



Rozpoznanie stanu zagrożenia pożarowego w rejonach eksploatowanych ścian zawałowych w oparciu o wskaźnik Grahama i WSS

Recognition the state of fire hazard in the area of exploited longwalls based on Graham's ratio and WSS index

Mgr inż. Stanisław Słowik*

Treść: W artykule przedstawiono podejście do rozpoznania stanu zagrożenia pożarowego w rejonach ścian zawałowych oparte o wskaźnik Grahama i wskaźnik WSS. Jako przykład podano tu trzy typowe przypadki – normalnego ruchu ściany, ściany prowadzonej w warunkach podwyższonego stanu zagrożenia pożarowego oraz otamowanego rejonu ściany, po wystąpieniu bardzo wysokiego stanu zagrożenia pożarowego. Dla tych przypadków zaprezentowano wyniki precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek powietrza według czasu ich pobrania oraz wyliczone wartości wskaźnika Grahama (z uwzględnieniem, czy znajduje się w przedziale wiarygodności) i stopień wskaźnika WSS. Omówiono również sposób opracowania wskaźników WSS–1, WSS–2, WSS–3, WSS–4, WSS–5, WSS–6 i WSS–7 oraz przedstawiono jak interpretuje się stan zagrożenia pożarowego przy pomocy tych wskaźników.

Abstract: The article presents the approach to recognizing the state of fire hazard in the areas of hard coal longwalls based on the Graham's ratio and WSS index. As an example, three typical cases are given - normal longwall working, a longwall under conditions of increased fire hazard and an enclosed longwall area with very high fire hazard. For these cases, the results of precise chromatographic analyzes of air samples according to the time of their collection were presented, as well as the calculated values of the Graham's ratio (including its reliability range) and the degree of the WSS index. The method of developing WSS–1, WSS–2, WSS–3, WSS–4, WSS–5, WSS–6 i WSS–7 indices was also presented and how fire risk is interpreted using these indicators.

Słowa kluczowe:

węgiel; podziemna eksploatacja węgla kamiennego; zagrożenie pożarem; rozpoznawanie stanu zagrożenia pożarowego; wskaźnik Grahama; wskaźnik WSS Słowika; interpretacja zagrożenia pożarowego

Keywords:

coal; underground coal mining; fire hazard; recognition of fire hazard; graham's ratio; slowik's WSS index; interpretation of fire hazard

1. Wprowadzenie

Prawidłowe rozpoznanie stanu zagrożenia pożarowego w kopalniach węgla kamiennego jest bardzo ważne ze względu na bezpieczeństwo ludzi, a także czynnik ekonomiczny. Głównie dotyczy to rejonów eksploatowanych ścian, gdzie trzeba jak najszybciej reagować na wzrost tego zagrożenia, aby ustrzec się przed jego skutkami - zwłaszcza pożarem.

W celu rozpoznania stanu zagrożenia pożarowego stosuje się wiele różnych kryteriów. W polskim górnictwie to najczęściej: wskaźnik ilości tlenu węgla (wyznaczany dla próbek powietrza pobieranych w prądach opływowych, wskaźnik Grahama (wyznaczany dla próbek powietrza pobieranych ze zrobów i przestrzeni otamowanych), a także ocena zagrożenia pożarowego metodą kalorymetryczno-chromatograficzną (Cygankiewicz 2000, Cygankiewicz, Gapiński 2013, Trenczek 2003).

Na świecie stosowanych jest jeszcze wiele innych wskaźników, np.: wskaźnik Tricketta, wskaźnik oparty o CO/H w emitowanych gazach, wskaźnik Morrisa, wskaź-

nik emisji CO, wskaźnik Littona, wskaźnik oparty o H/CO (Brady 2008, Clif i in. 1993, Cygankiewicz, Gapiński 2013). Mnogość wskaźników świadczy o tym, że mają one ograniczoną sprawdzalność.

Niniejszy artykuł przedstawia propozycję interpretacji stanu zagrożenia pożarowego w oparciu o kryterium wskaźnika Grahama oraz wskaźnika WSS (wskaźnik stanu Słowika). Uwzględniono również rozkład stężeń gazów istotnych z punktu widzenia zagrożenia pożarowego.

Wskaźnik WSS został opracowany przez autora artykułu i jest on średnią arytmetyczną uzyskaną z siedmiu wskaźników oznaczanych jako WSS–1, WSS–2, WSS–3, WSS–4, WSS–5, WSS–6 i WSS–7.

Celem przedstawionej analizy zagrożenia pożarowego jest zaprezentowanie jakości interpretacji przez zastosowane kryteria. Omówione zostały trzy typowe przypadki:

- ściana zawałowa prowadzona w warunkach niskiego stanu zagrożenia pożarowego;
- ściana zawałowa prowadzona w warunkach zwiększonego stanu zagrożenia pożarowego;
- otamowany rejon ściany ze względu na bardzo wysoki stan zagrożenia pożarowego.

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

2. Wskaźniki stanu zagrożenia pożarowego w kopalniach węgla kamiennego

2.1. Przyjęte założenia i konstrukcja wskaźników

Wskaźniki WSS–1, WSS–2, WSS–3, WSS–4, WSS–5, WSS–6 i WSS–7 opisujące stan zagrożenia pożarowego w kopalniach węgla kamiennego zostały opracowane jako narzędzie mające wspomagać interpretację zagrożenia pożarem endogenicznym w rejonach ścian wydobywczych. Powstały one przy wykorzystaniu różnych metod matematycznych, m.in. analizy liczb kryterialnych i stanowią zależność uwzględniającą gazy istotne z punktu widzenia procesu utleniania węgla. Gazy te to: tlen (O_2), azot (N_2), tlenek węgla (CO), dwutlenek węgla (CO_2), etylen (C_2H_4), propylen (C_3H_6), acetylen (C_2H_2), wodór (H_2), a więc gazy powstające podczas procesu utleniania węgla, jak i wpływające na jego przebieg (Trenczek 2003). Końcową formę wskaźniki uzyskały w wyniku szeregu analiz i przekształceń, których celem było dostosowanie i zoptymalizowanie ich do warunków kopalnianych, uwzględniono tu m.in.:

- rozkład stężeń gazów zrobowych w warunkach braku zagrożenia pożarowego;
- rozkład stężeń gazów zrobowych w przypadku występowania zagrożenia pożarowego;
- możliwą ilość ognisk zagrzania węgla oraz ich wpływ na skład powietrza;
- interpretację zagrożenia pożarowego w oparciu o stężenia gazów istotnych, głównie takich jak: etylen, propylen, acetylen, tlenek węgla i wodór (Trenczek 2003);
- przeskalowanie wskaźników dla uzyskania tych samych granic;
- przekształcenia wyrównujące wpływ nietypowych i odstających wartości stężeń pojedynczych gazów (wodoru);
- zależności korygujące w przypadkach, kiedy obserwujemy wystąpienie zwiększonej intensywności rozpadu termicznego i zmniejszającego się utleniania.

Wstępnie uzyskano dziewięć wskaźników, jednak po analizie dwa wskaźniki odrzucono ze względu na podobieństwo do pozostałych. Ostatecznie pozostało siedem wskaźników, które oznaczono jako:

- WSS–1 i wskaźnik WSS–2, są to różne zależności, w których składzie jest: etylen, propylen, CO, wodór;

- WSS–3, to zależność, w której składzie jest: acetylen, etylen, CO;
- WSS–4, to zależność, w której składzie jest: propylen, CO;
- WSS–5, to zależność, w której składzie jest: propylen, CO, CO_2 ;
- WSS–6, to zależność, w której składzie jest: acetylen, CO, CO_2 ;
- WSS–7, to zależność, w której składzie jest: etylen, propylen.

Wszystkie ww. wskaźniki uwzględniają też funkcję korygującą w przypadkach, kiedy obserwujemy wystąpienie zwiększonej intensywności rozpadu termicznego i zmniejszającego się utleniania.

Wskaźniki określające stan zagrożenia pożarowego: WSS–1, WSS–2, WSS–3, WSS–4, WSS–5, WSS–6 i WSS–7 zostały tak przekształcone, aby uzyskiwane wyniki stały się bezwymiarowe, a jednocześnie zachowały skalę zmienności. Dzięki temu możliwe było uproszczenie interpretacji zagrożenia pożarowego przez wprowadzenie średniej tych wskaźników. Liczona jest ona jako średnia arytmetyczna wskaźników: WSS–1, WSS–2, WSS–3, WSS–4, WSS–5, WSS–6 i WSS–7.

2.2. Stopniowanie i sposób interpretacji stanu zagrożenia pożarowego

Wskaźnikowi WSS przyporządkowano przedziały, którym nadano umowne stopnie zagrożenia pożarowego wyrażone cyframi, zaczynając od 1 (brak oznak zagrożenia pożarowego), kończąc na 7 (zagrożenie pożarem). Cyfry te należy rozumieć jako poziom zagrożenia pożarowego, a nie wartość liczbowa (tabela 2).

Stopniowanie wskaźnika WSS uwzględnia ocenę zagrożenia pożarami endogenicznymi wyrobisk górniczych stosowaną przez polskie przepisy górnicze (Rozporządzenie ... 2016).

Przepisy górnicze stanowią, że ocenę zagrożenia wyrobisk górniczych pożarami endogenicznymi przeprowadza się głównie w oparciu o kryterium przyrostu tlenku węgla (DCO), ilości tlenku węgla (V_{CO}) oraz wskaźnika Grahama (Rozporządzenie ... 2016). Według tego można określić cztery stopnie stanu zagrożenia pożarem endogenicznym, dla których wskazuje się odpowiednie postępowanie w zaistniałej sytuacji (tabela 1):

Tabela 1. Stopniowanie stanu zagrożenia pożarowego wg kryterium przyrostu tlenku węgla (ΔCO) i ilości tlenku węgla (V_{CO}) oraz wskaźnika Grahama (G) (Rozporządzenie ... 2016)

Table 1. Grading of fire hazard according to the criterion of carbon monoxide increase (ΔCO) and the amount of carbon monoxide (V_{CO}) as well as the Graham's ratio (Rozporządzenie ... 2016)

Kryteria zagrożenia pożarowego wg wskaźników przyrostu tlenku węgla (Δ_{CO}) i ilości tlenku węgla (V_{CO})		Kryteria zagrożenia pożarowego wg wskaźnika Grahama (G)	
-	-	$0 < G \leq 0,0025$	sytuacja normalna - nie występuje zagrożenie pożarowe w zrobach
$0 < V_{CO} \leq 10$ l/min. przy $0,0010 < \Delta CO \leq 0,0026\%$	wzmoczona obserwacja w kontrolowanym rejonie	$0,0025 < G \leq 0,0070$	wzmoczona obserwacja atmosfery w zrobach
$10 < V_{CO} \leq 25$ l/min. przy $\Delta CO \leq 0,0026\%$	należy przystąpić do prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie	$0,0070 < G \leq 0,0300$	należy przystąpić do prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie
$V_{CO} > 25$ l/min. lub $\Delta CO > 0,0026\%$	akcja przeciwpożarowa	$G > 0,0300$	akcja przeciwpożarowa

- nie występuje zagrożenie pożarowe;
- prowadzenie wzmożonej obserwacji;
- prowadzenie prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia;
- prowadzenie akcji przeciwpożarowej.

Interpretacja w oparciu o wskaźnik WSS wprowadza dokładniejsze stopniowanie stanu zagrożenia pożarowego niż stopniowanie w oparciu o wskaźnik Grahama przedstawione w tabeli 1. Przyjęta większa ilość poziomów ma na celu bardziej precyzyjne rozpoznanie stanu zagrożenia pożarowego oraz efektywniejsze dopasowanie prac profilaktycznych. I tak, stopień 1. wskaźnika WSS ($WSS < 1,0$) odpowiada sytuacji normalnej, kiedy nie obserwujemy oznak zagrożenia pożarowego. Stopnie: 2. ($1,0 \leq WSS < 1,8$), 3. ($1,8 \leq WSS < 3,0$) i 4. ($3,0 \leq WSS < 4,5$) odpowiadają sytuacji, dla której wskazuje się prowadzenie wzmożonej obserwacji i intensyfikowanie działania wraz z rozwojem zagrożenia pożarowego (ze wzrostem stopnia). Stopnie: 5. ($4,5 \leq WSS < 10,9$) i 6. ($10,9 \leq WSS < 20,0$) odnoszą się do prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie. Natomiast stopień 7. ($20,0 \leq WSS$) odnosi się do stanu zagrożenia pożarem (tabela 2).

Przy wyznaczaniu wskaźnika WSS można uwzględnić wskaźnik Grahama pod warunkiem, że zostanie on przekształcony tak, aby podawał stan zagrożenia pożarowego w skali wskaźników WSS oraz odrzucał niewiarygodne wartości (Słowik, Świerczek 2014, 2015).

Wartości niepewne wskaźnika Grahama wynikają z jego konstrukcji matematycznej. Jeżeli mianownik wskaźnika zawiera się w przedziale:

$$0,2 < 0,265N_2 - O_2 < 5,7$$

to można powiedzieć, na poziomie prawdopodobieństwa co najmniej 95%, że wskaźnik Grahama przedstawia prawidłowo stan zagrożenia pożarowego. W pozostałych przypadkach nie można mieć takiej pewności i obserwujemy nieprecyzyjną ocenę stanu zagrożenia pożarowego przez kryterium wskaźnika Grahama. W przedziale lewostronnym, czyli dla wartości mianownika ($0,265N_2 - O_2$) $\leq 0,2$ może występować zawyżanie stanu zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama. Natomiast w przedziale prawostronnym, czyli dla wartości mianownika ($0,265N_2 - O_2$) $\geq 5,7$ możemy mieć do czynienia z zaniżaniem stanu zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama (Słowik, Świerczek 2014, 2015).

Zawyżanie stanu zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama najczęściej obserwuje się w przypadku próbek pobranych z miejsc dobrze przewietrzanych, np. ze zrobów ścian o dużej intensywności przewietrzania lub z za nieuszczelnionych tam izolacyjnych, gdzie różnica potencjałów powoduje przepływ stosunkowo dużej ilości powietrza za tamę. Może też być skutkiem niedokładnie pobranej próbki powietrza do analizy (tzw. próbki zapowietrzane).

Przypadki zaniżania stanu zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama obserwuje się najczęściej dla próbek pobieranych z głębokich zrobów, z rurociągów odmetanowania, z za tam izolacyjnych, a szczególnie przy stosowaniu inertyzacji zrobów.

Przeprowadzono analizę jak duży jest wpływ wskaźnika Grahama na średnią wartość wskaźników: WSS–1, WSS–2, WSS–3, WSS–4, WSS–5, WSS–6 i WSS–7, czyli na wskaźnik WSS. Wykonano to w oparciu o testy t-Studenta na równość średnich w dwóch grupach niezależnych, z uwzględnieniem zmienności w grupach (wariancji). Stwierdzono, że wskaźnik Grahama nie wpływa w istotny sposób na średnią wskaźników. Analizę wykonano porównując grupy o licznosci 307 elementów, co gwarantuje uzyskanie wyniku o bardzo dużej pewności, czyli charakteryzującego się bardzo dużą mocą testu. Można więc powiedzieć, że uwzględnienie wskaźnika Grahama zwiększy ilość elementów w średniej, lecz nie wpłynie w istotny sposób na interpretację zagrożenia pożarowego przez omawiane wskaźniki.

3. Interpretacja zagrożenia pożarowego dla wybranych przykładów, oparta o wskaźniki Grahama i WSS

Porównanie interpretacji stanu zagrożenia pożarowego uzyskanej w oparciu o wskaźnik Grahama oraz wskaźnik WSS wykonano dla trzech typowych przypadków – ruchu ściany w sytuacji normalnej (nie występuje zagrożenie pożarowe w zrobach), dla ściany prowadzonej w warunkach podwyższonego stanu zagrożenia pożarowego oraz otamowanego rejonu ściany po wystąpieniu zagrożenia pożarem. Dla tych przypadków zestawiono w tabelach wyniki analizy składu próbek powietrza z czasem ich pobrania. Podano też wyliczone: wartość wskaźnika Grahama, wartość jego mianownika z uwzględnieniem, czy znajduje się w przedziale wiarygodności oraz stopień wskaźnika WSS, który jest średnią arytmetyczną wskaźników WSS–1, WSS–2, WSS–3, WSS–4, WSS–5, WSS–6 i WSS–7 (nie uwzględniono wartości skorygowanego wskaźnika Grahama).

Tabela 2. Stopniowanie poziomu stanu zagrożenia pożarowego wg wskaźnika WSS

Table 2. Gradation of fire hazard level according to WSS indicator

Kryteria zagrożenia pożarowego wg wskaźnika WSS		
$WSS < 1,0$	1. stopień brak oznak zagrożenia pożarowego (sytuacja normalna)	nie obserwuje się zagrożenia pożarowego
$1,0 \leq WSS < 1,8$	2. stopień niski stan zagrożenia	wzmożona obserwacja
$1,8 \leq WSS < 3,0$	3. stopień średni stan zagrożenia	
$3,0 \leq WSS < 4,5$	4. stopień podwyższony stan zagrożenia	
$4,5 \leq WSS < 10,9$	5. stopień wysoki stan zagrożenia	prowadzenie prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie
$10,9 \leq WSS < 20,0$	6. stopień bardzo wysoki stan zagrożenia	
$20,0 \leq WSS$	7. stopień zagrożenie pożarem	akcja przeciwpożarowa

3.1. Przypadek pierwszy: próbki pobrane ze zrobów ściany w sytuacji normalnej - brak zagrożenia pożarowego w zrobach

Opis przypadku pierwszego (tabela 3, rys. 1, rys. 2): próbki powietrza pobierano ze zrobów ściany podczas prowadzenia eksploatacji. W przykładzie pokazano okres, kiedy występował stan normalny – nie odnotowano zagrożenia pożarowego. Okres ten obejmuje 72 dni. W analizowanym okresie pobrano 18 próbek powietrza.

W zaprezentowanym przykładzie nie stwierdzono zwiększonych stężeń metanu, gazów inertnych, czy tzw. próbek zapowietrzonych (z wysokim stężeniem tlenu), stąd nie odnotowano niepewnych wartości wskaźnika Grahama.

Wskaźnik Grahama nie przekraczał wartości 0,0025 określonej przez polskie przepisy górnicze jako graniczna dla stwierdzenia występowania zagrożenia pożarowego. Po osiągnięciu wspomnianej wartości ($G = 0,0025$) przepisy podają, że należy prowadzić wzmożoną obserwację atmosfery w zrobach.

Najwyższą wartość wskaźnika Grahama ($G = 0,0018$) wyznaczono dla próbki nr 14 (58 dzień). W przedstawionym okresie wskaźnik Grahama nie wskazywał na konieczność prowadzenia wzmożonej obserwacji (tabela 3, rys. 1).

Wskaźnik WSS początkowo sygnalizuje brak widocznych oznak zagrożenia pożarowego (stopień 1.), po czym dla próbki nr 4 (9 dzień) następuje wzrost do 2. stopnia. Maksymalnie wskaźnik WSS osiąga 3. stopień i występuje to kilkakrotnie (tabela 3, rys. 2). Pomimo, że zagrożenie jest na stosunkowo niskim poziomie, to zauważamy pojawiające się okresy z tendencją do wzrostu stanu zagrożenia pożarowego. Okresy wzrostu zagrożenia powinny skutkować wzmożoną obserwacją, czy ta tendencja nie utrzyma się.

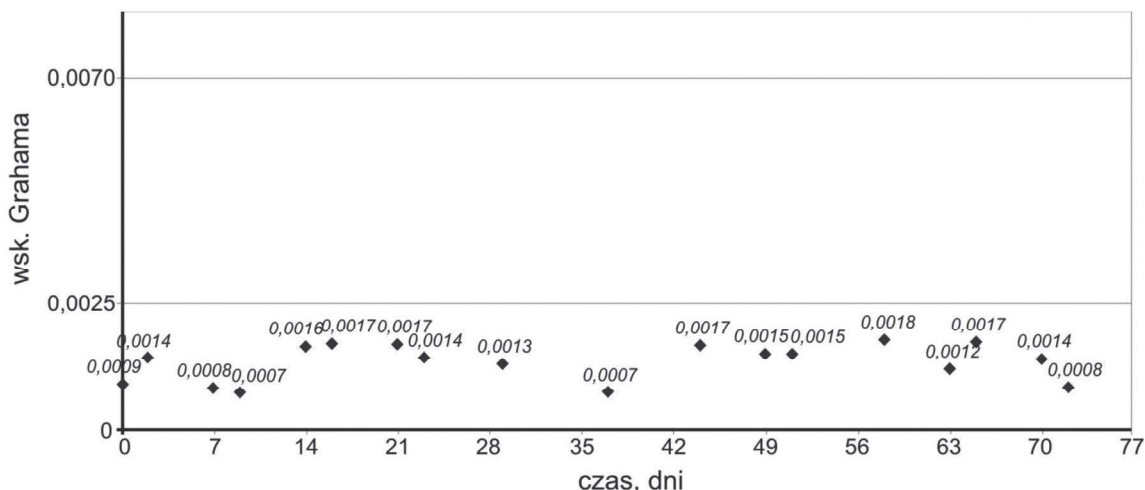
Śledząc stężenia gazów istotnych z punktu widzenia zagrożenia pożarowego (czyli związanych z procesem utleniania węgla i jego rozpadu termicznego) można zauważyć, że w tym przykładzie występują momenty wzrostu stężeń. Wyróżniają się dwie tendencje wzrostowe, po których następuje spadek, są to okresy w przedziale 9–23 dzień oraz 63–65 dzień (tabela 3).

W przedstawionym przypadku można zaobserwować, że wrażliwszy na zmianę zagrożenia pożarowego jest wskaźnik WSS. Spadek i wzrost stanu zagrożenia pożarowego sygnalizowany przez wskaźnik WSS przekłada się na stężenia istotnych gazów.

Tabela 3. Przypadek pierwszy. Wyniki analiz chemicznych próbek powietrza pobranych ze zrobów ściany w sytuacji normalnej – brak zagrożenia pożarowego z obliczonym wskaźnikiem Grahama i WSS

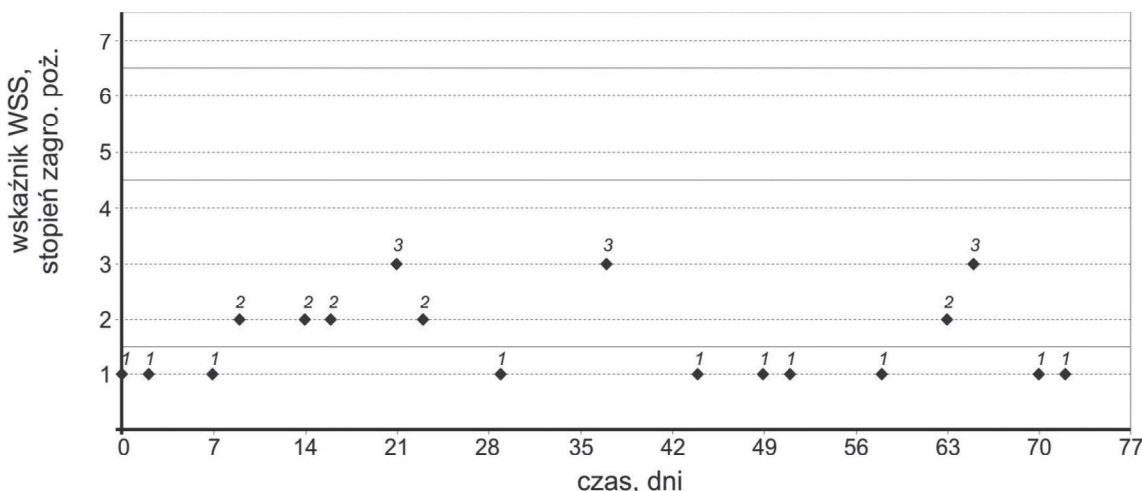
Table 3. First case. Results of chemical analyzes of air samples taken from the longwall goafs in a normal situation – no fire hazard, with the Graham's ratio and WSS index calculated

Opis punktu	Nr próbki	Czas, dni	C ₂ H ₄ Etylen, ppm	C ₃ H ₆ Propylen, ppm	C ₂ H ₂ Acetylen, ppm	CO Tlenek węgla ppm	O ₂ Tlen %	N ₂ Azot %	CO ₂ Dwutlenek węgla %	CH ₄ Metan %	H ₂ Wodór ppm	Graham	mianownik wskaźnika Grahama	Graham z uwzględnieniem wiarygodności	WSS stopień zagrożenia
zrobry ściany MN	1	0	0,06	0,04	0,002	24	18,7	81,0	0,29	0,00	2,3	0,0009	2,73	0,0009	1
	2	2	0,02	0,02	0,001	27	19,4	80,3	0,35	0,00	2,2	0,0014	1,92	0,0014	1
	3	7	0,04	0,03	0,001	22	18,6	80,7	0,64	0,05	2	0,0008	2,78	0,0008	1
	4	9	0,09	0,05	0,002	37	16,7	82,4	0,89	0,05	3,4	0,0007	5,19	0,0007	2
	5	14	0,06	0,05	0,001	38	18,9	80,3	0,76	0,05	3,9	0,0016	2,34	0,0016	2
	6	16	0,06	0,04	0,003	40	18,9	80,4	0,67	0,06	2,5	0,0017	2,37	0,0017	2
	7	21	0,07	0,05	0,001	49	18,4	80,5	1,03	0,05	2,6	0,0017	2,94	0,0017	3
	8	23	0,07	0,07	0,001	48	18,2	81,6	0,16	0,07	2,8	0,0014	3,43	0,0014	2
	9	29	0,05	0,03	0,001	20	19,6	79,8	0,53	0,09	2,5	0,0013	1,55	0,0013	1
	10	37	0,10	0,06	0,002	35	16,8	81,8	1,3	0,07	3,5	0,0007	4,90	0,0007	3
	11	44	0,03	0,02	0,002	8	20,5	79,1	0,27	0,19	1,5	0,0017	0,48	0,0017	1
	12	49	0,03	0,02	0,001	9	20,4	79,1	0,38	0,11	1,5	0,0015	0,60	0,0015	1
	13	51	0,05	0,03	0,001	19	19,8	79,7	0,37	0,10	1,7	0,0015	1,29	0,0015	1
	14	58	0,05	0,04	0,003	23	19,8	79,7	0,37	0,07	1,5	0,0018	1,30	0,0018	1
	15	63	0,08	0,04	0,001	33	18,6	80,8	0,56	0,06	2	0,0012	2,78	0,0012	2
	16	65	0,11	0,09	0,002	50	18,5	80,8	0,62	0,05	2,5	0,0017	2,92	0,0017	3
	17	70	0,06	0,05	0,003	25	19,4	80,1	0,47	0,06	0,8	0,0014	1,81	0,0014	1
	18	72	0,03	0,03	0,001	12	19,7	80,0	0,29	0,05	1,5	0,0008	1,49	0,0008	1



Rys. 1. Przypadek pierwszy. Wskaźnik Grahama wyznaczony dla próbek powietrza pobranych ze zrobów ściany w sytuacji normalnej – brak zagrożenia pożarowego

Fig. 1. First case. Graham's ratio determined for air samples taken from the longwall goafs in a normal situation – no fire hazard



Rys. 2. Przypadek pierwszy. Wskaźnik WSS wyznaczony dla próbek powietrza pobranych ze zrobów ściany w sytuacji normalnej – brak zagrożenia pożarowego

Fig. 2. First case. WSS index determined for air samples taken from the longwall goafs in a normal situation – no fire hazard

3.2. Przypadek drugi: próbki powietrza pobrane ze zrobów ściany przy zwiększonym stanie zagrożenia pożarowego

Opis przypadku drugiego (tabela 4, rys. 3, rys. 4): próbki powietrza pobierano ze zrobów czynnej ściany podczas jej prowadzenia w warunkach zwiększonego stanu zagrożenia pożarowego. Zaprezentowany okres obejmuje 64 dni. W tym czasie przeprowadzono 28 analiz chemicznych próbek powietrza. W próbkach powietrza stwierdzono zwiększone stężenia azotu, co świadczy o prowadzeniu profilaktyki poprzez inertyzację przestrzeni zrobowej przy użyciu tego gazu.

W analizowanym okresie dla większości próbek wskaźnik Grahama przyjmował niepewne wartości, było to 18 przypadków z 28 (64%). Wiarygodnych wartości wskaźnika Grahama było 10 (36%). Na występowanie niepewnych wartości wskaźnika Grahama miało tu wpływ podwyższone stężenie azotu, któremu dodatkowo towarzyszyła zwiększona ilość metanu.

Wpłynęło to na wartość mianownika wskaźnika Grahama, który często znajdował się w przedziale $(0,265N_2 - O_2)^3$ 5,7 (wzrost mianownika powodował zmniejszenie wartości ułamka) i obserwowano zaniżanie stanu zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama (Słowik, Świerczek 2014).

Wskaźnik Grahama w przedstawionym okresie, w dwóch przypadkach przekroczył wartość 0,0025, ale był poniżej wartości 0,0070. Znajdował się więc w przedziale, po osiągnięciu którego przepisy zalecają prowadzenie wzmożonej obserwacji atmosfery w zrobach. Stan taki wystąpił w końcowym okresie prowadzonej analizy.

Z punktu widzenia interpretacji wg wskaźnika Grahama, zagrożenie pożarowe w zrobach monitorowanej ściany kształtowało się na niskim poziomie prawie w całym okresie, a tylko w końcowym przedziale czasu wskazał on na konieczność prowadzenia wzmożonej obserwacji atmosfery w zrobach (tabela 4, rys. 3).

Wskaźnik WSS początkowo wahał się pomiędzy 3. i 2.

stopniem zagrożenia, a następnie utrzymywał na poziomie stopnia 3. do momentu, kiedy w okresie 15 do 21 dnia wskazał 5. stopień, a więc nastąpił wzrost zagrożenia.

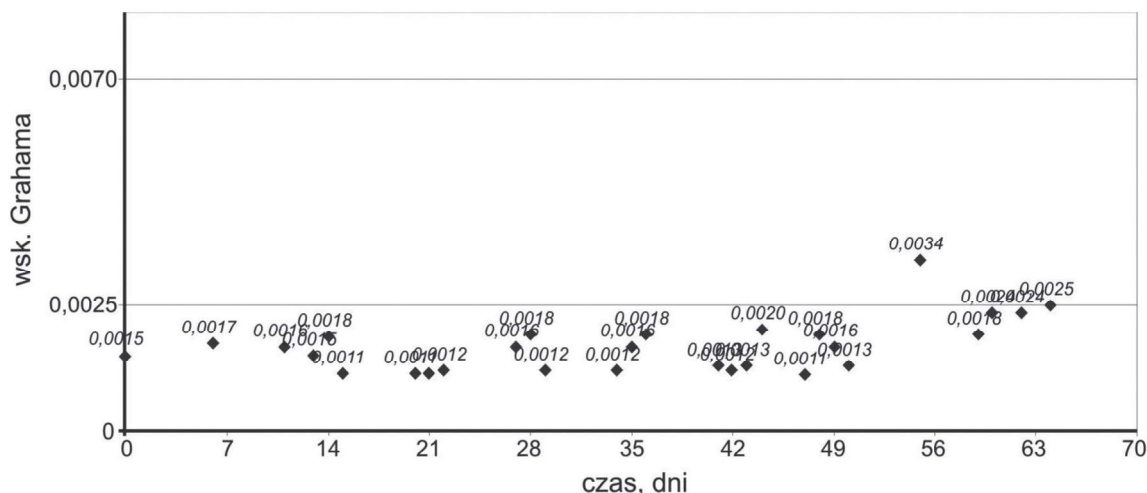
Należy tu zaznaczyć, że stopnie 2. 3. i 4. odnoszą się do działań opartych głównie na wzmożonej obserwacji zagrożenia, natomiast poziom stopnia 5. wskazuje na prowadzenie prac profilaktycznych (tabela 2). Oczywiście ostateczną decyzję co do rodzaju działań podejmuje inżynier wentylacji.

W dalszym okresie występowały wahania wskaźnika WSS pomiędzy stopniem 3. a 5., ale bez tendencji wzrostowej, można więc mówić o powstrzymaniu wzrostu zagrożenia pożarowego, lecz wskazane byłoby prowadzenie prac profilaktycznych (tabela 4, rys. 4).

W przypadku stężeń gazów istotnych z punktu widzenia zagrożenia pożarowego, początkowo występowały podwyższone stężenia z tendencją rosnącą. Natomiast od około 20 dnia zaobserwowano wyraźnie podwyższone poziomy stężeń gazów, który utrzymywał się (z wahaniami) przez cały pozostały okres (tabela 4).

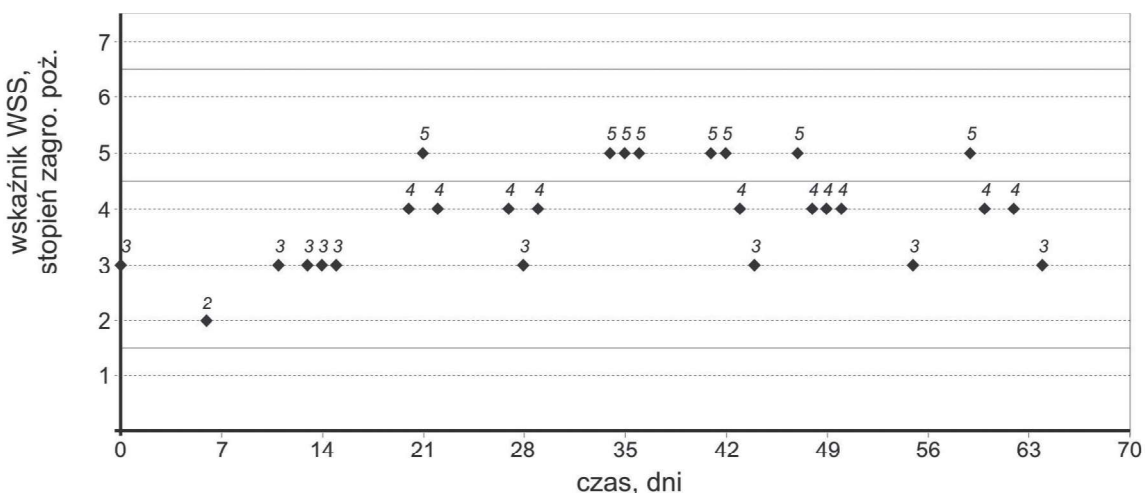
Tabela 4. Przypadek drugi. Wyniki analiz próbek powietrza pobranych ze zrobów ściany w warunkach zwiększonego stanu zagrożenia pożarowego, z obliczonym wskaźnikiem Grahama i WSS
Table 4. Second case. Results of analysis of air samples taken from the longwall goafs in conditions of increased fire hazard, with the Graham's ratio and WSS index calculated

Opis punktu	Nr próbki	Czas, dni	C ₂ H ₄ Etylen, ppm	C ₃ H ₆ Propylen, ppm	C ₂ H ₂ Acetylen, ppm	CO Tlenek węgla ppm	O ₂ Tlen %	N ₂ Azot %	CO ₂ Dwutlenek węgla %	CH ₄ Metan %	H ₂ Wodór ppm	Graham	Mianownik wskaźnika Grahama	Graham z uwzględnieniem wiarygodności	WSS stopień zagrożenia
zroby ściany KL	1	0	0,05	0,04	0,001	78	16,3	81,8	0,42	1,39	7,3	0,0015	5,35	0,0015	3
	2	6	0,02	0,02	0,001	40	18,8	79,8	0,99	0,33	4,1	0,0017	2,32	0,0017	2
	3	11	0,13	0,05	0,001	59	17,9	81,0	0,35	0,74	7,9	0,0016	3,62	0,0016	3
	4	13	0,16	0,05	0,001	84	16,0	82,0	0,55	1,37	8,7	0,0015	5,72	niepewny	3
	5	14	0,11	0,05	0,002	74	17,4	80,7	0,47	1,39	7,1	0,0018	4,02	0,0018	3
	6	15	0,18	0,04	0,001	78	14,4	80,5	1,04	4,03	9	0,0011	6,97	niepewny	3
	7	20	0,22	0,11	0,001	110	11,9	83,3	1,07	3,67	11,3	0,0011	10,20	niepewny	4
	8	21	0,26	0,14	0,001	170	7,6	85,5	1,28	5,46	21,3	0,0011	15,06	niepewny	5
	9	22	0,21	0,1	0,001	125	11,5	83,4	0,9	4,07	13,8	0,0012	10,61	niepewny	4
	10	27	0,2	0,07	0,001	135	13,5	82,7	0,84	2,94	8,9	0,0016	8,44	niepewny	4
	11	28	0,08	0,04	0,001	86	17,0	81,5	0,39	1,06	6,8	0,0019	4,58	0,0019	3
	12	29	0,16	0,07	0,001	103	13,9	84,0	0,69	1,42	19,6	0,0012	8,39	niepewny	4
	13	34	0,3	0,14	0,001	175	7,9	84,2	1,34	6,39	18,5	0,0012	14,46	niepewny	5
	14	35	0,24	0,1	0,001	200	10,4	86,2	0,93	2,31	17,2	0,0016	12,45	niepewny	5
	15	36	0,26	0,11	0,001	190	12,2	84,9	0,94	1,80	18,3	0,0019	10,26	niepewny	5
	16	41	0,28	0,12	0,001	144	11,8	84,7	0,85	2,54	30,4	0,0013	10,68	niepewny	5
	17	42	0,25	0,11	0,001	145	10,7	84,8	1,01	3,36	23,1	0,0012	11,72	niepewny	5
	18	43	0,19	0,09	0,001	116	13,0	83,4	0,86	2,66	14,5	0,0013	9,16	niepewny	4
	19	44	0,08	0,04	0,001	63	18,0	80,1	0,48	1,32	8	0,0020	3,21	0,0020	3
	20	47	0,39	0,21	0,001	179	5,9	85,8	1,57	6,53	32,8	0,0011	16,90	niepewny	5
	21	48	0,13	0,05	0,001	120	15,1	82,2	0,64	2,01	14,5	0,0018	6,67	niepewny	4
	22	49	0,15	0,08	0,001	125	14,1	82,8	0,81	2,21	28,6	0,0016	7,88	niepewny	4
	23	50	0,25	0,1	0,001	122	12,2	82,9	1,04	3,72	20,6	0,0013	9,72	niepewny	4
	24	55	0,06	0,04	0,001	61	19,3	79,5	0,42	0,75	18	0,0034	1,79	0,0034	3
	25	59	0,27	0,1	0,001	121	15,1	82,9	0,85	1,11	39,9	0,0018	6,86	niepewny	5
	26	60	0,49	0,16	0,001	87	17,8	81,0	0,46	0,70	29	0,0024	3,69	0,0024	4
	27	62	0,13	0,07	0,002	118	16,7	81,4	0,77	1,08	33	0,0024	4,84	0,0024	4
	28	64	0,07	0,06	0,001	58	19,0	80,2	0,34	0,51	18	0,0025	2,28	0,0025	3



Rys. 3. Przypadek drugi. Wskaźnik Grahama wyznaczony dla próbek powietrza pobranych ze zrobów ściany w warunkach zwiększonego stanu zagrożenia pożarowego

Fig. 3. Second case. Graham's ratio determined for air samples taken from the longwall goafs in conditions of increased fire hazard



Rys. 4. Przypadek drugi. Wskaźnik WSS wyznaczony dla próbek powietrza pobranych ze zrobów ściany w warunkach zwiększonego stanu zagrożenia pożarowego

Fig. 4. Second case. WSS index determined for air samples taken from the longwall goafs in conditions of increased fire hazard

3.3. Przypadek trzeci: próbki powietrza pobrane zza tamy podczas wystąpienia wysokiego zagrożenia pożarowego

Opis przypadku trzeciego (tabela 5, rys. 5, rys. 6): próbki powietrza pobierano zza tamy w czasie wystąpienia wysokiego stanu zagrożenia pożarowego. Przedstawiony okres obejmuje 42 dni, w ciągu którego wykonano 10 analiz chemicznych próbek powietrza.

Wskaźnik Grahama początkowo sygnalizował zwiększony stan zagrożenia pożarowego, dla którego zaleca się wzmożoną obserwację atmosfery ($0,0025 < G \leq 0,0070$). Następnie, od próbki nr 3, wskazał na brak występowania zagrożenia pożarowego ($0 < G \leq 0,0025$). Należy tu zauważyć, że prawie wszystkie wartości wskaźnika Grahama były niepewne (oprócz próbki nr 2), a wskaźnik Grahama w tych przypadkach zaniżał poziom zagrożenia pożarowego – czego nie uwzględniają polskie przepisy.

W rozpatrywanym przypadku niepewne wartości wskaźnika Grahama były efektem nie tylko zwiększonej ilości azotu (podobnie jak w przykładzie drugim), ale także wysokich stężeń metanu. Wpłynęło to na mianownik tego wskaźnika, który przyjmował wartości z przedziału $(0,265N_2 - O_2)^3$ 5,7 i obserwowano zaniżanie stanu zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama (Słowik, Świerczek 2014). Np. dla próbki nr 3 wskaźnik Grahama wyniósł $G = 0,0014$, zaś stężenie tlenu wynosiło $O_2 = 12,1\%$, tlenu węgla $CO = 132$ ppm, etylenu $C_2H_4 = 7,91$ ppm, propylenu $C_3H_6 = 1,1$ ppm oraz acetylenu $C_2H_2 = 0,017$ ppm.

Wskaźnik WSS w przypadku próbki nr 1 wskazał na zagrożenie pożarem (najwyższy, 7. stopień). Następnie sygnalizował postępujący spadek zagrożenia, najpierw do poziomu stopnia 6. (około 6 – 9 dzień) i w kolejnych dniach dalszy spadek do stopnia 5. W końcowym okresie osiągnął stopień 4.

Biorąc pod uwagę stężenia istotnych gazów, stwierdzono bardzo wysokie wartości tych stężeń w próbce nr 1. Zaś w

kolejnych próbkach obserwowano skutki otamowania i inertyzacji azotem zagrożonej przestrzeni zrobowej. Nastąpił spadek tlenu i tlenu węgla, utrzymywały się natomiast wysokie stężenia etylenu i propylenu, na których obecność wpływa nie tylko proces utleniania węgla, ale też jego rozpad termiczny.

Porównując wskaźniki: WSS i Grahama, można zauważyć, że wskaźnik WSS na początku podawał bardzo duży stan zagrożenia pożarowego (stopień 7.), a później nastąpił jego spadek do stopnia 4. Natomiast wskaźnik Grahama w prawie wszystkich przypadkach był niepewny (9 z 10 przypadków). Zdecydowanie pewniejszą interpretację uzyskano więc w oparciu o wskaźnik WSS.

4. Podsumowanie

Celem artykułu było przedstawienie sposobu interpretacji zagrożenia pożarowego w oparciu o kryterium wskaźnika Grahama oraz wskaźnika WSS, uwzględniono również rozkład stężeń gazów istotnych z punktu widzenia zagrożenia pożarowego.

Wskaźnik WSS to średnia arytmetyczna wskaźników: WSS–1, WSS–2, WSS–3, WSS–4, WSS–5, WSS–6 i WSS–7 opracowanych przez Autora. Wskaźniki te powstały jako narzędzie mające wspomagać rozpoznanie stanu zagrożenia pożarowego. Skonstruowano je w taki sposób, aby sprawdzały się w tym samym przedziale liczbowym. Dzięki temu, że nadano im ten sam wymiar (skalę) możliwe było wprowadzenie jednego wskaźnika (WSS) będącego średnią arytmetyczną. Wskaźnikowi WSS przyporządkowano przedziały, którym nadano umowne stopnie zagrożenia pożarowego wyrażone cyframi, zaczynając od 1 (brak oznak zagrożenia pożarowego), kończąc na 7 (zagrożenie pożarem). Cyfry te należy rozumieć jako poziom zagrożenia pożarowego, a nie wartość liczbową. Ze wzrostem cyfry, rośnie poziom zagrożenia pożarowego (tabela 2).

Stopniowanie stanu zagrożenia pożarowego przez wskaźnik WSS uwzględniła ocenę zagrożenia pożarami wyrobisk górniczych stosowaną przez polskie przepisy górnicze (tabela 1).

W artykule przedstawiono i omówiono trzy różne przypadki stanu zagrożenia pożarowego, które były monitorowane z wykorzystaniem precyzyjnej analizy chromatograficznej próbek powietrza. Pierwszy przypadek dotyczył prowadzenia ściany w warunkach sytuacji normalnej, braku zagrożenia pożarowego. Drugi przypadek, to ściana, w której wystąpiło zwiększone zagrożenie pożarowe. I trzeci, to otamowany rejon ściany podczas wystąpienia wysokiego zagrożenia pożarowego.

Z przedstawionych i omówionych przykładów wynika, że wskaźnik WSS będący średnią arytmetyczną uzyskaną z siedmiu wskaźników oznaczanych jako WSS–1, WSS–2, WSS–3, WSS–4, WSS–5, WSS–6 i WSS–7 stwarza nowe możliwości interpretacji zagrożenia pożarowego przez wprowadzenie większej ilości poziomów stopniowania. Wykazuje też podwyższoną odporność na zakłócenia związane ze zmianą składu próbek gazowych wynikającą m.in. z prowadzenia inertyzacji. W związku z powyższym może stać się pomocnym narzędziem przy rozpoznaniu zagrożenia pożarowego w kopalniach węgla kamiennego.

Wskaźniki: WSS–1, WSS–2, WSS–3, WSS–4, WSS–5, WSS–6, WSS–7 cechują się dużą złożonością wynikającą z założeń przyjętych przy ich konstruowaniu, dlatego przy współpracy autora artykułu i Lucjana Świerczka został opracowany program komputerowy, który określa stan zagrożenia pożarowego, wykorzystując wspomniane wskaźniki.

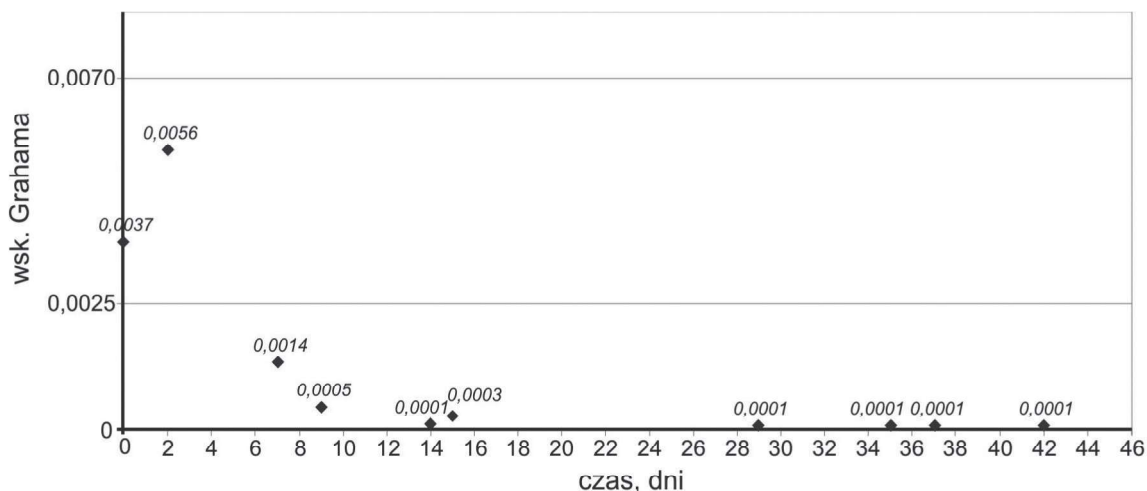
Literatura

BRADY D. 2008 - Problems with Determining Oxygen Deficiencies in Ratios Used for Assessing Spontaneous Combustion Activity in Aziz. Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, s. 209-216, Coal.

CLIF D.J., BELL S.L., BOFINGER C.M., KITCHEN B.P. 1993 - The Use of Gas Analysis to Aid in the Early Detection and Monitoring of Fires and Heating in Underground

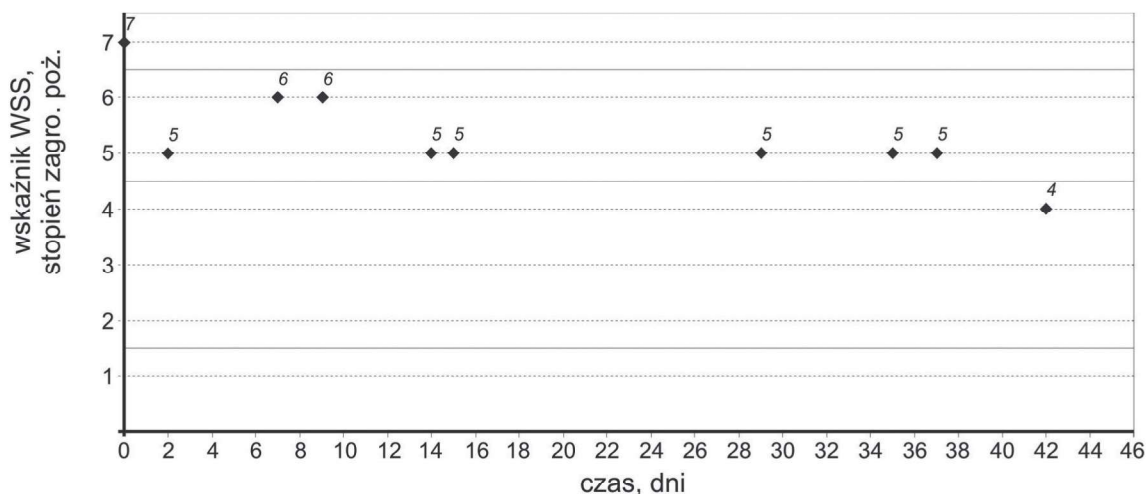
Tabela 5. Przypadek trzeci. Wyniki analiz próbek powietrza pobranych zza tamy podczas wystąpienia wysokiego zagrożenia pożarowego, z obliczonym wskaźnikiem Grahama i WSS
Table 5. Third case. Results of analyses of air samples taken from outside the dam in conditions of high fire hazard, with the calculated Graham's ratio and WSS index

Opis punktu	Nr próbki	Czas, dni	C ₂ H ₄ Etylen, ppm	C ₃ H ₆ Propylen, ppm	C ₂ H ₂ Acetylen, ppm	CO Tlenek węgla ppm	O ₂ Tlen %	N ₂ Azot %	CO ₂ Dwutlenek węgla %	CH ₄ Metan %	H ₂ Wodór ppm	Graham	Mianownik wskaźnika Grahama	Graham z uwzględnieniem wiarygodności	WSS stopień zagrożenia
tama nr 123	1	0	19,56	2,62	0,131	510	7,87	81,28	7,51	3,28	20,8	0,0037	13,67	niepewny	7
	2	2	5,41	0,78	0,049	160	18,07	79,03	1,95	0,93	5	0,0056	2,87	0,0056	5
	3	7	7,91	1,1	0,017	132	12,1	81,87	4,24	1,77	9,8	0,0014	9,60	niepewny	6
	4	9	13,69	1,92	0,065	75	6,5	83,26	7,03	3,19	10	0,0005	15,56	niepewny	6
	5	14	10,27	1,33	0,032	23	6,57	83,09	7	3,33	6,1	0,0001	15,45	niepewny	5
	6	15	5	0,58	0,011	30	11,85	81,37	4,45	2,32	7,2	0,0003	9,71	niepewny	5
	7	29	12,08	1,31	0,018	13	4,22	81,48	8,86	5,42	35,7	0,0001	17,37	niepewny	5
	8	35	7,24	1,09	0,012	8	6,14	81,68	7,56	4,6	91	0,0001	15,51	niepewny	5
	9	37	7,76	1,16	0,008	20	4,57	82,23	8,2	4,98	83,8	0,0001	17,22	niepewny	5
	10	42	4,1	0,76	0,001	13	7,82	81,79	6,22	4,16	38,4	0,0001	13,85	niepewny	4



Rys. 5. Przypadek trzeci. Wskaźnik Grahama wyznaczony dla analizowanych próbek powietrza pobranych z zewnątrz podczas wystąpienia wysokiego zagrożenia pożarowego

Fig. 5. Third case. Graham's ratio determined for analyzed air samples taken from outside the dam in conditions of high fire hazard



Rys. 6. Przypadek trzeci. Wskaźnik WSS wyznaczony dla analizowanych próbek powietrza pobranych z zewnątrz podczas wystąpienia wysokiego zagrożenia pożarowego

Fig. 6. Third case. WSS index determined for the analysed air samples taken from outside the dam in conditions of high fire hazard

Coal Mines, 25-th International Conference of Safety in Mines Research Institutes, 13-17 September 1993.

CYGANKIEWICZ J. 2000 - Niektóre wskaźniki pożarowe w kopalni. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Seria z Periodykiem nr 2. Kraków.

CYGANKIEWICZ J., GAPIŃSKI D. 2013 - Analiza metod oceny zagrożenia pożarami endogenicznymi przyjętych w górnictwie polskim na tle rozwiązań stosowanych w innych krajach. Zagrożenia aerologiczne w kopalniach węgla kamiennego – profilaktyka, zwalczanie, modelowanie, monitoring, s. 15-28.

SŁOWIK S., ŚWIERCZEK L. 2014 - Ujemne i zawyżone wartości wskaźnika Grahama. „Przeгляд Górnicy”, nr 12, s. 98-105.

SŁOWIK S., ŚWIERCZEK L. 2015 - Przedział wiarygodności wskaźnika Grahama. „Przeгляд Górnicy” nr 12, s. 49-61..

TRENCZEK S. 2003 - Ocena stanu zagrożenia pożarem endogenicznym, na podstawie temperatury zrobów wyznaczonej metodą gazów istotnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, z. 258, s. 363-375.

Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych. Dziennik Ustaw/2017/poz. 1118.

Artykuł wpłynął do redakcji –kwiecień 2020
Artykuł akceptowano do druku – 28.08.2020