

Nikodem Szlązak, Marek Borowski**

ZANIECZYSZCZENIE POWIETRZA SPALINAMI PRZY DRAŻENIU WYROBISK Z WYKORZYSTANIEM MASZYN Z SILNIKAMI DIESLA**

1. Wstęp

W polskim oraz światowym górnictwie podziemnym w procesach technologicznych wydobywania kopalin powszechnie stosuje się maszyny o różnym napędzie mechanizmu jazdy. W zależności od głównego silnika napędowego rozróżnia się napęd spalinowy, pneumatyczny i elektryczny. W kopalniach o dużym wydobywaniu zachodzi konieczność maksymalnego wykorzystania urządzeń, co wiąże się z łatwością manewrowania i szybkością przemieszczania się maszyn. Wymogom tym sprostać mogą tylko maszyny napędzane silnikami spalinowymi. Po raz pierwszy silniki benzynowe zastosowano pod koniec XIX wieku w Niemczech, lecz zagrożenie, jakie powodują (możliwość inicjacji zapłonu gazów kopalnianych), sprawiło, że szybko zabroniono ich stosowania w podziemnych kopalniach. Obiecujący okazał się wysokoprężny silnik spalinowy, wynaleziony w 1893 roku przez Rudolfa Diesla. Silnik ten został wprowadzony w polskim górnictwie rudnym w 1968 roku, kiedy to po raz pierwszy zastosowano czterokołowe maszyny samojezdne ładująco-odstawcze. Od tego momentu powszechnie stosuje się w górnictwie podziemnym rud maszyny napędzane silnikami wysokoprężnymi.

Zaletą napędu spalinowego jest uniezależnienie podwozia od kopalnianej sieci elektroenergetycznej lub sieci powietrza sprężonego, co wpływa dodatkowo na prędkość pojazdu i zdolność manewrowania [9]. Niestety wadą takiego napędu jest wydzielanie do atmosfery kopalnianej dużej ilości ciepła i toksycznych spalin. Problem ten występuje wszędzie tam, gdzie maszyny spalinowe zastosowane są w ograniczonej przestrzeni wyrobiska czy tunelu. Dotyczy to wykorzystywania podwieszanych kolejek spalinowych, lokomotyw spalinowych i maszyn samojezdnych.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Artykuł zrealizowano w ramach prac własnych nr 10.10.100.854

Zagrożenie wynikające z emisji do atmosfery wyrobisk podziemnych toksycznych produktów spalania, a także konieczność ich eliminacji poprzez oczyszczanie spalin, stanowi poważny problem technologiczny górnictwa podziemnego.

W celu określenia zanieczyszczenia atmosfery w trakcie drażenia wyrobiska przy pracy w nich maszyn samojezdnych wykonano pomiary gazowych i stałych składników spalin.

2. Sposoby wentylacji drażonych wyrobisk

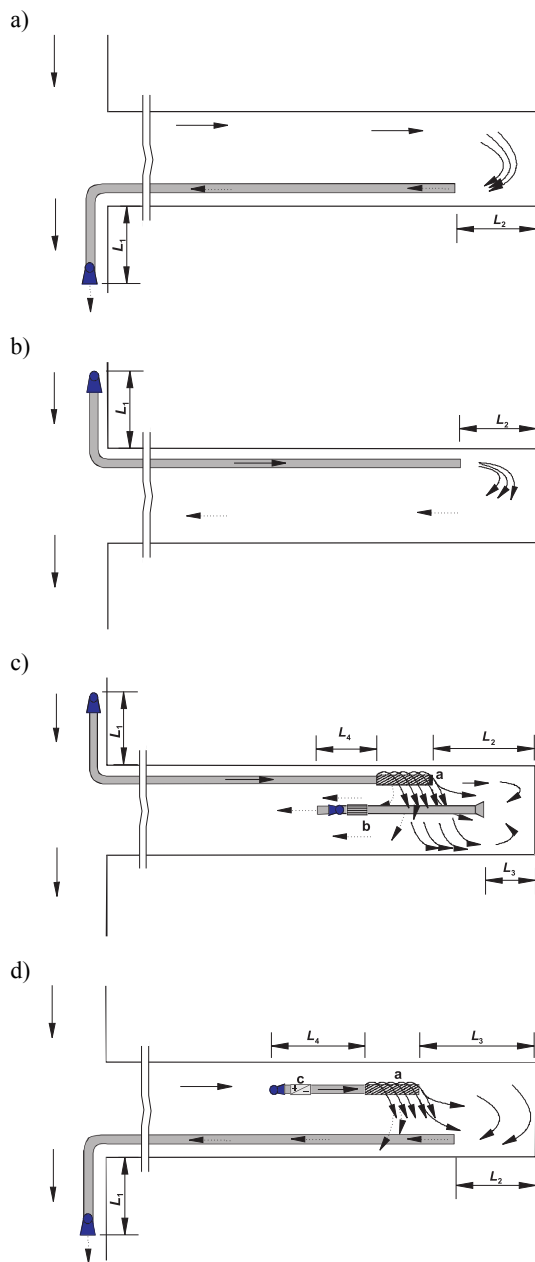
Wyrobiska, które nie są przewietrzane opływowym prądem powietrza, należy przewietrzać za pomocą wentylacji lutniowej. Przewietrzanie za pomocą wentylacji lutniowej może być ssące, tłoczące lub kombinowane. W wyrobiskach drażonych przy użyciu materiałów wybuchowych nie wymaga się stosowania urządzeń odpylających. Wentylacja ssąca składa się z zasadniczego lutniociągu ssącego, którym przepływa powietrze ze strefy produkcyjnej wyrobiska do jego wylotu. Zgodnie z obowiązującymi przepisami odległość lutniociągu ssącego od czoła przodka nie powinna być większa niż 3 m. Natomiast wentylacja tłocząca składa się z zasadniczego lutniociągu, do którego podłączony jest wentylator po stronie tłoczącej w wyrobisku z opływowym prądem powietrza. Zgodnie z obowiązującymi przepisami odległość lutniociągu tłoczącego od czoła przodka nie powinna być większa niż 10 m. Na rysunku 1 przedstawiono systemy wentylacji lutniowej.

3. Emisja gazów z silników spalinowych i ich wpływ na atmosferę kopalnianą

Wprowadzenie do kopalń maszyn spalinowych spowodowało zwiększenie wydajności pracy, ale w znaczący sposób przyczyniło się do zanieczyszczenia powietrza kopalnianego, wpływając tym samym na pogorszenie warunków pracy. Emisja toksycznych gazów to główna wada silników spalinowych. Podstawowym źródłem substancji zanieczyszczających jest układ wydechowy, a także — w mniejszym stopniu — skrzynia korbowa i układ zasilania w paliwo [5, 9]. Jedynymi produktami spalania paliwa w silniku powinny być dwutlenek węgla i woda według równania



Z uwagi na krótki czas spalania i bardzo wysoką temperaturę (od 1700 do 2700°C) [5, 9] towarzyszącą procesowi skład spalin odbiega w znacznym stopniu od składu idealnego. Głównymi zanieczyszczeniami spalin są tlenki azotu oraz cząsteczki stałe, zarówno widzialne (dym), jak i niewidzialne. W odróżnieniu od silnika benzynowego spaliny silnika wysokoprężnego zawierają znacznie mniej częściowo spalonych lub niespalonych węglowodorów i tlenku węgla (20 razy mniej tlenku węgla, 8 razy mniej węglowodorów), ale niestety więcej części stałych.



Rys. 1. Systemy wentylacji lutniowej: a) wentylacja ssąca; b) wentylacja tocząca; c) wentylacja kombinowana z zasadniczym lutniociągiem tłoczącym; d) wentylacja kombinowana z zasadniczym lutniociągiem ssącym.
 Oznaczenia: a — lutnia wirowa, b — odpylacz, c — chłodnica powietrza,
 L_1 – L_4 — odległość zabudowy poszczególnych elementów wentylacji lutniowej

W tabeli 1 przedstawiono przyczyny powstawania szkodliwych związków w spalinach.

TABELA 1

Przyczyny powstawania szkodliwych związków w spalinach [5]

Zanieczyszczenie	NO _x	CO	HC	PM
Przyczyny powstania	Strefa popromienna przy składzie mieszanki zbliżonym do stechiometrycznego	Spalanie niskotemperaturowe, dysocjacja CO ₂ w strefach o wysokiej temperaturze, rozkład aldehydów niedobór powietrza	Nieopalone paliwo (mieszanka) wygaszenie płomienia na ściankach cylindra i głowicy, w szczelinach między tłokiem a cylindrem, w rowkach pomiędzy zaworem a gniazdem, strefa zbyt bogatej lub zbyt ubogiej mieszanki, niezupełne spalanie przy niedoborze powietrza	Rozpad termiczny paliwa, np. przy jego wytrysku do stref gorących objętych przez płomień
Okoliczności sprzyjające	Wysoka temperatura w cylindrze podczas spalania, wysokie ciśnienie	Chłodzące oddziaływanie ścian cylindra i głowicy	–	Długi czas wtrysku, zbyt mało powietrza do spalania, zwłaszcza przy dużych obciążeniach

Stosowanie w kopalniach podziemnych maszyn spalinowych przyczynia się znacznie do pogorszenia warunków pracy, głównie na skutek wydzielania toksycznych produktów spalania [9]. Jakość wydzielanych spalin w znacznym stopniu zależy od sposobu eksploatacji silników, jakości paliwa, sposobu konserwacji i regulacji silnika, jakości, ciśnienia i temperatury zasysanego powietrza, rodzaju, mocy, typu silnika, sposobu pracy operatora, a także sposobu oczyszczania spalin [5].

Produkty spalania paliwa w silnikach maszyn można podzielić na [5, 9]:

- produkty niecałkowitego spalania, czyli tlenek węgla, węglowodory, aldehydy i sadza;
- produkty utleniania azotu z powietrza oraz nieorganicznych dodatków w paliwie i oleju smarującym, w postaci tlenków azotu i siarki, metale o silnie toksycznych właściwościach dodawane do paliw w celu polepszenia własności użytkowych i wydzielanych w procesie spalania w czystej postaci lub związków toksycznych.

Przeciętny skład substancji toksycznych w spalinach zestawiono w tabeli 2. Na stężenia poszczególnych składników w spalinach w znaczący sposób wpływają różnice konstrukcyjne i regulacyjne maszyn, ich warunki pracy, obciążenia, oraz prędkości obrotowe silników.

TABELA 2

Skład gazów spalinowych emitowanych przez silniki maszyn samojezdnych [5]

Wyszczególnienie	Zakres stężeń
Azot	76,0÷78,0%
Tlen	2,0÷18%
Para wodna	0,5÷4,0%
Dwutlenek węgla	1,0÷10,0%
Tlenek węgla	0,01÷1,4%
Tlenki azotu	0,002÷0,5%
Dwutlenek siarki	0,0001÷0,015%
Węglowodory	0,0009÷0,05%
Części stałe (sadza)	1,0÷ 10,0 mg/m ³

4. Redukcja emisji spalin

Emisja groźnych zanieczyszczeń z silników spalinowych do atmosfery kopalnianej stanowi poważne zagrożenie dla zdrowia i życia pracujących w kopalniach. Od wielu lat prowadzone są badania nad sposobem oczyszczania i neutralizacji spalin. W tym celu stosuje się różnego rodzaju katalizatory, których zadaniem jest zmniejszanie zawartości szkodliwych składników. Jednymi z takich katalizatorów są katalityczne konwertery. Zadaniem ich jest utlenianie tlenków węgla i węglowodorów do dwutlenku węgla, co czyni je mniej toksycznymi. Katalizatory te utleniają również NO i SO₂ do bardziej toksycznych NO₂ i SO₃. Niestety nie są one konstrukcyjnie przystosowane do usuwania części stałych, a silniki dobrze utrzymane i pracujące w odpowiednio dobranych warunkach wentylacyjnych nie wymagają ich stosowania [10].

Innym typem katalizatorów są układy, w których na nośniki z tlenku glinu lub glino-krzemianów nanosi się rozdrobnioną platynę. Katalizatory platynowe są skuteczne przy usuwaniu tlenku węgla utlenionego do CO₂ (skuteczność od 50 do 90%), ale niestety mniej skuteczne w stosunku do węglowodorów i aldehydów, a całkowicie nie skuteczne w stosunku do tlenków azotu i siarki. Układy tego typu pracują wydajnie w wąskim zakresie temperatur (257°C do 407°C), co sprawia, że w silnikach o małej mocy nie mogą być stosowane ze względu na zbyt niską temperaturę. Dużą ich zaletą jest trwałość i możliwość regeneracji.

Katalizatorami, które najskuteczniej usuwają części stałe spalin, są ceramiczne filtry płaskie. Neutralizują one do 95% części stałych [4] zawartych w spalinach, ale niestety są podatne na zatykanie oraz cieplne uszkodzenia struktury mechanicznej.

Katalizatorem, który z dużym powodzeniem wykorzystywany jest do oczyszczenia spalin, jest płuczka wodna, stosowana jako następny stopień oczyszczania po przeprowadzeniu spalin przez oczyszczacz katalityczny. Płuczki wodne w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych usuwają około 20% części stałych, 50÷80% SO₂ i do 20% węglowodorów [10], a dodatkowo ochładzają spaliny. Wadą takich układów jest to, że w wyniku ich działania tylko w nieznacznym stopniu zmniejsza się zawartość CO i NO_x, a pod wpływem gorących gazów spalinowych następuje odparowanie wody, która w postaci pary przedostaje się wraz ze szkodliwymi substancjami do otoczenia. W celu eliminacji tego efektu spaliny ochładza się wstępnie przed wprowadzeniem do płuczki.

Zastosowanie wyżej opisanych katalizatorów pozwala na usunięcie takich zanieczyszczeń, jak CO, SO₂, części stałe, węglowodory czy aldehydy, natomiast w niewielkim stopniu wpływa na usunięcie bardzo szkodliwych dla środowiska tlenków azotu. Nadmierne ich stężenie w otoczeniu człowieka powoduje zmianę stopnia utlenienia żelaza (+2 przechodzi na +3) w hemoglobinie, z utworzeniem methemoglobiny i częściowo nitrozohemoglobiny, co powoduje zablokowanie przenoszenia tlenu. Innym skutkiem zbyt dużego stężenia tlenków azotu jest rozszerzenie naczyń krwionośnych wywołujące spadek ciśnienia krwi, zawroty i bóle głowy. Wysoka temperatura spalania sprzyja tworzeniu się NO_x. Jako sposób jego usuwania można stosować recyrkulację spalin, ale całkowite usunięcie NO_x wymaga zredukowania go do N₂. Stanowi to dużą przeszkodę, ponieważ nadmiar tlenu w spalinach sprzyja utlenianiu, zaś utlenianie i redukcja to dwie przeciwstawne reakcje chemiczne.

Badania nad katalizatorem, który zredukowałby NO_x w obecności tlenu, nadal trwają, a obiecująca wydaje się technika selektywnej katalitycznej redukcji tlenków azotu (*Selective Catalytic Reduction*).

5. Wyniki pomiarów składników spalin w drażonych wyrobiskach

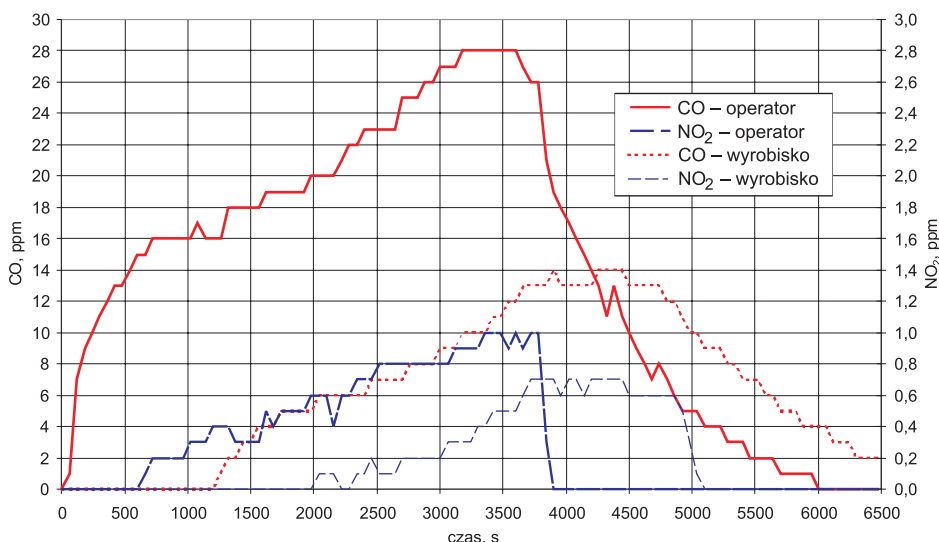
W celu określenia stanu zanieczyszczenia powietrza w drażonych wyrobiskach wykonano pomiary. Na ich podstawie możliwe było również określenie stopnia narażenia pracowników na działanie składników spalin w zanieczyszczonej atmosferze kopalnianej spowodowanej pracą maszyn z silnikami spalinowymi. Pierwszy z pomiarów został wykonany przy nieruchomej maszynie (wiertnica) stojącej w przodku wyrobiska. Natomiast drugi pomiar został wykonany przy maszynie poruszającej się wahadłowo, która odstawiała urobek.

W pomiarach wykorzystano analizatory gazów typu TMX (CO, NO₂), pyłomierz laserowy typu Grimm. Metodyka pomiarów polegała na umieszczeniu jednego analizatora gazów w kabinie operatora maszyny samojedznej, natomiast drugi analizator był umieszczany w wyrobisku poza strefą przodkową. Równocześnie z drugim analizatorem był lokalizowany pyłomierz.

Wyrobiska były przewietrzane za pomocą tłoczącej wentylacji lutniowej. W instalacji lutniowej stosowano wentylatory typoszeregu WLE-600 jako pojedyncze. Stosowane były lutniociągi elastyczne o średnicy $\varnothing = 600$ mm.

Pierwszy z pomiarów został wykonany przy nieruchomej maszynie w przodku wyrobiska, która wykonywała wiercenie pod otwory strzałowe. Obserwacje prowadzono od rozpoczęcia pracy maszyny przez okres jej pracy i po jej wyjeździe z wyrobiska. Strumień powietrza na wylocie z wyrobiska wynosił 420 m³/min, natomiast w przodku wyrobiska ślepego 140 m³/min.

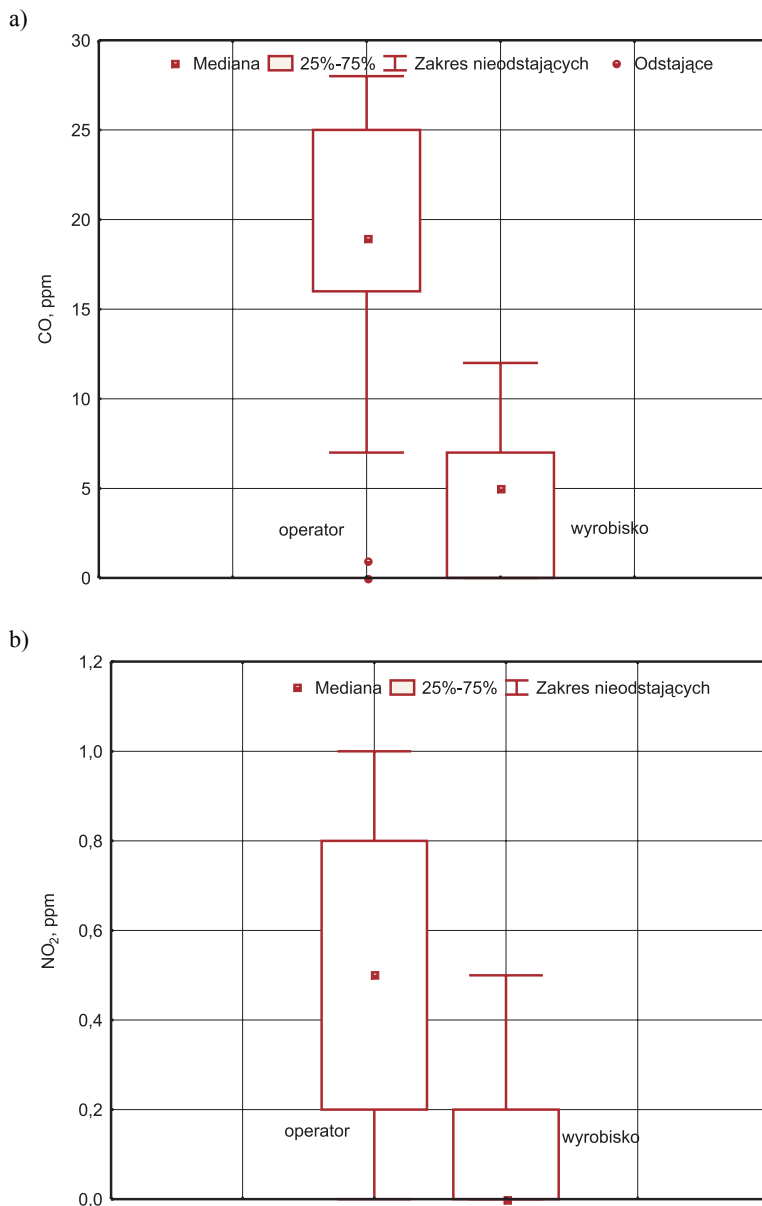
Na rysunku 2 przedstawiono zmiany stężeń tlenku węgla i ditlenku azotu w przodku, co odpowiada stężeniom gazów, na jakie narażony był operator wiertnicy oraz na wylocie z wyrobiska. W trakcie wiercenia obserwuje się narastanie stężeń gazów, a po wyjeździe maszyny z wyrobiska można zauważyć obniżanie stężeń gazów. Z wykresu wynika, że z uwagi na mniejszą intensywność przewietrzania w przodku występują większe stężenia gazów niż w pozostałej części wyrobiska.



Rys. 2. Zmiany stężenia gazów dla nieruchomej maszyny w przodku

Na rysunku 3 zamieszczono zakresy zmian stężenia gazów w trakcie pracy maszyny w przodku wyrobiska dla operatora i w wyrobisku. Z porównania średnich wartości stężeń w przodku oraz w wyrobisku wynika, że operator maszyny w przodku jest narażony na czterokrotnie większe wartości stężeń gazów od występujących w wyrobisku. Również po dokonaniu przeliczenia ditlenku azotu na umowny tlenek węgla należy stwierdzić, że stężenia tlenku węgla są prawie czterokrotnie większe.

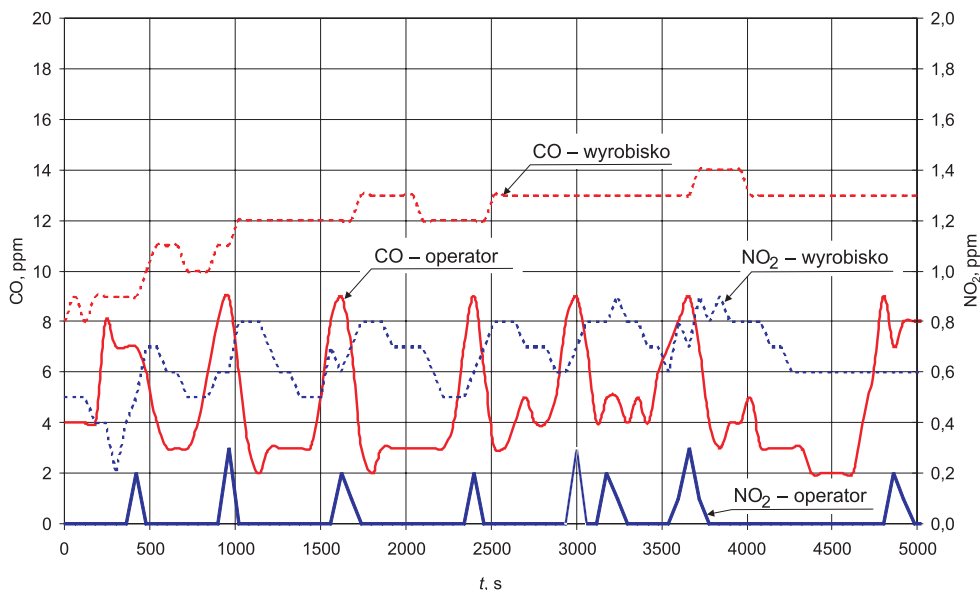
W drugim przypadku maszyna pracowała przy odstawie urobku w 50 m wyrobisku. Całkowita długość odstawy urobku do szybka zsypanego wynosiła 500 m. Odstęp czasu pomiędzy kolejnymi wjazdami do wyrobiska wynosił 600 s. Strumień powietrza na wylocie z wyrobiska wynosił 480 m³/min, natomiast w przodku wyrobiska ślepego 210 m³/min.



Rys. 3. Zakres stężeń gazów dla operatora w przodku i w wyrobisku przy nieruchomej maszynie w przodku: a) tlenek węgla; b) ditlenek azotu

Na rysunku 4 przedstawiono zmiany stężenia gazów w wyrobisku i dla operatora maszyny. Dla analizatora zainstalowanego w wyrobisku zmiany CO utrzymują się na ustabiliz-

zowanym poziomie, natomiast dla NO_2 następują wahania stężenia związane z kolejnymi wjazdami ładowarki do wyrobiska. Istotne zmiany stężenia gazów występują dla operatora ładowarki. W momencie, kiedy maszyna wjeżdża do wyrobiska, następuje wzrost stężenia CO oraz rejestrowane są piki stężeń NO_2 .

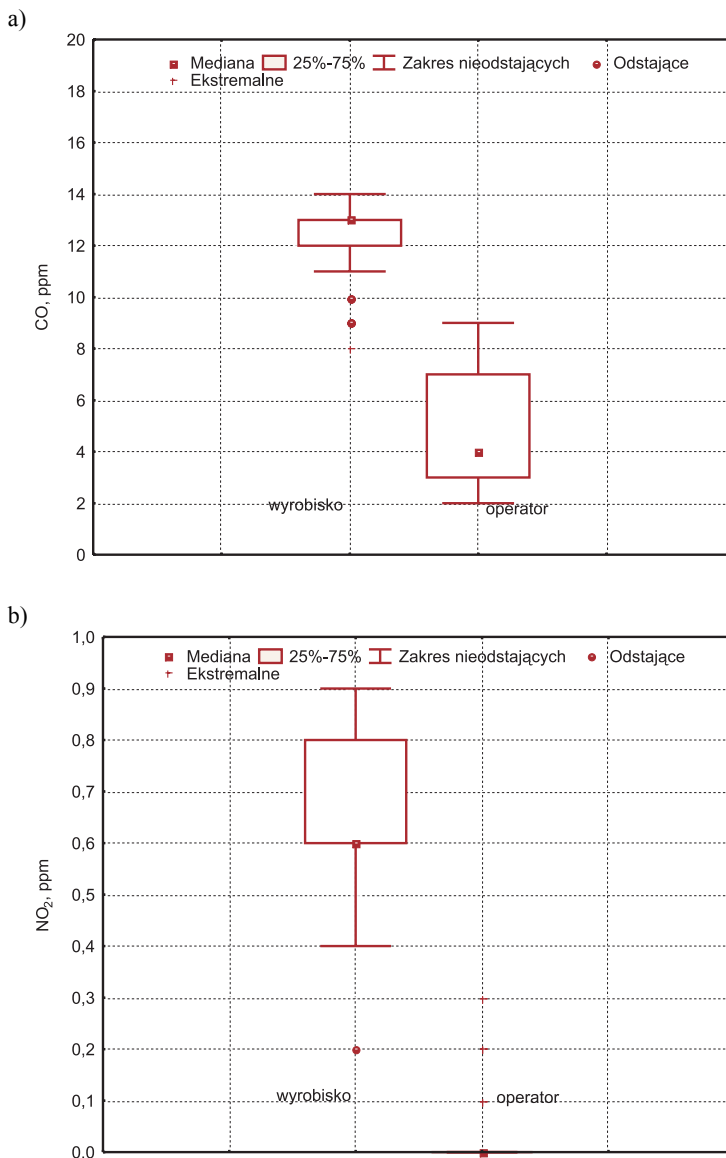


Rys. 4. Zmiany stężenia gazów dla maszyny odstawiającej urobek

Na rysunku 5 przedstawiono zakres zmian stężeń gazów dla operatora i w wyrobisku. Analizując zmiany stężenia gazów, należy stwierdzić, że dla operatora ładowarki stężenia są mniejsze niż rejestrowane w ślepych wyrobiskach, co świadczy o właściwych warunkach wentylacyjnych w ślepych wyrobiskach.

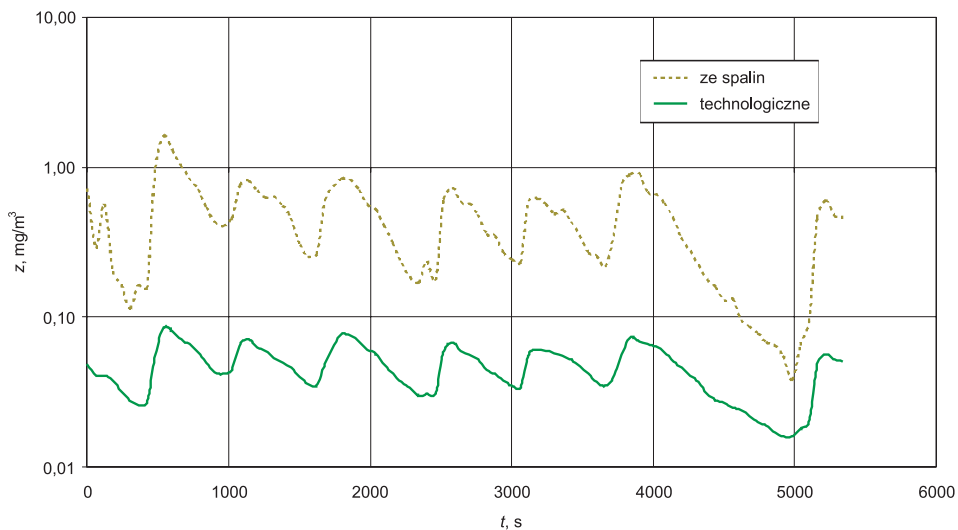
Rysunek 6 przedstawia zmiany stężenia pyłów pochodzące ze spalin i pozostałe określone jako technologiczne. Części stałe pochodzące od silników wysokoprężnych zdefiniowano jako pył o rozmiarze cząstek mniejszym niż $1,0 \mu\text{m}$. Dla zastosowanego w pomiarach przyrządu częściom stałym od maszyn samojezdnych odpowiadał pył w przedziale frakcyjnym od $0,5$ do $1,0 \mu\text{m}$.

Z analizy wykresu wynika, że pyły uznawane za części stałe pochodzące z emisji silników wysokoprężnych o rozmiarach do $1,0 \mu\text{m}$ posiadają 10% udział w całkowitym zapyleniu powietrza w wyrobisku. Analizując zamieszczone stężenia pyłów dla tych rozmiarów cząstek, można stwierdzić, że wzrost stężenia następuje w przypadku wjazdu maszyny do wyrobiska, a po wyjeździe maszyny z wyrobiska następuje obniżenie stężenia pyłów do poziomu tła.



Rys. 5. Zakres stężeń gazów dla operatora i w wrobisku dla maszyny odstawiającej urobek: a) tlenek węgla; b) ditlenek azotu

Na rysunku 7 zamieszczono zakres zmian stężeń pyłów pochodzących ze spalin oraz technologicznych. W przypadku tej maszyny wielkość zanieczyszczenia częściami stałymi spowodowana emisją spalin wynosiła średnio $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Stężenia pyłów ze spalin zmieniają się w zakresie od 15 do $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Rys. 6. Zmiany stężeń pyłów w wyrobisku ze spalin i pyły technologiczne przy maszynie odstawiającej urobek



Rys. 7. Zakres stężeń pyłów w wyrobisku ze spalin i pyły technologiczne przy maszynie odstawiającej urobek

6. Podsumowanie

Maszyna z napędem spalinowym daje duże możliwości ruchowe i produkcyjne. Jednak spaliny maszyn samojezdnych są przyczyną zanieczyszczenia powietrza kopalnianego. W powietrzu kopalnianym można osiągnąć graniczne normy emisji dla tlenków węgla, węglowodorów i — z pewnymi kłopotami — dla tlenków azotu oraz cząstek stałych. Niemniej jednak całkowite wyeliminowanie szkodliwych składników z atmosfery wyrobiska nie jest możliwe.

Dotychczasowe wyniki badań epidemiologicznych nie potwierdzają jednoznacznie narażenia zawodowego na spaliny silników spalinowych i jego wpływu na zwiększone ryzyko wystąpienia nowotworów płuc. Choć dowody oddziaływania spalin na organizm człowieka nie są w pełni udowodnione, nie można jednak wykluczyć ich rakotwórczego wpływu na załogę przebywającą w pobliżu maszyn z napędem spalinowym.

Zanieczyszczenia, jakie powodują maszyny, zależą między innymi od składu spalin, który można określać jedynie na podstawie indywidualnych analiz gazów spalinowych. Dlatego należy prowadzić systematyczne kontrole i regulacje pracy silników spalinowych.

W trakcie drażenia wyrobisk przy pracy w nich maszyn samojezdnych w wyrobiskach ślepych należy stosować wentylację tłoczącą. Zapewnia ona wynoszenie zanieczyszczeń z wyrobiska.

W celu ograniczenia narażenia pracowników na szkodliwe oddziaływanie składników spalin należy stosować środki zapobiegawcze:

- właściwe warunki przewietrzania przy pracy maszyn z silnikami Diesla,
- stosowanie układów oczyszczania spalin w maszynach z silnikami Diesla,
- odpowiedni system organizacji pracy,
- środki indywidualnej ochrony pracowników zatrudnionych przy pracy maszyn z silnikami Diesla.

Zanieczyszczenia stałe pochodzące ze spalin kształtują się na poziomie $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pozostałe zanieczyszczenia technologiczne są wielokrotnie wyższe i zależą od wielu czynników (zawodnienia wyrobiska), a spowodowane są wzniesaniem pyłu poprzez maszynę jadącą w wyrobisku oraz procesami załadunku i rozładunku urobku.

Przy odpowiednich warunkach przewietrzania możliwe jest zachowanie dopuszczalnych stężeń podanych w aktualnych normach, co pozwala na zagwarantowanie właściwych warunków pracy ludzi zatrudnionych w trakcie drażenia wyrobiska przy pracy w nich maszyn z silnikami spalinowymi.

LITERATURA

- [1] *Biglino D., Li H., Erickson R., Lund A., Yahiro H. and Shiotani M.*: EPR and ENDOR studies of NO_x and Cu^{2+} in zeolites: bonding and diffusion, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 1, 1999
- [2] *Cantrell B.K., Watts W.F.*: Diesel Exhaust Aerosol: Review of Occupational Exposure Appl. Occup. Environ. Hyg., 1997

- [3] *Li Y., Armor J.N.*: Catalytic decomposition of nitrous oxide on metal exchanged zeolites, *Appl. Catal. B: Environmental*, 1, 1992
- [4] *McKinnon D.L., Dasys A.A., Myers C.J.*: Field evaluation of diesel particulate filter system using a copper based fuel additive system for regeneration. The 6th US Mine Ventilation Symposium, (SME), 1993
- [5] *Merkisz J.*: Ekologiczne problemy silników spalinowych. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1998
- [6] Najbar M. (red.): Fizykochemiczne metody badań katalizatorów kontaktowych, Kraków, Uniwersytet Jagielloński 2001
- [7] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 17 czerwca 1998 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. Nr 513, poz. 79)
- [8] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 2 stycznia 2001 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. Nr 4, poz. 36)
- [9] *Szłazak N., Borowski M.*: Wentylacyjne aspekty stosowania maszyn z silnikami spalinowymi w kopalniach podziemnych. Kraków, Akademia Górniczo-Hutnicza 2002
- [10] *Waytulonis R.A.*: Diesel exhaust control in SME. Colorado, Mining Engineering Handbook, 2nd ed., vol. 1, Littleton, 1992