

Ujemne i zawyżone wartości wskaźnika Grahama

Negative and overestimated values of Graham's index



Mgr inż. Stanisław Słowik^{*)}



Mgr inż. Lucjan Świerczek^{*)}

Treść: W artykule przedstawiono analizę występowania w praktyce kopalnianej ujemnych wartości wskaźnika Grahama oraz anormalnie dużych w odniesieniu do rzeczywistego poziomu zagrożenia pożarowego. Wykorzystano do tego próbę składającą się z 1962 analiz chemicznych próbek powietrza pobranych ze zrobów ścian zawałowych oraz z za tam izolacyjnych. Stwierdzono, że główną przyczyną tych wartości jest sposób wyznaczania wskaźnika Grahama. Przeprowadzono analizę wskaźnika i wykazano, że przy wartości mianownika do 0,1 wskaźnik Grahama nie sprawdza się (zawyża zagrożenie pożarowe). Odniesiono się do kryterium wskaźnika ubytku tlenu mówiącego o 1 % progu ($-\Delta O_2 < 1\%$) poniżej którego wskaźnik Grahama wykazuje duże wahania nie pozwalające na prawidłową interpretację [6]. Ustalono, że to kryterium w obecnie stosowanych sposobach przewietrzania nie znajduje zastosowania. Przeanalizowano zmodyfikowaną wersję wskaźnika Grahama przyjmując, że do jego wyznaczania wykorzystany zostanie stosunek różnicy CO do różnicy tlenu. Wykazano, że nie wyeliminuje to występowania nietypowych przypadków. Dodatkowo pojawia się wtedy pytanie, czy kryteria stosowane dla wskaźnika Grahama można bezpośrednio przenieść na zmodyfikowany wskaźnik.

Abstract: This paper presents the analysis of Graham's index negative values as well as the overestimated values present in mining practice, in relation to the real level of fire hazard. The research was done by a test consisting of 1962 chemical analyses of air samples obtained from the gobbs in longwall with caving and from behind the stoppings. It was stated that the presence of such values of the Graham's index is caused by the way it is determined. Consequently, the analysis of the index showed by the denominator up to 0,1, the index fails (it overestimates the fire hazard). The authors refer to the criterion of oxygen loss index which defines a 1% threshold ($-\Delta O_2 < 1\%$) below which the Graham's index demonstrates high fluctuations precluding from proper interpretation [6]. It was determined that this criterion in the currently applied methods of ventilation does not suit the requirements. Assuming that for the determination of it, the ratio of CO difference to oxygen difference will be used, the Graham's index was analyzed but in a modified version. It was shown that it will not eliminate the occurrence of atypical cases. Moreover, a question occurs whether the criteria determined for the Graham's index can be directly transcribed on the modified index

Słowa kluczowe:

górnictwo, zagrożenie pożarowe, profilaktyka, wskaźnik Grahama, wskaźnik ubytku tlenu

Key words:

mining, fire hazard, prevention, Graham's index, oxygen loss index

1. Wprowadzenie

Wskaźnik Grahama jest jednym z najczęściej stosowanych wskaźników służących do określania stopnia zagrożenia pożarowego występującego w zrobach ścian zawałowych [3]. Określa on zagrożenie pożarowe według skali nieliniowej, co wynika z charakteru wydzielenia się tlenu węgla podczas procesu utleniania węgla.

Przepisy funkcjonujące w polskim górnictwie klasyfikują zagrożenie pożarowe w oparciu o wskaźnik Grahama następująco [7]:

- $0,0000 < G \leq 0,0025$ – sytuacja normalna – nie występuje zagrożenie pożarowe w zrobach;
- $0,0025 < G \leq 0,0070$ – wzmożona obserwacja atmosfery w zrobach, zwiększona częstotliwość pobierania próbek powietrza;
- $0,0070 < G \leq 0,0300$ – należy przystąpić do prac profilaktycznych przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie;
- $0,0300 < G$ – akcja przeciwpożarowa.

Generalnie więc, im wyższe są wartości wskaźnika Grahama, tym powinniśmy mieć do czynienia z większym zagrożeniem pożarowym. Pojawiają się jednak wyjątki, są to przypadki bardzo dużych wartości wskaźnika Grahama (nawet

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice

powyżej $G > 0,0300$) w sytuacjach, kiedy nie obserwuje się oznak podwyższonego zagrożenia pożarowego. Można się też spotkać z ujemnymi wartościami wskaźnika Grahama, które ww. klasyfikacja pomija.

W artykule podjęto próbę wyjaśnienia z czego wynikają takie wartości wskaźnika (określone tu jako nietypowe) oraz przeanalizowano, w jakich warunkach zagrożenia pożarowego się one pojawiały.

2. Wskaźnik Grahama – analiza wzoru

Wskaźnik Grahama jest to stosunek przyrostu tlenku węgla ($\Delta CO, \%$) do ubytku tlenu ($-\Delta O_2, \%$)

$$G = \frac{\Delta CO}{(-\Delta O_2)} \tag{1}$$

Wskaźnik ubytku tlenu ($-\Delta O_2$) oblicza się w oparciu o procentowe zawartości tlenu i azotu w powietrzu świeżym, i zużytym stosując wzór [6]:

$$(-\Delta O_2) = \frac{N_2''}{N_2'} (O_2' - O_2'') = O_2' - O_2'' + \frac{O_2'}{N_2'} (N_2'' - N_2'), \tag{2}$$

gdzie:

- O_2' i N_2' – zawartości tlenu i azotu na wlocie do kontrolowanego rejonu, %,
- O_2'' i N_2'' – zawartości tlenu i azotu na wylocie z kontrolowanego rejonu, %.

Dla wskaźnika Grahama przyjęto założenie, że ubytek tlenu obliczany jest w odniesieniu do powietrza atmosferycznego świeżego, w którym proporcja tlenu do azotu wynosi $\frac{O_2'}{N_2'} = 0,265$. Stąd wzór (1) po uwzględnieniu (2) i wspomnianego stosunku tlenu do azotu można zapisać jako

$$G = \frac{CO}{O_2' - O_2'' + 0,265(N_2'' - N_2')} \tag{3}$$

Podstawiając do (3) w miejsce O_2' lub N_2' odpowiednio $0,265N_2'$ lub $O_2'/0,265$ i upraszczając, otrzymujemy znaną zależność na wskaźnik Grahama, w której mianownik występuje w postaci $0,265N_2 - O_2$

$$G = \frac{CO}{0,265N_2 - O_2} \tag{4}$$

gdzie:

- CO – stężenie tlenku węgla, %,
- N_2 – stężenie azotu, %,
- O_2 – stężenie tlenu, %.

Wprowadzając zamiast O_2, N_2, CO, G oznaczenia standardowe funkcji: x, y, t – zmienne zależne oraz z – wartość funkcji, otrzymujemy

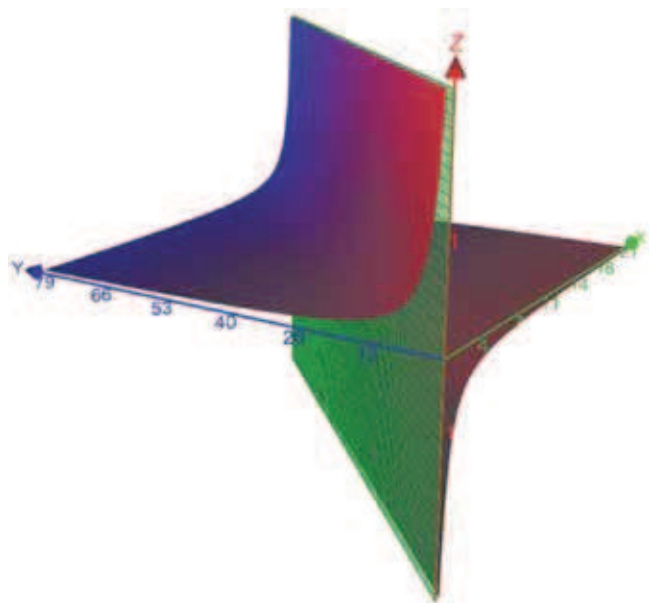
$$z = t \left(\frac{1}{0,265y - x} \right), \quad x > 0, y > 0, t > 0. \tag{5}$$

Zmienna t reprezentująca tlenek węgla wpływa proporcjonalnie na wartość funkcji (5), natomiast o jej przebiegu decyduje zależność ujęta w nawias, czyli

$$\frac{1}{0,265y - x}, \quad x > 0, y > 0. \tag{6}$$

Dziedzina funkcji (5) i (6) jest zbiór wszystkich dodatnich par liczb rzeczywistych z wyłączeniem przypadków zerowania się mianownika.

Wykres funkcji (6) przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Graficzne przedstawienie zależności (6)
Fig. 1. Illustration of the dependence (6)

Z analizy funkcji (5) i (6) wynika, że mamy tutaj do czynienia z dwoma granicami, którymi są płaszczyzny (rys. 1). Pierwsza z nich przechodzi przez osie x, y układu współrzędnych i w jej sąsiedztwie wartości funkcji zdążają do zera kiedy x lub y dążą do nieskończoności.

Druga płaszczyzna wynika z zerowania się mianownika i jest opisana równaniem

$$0,265y - x = 0 \tag{7}$$

We wzorze na wskaźnik Grahama zmiennym x i y odpowiadają tlen i azot. Żaden ze składników powietrza nie może przekroczyć stężenia 100 %, czyli ani tlen, ani azot nie osiągną bardzo wysokich wartości (nie dążą do nieskończoności) [4]. Dlatego pierwszego przypadku nie rozpatrywano.

Dla wskaźnika Grahama ważna jest druga płaszczyzna, która wynika z zerowania się mianownika (7). W jej pobliżu wartości funkcji (5) i (6) dążą do $\pm \infty$. Czyli osiągają bardzo niskie wartości ujemne lub bardzo wysokie dodatnie, niezależnie od zmiennej t , która w przypadku funkcji (5) reprezentuje tlenek węgla.

Można więc stwierdzić, że:

- wskaźnik Grahama osiąga bardzo wysokie bezwzględne wartości, gdy $|0,265N_2 - O_2|$ zbliża się do zera;
- wskaźnik Grahama przyjmuje wartości ujemne, gdy $0,265N_2 - O_2$.

Pozostaje pytanie o możliwość zerowania się mianownika w przypadku kiedy $0,265 N_2 = O_2$. Rozpatrując tę kwestię należy zwrócić uwagę, że stężenia tlenu i azotu oznaczane są na tym samym poziomie dokładności. Zazwyczaj poziom ten wynosi 0,01 %. W takim przypadku wartość azotu pomnożona przez współczynnik 0,265 w stosunku do stężenia tlenu jest innego rzędu. Dla członu $0,265N_2$ otrzymujemy wielkości rzędu 0,00001 %, zaś stężenie O_2 jest rzędu 0,01 %. Dlatego w praktyce nie spotyka się sytuacji, aby mianownik wskaźnika Grahama wyzerował się.

3. Nietypowe wartości wskaźnika Grahama

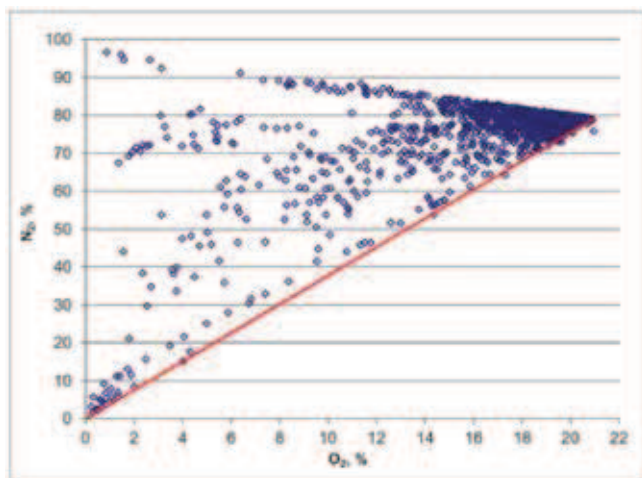
W analizie wskaźnika Grahama wykorzystano próbę złożoną z 1962 precyzyjnych analiz chromatograficznych próbek

powietrza kopalnianego. Próbki pobierane były z rejonów ścian zawałowych, w których panowały warunki normalne (brak zagrożenia pożarowego) oraz warunki podwyższonego lub wysokiego stopnia zagrożenia pożarowego. Widoczne jest to w statystykach opisowych stężeń gazów i wartości wskaźnika Grahama, np. stężenie tlenu dla próby zmieniało się do 0,25 do 20,97 %, CO od 1 do 1746 ppm. Zaś co najmniej 25 % przypadków charakteryzowało się wskaźnikiem Grahama powyżej 0,0026 – tyle wynosi górny kwartyl (tabl. 1).

Na wykresie (rys. 2) przedstawiono rozrzut stężeń azotu względem tlenu z naniesioną prostą reprezentującą płaszczyznę, dla której mianownik wskaźnika Grahama zeruje się:

$$0,265N_2 - O_2 = 0. \quad (8)$$

Punkty leżące w bezpośredniej bliskości prostej (8) to przypadki charakteryzujące się wysokimi wartościami do-



Rys. 2. Rozkład stężeń azotu i tlenu z naniesioną prostą graniczną (8)

Fig. 2. Distribution of nitrogen and oxygen concentrations with limiting straight line (8)

datnimi (powyżej prostej) lub niskimi wartościami ujemnymi wskaźnika Grahama (poniżej prostej).

3.1. Ujemne wartości wskaźnika Grahama, $0,265N_2 < O_2$.

Wyodrębniono 20 przypadków, które charakteryzowały się ujemną wartością wskaźnika Grahama. Dla określenia stopnia zagrożenia pożarowego reprezentowanego przez te próbki powietrza przeprowadzono ich dokładną analizę, którą oparto o stężenia CO, etylenu, propylenu, acetylenu i wodoru [2, 5]. Mała liczba elementów pozwoliła na przeanalizowanie każdej sytuacji z osobna. Podstawowe statystyki opisowe tych przypadków przedstawiono w tablicy 2.

Stwierdzono, że większość przypadków wystąpiła w czynnich ścianach zawałowych i warunkach niskiego poziomu zagrożenia pożarowego (16 przypadków). Stężenia w tych przypadkach nie przekraczały, dla:

- CO – 26 ppm;
- etylenu – 0,07 ppm;
- propylenu – 0,07 ppm;
- acetylenu – 0,008 ppm;
- wodoru – 2,7 ppm.

Natomiast pozostałe 4 przypadki to próbki powietrza pobrane z tam izolacyjnych i dla nich stwierdzono podwyższony poziom zagrożenia pożarowego.

3.2. Bardzo wysokie wartości wskaźnika Grahama przy niskich stężeniach CO.

W sytuacji, kiedy mianownik wskaźnika Grahama dąży do zera ($0,265N_2 - O_2 \rightarrow 0$) to pojawiają się bardzo wysokie bezwzględne wartości wskaźnika Grahama ($|G| \rightarrow \infty$). Zjawisko takie występuje nawet przy bardzo niskich stężeniach tlenku węgla, co wykazała analiza matematyczna wskaźnika.

Sporządzony wykres rozrzutu wartości bezwzględnych wskaźnika Grahama względem wartości bezwzględnych jego mianownika ilustruje wzrost jego wartości wraz ze zbliżaniem się mianownika do zera (rys. 3).

Tablica 1. Statystyki opisowe stężeń gazów i wskaźnika Grahama

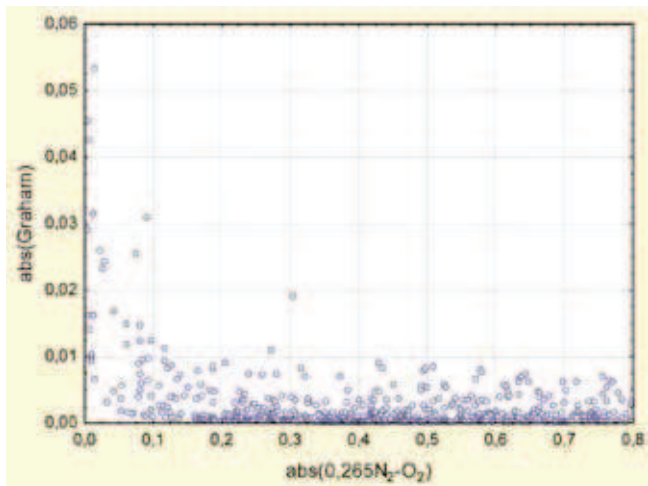
Table 1. Descriptive statistics of gas concentrations and Graham's index

	N ważnych	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Dolny kwartyl	Górny kwartyl	Odch.std
Tlen, %	1962	17,56	19,28	0,25	20,97	16,85	20,18	4,27
Azot, %	1962	75,95	79,01	1,40	96,59	76,45	79,63	10,98
CO, ppm	1962	39	12	1	1746	3	42	78
Etylen, ppm	1958	0,13	0,04	0,01	36,30	0,02	0,09	1,23
Propylen, ppm	1959	0,08	0,04	0,01	7,83	0,02	0,08	0,28
Acetylen, ppm	1960	0,008	0,003	0,001	1,650	0,002	0,006	0,044
Wodór, ppm	1956	8	2	1	1800	1	5	56
Graham	1962	0,0017	0,0011	-0,4571	0,1143	0,0004	0,0026	0,0115

Tablica 2. Statystyki opisowe – wskaźnik Grahama ujemny

Table 2. Descriptive statistics – negative Graham's index

Zmienna	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Odch.std
Etylen, ppm	20	0,06	0,01	0,52	0,12
Propylen, ppm	20	0,05	0,01	0,25	0,06
Acetylen, ppm	20	0,004	0,001	0,012	0,003
Wodór, ppm	20	1,5	0,5	2,7	0,7
CO, ppm	20	5,9	1,0	28,0	6,77
Tlen, %	20	19,01	4,03	20,97	3,86
Azot, %	20	71,23	15,12	78,92	14,50
$0,265N_2 - O_2$, %	20	-0,1296	-0,8724	-0,0035	0,1964
Graham	20	-0,0318	-0,4571	-0,0001	0,1007



Rys. 3. Wykres rozrzutu bezwzględnych wartości wskaźnika Grahama względem bezwzględnych wartości mianownika
 Fig. 3. Scatter diagram of Graham's index absolute values in relation to the denominator absolute values

Bardzo wyraźny wzrost wartości wskaźnika Grahama obserwuje się w przedziale $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$. A więc dla mianownika poniżej 0,1 można spodziewać się wysokich wartości wskaźnika Grahama, nawet przy niskich stężeniach CO.

Z próby wydzielono dwie podgrupy, wyłączając z nich przypadki ujemne. Pierwszą podgrupę stanowiły przypadki należące do przedziału $0 < 0,265 \cdot N_2 - O_2 \leq 0,1$. Do drugiej podgrupy zaliczono pozostałe przypadki, czyli z przedziału $0,1 < 0,265 \cdot N_2 - O_2$. Podstawowe statystyki opisowe podgrup, uwzględniające stężenia gazów, wartości wskaźnika Grahama i jego mianownika – przedstawiono w tabelicy 3.

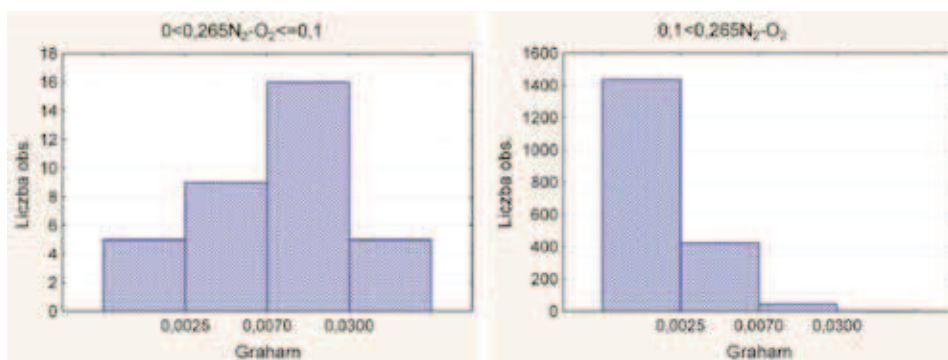
Porównanie obu podgrup pod kątem rozkładów wartości wskaźnika Grahama, stężenia tlenu, CO, etylenu, propylenu, acetyleny i wodoru przedstawiono na histogramach (rys. 4a-g).

Statystyki opisowe przedstawione w tabelicy 3 wykazują, że w podgrupie pierwszej ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$) pojawiają się bardzo wysokie wartości wskaźnika Grahama (średnia 0,0186, max 0,1143, dolny kwartył 0,0047, górny kwartył 0,0169) przy niskich stężeniach CO (średnia 5 ppm, max 19 ppm), etylenu (średnia 0,02 ppm, max 0,06 ppm), propylenu (śred-

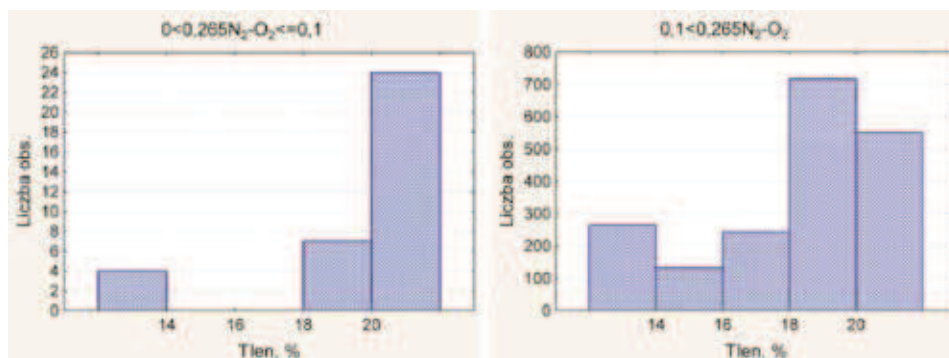
Tablica 3. Statystyki opisowe stężeń gazów i wartości wskaźnika Grahama

Table 3. Descriptive statistics of gas concentrations and Graham's index

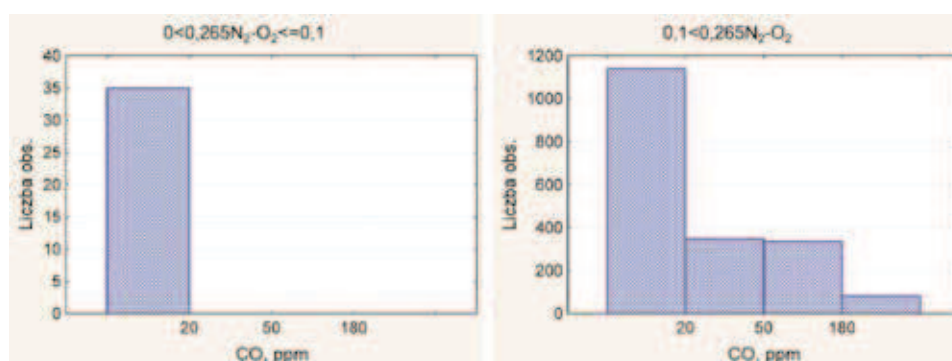
Zmienna	N ważnych	Średnia	Mediana	Min.	Max	Dolny Kwartył	Górny Kwartył	Odch.std
$0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$								
Etylen, ppm	35	0,02	0,01	0,01	0,06	0,01	0,02	0,01
Propylen, ppm	34	0,02	0,01	0,01	0,1	0,01	0,03	0,02
Acetylen, ppm	35	0,003	0,002	0,001	0,015	0,001	0,003	0,003
CO, ppm	35	5	3	1	19	1	8	4,3
Tlen, %	35	18,2	20,8	0,3	20,9	19,8	20,9	6,4
Azot, %	35	68,9	78,7	1,4	79,1	74,8	79,0	24,1
Wodór, ppm	35	1,6	1,4	0,5	3,6	1,1	2	0,7
$0,265N_2 - O_2$, %	35	0,054	0,0601	0,0018	0,0988	0,0123	0,0841	0,0351
Graham	35	0,0186	0,0097	0,001	0,1143	0,0047	0,0169	0,0259
$0,1 < 0,265N_2 - O_2$								
Etylen, ppm	1904	0,14	0,04	0,01	36,3	0,02	0,09	1,24
Propylen, ppm	1906	0,09	0,04	0,01	7,83	0,02	0,08	0,29
Acetylen, ppm	1906	0,008	0,003	0,001	1,65	0,002	0,006	0,045
CO, ppm	1908	40,4	13	1	1746	3	43	79
Tlen, %	1908	17,5	19,3	0,3	20,8	16,8	20,1	4,2
Azot, %	1908	76,1	79	2,4	96,6	76,6	79,7	10,5
Wodór, ppm	1902	7,9	2,4	0,5	1800	1,4	5,3	56,6
$0,265N_2 - O_2$, %	1908	2,6391	1,3777	0,1084	24,6964	0,6323	3,3397	3,2518
Graham	1908	0,0017	0,0011	0	0,0637	0,0004	0,0025	0,0024



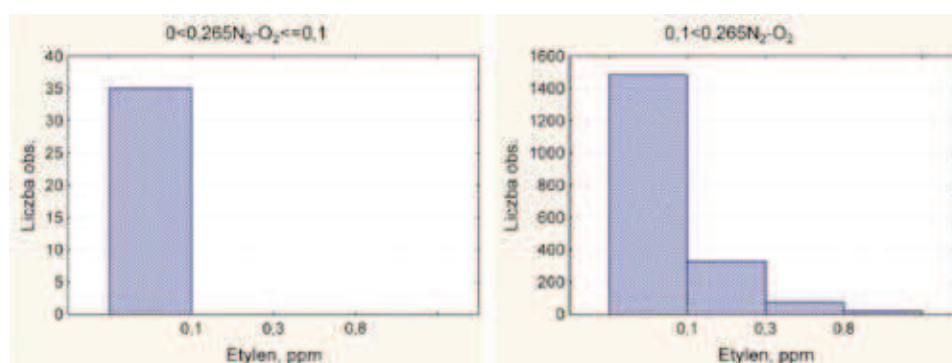
Rys. 4a. Histogram wskaźnika Grahama dla przedziału $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ oraz $0,1 < 0,265N_2 - O_2$
 Fig. 4a. Histogram of Graham's index for the interval of $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ and $0,1 < 0,265N_2 - O_2$



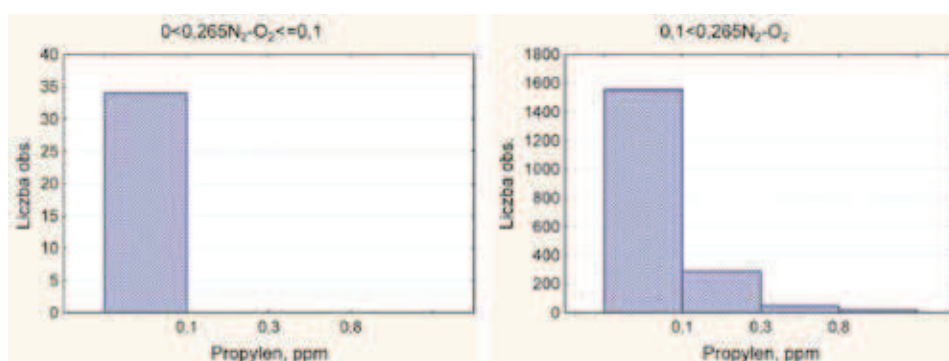
Rys. 4b. Histogram stężenia tlenu dla przedziału $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ oraz $0,1 < 0,265N_2 - O_2$
 Fig. 4b. Histogram of oxygen concentration for the interval of $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ and $0,1 < 0,265N_2 - O_2$



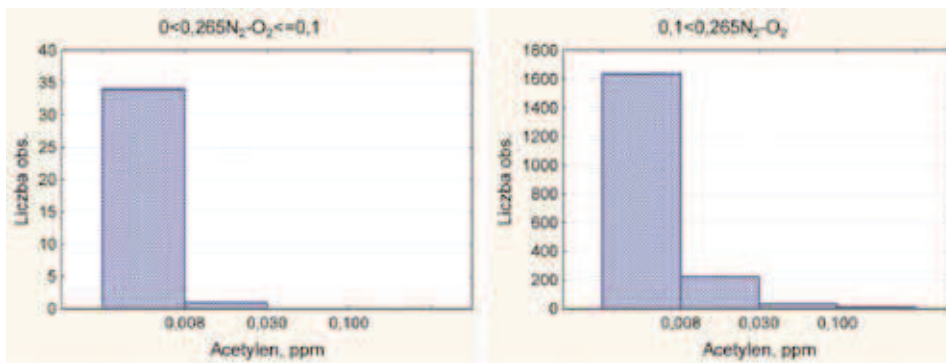
Rys. 4c. Histogram stężenia CO dla przedziału $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ oraz $0,1 < 0,265N_2 - O_2$
 Fig. 4c. Histogram of CO concentration for the interval of $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ and $0,1 < 0,265N_2 - O_2$



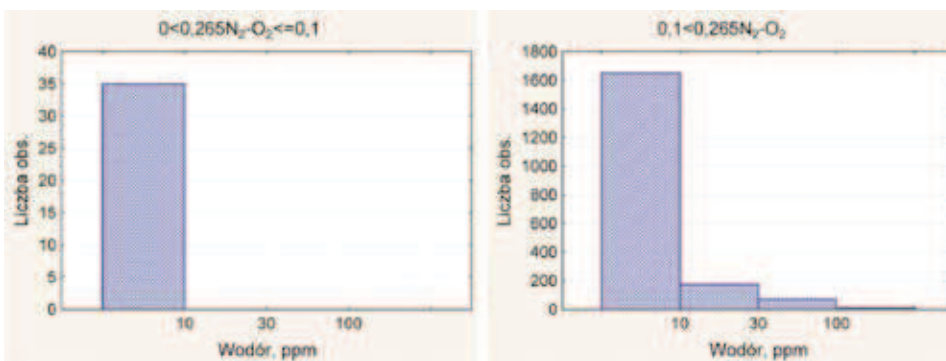
Rys. 4d. Histogram stężenia etylenu dla przedziału $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ oraz $0,1 < 0,265N_2 - O_2$
 Fig. 4d. Histogram of ethylene concentration for the interval of $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ and $0,1 < 0,265N_2 - O_2$



Rys. 4e. Histogram stężenia propylenu dla przedziału $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ oraz $0,1 < 0,265N_2 - O_2$
 Fig. 4e. Histogram of propylene concentration for the interval of $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ and $0,1 < 0,265N_2 - O_2$



Rys. 4f. Histogram stężenia acetyleny dla przedziału $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ oraz $0,1 < 0,265N_2 - O_2$.
 Fig. 4f. Histogram of acetylene concentration for the interval of $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ and $0,1 < 0,265N_2 - O_2$



Rys. 4g. Histogram stężenia wodoru dla przedziału $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ oraz $0,1 < 0,265N_2 - O_2$.
 Fig. 4g. Histogram of hydrogen concentration for the interval of $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$ and $0,1 < 0,265N_2 - O_2$

nia 0,02 ppm, max 0,10 ppm), acetyleny (średnia 0,003 ppm, max 0,015 ppm) i wodoru (średnia 1,6 ppm, max 3,6 ppm). Analiza tej podgrupy pozwala stwierdzić, że większość przypadków ma wysoką wartość wskaźnika Grahama wskazującą na bardzo duże zagrożenie pożarowe. Prawie 75 % przypadków ma wartość wskaźnika Grahama co najmniej 0,0047 (dolny kwartył) i zostały one sklasyfikowane jako przypadki o podwyższonym stopniu zagrożenia pożarowego, a niektóre z nich jako pożar. Jednak takiego zagrożenia nie potwierdzają stężenia CO, węglowodorów i wodoru. Ich stężenia były niskie i świadczyły o braku zagrożenia pożarowego – np. maksymalne stężenie CO nie przekraczało 19 ppm, etylenu 0,06 ppm, wodoru 3,6 ppm.

Inaczej sytuacja przedstawia się w drugiej podgrupie, czyli w przedziale $0,1 < 0,265N_2 - O_2$. Tutaj obok wysokich wartości wskaźnika Grahama (średnia 0,0017, max 0,0637, górny kwartył 0,0025) występują także wysokie stężenia CO (średnia 40,4 ppm, max 1746 ppm, górny kwartył 43 ppm), etylenu (średnia 0,14 ppm, max 36,3 ppm), propylenu (średnia 0,09 ppm, max 7,83 ppm), acetyleny (średnia 0,008 ppm, max 1,65 ppm) i wodoru (średnia 7,9 ppm, max 1800 ppm).

Rozkład wartości wskaźnika Grahama w odniesieniu do rozkładu stężeń CO, wodoru i węglowodorów nie budzi zastrzeżeń, jak to miało miejsce w przypadku podgrupy pierwszej ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$). Można stwierdzić, że wysokie wartości wskaźnika Grahama są w tych przypadkach potwierdzone przez wysokie stężenia CO, wodoru oraz węglowodorów.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że wskaźnik Grahama jest wyraźnie zawyżany, kiedy wartość jego mianownika należy do przedziału $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$. Takie przypadki byłyby błędnie sklasyfikowane pod kątem stopnia zagrożenia pożarowego w oparciu o wskaźnik Grahama, tj. zagrożenie pożarowe zostałyby określone jako znacznie wyższe niż w rzeczywistości. W tabelicy 4 podano przykłady takiej klasyfikacji.

4. Wskaźnik ubytku tlenu według Poradnika Górnika

W „Poradniku Górnika” podany jest warunek, że „wskaźnik Grahama obliczony dla próbek powietrza o małym wskaźniku ubytku tlenu ($-\Delta O_2$) < 1% wykazuje znaczne

Tablica 4. Przykłady nieprawidłowej klasyfikacji zagrożenia pożarowego wg wskaźnika Grahama
 Table 4. Examples of incorrect classification of fire hazard according to Graham’s index

Opis punktu	Etylen ppm	Propylen ppm	Acetylen ppm	CO ppm	Tlen %	Azot %	CO ₂ %	Metan %	Wodór ppm	0,265N ₂ -O ₂ %	Graham
zawał	0,02	0,01	0,003	2	20,92	78,95	0,07	0,06	1,3	0,0018	0,1143
zawał	0,02	0,02	0,002	12	19,45	73,44	0,38	6,7	1,5	0,0116	0,1034
zawał	0,02	0,02	0,002	8	20,36	76,87	0,44	2,33	1,2	0,0414	0,0758
zawał	0,01	0,01	0,002	1	20,86	78,73	0,14	0,27	2,8	0,0035	0,0290
zawał	0,01	0,01	0,002	6	20,04	75,72	0,15	4,06	3,6	0,0258	0,0233
zawał	0,02	0,02	0,004	7	19,77	74,76	0,19	5,27	1,5	0,0414	0,0169

Tablica 5. Statystyki opisowe stężeń gazów i wartości wskaźnika Grahama z uwzględnieniem warunku $(-\Delta O_2) < 1\%$
Table 5. Descriptive statistics of gas concentrations and Graham's index considering the condition $(-\Delta O_2) < 1\%$

Zmienna	N ważnych	Średnia	Mediana	Min.	Max	Dolny Kwartyl	Górny Kwartyl	Odch.std
$0 < 0,265N_2 - O_2 < 1$								
CO, ppm	757	8,2	4	1	58	1,0	10,0	10,2
Tlen, %	757	19,60	20,33	0,25	20,92	19,98	20,58	3,18
Azot, %	757	75,84	78,96	1,40	79,74	77,39	79,22	12,05
$0,265N_2 - O_2$, %	757	0,4999	0,4683	0,0018	0,9921	0,2877	0,6997	0,2548
Graham	757	0,0024	0,0010	0,0001	0,1143	0,0004	0,0022	0,0068
$1 \leq 0,265N_2 - O_2$								
CO, ppm	1186	60,0	27	1	1746	10,0	77,0	94,7
Tlen, %	1186	16,24	17,92	0,32	20,11	15,03	19,29	4,37
Azot, %	1186	76,11	79,22	5,68	96,59	75,90	80,06	10,16
$0,265N_2 - O_2$, %	1186	3,9282	2,5845	0,9986	24,6964	1,4915	5,1337	3,5477
Graham	1186	0,0018	0,0013	0,0000	0,0637	0,0005	0,0027	0,0026

wahania, które utrudniają interpretację wyników analiz próbek powietrza” [6].

Jeżeli przyjmiemy, że mianownik wskaźnika Grahama jest odpowiednikiem wskaźnika ubytku tlenu wg [6], czyli $(-\Delta O_2) \equiv 0,265N_2 - O_2$, to dla posiadanej próby statystycznej przypadki, dla których $(-\Delta O_2) < 1\%$ stanowiły aż 38,9% (tabl. 5). Jest to duży procent, który oznacza, że około 4. próbki z 10. cechują się niepewnym wynikiem.

Można więc przypuszczać, że zalecenie podane w „Poradniku Górnika”, które sformułowano kilkadziesiąt lat temu było prawidłowe dla ówczesnych warunków przewietrzania charakteryzujących się małą intensywnością i często dużą niestabilnością.

W oparciu o dysponowaną 1962 elementową próbę trudno znaleźć uzasadnienie tego kryterium. Chcąc go uwzględnić, to należałoby odrzucić około 40 % przypadków z próby, co stawia pod znakiem zapytania zasadność stosowania wskaźnika Grahama jako jednego z podstawowych narzędzi służących do określania stopnia zagrożenia pożarowego.

5. Zmodyfikowany wskaźnik Grahama

Przeprowadzono również analizę zmodyfikowanego wskaźnika Grahama przyjmując założenie, że zostanie on obliczony nie wg wzoru (4), tylko w oparciu o (1) z następującą zależnością [1, 6]

$$G_{(zmodyf)} = \frac{CO_{(zroby)} - CO_{(obieg)}}{O_{2(zroby)} - O_{2(obieg)}}, \quad (9)$$

gdzie (obieg) oznacza próbkę powietrza pobraną na wlocie do rejonu.

Właściwości wzoru (9) są podobne jak analizowanych funkcji (5) i (6). Można się więc spodziewać, że podobnie

jak dla wskaźnika Grahama, tak i tu pojawią się wartości nietypowe.

Aby to sprawdzić sporządzono 176, elementową próbę zawierającą wyniki analiz próbek powietrza pobieranych na wlocie, wylocie i ze zrobów ścian, która posłużyła do analizy wskaźnika (9). Wyniki statystyk opisowych podano w tabl. 6.

Stwierdzono, że dla wskaźnika zmodyfikowanego $G_{(zmodyf)}$ liczonego wg (9):

- pojawiają się wartości zawyżone, np. $G_{(zmodyf)} = 0,0100$ (przy wartości mianownika 0,02), natomiast odpowiadający tej próbce wskaźnik Grahama wynosił $G = 0,0017$ (przy wartości mianownika 0,17);
- możemy otrzymać wartość równą zero. Sytuacja taka występuje, gdy oznaczone stężenia CO w obiegu i zrobach nie różnią się;
- możemy otrzymać wartość nieoznaczoną. Występuje to w przypadku, kiedy stężenia O_2 w obiegu i zrobach nie różnią się (dzielenie przez zero).

Porównanie wskaźnika Grahama z jego zmodyfikowaną wersją w oparciu o analizę wartości z tablicy 6 mogłoby sugerować, że oba wskaźniki dają bardzo zbliżone wyniki. Jednak analiza dobroci dopasowania pomiędzy wskaźnikami wykazała, że pomimo małej wartości odchylenia liczonego metodą najmniejszych kwadratów (0,000001) i odchylenia przeciętnego (0,0006) otrzymujemy stosunkowo duże wartości względnego błędu kwadratowego (0,0096) i błędu całkowitego względnego (0,0324). Korelacja pomiędzy wskaźnikami jest równa 0,87. Jest ona wprawdzie wysoka, ale wynika z niej, że 13 % przypadków jest nieskorelowanych. Dla porównywalnych stężeń CO pojawiają się więc przypadki mocno odstające (rys. 5), np:

- wskaźnik zmodyfikowany liczony wg (9) wynosi 0,0100 (dla $\Delta CO = 2\text{ppm}$) zaś wskaźnik Grahama (4) wynosi 0,0017 (dla $CO = 3\text{ppm}$);

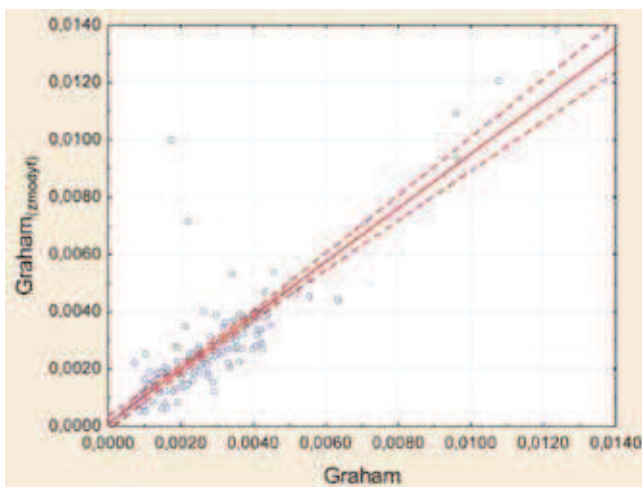
Tablica 6. Statystyki opisowe wartości zmodyfikowanego wskaźnika (9) i wskaźnika Grahama
Table 6. Descriptive statistics of the modified index (9) and the Graham's index

	N ważnych	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Dolny	Górny	Odch.std
$CO_{(zroby)}$	176	101,7	69,5	1	430	29,5	150	95,6
$CO_{(zroby)} - CO_{(obieg)}$	176	99,8	68,0	0	429	28,5	143	95,1
$O_{2(zroby)} - O_{2(obieg)}$	176	4,30	2,81	0	19,23	1,68	5,93	4,06
$G_{(zmodyf)}$	175	0,0026	0,0023	0	0,0139	0,0014	0,0034	0,0020
GRAHAM	176	0,0027	0,0024	$G < 0,0000$	0,0124	0,0012	0,0036	0,0018

- wskaźnik zmodyfikowany liczony wg (9) wynosi 0,0053 (dla $\Delta\text{CO} = 17\text{ppm}$) zaś wskaźnik Grahama (4) wynosi 0,0034 (dla $\text{CO} = 20\text{ppm}$).

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zmiana sposobu obliczania wskaźnika Grahama przez zastosowanie wzoru (9) nie eliminuje występowania nietypowych przypadków (zawyżonych, nieoznaczonych lub równych zero). Dodatkowo pojawia się problem, czy kryteria stosowane dla wskaźnika Grahama można bezpośrednio przenieść na wskaźnik zmodyfikowany (9). Na rysunku 5 widać, że prosta reprezentująca zależność liniową pomiędzy wskaźnikami odbiega od zależności $y = x$.

Wykonana analiza wskazuje, że doświadczenia nabytego przy interpretowaniu wskaźnika Grahama nie należy bezpośrednio przenosić na jego wersję zmodyfikowaną (9). Zalecana jest tu ostrożność i posiłkowanie się np. wynikami precyzyjnej analizy chromatograficznej.



Rys. 5. Wykres rozrzutu wartości wskaźnika Grahama zmodyfikowanego (9) względem wskaźnika Grahama (4).

Fig. 5. Scatter diagram of the modified Graham's index values (9) in relation to the regular Graham's index

6. Podsumowanie

Pojawiające się ujemne lub bezzasadnie bardzo wysokie wartości wskaźnika Grahama wynikają z własności wzoru, z którego wyznacza się ten wskaźnik (4). Kiedy bowiem mianownik wskaźnika przyjmuje wartości:

- ujemne ($0,265\text{N}_2 < \text{O}_2$), to otrzymujemy ujemne wartości wskaźnika Grahama;
- bardzo małe ($0,265\text{N}_2 - \text{O}_2 \rightarrow 0$), wtedy otrzymujemy bardzo wysokie wartości wskaźnika Grahama i to niezależnie od stężenia CO.

Ujemne wartości wskaźnika Grahama występują zarówno w warunkach niskiego jak i podwyższonego poziomu zagrożenia pożarowego.

Zawyżanie stopnia zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama widoczne jest szczególnie w przedziale $0 < 0,265\text{N}_2 - \text{O}_2 \leq 0,1$. W podanym przedziale prawie 75 % przypadków miało wartość wskaźnika Grahama powyżej 0,0047, co oznacza podwyższony stopień zagrożenia pożarowego lub nawet pożar ($G_{\text{max}} = 0,1143$). Dokładna analiza stężeń CO, etylenu, propylenu, acetyleny oraz wodoru wykluczyła taką interpretację ponieważ ich rozkład w żaden sposób nie koresponduje z rozkładem wartości wskaźnika

Grahama. Stężenia tych gazów były niskie i nie wskazywały na występowanie zagrożenia pożarowego, np. stężenie CO nie przekraczało 19 ppm, etylenu – 0,06 ppm, a wodoru – 3,6 ppm.

Większość próbek z przedziału $0 < 0,265\text{N}_2 - \text{O}_2 \leq 0,1$ zostałyby w oparciu o wskaźnik Grahama błędnie sklasyfikowane, tj. zagrożenie pożarowe byłoby określone jako znacznie wyższe niż w rzeczywistości.

Wskazane jest aby sprawdzać mianownik wskaźnika Grahama i jeżeli wartość mianownika będzie zawierała się w przedziale $0 < 0,265\text{N}_2 - \text{O}_2 \leq 0,1$, to zaleca się skorygowanie oceny stanu zagrożenia pożarowego w oparciu o inne kryteria, np. wyniki precyzyjnej analizy chromatograficznej.

Częste występowanie ujemnych lub bezzasadnie zawyżonych wartości wskaźnika Grahama powinno skutkować zmianą sposobu lub miejsca pobierania próbek powietrza.

Warunek mówiący że „wskaźnik Grahama obliczony dla próbek powietrza o małym wskaźniku ubytku tlenu ($-\Delta\text{O}_2$) < 1 % wykazuje znaczne wahania, które utrudniają interpretację wyników analiz próbek powietrza” podany w „Poradniku Górnika” nie znajduje uzasadnienia w dzisiejszych systemach przewietrzania kopalń. Przyjęcie bowiem takiego warunku skutkuje odrzuceniem około 40 % przypadków z 1962 elementowej próby. Stawiałoby to pod znakiem zapytania stosowanie wskaźnika Grahama jako jednego z podstawowych narzędzi służących do określania stopnia zagrożenia pożarowego.

Analiza zmodyfikowanego wskaźnika Grahama (9) wykazała, że taka zmiana sposobu jego wyznaczania nie wyklucza wystąpienia nietypowych przypadków. Dodatkowo pojawia się problem, czy stosowane kryteria dla wskaźnika Grahama można bezpośrednio przenieść na zmodyfikowany wskaźnik (9). Z analizy porównawczej obu wskaźników wynika, że doświadczenia nabyte przy interpretowaniu wskaźnika Grahama nie powinny być bezpośrednio przenoszone na jego wersję zmodyfikowaną (9). Zalecana jest ostrożność i posiłkowanie się np. wynikami precyzyjnej analizy chromatograficznej.

Następstwem niniejszego artykułu będzie przeprowadzenie analizy w celu określenia wartości mianownika, od której można (z odpowiednio dużym prawdopodobieństwem) mówić o zawyżaniu poziomu zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama.

Literatura

1. Brady, D.: 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, 2008, 209÷216, Coal 2008.
2. Cygankiewicz J.: Ocena rozwoju ognisk samozagrzewania na podstawie precyzyjnej analizy chemicznej prób powietrza kopalnianego. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górniczego, nr 14, str. 505÷513, 1996
3. Cygankiewicz J., Gapiński D.: 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, str. 15÷28, 2013.
4. Mazur M.: Systemy ochrony powietrza. Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.
5. Waclawik J., Cygankiewicz J., Branny M.: Niektóre zagadnienia pożarów endogenicznych. Biblioteka szkoły eksploatacji podziemnej, 2000.
6. Paca zbiorowa: Poradnik Górnika t. III, str. 254÷257.
7. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych – wraz z późniejszymi zmianami.