

Przedział wiarygodności wskaźnika Grahama

Validity range of Graham index



Mgr inż. Stanisław Słowik^{*)}



Mgr inż. Lucjan Świerczek^{*)}

Treść: W artykule omówiono właściwości wskaźnika Grahama związane z jego konstrukcją matematyczną, z której wynika, że może on podążać asymptotycznie w kierunku zera i nieskończoności. Następnie w oparciu o próbę złożoną z 2777 analiz chemicznych powietrza pobranego ze zrobów ścianowych i zza tam izolacyjnych wykazano, że dla skrajnych wartości mianownika wskaźnika Grahama obserwujemy rozbieżność pomiędzy rzeczywistym stopniem zagrożenia pożarowego a prognozowanym przez wskaźnik. Zaobserwowano, że w przypadku bardzo niskich wartości mianownika występuje tendencja do zawyżania poziomu zagrożenia przez wskaźnik, natomiast dla bardzo wysokich wartości mianownika obserwuje się tendencję odwrotną. Dlatego przeprowadzono analizę mającą na celu wyznaczenie przedziału wiarygodności wskaźnika Grahama w zależności od wartości jego mianownika. W tym celu wykorzystano odpowiednie narzędzia matematyczne dające dużą pewność co do weryfikowanych hipotez i wyznaczono przedział mianownika, dla którego można przyjąć, że wskaźnik Grahama na poziomie prawdopodobieństwa co najmniej 95% określa prawidłowo stopień zagrożenia pożarowego. Dla przypadków wykraczających poza wyznaczony przedział nie można już mieć takiej pewności. Uzyskane wnioski mogą być bardzo pomocne przy analizie i ocenie zagrożenia pożarowego w kopalniach.

Abstract: This paper describes the characteristics of Graham index and its mathematical structure which shows that it can asymptotically approach zero and infinity. Based on a sample of 2777 chemical analyzes of air, taken from longwall workings as well as from behind the isolating dams, it has been shown that for the extreme values of Graham index there is a discrepancy between the actual level of fire risk and the one predicted by the indicator. It was observed that at the very low values of the denominator the Graham index overestimates the level of risk and for very high values of the denominator there is an opposite tendency. Therefore, an analysis was conducted to determine the validity range of Graham index, depending on the values of its denominator. For this purpose an appropriate mathematical tools were used that provide high reliability of the verified hypotheses. In the analysis the denominator range was calculated, for which it can be assumed at 95% probability that the rate of Graham index correctly determines the degree of fire hazard. For cases outside of the estimated range there is no certainty. The obtained results can be very helpful in the analysis and assessment of fire hazard risk in coal mines.

Słowa kluczowe:

górnictwo, zagrożenie pożarowe, profilaktyka, wskaźnik Grahama, przedział wiarygodności

Key words:

mining, fire hazard, prevention, Graham index, validity range

1. Wprowadzenie

Wskaźnik Grahama jest jednym z podstawowych wskaźników poziomu zagrożenia pożarowego występującego w miejscach niedostępnych kopalń węgla kamiennego (zroby, odizolowane wyrobiska). Zdarza się, że otrzymujemy wartości nietypowe tego wskaźnika, które nie odpowiadają poziomowi rzeczywistego zagrożenia. W przypadku wartości ujemnych

nie ma wątpliwości co do ich nietypowego charakteru. Natomiast dla wartości dodatnich wiadomo na pewno, że nietypowe przypadki występują, gdy mianownik wskaźnika Grahama jest mniejszy od 0,1% (wówczas mamy do czynienia z zawyżaniem stopnia zagrożenia pożarowego) [9]. W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania przedziału wiarygodności wskaźnika Grahama, która polegała na przeprowadzeniu analizy wskaźnika z wykorzystaniem odpowiednich narzędzi matematycznych (testy statystyczne). To pozwoliło na wyznaczenie przedziału mianownika,

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice

dla którego z prawdopodobieństwem na poziomie co najmniej 95% można twierdzić, że wskaźnik Grahama jest wiarygodny.

Analizę oparto na 2777-elementowej próbie złożonej z analiz chromatograficznych próbek powietrza kopalnianego pobieranych ze zrobów ścianowych lub zza tam izolacyjnych.

2. Wstęp do analizy wskaźnika

Wskaźnik Grahama określony jest wzorem

$$G = \frac{\text{CO}}{0,265 \cdot \text{N}_2 - \text{O}_2}, \quad (1)$$

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

Powyższy wzór można zapisać jako funkcję trzech zmiennych $g = f(x, y, t)$

$$g = t \left(\frac{1}{0,265 \cdot y - x} \right), \quad x > 0, y > 0, t > 0. \quad (2)$$

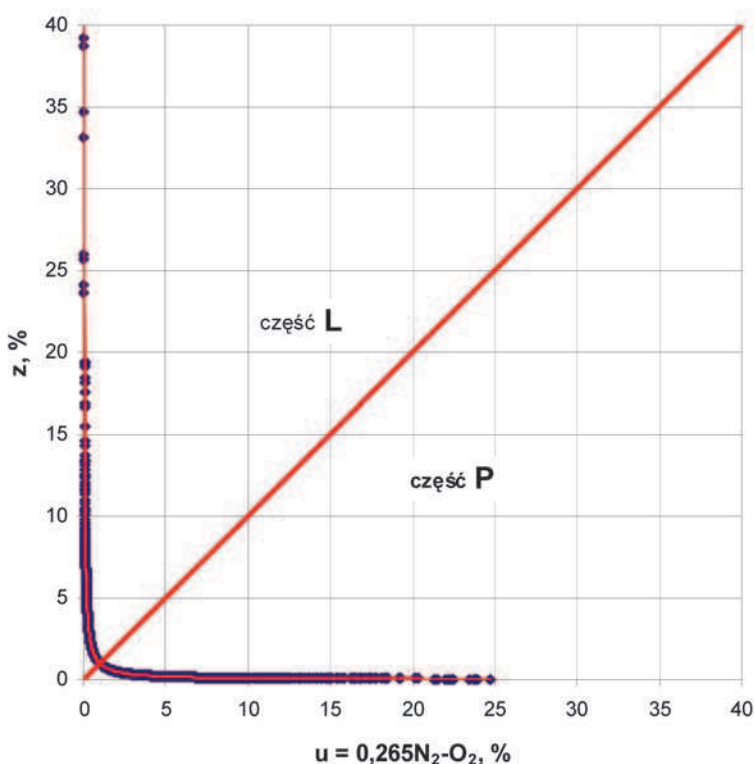
Zmienna t (dla wskaźnika Grahama jest to stężenie CO) wpływa proporcjonalnie na wartość funkcji, natomiast o przebiegu funkcji decyduje wyrażenie w nawiasie, czyli

$$\frac{1}{0,265 \cdot y - x}, \quad x > 0, y > 0. \quad (3)$$

Jeżeli w zależności (3) zastąpimy mianownik zmienną u , to otrzymujemy wzór na hiperbolę (równoosiową, sprzężoną)

$$z = \frac{1}{u}, \quad u > 0. \quad (4)$$

Hiperbolę taką przedstawiono na wykresie punktowym $z = f(u)$, sporządzonym dla analizowanej próby statystycznej, przy czym dla większej przejrzystości rysunku ograniczono skalę do $z \leq 40$ i $u \leq 40$ (rys. 1).



Wykorzystując właściwości hiperboli w analizie wskaźnika Grahama, można stwierdzić co następuje:

- Dla lewej części ramienia hiperboli (L) zauważa się, że kiedy mianownik dąży do zera $u \rightarrow 0$, to funkcja dąży do nieskończoności $z \rightarrow \infty$. Oznacza to, że jeżeli mianownik wskaźnika Grahama ma bardzo niskie wartości ($0,265\text{N}_2 - \text{O}_2 \rightarrow 0$), to wskaźnik osiąga bardzo wysoki poziom ($G \rightarrow \infty$) zawiązując stopień zagrożenia. Jak już wykazano, taka sytuacja występuje na pewno dla mianownika mniejszego od 0,1% [9].
- Dla prawej części ramienia hiperboli (P) obserwuje się sytuację odwrotną, czyli gdy mianownik dąży do nieskończoności $u \rightarrow \infty$, to funkcja dąży do zera $z \rightarrow 0$. Oznacza to, że jeżeli mianownik wskaźnika Grahama ma bardzo wysokie wartości ($0,265\text{N}_2 - \text{O}_2 \rightarrow \infty$), to wskaźnik osiąga bardzo niski poziom ($G \rightarrow 0$). Mianownik wskaźnika Grahama jest uzależniony od składu atmosfery kopalnianej i nigdy nie będzie dążył do wartości nieskończonej. Jednak opierając się o zasadę symetrii i wnioski zawarte w [9] można wykazać, że dla wartości mianownika 0,1%, należącej do lewej części (L) pojawia się jego symetryczny odpowiednik dla części prawej (P) (rys. 1). Istnieje więc uzasadnione podejrzenie, że również dla dużych wartości mianownika pojawiają się nietypowe przypadki wskaźnika Grahama. Dlatego podczas dalszej analizy zwrócono szczególną uwagę na ten problem.

3. Charakterystyka próby poddanej analizie

Próba statystyczna została sporządzona z 2777 elementów, które stanowiły wyniki chromatograficznych analiz powietrza kopalnianego pobranego ze zrobów ścianowych i zza tam izolacyjnych. Próba obejmowała stany: normalne, zagrożenia pożarowego i pożaru. Przeważał stan normalny, natomiast stany zagrożenia pożarowego i pożaru były proporcjonalnie mniejsze, adekwatnie do rzeczywistych warunków panujących w kopalniach.

Rys. 1. Rozkład punktowy dla zależności $z = 1 / (0,265\text{N}_2 - \text{O}_2)$

Fig. 1. Point distribution for the formula $z = 1 / (0,265\text{N}_2 - \text{O}_2)$

Przeprowadzono analizę próby pod kątem wskaźnika Grahama i jego składowych ze szczególnym uwzględnieniem przedstawionych wcześniej wniosków wynikających z właściwości hiperboli.

Próbe podzielono na symetryczne podpróby, wykorzystując do tego oś symetrii wyznaczoną dla hiperboli (rys. 1). Wydzielono więc dwie podpróby. Pierwsza obejmowała przedział po lewej stronie osi symetrii $0 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1$ i oznaczono ją jako L. W jej skład weszło 1166 elementów. Druga podpróba objęła przedział $1 < 0,265 N_2 - O_2$, który odpowiada odcinkowi hiperboli po prawej stronie osi symetrii. Oznaczono ją jako P, a w jej skład weszło 1611 elementów.

Podstawowe statystyki opisowe próby oraz podprób L i P przedstawiono w tabl. 1.

- Z przedstawionych statystyk opisowych próby wynika, że:
- wartość środkowa wskaźnika Grahama dla podprób L i P oraz próby jest prawie taka sama;
 - wartość dolnego kwartyła wskaźnika Grahama dla podprób i próby są porównywalne. Podobnie jest z wartością górnego kwartyła;
 - podpróby wykazują wyraźne zróżnicowanie wartości wskaźnika Grahama w zakresie średnich oraz maksymalnych i minimalnych – w podpróbie L są one wyższe niż w podpróbie P;
 - w przypadku CO próba i podpróby wykazują wyraźne zróżnicowanie wartości średnich, środkowych, dolnego i górnego kwartyła. W podpróbie L występują stężenia CO wyraźnie niższe niż w podpróbie P, co jest sytuacją odwrotną niż w przypadku wskaźnika Grahama.

Wnioski z przeprowadzonej analizy są zbieżne z uwagami wynikającymi z właściwości hiperboli, tzn. że pojawiają się wysokie wartości wskaźnika Grahama w przedziale, gdzie występują niskie wartości CO i odwrotnie.

W dalszej kolejności przeprowadzono więc szczegółową analizę próby, aby rozpoznać rozkład i kształtowanie się interesujących nas zmiennych oraz określić zakresy, w których występują nietypowe wartości wskaźnika Grahama.

W tym celu próbe podzielono na przedziały. Posłużono się przy tym wynikami analizy nietypowych wartości wskaź-

nika Grahama przedstawionych w [9], gdzie wykazano, że wskaźnik Grahama w przedziale $0 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 0,1$ ma dużą tendencję do zawyżania stopnia zagrożenia pożarowego. Ten właśnie przedział przyjęto jako pierwszy dla podpróby L. Następne przedziały otrzymały taką samą szerokość, aż do wartości $0,265 N_2 - O_2 = 1$, gdzie następuje przejście krzywej przez oś symetrii z części L na część P (rys. 1). Naszym zamiarem było zachowanie takich samych rozmiarów przedziałów podpróby P co podpróby L, dlatego zostały one wyznaczone w oparciu o symetrię. A więc symetrycznym odpowiednikiem przedziału L10 ($0,9 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1,0$) podpróby L będzie przedział P10 ($1/1 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1/0,9$) w podpróbie P, zaś przedziałowi L9 ($0,8 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 0,9$) odpowiada przedział P9 ($1/0,9 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1/0,8$) itd. W tablicy 2 zestawiono odpowiadające sobie symetrycznie przedziały dla obu podprób.

Tablica 2. Przedziały wyznaczone dla podprób L i P zestawione symetrycznie

Table 2. Ranges designated for sub-samples L and P, symmetrically summarized

Przedziały dla podpróby L:	Przedziały dla podpróby P:
L1: $0 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 0,1$	P1: $1/0,1 < 0,265 N_2 - O_2$
L2: $0,1 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 0,2$	P2: $1/0,2 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1/0,1$
L3: $0,2 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 0,3$	P3: $1/0,3 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1/0,2$
L4: $0,3 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 0,4$	P4: $1/0,4 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1/0,3$
L5: $0,4 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 0,5$	P5: $1/0,5 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1/0,4$
L6: $0,5 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 0,6$	P6: $1/0,6 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1/0,5$
L7: $0,6 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 0,7$	P7: $1/0,7 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1/0,6$
L8: $0,7 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 0,8$	P8: $1/0,8 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1/0,7$
L9: $0,8 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 0,9$	P9: $1/0,9 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1/0,8$
L10: $0,9 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1,0$	P10: $1,0 < 0,265 N_2 - O_2 \leq 1/0,9$

Wyniki statystyk podstawowych z rozbiem na przedziały przedstawiono w tabl. 3. Natomiast interpretację graficzną wybranych zmiennych przedstawiono na rys. 2 do 5.

Tablica 1. Statystyki opisowe próby statystycznej oraz podprób L i P
Table 1. Descriptive statistics of the sample and sub-samples L and P

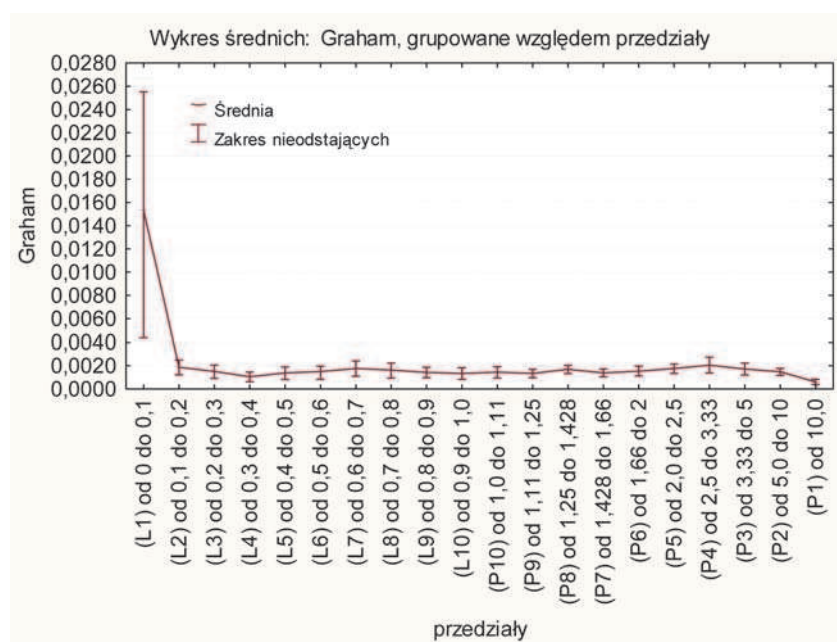
Próba bez podziału na grupy								
Zmienna	N ważnych	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Dolny Kwartyl	Górny Kwartyl	Odch.std
Tlen, %	2777	17,8	19,4	0,3	20,9	17,1	20,3	4,1
Azot, %	2777	77,0	79,1	1,4	97,5	77,4	79,7	9,6
Metan	2777	4,3	0,4	0,0	97,2	0,0	2,9	12,0
CO,%	2777	0,0034	0,0011	0,0001	0,0437	0,0003	0,0034	0,0060
Graham	2777	0,0018	0,0010	0,000004	0,1143	0,0005	0,0022	0,0043
Podpróba: L								
Tlen, %	1166	19,9	20,4	0,3	20,9	20,1	20,7	2,7
Azot, %	1166	76,7	79,0	1,4	79,7	78,4	79,2	10,0
Metan	1166	3,1	0,2	0,0	97,2	0,0	1,1	12,5
CO,%	1166	0,0007	0,0004	0,0001	0,0054	0,0001	0,0009	0,0009
Graham	1166	0,0023	0,0010	0,0001	0,1143	0,0005	0,0020	0,0064
Podpróba: P								
Tlen, %	1611	16,2	17,9	0,3	20,1	15,0	19,3	4,3
Azot, %	1611	77,1	79,5	5,7	97,5	76,8	80,3	9,4
Metan	1611	5,2	0,9	0,0	92,8	0,0	4,5	11,5
CO,%	1611	0,0054	0,0024	0,0001	0,0437	0,0010	0,0066	0,0072
Graham	1611	0,0015	0,0011	0,000004	0,0124	0,0004	0,0023	0,0015

Tablica 3. Statystyki podstawowe lewego i prawego ramienia hiperboli z rozbiciem na przedziały
Table 3. Basic statistics of the left and right arm of the hyperbole split into ranges

Bez podziału na grupy								
Zmienna	N ważnych	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Dolny Kwartyl	Górny Kwartyl	Odch.std
Tlen, %	2777	17,8	19,4	0,3	20,9	17,1	20,3	4,1
Azot, %	2777	77,0	79,1	1,4	97,5	77,4	79,7	9,6
Metan	2777	4,3	0,4	0,0	97,2	0,0	2,9	12,0
CO ₂ ,%	2777	0,0034	0,0011	0,0001	0,0437	0,0003	0,0034	0,0060
Graham	2777	0,0018	0,0010	0,0000	0,1143	0,0005	0,0022	0,0043
przedział L1: $0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$								
Tlen, %	66	19,4	20,8	0,3	20,9	20,1	20,9	4,8
Azot, %	66	73,4	78,8	1,4	79,1	76,1	79,0	18,1
Metan	66	7,0	0,2	0,0	97,2	0,0	3,6	22,7
CO ₂ ,%	66	0,0004	0,0002	0,0001	0,0020	0,0001	0,0006	0,0004
Graham	66	0,0153	0,0071	0,0010	0,1143	0,0027	0,0150	0,0225
przedział L2: $0,1 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,2$								
Tlen, %	156	20,0	20,8	0,5	20,8	20,7	20,8	3,6
Azot, %	156	75,9	79,0	2,4	79,2	78,7	79,1	13,7
Metan	156	4,0	0,1	0,0	96,1	0,0	0,4	17,1
CO ₂ ,%	156	0,0003	0,0002	0,0001	0,0016	0,0001	0,0003	0,0003
Graham	156	0,0019	0,0011	0,0005	0,0112	0,0006	0,0021	0,0020
przedział L3: $0,2 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,3$								
Tlen, %	175	20,3	20,7	1,0	20,8	20,6	20,7	2,1
Azot, %	175	77,5	79,0	4,6	79,2	78,7	79,1	7,9
Metan	175	2,0	0,1	0,0	93,5	0,0	0,6	9,9
CO ₂ ,%	175	0,0004	0,0002	0,0001	0,0031	0,0001	0,0004	0,0005
Graham	175	0,0015	0,0008	0,0003	0,0110	0,0004	0,0017	0,0019
przedział L4: $0,3 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,4$								
Tlen, %	128	20,3	20,6	4,3	20,7	20,5	20,6	1,5
Azot, %	128	77,9	79,0	17,6	79,3	78,6	79,2	5,8
Metan	128	1,6	0,2	0,0	76,8	0,1	0,8	7,2
CO ₂ ,%	128	0,0004	0,0002	0,0001	0,0026	0,0001	0,0004	0,0004
Graham	128	0,0011	0,0007	0,0003	0,0082	0,0003	0,0013	0,0013
przedział L5: $0,4 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,5$								
Tlen, %	149	19,9	20,5	1,1	20,6	20,4	20,6	2,6
Azot, %	149	76,6	79,0	5,7	79,4	78,4	79,3	9,7
Metan	149	3,3	0,3	0,0	92,1	0,0	1,0	12,1
CO ₂ ,%	149	0,0006	0,0003	0,0001	0,0041	0,0001	0,0007	0,0008
Graham	149	0,0014	0,0007	0,0002	0,0091	0,0003	0,0016	0,0017
przedział L6: $0,5 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,6$								
Tlen, %	110	19,7	20,4	0,3	20,5	20,2	20,5	2,8
Azot, %	110	76,3	79,1	3,1	79,5	78,4	79,3	10,6
Metan	110	3,7	0,3	0,0	95,4	0,0	1,2	13,2
CO ₂ ,%	110	0,0008	0,0005	0,0001	0,0047	0,0002	0,0011	0,0010
Graham	110	0,0015	0,0009	0,0002	0,0085	0,0004	0,0020	0,0018
przedział L7: $0,6 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,7$								
Tlen, %	113	19,7	20,3	0,6	20,5	19,7	20,4	2,3
Azot, %	113	76,8	79,0	4,9	79,5	76,9	79,4	8,5
Metan	113	3,2	0,4	0,0	93,3	0,0	3,2	10,6
CO ₂ ,%	113	0,0011	0,0007	0,0001	0,0048	0,0003	0,0015	0,0012
Graham	113	0,0018	0,0011	0,0001	0,0075	0,0005	0,0022	0,0018
przedział L8: $0,7 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,8$								
Tlen, %	92	19,5	20,2	0,6	20,4	19,8	20,3	2,5
Azot, %	92	76,4	79,0	4,9	79,6	77,5	79,4	9,3
Metan	92	3,8	0,5	0,0	93,3	0,0	2,5	11,7
CO ₂ ,%	92	0,0012	0,0008	0,0001	0,0054	0,0004	0,0015	0,0013
Graham	92	0,0016	0,0010	0,0001	0,0070	0,0005	0,0020	0,0017

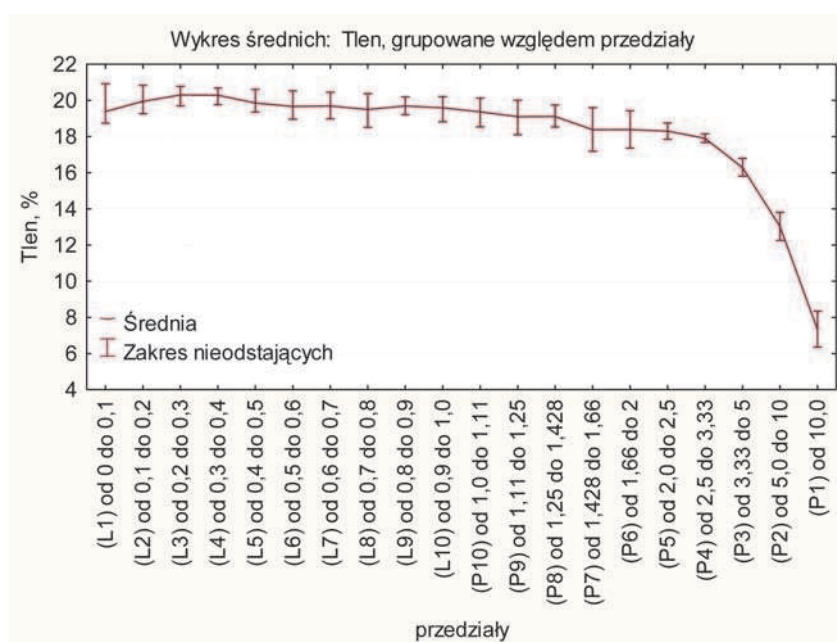
przedział L9: $0,8 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,9$								
Tlen, %	94	19,7	20,1	10,8	20,3	19,7	20,2	1,2
Azot, %	94	77,5	79,1	44,0	79,6	77,5	79,5	4,7
Metan	94	2,1	0,5	0,0	44,7	0,0	2,5	5,1
CO, %	94	0,0012	0,0010	0,0001	0,0046	0,0006	0,0015	0,0009
Graham	94	0,0014	0,0011	0,0001	0,0056	0,0007	0,0018	0,0011
przedział L10: $0,9 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1,0$								
Tlen, %	83	19,6	20,0	0,8	20,2	19,7	20,1	2,2
Azot, %	83	77,5	79,2	6,7	79,7	78,1	79,5	8,1
Metan	83	2,6	0,3	0,0	91,2	0,0	2,0	10,2
CO, %	83	0,0013	0,0008	0,0001	0,0048	0,0005	0,0019	0,0011
Graham	83	0,0014	0,0008	0,0001	0,0052	0,0005	0,0019	0,0012
przedział P10: $1,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,9$								
Tlen, %	93	19,4	19,9	1,1	20,1	19,6	20,0	2,2
Azot, %	93	77,1	79,1	8,0	79,8	77,8	79,5	8,2
Metan	93	3,2	0,5	0,0	89,7	0,0	2,3	10,2
CO, %	93	0,0015	0,0012	0,0001	0,0062	0,0007	0,0018	0,0013
Graham	93	0,0015	0,0011	0,0001	0,0060	0,0007	0,0018	0,0012
przedział P9: $1/0,9 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,8$								
Tlen, %	115	19,1	19,8	0,3	20,0	19,3	19,9	2,7
Azot, %	115	76,5	79,3	5,7	79,9	77,4	79,6	10,3
Metan	115	3,9	0,5	0,0	92,8	0,0	2,9	13,0
CO, %	115	0,0016	0,0013	0,0001	0,0063	0,0009	0,0020	0,0012
Graham	115	0,0013	0,0011	0,0001	0,0054	0,0008	0,0017	0,0010
przedział P8: $1/0,8 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,7$								
Tlen, %	136	19,1	19,7	6,8	19,9	19,1	19,8	1,9
Azot, %	136	77,2	79,3	30,3	80,1	77,1	79,7	7,1
Metan	136	2,9	0,5	0,0	62,0	0,0	3,5	8,0
CO, %	136	0,0023	0,0017	0,0001	0,0076	0,0011	0,0032	0,0016
Graham	136	0,0017	0,0013	0,0001	0,0056	0,0009	0,0024	0,0012
przedział P7: $1/0,7 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,6$								
Tlen, %	134	18,4	19,5	0,8	19,8	18,7	19,6	3,6
Azot, %	134	75,1	79,3	9,0	80,2	76,6	79,9	13,4
Metan	134	5,9	0,6	0,0	88,9	0,0	4,2	16,8
CO, %	134	0,0021	0,0017	0,0001	0,0068	0,0010	0,0031	0,0016
Graham	134	0,0014	0,0011	0,0001	0,0043	0,0007	0,0020	0,0010
przedział P6: $1/0,6 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,5$								
Tlen, %	136	18,4	19,2	1,3	19,6	18,8	19,4	3,1
Azot, %	136	76,2	79,6	11,2	80,5	78,0	79,9	11,6
Metan	136	4,7	0,3	0,0	86,3	0,0	2,6	14,4
CO, %	136	0,0028	0,0023	0,0001	0,0183	0,0014	0,0039	0,0025
Graham	136	0,0015	0,0012	0,0001	0,0096	0,0008	0,0021	0,0013
przedział P5: $1/0,5 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,4$								
Tlen, %	151	18,3	18,8	9,6	19,3	18,2	19,0	1,4
Azot, %	151	77,5	79,2	44,7	80,9	77,1	80,1	5,3
Metan	151	3,3	0,7	0,0	44,9	0,0	2,8	6,8
CO, %	151	0,0039	0,0035	0,0001	0,0117	0,0015	0,0058	0,0029
Graham	151	0,0018	0,0015	0,0000	0,0050	0,0007	0,0025	0,0013
przedział P4: $1/0,4 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,3$								
Tlen, %	170	17,9	18,1	14,4	18,9	17,6	18,4	0,8
Azot, %	170	78,6	79,6	65,7	81,5	77,3	80,4	3,0
Metan	170	2,3	0,9	0,0	18,7	0,0	2,8	3,7
CO, %	170	0,0060	0,0038	0,0001	0,0352	0,0012	0,0092	0,0068
Graham	170	0,0021	0,0013	0,0000	0,0124	0,0004	0,0033	0,0023
przedział P3: $1/0,3 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,2$								
Tlen, %	242	16,3	16,8	1,8	18,2	16,2	17,5	2,0
Azot, %	242	77,1	79,7	21,0	82,7	77,1	80,6	7,4
Metan	242	4,9	1,1	0,0	74,6	0,0	4,6	9,6
CO, %	242	0,0071	0,0038	0,0001	0,0437	0,0011	0,0115	0,0084
Graham	242	0,0017	0,0009	0,0000	0,0106	0,0003	0,0029	0,0020

przedział P2: $1/0,2 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$								
Tlen, %	289	13,0	14,0	2,4	16,9	11,8	15,5	3,3
Azot, %	289	74,9	79,8	29,6	85,5	71,3	82,3	11,1
Metan	289	9,7	2,3	0,0	66,0	0,0	14,9	14,4
CO, %	289	0,0101	0,0071	0,0001	0,0402	0,0011	0,0166	0,0097
Graham	289	0,0015	0,0011	0,0000	0,0064	0,0002	0,0025	0,0014
przedział P1: $1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$								
Tlen, %	145	7,3	7,6	0,9	12,6	5,3	9,9	3,1
Azot, %	145	83,0	85,5	43,9	97,5	77,3	89,0	9,1
Metan	145	6,1	2,4	0,0	51,7	0,0	10,1	8,5
CO, %	145	0,0076	0,0028	0,0001	0,0383	0,0004	0,0106	0,0100
Graham	145	0,0006	0,0002	0,0000	0,0037	0,0000	0,0010	0,0008



Rys. 2. Wartości średnie wskaźnika Grahama z zaznaczonym zakresem nieodstających dla poszczególnych przedziałów

Fig. 2. Graham index mean values with the selection of not outliers range for individual intervals

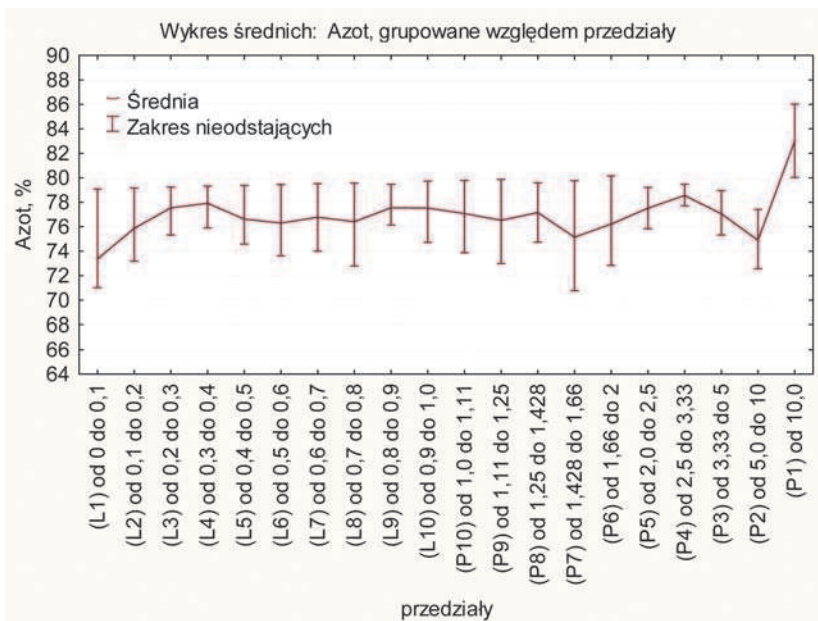


Rys. 3. Wartości średnie tlenu z zaznaczonym zakresem nieodstających dla poszczególnych przedziałów

Fig. 3. Oxygen mean values with the selection of not outliers range for individual intervals

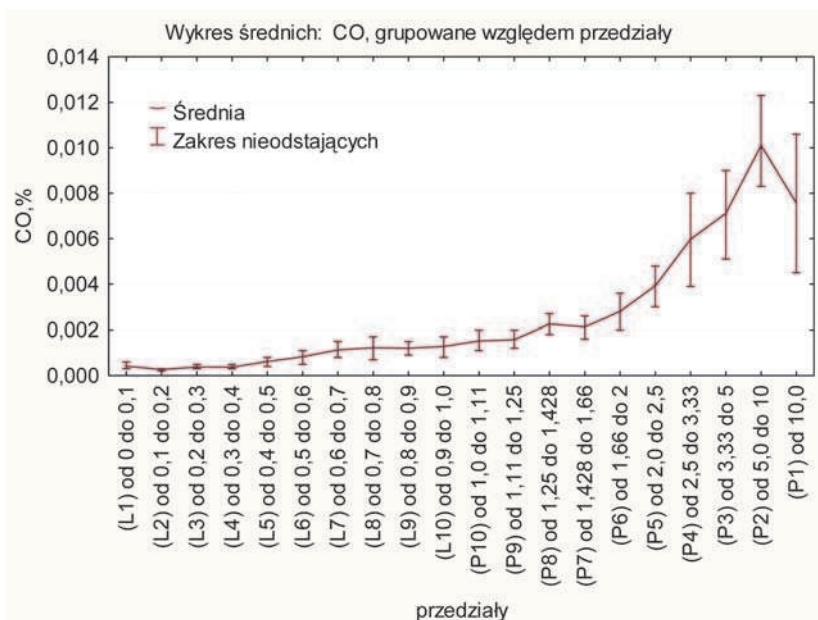
Rys. 4. Wartości średnie azotu z zaznaczonym zakresem nieodstających dla poszczególnych przedziałów

Fig. 4. Nitrogen mean values with the selection of not outliers range for individual intervals



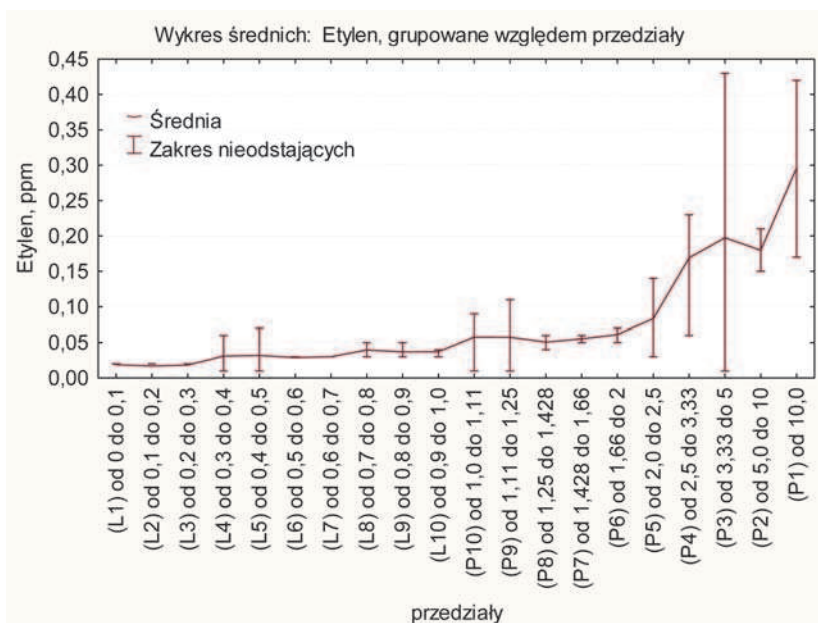
Rys. 5. Wartości średnie CO z zaznaczonym zakresem nieodstających dla poszczególnych przedziałów

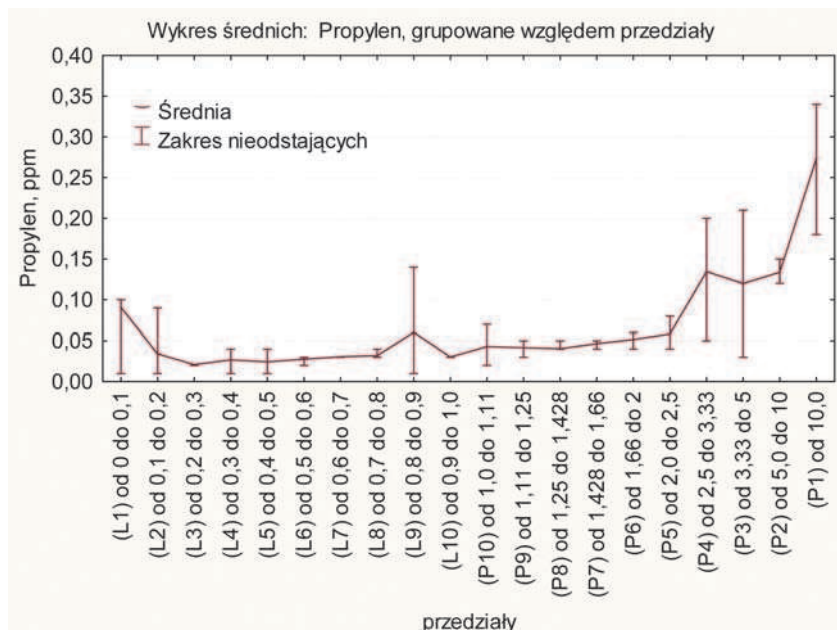
Fig. 5. CO mean values with the selection of not outliers range for individual intervals



Rys. 6. Wartości średnie etylenu z zaznaczonym zakresem nieodstających dla poszczególnych przedziałów

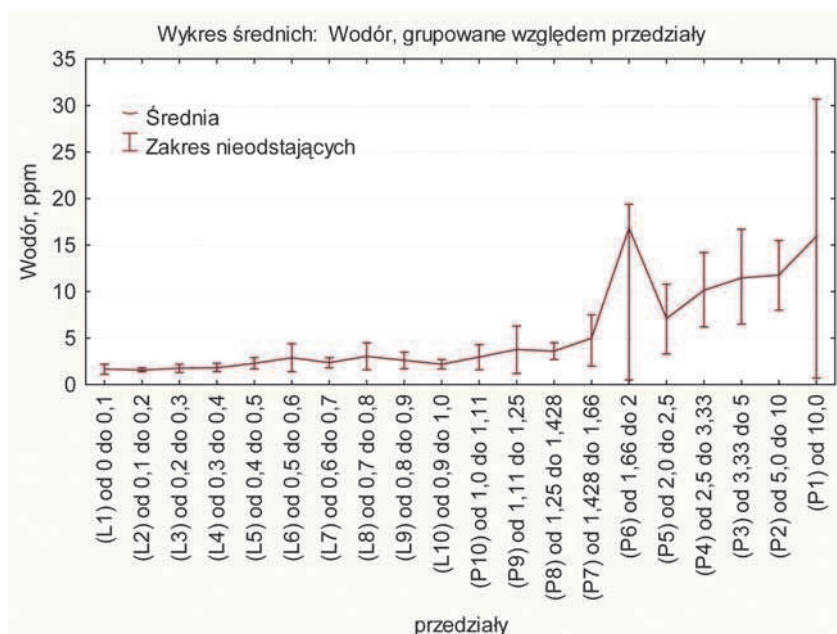
Fig. 6. Ethylene mean values with the selection of not outliers range for individual intervals





Rys. 7. Wartości średnie propylenu z zaznaczonym zakresem nieodstających dla poszczególnych przedziałów

Fig. 7. Propylene mean values with the selection of not outliers range for individual intervals



Rys. 8. Wartości średnie wodoru z zaznaczonym zakresem nieodstających dla poszczególnych przedziałów

Fig. 8. Hydrogen mean values with the selection of not outliers range for individual intervals

Z zestawienia statystyk podstawowych wskaźnika Grahama sporządzonych dla podpróby L ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1$) wyróżnia się przedział L1 ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$) (tabl. 3). Wartość średnia wskaźnika Grahama jest tu prawie o rząd wielkości większa niż w pozostałych przedziałach. Występują również bardzo wysokie wartości nieodstające wskaźnika na tle pozostałych przedziałów (tabl. 3, rys. 2). Sugeruje to, że w przedziale L1 ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$) powinno występować najwyższe zagrożenie pożarowe związane z większością elementów tego przedziału. Jednak analiza statystyk podstawowych CO oraz węglowodorów i wodoru nie potwierdza takiego stanu – stężenia tych gazów są małe, odpowiadające w większości niskiemu stopniowi zagrożenia pożarowego (tabl. 3, rys. 6, 7 i 8). Potwierdza to wnioski zawarte w [9], że w przedziale ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$) występują przypadki, dla których wskaźnik Grahama nie oddaje prawidłowo stopnia zagrożenia pożarowego, znacznie go zawyżając.

W statystykach podstawowych wskaźnika Grahama w zakresie podpróby P ($1 < 0,265N_2 - O_2$) wyróżnia się prze-

dział P1 ($1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$). W tym przedziale wartość średnia wskaźnika jest około 3 razy niższa niż w przedziałach L2, ..., L10, P2, ..., P10. Występują tu również najniższe wartości wskaźnika w zakresie nieodstających. Można więc wysnuć wniosek, że w przedziale P1 ($1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$) powinno występować najniższe zagrożenie pożarowe, związane z większością elementów tego przedziału. Jednak w przedziale P1 występują podwyższone stężenia CO, etylenu, propylenu, wodoru i azotu oraz obniżone stężenia tlenu (tabl. 3, rys. 2, 3, 4, 5, 6, 7 i 8). Takie stężenia przytoczonych gazów pojawiają się w warunkach bardzo wysokiej temperatury i braku tlenu (podczas rozpadu termicznego węgla – pirolizy) [2][4]. I dla takich warunków, pomimo podwyższonych wartości CO obserwujemy obniżone wartości wskaźnika Grahama.

W przedziale P1 wskaźnik Grahama sygnalizuje nam najniższe zagrożenie, co nie odpowiada rzeczywistości. Poniżej podano przykład jak wskaźnik Grahama zachowuje się w warunkach wysokiej temperatury przy postępującym spadku stężenia tlenu (tablica 4).

Tablica 4. Przykład wartości wskaźnika Grahama w warunkach spadającego stężenia tlenu i wysokiego zagrożenia pożarowego – próbki pobrane z za tamy w 3-dniowych odstępach czasowych

Table 4. Example of Graham index values in the conditions of decreasing oxygen concentration and high level of fire hazard - samples were taken from behind the isolation dam at 3-day intervals

-	Etylen ppm	Propy- len ppm	Acety- len ppm	CO ppm	Tlen %	Azot %	CO ₂ %	Metan %	Wodór ppm	0,265N ₂ -O ₂ %	Graham
1 dzień	29,10	4,23	5,625	2233	15,25	80,23	1,10	3,05	1312,0	6,01	0,0371
4 dzień	11,30	2,25	2,141	1452	4,78	57,20	1,22	36,62	196,0	10,38	0,0140
7 dzień	9,46	1,86	0,672	402	2,93	63,00	1,09	32,93	6,7	13,77	0,0029
10 dzień	4,81	0,81	0,197	34	2,61	66,49	1,14	29,75	3,2	15,01	0,0002

4. Poszukiwanie granicznych wartości mianownika

Z przedstawionej analizy wynika, że należy poszukiwać dwóch wartości granicznych mianownika, które wyznaczają przedział wiarygodności wskaźnika Grahama. Podstawą tych poszukiwań będą przedziały skrajne, w których występują wyraźnie odstające wartości wskaźnika. A więc przedział L1 ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1$), gdzie wskaźnik Grahama zawyża stopień zagrożenia pożarowego i przedział P1 ($1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$), gdzie wskaźnik wykazuje zbyt niskie wartości w stosunku do poziomu zagrożenia pożarowego.

Poszukiwanie granicznych wartości mianownika wskaźnika Grahama zostało zrealizowane jako porównanie dwóch sąsiednich grup (grupy obejmującej przypadki odstające z grupą sąsiednią, gdzie te przypadki zanikają). A ponieważ pomiędzy tymi grupami nie występuje skokowa granica, dlatego konieczne było zastosowanie metody, która tę granicę jak najlepiej wychwyci.

Z uwagi na bardzo dużą licznosc próby skorzystano z centralnego twierdzenia granicznego, które mówi, że rozkład średnich z próby zmierza do rozkładu normalnego, niezależnie od rozkładu zmiennej w populacji. Przyjęte założenie pozwala zastosować testy statystyczne, które dają dużą pewność co do weryfikowanych hipotez.

Do poszukiwania granicy pomiędzy grupami wykorzystano program STATISTICA i testy różnic między średnimi z dwóch prób, z uwzględnieniem jednorodności wariancji (test t). Założono poziom istotności dla testu t równy 0,05. Czyli z prawdopodobieństwem na poziomie co najmniej 95% popełniamy błąd, odrzucając hipotezę zerową o braku różnicy między średnimi, z uwzględnieniem zmienności w grupach. Można więc przyjąć, że z prawdopodobieństwem na poziomie co najmniej 95% wyznaczone wartości graniczne będą określać przedział mianownika, gdzie wskaźnik Grahama daje dużą wiarygodność oceny zagrożenia pożarowego.

Analizę różnic pomiędzy średnimi rozpoczęto od porównania podgrupy L i P. Otrzymane wyniki testów nie pozwoliły na przyjęcie hipotezy zerowej o braku różnic pomiędzy średnimi z uwzględnieniem jednorodności wariancji. Dlatego odrzucono wartości najbardziej odstające, czyli te występujące w przedziałach L1 ($0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,1\%$)

oraz P1 ($1/0,1 < 0,265N_2 - O_2\%$). Po czym powtórzono testy, porównując wartości wskaźnika Grahama grupy L2 ÷ L10 z jej symetrycznym odpowiednikiem, tj. grupą P2 ÷ P10. Obliczone poziomy istotności testu Levene'a oraz testu Browna i Forsythe'a przekraczały 0,05 (wynosiły odpowiednio $p = 0,991074$ i $p = 0,133713$). Natomiast wartość odpowiedniego testu t dla jednorodnych wariancji wynosiła $t = -1,701$, a odpowiadający mu poziom istotności $p = 0,089$ (tabl. 5). Otrzymane wyniki pozwalają stwierdzić, że spełnione jest założenie o jednorodności wariancji i nie można odrzucić hipotezy zerowej, która mówi o równości średnich wskaźnika Grahama w obu grupach.

Daje nam to podstawę do tego, aby poszukiwać granicznej wartości mianownika wskaźnika, wykorzystując przedziały L1 i P1, w których występują wartości zauważalnie odstające.

4.1. Granica lewostronna

W przypadku granicy lewostronnej mianownika wskaźnika Grahama obserwuje się, że im bardziej jego wartość zbliża się do zera, tym większa jest rozbieżność pomiędzy poziomem wskaźnika Grahama a rzeczywistym stanem zagrożenia pożarowego. Rozbieżności takie na pewno występują w przedziale L1. Dlatego sposób poszukiwania wartości granicznej mianownika polegał na tym, że przedział L1 był przesuwany krokowo w kierunku wyższych wartości. Działanie takie miało na celu wyrównanie różnic pomiędzy porównywanymi grupami przez odrzucanie najbardziej zawyżonych wartości i dobieranie wartości zbliżających się do typowych.

Przyjęto, że wskaźniki Grahama z przedziału L1 będą porównywane ze wskaźnikami:

- a) grupy obejmującej przedziały L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10;
- b) grupy obejmującej przedziały L2 ÷ L10 (zawężona do lewej części ramienia hiperboli);
- c) grupy przedziału sąsiadującego, czyli L2.

4.1.1. Test t na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału L1 a przedziału (L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10)

Postępowano w sposób następujący: jeżeli wykonane testy t dla prób niezależnych wykazały, że nie można przyjąć

Tablica 5. Testy t dla prób niezależnych. Porównanie wskaźnika Grahama podgrupy lewego i prawego ramienia hiperboli przy odrzuceniu przedziałów skrajnych L1 i P1

Table 5. T-tests for the independent samples. The comparison of Graham index subgroup of the left and right arm of hyperbole rejecting the extreme ranges L1 and P1

Zmienna	Testy t							
	Grupa 1: od L2 do L10 Grupa 2: od P2 do P10							
	Średnia lewa	Średnia prawa	t	df	p	t oddz. est. war.	df	p dwustr.
Graham	0,0015	0,0016	-1,701	2564	0,089	-1,679	2240,61	0,093

hipotezy zerowej, która mówi o równości średnich wskaźnika Grahama dla obu grup, to przesuwano skrajny przedział (L1) z zachowaniem jego rozpiętości oraz odpowiednio skracano drugą grupę (L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10). Postępowano tak aż do momentu uzyskania potwierdzenia, że nie występują różnice w wartościach średnich obu grup, z uwzględnieniem zmienności w grupach (jednorodności wariancji). Ostatni negatywny wynik testu t przyjmowano za wartość graniczną mianownika, od której wskaźnik Grahama nie odzwierciedla prawidłowo stanu zagrożenia pożarowego (w tym przypadku zawiąza poziom zagrożenia). Np. pierwszą analizę wykonano porównując przedziały: L1 ($0,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,100$) i L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10 ($0,100 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$). Następnie granica była przesuwana o 0,001 z zachowaniem dla grupy L1 rozpiętości 0,1. A więc następną analizą było porównanie grup: L1 ($0,001 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,101$) i L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10 ($0,101 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$). Postępowano w ten sposób do momentu, aż uzyskano potwierdzenie na poziomie prawdopodobieństwa równym 95%, że pomiędzy grupami nie występują istotne różnice.

Wyniki uzyskane dla pierwszej i ostatnich analiz przedstawiono w tabelicy 6.

Otrzymane wyniki dają podstawę do stwierdzenia, że nie można odrzucić hipotezy zerowej, która mówi o braku różnic pomiędzy średnimi wartościami wskaźnika Grahama w przypadku porównania grup ($0,112 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,212$) i ($0,212 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$). W oparciu o to stwierdzenie możemy więc przyjąć, że z prawdopodobieństwem co najmniej 95% wskaźnik Grahama daje dużą wiarygodność

oceny zagrożenia pożarowego w przedziale mianownika powyżej lewostronnej wartości granicznej równej ($0,265N_2 - O_2$)_{gr} = 0,211 (tabl. 6).

4.1.2. Test t na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału L1 a przedziału (L2 ÷ L10)

Postępowano analogicznie jak w poprzednim punkcie, przy czym pierwszą analizę wykonano porównując przedziały: L1 ($0,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,100$) i L2 ÷ L10 ($0,100 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1,0$). Następnie granica pomiędzy grupami była przesuwana z zachowaniem rozpiętości przedziału L1 równej 0,1 aż do potwierdzenia na poziomie prawdopodobieństwa 95% braku różnic pomiędzy średnimi. Wyniki dla pierwszej i ostatnich analiz przedstawiono w tabelicy 7.

Dla tego sposobu analizy możemy przyjąć, że wskaźnik Grahama daje dużą wiarygodność oceny zagrożenia pożarowego w przedziale mianownika powyżej lewostronnej wartości granicznej równej ($0,265N_2 - O_2$)_{gr} = 0,216 (tabl. 7).

4.1.3. Test t na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału L1 a przedziału L2

Postępowano analogicznie do poprzednich punktów, przy czym pierwszą analizę wykonano porównując grupę L1 ($0,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,100$) z L2 ($0,100 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,200$). Następnie obie grupy były przesuwane z zachowaniem stałej rozpiętości każdego z przedziałów, równej 0,1. Wyniki dla pierwszej i ostatnich analiz przedstawiono w tabelicy 8.

Tablica 6. Wyniki testów t dla prób niezależnych na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału L1 a przedziału (L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10)

Table 6. The results of t-tests for independent samples in the presence of significant differences between the Graham index in range L1 and range (L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10)

Zmienna	Testy t						
	N ważnych Grupa 1	N ważnych Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t	df	p
Grupa 1, (L1): ($0,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,10$) Grupa 2, (L2÷L10+P2÷P10): ($0,10 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$)							
Graham	66	2566	0,015316	0,001568	28,42545	2630	0
Grupa 1, (L1): ($0,111 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,211$) Grupa 2, (L2÷L10+P2÷P10): ($0,211 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$)							
Graham	166	2392	0,001808	0,00155	1,987771	2556	0,046944
Grupa 1, (L1): ($0,112 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,212$) Grupa 2, (L2÷L10+P2÷P10): ($0,212 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$)							
Graham	166	2389	0,001798	0,001552	1,899102	2553	0,057664

Tablica 7. Wyniki testów t dla prób niezależnych na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału L1 a przedziału (L2 ÷ L10)

Table 7. The results of t-tests for independent samples in the presence of significant differences between the Graham index in range L1 and range (L2 ÷ L10)

Zmienna	Testy t						
	N ważnych Grupa 1	N ważnych Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t	df	p
Grupa 1, (L1): ($0,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,10$) Grupa 2, (L2÷L10): ($0,10 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1,0$)							
Graham	66	1100	0,0153	0,0015	19,58	1164	0
Grupa 1, (L1): ($0,116 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,216$) Grupa 2, (L2÷L10): ($0,216 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1,0$)							
Graham	163	920	0,0018	0,0015	2,352	1081	0,019
Grupa 1, (L1): ($0,117 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,217$) Grupa 2, (L2÷L10): ($0,217 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1,0$)							
Graham	164	918	0,0017	0,0015	1,954	1080	0,051

Tablica 8. Wyniki testów t dla prób niezależnych na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału L1 a grupą przedziału sąsiadującego L2

Table 8. The results of t-tests for independent samples in the presence of significant differences between the Graham index in range L1 and adjacent range L2

Zmienna	Testy t						
	N ważnych Grupa 1	N ważnych Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t	df	p
Grupa 1, (L1): $0,0 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,10$ Grupa 2, (L2): $(0,10 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,20)$							
Graham	66	156	0,015316	0,001871	7,41857	220	0
Grupa 1, (L1): $0,093 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,193$ Grupa 2, (L2): $(0,193 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,293)$							
Graham	157	172	0,002016	0,001533	2,095688	327	0,036878
Grupa 1, (L1): $0,094 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,194$ Grupa 2, (L2): $(0,194 < 0,265N_2 - O_2 \leq 0,294)$							
Graham	157	173	0,001978	0,001533	1,949453	328	0,052093

Dla tego sposobu analizy możemy przyjąć, że wskaźnik Grahama daje dużą wiarygodność oceny zagrożenia pożarowego w przedziale mianownika powyżej lewostronnej wartości granicznej równej $(0,265N_2 - O_2)_{gr} = 0,193$ (tabl. 8).

Przeprowadzone testy wskazują na to, że przedział, w którym zawiera się wartość graniczna mianownika wskaźnika Grahama jest bardzo wąski. Można to zaobserwować po tym, jak mocno spada prawdopodobieństwo wraz z obniżaniem się wartości mianownika (niezależnie od obranej metody jego wyznaczania). Np. zmniejszenie wartości mianownika o 0,001 powoduje, że obliczone prawdopodobieństwo jest już poniżej wymaganego poziomu $p = 0,05$ (tabl. 6, 7 i 8). A więc odpowiednio zaokrąglając którykolwiek z otrzymanych wyników spowodujemy, że uzyskana wartość będzie zawierać przedział, w którym występują wszystkie obliczone graniczne wartości mianownika, tj. wg każdej z trzech zastosowanych metod.

W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymano dla lewej strony mianownika wskaźnika Grahama trzy wartości graniczne, które są bardzo zbliżone: 0,193; 0,211 oraz 0,216 i średnio równe 0,207.

Warto w tym miejscu zauważyć, że w górnictwie austrijskim funkcjonuje zasada, według której, jeżeli wartość mianownika wskaźnika Grahama wynosi poniżej 0,2, to obliczony wskaźnik jest niemiarodajny [3]. Wartość ta jest zbliżona do wyznaczonych przez nas wartości granicznych oraz ich średniej.

4.2. Granica prawostronna

Granice prawostronną mianownika wskaźnika Grahama poszukiwano analogicznie jak w przypadku granicy lewo-

stronnej, tj. wykonując trzy warianty testów t, gdzie wskaźniki Grahama z przedziału P1 porównywano ze wskaźnikami:

- d) grupy obejmującej przedziały $L2 \div L10 + P2 \div P10$;
- e) grupy obejmującej przedziały $P2 \div P10$;
- f) grupy przedziału sąsiadującego, czyli P2.

4.2.1. Test t na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału P1 a przedziału (L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10)

Postępowano analogicznie do poprzednich punktów, przy czym pierwszą analizę wykonano porównując grupę P1 ($1/0,1 < 0,265N_2 - O_2$) z grupą $L2 \div L10 + P2 \div P10$ ($0,100 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,1$). Następnie grupa P1 była przesuwana z zachowaniem swojej rozpiętości zaś grupa $L2 \div L10 + P2 \div P10$ była odpowiednio skracana. Wyniki dla pierwszej i ostatnich analiz przedstawiono w tablicy 9.

W oparciu o otrzymane wyniki testów możemy przyjąć, że z prawdopodobieństwem na poziomie co najmniej 95% wskaźnik Grahama daje dużą wiarygodność oceny zagrożenia pożarowego w przedziale mianownika poniżej prawostronnej wartości granicznej równej $(0,265N_2 - O_2)_{gr} = 1/0,172 = 5,81$ (tabl. 9).

4.2.2. Test t na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału P1 a przedziału (P2 ÷ P10)

Postępowano analogicznie do poprzednich przypadków, wyniki dla pierwszej i ostatnich analiz przedstawiono w tablicy 10.

W oparciu o otrzymane wyniki testów możemy przyjąć, że z prawdopodobieństwem na poziomie co najmniej 95% wskaźnik Grahama daje dużą wiarygodność oceny zagrożenia

Tablica 9. Wyniki testów t dla prób niezależnych na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału P1 a przedziału (L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10)

Table 9. The results of t-tests for independent samples in the presence of significant differences between the Graham index in range P1 and range (L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10)

Zmienna	Testy t						
	N ważnych Grupa 1	N ważnych Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t	df	p
Grupa 1, (L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10): $(0,10 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,10)$ Grupa 2, (P1): $(1/0,10 < 0,265N_2 - O_2)$							
Graham	2566	145	0,001568	0,000603	7,128928	2709	0,0000000
Grupa 1, (L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10): $(0,100 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,172)$ Grupa 2, (P1): $(1/0,172 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,072)$							
Graham	2364	270	0,001575	0,001371	1,984037	2632	0,047355
Grupa 1, (L2 ÷ L10 + P2 ÷ P10): $(0,100 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,175)$ Grupa 2, (P1): $(1/0,175 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,075)$							
Graham	2354	274	0,001574	0,001403	1,665269	2626	0,095978

Tablica 10. Wyniki testów t dla prób niezależnych na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału P1 a przedziału (P2 ÷ P10)

Table 10. The results of t-tests for independent samples in the presence of significant differences between the Graham index in range P1 and range (P2 ÷ P10)

Zmienna	Testy t						
	N ważnych Grupa 1	N ważnych Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t	df	p
Grupa 1, (P2 ÷ P10): $(1 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,10)$ Grupa 2, (P1): $(1/0,10 < 0,265N_2 - O_2)$							
Graham	1466	145	0,001615	0,000603	7,754938	1609	0,0000000
Grupa 1, (P2 ÷ P10): $(1 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,179)$ Grupa 2, (P1): $(1/0,179 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,079)$							
Graham	1243	277	0,001635	0,001427	2,041768	1518	0,041347
Grupa 1, (P2 ÷ P10): $(1 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,181)$ Grupa 2, (P1): $(1/0,181 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,081)$							
Graham	1235	275	0,001635	0,001440	1,905374	1508	0,056922

pożarowego w przedziale mianownika poniżej prawostronnej wartości granicznej równej $(0,265N_2 - O_2)_{gr} = 1/0,179 = 5,59$ (tabl. 10).

4.2.3. Test t na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału P1 a przedziału P2

Postępowano analogicznie do poprzednich punktów, zaś wyniki uzyskane dla pierwszej i ostatnich analiz przedstawiono w tablicy 11.

W oparciu o otrzymane wyniki testów możemy przyjąć, że z prawdopodobieństwem na poziomie co najmniej 95% wskaźnik Grahama daje dużą wiarygodność oceny zagrożenia pożarowego w przedziale mianownika poniżej prawostronnej wartości granicznej równej $(0,265N_2 - O_2)_{gr} = 1/0,172 = 5,81$ (tabl. 11).

W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymano dla prawej strony mianownika wskaźnika Grahama trzy wartości graniczne: 5,81; 5,59 oraz 5,81, które są średnio równe 5,7.

5. Podsumowanie

Wiarygodność przeprowadzonej analizy oparto na 2777-elementowej próbie złożonej z analiz chromatograficznych próbek powietrza kopalnianego pobieranych ze zrobów ścianowych lub z za tam izolacyjnych.

Wykazano, że wskaźnik Grahama G rozpatrywany jako zależność względem mianownika jest zbiorem hiperboli $z = \frac{1}{u}$ różnicowanych przez mnożnik CO , $G = CO \cdot \left(\frac{1}{u}\right)$, gdzie: $u = (0,265N_2 - O_2)$.

W oparciu o takie założenie przeprowadzono dokładną analizę próby w zakresie interesujących nas zmiennych i stwierdzono, że zarówno z lewej jak i prawej strony przedziału mianownika wskaźnika Grahama pojawiają się wyraźnie odstające wartości tego wskaźnika, które nie oddają prawidłowo stopnia zagrożenia pożarowego.

Poszukiwano dwóch wartości granicznych mianownika, które będą wyznaczać przedział wiarygodności wskaźnika Grahama. Wykorzystano w tym celu testy t dla prób niezależnych, które dają dużą pewność co do weryfikowanych hipotez (poziom istotności przyjęto równy 0,05).

Ustalono, że graniczna wartość mianownika wskaźnika Grahama wynosi:

- dla lewej strony $(0,265N_2 - O_2)_{gr} = 0,2$;
- dla prawej strony $(0,265N_2 - O_2)_{gr} = 5,7$.

W przedziale lewostronnym, czyli dla wartości mianownika $(0,265N_2 - O_2)_{gr} \leq 0,2$, obserwujemy próbki charakteryzujące się zawartością tlenu: od 10,2% do 20,9% (średnia 20,6%, mediana 20,8%), azotu: od 39% do 79,2% (średnia 78,2%, mediana 79,0%), CO_2 : od 0,1% do 0,9% (średnia 0,1%, mediana 0,1%), CH_4 : od 0,0% do 48,0% (średnia 1,1%, mediana 0,1%). Można zauważyć, że zdecydowanie przeważają tu próbki z wysoką zawartością tlenu, niską zawartością CO_2 i metanu. Dlatego zawyżanie stopnia zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama najczęściej występuje w przypadku próbek pobranych z miejsc niedostępnych i jednocześnie dobrze przewietrzanych, np. ze zrobów ścian o dużej intensywności przewietrzania lub z za nieszczelnych tam izolacyjnych, w których dodatkowo różnica potencjałów wywołuje wciąganie powietrza za tamę. Wartość mianownika $(0,265N_2 - O_2)_{gr} \leq 0,2$ może też być skutkiem niedokładnie pobranej próbki powietrza do analizy.

Tablica 11. Wyniki testów t dla prób niezależnych na występowanie istotnych różnic pomiędzy wskaźnikiem Grahama przedziału P1 a przedziału P2

Table 11. Results of t-tests for independent samples in the presence of significant differences between the Graham index in range P1 and range P2

Zmienna	Testy t						
	N ważnych Grupa 1	N ważnych Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t	df	p
Grupa 1, (P2): $(1/0,20 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,10)$ Grupa 2, (P1): $(1/0,10 < 0,265N_2 - O_2)$							
Graham	289	145	0,001473	0,000603	6,955220	432	0,0000000
Grupa 1, (P2): $(1/0,272 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,172)$ Grupa 2, (P1): $(1/0,172 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,072)$							
Graham	275	270	0,001657	0,001371	2,105520	543	0,035705
Grupa 1, P2 ÷ (P10): $(1/0,275 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,175)$ Grupa 2, (P10): $(1/0,175 < 0,265N_2 - O_2 \leq 1/0,075)$							
Graham	271	274	0,001633	0,001403	1,685397	543	0,092487

W przedziale prawostronnym, czyli dla wartości mianownika $(0,265N_2 - O_2)_{gr} \geq 5,7$, obserwujemy próbki charakteryzujące się zawartością tlenu: od 0,9% do 16,3% (średnia 10,3%, mediana 10,9%), azotu: od 45,6% do 97,5% (średnia 78,7%, mediana 81,1%), CO_2 : od 0,1% do 10,3% (średnia 2,8%, mediana 2,1%), CH_4 : od 0,0% do 46,7% (średnia 7,8%, mediana 2,4%). W tym przedziale zdecydowanie przeważają próbki z niską zawartością tlenu oraz zwiększoną zawartością azotu, CO_2 i metanu. Dlatego przypadki zaniżania stopnia zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama obserwuje się najczęściej dla próbek pobieranych z głębokich zrobów, z rurociągów odmetanowania, zza tam izolacyjnych, a szczególnie w przypadkach stosowania inertyzacji zrobów azotem lub dwutlenkiem węgla.

Przypadki niepoprawnej oceny poziomu zagrożenia poza-rem endogenicznym przez wskaźnik Grahama zostały przedstawione m.in. w [5] i [13]. Wskazano, że metan niezwiązany z reakcją utleniania, który dopływa z jakiegoś „zbiornika” do miejsca pobierania próbek gazowych poddawanych analizie, „fałszuje” wartość wskaźnika [5]. Za „fałszowanie” wartości wskaźnika Grahama odpowiada też dopływ do miejsca pobierania próbki azotu stosowanego do inertyzacji [13].

Występujące nieprawidłowości spowodowały, że w górnictwie światowym przyjmuje się różne ograniczenia w stosowaniu wskaźnika Grahama, zazwyczaj odnoszą się one do dolnego przedziału mianownika wskaźnika Grahama [3], [7].

Przyczyn nieprawidłowej oceny stopnia zagrożenia pożarowego na podstawie wartości wskaźnika Grahama poszukuje się głównie w sposobie określania ubytku tlenu [1]. Jednak, jak podano w [9], nie rozwiązuje to problemu. W artykule wykazano, że nieprawidłowa ocena stopnia zagrożenia pożarowego w oparciu o wskaźnik Grahama związana jest z mianownikiem, czyli ubytkiem tlenu, ale wynika głównie z konstrukcji matematycznej wzoru służącego do obliczania tego wskaźnika. W związku z tym niezależnie od tego, czy na skład pobieranej próbki powietrza będą oddziaływać gazy inertne (azot, CO_2), metan, czy inne czynniki, to jeżeli mianownik znajdzie się w przedziale o niskiej wiarygodności, wówczas wskaźnik Grahama nie będzie prawidłowo oddawał poziomu zagrożenia pożarowego.

Wyprowadzony zakres wiarygodności wskaźnika Grahama może być pomocny m.in. przy obserwacji zagrożenia pożarowego podczas inertyzacji, po otamowaniu wyrobisk oraz przy ocenie prawidłowości pobierania próbek gazowych.

W oparciu o przeprowadzoną analizę sformułowano następujący wniosek:

Jeżeli wartości mianownika wskaźnika Grahama zawierają się w przedziale $0,2 < 0,265N_2 - O_2 < 5,7$, to wskaźnik Grahama cechuje się dużą wiarygodnością i można przyjąć, że na poziomie prawdopodobieństwa co najmniej 95% przedstawia prawidłowo stopień zagrożenia pożarowego. W pozostałych przypadkach nie można już

mieć takiej pewności, dlatego wskazane jest wówczas, aby korzystać z innych kryteriów określania stopnia zagrożenia pożarowego (np. z precyzyjnej analizy chromatograficznej próbek powietrza kopalnianego).

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 Górnictwa” 1996, Nr 14.
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. *Cygankiewicz J., Krause E.*: Kryteria warunkujące bezpieczeństwo prowadzenia eksploatacji w pokładach silnie metanowych i zagrożonych pożarami endogenicznymi, na przykładzie ściany nr 9 w pokładzie 405/2 w kopalni „Sośnica”. Prace Naukowe GIG. „Górnictwo i Środowisko” 2005, Nr 2.
5. *Lasek S., Stacha G., Trenczek S.*: Doświadczenia uzyskane w trakcie eksploatacji ściany 3J w pokładzie 502 partii J w KWK „Śląsk” w zakresie wpływu zagrożenia tapaniami na eskalację zagrożenia metanowego. Materiały 2 Szkoły Aerologii Górniczej. Zakopane 7-10 października 2002. Wyd. Sekcja Aerologii Górniczej Komitetu Górnictwa PAN, Kraków 2002, str. 249-263.
6. *Luszniewicz A., Słaby T.*: Statystyka z pakietem komputerowym STATISTICA PL. Teoria i zastosowania. Wydawnictwo C.H. Beck, 2008.
7. *Mackenzie-Wood P., Strang J.*: Fire gases and their interpretation. The Mining Engineer, June 1990.
8. *Mazur M.*: Systemy ochrony powietrza. Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.
9. *Słowik S., Świerczek L.*: Ujemne i zawyżone wartości wskaźnika Grahama. „Przeгляд Górnicy” 2014, Nr 12.
10. *Wacławik J., Cygankiewicz J., Branny M.*: Niektóre zagadnienia pożarów endogenicznych. Biblioteka szkoły eksploatacji podziemnej, 2000.
11. *Paca zbiorowa*: „Poradnik Górnika” t.3, str. 254-257.
12. 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.
13. *Trenczek S.*: Ocena stanu zagrożenia pożarem endogenicznym, na podstawie temperatury zrobów wyznaczonej metodą gazów istotnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria „Górnictwo” 2003, z. 258.