

Impact of flameproof exhaust system on efficiency of selective catalytic reduction

Ecological problems associated with operation of diesel engine in underground excavation areas are discussed. Characteristic features of diesel drives operating in excavation zones threatened by explosion hazard, including technical problems with use of selective catalytic reduction, are presented. The results of stationary tests of flameproof diesel drive, in which selective catalytic reduction of nitrogen oxides (NO_x) was used, are given.

Key words: flameproof exhaust system, NO_x emission, selective catalytic reduction

Wpływ ognioszczelnego układu wylotowego na sprawność metody selektywnej redukcji katalitycznej

W artykule omówiono problemy ekologiczne związane z pracą silnika z zapłonem samoczynnym w wyrobiskach podziemnych. Przedstawiono cechy charakterystyczne spalinowych układów napędowych pracujących w wyrobiskach zagrożonych wybuchem, uwzględniając problemy techniczne związane z zastosowaniem metody selektywnej redukcji katalitycznej. Zaprezentowano wyniki przeprowadzonych badań stanowiskowych ognioszczelnego, spalinowego układu napędowego, w którym zastosowano metodę selektywnej redukcji katalitycznej tlenków azotu.

Słowa kluczowe: ognioszczelny układ wylotowy, emisja tlenków azotu, selektywna redukcja katalityczna

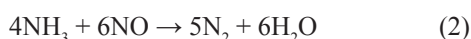
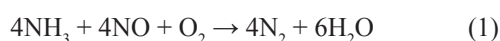
1. Introduction

Emission of gaseous pollutants to the atmosphere is a significant hazard to the natural environment. Diesel engines emit the following basic toxic substances: carbon oxide (CO), hydrocarbons (HC), nitrogen oxides (NO_x), aldehydes (RCHO), sulfur dioxide (SO_2) and particulate matter (PM). Diesel engines used in mining plants emit a lot of nitrogen oxides, due to operation at high load [7]. Distribution of NO_x emission from different sources is presented in Fig. 1 [5]. From the diagram it can be seen that diesel engines used in road and off-road vehicles are responsible for over 43% of total emissions of nitrogen oxides.

At present selective catalytic reduction (SCR) is the most effective method for reduction of nitrogen oxides in exhaust gases from diesel engines. Depending on used reducing agent, the following two variants of this method can be distinguished:

- CH-SCR, reduction of NO_x with the use of hydrocarbons as the reducing agent, NO_x reduction efficiency of up to 80%,
- NH₃-SCR, reduction of NO_x with the use of ammonia as the reducing agent, NO_x reduction efficiency of up to 95%.

Selective reduction of nitrogen oxides with use of ammonia is commonly used in the automotive industry due to its efficiency and cost. In the automotive industry 32.5% urea water solution, under the trade name AdBlue is used, as ammonia is a toxic gas [14]. NO and NO_2 are reduced on the surface of catalytic reactor according to the following reactions [9, 8]:



1. Wprowadzenie

Emisja zanieczyszczeń gazowych do atmosfery stanowi istotne zagrożenie dla środowiska naturalnego. W odniesieniu do silników spalinowych do podstawowych, toksycznych substancji emitowanych przez te silniki zalicza się tlenek węgla (CO), węglowodory (HC), tlenki azotu (NO_x), aldehydy (RCHO), dwutlenek siarki (SO_2), cząstki stałe (PM). Stosowane w zakładach górniczych silniki spalinowe z zapłonem samoczynnym, ze względu na pracę z dużym obciążeniem, emitują dużo tlenków azotu [7]. Na rysunku 1 przedstawiono strukturę emisji NO_x pochodzącej z różnych źródeł [5]. Z analizy rysunku wynika, że silniki spalinowe stosowane w pojazdach drogowych i pozadrogowych są odpowiedzialne za ponad 43% całkowitej emisji tlenków azotu.

Obecnie najbardziej skuteczną metodą zmniejszania stężenia tlenków azotu w spalinach silników o zapłonem samoczynnym jest selektywna redukcja katalityczna (SCR). Rozróżniamy dwa warianty tej metody ze względu na zastosowany czynnik redukujący:

- CH-SCR, redukcja NO_x z wykorzystaniem węglowodorów jako substancji redukującej; sprawność redukcji NO_x do 80%,
- NH₃-SCR, redukcja NO_x z wykorzystaniem amoniaku jako substancji redukującej; sprawność redukcji NO_x do 95%.

Ze względu na dużą skuteczność oraz niewielkie koszty, w przemyśle motoryzacyjnym masowe zastosowanie znalazła selektywna redukcja tlenków azotu amoniakiem. Ponieważ amoniak jest gazem toksycznym, dlatego w motoryzacji wykorzystuje się w 32,5-procentach wodny roztwór mocznika o handlowej nazwie AdBlue [13]. Redukcja NO oraz NO_2 na powierzchni reaktora katalitycznego zachodzi według reakcji (1), (2), (3) [8, 9].

Najczęściej stosowane są reaktory tlenkowe wanadowo-wolframowe na nośniku tlenku tytanu ($V_2O_5/WO_3/TiO_2$).

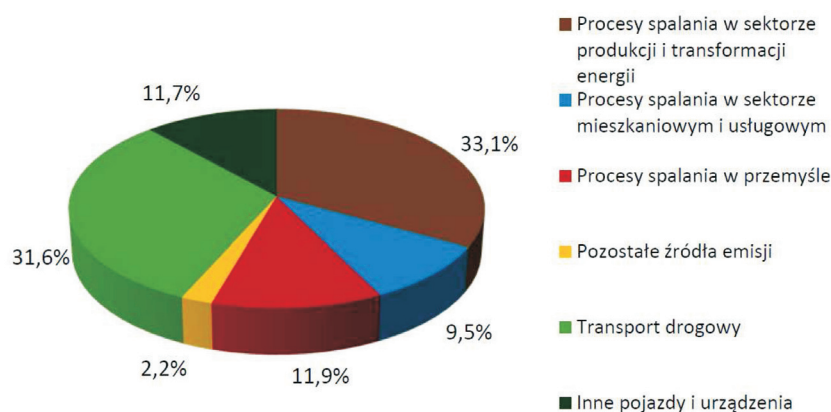
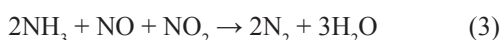


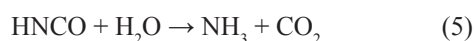
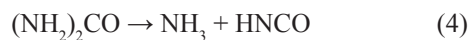
Fig. 1. Distribution of nitrogen oxides emissions in Poland in 2009 [5]

Rys. 1. Struktura emisji tlenków azotu w Polsce w 2009 r. [5]



Reactors with vanadium – tungsten oxides catalyst on titanium oxide as the carrier ($\text{V}_2\text{O}_5/\text{WO}_3/\text{TiO}_2$) are most popular. Moreover, reactors with catalytic zeolite surface with copper ions Cu-ZSM-5 or iron Fe-ZSM-5 are more widely used at present. Reducing agent is injected in front of catalytic reactor, most often just behind the turbocharger outlet, i.e. at the place of highest temperature in the exhaust system. Example of the system for dosing the urea water solution is presented in Fig. 2. In this system, the spraying nozzle is installed in the exhaust pipe at some distance from the valve dosing the agent. In such case, spraying is assisted by compressed air.

Water evaporates at first after injection of urea water solution to the stream of exhaust gases. Then, during flow of the stream through the exhaust system, the following thermolysis and hydrolysis reactions take place:



The amount of reducing agent is strictly determined by the control module depending on the operating parameters of diesel engine. A possibility of emission of ammonia that does not take part in reactions (ammonia slip) from exhaust system is a disadvantage of using the ammonia as reagent. According to the regulations, the permissible ammonia concentration is 25 ppm [13].

2. Design of mining diesel drive in the aspect of nitrogen oxides conversion

Example of a drive system for transportation machines and equipment used in hard coal mining industry, where diesel engines are used, is presented in Fig. 3.

Obecnie coraz szersze zastosowanie znajdują reaktory z katalityczną powierzchnią zeolitową z jonami miedzi Cu-ZSM-5 lub żelazem Fe-ZSM-5. Wtrysk czynnika redukującego następuje przed reaktorem katalitycznym, najczęściej zaraz za wylotem turbosprężarki, to jest w miejscu o największej temperaturze w układzie wylotowym. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy układ dozowania wodnego roztworu mocznika. W tym układzie dysza rozpylająca umieszczona jest w przewodzie wylotowym w pewnym oddaleniu od zaworu dozującego czynnika. Wtedy rozpylanie zwykle jest wspomaganie sprężonym powietrzem.

Po wtrysku wodnego roztworu mocznika do strumienia spalin najpierw następuje odparowanie wody. Następnie, podczas jego przepływu przez układ wylotowy, następują reakcje termolizy oraz hydrolizy (4), (5).

Ilość dozowanego czynnika redukcyjnego jest ściśle określana przez moduł sterujący na podstawie parametrów

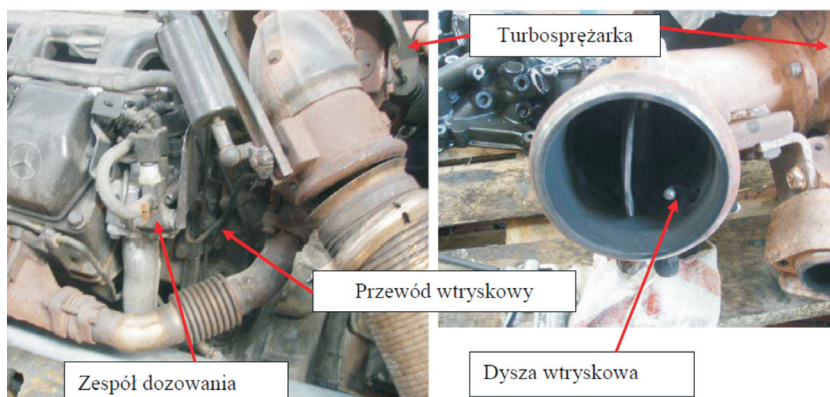


Fig. 2. System for dosing the urea water solution on the example of a truck engine [7]

Rys. 2. Układ dozowania wodnego roztworu mocznika na przykładzie silnik samochodu ciężarowego [7]

pracy silnika spalinowego. Niekorzystną cechą związaną z wykorzystaniem amoniaku jako reagenta jest możliwość emisji z układu wylotowego części amoniaku, niebiorącego udziału w reakcjach (ammonia slip). Przepisy w tym zakresie dopuszczają stężenie amoniaku wynoszące 25 ppm [13].

2. Budowa górniczego napędu spalinowego w aspekcie konwersji tlenków azotu

Przykładowy układ napędowy maszyn i urządzeń transportowych stosowanych w górnictwie węgla kamiennego, w którym wykorzystuje się silnik spalinowy pokazano na rysunku 3.

Oprócz silnika spalinowego w skład układu wchodzi rozbudowane układy dolotowy i wylotowy, odpowiadające wymaganiom górniczym. Najważniejszym wymaganiem, stanowiącym istotne ograniczenie w stosowaniu silników

Extended inlet and outlet systems, which meet the mining requirements, are beside the diesel engine also major parts of drive system. The limit of maximum temperature of external surfaces of the drive system equal to 150 °C is the most important requirement for diesel engines that drive mining machines. It relates to the case, when flammable dust is present. In the case, when the drive is used in underground excavations, where there is no flammable dust, maximum temperature of the surface of the drive system and the exhaust gases should not exceed 450 °C. This condition applies to all engine components, which are in direct contact with the surrounding atmosphere. This condition is especially important for the catalytic reactors in the systems for reduction of nitrogen oxides, which reach the temperature exceeding this permissible value during operation. Their use requires development of temperature protection for external surfaces, which at the same time will not affect the processes on the surface of the reactor core. All the components included in the exhaust system designed for operation in conditions of gas and coal dust explosion hazard, are presented in Fig. 4.

Assemblies of exhaust system are important from the point of view of the system for conversion of nitrogen oxides. Exhaust systems of diesel drives for mining equipment

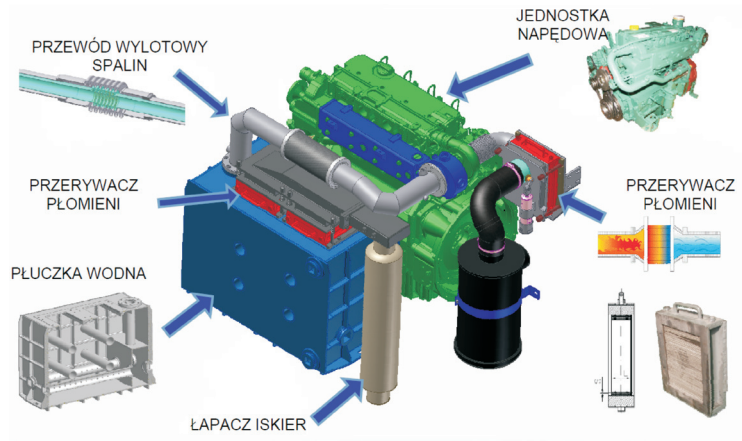


Fig. 3. Diesel engine for operation in potentially explosive atmospheres [7]
Rys. 3. Silnik spalinowy do pracy w atmosferach potencjalnie wybuchowych [7]

spalinowych do napędu maszyn górniczych, jest warunek zachowania maksymalnej temperatury powierzchni zewnętrznych napędu, która nie może przekroczyć 150 °C. Dotyczy to przypadku występowania palnego pyłu, natomiast w sytuacji eksploatacji urządzenia w wyrobiskach podziemnych, w których nie występuje pył palny, maksymalna temperatura powierzchni i spalin, o których mowa wyżej, nie powinna przekraczać 450 °C. Warunek ten dotyczy wszystkich elementów silnika, do których ma dostęp otaczająca atmosfera w najbardziej niekorzystnych warunkach pracy. Jest on szczególnie istotne w odniesieniu do reaktorów katalitycznych wchodzących w skład systemów redukcji tlenków azotu, które podczas pracy osiągają temperaturę przekraczającą dopuszczalne wartości graniczne. Ich zastosowanie wymaga opracowania zabezpieczenia temperaturowego powierzchni zewnętrznych, niewpływającego jednocześnie na procesy zachodzące na powierzchni rdzenia reaktora. Na rysunku 4 przedstawiono schematycznie wszystkie elementy wchodzące w skład układu spalinowego do pracy w warunkach zagrożenia wybuchem gazu i pyłu palnego.

Z punktu widzenia systemu konwersji tlenków azotu istotne są zespoły układu wylotowego. W skład układu wylotowego górniczego napędu spalinowego wchodzi elementy odprowadzające spaliny do otoczenia. Układ taki powinien być wyposażony w przerywacz płomieni oraz łapacz iskier. Zadaniem przerywacza jest zabezpieczenie przed przedostaniem się płomieni z części ognioszczelnego układu wylotowego do otaczającej strefy zagrożenia (rys. 5).

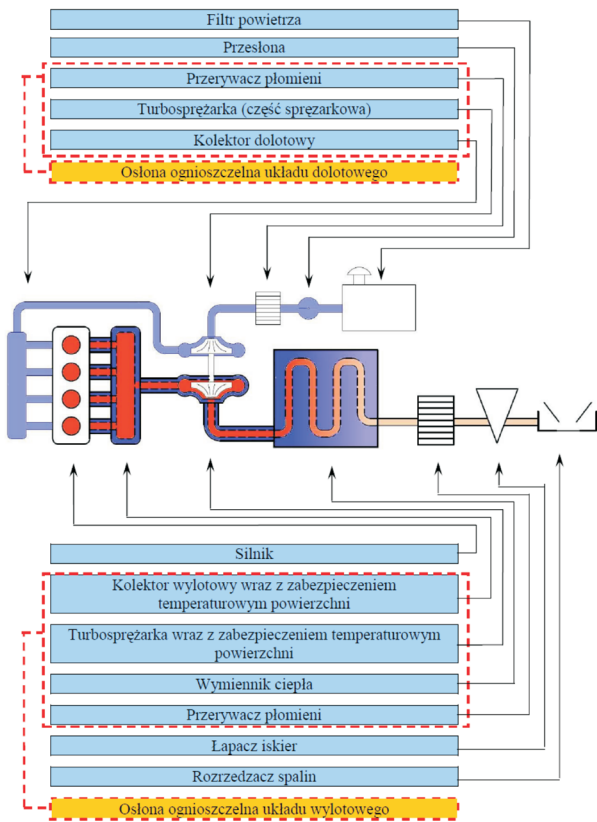


Fig. 4. Diagram of inlet-outlet system of drive unit used in the mining industry [7]

Rys. 4. Schemat układu dolotowo-wylotowego zespołu napędowego stosowanego w górnictwie [7]

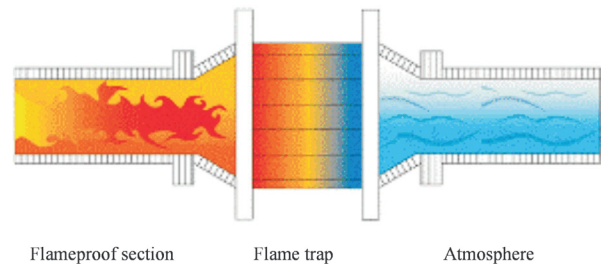


Fig. 5. Principle of operation of a flame trap [7]
Rys. 5. Zasada działania przerywacza płomienia [7]

should be equipped with a flame trap and a spark arrester. The flame trap has to protect against propagation of flames from flameproof section of exhaust system to the surrounding explosive atmosphere (Fig. 5).

Requirement with regards to maximum temperature refers also to exhaust gases, which are just behind the flame trap. Part of exhaust system between flame trap and engine should additionally meet the requirements referring to the flameproof casing and be designed according to the requirements for gases of group I. According to the requirements the flameproof casing should guarantee as follows [11]:

- resistance to pressure of internal explosion during test of most severe explosion that can be expected in a flameproof casing;
- resistance to pressure during the test with the controlled pressure exceeding the highest pressure recorded during the tests at worst conditions of explosion, with maintenance of flameproof casing properties;
- preventing against propagation of internal explosion during the test of most hazardous explosion that can happen inside the flameproof casing. In such conditions the explosion should be stopped in the flameproof casing and not transferred to the surrounding atmosphere.

The highest efficiency of conversion of nitrogen oxides is observed in temperatures above 300 °C [6, 9]. Thus, the catalytic reactor can not be installed out of flameproof zone, because too low temperature of exhaust gases cannot ensure proper reduction of nitrogen oxides. Additionally it should be taken into account that modules of catalytic reactors consist in the first part of an oxidation reactor, which ensures proper ratio between NO and NO₂ and enables decrease of effective temperature of NO_x conversion (Fig. 6) [2].

Exothermic oxidation reactions can increase temperature of exhaust gases above the permissible temperature of 150 °C. Due to this, the system of catalytic reactor has to meet the same requirements as the flameproof part of the exhaust system.

Injection of urea water solution to the exhaust system is required in the system for selective catalytic reduction (SCR)

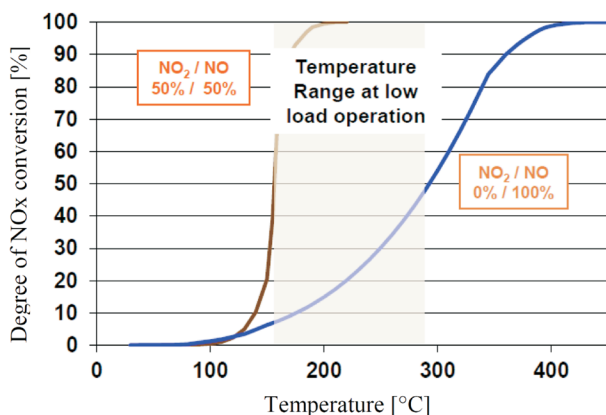


Fig. 6. Degree of NO_x reduction depending on temperature and NO₂/NO ratio [2]

Rys. 6. Stopień redukcji NO_x w zależności od temperatury i stosunku NO₂/NO [2]

Wymóg związany z maksymalną wartością temperatury dotyczy również spalin znajdujących się bezpośrednio za przerywaczem płomieni. Część układu wylotowego pomiędzy przerywaczem płomieni a silnikiem powinna spełniać dodatkowo wymagania dotyczące osłony ognioszczelnej i być zaprojektowana zgodnie z wymaganiami związanymi z gazem grupy I. Według wymagań osłona ognioszczelna powinna gwarantować [11]:

- odporność na działanie ciśnienia wybuchu wewnętrznego w czasie próby, której celem jest wywołanie i pomiar najgroźniejszego wybuchu, jakiego można się spodziewać w osłonie ognioszczelnej,
- odporność na działanie ciśnienia w czasie próby, której celem jest zastosowanie regulowanej wartości ciśnienia, przekraczającej największe ciśnienie stwierdzone w czasie badań, przy najostrożniejszych warunkach wybuchu i wykazanie, że w takich warunkach osłona ognioszczelna zachowuje swoje właściwości,
- zapobieganie przenoszeniu się wybuchu wewnętrznego w czasie próby, której celem jest przeprowadzenie najgroźniejszego wybuchu, jaki może się zdarzyć wewnątrz osłony ognioszczelnej i stwierdzenie, że w tych warunkach wybuch zostaje powstrzymany w osłonie ognioszczelnej i nie przenosi się do otaczającej atmosfery.

Najwyższą skuteczność konwersji tlenków azotu uzyskuje się w temperaturze powyżej 300 °C [6, 9]. Wynika z tego, że reaktor katalityczny nie może być zabudowany poza przestrzenią ognioszczelną, gdyż zbyt niska wartość temperatury spalin może nie zapewnić odpowiednich warunków do redukcji tlenków azotu. Należy również uwzględnić to, że moduły reaktorów katalitycznych składają się w pierwszej części z reaktora utleniającego, zapewniającego odpowiedni stosunek NO do NO₂, który pozwala na zmniejszenie wartości skutecznej temperatury konwersji NO_x (rys. 6) [2].

Egzotermiczne reakcje utleniania stwarzają niebezpieczeństwo zwiększenia temperatury spalin powyżej dopuszczalnej wartości granicznej 150 °C. W związku z powyższym zespół reaktora katalitycznego musi spełniać takie same wymagania jak część ognioszczelna układu wylotowego.

W systemie selektywnej redukcji katalitycznej (SCR), przed reaktorem katalitycznym wymagany jest wtrysk wodnego roztworu mocznika do układu wylotowego. W przeprowadzonych badaniach w ramach pracy [7] zidentyfikowano wpływ układu wylotowego na proces reakcji hydrolizy oraz termolizy, w wyniku których powstają cząstki NH₃ redukujące NO_x na powierzchni katalitycznej reaktora. W wyniku dozowania reagenta bezpośrednio do układu wylotowego ognioszczelnego układu wylotowego występuje duża skłonność osiadania reagenta w postaci depozytu na powierzchni wewnętrznej przewodu wylotowego. Może to być wynikiem konstrukcji, w której przewód wylotowy jest chłodzony oraz zabezpieczony termicznie płaszczem wodnym.

Jednym z istotnych problemów przemyślu motoryzacyjnego związanym z zastosowaniem roztworu mocznika do redukcji tlenków azotu jest jego zamrażanie w ujemnej temperaturze. Wtedy wymagana jest obecność dodatkowej instalacji grzewczej. W przypadku eksploatacji układu SCR

in front of catalytic reactor. Impact of exhaust system on hydrolysis and thermolysis reactions, in the result of which NH_3 particles are formed to reduce NO_x on the catalytic surface of reactor, was identified during the tests within the project [7]. Urea is highly prone to settle on the internal surface of exhaust pipe in a result of its dosing directly to the flameproof exhaust system. It can result from the design in which the pipe is cooled by water jacket.

Freezing of urea solution in the temperature below zero is one of significant problems in the automotive industry associated with use of urea solution for reduction of nitrogen oxides. Additional heating is required in such cases. There is no such a problem in the case of using the SCR system in underground excavations, which simplifies the design of the system.

3. Testing the impact of features of flameproof diesel drive on efficiency of conversion of nitrogen oxides by selective catalytic reduction

Mining drive system equipped with BF4M1013M Deutz diesel engine with a displacement of 4.5 dm^3 , was used in the tests. According to the manufacturer's data it reaches maximum power 81 kW at rotary speed 2300 rpm. Special design of exhaust manifold and turbo compressor meeting the requirements for the engines used in the mining industry, is its characteristic feature. External surfaces of exhaust manifold and turbo compressor are protected against excessive warming by water cooling from engine cooling system. This engine is used in Lds-100K-EMA locomotive, SKZ-81 drivetrain and drivetrain of PIOMA CSP suspended monorail. Test stand for diesel drive for mining operations is presented in Fig. 7.

The test stand was extended by assemblies of the system for selective catalytic reduction for diesel drives for mining operations. The following main sub-systems are part of the stand:

- SCR reactor system with a water jacket,
- system for preparation of the agent,
- system for injection of the agent with dosing control.

Concentration of nitrogen oxides measured in the exhaust system in front of and behind the catalytic reactor during the tests according to variant A, in which cooling of exhaust system by water jacket was not planned, is presented in Fig. 9.



Fig. 7. General view of test stand for diesel drive [7]

Rys. 7. Ogólny widok stanowiska badawczego napędu spalinowego [7]

w wyrobiskach podziemnych problem taki nie występuje, co upraszcza konstrukcję systemu.

3. Badania wpływu cech ognioszczelnego napędu spalinowego na sprawność konwersji tlenków azotu metodą selektywnej redukcji katalitycznej

W badaniach doświadczalnych wykorzystano górniczy napęd spalinowy wyposażony w silnik o zapłonie samoczynnym firmy Deutz, o oznaczeniu BF4M1013M i objętości skokowej $4,5 \text{ dm}^3$. Według danych producenta osiąga on maksymalną moc 81 kW przy prędkości obrotowej 2300 obr/min. Cechą charakterystyczną tego silnika jest specjalna konstrukcja kolektora wylotowego oraz turbosprężarki, wynikająca z konieczności spełnienia wymagań stawianym silnikom stosowanym w górnictwie. Powierzchnie zewnętrzne tych zespołów zabezpieczone są przed nadmiernym nagrzewaniem przez chłodzenie wodne z obiegu chłodzenia silnika. Silnik ten stosowany jest między innymi w lokomotywie Lds-100K-EMA, ciągniku SKZ-81 oraz ciągniku kolei podwieszanej PIOMA CSP. Stanowisko badawcze górniczego napędu spalinowego przedstawiono na rysunku 7.

Stanowisko badawcze rozbudowano o zespoły systemu selektywnej redukcji katalitycznej dedykowane do górniczych napędów spalinowych (rys. 8). W tej części stanowiska można wyróżnić następujące główne podzespoły:

- zespół reaktora SCR z płaszczem wodnym,
- zespół przygotowania czynnika,
- zespół wtrysku czynnika wraz ze sterowaniem.

Na rysunku 9 przedstawiono stężenie tlenków azotu mierzone w układzie wylotu spalin przed reaktorem i za reaktorem katalitycznym podczas badań według założonego wariantu A, w którym zgodnie z założeniami nie przewidywano chłodzenia oraz zabezpieczenia temperaturowego układu wylotowego płaszczem wodnym. W większości punktów cyklu badawczego otrzymano stopień redukcji tlenków azotu NO_x wynoszący powyżej 50%. Porównując wyniki można zauważyć, że zwiększenie prędkości obrotowej oraz obciążenia silnika skutkuje bardziej efektywną pracą reaktora katalitycznego.

Po zakończeniu cyklu badawczego przeprowadzono demontaż układu wylotowego. Zaobserwowano, że ściana

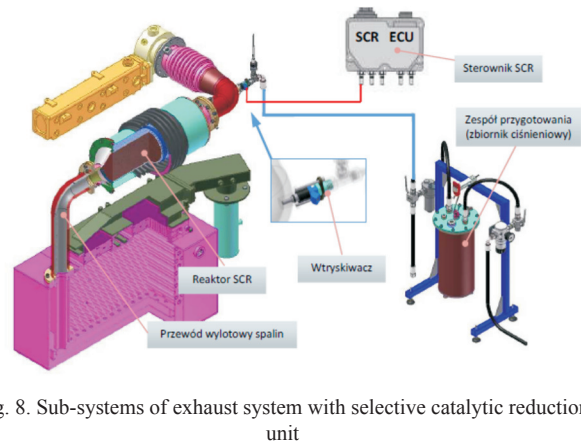


Fig. 8. Sub-systems of exhaust system with selective catalytic reduction unit

Rys. 8. Podzespoły układu wylotowego z układem selektywnej redukcji katalitycznej

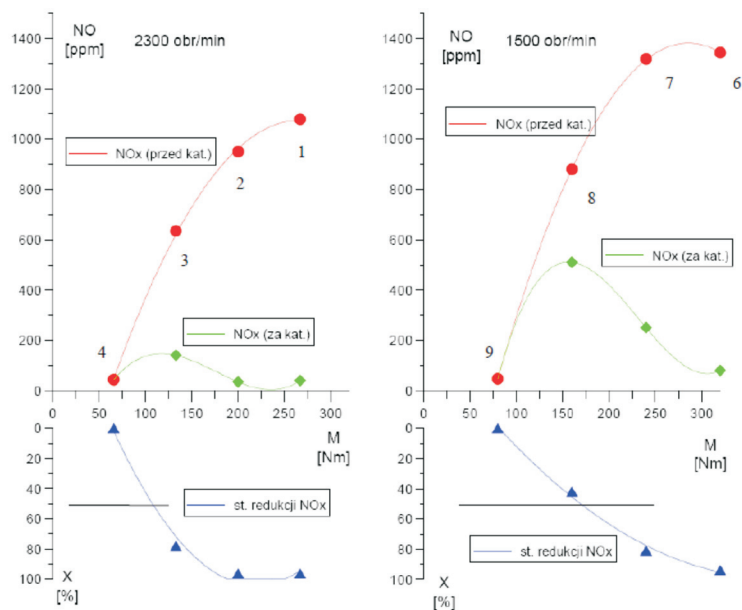


Fig. 9. Concentration of nitrogen oxides and level of their reduction for exhaust system without a water jacket (variant A) [7]

Rys. 9. Stężenie tlenków azotu oraz stopień ich redukcji dla układu wylotowego, w którym nie zastosowano płaszcza wodnego (wariant A) [7]

In most points of the test, the reduction of nitrogen oxides was above 50%. Comparing the results it can be concluded that increase of rotary speed and load of the engine results in more effective operation of the catalytic reactor.

The exhaust system was disassembled after completion of the tests. It was observed that internal wall of the pipe at the section between the reagent injector and the catalytic reactor was covered with powder deposits, which could easily be removed.

Concentration of nitrogen oxides in front of and behind the catalytic reactor during the tests according to variant Bs, in which exhaust system was cooled by the agent from engine cooling system, is presented in Fig. 11. Reduction of NO_x above 50% (69%–91%) was obtained only for points 1 and 2. In the case of rotary speed equal to 1500 rpm the reduction of NO_x in points 6 and 7 was in the range between 28%–36%. Dosing the AdBlue in points 4 and 8 did not change the readings from the analyser of exhaust gases.

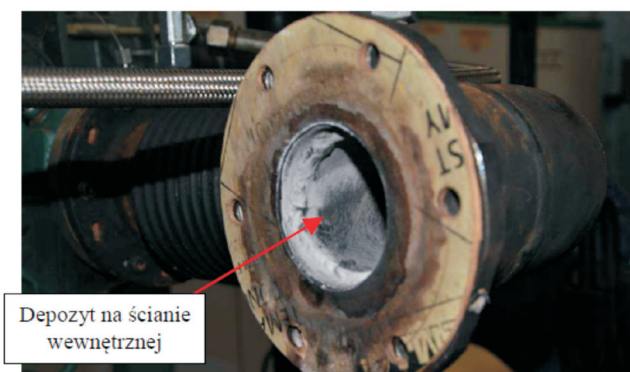


Fig. 10. Internal wall after tests without water jacket [7]

Rys. 10. Ścianka wewnętrzna po próbach bez płaszcza wodnego [7]

wewnętrzna przewodu na odcinku wtryskiwacz reagenta – reaktor katalityczny była pokryta stałymi depozytami o konsystencji proszku, który stosunkowo łatwo można było usunąć (rys. 10).

Na rysunku 11 przedstawiono stężenie tlenków azotu przed reaktorem i za reaktorem katalitycznym w trakcie badań według założonego wariantu Bs, w którym układ chłodzenia silnika był chłodzony czynnikiem z układu chłodzenia silnika. Redukcję NO_x powyżej 50% (69%–91%) uzyskano tylko dla punktów 1 i 2 przyjętego cyklu badawczego. Dla prędkości obrotowej 1500 obr/min stopień redukcji NO_x w punktach 6 i 7 mieścił się w zakresie 28%–36%. Dozowanie AdBlue w punktach 4 i 8 cyklu badawczego nie powodowało zmian we wskazaniach analizatora spalin. Uzyskane wyniki świadczą o możliwości uzyskania pożądanej redukcji tylko podczas pracy silnika z dużym obciążeniem, kiedy występuje duża wartość stężenia tlenków azotu w spalinach i jednocześnie dostateczna wartość temperatury spalin do zachodzenia procesu redukcji.

Po przeprowadzeniu badań zdemontowano elementy układu wylotowego. Ściana wewnętrzna przewodu na odcinku od umieszczenia wtryskiwacza aż do reaktora katalitycznego była pokryta warstwą depozytów, która miała szklistą powierzchnię o grubości od 1 mm do 2 mm. Forma osadzonego depozytu na powierzchni przewodu ukształtowana była strumieniem spalin. Wyraźnie zauważalne były miejscami wyżłobienia oraz nacieki (rys. 12, 13). Depozyty osadzały się na ściankach przewodu głównie podczas pracy silnika z małym obciążeniem, kiedy zarówno wartość strumienia przepływających gazów, jak i jego temperatura miały małą wartość. Podczas pracy silnika z dużym obciążeniem warstwa depozytów zniknęła.

Na rysunku 14 przedstawiono zbiorcze wyniki badania konwersji tlenków azotu w układzie wylotowym badanego silnika dla rozpatrywanych wariantów A, Bs. Dolna część wykresu odpowiada temperaturze powierzchni wewnętrznej przewodu wylotowego w początkowej części układu wylotowego. W wariantcie A określono ją jako temperaturę powierzchni zewnętrznej przewodu wylotowego, natomiast w wariantcie B jest to temperatura czynnika chłodzącego na wyjściu z układu wylotowego. W przypadku obecności płaszcza wodnego zauważano wyraźne zmniejszenie sprawności systemu redukcji tlenków azotu. Wysoka temperatura powierzchni wewnętrznej przewodu sprzyja odparowaniu wody oraz reakcji termolizy mocznika, co wystąpiło podczas badania wariantu A. W badaniach w wariantcie Bs, w którym kanały wylotowe były intensywnie chłodzone, proces redukcji tlenków azotu był mniejszy, a na ściankach układu odkładały się stałe depozyty. Zjawiska takie nie wystąpiły natomiast podczas dużego natężenia przepływu i dużej prędkości spalin, kiedy następuje lepsze wymieszanie rozpylonego czynnika z głównym strumieniem spalin. Czynniki w mniejszej ilości dociera wówczas w obszar „chłodnej” ścianki, gdzie może ulec osadzeniu i odkładaniu się depozytów.

The results confirm the possibility of required reduction only during operation of engine at high load, when the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases is high and the temperature of exhaust gases is enough for proper reduction.

The components of exhaust system were disassembled after the tests. Internal wall of the pipe between injector and catalytic reactor was covered with a layer of deposits of glassy surface of thickness from 1 mm to 2 mm. The structure of deposit on the surface was shaped by a stream of exhaust gases. Grooves and infiltrations were clearly visible (Fig. 12, 13). The deposits were settling on the pipe walls mainly during operation of the engine at low load, when both flow of exhaust gases and temperature of exhaust gases were lower. The layer of deposits disappeared during operation of engine at high load.

Collective results of testing the conversion of nitrogen oxides in exhaust system of tested engine for variants A and Bs are given in Fig. 14. Lower part of the diagram refers to the temperature of internal surface of exhaust pipe in the first part of the exhaust system. In variant A this is the temperature of external surface of exhaust pipe, and in variant Bs this is the temperature of the cooling agent at the outlet of the exhaust system. Significant reduction of efficiency of the system for reduction of nitrogen oxides was observed in the case, when there was a water jacket was employed. High temperature of internal surface of the pipe favours evaporation of water and urea thermolysis, which took place during testing in variant A. In Bs variant, where exhaust channels were intensively cooled, reduction of nitrogen oxides was lower and solid deposits settled on the walls of the system. Such phenomena did not occur at high flow intensity and high speed of exhaust gases, when sprayed agent is better mixed with the main stream of exhaust gases. Smaller amount of agent reaches the “cool” wall, where it can settle.

4. Summary

Underground excavations are specific places for diesel engines operation, where diesel machines operate in confined space. Mining teams in these spaces are exposed to exhaust gases, especially to nitrogen oxides, which are most hazardous among all components of exhaust gases from diesel engines. While intensive actions aiming at minimization of this problem are noticeable in the market of surface machines, there are no proper designs and methods for conversion of nitrogen oxides for machines operating in underground excavations with explosive atmosphere. Design of a mining drive system for operation in mines with explosive atmosphere was analyzed, taking into account technical problems associated with the use of the system for selective catalytic reduction of nitrogen oxides in exhaust gases. Significant impact of cooling the mining equipment’s exhaust system on the efficiency of conversion of nitrogen oxides, and especially on the amount of deposit settled on the internal wall of the exhaust pipe, was indicated. Elimination of these

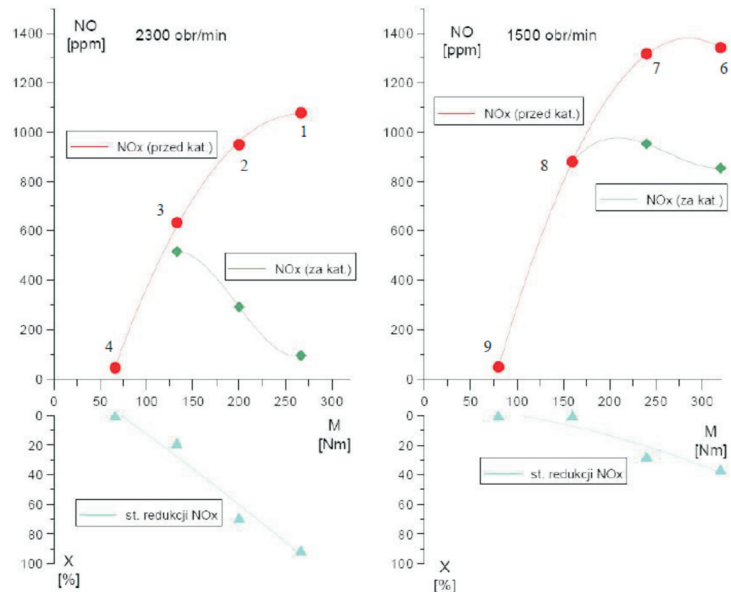


Fig. 11. Concentration of nitrogen oxides and level of their reduction for exhaust system with exhaust pipe cooled by the agent from the engine cooling system (variant Bs) [7]

Rys. 11. Stężenie tlenków azotu oraz stopień ich redukcji dla układu wylotowego z chłodzonym przewodem wylotowym czynnikiem z układu chłodzenia silnika (Wariant Bs) [7]

4. Podsumowanie

Podziemne wyrobiska kopalniane są szczególnym miejscem eksploatacji silników spalinowych, gdzie maszyny spalinowe pracują w przestrzeniach o ograniczonej kubaturze. Pracujące tam załogi górnicze są

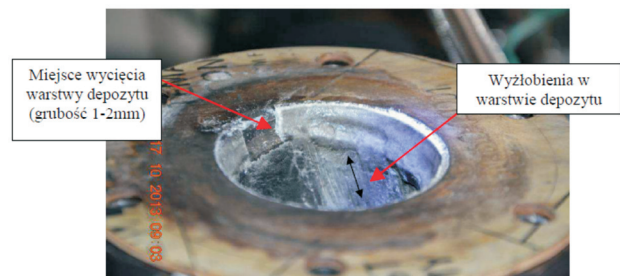


Fig. 12. Internal wall after the tests with cooled exhaust pipe (pipe) [7]

Rys. 12. Ścianka wewnętrzna po próbach z chłodzonym przewodem wylotowym (przewód) [7]



Fig. 13. Internal wall after the tests with cooled exhaust pipe (entry to the pipe) [7]

Rys. 13. Ścianka wewnętrzna po próbach z chłodzonym przewodem wylotowym (wejście do reaktora) [7]

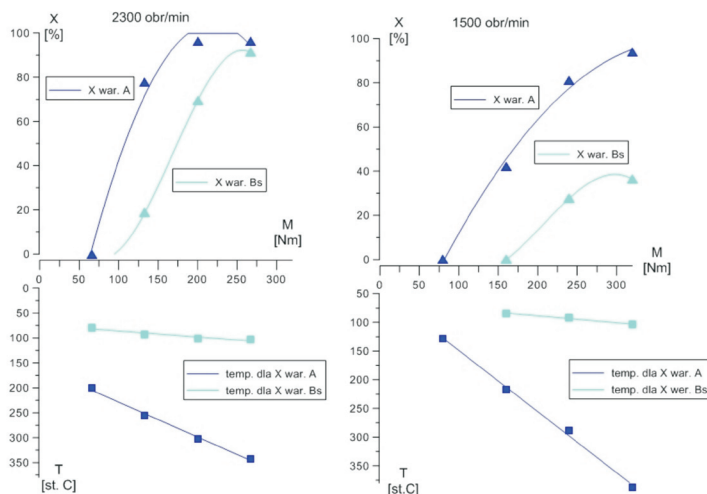


Fig. 14. Comparison of efficiency of the system for reduction of nitrogen oxides depending on configuration of the exhaust system [7]

Rys. 14. Porównanie sprawności układu redukcji tlenków azotu w zależności od konfiguracji układu wylotowego [7]

unwanted effects requires development of a new design of exhaust pipe section between injector and reactor for selective catalytic reduction.

nażone na oddziaływanie spalin, a szczególnie na działanie tlenków azotu, które spośród wszystkich składników spalin silników z zapłonem samoczynnym stanowią największe zagrożenie. O ile na rynku maszyn powierzchniowych zauważalne są intensywne działania zmierzające do zminimalizowania tego problemu, o tyle brak jest odpowiednich konstrukcji i metod konwersji tlenków azotu, dedykowanych do maszyn pracujących w wyrobiskach podziemnych zagrożonych atmosferą wybuchową. W przedstawionej pracy przeprowadzono analizę budowy górniczego zespołu napędowego przeznaczonego do eksploatacji w wyrobiskach zagrożonych atmosferą wybuchową, uwzględniając problemy techniczne związane z zastosowaniem systemu selektywnej redukcji katalitycznej do oczyszczania spalin z tlenków azotu. Przeprowadzone badania stanowiskowe wykazały istotny wpływ systemów zabezpieczenia temperaturowego górniczego układu wylotowego na sprawność konwersji tlenków azotu. W szczególności wykazano jego wpływ na ilość osadzonego depozytu na ścianie wewnętrznej przewodu wylotowego. Eliminacja tego niepożądanego efektu wymaga opracowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych przewodu wylotowego na odcinku pomiędzy wtryskiwaczem a reaktorem selektywnej redukcji katalitycznej.

Bibliography/Literatura

- [1] Bieniek A., Graba M., Lechowicz A. Sterowanie adaptacyjne systemem recyrkulacji spalin w aspekcie obniżenia emisji substancji szkodliwych dla klasycznego silnika ZS. Inżynieria Rolnicza 5(130), 2011.
- [2] Brück R. Highly efficient SCR for SCR only applications for NRMM. Emitec GmbH.
- [3] Brzeźński M., Sala R. Problemy eksploatacji systemów selektywnej redukcji katalitycznej tlenków azotu. Silniki Spalinowe 3/2013.
- [4] Chłopek Z. Ochrona środowiska naturalnego. WKŁ, Warszawa 2002.
- [5] Degórska A. i in. Zanieczyszczenie powietrza w Polsce w 2009 roku na tle wielolecia. IOŚ Warszawa 2011.
- [6] Fridell E., Steen E. Ammonia slip measurements on ships with NO_x converters. IVL Report B1766.
- [7] Kaczmarczyk K. Metoda dostosowania silnika do wymagań stawianych górniczym napędem spalinowym, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Gliwice 2014.
- [8] Kamela W., Kruczyński S. Analiz porównawcza reaktorów z katalizatorem platynowym i tlenkowym w procesie redukcji NO_x amoniakiem. Silniki Spalinowe 3/2012.
- [9] Kojtych A. Zastosowanie selektywnej redukcji NO_x amoniakiem (NH_3 -SCR) do pojazdów napędzanych silnikiem z zapłonem samoczynnym. Motrol 6/2004.
- [10] Materiały informacyjne firmy MEHLDAU & STEINFATH Umwelttechnik GmbH.
- [11] PN-EN 1834-2:2002 Silniki spalinowe tłokowe. Wymagania bezpieczeństwa dotyczące projektowania i budowy silników przeznaczonych do stosowania w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Część 2: Silniki grupy I przeznaczone do dostosowania w pracach podziemnych zagrożonych występowaniem metanu i/lub palnego pyłu.
- [12] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 19 sierpnia 2005 r. w sprawie szczegółowych wymagań dla silników spalinowych w zakresie ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i cząstek stałych przez te silniki (Dz.U. nr 202, poz. 2203).
- [13] www.grupaazoty.com (20 styczeń 2015).

Krzysztof Kaczmarczyk, DEng. – Institute of Mining Technology, Gliwice.

Dr inż. Krzysztof Kaczmarczyk – Instytut Techniki Górniczej KOMAG Gliwice.

e-mail: kkaczmarczyk@komag.eu



Marek Brzeźński, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering at Cracow University of Technology.

Dr hab. inż. Marek Brzeźński – profesor na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej.

e-mail: mbrzez@pk.edu.pl

