił odpowiednio:
 - dla kotła nr 1 – 1,419 g/s;
 - dla kotła nr 2 – 1,439 g/s;
 - dla kotła nr 3 – 1,189 g/s.
3. Zmniejszony zgodnie z założeniami wstępnymi o 30% poziom emisji. W związku z tym, że faktyczny poziom emisji nie przekraczał obliczeniowego za poziom odniesienia przyjęto faktyczną maksymalną emisję tlenków azotu. Przy takim podejściu wymagany efekt zastosowania systemu wynosił:
 - dla kotła nr 1 – 0,993 g/s;
 - dla kotła nr 2 – 1,003 g/s;
 - dla kotła nr 3 – 0,832 g/s.

Efekt działania systemu zdławienia emisji NO_x na przykładzie kotła nr 1 przedstawiono na rysunku 1. Jak widać z przedstawionych wykresów emisja NO_x w bazowym eksploatacyjnym stanie kotła może zbliz-

zać się do wartości obliczeniowej tylko w trybach pracy przekraczających nominalną wydajność kotła, tj. powyżej 110% (krzywa 1).

Dla kotłów nr 1 i 2 odpowiada to ciśnieniu gazu 400 mm H₂O i wydajności około 22 t pary/h. Kocioł nr 3 w związku z jego charakterystykami technicznymi pracuje najwyżej przy ciśnieniu gazu 300 mm H₂O z wydajnością około 21 t pary/h.

Krzywa 2 na rysunku charakteryzuje ustalony w trakcie badań i nastawiania kotła optymalny tryb jego pracy przy działającym systemie zdławienia emisji NO_x. Ten tryb pozwala zmniejszyć emisję tlenków azotu dla wszystkich kotłów nie mniej niż o 30% od faktycznego maksymalnego poziomu przy zużyciu pary nieprzekraczającym 1% wydajności kotła. Takie zużycie pary jest około 2-krotnie mniejsze od znanego z publikacji naukowych (Барышев и др. 1996, Szkarowski 1997) i świadczy o wysokiej efektywności opracowanego systemu.

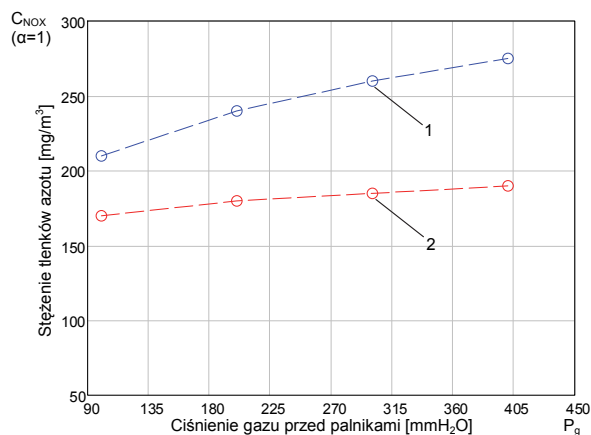


Rys. 1. Masowa emisja NO_x dla kotła DKVR-20-13 nr 1: 1 – w stanie eksploatacyjnym; 2 – z włączonym systemem zdławienia emisji tlenków azotu
Fig. 1. Massive emissions of NO_x boiler DKVR-20-13 No 1: 1 – in operating condition; 2 – enabled system to stifle emissions of nitrogen oxides

Zużycie pary nie powoduje obniżenia sprawności zużycia paliwa. Wtryskiwanie z dużą prędkością pary do dokładnie określonych stref jądra płomienia znacznie intensyfikuje mieszanie się strumieni gazu i powietrza i co za tym idzie – również procesy spalania. Ponadto część wilgoci dyso-

cjując w wysokotemperaturowej strefie na rodniki H^+ i OH^- , co także sprzyja przyspieszeniu procesów spalania. Zwiększenie stężenia gazów trójatomowych w przestrzeni paleniskowej skutkuje także wzrostem stopnia czarności tej przestrzeni i przyczynia się do zwiększenia intensywności wymiany ciepła powierzchni ekranowych na drodze promieniowania. To wszystko pozwoliło zmniejszyć ilość powietrza wymaganą do zapewnienia całkowitego i zupełnego spalania o 12-15%. Takie zmniejszenie nadmiaru powietrza zmniejsza z kolei straty ciepła fizyczne spalinowe o około 1/%, co w całości kompensuje zużycie pary na wtryskiwanie.

Dane w postaci masowej emisji NO_x wymagają specjalnej obróbki wyników pomiarów i dodatkowych obliczeń. Dlatego na rysunku 2 przedstawiono obiektywne wyniki pomiarów stężenia NO_x w spalinach kotła nr 1 przy tychże oznaczeniach krzywych. Dane przeliczono na $\alpha = 1$ w celu wykluczenia wpływu rozcieńczenia spalin.



Rys. 2. Stężenie NO_x (w przeliczeniu na $\alpha = 1$) w spalinach kotła DKVR 20-13 nr 1: 1 – w faktycznym stanie eksploatacyjnym; 2 – z włączonym systemem zdławienia emisji tlenków azotu

Fig. 2. The concentration of NO_x (expressed as $\alpha = 1$) in the exhaust gas boiler DKVR 20-13 No 1: 1 – in the actual operating state, 2 – enabled system to stifle emissions of nitrogen oxides

Zestawienie głównych opomiarowanych i obliczanych wartości charakteryzujących działanie opracowanego systemu na przykładzie kotła nr 1 przy przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań emisji tlenków azotu dla kotła DKVR 20-13 nr 1 na paliwie gazowym

Table 1. Summary of the results of the testing of emissions of nitrogen oxides for fuel gas boiler DKVR 20-13 No 1

Wskaźniki	Ciśnienie gazu przed palnikami [mm H ₂ O]			
	100	200	300	400
1. Wydajność parowa [t/h]	10,72	15,39	18,97	21,91
2. Zużycie gazu [m ³ /h]	825	1167	1429	1650
3. Strumień objętości spalin ($\alpha=1$, $t=20^{\circ}\text{C}$) [m ³ /s]	2,58	3,65	4,47	5,16
4. Stężenie NO _x w spalinach ($\alpha=1$, $t=20^{\circ}\text{C}$) [mg/m ³]:				
a) faktyczna eksploatacyjna	210	240	260	275
b) z włączonym systemem	170	180	185	190
5. Emisja masowa tlenków azotu [g/s]:				
a) maksymalna obliczeniowa	1,633			
b) maksymalna faktyczna	1,419			
c) faktyczna eksploatacyjna	0,542	0,876	1,162	1,419
d) z włączonym systemem	0,439	0,657	0,827	0,980
6. Ciśnienie pary przed wtryskiwaczami systemu [at]	2,0	3,8	5,5	7,2
7. Zużycie pary [kg/h]	80	110	125	140

7. Wykorzystanie wyników

Praktycznym wynikiem pracy są karty pracy kotłów. Przykład karty pracy kotła nr 1 przedstawiono w tabeli 2. Należy zauważyć, że ciśnienie powietrza regulowane jest automatycznie poprzez regulator „paliwo-powietrze” w układzie automatyki kotła. Natomiast ciśnienie pary przed wtryskiwaczami należy ustalać ręcznie.

8. Wnioski

1. Określono faktyczne poziomy emisji tlenków azotu dla kotłów w stanie eksploatacyjnym, które tylko przy obciążeniach powyżej nominalnego są zbliżone do maksymalnych obliczeniowych wartości.

Tabela 2. Karta pracy kotła DKVR 20-13 nr 1 zainstalowanego w kotłowni S.A. Russkije Samocviety przy spalaniu gazu ziemnego o wartości opałowej $8100 \pm 50 \text{ kcal/m}^3$

Table 2. The parameter table of the boiler DKVR 20-13 No 1 in the boiler room installed in S.A. Russkiye Samotsviety the combustion of natural gas with a calorific value $8100 \pm 50 \text{ kcal/m}^3$

Wskaźnik	Jednostka	Wartości			
1. Wydajność parowa	%	50	75	95	110
	t/h	10,79	15,39	18,97	21,91
2. Wydajność cieplna	kcal/h/	6,04/	8,62/	10,62/	12,27/
	MW	7,02	10,02	12,35	14,27
3. Ciśnienie pary	at	10,0			
4. Ciśnienie pary przed wtryskiwaczami	at	2,0	3,8	5,5	7,2
5. Ciśnienie gazu przed palnikami	mm H ₂ O	100	200	300	400
6. Zużycie paliwa	m ³ /h	825	1167	1429	1650
7. Ciśnienie powietrza przed palnikami	mm H ₂ O	8	17	26	34
8. Podciśnienie					
- w palenisku	mm H ₂ O	2,5			
- za kotłem	mm H ₂ O	13	16	18	25
- za ekonomizerem	mm H ₂ O	65	80	95	105
9. Temperatura wody uzupełniającej					
- przed ekonomizerem	°C	100			
- po ekonomizerze	°C				
10. Temperatura spalin					
- za kotłem	°C	270	280	320	340
- za ekonomizerem	°C	125	130	138	146
11. Skład spalin					
- za kotłem	% obj.	8,2	8,7	9,3	9,7
CO ₂	% obj.	6,4	5,5	4,3	3,7
O ₂					
- za ekonomizerem					
CO ₂	% obj.	7,8	8,1	8,8	9,2
O ₂	% obj.	7,1	6,5	5,3	4,6
12. Stężenie NO _x w spalinach ($\alpha=1$)	mg/m ³	170	180	185	190
13. Współczynnik nadmiaru powietrza					
- za kotłem	-	1,39	1,32	1,23	1,19
- za ekonomizerem	-	1,46	1,39	1,30	1,25
14. Straty ciepła agregatu kotłowego					
- fizyczne spalinowe q_2	%	5,9	6,0	6,1	6,3
- na system zmniejszenia emisji NO _x ; K_{NOx}	%	0,7	0,7	0,6	0,6
- do otoczenia q_5	%	3,0	2,1	1,5	1,3
15. Sprawność agregatu kotłowego „brutto”	%	90,4	91,2	91,8	91,8
16. Jednostkowe zużycie paliwa przy średniej eksploatacyjnej sprawności netto 89%	kg u.p./GJ	161,5			

2. Został opracowany, zbadany i wdrożony układ zmniejszenia emisji tlenków azotu dla kotłów DKVR 20-13 metodą wtryskiwania pary z konkretnym typem urządzenia rozpylającego dla kotłów parowych, sposobem jego montażu oraz miejscem i ilością wtryskiwanej pary.
3. Określono optymalny tryb pracy systemu zmniejszenia emisji tlenków azotu, który pozwala osiągnąć wymagane zmniejszenie emisji o 30% przy ograniczonym zużyciu pary na wtryskiwanie (nie więcej 1% wydajności parowej kotła).
4. Ponieważ wtrysk pary wg autorskiej technologii pozwala zwiększyć sprawność pracy kotła netto średnio o 1% zalecane tryby pracy kotłów z włączonym systemem zmniejszenia emisji tlenków azotu nie powodują obniżenia sprawności zespołu kotłowego brutto.

Literatura

- Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами (1986). Л. Гидрометеоздат. Госкомгидромет.
- Барышев, В., Белосельский, Б., Зенькевич, Л., Шпилевская, Л. (1996). Снижение выброса окислов азота с помощью регулируемого остаточного химического недожога. *Теплоэнергетика*, 4 (1), 58-60.
- Кузнецова, Н. и др. (1973). Тепловой расчет котельных агрегатов: Норматив. метод. М.: Энергия.
- Pavlenko, A., Szkarowski, A., Janta-Lipińska, S. (2014). Badania spalania emulsji paliwowych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 16, 376-385.
- Szkarowski, A., Janta-Lipińska, S. (2009). Automatyczne sterowanie jakością spalania paliwa stałego w kotłach przemysłowo-grzewczych. *Rocznik Ochrony Środowiska*, 11, 241-255.
- Szkarowski, A., Janta-Lipińska, S. (2011). Modelowanie optymalnego spalania w kotłach przemysłowo-grzewczych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 13, 511-524.
- Szkarowski, A., Janta-Lipińska, S. (2013). Badania energo-ekologicznych wskaźników pracy kotłów przy spalaniu paliwa ze sterowanym resztkowym niedopałem chemicznym. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 15, 981-995.
- Szkarowski, A., Janta-Lipińska, S. (2015). Badania doświadczalne a dokładność opracowanego modelu. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 17, 576-584.

- Szkarowski, A. (1997). *Podwyższenie efektywności ochrony atmosfery przy spalaniu gazowego i ciekłego paliwa*. Autoreferat rozprawy habilitacyjnej. Sankt-Petersburg.
- Szkarowski, A. (2001). Technologia redukcji emisji NO_x metodą dozowanego skierowanego balastowania płomienia. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 3, 53-75.
- Szkarowski, A. (2002). Zasady obliczeń zdławienia NO_x metodą dozowanego skierowanego wtrysku balastu wodnego. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 4, 365-379.
- Szkarowski, A. (2003). Szczegółowe problemy sprawnego i ekologicznego spalania paliwa w przedpaleniskach pieców. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 5, 67-79.

Reducing Emissions of Nitrogen Oxides from DKVR Boilers

Abstract

The standard sample balance of the boiler showed that the maximum efficiency has been observed in noticeable incompleteness of combustion. The nitrogen oxides which are formed at the highest temperature that is in the absence of chemical incompleteness of combustion are substances that are much more toxic than eg. carbon monoxide. For this reason the team of authors undertook the development and implementation of measures to the reduction of toxic emissions of nitrogen oxides to the atmosphere using boiler DKVR-20-13 with three gas/fuel oil burners GMGB-5.6. The complicated nature of the issue makes it necessary to have an individual solution in each case, in relation to the adjustment of the boiler, taking into account the characteristics and details of all components of the whole boiler-furnace mechanism. The principal problem which was encountered by a team of authors already in the process of conducting research turned out to be a matter of respect to a reference level, which should be referred to the reduction in emissions. The authors have therefore decided to be the reference for the actual take maximum emissions, verifying it previously with a maximum nitrogen oxide emission for these types of devices.

In their paper the authors presented and analyzed a number of options to reduce emissions of nitrogen oxides into the atmosphere. Among the methods which were analyzed among others exhaust gas recirculation, injection of steam and boiler room inventory.

Preliminary analysis of theoretical as well as experience has allowed the research team to recommend as an effective way to reduce emissions of nitrogen oxides DKVR for boilers operating in industrial and heating mode: a meth-

od of injecting steam into the combustion zone or flue gas recirculation. The desired effect is at least 30% reduction in nitrogen oxide emissions. The results obtained by the authors of the NO_x emission results were presented at work in two ways: in terms of mass emissions of nitrogen oxides (Figure 1) and as an objective value per at $\alpha = 1$ (Figure 2). In the course of their analysis takes into consideration three levels the possible impact of emissions from the flue gas boilers atmospheric pollution, which take into account and are shown in Figure 1.

Selection of the main measured or calculated values that characterize the operation of the boiler are summarized in Table 1.

This publication also sets forth the actual levels of emissions of nitrogen oxides for boiler in operating condition and has been developed and then implemented the system to reduce emissions NO_x using steam injection. In addition, the authors were able to determine the optimal mode of operation of the system to reduce emissions, which helped achieve the required, presupposed a 30% decrease. Recommended in practice mode enabled system boilers to reduce emissions of nitrogen oxides does not reduce the efficiency of the boiler.

Streszczenie

Standardowe bilansowe próby kotła pokazują, że maksymalną jego sprawność notuje się przy zauważalnej niezupełności spalania. Tlenki azotu, które powstają w maksymalnej temperaturze, czyli przy braku chemicznej niezupełności spalania są substancjami o wiele bardziej toksycznymi niż np. tlenek węgla. Z tego też powodu zespół autorów podjął się opracowania i wdrożenia środków mających na celu obniżenie emisji toksycznych tlenków azotu dla atmosfery na przykładzie kotła DKVR-20-13 z trzema palnikami gazowo-mazutowymi GMGB-5,6. Skomplikowany charakter tego zagadnienia powoduje konieczność jego indywidualnego rozwiązania w każdym konkretnym przypadku nastawiania kotła z uwzględnieniem charakterystyk i szczegółów wszystkich składowych urządzeń całego zespołu kotłowo-paleniskowego.

Zasadniczym problemem, na który natknął się zespół autorów już w trakcie prowadzenia prac badawczych okazała się kwestia poziomu odniesienia względem, którego określane powinno być obniżenie emisji. Autorzy podjęli w związku z tym decyzję, żeby za taki poziom odniesienia przyjmować faktyczną maksymalną emisję, weryfikując ją uprzednio z maksymalną dopuszczalną emisją tlenków azotu dla omawianych typów urządzeń.

W swojej pracy autorzy przedstawili i przeanalizowali szereg wariantów służących zmniejszeniu emisji tlenków azotu do atmosfery. Wśród analizowanych sposobów znalazła się m.in. recyrkulacja spalin, wtrysk pary wodnej oraz inwentaryzacja kotłowni.

Wstępna analiza teoretyczna a także doświadczenie zespołu badawczego pozwoliło polecić jako efektywną metodę zmniejszenia emisji tlenków azotu dla kotłów DKVR pracujących w trybie przemysłowo-grzewczym: metodę wtryskiwania pary do strefy spalania lub recyrkulację spalin. Pożądanym efektem jest co najmniej 30% obniżenie emisji tlenków azotu.

Uzyskane przez autorów wyniki emisji NO_x zaprezentowane zostały w pracy w dwójaki sposób: w przeliczeniu na masową emisję tlenków azotu (rys. 1) oraz jako wartość obiektywna w przeliczeniu na $\alpha = 1$ (rys. 2). W trakcie prowadzonej analizy uwzględniano trzy poziomy ewentualnego wpływu emisji ze spalinami kotłów na zanieczyszczenie atmosfery, co uwzględniono i przedstawiono na rysunku 1.

Zestawienie głównych mierzonych i obliczanych wartości, które charakteryzują działanie kotła zestawiono w tabeli 1. W niniejszej publikacji ponadto określone zostały faktyczne poziomy emisji tlenków azotu dla kotłów w stanie eksploatacyjnym a także opracowany został a następnie wdrożony układ zmniejszenia emisji NO_x metodą wtryskiwania pary. Dodatkowo autorom udało się określić optymalny tryb pracy systemu zmniejszenia emisji, który pozwolił osiągnąć wymagane zakładane na wstępie 30% zmniejszenie. Zalecany w praktyce tryb pracy kotłów z włączonym systemem zmniejszenia emisji tlenków azotu nie powoduje obniżenia sprawności samego zespołu kotłowego.

Słowa kluczowe:

obniżenie emisji, tlenki azotu, kotły parowe

Keywords:

reduction in emissions, nitrogen oxides, steam boilers