



Modyfikacja kryterium oceny stanu zagrożenia pożarowego na przykładzie wskaźnika Grahama

Modification of the criterion for assessing the state of fire hazard on the example of the Graham's ratio

Stanisław Słowik^{*)}

Treść: Przeanalizowano wyniki badań termicznego wygrzewania próbek węgla reprezentujących wszystkie grupy skłonności do samozapalenia wg klasyfikacji ujętej normą PN-93/G-04558. Zwrócono uwagę, że gazy wydzielane z zagrzewanych próbek osiągają różne stężenia w tej samej temperaturze zagrzania. Pokazano jak wpływa to na ocenę zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama. Spostrzeżenia odniesiono do warunków kopalnianych przeprowadzając analizę mieszania się gazów wydzielanych z zagranego węgla z powietrzem zrobowym dla dalekiej odległości ogniska zagrzania od miejsca pobrania próbki gazowej i bliskiej odległości. Omówiono wyniki tych analiz, które potwierdziły problem z interpretacją zagrożenia pożarowego w oparciu o wskaźniki pożarowe wykorzystujące gazy wydzielane podczas zagrzewania się węgla. Przykładem tego jest wskaźnik Grahama. Zaproponowano w jaki sposób temu przeciwdziałać. Podstawą jest ograniczenie rozrzutu wartości wskaźnika Grahama dla tej samej temperatury zagranego węgla oraz ustalenie wzorca pełniącego funkcję Wzorca odniesienia, do którego porównywane są przebiegi termicznego utleniania badanych próbek węgla i na tej podstawie korygowane są wartości kryterialne wskaźnika Grahama. Opisano przykład weryfikacji kryterium wskaźnika Grahama dla wybranych węgla. Podczas korygowania granic wskaźnika Grahama uwzględniono stopień rozcieńczenia gazów wydzielanych z zagranego węgla gazami zrobowymi i wpływ wartości niewiarygodnych wskaźnika Grahama na interpretację zagrożenia pożarowego.

Abstract: The results of thermal annealing of coal samples representing all groups of spontaneous combustion according to the classification included in the PN-93/G-04558 standard were analyzed. It was noted that gases released from the heated samples reach different concentrations at the same heating temperature. It is shown how this influences the assessment of fire hazard by the Graham's ratio. The observations were related to mine conditions by analyzing the mixing of gases emitted from the heated coal with the longwall goafs air for the far distance of the source of heating from the gas sampling point and the near distance. The results of these analyzes are discussed, which confirmed the problem of interpreting the fire hazard based on fire indicators that are based on the concentrations of gases emitted when coal heats up. An example of this is the Graham's ratio. It has been proposed how to counter this. The basis is to limit the scatter of Graham's ratio values calculated for the same temperature of heated coal and to establish a standard, which serves as a Reference standard to which the courses of thermal oxidation of tested coal samples are compared and on this basis the criterion values of the Graham's ratio are corrected. An example of verification of the Graham's ratio criterion for selected coals is described. When correcting the limits of the Graham's ratio, the degree of dilution of the gases emitted from the heated coal with the longwall goafs gases and the effect of the unreliable values of the Graham's ratio on the interpretation of the fire hazard were taken into account.

Słowa kluczowe:

zagrożenie pożarowe, prognozowanie zagrożenia pożarowego, wskaźnik Grahama, zmiana granic wskaźnika Grahama

Keywords:

fire hazard, fire hazard forecasting, Graham's ratio, changing the limits of the Graham's ratio

1. Wprowadzenie

W celu lepszego rozpoznania zagrożenia pożarowego w zrobach eksploatowanych ścian, przeprowadza się termiczne wygrzewanie próbek węgla. Badania termicznego wygrzewania próbek węgla ujawniają, że gazy wydzielane podczas tego procesu osiągają odmienne stężenia dla różnych węgla w tej samej temperaturze. Przekłada się to na wartości wskaźników pożarowych, które są wyliczane w oparciu o te gazy, jak wskaźnik Grahama (podstawowy wskaźnik stosowany w górnictwie polskim), Tricketta, Willeta, Littona

i inne (Cygankiewicz, Gapiński 2013, Mackenzie-Wood, Strang 1990, Trenczek 2003).

O stanie zagrożenia pożarowego decyduje stopień zagrzania węgla (jego temperatura). W danej temperaturze z zagranego węgla wydzielane są gazy, które różnią się wielkością stężeń w zależności od zagranego węgla. Dlatego stan zagrożenia pożarowego określony w oparciu o stałe kryteria przyjęte dla tych gazów, czy wskaźników liczonych z ich wykorzystaniem, mogą odnosić się do różnego stopnia zagrożenia (temperatury zagrzania węgla).

W praktyce oznacza to, że działania zapobiegające zagrożeniu pożarowemu podjęte przy tych samych wartościach wskaźników pożarowych dotyczą różnego stopnia zagrania węgla, co przekłada się na efektywność opanowania zagro-

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice

żenia pożarowego. Uznano, że jest to bardzo ważny problem dla bezpieczeństwa eksploatacji ścian zawalowych i przeprowadzono jego analizę. Wykorzystano do tego 16-elementową próbę węgla, którą zestawiono tak, aby były reprezentowane wszystkie grupy skłonności węgla do samozapalenia (PN-93/G-04558).

Analizę stanu zagrożenia pożarowego przeprowadzono w oparciu o wymagany przepisami wskaźnik Grahama, który jest powszechnie używany w polskim górnictwie i ma wyznaczone kryteria zagrożenia konkretnymi wartościami (Rozporządzenie ...2016) (tabela 1). Na potwierdzenie tego, że poruszony problem dotyczy też innych wskaźników wyznaczanych w oparciu o gazy powstające podczas zagrzewania węgla pokazano jak zmieniają się z temperaturą zagrzewania węgla stężenia gazów istotnych i wartości wskaźnika WSS. Wykorzystano wskaźnik WSS, ponieważ podobnie jak wskaźnik Grahama ma on określone liczbowo kryteria zagrożenia (Słowik 2020). W przypadku wskaźnika WSS uwzględniono stopnie alarmowe, które przy wystąpieniu bardzo wysokiego zagrożenia pożarowego ułatwiają jego rozpoznanie i zwalczanie (tabela 2). Celem artykułu nie jest krytyka wskaźnika Grahama, ale pokazanie na jego przykładzie jak można podnieść jakość analizy zagrożenia pożarowego i bezpieczeństwo w kopalniach.

2. Materiał badawczy i metodyka badań

Za materiał badawczy posłużyły wyniki uzyskane podczas termicznego wygrzewania próbek węgla. Jako podstawowe metody badawcze przyjęto ilościowe (matematyczne i statystyczne) oraz modelowe.

Badania składu gazów wydzielanych podczas wygrzewania węgla w danej temperaturze przeprowadzono dla próbek węgla pobranych z pokładów lub ich części w rejonach eksploatacyjnych polskich kopalń. Badania te związane były z wykonaniem termicznego utleniania wzorcowej próby węgla w warunkach laboratoryjnych, o którym mówi pkt 7.17.2 Załącznika nr 3 Zwalczanie Zagrożeń do Rozporządzenia Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych. Należy podkreślić, że badania termicznego wygrzewania próbek węgla wykonano przy pomocy tej samej aparatury badawczej, to znaczy, że na zróżnicowanie wyników badań nie miała wpływu użyta aparatura. Badania próbek węgla prowadzono w kulistej metalowej komorze reakcyjnej wyposażonej w układ pomiarowy do monitorowania zmian rozkładu temperatury w złożu węgla podczas nagrzewania. Szczegółowo - aparatura i sposób w jaki prowadzono badania zostały opisane przez Więckowskiego (Więckowski i in. 2018).

Badania termicznego wygrzewania próbek węgla objęły węgle reprezentujące wszystkie grupy skłonności do samozapalenia wg klasyfikacji GIG (PN-93/G-04558):

- 1 węgiel sklasyfikowany do I grupy skłonności węgla do samozapalenia (próbka P1);
- 3 węgle sklasyfikowanych do II grupy skłonności węgla do samozapalenia (próbki P2, P3, P4);
- 4 węgle sklasyfikowane do III grupy skłonności węgla do samozapalenia (próbki P5, P6, P7, P8);
- 3 węgle sklasyfikowane do IV grupy skłonności węgla do samozapalenia (próbki P9, P10, P11);
- 5 węgli sklasyfikowany do V grupy skłonności węgla do samozapalenia (próbki P12, P13, P14, P15).

Tabela 1. Stopniowanie stanu zagrożenia pożarowego wg kryterium wskaźnika Grahama

Table 1. Gradation of fire hazard according to the criterion the Graham's ratio

Kryteria zagrożenia pożarowego wg wskaźnika Grahama (G)	
$0 < G \leq 0,0025$	sytuacja normalna - nie występuje zagrożenie pożarowe w zrobach
$0,0025 < G \leq 0,0070$	wzmoczona obserwacja atmosfery w zrobach
$0,0070 < G \leq 0,0300$	należy przystąpić do prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie
$G > 0,0300$	akcja przeciwpożarowa

Tabela 2. Stopniowanie stanu zagrożenia pożarowego wg wskaźnika WSS (z uwzględnieniem stopni alarmowych)

Table 2. Gradation of fire hazard level according to WSS indicators (taking into account the alert levels)

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	wzmoczona 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	
$20,0 \leq WSS < 42,4$	7 stopień najwyższy stan zagrożenia	nasilenie prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia, bardzo duże prawdopodobieństwo przerwania normalnego ruchu w zagrożonym rejonie, możliwe otamowanie rejonu
$42,4 \leq WSS < 89,6$	8 stopień stan alarmowy I	duże prawdopodobieństwo pożaru, możliwe otamowanie rejonu
$89,6 \leq WSS$	9 stopień stan alarmowy II	bardzo duże prawdopodobieństwo pożaru

Podczas wykonywania termicznego wygrzewania próbek węgla pobierano w danej temperaturze próbkę gazu i określano jej skład, wyznaczając stężenie objętościowe etylenu, propylenu, acetylenu, tlenku węgla, tlenu, azotu, dwutlenku węgla, metanu i wodoru. W oparciu o te dane obliczono wskaźnik Grahama, wartość jego mianownika i dodatkowo stopień wskaźnika WSS, które następnie wykorzystano do analizy stanu zagrożenia pożarowego dla poszczególnych punktów pomiarowych (temperatur).

3. Analiza wyników badań termicznego wygrzewania próbek węgla wraz z dyskusją

Statystyki podstawowe wskaźnika Grahama i jego mianownika pogrupowane według temperatury zagrzenia węgla, przy której pobierane były próbki gazu, zestawiono w tabeli (tabela 3).

Analizując podstawowe statystyki przedstawione w tabeli 3 można zauważyć, że węgle w tej samej temperaturze zagrzenia mają różne wartości wskaźnika Grahama, który charakteryzuje się znacznym rozrzutem. Wskaźnik Grahama określa dwa stany zagrożenia pożarowego, pomimo tej samej temperatury zagrzenia węgla w przypadku:

- 50 °C – wartość wskaźnika Grahama zmienia się od min. $G = 0,0009$ do max $G = 0,0039$, czyli stan zagrożenia pożarowego jest w przedziale $0 < G \leq 0,0025$ i $0,0025 < G \leq 0,0070$ (tabela 1);
- 75 °C – wartość wskaźnika Grahama zmienia się od min. $G = 0,0013$ do max $G = 0,0066$, czyli stan zagrożenia pożarowego jest w przedziale $0 < G \leq 0,0025$ i $0,0025 < G \leq 0,0070$;
- 100 °C – wartość wskaźnika Grahama zmienia się od min. $G = 0,0034$ do max $G = 0,0139$, czyli stan zagrożenia pożarowego jest w przedziale $0,0025 < G \leq 0,0070$ i $0,0070 < G \leq 0,0300$;
- 150 °C – wartość wskaźnika Grahama zmienia się od min. $G = 0,0182$ do max $G = 0,0437$, czyli stan zagrożenia pożarowego jest w przedziale $0,0070 < G \leq 0,0300$ i $0,0300 < G$.

W temperaturze zagrzenia węgla 125°C wskaźnik Grahama znajduje się tylko w przedziale $0,0070 < G \leq 0,0300$, zaś w temperaturze 175°C i 200°C wskaźnik Grahama znajduje się w przedziale $G > 0,0300$.

Przedstawione podstawowe statystyki wskaźnika Grahama dotyczą warunków zagrzenia węgla w urządzeniu badawczym. Natomiast w warunkach kopalnianych próbka powietrza pobierana ze zrobów ściany stanowi mieszaninę gazów wydzielanych z zagrzewającego się węgla i powietrza zrobowego. Wpływa to na skład próbki gazowej i w skrajnych przypadkach będzie dążyć do składu gazów wydzielanych z zagrzenia węgla (miejsce pobrania próbki jest blisko ogniska zagrzenia) lub powietrza zrobowego (miejsce pobrania próbki jest daleko od ogniska zagrzenia) (Słowik 2022).

Przeprowadzono symulację mieszania się gazów wydzielanych z zagrzenia węgla z powietrzem zrobowym zgodnie z metodą opisaną w artykule „Ocena stanu zagrożenia pożarowego w odniesieniu do rozrzedzenia gazów...” (Słowik 2022). W podanym artykule opisano sposób mieszania gazów i objaśniono dlaczego zbliżono się do warunków rzeczywistych. Tutaj nie zostały powtórzone te analizy i objaśnienia dotyczące sposobu mieszania gazów, dla dociekliwych proponuje się zapoznanie z podaną publikacją.

Symulację wykonano dla skrajnych węgli próby: węgla P5 i węgla P15 (węgle skrajne wybrane zostały w oparciu o stężenia istotnych gazów. Przy czym węgiel P5 sklasyfikowano do III grupy samozapalności wg PN-93/G-04558 oraz III grupy wg SMP(37°C). Natomiast węgiel P15 sklasyfikowano do V grupy samozapalności wg PN-93/G-04558 oraz V grupy samozapalności wg SMP(37°C).

Przeanalizowano następujące przypadki mieszania się gazów wydzielanych z zagrzenia węgla (V_{zag}) z powietrzem zrobowym (V_{zr}): $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:100; 1:50; 1:25; 1:12; 1:6; 1:3; 1:2$ i $1:1$. W oparciu o to wybrano dwie sytuacje, które reprezentują niski i wysoki stan zagrożenia pożarowego (tabela 4 i tabela 5). Stan zagrożenia określono głównie w oparciu o wskaźnik Grahama. Sytuacje te odnoszą się do dalekiej odległości ogniska zagrzenia od miejsca pobrania próbki gazowej $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:50$ (niski stan zagrożenia) i do bliskiej odległości (wysoki stan zagrożenia) $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:3$.

Tabela 3. Statystyki podstawowe wskaźnika Grahama dla 16-elementowej próby węgla
Table 3. Basic statistics of Graham's ratio for the 16-element coal sample

Temperatura zagrzenia węgla	N ważnych	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Odch. std
wskaźnik Grahama						
1	2	3	4	5	6	7
Bez podziału na grupy temperaturowe	112	0,0242	0,0152	0,0009	0,0999	0,0233
50°C	16	0,0017	0,0013	0,0009	0,0039	0,0010
75°C	16	0,0033	0,0028	0,0013	0,0066	0,0015
100°C	16	0,0073	0,0067	0,0034	0,0139	0,0029
125°C	16	0,0163	0,0152	0,0084	0,0280	0,0056
150°C	16	0,0301	0,0282	0,0182	0,0437	0,0080
175°C	16	0,0463	0,0461	0,0340	0,0653	0,0092
200°C	16	0,0643	0,0626	0,0510	0,0999	0,0132
mianownik wskaźnika Grahama						
1	2	3	4	5	6	7
Bez podziału na grupy temperaturowe	112	6,56	5,25	1,04	21,20	4,69
50°C	16	2,79	2,40	1,04	5,70	1,44
75°C	16	3,08	2,86	1,05	6,02	1,45
100°C	16	3,76	3,31	1,46	7,87	1,69
125°C	16	4,85	4,25	1,99	10,24	2,18
150°C	16	7,21	6,39	3,50	14,98	3,04
175°C	16	10,25	9,61	5,40	19,17	3,74
200°C	16	13,96	13,62	7,52	21,20	3,85

Odległości ogniska zagrzania od miejsca pobrania próbek wyrażono przez rozcieńczenie gazów zagrzanego węgla (V_{zag}) gazami zrobotowymi (V_{zr}).

Zestawienie stężeń gazów istotnych, wskaźnika Grahama i wskaźnika WSS dla stanu po wymieszaniu się gazów przedstawiono w tabeli 4 i tabeli 5. Skład gazów zrobotowych wykorzystany w symulacji był zgodny z modelem przedsta-

wionym w artykule „Ocena stanu zagrożenia pożarowego...” (Słowik 2022).

W przypadku węgla P5 i P15 dla dużej odległości ogniska zagrzania od linii zawału ściany (duże rozcieńczenie gazów wydzielanych z zagrzanego węgla), możemy stwierdzić różnice w ocenie stanu zagrożenia pożarowego. Wskaźnik Grahama dla tych węgli osiąga następujące wartości w temperaturze zagrzania (tabela 4):

Tabela 4. Zestawienie stężeń gazów istotnych, wskaźnika Grahama i wskaźnika WSS po zmieszaniu się gazów wydzielanych z zagrzanego węgla z powietrzem zrobotowym w stosunku $n = (V_{zag}:V_{zr}) = 1:50$

Table 4. Summary of concentrations of significant gases, Graham's ratio and WSS indicator after mixing the gases released from the heated coal with the longwall goafs air at a ratio of $n = (V_{zag}:V_{zr}) = 1:50$

węgiel P5												
Temp. zagrzania	Skład gazów po wymieszaniu się w stosunku $V_{zag}:V_{zr} = 1:50$									Mianownik wsk. Grahama	Graham	Stopień wsk. WSS
	C_2H_4 Etylen	C_3H_6 Propylen	C_2H_2 Acetylen	CO Tlenek węgla	O_2 Tlen	N_2 Azot	CO_2 Dwutlenek węgla	CH_4 Metan	H_2 Wodór			
°C	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	ppm	%	–	–
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	0,05	0,04	0,004	17	19,39	78,12	0,51	1,96	3	1,31	0,0013	1
75	0,05	0,04	0,004	18	19,34	78,16	0,53	1,96	3	1,37	0,0013	1
100	0,06	0,04	0,004	23	19,08	78,23	0,64	2,05	4	1,65	0,0014	2
125	0,10	0,07	0,004	40	18,04	78,48	1,04	2,42	6	2,75	0,0014	3
150	0,16	0,11	0,004	67	16,91	78,76	1,48	2,83	8	3,96	0,0017	4
175	0,23	0,16	0,005	103	16,51	78,88	1,63	2,96	9	4,39	0,0024	4
200	0,34	0,19	0,005	156	16,46	78,91	1,65	2,96	9	4,45	0,0035	5
węgiel P15												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	0,05	0,04	0,004	21	19,35	78,21	0,52	1,91	3	1,37	0,0015	1
75	0,06	0,04	0,004	25	19,30	78,23	0,53	1,93	3	1,43	0,0018	2
100	0,09	0,06	0,004	42	19,01	78,32	0,64	2,02	4	1,74	0,0024	2
125	0,21	0,11	0,004	91	17,94	78,59	1,06	2,39	6	2,89	0,0031	4
150	0,36	0,22	0,005	177	16,75	78,90	1,53	2,79	8	4,16	0,0043	5
175	0,53	0,29	0,007	299	16,32	79,01	1,72	2,92	9	4,62	0,0065	5
200	0,69	0,39	0,010	469	16,27	78,97	1,79	2,92	9	4,66	0,0101	5

Tabela 5. Zestawienie stężeń gazów istotnych, wskaźnika Grahama i wskaźnika WSS po zmieszaniu się gazów wydzielanych z zagrzanego węgla z powietrzem zrobotowym w stosunku $n = (V_{zag}:V_{zr}) = 1:3$

Table 5. Summary of concentrations of significant gases, Graham's ratio and WSS indicator after mixing the gases released from the heated coal with the longwall goafs air at a ratio of $n = (V_{zag}:V_{zr}) = 1:3$

węgiel P5												
Temp. zagrzania	Skład gazów po wymieszaniu się w stosunku $V_{zag}:V_{zr} = 1:3$									Mianownik wsk. Grahama	Graham	Stopień wsk. WSS
	C_2H_4 Etylen	C_3H_6 Propylen	C_2H_2 Acetylen	CO Tlenek węgla	O_2 Tlen	N_2 Azot	CO_2 Dwutlenek węgla	CH_4 Metan	H_2 Wodór			
°C	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	ppm	%	–	–
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	0,04	0,03	0,003	18	19,16	78,30	0,41	2,12	2	1,59	0,0012	1
75	0,05	0,03	0,003	24	19,03	78,61	0,42	1,94	3	1,80	0,0013	1
100	0,07	0,05	0,003	41	18,87	78,66	0,51	1,96	3	1,98	0,0021	2
125	0,17	0,12	0,003	98	17,99	78,91	0,83	2,25	6	2,92	0,0034	4
150	0,49	0,36	0,004	272	16,78	79,33	1,20	2,66	9	4,24	0,0064	5
175	1,15	0,82	0,007	681	16,02	79,70	1,41	2,79	14	5,10	0,0134	6
200	2,59	1,29	0,011	1357	15,39	80,08	1,59	2,80	18	5,83	0,0233	7
węgiel P15												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	0,12	0,07	0,003	60	18,66	79,43	0,44	1,46	2	2,39	0,0025	3
75	0,18	0,13	0,003	113	18,56	79,49	0,46	1,47	3	2,51	0,0045	4
100	0,42	0,32	0,004	289	17,97	79,84	0,61	1,55	5	3,18	0,0091	5
125	1,53	0,59	0,009	744	16,67	80,33	1,08	1,83	10	4,62	0,0161	6
150	3,00	1,71	0,019	1673	14,80	81,11	1,79	2,13	14	6,70	0,0250	7
175	4,99	2,49	0,026	3171	13,54	81,42	2,49	2,23	16	8,04	0,0394	7
200	7,06	3,82	0,063	5337	12,91	80,97	3,35	2,23	19	8,55	0,0624	8

- 125 °C – węgiel P5, $G = 0,0014$ vs węgiel P15, $G = 0,0031$;
- 150 °C – węgiel P5, $G = 0,0017$ vs węgiel P15, $G = 0,0043$;
- 175 °C – węgiel P5, $G = 0,0024$ vs węgiel P15, $G = 0,0065$;
- 200 °C – węgiel P5, $G = 0,0035$ vs węgiel P15, $G = 0,0101$.

Wraz z wzrostem zagrożenia pożarowego, kiedy udział gazów wydzielanych z zagrzanego węgla w analizowanej próbce jest większy (co jest równoznaczne bliskiej odległości ogniska zagrzanania od linii zawału ściany) rozbieżności w ocenie stanu zagrożenia pożarowego pojawiają się już przy temperaturze zagrzanania 75 °C (tabela 5):

- 75 °C – węgiel P5, $G = 0,0013$ vs węgiel P15, $G = 0,0045$;
- 100 °C – węgiel P5, $G = 0,0021$ vs węgiel P15, $G = 0,0091$;
- 125 °C – węgiel P5, $G = 0,0034$ vs węgiel P15, $G = 0,0161$;
- 150 °C – węgiel P5, $G = 0,0064$ vs węgiel P15, $G = 0,0250$;
- 175 °C – węgiel P5, $G = 0,0134$ vs węgiel P15, $G = 0,0394$;
- 200 °C – węgiel P5, $G = 0,0233$ vs węgiel P15, $G = 0,0624$.

Należy wyróżnić temperaturę 100 °C, gdzie dla węgla P5 mamy sytuację normalną i brak zagrożenia pożarowego ($G = 0,0021$), a dla węgla P15 wskaźnik Grahama sygnalizuje już konieczność prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie ($G = 0,0091$).

Podczas prowadzonej analizy warto zwrócić uwagę na wartość mianownika wskaźnika Grahama. Uwzględniając go możemy określić, czy wskaźnik jest w przedziale wiarygodnym, gdzie mamy pewność co do prawidłowej interpretacji stanu zagrożenia, czy też w przedziale niewiarygodnym, gdzie nie mamy co do tego pewności (Słowik, Świerczek 2015).

W wyniku prowadzonych badań wykazano, że jeżeli wartość mianownika wskaźnika Grahama zawiera się w przedziale $0,2 < 0,265N_2 - O_2 < 5,7$, to możemy twierdzić na poziomie prawdopodobieństwa co najmniej 95%, że wskaźnik przedstawia prawidłowo stopień zagrożenia pożarowego. W pozostałych przypadkach nie można mieć takiej pewności i obserwujemy niewłaściwą interpretację zagrożenia pożarowego. W przedziale wartości mianownika $(0,265N_2 - O_2) \leq 0,20$ występuje zawyżanie stopnia zagrożenia pożarowego, zaś w

przedziale $(0,265N_2 - O_2) \geq 5,70$ występuje zaniżanie stopnia zagrożenia pożarowego przez wskaźnik Grahama.

W omawianych przypadkach zaniżanie stanu zagrożenia pożarowego zauważa się już w temperaturze 75 °C (tabela 3). Widoczny wpływ tego zjawiska występuje w temperaturze 150 °C, gdzie mediana przekracza wartość 5,7. Zaś w temperaturze 200 °C już wszystkie przypadki wskaźnika Grahama znalazły się w przedziale niewiarygodnym, ponieważ mianownik wynosi od 7,52 do 21,20 (tabela 3). Dlatego w prowadzonej analizie skupiono się na przedziale temperatury do 200 °C.

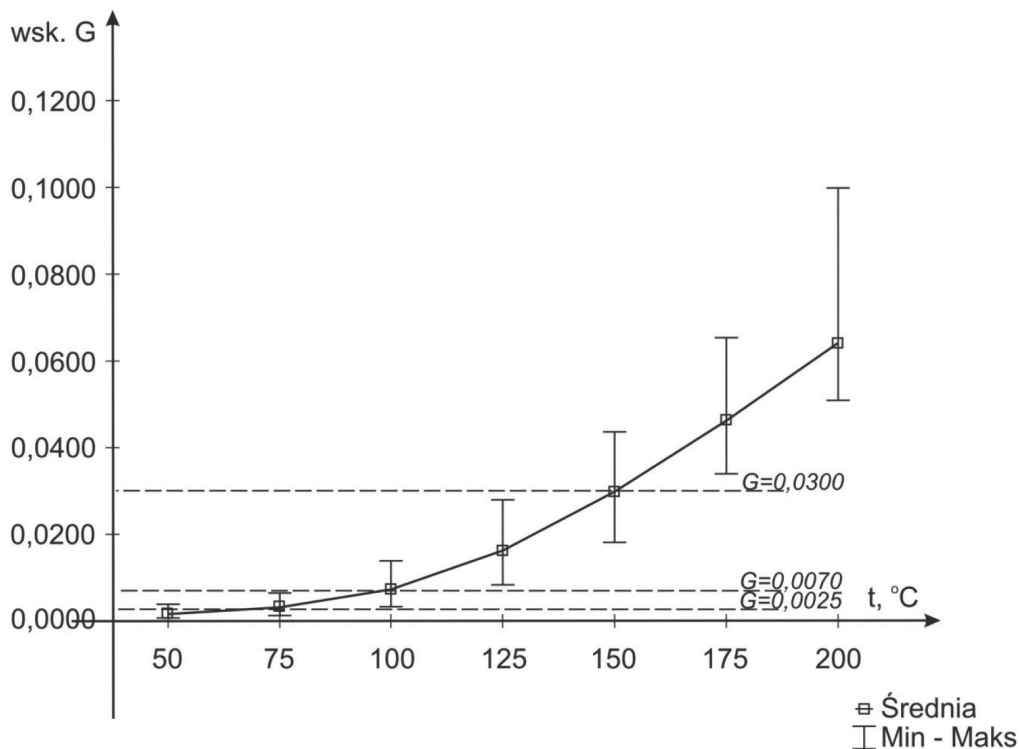
Rozrzut interpretacji stanu zagrożenia pożarowego wg kryterium wskaźnika Grahama omawianych przypadków przedstawiono na wykresie (rys. 1).

Należy podkreślić, że rozbieżności w ocenie stanu zagrożenia pożarowego wystąpią również przy korzystaniu z innych kryteriów uwzględniających gazy wydzielane podczas zagrzewania węgla, mogą to być wskaźniki jak i stężenia gazów (tabela 4, tabela 5).

Rozwiązaniem dla przedstawionego problemu jest ograniczenie rozrzutu wartości stosowanego kryterium, a najlepiej, by węgle w tej samej temperaturze zagrzanania miały tę samą wartość kryterialną. Skorygowanie wartości kryterialnej wskaźnika można dokonać przez wprowadzenie odpowiedniej poprawki, jednak potrzebny jest do tego wzorzec odniesienia, do którego można porównywać przebiegi termicznego utleniania różnych węgli i korygować odchyłki. Wzorzec odniesienia powinien mieć cechy populacji, czyli opierać się o reprezentatywny model węgla.

Wzorzec odniesienia, czyli reprezentatywny model emisji gazów pożarowych z zagrzewającego się złoża węgla

Utworzenie reprezentatywnego modelu dla zagrzewanych węgli wiąże się z trudnościami w postaci doboru elementów próby. Próba reprezentatywna powinna charakteryzować się wynikami zbliżonymi do populacji i zazwyczaj opiera się na średniej z próby losowej pochodzącej z populacji. Główną



Rys. 1. Rozrzut wartości wskaźnika Grahama badanej próby węgla dla danej temperatury zagrzanania
Fig. 1. The dispersion of the Graham's ratio of the tested sample of coals for a given heating temperature

przeszkodą w utworzeniu reprezentatywnej próby losowej jest dostępność pokładów węgla zalegających pod ziemią. Dlatego przy jej tworzeniu oparto się na założeniu, że dana cecha w populacji dąży do rozkładu normalnego. Za cechę węgla powiązaną z zagrożeniem pożarowym uznano skłonność węgla do samozapalenia. Zostało wykazane, że skłonność węgla do samozapalenia określona wg wskaźnika SMP(T) ma rozkład normalny, szczególnie jest to widoczne dla temperatury początkowej 37 °C (Słowik 2019). Związek pomiędzy wskaźnikiem SMP(37 °C) i produktami termicznego utleniania badanych próbek węgla możemy wyznaczyć obliczając korelację pomiędzy nimi. I przykładowo, obliczona dla badanej próby węgla korelacja między wskaźnikami SMP(37 °C), a zlinearyzowanymi wartościami stężeń CO dla temperatury 125, 150 i 200 °C wynosi odpowiednio: -0,71, -0,61 i -0,55. Oznacza to korelację silną ($0,6 < |r| \leq 0,8$) i bardzo silną ($0,8 < |r| \leq 1,0$) (Ręklewski 2020).

Kształt rozkładu normalnego opisuje krzywa Gaussa (1), gdzie a i σ są parametrami tej funkcji. Parametr a jest wartością przeciętną (średnią) lub oczekiwaną, zaś parametr σ jest odchyleniem standardowym charakteryzującym szerokość rozkładu:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}. \quad (1)$$

Pole pod krzywą Gaussa jest niezależne od jej parametrów (a , σ) i wynosi 1.

Przy opracowywaniu *Wzorca odniesienia* oraz ustaleniu parametrów krzywej Gaussa wykorzystano grupowy podział skłonności węgla do samozapalenia wg wskaźnika SMP(37 °C) (Słowik 2019). Jako istotny parametr dla funkcji Gaussa przyjęto odchylenie standardowe wynikające z rozkładu licznosci wskaźnika SMP(37 °C) oraz przedział całkowania powiązany z szerokością przedziału grupowego.

Węgłe wchodzące w skład analizowanej próby sklasyfikowano pod kątem skłonności do samozapalenia wg wskaźnika SMP(37 °C) i określono ich grupy (tabela 6). Dla danej grupy skłonności węgla do samozapalenia wg SMP(37 °C) obliczono

średnią wartość czynnika (np. stężenie etylenu). Pole pod krzywą funkcji rozkładu normalnego (Gausa) podzielono na pięć części tak, aby odpowiadały grupie skłonności węgla do samozapalenia wg wskaźnika SMP(37 °C) (rys. 2). Pola te, oznaczone jako P_1 do P_5 stanowią współczynniki grupowe, przez które mnożona jest wartość średnia czynnika należącego do danej grupy samozapalności SMP(37 °C) (np. stężenie etylenu).

Wartości pól P_1 do P_5 , które stanowią współczynniki grupowe przyporządkowane do grupy samozapalności wg wskaźnika SMP(37 °C) wynoszą:

- dla I i V grupy $P_1 = P_5 = 0,15$;
- dla II i IV grupy $P_2 = P_4 = 0,215$;
- dla III grupy $P_3 = 0,27$.

Wartość czynnika (m) dla *wzorca odniesienia* liczona jest jako suma iloczynu wartości średniej czynnika danej grupy samozapalności węgla i współczynnika grupowego (P_1, \dots, P_5):

$$m = m_{I\ \text{sr}} \cdot P_1 + m_{II\ \text{sr}} \cdot P_2 + m_{III\ \text{sr}} \cdot P_3 + m_{IV\ \text{sr}} \cdot P_4 + m_{V\ \text{sr}} \cdot P_5 \quad (2)$$

Przykład na wyznaczenie dla *wzorca odniesienia* stężenia etylenu:

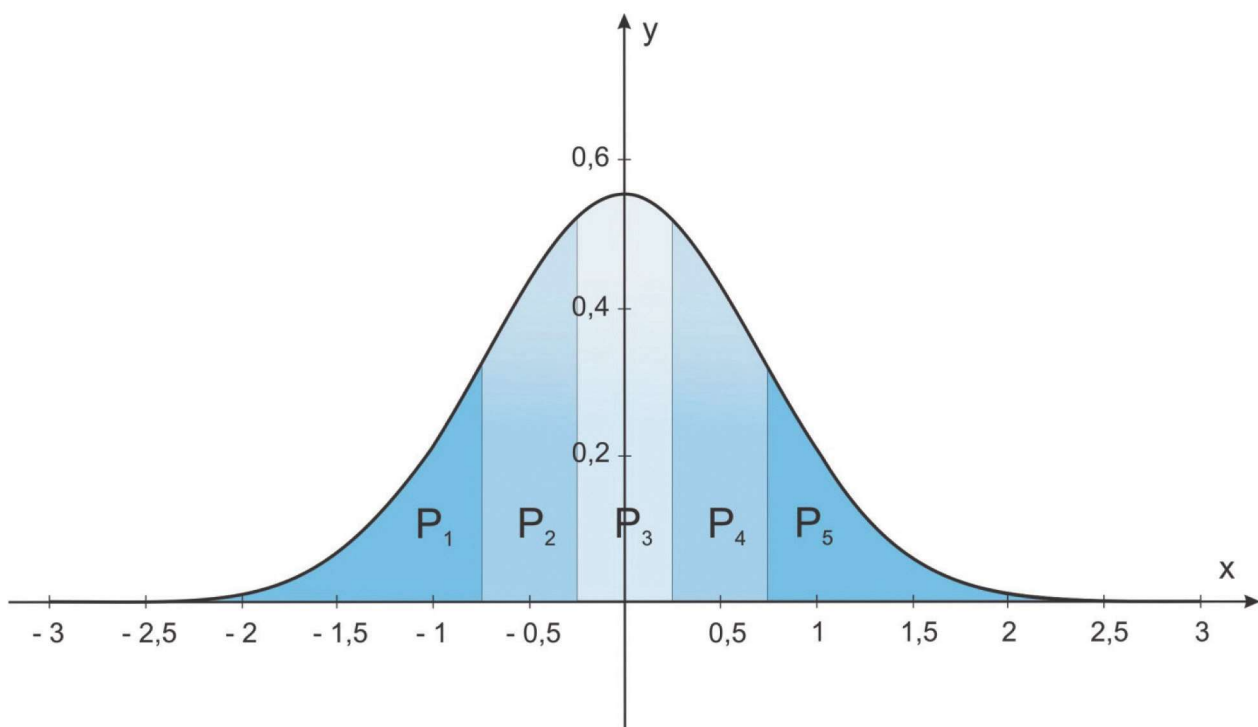
$$Etyelen_{w.odn.} = Etyelen_{I\ \text{sr}} \cdot P_1 + Etyelen_{II\ \text{sr}} \cdot P_2 + Etyelen_{III\ \text{sr}} \cdot P_3 + Etyelen_{IV\ \text{sr}} \cdot P_4 + Etyelen_{V\ \text{sr}} \cdot P_5.$$

Przykład na wyznaczenie dla *wzorca odniesienia* stężenia CO:

$$CO_{w.odn.} = CO_{I\ \text{sr}} \cdot P_1 + CO_{II\ \text{sr}} \cdot P_2 + CO_{III\ \text{sr}} \cdot P_3 + CO_{IV\ \text{sr}} \cdot P_4 + CO_{V\ \text{sr}} \cdot P_5.$$

Wzorec odniesienia opracowano zgodnie z opisaną wyżej metodą, a skład gazów obliczono z wykorzystaniem wzoru (2) (Tabela 7).

Skłonność węgla do samozapalenia wchodzących w skład analizowanej próby oznaczona wg metody ujętej normą PN-93/G-04558 oraz metody SMP(T) (dla 37 °C) została zestawiona w tabeli (tabela 6).



Rys. 2. Pola powierzchni P_1 , P_2 , P_3 , P_4 i P_5 jako współczynniki grupowe dla danej grupy samozapalności SMP(37 °C)
Fig. 2. Area fields P_1 , P_2 , P_3 , P_4 and P_5 as group coefficients for a given self-ignition group SMP(37 °C)

Tabela 6. Zestawienie elementów próby z uwzględnieniem skłonności do samozapalenia

Table 6. Summary of sample elements taking into account the propensity to spontaneous combustion

Lp.	Próbka węgla	Klasyfikacja ujęta normą PN-93/G-04558	Klasyfikacja wg wskaźnika SMP(T)
1	2	3	4
1	P1	I grupa	SMP(37 °C) = 8,70 (I gr.)
2	P2	II grupa	SMP(37 °C) = 8,48 (II gr.)
3	P3	II grupa	SMP(37 °C) = 8,33 (II gr.)
4	P4	II grupa	SMP(37 °C) = 8,27 (II gr.)
5	P5	III grupa	SMP(37 °C) = 8,14 (III gr.)
6	P6	II grupa	SMP(37 °C) = 8,11 (III gr.)
7	P7	III grupa	SMP(37 °C) = 8,05 (III gr.)
8	P8	III grupa	SMP(37 °C) = 7,81 (III gr.)
9	P9	II grupa	SMP(37 °C) = 7,74 (IV gr.)
10	P10	III grupa	SMP(37 °C) = 7,52 (IV gr.)
11	P11	III grupa	SMP(37 °C) = 7,31 (IV gr.)
12	P12	III grupa	SMP(37 °C) = 7,26 (V gr.)
13	P13	IV grupa	SMP(37 °C) = 7,18 (V gr.)
14	P14	IV grupa	SMP(37 °C) = 6,65 (V gr.)
15	P15	IV grupa	SMP(37 °C) = 6,63 (V gr.)
16	P16	V grupa	SMP(37 °C) = 6,50 (V gr.)

Wzorzec odniesienia stanowi podstawę dalszej analizy, szczególnie jeśli chodzi o oszacowanie jak duże są odchylenia wartości wskaźników pożarowych badanych węgli i weryfikację wartości granicznych. Wzorzec odniesienia z wyznaczonymi wartościami wskaźnika Grahama i wskaźnika WSS przedstawiono w tabeli (tabela 7).

Dyskusja nad niejednoznacznością oceny stanu zagrożenia pożarowego na przykładzie kryterium wskaźnika Grahama

Polskie przepisy dotyczące zagrożenia pożarowego w kopalniach węgla kamiennego jako podstawowy wskaźnik do jego oceny podają wskaźnik Grahama, który jako jedyny wśród innych wymienionych jest skategoryzowany. Dlatego w dyskusji skupiono się na nim, natomiast wysunięte wnioski można uogólnić na inne kryteria (gazy istotne, wskaźniki). Należy bowiem podkreślić, że gazy wydzielane z różnych próbek węgla w tej samej temperaturze zagrzania różnią się składem (tabela 4, tabela 5).

Wyniki badań termicznego wygrzewania pozwalają prześledzić jak zmienia się temperatura zagrzania próby węgla dla wartości kryterialnych wskaźnika Grahama, tj. $G = 0,0025$,

$G = 0,0070$ i $G = 0,0300$ (tabela 8). W przypadku wartości wskaźnika $G = 0,0025$ analizowane węgle mają temperaturę zagrzania szacowaną na 29 °C do 89,1 °C. Oznacza to, że dla jednego węgla zastosujemy kryterium wskaźnika Grahama $G = 0,0025$ (wymagające rozpoczęcia wzmoczonej obserwacji atmosfery w zrobach) przy przekroczeniu temperatury 29 °C, zaś w przypadku innego, zastosujemy to samo kryterium kiedy węgiel przekroczy temperaturę 89,1 °C (czyli przy temperaturze około 60 stopni wyższej). Wartość wskaźnika $G = 0,0070$ analizowane węgle osiągają przy temperaturze 76,9 do 121,9 °C. Kryterium $0,0070 < G \leq 0,0300$ (z wymogiem podjęcia prac mających na celu likwidację lub ograniczenie zagrożenia przy zachowaniu normalnego ruchu w zagrożonym rejonie) zastosujemy, kiedy przekroczona zostanie temperatura min. 76,9 °C do max 121,9 °C, co będzie zależało od węgla. W przypadku granicznej wartości wskaźnika Grahama $G = 0,0300$ badane węgle mają temperaturę w przedziale od 131,5 °C do 168,4 °C.

Tabela 8. Statystyki podstawowe szacowanej temperatury zagrzania 16-elementowej próby węgla obliczone dla wartości granicznych wskaźnika Grahama

Table 8. Basic statistics of the estimated heating temperature of a 16-element coal sample calculated for the limits values of the Graham's ratio

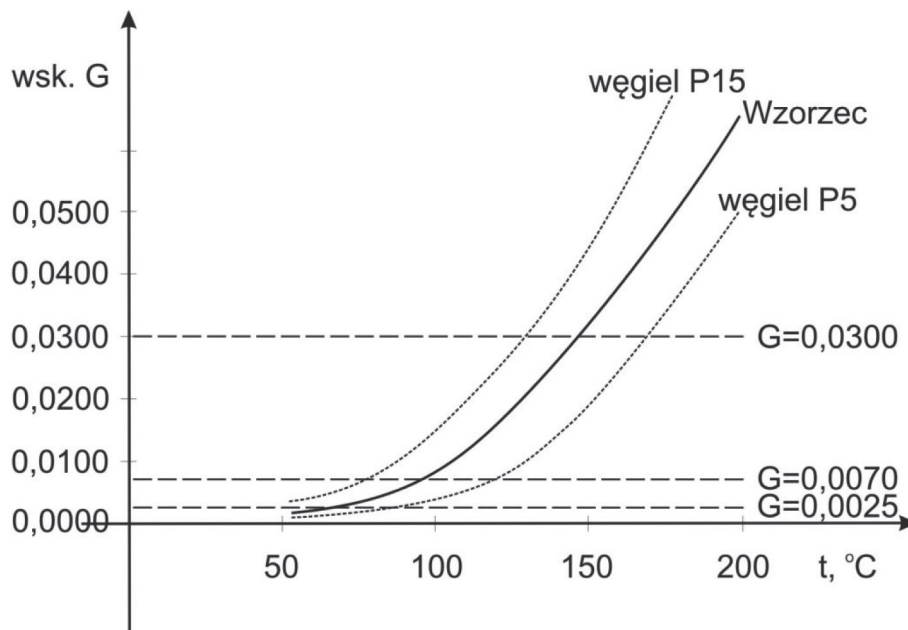
Szacowana temperatura zagranego węgla dla wartości wskaźnika Grahama:			
	$G = 0,0025$	$G = 0,0070$	$G = 0,0300$
1	2	3	4
min	29,0 °C	76,9 °C	131,5 °C
max	89,1 °C	121,9 °C	168,4 °C
średnia	64,5 °C	101,2 °C	153,2 °C
mediana	69,7 °C	103,8 °C	155,1 °C

Porównując z wzorcem odniesienia dwa węgle, węgiel P5 i węgiel P15, należące do krańcowych elementów próby (pod kątem stężeń wydzielanych gazów), zauważymy że jak dużą rozbieżnością możemy mieć do czynienia pomiędzy konkretnymi węglami badanej próby (rys. 3). Różnica temperatury zagranego węgla, przy której węgle P5 i P15 osiągają kryterialnych wartości wskaźnika Grahama jest znacząca, np. kryterium $G = 0,0070$ węgiel P15 osiąga przy temperaturze 78 °C, zaś węgiel P5 przy temperaturze 118 °C (tabela 9). Różnica wynosi 40 °C. Natomiast wzorzec odniesienia to kryterium osiąga przy temperaturze 96 °C. Temperatury te dotyczą warunków doświadczenia, w warunkach rzeczywistych mogą występować większe rozbieżności, o czym świadczą wyniki symulacji przedstawione w tabeli 4 i tabeli 5. Przekłada się to na jakość rozpoznania zagrożenia pożarowego.

Tabela 7. Wzorzec odniesienia z wyznaczonymi wartościami wskaźnika Grahama i wskaźnika WSS

Table 7. Reference standard with designated values of Graham's ratio and WSS indicator

Temp. zagrzania	Skład gazów obliczony z wykorzystaniem wzoru (2)									Mianownik wsk. Grahama	Graham	Stopień wsk. WSS
	C ₂ H ₄ Etylen	C ₃ H ₆ Propylen	C ₂ H ₂ Acetylen	CO Tlenek węgla	O ₂ Tlen	N ₂ Azot	CO ₂ Dwutlenek węgla	CH ₄ Metan	H ₂ Wodór			
°C	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%	%	ppm	%	–	–
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	0,08	0,04	0,001	40	18,7	79,3	0,25	1,7	0,5	2,27	0,0018	1
75	0,11	0,08	0,001	84	18,6	79,9	0,19	1,2	1,1	2,56	0,0033	3
100	0,31	0,23	0,001	246	18,1	80,5	0,21	1,1	4,4	3,18	0,0077	5
125	1,13	0,54	0,004	718	17,4	81,2	0,31	1,0	11,8	4,16	0,0173	5
150	3,39	2,13	0,015	2041	15,5	82,5	0,66	1,1	25,0	6,33	0,0322	7
175	7,58	4,57	0,035	4483	13,0	84,0	1,37	1,1	41,1	9,27	0,0484	8
200	15,07	6,75	0,072	8683	9,6	85,6	2,71	1,2	58,5	13,08	0,0664	9



Rys. 3. Zależność wskaźnika Grahama od temperatury zagrzania węgla dla dwóch wybranych węgli (P5 i P15) i wzorca odniesienia

Fig. 3. Dependence of the Graham's ratio on the coal heating temperature for two selected coals (P5 and P15) and the Reference standard

Tabela 9. Zestawienie temperatury zagrzania węgla P5, węgla P15 oraz wzorca odniesienia dla granicznych wartości wskaźnika Grahama

Table 9. Comparison of the heating temperature of coal P5, coal P15 and the Reference standard for the limit values of the Graham's ratio

Wartość graniczna wskaźnika G	Temperatura zagranego węgla, °C		
	węgiel P15	wzorzec odniesienia	węgiel P5
1	2	3	4
0,0025	41	62	90
0,0070	78	96	118
0,0300	128	146	168

Problem niejednoznaczności kryterium wskaźnika Grahama został zasygnalizowany przez Trenchka, który

Tabela 10. Porównanie wskaźnika Grahama węgla P5 i węgla P15 z wzorcem odniesienia po wymieszaniu się gazów wydzielanych z zagranego węgla i gazów zrobowych w stosunku $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:50$

Table 10. Comparison of the Graham's ratio of coal P5 and coal P15 with the Reference standard after the gases emitted from the heated coal and longwall goafs gases have mixed at a ratio of $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:50$

Temp. zagrzania, °C	Wskaźnik Grahama $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:50$		
	wzorzec odniesienia	węgiel P5	węgiel P15
1	2	3	4
50	0,0014	0,0013	0,0015
75	0,0014	0,0013	0,0018
100	0,0016	0,0014	0,0024
125	0,0017	0,0014	0,0031
150	0,0022	0,0017	0,0043
175	0,0032	0,0024	0,0065
200	0,0050	0,0035	0,0101

wskazał na duży rozrzut wskaźnika Grahama występujący w danej temperaturze wygrzewania węgla (Trenczek 2010). Postuluje on, aby znaleźć rozwiązanie tego problemu przez wykorzystanie wyników doświadczenia i dostosowanie ich do warunków rzeczywistych.

W warunkach rzeczywistych próbka powietrza pobierana jest ze zrobów, gdzie występuje mieszanie się gazów wydzielanych z zagranego węgla z powietrzem zrobowym. Sytuację taką dla węgla P5 i P15 zaprezentowano wcześniej, przeprowadzając odpowiednią symulację mieszania (tabela 4, tabela 5). Taką samą symulację mieszania wykonano dla wzorca odniesienia, zaś wartości wskaźników Grahama porównano ze sobą i pokazano jak mogą kształtować się wartości wskaźnika dla różnych węgli i tej samej temperatury węgla w warunkach rzeczywistych (tabela 10 i 11).

Tabela 11. Porównanie wskaźnika Grahama węgla P5 i P15 z wzorcem odniesienia po wymieszaniu się gazów wydzielanych z zagranego węgla i gazów zrobowych w stosunku $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:3$

Table 11. Comparison of the Graham's ratio of coal P5 and coal P15 with the Reference standard after the gases emitted from the heated coal and longwall goafs gases have mixed at a ratio of $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:3$

Temp. zagrzania, °C	Wskaźnik Grahama $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:3$		
	wzorzec odniesienia	węgiel P5	węgiel P15
1	2	3	4
50	0,0016	0,0012	0,0025
75	0,0022	0,0013	0,0045
100	0,0039	0,0021	0,0091
125	0,0066	0,0034	0,0161
150	0,0123	0,0064	0,0250
175	0,0210	0,0134	0,0394
200	0,0342	0,0233	0,0624

Wykonana symulacja przybliżenia wyników wygrzewania do warunków rzeczywistych, gdzie jest mieszanie się gazów wydzielanych z zagrzanego węgla z powietrzem zrobowym, pokazuje niejednoznaczność kryterium wskaźnika Grahama. Analizując wyniki zawarte w tabeli 10 i 11, zauważa się duże różnice w określaniu stanu zagrożenia pożarowego pomiędzy węglami dla tej samej temperatury zagrzaną. Rozbieżności z jakimi spotykamy się można prześledzić porównując temperaturę zagrzaną węgla oszacowaną dla wartości kryterialnych wskaźnika Grahama. Takie zestawienie zaprezentowano w tabeli 12. Kiedy ognisko zagrzaną jest oddalone od linii zawału (miejsca poboru próbki kontrolnej), to kryterium wskaźnika Grahama np. $G = 0,0300$ (akcja przeciwpożarowa) sygnalizuje temperaturę *wzorca odniesienia* $t(0,0300) = 310\text{ °C}$, węgla P5 $t(0,0300) = 349\text{ °C}$, zaś węgla P15 $t(0,0300) = 264\text{ °C}$. Natomiast, kiedy ognisko zagrzaną jest blisko linii zawału (miejsca poboru próbki kontrolnej), to kryterium wskaźnika Grahama $G = 0,0300$ sygnalizuje temperaturę węgla: dla *wzorca odniesienia* $t(0,0300) = 192\text{ °C}$, węgla P5 $t(0,0300) = 208\text{ °C}$, zaś węgla P15 $t(0,0300) = 159\text{ °C}$. Potwierdza się niedokładność szacowania temperatury zagrzanego węgla pomimo tej samej wartości kryterium (Słowik 2022).

Podczas analizy zagrożenia pożarowego zakłada się zazwyczaj, że wartość wskaźnika odpowiada, z niewielkimi odchyłkami, tej samej temperaturze zagrzaną węgla. Jednak jak wykazano, jest to duże uproszczenie, które wpływa na rozpoznanie zagrożenia pożarowego. Łatwiej przerwać proces zagrzewania węgla, który zaczniemy zwalczać przy temperaturze węgla np. 50 °C , niż kiedy zaczniemy to robić od temperatury 108 °C . Łatwiej też przeprowadzić akcję przeciwpożarową kiedy węgiel zagrzaną jest do 159 °C , niż gdy jest zagrzaną do 208 °C . Aby przeciwdziałać takim rozbieżnościom, należałoby wyrównać wartości graniczne wskaźników wykorzystując *Wzorzec odniesienia*, który będzie określał kryteria wskaźnika Grahama zgodnie z wymaganiami obowiązujących przepisów i posłuży do „kalibracji” stanu zagrożenia pożarowego dla danego węgla.

4. Proponowane rozwiązanie

Polskie przepisy nie przewidują, jak np. australijskie, aby kopalnie ustalały poziomy graniczne stężeń istotnych gazów i wskaźników (Cygankiewicz, Gapiński 2013). Jednak biorąc pod uwagę przedstawioną analizę, określenie takich granic, choćby tylko jako dodatkowa informacja przy rozpoznaniu zagrożenia pożarowego dla eksploatowanej ściany, jest jak najbardziej wskazane.

Korygowanie granicy wskaźnika Grahama możliwe jest na dwa sposoby, przez przekształcenie wzoru wskaźnika i za-

chowaniu jego wartości kryterialnych lub dla niezmienionego wzoru ustalenie nowych wartości kryterialnych. Drugie rozwiązanie jest praktyczniejsze, albowiem określając wartości graniczne wskaźnika, łatwiej zorientować się czy mamy do czynienia ze „złagodzeniem”, czy „zaostreniem” kryterium. Dlatego wybrano tę metodę.

Najprostszym sposobem określenia nowej granicy kryterium pożarowego jest wyznaczenie go, porównując zależność wskaźnika Grahama od temperatury zagrzaną węgla z *wzorcem odniesienia*. Jednak przy takiej metodzie pojawiają się duże różnice pomiędzy wyznaczoną granicą dla badanej próbki węgla i *wzorcem odniesienia*. Uznano więc, że metoda oparta na bezpośrednim porównaniu obciążona jest zbyt dużym ryzykiem i wprowadzono poprawki, które uwzględniały m.in. stopień rozcieńczenia próbki gazowej gazami zrobowymi oraz wpływ wartości niewiarygodnych wskaźnika Grahama. Pokazano przykład tak określonych granic wskaźnika Grahama dla węgla P5 (III grupa samozapalności wg PN-93/G-04558) i węgla P15 (V grupa samozapalności wg PN-93/G-04558).

W pierwszej kolejności dla węgla P5 i P15 ustalono nowe granice wskaźnika Grahama, wykorzystując bezpośrednie porównanie przebiegu temperaturowego wygrzewania węgla z *wzorcem odniesienia*. Uzyskane w ten sposób graniczne wartości wskaźnika Grahama to:

- węgiel P5: 0,0011 – 0,0033 – 0,0147;
- węgiel P15: 0,0049 – 0,0121 – 0,0438.

Widać, że występuje duża różnica pomiędzy wartościami kryterialnymi wskaźnika wyznaczonymi dla węgla P5 i P15 a *wzorcem odniesienia*, np. 0,0011 vs 0,0025, 0,0049 vs 0,0025. Dlatego przeprowadzono weryfikację ustalonych granic, aby zbliżyć się do *wzorca*, uwzględniając wnioski wynikające z temperaturowego wygrzewania węgla. W tym przypadku skupiono się głównie na porównaniu przedziałów, a nie zależności funkcyjnych. Uwzględniono też stopień rozcieńczenia próbki powietrza gazami zrobowymi oraz wartości niewiarygodne wskaźnika Grahama i ustalono następujące graniczne wartości wskaźnika Grahama (tabela 4, tabela 5):

- węgiel P5: 0,0019 – 0,0048 – 0,0165;
- węgiel P15: 0,0030 – 0,0098 – 0,0371.

Nowe wartości graniczne należy rozumieć w ten sposób, że np. *wzmogoną obserwację atmosfery w zrobach* w przypadku węgla P5 należy prowadzić, gdy wskaźnik Grahama zawiera się w przedziale $0,0019 < G \leq 0,0048$, zaś w przypadku węgla P15, kiedy wartość wskaźnika Grahama wynosi $0,0030 < G \leq 0,0098$.

Porównanie interpretacji zagrożenia pożarowego według zweryfikowanego wskaźnika Grahama dla węgla P5 i P15 z uwzględnieniem *wzorca odniesienia* przedstawiono w tabeli 13 i tabeli 14.

Tabela 12. Porównanie szacowanej temperatury zagrzaną *wzorca odniesienia*, węgla P5 i węgla P15 wyznaczone dla kryterialnych wartości wskaźnika Grahama i warunków zbliżonych do rzeczywistych

Table 12. Comparison of estimated heating temperature of *Reference Standard*, coal P5 and coal P15 determined for the limit values of the Graham's ratio and conditions similar to real

Wskaźnik Grahama	Miejsce oddalenia ogniska zagrzaną węgla od miejsca poboru próbki kontrolnej					
	daleko od linii zawału $n = V_{zag} : V_{zt} = 1:50$			blisko do linii zawału $n = V_{zag} : V_{zt} = 1:3$		
	wzorzec odniesienia	węgiel P5	węgiel P15	wzorzec odniesienia	węgiel P5	węgiel P15
1	2	3	4	5	6	7
$G = 0,0025$	158 °C	177 °C	104 °C	79 °C	108 °C	50 °C
$G = 0,0070$	221 °C	248 °C	178 °C	127 °C	152 °C	89 vC
$G = 0,0300$	310 °C	349 °C	264 °C	192 °C	208 °C	159 °C

Tabela 13. Porównanie zweryfikowanego wskaźnika Grahama węgla P5 i P15 z wzorcem odniesienia po wymieszaniu się gazów wydzielanych z zagrzanego węgla i gazów zrobowych w stosunku $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:50$

Table 13. Comparison of the verified Graham's ratio of coal P5 and P15 with the Reference standard after the gases emitted from the heated coal and the longwall goafs gases have mixed at a ratio of $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:50$

Temp. zagrzania, °C	$n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:50$		
	Wskaźnik Grahama	Zweryfikowany wskaźnik Grahama	
	Wzorzec odniesienia	węgiel P5	węgiel P15
1	2	3	4
50	0,0014 $0 < G \leq 0,0025$	0,0013 $0 < G \leq 0,0019$	0,0015 $0 < G \leq 0,0030$
75	0,0014 $0 < G \leq 0,0025$	0,0013 $0 < G \leq 0,0019$	0,0018 $0 < G \leq 0,0030$
100	0,0016 $0 < G \leq 0,0025$	0,0014 $0 < G \leq 0,0019$	0,0024 $0 < G \leq 0,0030$
125	0,0017 $0 < G \leq 0,0025$	0,0014 $0 < G \leq 0,0019$	0,0031 $0,0030 < G \leq 0,0098$
150	0,0022 $0 < G \leq 0,0025$	0,0017 $0 < G \leq 0,0019$	0,0043 $0,0030 < G \leq 0,0098$
175	0,0032 $0,0025 < G \leq 0,0070$	0,0024 $0,0019 < G \leq 0,0048$	0,0065 $0,0030 < G \leq 0,0098$
200	0,0050 $0,0025 < G \leq 0,0070$	0,0035 $0,0019 < G \leq 0,0048$	0,0101 $0,0098 < G \leq 0,0371$

Tabela 14. Porównanie zweryfikowanego wskaźnika Grahama węgla P5 i P15 z wzorcem odniesienia po wymieszaniu się gazów wydzielanych z zagrzanego węgla i gazów zrobowych w stosunku $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:3$

Table 14. Comparison of the verified Graham's ratio of coal P5 and P15 with the Reference standard after the gases emitted from the heated coal and the longwall goafs gases have mixed at a ratio of $n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:3$

Temp. zagrzania, °C	$n = (V_{zag} : V_{zr}) = 1:3$		
	Wskaźnik Grahama	Zweryfikowany wskaźnik Grahama	
	wzorzec odniesienia	węgiel P5	węgiel P15
1	2	3	4
50	0,0016 $0 < G \leq 0,0025$	0,0012 $0 < G \leq 0,0019$	0,0025 $0 < G \leq 0,0030$
75	0,0022 $0 < G \leq 0,0025$	0,0013 $0 < G \leq 0,0019$	0,0045 $0,0030 < G \leq 0,0098$
100	0,0039 $0,0025 < G \leq 0,0070$	0,0021 $0,0019 < G \leq 0,0048$	0,0091 $0,0030 < G \leq 0,0098$
125	0,0066 $0,0025 < G \leq 0,0070$	0,0034 $0,0019 < G \leq 0,0048$	0,0161 $0,0098 < G \leq 0,0371$
150	0,0123 $0,0070 < G \leq 0,0300$	0,0064 $0,0048 < G \leq 0,0165$	0,0250 $0,0098 < G \leq 0,0371$
175	0,0210 $0,0070 < G \leq 0,0300$	0,0134 $0,0048 < G \leq 0,0165$	0,0394 $0,0371 < G$
200	0,0342 $0,0300 < G$	0,0233 $0,0165 < G$	0,0624 $0,0371 < G$

Analizując tabelę 13 i tabelę 14 w zestawieniu z tabelą 10 i tabelą 11 widać, że korekcja granic zbliżyła interpretację stanu zagrożenia pożarowego do wzorca odniesienia, choć nie wprowadza radykalnej zmiany. W przypadku dużego rozcieńczenia (dużej odległości od miejsca zagrzania, tabela 10 vs tabela 13) dla węgla P5 stan zagrożenia wymagający *wzmoczonej obserwacji atmosfery w zrobach* sygnalizowany jest wcześniej, zaś dla węgla P15 później. W przypadku małego rozcieńczenia (blisko do miejsca za-

grzania, tabela 11 vs tabela 14) lepiej widać wpływ korekcji wartości granicznych na interpretację zagrożenia, czyli wprowadzona korekcja nabiera większego znaczenia ze wzrostem zagrożenia pożarowego.

5. Podsumowanie

Analiza termicznego wygrzewania próbek węgla wykazuje, że wydzielane podczas tego procesu gazy mają różne stężenia w tej samej temperaturze. Różne stężenia gazów generują różne wartości wskaźników pożarowych, co powoduje problemy z interpretacją zagrożenia pożarowego. Problemy te mogą pojawić się przy stosowaniu sztywnych kryteriów zarówno dla gazów jak i wskaźników. Przykładem jest wskaźnik Grahama, który dla przeanalizowanej 16-elementowej próby węgla w temperaturze zagrzania:

- 50 °C zmienił się od 0,0009 do 0,0039;
- 75 °C zmienił się od 0,0013 do 0,0066;
- 100 °C zmienił się od 0,0034 do 0,0139;
- 150 °C zmienił się od 0,0182 do 0,0437

i w tych przypadkach wskaźnik Grahama określał różny stan zagrożenia pożarowego, np. dla temperatury 50 °C jest to: $0 < G \leq 0,0025$ i $0,0025 < G \leq 0,0070$.

Problem z interpretacją zagrożenia pożarowego występuje również dla takiego samego stanu zagrożenia pożarowego, ponieważ wartość wskaźnika zmienia się w dużym przedziale, np. dla przeanalizowanej próby węgla w temperaturze zagrzania 125 °C wskaźnik Grahama zmienia się w zakresie wartości 0,0084 do 0,0280.

W warunkach rzeczywistych mamy w zrobach mieszaninę gazów wydzielanych z zagrzanego węgla i powietrza zrobowego, dlatego przeprowadzono analizę mieszaniny z powietrzem zrobowym gazów wydzielanych podczas termicznego wygrzewania próbek węgla, która potwierdziła problem różnych wartości wskaźnika Grahama dla tej samej temperatury węgla. Opieranie się na założeniu, że w warunkach rzeczywistych wartość wskaźnika Grahama odpowiada tej samej temperaturze zagrzania węgla jest nieuzasadnione i negatywnie wpływa na jakość rozpoznania zagrożenia pożarowego. Aby temu zapobiegać należałoby wyrównać rozrzut wartości wskaźnika. Wyrównanie rozrzutu wskaźnika Grahama, a tym samym polepszenie interpretacji zagrożenia pożarowego, można uzyskać przez wprowadzenie odpowiedniej korekty opartej o wzorzec odniesienia. Wzorzec odniesienia powinien mieć cechy populacji i opierać się o reprezentatywny model, który w założeniu reprezentuje średnią z populacji. Wartości kryterialne wskaźnika Grahama dla wzorca odniesienia powinny być zgodne z przepisami, czyli: 0,0025 – 0,0070 – 0,0300.

Utworzono taki Wzorzec bazując na założeniu, że dana cecha w populacji dąży do rozkładu normalnego. Taką cechą węgla związaną z zagrożeniem pożarowym jest skłonność do samozapalenia określona wskaźnikiem SMP(T) dla temperatury początkowej 37 °C. Wykazano dla badanej próby węgla, że pomiędzy wskaźnikiem SMP(37°C) a zlinearyzowanymi wartościami produktów powstających podczas procesu wygrzewania (np. stężeniem CO) występuje wysoka korelacja.

Skorygowane granice wskaźnika Grahama wyznaczono metodą porównania wyników badań termicznego wygrzewania danego węgla z wzorcem odniesienia. Dodatkowo, wykorzystując doświadczenie w interpretacji zagrożenia pożarowego w oparciu o wyniki precyzyjnej analizy chromatograficznej prób gazowych i uwzględnieniu takich czynników jak stopień rozcieńczenia gazów wydzielanych z zagrzanego węgla powietrzem zrobowym oraz wartości niewiarygodne wskaźnika Grahama dla wybranych przykładowo węgla, wyznaczono skorygowane granice wskaźnika Grahama, które wyniosły:

- węgiel P5 (III grupa samozapalności wg PN-93/G-04558): 0,0019 – 0,0048 – 0,0165;
- węgiel P15 (V grupa samozapalności wg PN-93/G-04558): 0,0030 – 0,0098 – 0,0371.

Skorygowane granice wskaźnika Grahama należy rozumieć tak, że stan zagrożenia pożarowego dla węgla P5 w przedziale wskaźnika $0,0019 < G \leq 0,0048$ jest interpretowany jak w przypadku określonego przepisami przedziału $0,0025 < G \leq 0,0070$ (*wzorzec odniesienia*).

Przeprowadzona analiza uświadamia nam z jak dużą różnicą ocenę stopnia zagrzenia węgla, a tym samym stanu zagrożenia pożarowego, mamy do czynienia przy stosowaniu sztywnego kryterium wskaźnika Grahama. W przypadku analizowanej próby węgla szacowana temperatura zagrzenia określona dla wartości wskaźnika Grahama $G = 0,0025$ wynosi od 29 °C do 89 °C, dla wartości wskaźnika $G = 0,0070$ wynosi 77 °C do 122 °C, zaś dla $G = 0,0300$ wynosi 131 °C do 168 °C. I oczywiście jest, że łatwiej przerwać proces zagrzenia węgla przy temperaturze 29 °C, zaś trudniej, gdy zaczniemy to robić od temperatury 89 °C. Jeżeli nie uwzględnimy tego zjawiska możemy być zaskoczeni, że w rejonie ściany dochodzi do nagłego rozwoju zagrożenia pożarowego kończącego się pożarem. Dlatego jest jak najbardziej zasadne, aby zacząć prowadzić analizę zagrożenia pożarowego z wyznaczeniem skorygowanych, granicznych wartości wskaźnika Grahama. Pomocne do tego są badania termicznego wygrzewania węgla.

Na koniec należy jeszcze podkreślić, jak ważne jest doświadczenie nabyte przez pracowników danej kopalni, dzięki któremu mogą weryfikować prognozowany stan zagrożenia pożarowego.

Literatura

- CYGANKIEWICZ J., GAPIŃSKI D. 2013 - Analiza metod oceny zagrożenia pożarami endogenicznymi przyjętych w górnictwie polskim na tle rozwiązań stosowanych w innych krajach. Praca zbiorowa: Zagrożenia aerologiczne w kopalniach – profilaktyka, zwalczanie, modelowanie, monitoring pod red. J. Cygankiewicza i S. Pruska, wyd. GIG Katowice, s. 15–28.
- MACKENZIE-WOOD P., STRANG J. 1990 - Fire gases and their interpretation. The Mining Engineer, June.
- REKLEWSKI M. 2020 - Statystyka opisowa: Teoria i przykłady. Wydawnictwo Państwowej Uczelni Zawodowej we Włocławku. Włocławek.
- SŁOWIK S., ŚWIERCZEK L. 2015 - Przedział wiarygodności wskaźnika Grahama. „Przeгляд Górnicy”, nr 12, s. 49-61.
- SŁOWIK S. 2019 – Metoda oznaczania skłonności węgla do samozapalenia w warunkach temperatury pierwotnej skał. „Przeгляд Górnicy”, nr 8, s. 40-49.
- SŁOWIK S. 2020 - Rozpoznanie stanu zagrożenia pożarowego w rejonach eksploatowanych ścian zawałowych w oparciu o wskaźnik Grahama i WSS. „Przeгляд Górnicy”, nr 8, s. 45-53.
- SŁOWIK S. 2022 - Ocena stanu zagrożenia pożarowego w odniesieniu do rozrzedzenia gazów wydzielających się podczas utleniania węgla w zrobach ściany. Przeгляд Górnicy, nr 2, s.7-17.
- TRENCZEK S. 2003 - Ocena stanu zagrożenia pożarem endogenicznym, na podstawie temperatury zrobów wyznaczonej metodą gazów istotnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, zeszyt 258. Gliwice, s. 363-375.
- TRENCZEK S. 2010 - Ocena zagrożenia pożarami endogenicznymi pokładów węgla kamiennego i sposoby jego zapobiegania. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice.
- WIĘCKOWSKI M., CHORAŻEWSKI M., HOWANIEC N., POSTNIKOV E., SMOLIŃSKI A. 2018 - Changes in the Distribution of Temperature in a Coal Deposit and the Composition of Gases Emitted during Its Heating and Cooling. Sustainability, Vol. 10 (2018), Art. No. 3587.
- Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych. Dziennik Ustaw 2017 poz. 1118.
- PN-93/G-04558 Węgiel kamienny. Oznaczenie wskaźników samozapalności.

Artykuł wpłynął do redakcji – sierpień 2022 r.
Artykuł zaakceptowano do druku – 14.11.2022 r.

Stanisław Słowik - mgr inż. górnik, pracownik inżynierjno-techniczny w Zakładzie Aerologii Górniczej Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach, zatrudniony na stanowisku starszego specjalisty, kontakt: sslowik@gig.eu