



Wtrysk balastu wodnego jako metoda zmniejszenia emisji tlenków azotu

Aleksander Szkarowski^{,**}, Sylwia Janta-Lipińska^{*},
Magdalena Orłowska^{*}, Shirali Mamedov^{***}*

^{}Politechnika Koszalińska,*

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

*^{***}St. Petersburg University of Architecture & Civil Engineering*

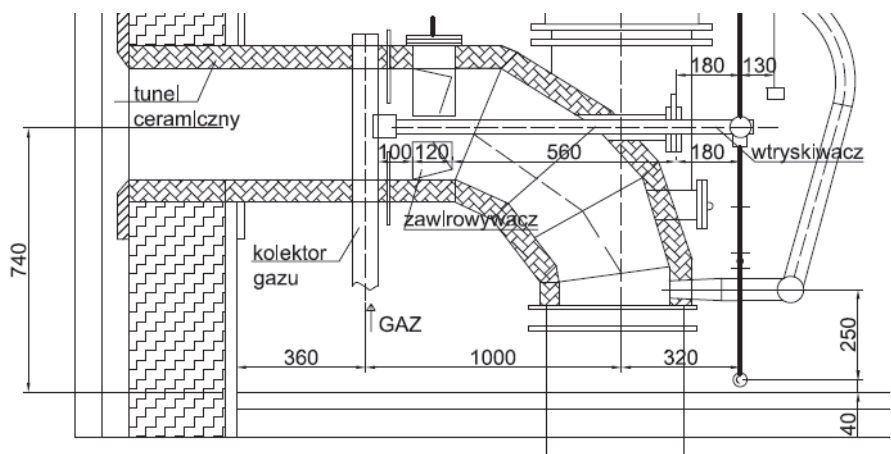
1. Wstęp

W niniejszej publikacji autorzy kontynuują przedstawienie wyników swoich badań związanych z obniżeniem emisji tlenków azotu (NO_x) powstających podczas spalania paliwa w kotłach przemysłowo-grzewczych (Szkarowski 2001, 2002, Szkarowski et al. 2011, 2013, 2015, 2016). Wysokie wskaźniki pod względem ekonomiczności i ekologiczności procesu spalania posiada metoda strefowego wtryskiwania balastu wodnego do płomienia. Wcześniejsze badania i skuteczne wdrożenia metody dotyczyły kotłów parowych, głównie konstrukcji dwuwalczakowej, poziomej np. DKVR i DE (Szkarowski et al. 2009, 2016). Kolejnym etapem badań było opracowanie i wdrożenie tej metody dla kotłów wodnych o dużej mocy (30-50 MW) o przeznaczeniu ciepłowniczym. Jako obiekt badań wybrano kotły PTVM, których konstrukcja szymbowa powoduje całkiem inne warunki spalania i aerodynamikę płomienia niż we wcześniej opracowanych przypadkach.

2. Charakterystyka obiektu badań

Druga Krasnogwadijska kotłownia w Sankt-Petersburgu wyposażona jest w 2 kotły PTVM-50 o mocy nominalnej 50 MW wyprodukowane w Czechach, pracujące bezpośrednio na sieć ciepłą. Kotły mają

konstrukcję szybową bez regulatorów ciągu, a pęczki konwekcyjne znajdują się bezpośrednio nad ekranowanym paleniskiem. Kotły wyposażone są w 12 standardowych palników typu DKZ, umieszczonych w blokach po 6 sztuk na przeciwległych ścianach kotła. Każdy palnik ma własny wentylator nadmuchowy. Palniki przeznaczone są do spalania gazu ziemnego i wyposażone we wtryskiwacze mazutu o rozpylaniu mechanicznym (Jemieljanow 1992, Charun et al. 2016, Czapp et al. 2016, Pavlenko et al. 2014) (rys. 1).



Rys. 1. Przekrój palnika DKZ z wtryskiwaczem mazutu wykorzystywanym do doprowadzania balastu wodnego

Fig. 1. Cross section view of DKZ burner with the black oil atomizer used for injection of water ballast

W kotłowni znajdują się także 3 kotły parowe DKVR-10 co daje możliwość wykorzystania produkowanej pary jako balastu wodnego. 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. Teoretyczne uzasadnienie zastosowania metody

Metoda balastowania strefy spalania wilgocią zapewnia efektywne zdławienie powstawania tlenku azotu wskutek złożonego działania kilku mechanizmów (Szkarkowski 1997, 2001, 2002, 2003). Przesłanką do uzasadnienia tej metody jest zjawisko niejednorodności płomienia wzdłuż paleniska zarówno ze względu na jego skład jak i temperaturę. Przy czym różne strefy płomienia w różnym stopniu „odpowiedzialne” są za powstawanie poszczególnych składników. Temperaturowe warunki i koncentracje komponentów reakcji chemicznych w tych strefach wyznaczają intensywność generacji tlenków azotu (NO_x) i ich końcowe stężenie w spalinach (Roslakow 1986). Z kolei oddziaływanie na warunki temperaturowe i koncentracyjne w takich strefach jest potężnym narzędziem dla zdławienia powstania NO_x i zmniejszenia zanieczyszczenia atmosfery jednym z najbardziej niebezpiecznych produktów spalania każdego paliwa organicznego.

Po pierwsze wtrysk wilgoci do dokładnie określonych stref płomienia obniża ich temperaturę będącą głównym czynnikiem przyspieszającym generację NO_x . Po drugie wtrysk pozwala zapewnić zupełne spalanie przy obniżonym stężeniu wolnego tlenu, co również przyczynia się do zdławienia powstawania tlenków azotu.

Ten drugi mechanizm z kolei jest bardzo złożony. 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 wewnątrzpłomieniowe. Ponadto część wilgoci dysocjuje w wysokotemperaturowej strefie na rodniki H i OH, co także sprzyja przyspieszeniu procesów spalania, ponieważ rodniki te włączają się do reakcji z udziałem pośrednich produktów spalania.

Należy zauważyć, że zwiększenie stężenia gazów trójatomowych w przestrzeni paleniskowej skutkuje wzrostem stopnia czarności tej przestrzeni i przyczynia się do zwiększenia intensywności wymiany ciepła powierzchni ekranowych na drodze promieniowania. Wstępne obliczenia wykazały, że metoda zapewnić może zmniejszenie emisji NO_x o 25 do 30% przy wtryskiwaniu balastu w ilości do 1% ekwiwalentnej wydajności parowej kotła. Z kolei zmniejszenie nadmiaru powietrza i towarzyszące temu obniżenie strat ciepła spalinowych (Orłowska et al. 2012) powinno pozwolić na zwiększenie sprawności kotła brutto o około 1%.

W ten sposób zdławienie tlenków azotu osiągnięte zostanie bez zmniejszenia sprawności kotłowni netto.

4. Opracowanie systemu zmniejszenia emisji NO_x

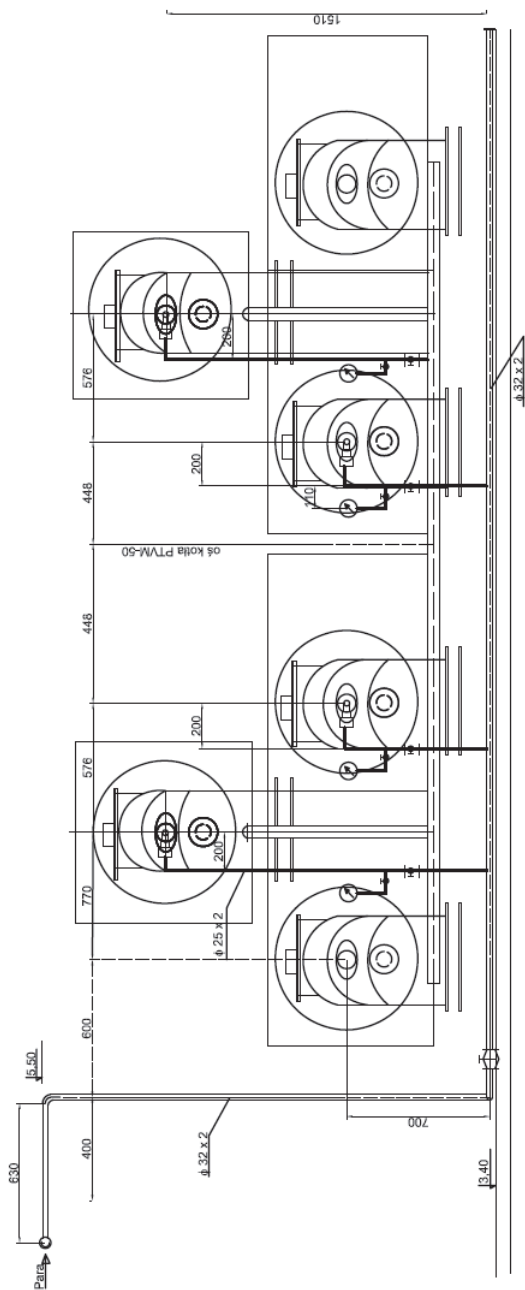
Występowanie w konstrukcji palników wtryskiwaczy mazutu spowodowało naturalne rozwiązanie o ich wykorzystaniu do wtryskiwania wilgoci (zobacz rys. 1). Ze względu na zaspokojenie obciążenia cieplnego sieci cieplnej oraz wysoką kaloryczność paliwa gazowego, nawet przy obciążeniu zbliżonym do nominalnego (50 MW) w kotle nr 4 wykorzystuje się najwyżej 9 palników zaś w kotle nr 5 tylko 10. Dlatego po wstępnym modelowaniu procesu paleniskowego podjęto decyzję o doprowadzaniu pary tylko do 4 środkowych palników po każdej ze stron (rys. 2).

W trakcie obszernych badań eksperymentalnych opracowano optymalną konstrukcję głowicy do wtryskiwania wilgoci nakręcanej w miejscu głowicy rozpylającej mazut (rys. 3). W podobny sposób ustalone zostało, że obecne położenie głowicy mazutowej najlepiej odpowiada miejscu doprowadzania wilgoci. Dalsze sterowanie strugami pary w celu balastowania wybranych stref w płomieniu zapewnia kątem rozwarcia chmury parowej oraz ciśnienie pary.

5. Badania eksperymentalne

Program badań eksperymentalnych przewidywał:

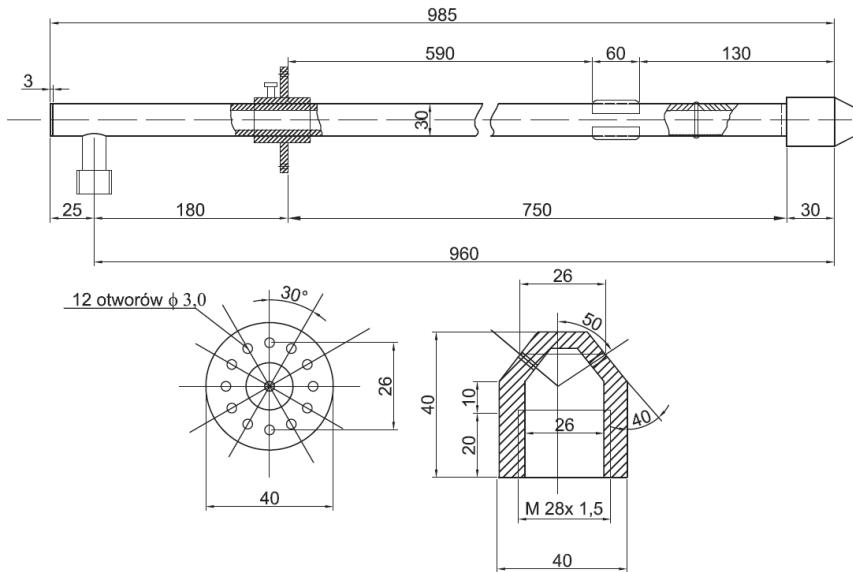
1. Określenie faktycznego poziomu emisji w eksploatacyjnym stanie technicznym kotłów, będącego poziomem odniesienia.
2. Możliwość optymalizacji pracy kotłów skierowanej na zmniejszenie emisji NO_x bez zastosowania dodatkowych środków technicznych (Кузнецова, Н. и др. 1973).
3. Określenie najlepszych konstruktywnych parametrów głowic rozpylających.
4. Ustalenie najkorzystniejszego, pod względem zużycia pary, trybu pracy układu zapewniającego wymagane osiągi.



Rys. 2. Schemat doprowadzania pary do wtryskiwaczy dla bloku palników na prawej ścianie kotła
Fig. 2. Steam supply scheme of the injectors for the burner block on the right side of boiler

Wstępnie oszacowana maksymalna obliczeniowa emisję tlenków azotu emitowana do atmosfery [g/s] w przeliczeniu na NO_2 wyniósł 4,709 [g/s] (Сборник (1986)). 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.

Doprowadzenie pary do strefy spalania w celu zmniejszenia intensywności generacji NO_x wykorzystano wchodzące w skład palników DKZ wtryskiwacze mazutu. Wygląd chmury parowej znajdującej się dokładnie w wymaganym miejscu jądra płomienia udowodnił słuszność tej decyzji.



Rys. 3. Wtryskiwacz mazutu z opracowaną głowicą do rozpylania wilgoci
Fig. 3. Black oil atomizer with a developed nozzle for injection of moisture

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.

Zrealizowanie powyższego programu badań pozwoliło na określenie optymalnych konstruktywnych i reżimowych parametrów systemu zdławienia emisji NO_x, zakładając oczekiwany poziom zmniejszenia emisji o 25%.

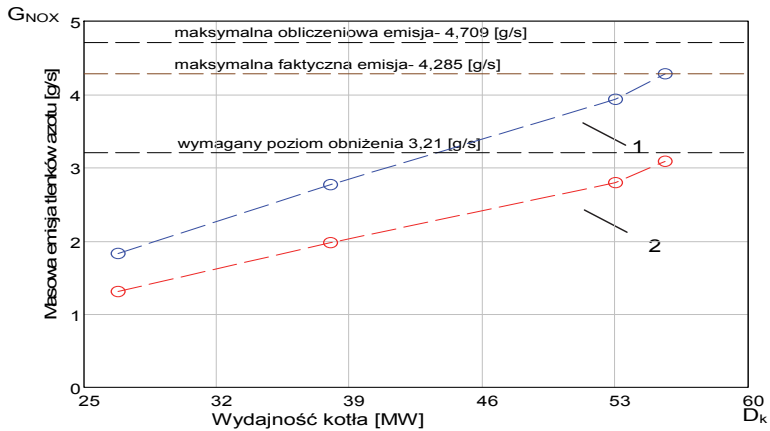
6. Wyniki badań

Emisję NO_x podaje się w przeliczeniu na masową emisję tlenków azotu G_{NO_x} [g/s], ponieważ właśnie ten wskaźnik charakteryzuje bezwzględny wpływ emisji szkodliwych składników spalin na zanieczyszczenie atmosfery.

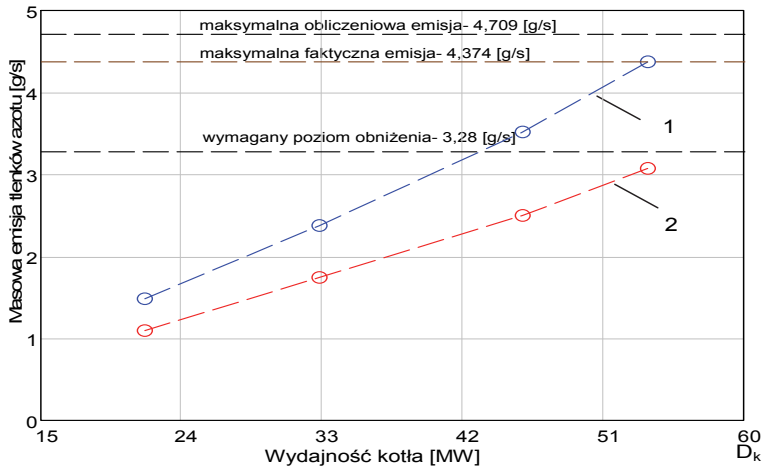
W trakcie analizy wyników badań rozpatrywano trzy poziomy ewentualnego wpływu emisji ze spalinami kotłów na zanieczyszczenia atmosfery:

1. Maksymalny obliczeniowy poziom emisji, który dla kotłów PTVM-50 wynosił 4,709 g/s.
2. Maksymalny faktyczny poziom określony doświadczalnie podczas inwentaryzacji kotłowni, przy praktycznie maksymalnie osiągniętych trybach pracy kotłów wyniósł:
 - dla kotła nr 4 – 4,285 g/s
 - dla kotła nr 5 – 4,374 g/s
3. Zmniejszony zgodnie z zadaniem o 25% poziom emisji. W związku z tym, że w żadnym z kotłów faktyczny poziom emisji nie przekraczał obliczeniowego za poziom odniesienia przyjęto faktyczną maksymalną emisję tlenków azotu:
 - dla kotła nr 4 – 3,21 g/s
 - dla kotła nr 5 – 3,28 g/s

Przy nałożeniu na wspomniane poziomy danych optymalizacji-system zdławienia emisji NO_x przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Przytoczone dane w postaci masowej emisji substancji wymagają specjalnej obróbki wyników pomiarów i kwalifikowanych obliczeń, co raczej jest trudno osiągalne w praktyce.



Rys. 4. Masowa emisja NO_x dla kotła PTVM-50 nr 4: 1 – w stanie eksploatacyjnym; 2 – z włączonym systemem zdławienia emisji tlenków azotu
Fig. 4. Mass emissions of NO_x boiler PTVM-50 No 4: 1 – in operating condition; 2 – enabled system to stifle emissions of nitrogen oxides



Rys. 5. Masowa emisja NO_x dla kotła PTVM-50 nr 5: 1 – w stanie eksploatacyjnym; 2 – z włączonym systemem zdławienia emisji tlenków azotu
Fig. 5. Mass emissions of NO_x boiler PTVM-50 No 5: 1 – in operating condition; 2 – enabled system to stifle emissions of nitrogen oxides

Dlatego zestawienie głównych opomiarowanych i obliczanych wartości charakteryzujących pracę kotłów przy działaniu opracowanego systemu przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Zestawienie wyników badań emisji tlenków azotu dla kotła PTVM-50 nr 4 na paliwie gazowym

Table 1. Summary of the results of the testing of emissions of nitrogen oxides for fuel gas boiler PTVM-50 No 4

Wskaźniki	Ilość pracujących palników			
	4	6	8	9
1. Wydajność kotła [MW]	26,79	37,96	52,95	55,56
2. Zużycie gazu [m ³ /h]	3150	4470	5980	6600
3. Strumień objętości spalin ($\alpha=1, t=20^{\circ}\text{C}$) [m ³ /s]	7,98	11,32	15,14	16,71
4. Stężenie NO _x w spalinach ($\alpha=1, t=20^{\circ}\text{C}$) [mg/m ³]:				
a) faktyczna eksploatacyjna	230	245	260	265
b) z włączonym systemem	165	175	185	185
5. Emisja masowa tlenków azotu [g/s]:				
a) maksymalna obliczeniowa	4,709			
b) maksymalna faktyczna	4,285			
c) faktyczna eksploatacyjna	1,835	2,773	3,936	4,285
d) z włączonym systemem	1,317	1,981	2,801	3,091
6. Ciśnienie pary przed wtryskiwaczami systemu [bar]	1,0	1,0	1,0	1,8
7. Zużycie pary na wtrysk [kg/h]	275	410	550	735

Tabela 2. Zestawienie wyników badań emisji tlenków azotu dla kotła PTVM-50 nr 5 na paliwie gazowym

Table 2. Summary of the results of the testing of emissions of nitrogen oxides for fuel gas boiler PTVM-50 No 5

Wskaźniki	Ilość pracujących palników			
	4	6	8	10
1. Wydajność kotła [Gkcal/h]	21,63	32,80	45,79	53,79
2. Zużycie gazu [m ³ /h]	2560	3840	5348	6400
3. Strumień objętości spalin ($\alpha=1, t=20^{\circ}\text{C}$) [m ³ /s]	6,48	9,72	13,54	16,20
4. Stężenie NO _x w spalinach ($\alpha=1, t=20^{\circ}\text{C}$) [mg/m ³]:				
a) faktyczna eksploatacyjna	230	245	260	270
b) z włączonym systemem	170	180	185	190
5. Emisja masowa tlenków azotu [g/s]:				
a) maksymalna obliczeniowa	4,709			
b) maksymalna faktyczna	4,374			
c) faktyczna eksploatacyjna	1,490	2,381	3,520	4,374
d) z włączonym systemem	1,102	1,750	2,505	3,078
6. Ciśnienie pary przed wtryskiwaczami systemu [bar]	1,0	1,0	1,0	1,8
7. Zużycie pary na wtrysk [kg/h]	275	410	550	735

7. Wnioski

1. Został opracowany, zbadany i wdrożony układ zmniejszenia emisji tlenków azotu dla kotłów PTVM-50 metodą wtryskiwania pary z konkretnym typem urządzenia rozpylającego dla kotłów parowych, sposobem jego montażu oraz miejscem i ilością wtryskiwanej pary.

2. Określono optymalny tryb pracy systemu zmniejszenia emisji tlenków azotu, który pozwala osiągnąć wymagane zmniejszenie emisji o 25% przy ograniczonym zużyciu pary na wtryskiwanie (nie więcej 1 % ekwiwalentnej wydajności parowej kotła).

3. 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 kotłowni brutto.

Literatura

- Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами (1986). Л. Гидрометеоиздат. Госкомгидромет.
- Charun H., Czapp M., Czapp S., Orłowska M., (2016). Effect of the inclination angle of the condenser on the heat transfer coefficient value – experimental study. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* 293, *Mechanika* 88, *RUTMech*, tom 33, zeszyt 88 (4/16), 307-315.
- Czapp S., Czapp M. and Orłowska M. (2016). Numerical and experimental investigation of thermal convection near electric devices with vertical channels. *International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*, Rzeszów, 54-59.
- Jemieljanow, A. A., (1992). *Opracowanie urządzeń wtryskujących dla zdławienia tlenków azotu przy spalaniu gazu i mazutu w paleniskach kotłów*. Autoreferat rozprawy doktorskiej. Sankt – Petersburg.
- Кузнецова, Н. и др. (1973). Тепловой расчет котельных агрегатов: Норматив. метод. М.: Энергия.
- Orłowska M., Czapp M., (2012). Analiza numeryczna wydajności cieplnej konwekcyjnego wymiennika ciepła obudowanego poziomymi płytami, *Rocznik Ochrona Środowiska*, 14, 582-585.
- Pavlenko, A., Szarowski, A., Janta-Lipińska, S. (2014). Badania spalania emulsji paliwowych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 16, 376-385.
- Roslakow, P. W. (1986). Obliczenie wytwarzania się paliwowych tlenków azotu przy spalaniu paliwa zawierającego azot. *Energetyka cieplna*, 1(1), 37-41.
- 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 metoda dozowanego skierowanego balastowania płomienia. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 3, 53-73.
- Szkarowski, A. (2002). Zasady obliczeń zdławienia NO_x metodą dozowanego skierowanego wtrysku balastu wodnego. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 4, 365-378.
- Szkarowski, A. (2003). Szczegółowe problemy sprawnego i ekologicznego spalania paliwa w przedpaleniskach pieców. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 5, 67-78.
- Szkarowski, A., Janta-Lipińska, S. (2009). Automatyczne sterowanie jakością spalania paliwa stałego w kotłach przemysłowo-grzewczych. *Rocznik Ochrona 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., Janta-Lipińska, S., Gawin, R. (2016). Obniżenie emisji tlenków azotu z kotłów DKVR. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 18, 565-578.

Injection of Water Ballast as a Method to Reduce Nitrogen Oxide Emissions

Abstract

The water ballast injection method is one of the most prospective scientific and technical solutions. Its chief purpose is to reduce the pollution of air with harmful products of organic fuel combustion. The analysis conducted demonstrates that the injection method is characterized by unique energy efficiency and environmental friendly indices as compared to other air quality protection methods.

The phenomenon of the heterogeneity of the flame along the furnace considering both its composition and temperature constitutes the grounds of this method. Various flame areas are “responsible” to a different extent for the occurrence of individual components. The temperature conditions and the concentrations of the components of chemical reactions in these areas determine the intensity of the generation of nitrogen oxides (NO_x) and their final concentration in fumes. An injection of humidity into accurately specified flame areas lowers their temperature, which constitutes the main factor that accelerates the generation of NO_x . Furthermore, this method guarantees complete combustion with a reduced concentration of free oxygen, which also contributes to a suppressed occurrence of nitrogen oxides.

The present study was performed for two PTVM-50 boilers with DKZ burners (Fig. 1) that are installed in the Second Krasnogwadijski Boiler Plant in Sankt-Petersburg. Preliminary calculations demonstrated that this method may guarantee a reduction of NO_x emissions by 30 per cent with a balance injection in a quantity up to 1 per cent of the equivalent steam boiler performance.

A reduction of excess air and the accompanying reduction of fume heat loss should permit an increased gross boiler efficiency by ca. 1 per cent.

The aforementioned assumptions were realized during the studies. Furthermore, an optimal design was developed of a head for humidity injection, which was installed in the place of a head that sprays mazut (Fig. 3). The use of this solution permitted measurements of NO_x emission in fumes, which are presented in the study (Fig. 4 and Fig. 5). In the analysis conducted, three levels were taken into account of the possible impact of the emissions of fumes from boiler on air pollution.

Streszczenie

Metoda wtrysku balastu wodnego jest jednym z najbardziej perspektywistycznych rozwiązań naukowo-technicznych. Skierowana jest ona przede wszystkim na zmniejszenie zanieczyszczeń atmosfery szkodliwymi produktami spalania paliwa organicznego. Przeprowadzona analiza pokazuje, że metoda wtrysku charakteryzuje się unikalnymi energo-ekologicznymi i techniczno-ekonomicznymi wskaźnikami spośród innych technologii ochrony atmosfery.

Przesłanką do uzasadnienia tej metody jest zjawisko niejednorodności płomienia wzdłuż paleniska zarówno ze względu na jego skład jak i temperaturę. Przy czym różne strefy płomienia w różnym stopniu „odpowiedzialne” są za powstawanie poszczególnych składników. Temperaturowe warunki i koncentracje komponentów reakcji chemicznych w tych strefach wyznaczają intensywność generacji tlenków azotu (NO_x) i ich końcowe stężenie w spalinach. Wtrysk wilgoci do dokładnie określonych stref płomienia obniża ich temperaturę będącą głównym czynnikiem przyspieszającym generację NO_x . Ponadto metoda ta pozwala zapewnić zupełne spalanie przy obniżonym stężeniu wolnego tlenu, co również przyczynia się do zdławienia powstawania tlenków azotu. Opracowanie wykonane zostało dla dwóch kotłów PTVM-50 z palnikami DKZ (rys. 1) zainstalowanych w Drugiej Krasnogwadijskiej kotłowni w Sankt-Petersburgu. Wstępne obliczenia wykazały, że metoda ta zapewnić może zmniejszenie emisji NO_x o 25 do 30% przy wtryskiwaniu balastu w ilości do 1% ekwiwalentnej wydajności parowej kotła. Z kolei zmniejszenie nadmiaru powietrza i towarzyszące temu obniżenie strat ciepła spalinowych powinno pozwolić na zwiększenie sprawności kotła brutto o około 1%.

Powyższe założenia zrealizowane zostały w trakcie badań. Ponadto opracowana została optymalna konstrukcja głowicy do wtryskiwania wilgoci, która nakręcana była w miejscu głowicy rozpylającej mazut (rys. 3). Wykorzystanie takiego rozwiązania pozwoliło na pomiary emisji NO_x w spalinach, które zaprezentowane zostały w pracy (rys. 4 i rys. 5). W trakcie przeprowadzonej

analizy uwzględniane zostały trzy poziomy ewentualnego wpływu emisji ze spalinami kotłów na zanieczyszczenie atmosfery.

Key words:

emissions, injection of humidity, boiler, nitrogen oxides

Słowa kluczowe:

emisja, wtrysk wilgoci, kocioł, tlenki azotu