

# Wykorzystanie optycznej metody pomiaru stężenia pyłu do wspomagania oceny parametrów wpływających na możliwość zaistnienia wybuchu osiadłego pyłu węglowego

*W artykule scharakteryzowane zostały parametry i czynniki wpływające na możliwość zaistnienia wybuchu osiadłego pyłu węglowego. Przedstawiono sposób wyznaczania rozkładów ilości osiadłego pyłu węglowego powstającego podczas eksploatacji węgla i sposób wykorzystania tych rozkładów do wspomagania oceny zagrożenia wybuchem pyłu węglowego. Opisano działanie stacjonarnego pyłomierza optycznego PE-2, wykorzystanego w badaniach, oraz system pomiarowy kopalni. Zaprezentowano nową propozycję wspomagania oceny zagrożenia wybuchem opartą o ciągłe monitorowanie stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu.*

## 1. WPROWADZENIE

---

Według światowych statystyk wydobywanie węgla kamiennego na świecie wciąż wzrasta, a liczba zatrudnionych przy jego wydobyciu sięga około czterech milionów osób [6]. Osób, które są potencjalnie narażone na wybuch pyłu węglowego. Jak uczy historia górniczych eksplozji, wybuchy pyłu węglowego należą do najtragiczniejszych w skutkach. W odróżnieniu od innych zagrożeń – metanowego, pożarowego, wodnego itp. – zagrożenie wybuchem pyłu węglowego występuje w prawie każdej podziemnej kopalni wydobywającej węgiel kamienny. Głównym czynnikiem inicjującym wybuch pyłu węglowego jest zapalenie lub wybuch metanu. Wybuchy metanu mają jednak charakter lokalny w skali całej kopalni i nie obejmują dużej liczby wyrobisk. Powodem lokalnego charakteru wybuchu jest brak praktycznej możliwości utrzymania się w całym powietrzu wentylacyjnym wybuchowego stężenia metanu w zakresie 5 do 15%. Natomiast pył węglowy generowany podczas wydobywania węgla jest wszechobecny i przenoszony jest przez powietrze wentylacyjne na duże odległości.

Dotychczas zagrożenie wybuchem pyłu węglowego, pomimo że jest jednym z najtragiczniejszych

w skutkach, nie jest monitorowane w sposób ciągły. Obecnie stosowane metody oceny kształtowania się stanu zagrożenia wybuchem pyłu węglowego oparte są na analizie wyników badań laboratoryjnych próbek węgla pobieranych bezpośrednio z wyrobisk. Badania takie wykonane w sposób rzetelny, zgodnie z obowiązującymi przepisami, dają obiektywne i dokładne wyniki pozwalające na określenie stanu zagrożenia wybuchem pyłu węglowego w badanym rejonie. Częstotliwość wykonywania tych badań jest jednak mała, co przy dynamicznym charakterze zjawiska zapylenia oraz postępującej koncentracji wydobycia może powodować, że uzyskane wyniki mogą odbiegać znacząco od stanu rzeczywistego.

Rozwiązaniem tego problemu mogłoby być wprowadzenie ciągłego monitorowania stanu zapylenia powietrza metodą optyczną. Przyczyną niewprowadzenia takiego monitoringu w kopalniach węgla kamiennego jest przede wszystkim brak badań nad rozprzestrzenianiem się pyłów oraz trudności metrologiczne występujące przy pomiarze stężenia pyłu.

W dalszej części artykułu przedstawiona została metoda ciągłego monitorowania stężenia pyłu pozwalająca na ocenę parametrów wpływających na możliwość zaistnienia wybuchu osiadłego pyłu węglowego.

## 2. PARAMETRY I CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA MOŻLIWOŚĆ ZAISTNIENIA WYBUCHU PYŁU WĘGLOWEGO

Zaistnienie wybuchu pyłu węglowego to proces złożony. Na możliwość jego wystąpienia ma wpływ wiele czynników, takich jak [1]:

- rodzaj i intensywność źródeł zapylenia,
- stopień rozdrobnienia pyłu,
- właściwości palne pyłu,
- granice wybuchowości,
- inicjaty zapłonu,
- stężenie zapylenia i rozmieszczenie pyłu osiadłego w wyrobiskach,
- obecność metanu w powietrzu,
- gabaryty wyrobisk.

Główny wpływ na minimalizowanie możliwości wystąpienia wybuchu pyłu węglowego mają dwa czynniki: inicjaty zapłonu (zapłon) oraz paliwo (osiadły pył węglowy). Przepisy dotyczące zagrożenia metanowego i jego kontroli oraz przepisy dotyczące bezpiecznego użytkowania materiałów wybuchowych zapewniają bezpieczeństwo w aspekcie wybuchu pyłu węglowego pod warunkiem ich przestrzegania. Zastosowanie automatycznej metanometrii oraz prowadzenie robót strzałowych z uwzględnieniem przepisów bezpieczeństwa pozwalają na wystarczającą kontrolę tego elementu. Inaczej w przypadku drugiego z wymienionych czynników – paliwa, które ma największy wpływ na możliwość wystąpienia wybuchu. Całkowita eliminacja tego elementu jest niemożliwa. Pył powstający w procesie urabiania węgla jest nieunikniony i wszechobecny. Jedyne wpływy, jakie możemy na niego wywrzeć, to ograniczanie jego powstawania oraz usuwanie lub neutralizacja pozostałej jego części.

Do oceny możliwości wystąpienia wybuchu brane są pod uwagę dwa parametry określające ilość znajdującego się w wyrobisku pyłu. Pierwszy z nich to ilość pyłu zawieszzonego w powietrzu – stężenie pyłu, mierzone w jednostce masy na objętość ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). Pojęcie pyłu zawieszzonego w powietrzu (cząstek pyłu znajdujących się w gazie) z nazwy sugeruje opis stanu statycznego, co nie jest zgodne z rzeczywistością. Pył zawieszony w powietrzu podlega nieustannym ruchom, począwszy od ruchów Browna (dla małych cząstek) do ruchu spowodowanego przepływającym przez wyrobisko powietrzem wentylacyjnym. Parametr ten stosowany jest głównie do oceny zagrożenia pyłami szkodliwymi dla zdrowia.

Drugi z parametrów to intensywność osiadania pyłu w wyrobisku – pył osiadły, mierzony w jednostce masy na powierzchnię na czas ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{doba}$ ). Jest to pył wytrącony z fazy gazowej w wyniku występowania zjawiska

elutracji, impakcji i grawitacji [1]. Intensywność osiadania (inaczej ilość pyłu osiadłego) zależy od:

- intensywności źródła zapylenia,
- rozkładu wymiarowego (granulometrycznego) cząstek pyłu,
- prędkości przepływu powietrza przez wyrobisko, kształtu i rozmiaru wyrobiska oraz występowania ewentualnych przeszkód na drodze przepływu powietrza.

Na ocenę kształtowania się stanu zagrożenia wybuchem pyłu węglowego ma także wpływ parametr określający skuteczność zabezpieczenia pyłu kopalnianego przed wybuchem, który jest miarą zawartości części niepalnych stałych.

Złożony charakter zjawiska zapylenia i mnogość parametrów branych pod uwagę przy jego ocenie sprawiają, że badania nad sposobem rozprzestrzeniania się pyłu węglowego i jego transportem wraz z powietrzem wentylacyjnym nie są chętnie podejmowane. Duży wpływ na to mają także kłopoty metrologiczne oraz niewielka liczba urządzeń do pomiarów ciągłych, przystosowanych do pracy w warunkach atmosfery wybuchowej.

## 3. METODA CIĄGŁEGO MONITOROWANIA ZAPYLENIA DLA WSPOMAGANIA OCENY ZAGROŻENIA WYBUCHEM PYŁU

Koncepcja zaproponowanej metody stworzona została w Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG na podstawie ciągłych pomiarów stężenia pyłu respirabilnego w powietrzu wentylacyjnym i badań nad kształtowaniem się wartości stężeń wzdłuż drogi jego transportu z powietrzem wentylacyjnym od miejsca jego powstawania [3].

Podstawowym urządzeniem stosowanym do badań jest opracowany w Instytucie EMAG stacjonarny pyłomierz optyczny typu PŁ-2/50, przedstawiony na rysunku 1.



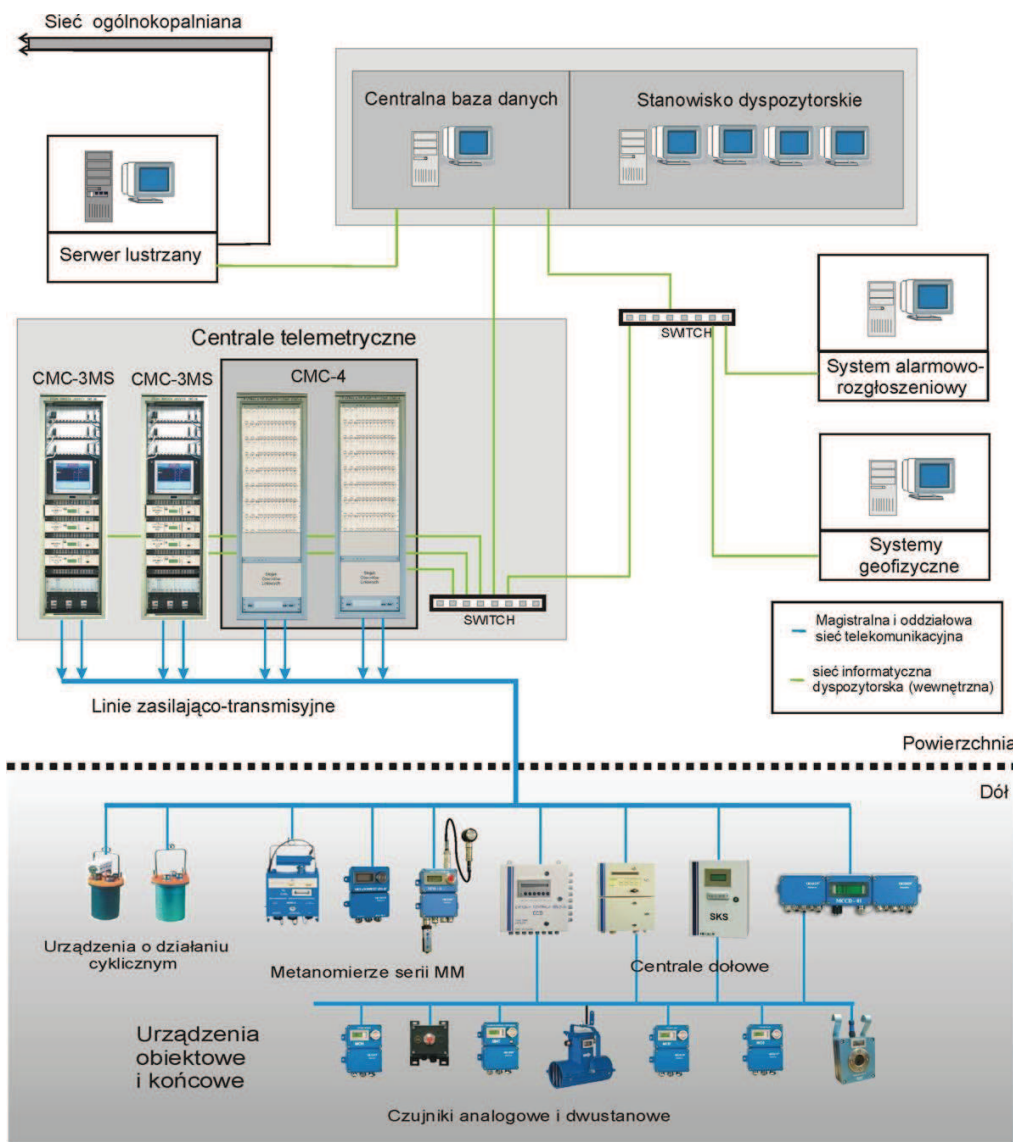
Rys. 1. Stacjonarny pyłomierz optyczny PŁ-2 (Instytut EMAG)

Jest to urządzenie optyczne pracujące w oparciu o zjawisko rozproszenia światła na cząstkach pyłu [4]. Fizyczna zasada jego działania wykorzystuje tzw. efekt Tyndalla, polegający na rozpraszaniu promieniowania świetlnego o stałej długości fali na roztworze koloidalnym [5], którym w tym przypadku jest mieszanina pyłu węglowego i powietrza.

Pyłomierz PŁ-2 umożliwia ciągły pomiar i rejestrację stężenia pyłu respirabilnego (średnica cząstek pyłu do ok. 8 µm) w zakresie 0÷100 mg/m<sup>3</sup> (TYP PŁ-2/100) lub od 0÷50 mg/m<sup>3</sup> (TYP PŁ-2/50), co jest związane z odpowiednią kalibracją pyłomierza. W pyłomierzu jako źródło światła wykorzystano diodę promieniowania podczerwonego. Intensywność rozproszonego na cząstkach pyłu promieniowania mierzona jest za pomocą fotodetektora, pracującego również w tym samym zakresie częstotliwości promieniowania. Pyłomierz PŁ-2 posiada dopuszczenie do pracy w strefach zagrożonych wy-

buchem (I M Ex ia I) i współpracuje z systemami metanowo-pożarowymi SMP-NT (rys. 2), SMP-NT/A.

Rejestracja i archiwizacja danych pomiarowych z pyłomierzy optycznych PŁ-2 realizowana jest w systemie pomiarowym kopalni w sposób ciągły, analogicznie jak dla innych czujników pomiarowych wchodzących w skład systemu. Każdy pyłomierz PŁ-2 kalibrowany jest pyłem węglowym pobranym z wyrobiska, w którym ma być zainstalowany. Pobrane próbki pyłu przesiewane są przez sito o wymiarze oczka 100 µm. Następnie pyłomierz PŁ-2 oraz pyłomierz CIP10-R (frakcja respirabilna) umieszcza się w specjalnie skonstruowanej komorze, umożliwiającej utrzymywanie ciągłego zapylenia w dłuższym okresie. Kalibracja realizowana jest przez porównanie średniej wartości zapylenia zarejestrowanej przez pyłomierz PŁ-2 w ciągu ośmiu godzin z wartością zapylenia zarejestrowaną przez pyłomierz grawimetryczny CIP10-R w tym samym czasie.



Rys. 2. Struktura systemu SMP-NT realizująca funkcje automatycznych zabezpieczeń metanowych i kontroli wentylacji w wybranych obszarach kopalni (Instytut EMAG)

Prezentowana metoda obliczania intensywności osiadania pyłu węglowego w wyrobisku jest metodą pośrednią, polegającą na wyznaczeniu średniego roz-

kładu pyłu respirabilnego na wybranym odcinku wyrobiska, a następnie prowadzeniu obliczeń według przedstawionej zależności:

$$M_o = \sum_{t=0}^t \left[ \int_{x_1}^{x_2} (C_U(x, t) \cdot z) dx \right] = \sum_{t=0}^t \left[ \int_{x_1}^{x_2} (A(t) \cdot z \cdot k \cdot e^{-bx}) dx \right] =$$

$$= \sum_{t=0}^t \left[ z \cdot k \cdot A(t) \int_{x_1}^{x_2} e^{-bx} dx \right] = \sum_{t=0}^t \left[ -\frac{z \cdot k \cdot A(t)}{b} (e^{-bx_2} - e^{-bx_1}) \right] \quad (1)$$

gdzie:

- $A(t)$  – wartość chwilowa stężenia pyłu na wylocie ze ściany [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ],
- $z$  – współczynnik uwzględniający zależność między zawartością frakcji całkowitej pyłu do frakcji respirabilnej (bezwymiarowy),
- $k$  – ilościowy współczynnik osiadania pyłu (bezwymiarowy),
- $b$  – jakościowy współczynnik osiadania pyłu [ $1/\text{m}$ ],
- $x$  – odległość [ $\text{m}$ ].

Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

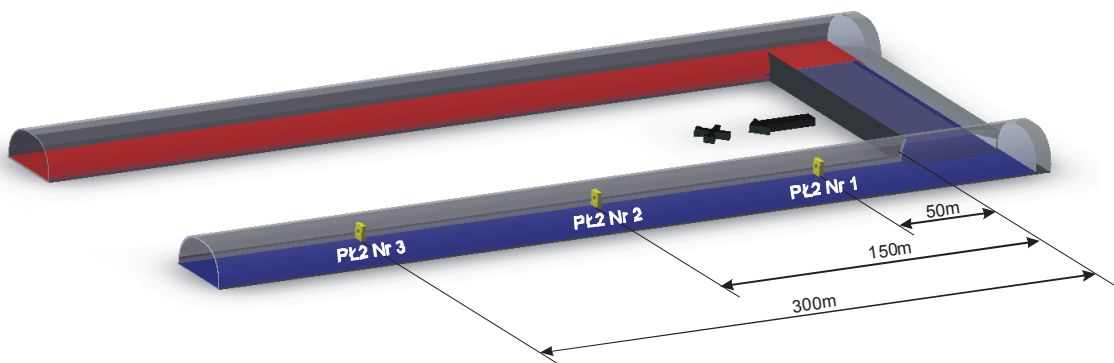
- pyłomierze dokonują pomiaru stężenia czystego pyłu węglowego w jednostce masy na objętość [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ],
- granice całkowania:
  - $x_1$  – początek wyrobiska (skrzyżowanie wylotu ściany z chodnikiem nadścianowym – wentylacyjnym),
  - $x_2$  – koniec analizowanego odcinka wyrobiska: 300 m.

Obliczenia polegają na całkowaniu rozkładów ubytku stężenia dla zarejestrowanych wartości chwilowych względem odległości, a następnie sumowaniu ich w czasie.

W celu wyznaczenia funkcji średniego rozkładu pyłu należy rozmieścić co najmniej trzy pyłomierze w sposób zilustrowany na rysunku 3.

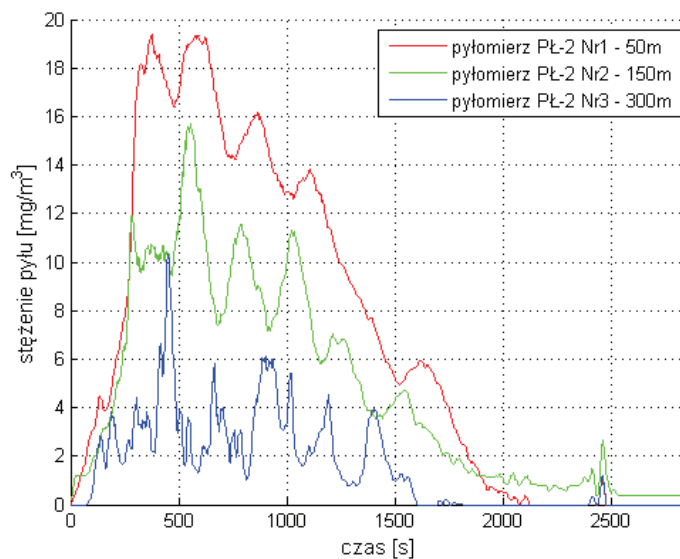
Do obliczeń przyjmuje się odległość od źródła pyłu (wylotu ze ściany) równą 300 m. Odpowiada to długości strefy zabezpieczającej (200 m), wynikającej z odpowiednich zapisów w przepisach dotyczących zagrożenia pyłowego, powiększonej o 50%. Lokalizacja pyłomierzy w badanej strefie wyrobiska powinna być taka, aby pierwszy z czujników znajdował się jak najbliżej wylotu ze ściany, drugi – mniej więcej w połowie strefy, a trzeci – na jej końcu. Lokalizacja czujników musi być także tak dobrana, aby zminimalizować wpływ zjawisk oddziałujących negatywnie na wynik pomiaru (np.: wodne kurtyny zraszające, źródła dymu). Takie rozmieszczenie czujników umożliwia obserwację zmian stężenia pyłu następujących wraz ze wzrostem odległości od źródła zapylenia, jakim jest w tym przypadku kombinacja pracującego kombajnu ścianowego, ruch obudowy, przesyp z przenośnika zgrzeblowego na taśmowy oraz kruszarka. Na rysunku 4. przedstawiono przykładowe przebiegi wartości stężenia pyłu, zarejestrowane przez pyłomierze PŁ-2.

Po wyznaczeniu funkcji średniego rozkładu stężenia pyłu dla badanego wyrobiska należy zdemontować dwa ostatnie pyłomierze (patrzac od wylotu ze ściany) i prowadzić obliczenia według zależności (1) podstawiając za  $A(t)$  chwilowe wartości stężenia pyłu zarejestrowane przez pyłomierz znajdujący się w bez-



Rys. 3. Rozmieszczenie pyłomierzy PŁ-2 w badanym wyrobisku

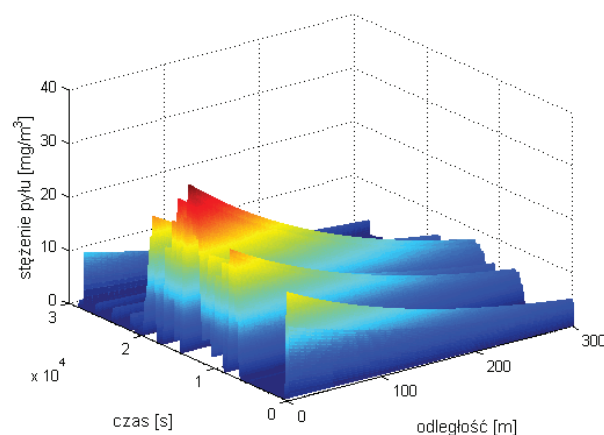




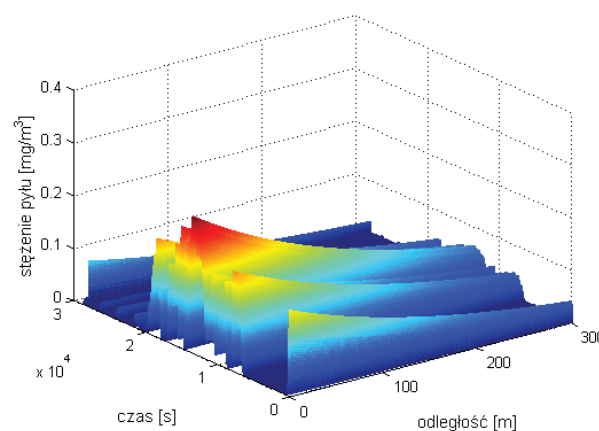
Rys. 4. Stężenie pyłu zarejestrowane przez pyłomierze optyczne PŁ-2 kolejno w odległości 50, 150 i 300 metrów od wylotu ze ściany

bezpośredniej bliskości wylotu ze ściany (źródła pyłu). Aby na podstawie wyznaczonej funkcji rozkładu oraz pomiarów wartości chwilowych stężenia pyłu możliwe było wyznaczanie ilości masy pyłu osiadłego, należy wprowadzić współczynnik, który uwzględnia zależność między zawartością frakcji całkowitej pyłu do frakcji respirabilnej mierzonej przez pyłomierze optyczne PŁ-2. Zależność tę można wyznaczyć na dwa sposoby. Pierwszy polega na wyznaczeniu stosunku zmierzonej pyłomierzem grawimetrycznym wartości pyłu całkowitego w danym przedziale czasu do wartości średniego stężenia pyłu zarejestrowanego przez pyłomierz optyczny PŁ-2 w tym samym przedziale czasu. Drugi sposób oparty jest na analizie wymiarowej cząstek pyłu osiadłego metodą dyfrakcji laserowej dla próbek pobranych ze spągu i ociosu wzdłuż badanego wyrobiska (np.: w miejscu zainstalowania czujników). Jest to także stosunek zawartości frakcji całkowitej do respirabilnej. Obydwie metody dają bardzo zbliżone wyniki i do obliczeń można przyjmować dowolną z nich.

Obliczenia według zaprezentowanej metody wyznaczania intensywności osiadania pyłu węglowego realizowane są przez specjalnie do tego celu napisany skrypt programu Matlab, który po wcześniejszym zaimportowaniu danych z systemu pomiarowego kopalni oblicza intensywność osiadania pyłu węglowego na badanym odcinku wyrobiska, wyrażony w jednostce masy na powierzchnię na czas ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{doba}$ ). Dodatkową funkcją realizowaną przez skrypt jest generowanie trójwymiarowych wykresów średniego stężenia pyłu (rys. 5) oraz przestrzennego rozkładu ubytku pyłu w wyrobisku (rys. 6).



Rys. 5. Przestrzenny rozkład stężenia pyłu



Rys. 6. Przestrzenny rozkład ubytku stężenia pyłu

Badania przeprowadzone w kopalni wykazały [2], że zastosowanie eksponencjalnego modelu średniego rozkładu pyłu w wyrobisku w połączeniu z ciągłym

pomiarem stężenia pyłu daje możliwość określania intensywności osiadania pyłu węglowego na wybranym odcinku wyrobiska. W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano wartości intensywności osiadania pyłu węglowego, wyrażone w gramach na metr kwadratowy na dobę – wartości maksymalne i minimalne przedstawione zostały w tabeli 1.

**Tabela 1.**  
**Maksymalne i minimalne wartości intensywności osiadania pyłu wynikające z badań**

	Ściana A		Ściana B		Ściana C	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.
Intensywność osiadania pyłu $M_0$ [g/m <sup>2</sup> /doba]	628,9	174,0	303,6	237,4	357,1	570,6

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że na 300-metrowym odcinku wyrobiska nadścianowego może zgromadzić się w ciągu doby ok. 0,2% średniego dobowego wydobywania ściany w postaci pyłu węglowego. Pozostała część wytworzonego pyłu transportowana jest dalej z powietrzem wentylacyjnym, lecz największa jego ilość pozostaje w ścianie, a następnie w zawale. Badania wykazały także liniową zależność intensywności osiadania od intensywności źródła pyłu.

Wyznaczone podczas obliczeń wartości intensywności osiadania pyłu węglowego znacząco przewyższają wartości podane w literaturze oraz dane przekazywane przez kopalnię. Pierwszym powodem takiego stanu jest to, że badana metoda nie uwzględnia zawartości części niepalnych stałych. Drugim powodem jest to, że metoda ta uwzględnia pył osiadający nie tylko na spągu, lecz na wszystkich elementach technicznego wyposażenia wyrobiska oraz na ociosach.

#### 4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie optycznej metody ciągłego pomiaru stężenia pyłu zawieszonego w powietrzu oraz wyznaczonego dla danego wyrobiska matematycznego modelu rozkładu średniego stężenia pyłu, w połączeniu z odpowiednim oprogramowaniem, może stanowić element służący do oceny parametrów wpływających na możliwość zaistnienia wybuchu osiadłego pyłu węglowego. Ocena zagrożenia wybuchem węglowego pyłu osiadłego może być prowadzona w oparciu o obserwację intensywności osiadania pyłu węglowego w wyrobisku, obliczaną na podstawie wyznaczonych rozkładów oraz ciągłego pomiaru stężenia pyłu, wyrażoną w jednostce masy na powierzchnię na czas.

Zaproponowany i przebadany model średniego rozkładu pyłu w wyrobisku i wyznaczone na jego podstawie przestrzenne rozkłady stężenia pyłu oraz ubytku jego masy wraz z odległością od źródła, oparte o wartości chwilowe stężenia pyłu, w bardzo dobry sposób przedstawiają charakter zjawiska, jakim jest transport i osiadanie cząstek pyłu w wyrobisku. Z uwagi na to, że stężenie pyłu zawieszonego w powietrzu jest wielkością niemetrolologiczną, niemającą jednoznacznego wzorca, zaprezentowana optyczna metoda, stanowiąca element oceny ryzyka wybuchu pyłu węglowego w oparciu o ciągłe optyczne pomiary stężenia pyłu, jest metodą względną. Wartości intensywności osiadania pyłu węglowego zależą od obliczonych współczynników  $b$ ,  $k$  i  $z$  oraz dodatkowo obarczone są błędem metody pomiarowej. Wartości jakościowego i ilościowego współczynnika osiadania pyłu ( $b$  i  $k$ ) zależą od panujących warunków wentylacyjnych w wyrobisku, intensywności źródła pyłu oraz przyjętej długości strefy wyrobiska, dla której prowadzone są obliczenia. Do obliczeń zastosowane zostały współczynniki o najmniejszych wartościach, odpowiadające najszybszemu (najintensywniejszemu) osiadaniu pyłu.

Wykorzystanie optycznej metody pomiaru stężenia pyłu do wspomagania oceny parametrów wpływających na możliwość zaistnienia wybuchu pyłu osiadłego w znaczący sposób może wpłynąć na poprawę bezpieczeństwa w tym względzie oraz może stanowić dobre narzędzie do kontroli i oceny profilaktyki przeciwybuchowej. Zaprezentowana metoda oceny ryzyka wybuchu pyłu jest metodą rozwojową. W dalszym ciągu kontynuowane są badania nad poprawą jej jednoznaczności oraz nad udoskonalaniem urządzeń służących do ciągłego pomiaru stężenia pyłu.

#### Literatura

1. *Lebecki K.*: Zagrożenia pyłowe w górnictwie. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice 2004.
2. *Malachowski M.*: Optyczna metoda ciągłego pomiaru osiadania pyłu w wyrobisku jako elementu oceny ryzyka wybuchu pyłu. Praca doktorska, GIG 2012.
3. *Mróz J., Malachowski M.*: Analiza zagrożeń pyłowych w kopalniach węgla kamiennego na podstawie ciągłego monitorowania, V Szkoła Aerologii Górniczej, Wrocław, X 2009.
4. *Mróz J., Malachowski M., Szczygielska M., Choroba T.*: System pomiarów zapylenia dla kopalni węgla kamiennego, X Konferencja Naukowa „Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne”, Poznań, VI 2008.
5. Strona internetowa <http://www.pl.wikipedia.org>, V 2010.
6. Strona internetowa <http://bp.com/statisticalreview>, VI 2011.