

Eugeniusz Krause, Maria Gajdowska***

PRZEPROWADZENIE KLASYFIKACJI I SYSTEMATYZACJI ŚCIAN EKSPLOATOWANYCH W POKŁADACH METANOWYCH W KOPALNIACH WĘGLA KAMIENNEGO W ROKU 2011

Streszczenie

Eksploatacja pokładów metanowych w polskich kopalniach węgla kamiennego jest przyczyną występowania niebezpiecznych zdarzeń, takich jak: zapalenia, wybuchy oraz pożary metanu. Zjawiska te powstają zazwyczaj w eksploatowanych ścianach, w pokładach średnio- i wysokometanowych. Na poziom zagrożenia metanowego w rejonie ściany wpływa szereg parametrów i czynników decydujących o wielkości wydzielania się metanu do jej środowiska.

W artykule omówiono zestaw wyjściowych czynników i parametrów opisujących kształtowanie się zagrożenia metanowego w rejonie ściany. W oparciu o zestaw zmiennych charakteryzujących zagrożenie metanowe w środowisku ścian zebrano dane z 75 ścian eksploatowanych w kopalniach metanowych w roku 2011. Przeprowadzono statystyczną weryfikację przyjętego zestawu czynników i parametrów. Następnie, w oparciu o metodę taksonomiczną, dokonano podziału na podzbiory statystycznie jednorodne, w ramach których wnioskowanie jest bardziej słuszne niż w całych zbiorach ścian objętych analizą. Usystematyzowania ścian pod względem poziomu zagrożenia dokonano, opracowując syntetyczny miernik oceny zagrożenia metanowego. Obliczona wartość miernika dla każdej ściany, pozwala na identyfikację zagrożenia w utworzonych podzbiorach oraz porównywanie ścian między sobą.

Słowa kluczowe: zagrożenie metanowe, rejon ściany, ściana, pokład metanowy, eksploatacja, metan, wydzielanie się metanu, ocena, miernik syntetyczny, kopalnia węgla kamiennego, Polska.

Classification and systematization of longwalls extracted from methane seams in hard coal mines in 2011

Abstract

Exploitation of methane seams in Polish coalmines triggers off various events of danger, such as: ignitions, explosions and fires from methane gas. These phenomena usually occur in longwalls during extraction in medium- and heavily-saturated methane seams. The danger extent near longwalls depends on a variety of parameters and factors which have the impact on the amount of methane that outflows to its environment.

This paper presents a set of initial parameters and factors which describe the conditions the danger origins in the area of longwalls. Basing of a set of variables determining the methane danger in the longwall area, in 2011 data from 75 active longwalls in methane mines was collected. Then, the numbers in question were subject to statistical verification. After that, basing of a taxonomic method, statistically homogenous subsets have been distinguished, which helped to draw conclusions more appropriate as opposed to data set as a whole. The classification of longwalls on account of the extent of danger was performed by devising a synthetic measure for methane danger assessment. The measure value for each longwall allows to identify the danger in the subsets as well as compare the logwalls between one another.

Keywords: natural hazard, longwall area, longwall, methane seam, exploitation, methane, methane outflow, synthetic measure, assessment, hard coal mine, Poland.

* Główny Instytut Górnictwa

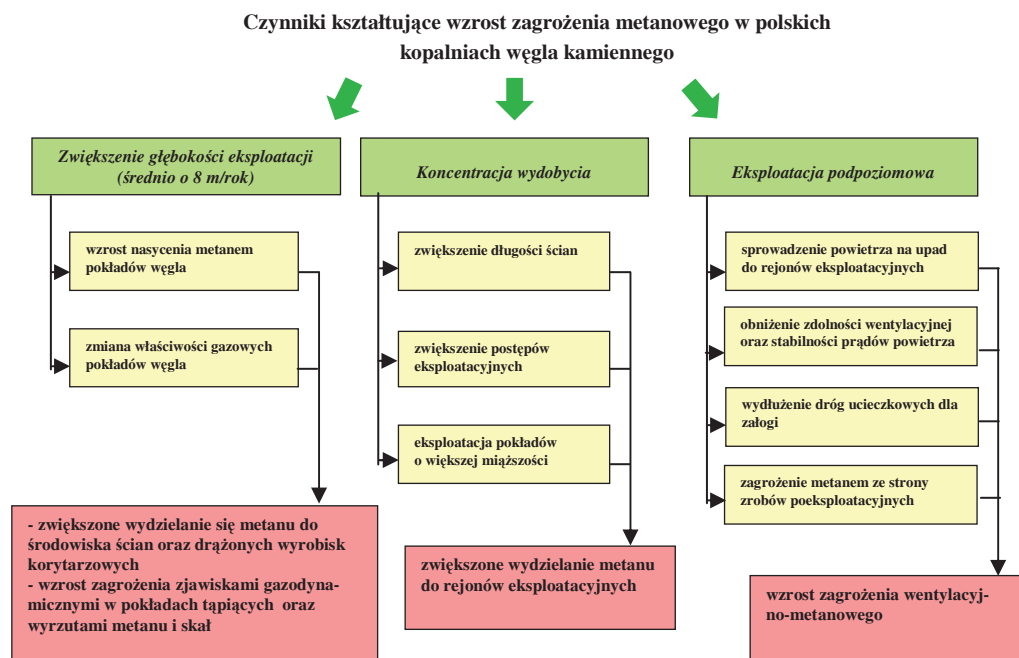
** Politechnika Śląska

1. WPROWADZENIE

Rosnące w ostatnich 15 latach zagrożenie metanowe w polskich kopalniach węgla kamiennego przyczyniło się do występowania zapaleń, wybuchów oraz pożarów metanu, w niektórych przypadkach o katastrofalnych skutkach. Wzrost zagrożenia w rejonach eksploatowanych ścian jest zdecydowanie większy niż w drążonych wyrobiskach korytarzowych. Czynniki, które mają zasadniczy wpływ na wielkość wydzielania się metanu do rejonów eksploatacyjnych, są:

- rosnąca z głębokością metanonośność pokładów eksploatowanych oraz otaczającego je złoże,
- zwiększona koncentracja wydobywania, uzyskiwana głównie przez wydłużanie ścian oraz bardziej selektywna eksploatacja pokładów, tj. o większej miąższości,
- prowadzenie eksploatacji podziemnej spowodowane ograniczeniem w ostatnich kilkunastu latach nakładów na inwestycje.

Czynniki kształtujące wzrost zagrożenia metanowego w polskich kopalniach węgla kamiennego, w sposób schematyczny, przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Czynniki kształtujące wzrost zagrożenia metanowego w polskich kopalniach węgla kamiennego

Fig. 1. Factors which determine the rise of methane danger in Polish coalmines

Oceniając wpływ poszczególnych czynników na kształtowanie się zagrożenia metanowego, stwierdzono, że do wzrostu wydzielania się metanu w eksploatowanych ścianach, w dużym stopniu przyczynia się zwiększone nasycenie metanem pokładów wraz z głębokością ich zalegania. W latach 1998–2008 nastąpił wzrost metanowości

względnej z 8,09 do 13,23 m³ CH₄ na każdy Mg wydobytego węgla z pokładów metanowych, co daje 61%. Miało na to wpływ:

- rosnące nasycenie metanem pokładów eksploatowanych,
- rosnące nasycenie metanem pokładów podebranych i nadebranych, objętych zasięgiem odprężenia eksploatacyjnego,
- sukcesywne wydłużanie ścian.

Wspomniana sytuacja wpłynęła na zwiększenie objętości odprężanego złoża w otoczeniu ścian. Nadmienić należy, iż w latach 1995–2011 nastąpił wzrost długości ścian o 35,4%. Wzrost ten przekłada się na zwiększenie objętości odprężanego złoża, kształtując wielkość strumienia uwalnianego metanu z pokładów podebranych i nadebranych. Mając na uwadze powyższe spostrzeżenia, projektowana długość ściany w otoczeniu wysokometanowego złoża rzutuje na jej zdolność wydobywczą, przez wentylacyjno-metanowe kryteria bezpieczeństwa.

Czynnikiem kształtującym zagrożenie metanowe w rejonach eksploatowanych ścian jest również ich podziemne usytuowanie w sieci wentylacyjnej kopalni. W ostatnich kilkunastu latach niewystarczająca ilość wykonywanych wyrobisk udostępniających w kopalniach (szyby, przekopy, przecznice) przyczyniła się do projektowania i prowadzenia eksploatacji podziemnej. Praktyka górnicza potwierdza, iż w wielu rejonach eksploatacyjnych ograniczona zdolność wentylacyjna zmniejsza skuteczność zwalczania zagrożenia metanowego. Obecnie ponad 50% wydobywania węgla w polskich kopalniach pochodzi ze ścian usytuowanych podziemnie. Czynniki kształtujące zagrożenie metanowe podczas eksploatacji podziemnej przedstawia rysunek 1. Wzrost zagrożenia metanowego w eksploatowanych ścianach, w ostatnich kilkunastu latach, wymaga szerszego podejścia do tematyki oceny poziomu tego zagrożenia.

W niniejszym artykule przeprowadzono analizę zagrożenia metanowego w 75 ścianach eksploatowanych w roku 2011 w pokładach metanowych w kopalniach: Kompanii Węglowej SA, Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA i Katowickiego Holdingu Węglowego SA. W oparciu o ankietę ekspercką przyjęto zestaw wyjściowy 12 czynników opisujących kształtowanie się zagrożenia metanowego w ścianach eksploatowanych w pokładach metanowych. Obliczenia statystycznych zależności korelacyjnych 12 czynników opisujących zagrożenie metanowe przeprowadzono na zbiorze 75 ścian. Zweryfikowany statystycznie zestaw parametrów i wskaźników stanowił bazę do przeprowadzenia dalszych obliczeń. Zastosowanie metody taksonomicznej pozwoliło na klasyfikację ścian w podzbiory ścian o podobnym zagrożeniu metanowym. W celu systematyzacji podzbiorów oraz ścian pod względem występującego zagrożenia metanowego opracowano syntetyczny miernik oceny poziomu tego zagrożenia. Obliczona dla każdej ściany wartość miernika pozwala na porównywanie ścian między sobą, a także utworzonych podzbiorów. Metody klasyfikacji i systematyzacji zbiorów zastosowano w celu usystematyzowania pokładów projektowanych do eksploatacji pod kątem rozpoznania geologiczno-górniczego oraz gazowego (Krause 2009).

2. DOBÓR CZYNNIKÓW I PARAMETRÓW KSZTAŁTUJĄCYCH ZAGROŻENIE METANOWE W ŚCIANACH

Zagrożenie metanowe w eksploatowanych ścianach w pokładach metanowych kształtują następujące czynniki i parametry:

- gazowe,
- geologiczno-górnictwo,
- techniczno-organizacyjne.

Nasylenie pokładów węgla metanem w dużym stopniu przekłada się na ilość uwalnianego metanu podczas prowadzenia eksploatacji. Oznaczona badaniami wartość metanonośności pokładu stanowi obecnie jedyne kryterium podziału pokładów na odpowiednie kategorie zagrożenia metanowego. Podkreślić należy, że wielkość wydzielania się metanu do środowiska ściany często nie jest zależna od kategorii pokładu, w której jest usytuowana.

Desorbowalne zasoby metanu wydzielającego się do środowiska eksploatowanych ścian pochodzą z pokładu eksploatowanego oraz pokładów podebranych i nadebranych. Wyniki analiz zagrożenia metanowego w ścianach eksploatowanych w roku 2011 w Kompanii Węglowej SA, potwierdzają 59% udział metanu wydzielającego się z pokładów podebranych i nadebranych w całkowitym wydzielaniu się do środowiska. Wydzielanie się metanu z pokładu eksploatowanego, z pokładów podebranych i nadebranych oraz zrobów poeksploatacyjnych wcześniej dokonanej eksploatacji, decyduje o poziomie występującego zagrożenia metanowego w środowisku ścian.

Na poziom kształtowania się zagrożenia w wyrobiskach rejonu ściany mają wpływ następujące czynniki:

- metanonośność na obrysie pola eksploatacyjnego ściany oraz metanonośność pokładów podebranych i nadebranych,
- metanowość bezwzględna całkowita rejonu ściany,
- udział metanu z pokładu eksploatowanego w metanowości bezwzględnej całkowitej,
- udział metanu z pokładów podebranych i nadebranych w metanowości bezwzględnej całkowitej.

Na wielkość desorbowalnych zasobów metanu uwalnianych podczas eksploatacji mają wpływ następujące parametry eksploatacji:

- długość ściany,
- wysokość ściany,
- postęp poeksploatacyjny.

Koncentracja wydobywania, uzyskiwana przez zwiększenie długości, a w mniejszym stopniu postęp i wysokość ściany przekłada się na objętość odprężanego złoża, w następstwie także na ilość metanu wydzielającego się do rejonu ściany. Parametrem, który w największym stopniu wpływa na objętość odprężanego i odgazowującego się złoża nad i pod eksploatowaną ścianą, jest długość ściany. W zestawie wyjściowym

zmiennych opisujących kształtowanie się zagrożenia metanowego podczas eksploatacji ściany uwzględniono wyżej wymienione czynniki i parametry.

Na poziom kształtowania się zagrożenia metanowego w rejonach ścian ma także wpływ zakres stosowanej profilaktyki obniżającej zagrożenie, obejmującej między innymi **przewietrzanie** oraz **odmetanowanie**. Sposób przewietrzania ściany oraz wydatek powietrza przepływającego przez rejon eksploatacyjny kształtują zawartość metanu w prądzie zużytego powietrza odprowadzanego z rejonu ściany. Wentylacyjne sposoby zwalczania zagrożenia metanowego w rejonie eksploatowanej ściany są często niewystarczające do wentylacyjnego zwalczania zagrożenia metanowego, stąd konieczne jest stosowanie odmetanowania.

Profilaktyka aktywna obejmuje stosowanie odmetanowania eksploatacyjnego, tym samym parametry przewietrzania oraz efektywność odmetanowania wpływają na kształtowanie się zagrożenia metanowego w wyrobiskach rejonów eksploatacyjnych.

Spośród czynników i parametrów geologiczno-górnicznych, gazowych i organizacyjno-technicznych przyczyniających się do kształtowania zagrożenia metanowego w ścianach, w oparciu o ankietę ekspercką, przyjęto następujący zestaw wyjściowy:

- X_1 – średnia metanonośność na obrysie pola eksploatacyjnego ściany, $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{Mg}_{\text{csw}}$;
- X_2 – długość ściany, m;
- X_3 – wysokość ściany, m;
- X_4 – postęp ściany, m/d;
- X_5 – wydobywanie, Mg/d;
- X_6 – wskaźnik systemu przewietrzania i metanowości wentylacyjnej rejonu ściany;
- X_7 – wydatek powietrza w rejonie ściany, m^3/min ;
- X_8 – metanowość bezwzględna całkowita, $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{min}$;
- X_9 – udział metanu z pokładu eksploatowanego w metanowości bezwzględnej całkowitej, %;
- X_{10} – udział metanu z pokładów podebranych i nadebranych w metanowości bezwzględnej, %;
- X_{11} – efektywność odmetanowania, %;
- X_{12} – metanowość relatywna względna, $\text{m}^3 \text{CH}_4$ w przeliczeniu na Mg wydobytego węgla.

Na podstawie zestawu wyjściowego zebrano dane z 75 ścian, w których prowadzona była eksploatacja w roku 2011. Numery ścian 1–75 stanowią zbiór, który można zidentyfikować odnośnie do kopalni, pokładu i nazwy ściany. W przyjętym zestawie wyjściowym 12 wskaźników i parametrów interpretacji wymagają przyjęte zmienne X_6 , X_9 , X_{10} oraz X_{12} .

Wskaźnik systemu przewietrzania i metanowości wentylacyjnej X_6 został skonstruowany dla każdej ściany ze zbioru 75 ścian przy uwzględnieniu stosowanego systemu przewietrzania ściany (tj. „U” lub „Y”) oraz metanowości wentylacyjnej ściany $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{min}$ w przedziałach wartości. Przyjęty wskaźnik systemu przewietrzania i metanowości wentylacyjnej rejonu ściany X_6 przyjmuje wartości 1, 2, 3, 4 (tab. 1).

Wartości wskaźników dotyczące udziału metanu z pokładu eksploatowanego X_9 oraz z pokładów podebranych i nadebranych X_{10} są wartościami uzyskanymi z prognoz wydzielania się metanu do ścian, które zostały wykonane przez rzeczoznawców

do spraw ruchu zakładu górnictwa wytypowanych przez Prezesa Wyższego Urzędu Górniczego. Wartość metanowości względnej relatywnej (zmienna X_{12}), opisuje najdokładniej ilość wydzielającego się metanu do rejonu ściany w przeliczeniu na 1 Mg wydobytego węgla. Wartość ta charakteryzuje potencjał metanowy pokładu eksploatowanego oraz jego otoczenia. W przeszłości wartość metanowości względnej relatywnej stanowiła kryterium klasyfikacji pokładów lub ich części do poszczególnych kategorii zagrożenia metanowego.

Tabela 1. Wskaźnik systemu przewietrzania i metanowości wentylacyjnej rejonu ściany

System przewietrzania	Metanowość wentylacyjna ściany, m ³ CH ₄ /min	Wskaźnik systemu przewietrzania i metanowości wentylacyjnej rejonu ściany
Y	< 10	1
	> 10	2
U	< 5	1
	5–10	2
	10–15	3
	> 15	4

Zbiór zebranych danych o 75 ścianach eksploatowanych w roku 2011 w pokładach metanowych zestawiono w formie macierzy X [1:75; 1:12]. Dane zawarte w tabeli 2 obejmują kolejno 40 ścian wchodzących w skład Kompanii Węglowej SA, 23 ściany Jastrzębskiej Spółki Węglowej SA i 12 ścian Katowickiego Holdingu Węglowego SA.

Tabela 2. Zbiór danych charakteryzujących zagrożenie metanowe w 75 eksploatowanych ścianach

Numer ściany	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
	średnia metanowość na obrysie ściany m ³ CH ₄ /Mg _{sw}	długość ściany, m	wysokość ściany, m	postęp ściany, m/d	wydobycie, Mg/d	wskaźnik systemu przewietrzania i metanowości wentylacyjnej rejonu ściany	wydatek powietrza w rejonie ściany, m ³ /min	metanowość bezwzględna całkowita m ³ /min	udział metanu z pokładu eksploatowanego, %	udział metanu z pokładów podebranych i nadebranych, %	efektywność odmetanowania, %	metanowość relatywna względna
1.	0,130	245	2,80	3,50	2700	1	950	1,00	5,00	95,00	0,00	0,53
2.	2,843	245	1,90	3,50	1970	2	1350	19,15	10,00	90,00	35,00	14,00
3.	0,500	243	2,98	4,30	4100	1	880	0,80	15,60	84,40	0,00	0,28
4.	5,600	239	2,20	3,00	2400	4	1130	27,00	23,10	76,90	38,00	16,20
5.	0,260	246	2,45	5,10	4500	1	830	0,40	36,88	63,12	0,00	0,13
6.	0,030	240	1,90	4,36	3198	1	1370	0,04	7,21	92,79	0,00	0,02
7.	0,700	245	1,77	4,85	2592	1	980	1,05	51,28	48,72	0,00	0,58
8.	2,500	240	3,60	4,31	5818	4	1750	21,00	24,00	76,00	15,00	5,20
9.	6,800	249	1,70	1,84	1109	2	1720	16,00	38,00	62,00	40,00	20,78
10.	0,390	288	2,00	0,83	650	1	800	1,45	82,33	17,67	0,00	3,21
11.	2,000	285	1,70	3,60	2200	2	1375	6,62	30,00	70,00	14,00	4,33
12.	1,000	260	2,50	2,90	2800	1	1800	1,00	64,00	36,00	0,00	0,51
13.	1,000	283	2,00	2,00	1700	1	1100	1,08	50,00	50,00	0,00	0,91
14.	2,000	143	2,70	3,20	2088	1	1500	1,83	8,00	92,00	46,00	1,26
15.	1,505	204	2,70	4,20	3422	1	1010	1,11	19,87	80,13	0,00	0,47
16.	0,001	160	2,10	1,60	736	1	440	0,10	49,78	50,22	0,00	0,20

Górnictwo i Środowisko

17.	4,110	241	2,26	1,95	1484	3	1440	14,80	30,90	69,10	21,54	14,36
18.	0,860	119	3,40	3,82	2096	1	1010	0,72	47,19	52,81	0,00	0,49
19.	3,655	278	2,36	1,57	1527	1	1350	13,82	15,56	84,44	29,80	13,03
20.	4,479	254	3,37	2,04	2750	2	2140	14,23	30,85	69,15	12,01	7,45
21.	8,800	180	1,70	4,60	2347	3	1350	15,10	39,50	60,50	15,30	9,26
22.	10,000	250	1,39	3,60	1911	3	1700	29,50	14,00	86,00	61,80	22,23
23.	1,210	235	2,00	4,60	2958	1	840	0,33	67,25	32,75	0,00	0,16
24.	4,192	242	2,20	3,80	2596	3	1390	14,76	48,12	51,88	27,50	8,19
25.	4,223	247	3,00	4,10	3886	1	990	3,91	44,36	55,64	26,90	1,45
26.	2,790	240	2,70	3,10	2000	3	1350	35,85	18,50	81,50	61,00	25,81
27.	0,270	237	2,70	6,10	5100	1	1030	2,06	28,15	71,85	0,00	0,58
28.	1,780	191	2,00	2,40	1100	1	1320	1,32	25,55	74,45	0,00	1,73
29.	0,550	229	3,90	2,90	3200	1	1390	1,39	22,30	77,70	0,00	0,63
30.	0,410	199	2,40	3,80	2100	1	1400	1,40	18,55	81,45	0,00	0,96
31.	1,771	167	1,81	3,90	1589	1	1380	4,41	32,15	67,85	0,00	4,00
32.	1,158	230	3,22	3,20	2584	1	1090	2,62	31,45	68,55	0,00	1,46
33.	0,977	192	3,04	3,83	2700	1	620	1,93	18,25	81,75	0,00	1,03
34.	0,755	244	2,81	4,00	3004	1	780	2,31	33,70	66,30	0,00	1,11
35.	0,475	192	1,88	1,80	790	1	660	1,45	25,45	74,55	0,00	2,64
36.	0,624	180	3,35	2,50	1800	1	1200	1,35	42,00	58,00	0,00	1,08
37.	3,357	235	2,40	4,00	2200	1	950	4,84	28,00	72,00	58,52	3,17
38.	3,903	110	2,20	3,50	1000	1	950	9,21	25,00	75,00	48,08	13,26
39.	1,645	221	1,95	3,50	1600	1	1400	4,97	8,00	92,00	46,06	4,47
40.	4,208	265	2,64	3,00	2500	2	980	7,72	46,00	54,00	0,00	4,45
41.	2,091	187	3,70	4,10	3500	1	1100	1,30	24,28	75,72	0,00	0,53
42.	1,607	165	2,80	3,50	2100	1	900	0,30	35,04	64,96	0,00	0,21
43.	4,072	135	3,00	3,50	1900	2	1500	13,30	24,18	75,82	41,33	10,08
44.	1,454	135	2,10	4,30	1300	1	900	0,90	34,92	65,08	0,00	1,00
45.	2,333	95	2,50	2,50	700	1	800	1,33	40,27	59,73	0,00	2,74
46.	4,490	242	1,45	2,80	1124	3	1870	21,30	28,6	71,4	42,00	27,29
47.	4,680	180	2,40	4,83	2292	3	1650	24,80	31,25	68,75	40,00	15,58
48.	2,927	250	2,70	7,00	6600	1	2200	0,80	36,00	64,00	0,00	0,17
49.	4,040	250	2,60	6,50	6000	2	2600	12,50	30,00	70,00	7,30	3,00
50.	6,241	250	1,80	3,00	1900	2	2400	51,50	12,00	88,00	52,30	39,03
51.	0,737	156	2,30	3,17	1603	1	860	0,70	61,62	38,38	0,00	0,63
52.	2,669	206	2,90	1,88	1466	3	1050	18,23	37,83	62,17	26,00	17,91
53.	1,102	237	1,35	5,55	2517	1	790	0,97	36,63	63,37	0,00	0,55
54.	2,020	249	2,00	4,80	2200	1	1570	5,74	15,55	84,45	54,00	3,76
55.	2,130	244	2,60	2,80	2100	1	1040	4,49	13,93	86,07	60,00	3,08
56.	2,770	234	2,40	4,70	2600	2	1420	6,54	34,74	65,26	0,00	3,62
57.	4,160	248	1,90	2,90	1600	2	1630	16,58	40,55	59,45	64,00	14,92
58.	3,300	160	1,70	5,00	1974	1	1650	5,08	35,80	64,20	2,00	3,71
59.	1,900	104	3,05	3,50	1500	1	1510	4,88	51,60	48,40	4,00	4,68
60.	3,400	235	1,68	3,60	1707	1	1340	12,00	28,40	71,60	44,00	10,12
61.	5,000	240	2,03	1,90	871	1	1480	11,28	36,00	64,00	47,00	18,65
62.	4,900	242	2,28	3,90	1419	2	1690	11,72	32,70	67,30	12,00	11,89
63.	2,800	245	1,62	2,90	1876	1	2170	14,29	27,00	73,00	38,00	10,97
64.	2,160	225	4,35	4,80	6367	2	920	8,37	26,63	73,37	0,00	1,89
65.	3,870	230	2,96	2,60	2654	3	1530	18,25	29,40	70,60	20,27	9,90
66.	2,470	258	3,90	2,40	3597	2	980	8,24	17,00	83,00	25,49	3,30
67.	0,858	135	2,30	6,00	2100	1	1050	1,66	70,00	30,00	0,00	1,14
68.	1,640	180	2,60	6,00	2600	1	1100	2,75	82,00	18,00	0,00	1,52
69.	0,500	180	2,20	4,50	2200	1	550	0,50	73,00	27,00	0,00	0,33
70.	0,813	155	3,30	6,00	2900	1	1000	2,60	41,52	58,48	0,00	1,29
71.	1,245	219	1,90	6,80	3774	1	1100	2,20	19,52	80,48	0,00	0,84
72.	4,207	160	3,00	2,60	2111	4	1900	39,53	15,54	84,46	48,30	26,97
73.	2,949	174	2,00	2,50	752	1	1000	4,64	72,84	27,16	0,00	8,89
74.	1,217	80	2,80	4,70	1000	1	1050	1,80	55,00	45,00	0,00	2,59
75.	0,810	190	2,20	8,60	4673	1	620	2,55	32,50	67,50	0,00	0,79

Macierz wyjściową X [1:75; 1:12] poddano obliczeniom zależności korelacyjnych między 12 wskaźnikami i parametrami. Macierz współczynników korelacji zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Macierz korelacji

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
X_1	1,00	0,17	-0,25	-0,18	-0,14	0,63	0,54	0,71	-0,19	0,19	0,62	0,72
X_2	0,17	1,00	-0,16	-0,14	0,30	0,20	0,26	0,21	-0,20	0,20	0,20	0,16
X_3	-0,25	-0,16	1,00	0,01	0,46	0,04	-0,11	-0,12	-0,09	0,09	-0,24	-0,28
X_4	-0,18	-0,14	0,01	1,00	0,64	-0,18	-0,04	-0,24	0,04	-0,04	-0,29	-0,36
X_5	-0,14	0,30	0,46	0,64	1,00	0,06	0,12	-0,10	-0,18	0,18	-0,26	-0,33
X_6	0,63	0,20	0,04	-0,18	0,06	1,00	0,41	0,79	-0,21	0,21	0,43	0,64
X_7	0,54	0,26	-0,11	-0,04	0,12	0,41	1,00	0,58	-0,28	0,28	0,41	0,52
X_8	0,71	0,21	-0,12	-0,24	-0,10	0,79	0,58	1,00	-0,33	0,33	0,68	0,92
X_9	-0,19	-0,20	-0,09	0,04	-0,18	-0,21	-0,28	-0,33	1,00	-1,00	-0,42	-0,26
X_{10}	0,19	0,20	0,09	-0,04	0,18	0,21	0,28	0,33	-1,00	1,00	0,42	0,26
X_{11}	0,62	0,20	-0,24	-0,29	-0,26	0,43	0,41	0,68	-0,42	0,42	1,00	0,71
X_{12}	0,72	0,16	-0,28	-0,36	-0,33	0,64	0,52	0,92	-0,26	0,26	0,71	1,00

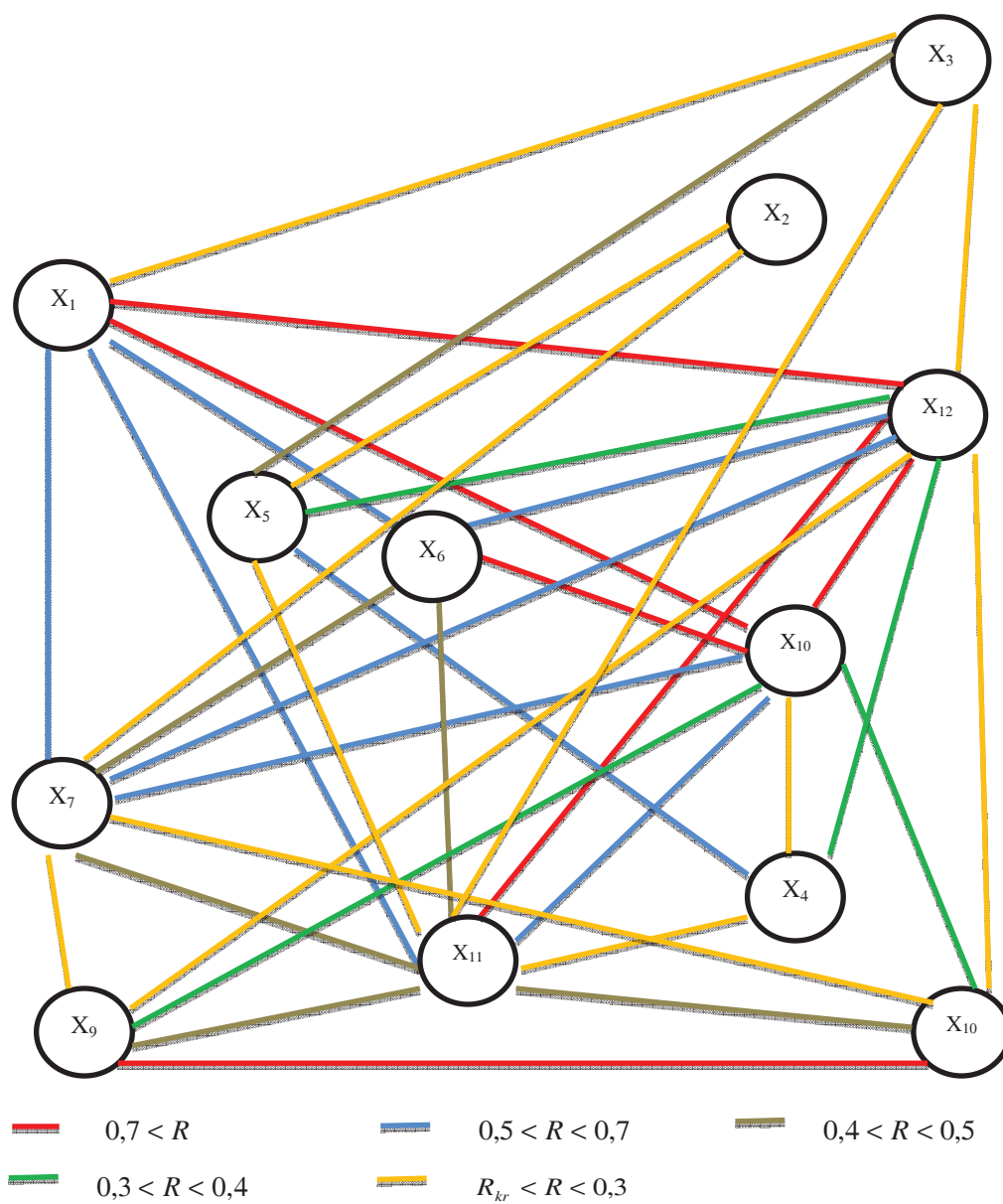
Badanie istotności współczynników korelacji obliczono na podstawie liczebności próby. Krytyczną wartość współczynnika korelacji uzyskano, wykorzystując poniższy wzór (Mańczak 1979)

$$|R| > \frac{t_{kr}}{\sqrt{N - 2 + t_{kr}^2}} = R_{kr} \quad (1)$$

Dla $N = 75$ z tablic rozkładu t -Studenta dla $\alpha = 0,05$ otrzymano wartość $t_{kr} = 1,99$. Podstawiając kolejno do powyższego wzoru, uzyskano wartość $R_{kr} = 0,23$.

Na rysunku 2 przedstawiono graf korelacji między zmiennymi, dla których wartość korelacji przekraczała 0,23. Wartość współczynników korelacji między zmiennymi w grafie (rys. 2) oznaczono następującymi kolorami:

- czerwony – dla korelacji $R > 0,7$,
- niebieski – dla korelacji $0,5 < R < 0,7$,
- szary – dla korelacji $0,4 < R < 0,5$,
- zielony – dla korelacji $0,3 < R < 0,4$,
- żółty – dla korelacji $R_{kr} < R < 0,3$.

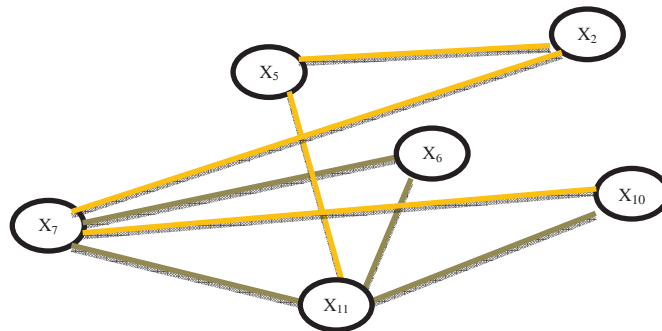


Rys. 2. Graf korelacji między parametrami i wskaźnikami opisującymi kształtowanie się zagrożenia metanowego

Fig. 2. Graph of correlation relationships between parameters and indicators for defining the extent of methane danger

Macierz korelacji (tab. 3 oraz rys. 2) potwierdziła, że przyjęte zmienne zestawu wyjściowego charakteryzują się różnym stopniem skorelowania. Silna korelacja między niektórymi parametrami i czynnikami przyjętego zbioru wyjściowego potwierdza występowanie stosunkowo silnych zależności identyfikujących zagrożenie metanowe w eksploatowanych ścianach. Wysokimi współczynnikami korelacji powyżej 0,7 charakteryzuje się zmienna X_8 . Zmienna ta skorelowana jest z parametrami: X_1 , X_6 i X_{12} . Powyższe obserwacje potwierdzają, że w pierwszej kolejności powinna zostać wyeliminowana zmienna X_8 . Równie wysokie współczynniki korelacji posiadają następujące zmienne: X_1 , X_{12} , X_9 ze zmienną X_{10} oraz X_{12} ze zmienną X_{11} . Także te zmienne nie powinny być uwzględniane w dalszej analizie. Wartości współczynników korelacji zmiennych X_3 i X_4 ze zmienną X_5 , wskazują, iż zmienne te również należy wykluczyć. Pomimo przekroczonych wartości krytycznych korelacji 0,23 między niektórymi zmiennymi, ze względu na duże ich znaczenie w ocenie poziomu zagrożenia metanowego, pozostawiono je w dalszej analizie.

Przeprowadzona syntetyczna analiza korelacji między parametrami opisującymi zagrożenie metanowe pozwoliła zidentyfikować parametry skorelowane słabo oraz te, które powinny znaleźć się w zredukowanym zbiorze wyjściowym dla przeprowadzenia klasyfikacji i systematyzacji ścian na podzbiory statystycznie jednorodne. Graf korelacji po zredukowaniu przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Zredukowany graf korelacji

Fig. 3. Reduced graph of correlation

Zweryfikowany zestaw sześciu zmiennych (rys. 3), przyjęty do dalszych obliczeń, stanowią następujące parametry:

X_2 – długość ściany, m;

X_5 – wydobywanie, Mg/d;

X_6 – wskaźnik systemu przewietrzania i metanowości wentylacyjnej rejonu ściany;

X_7 – wydatek powietrza w rejonie ściany, m³/min;

X_{10} – udział metanu z pokładów podebranych i nadebranych w metanowości bezwzględnej, %;

X_{11} – efektywność odmetanowania, %.

W oparciu o zweryfikowany zestaw zmiennych, obliczono podział zbioru 75 ścian na podzbiory statystycznie jednorodne, wykorzystując metodę grupowania zmiennych losowych wielowymiarowych.

3. KLASYFIKACJA ŚCIAN METODĄ GRUPOWANIA ZMIENNYCH LOSOWYCH WIELOWYMIAROWYCH

Metoda grupowania zmiennych losowych wielowymiarowych umożliwia obserwację przemieszczania się i łączenia obiektów oraz podzbiorów w grupy typologiczne jednorodne. Przekazuje także wyniki obliczeń w postaci ciągłego grupowania poszczególnych obiektów z rozpatrywanego zbioru (Kozdrój, Przybyła 1986; Ziembicki, Bruski 1975).

Każdą ścianę X_j eksploatowaną w pokładzie metanowym traktować należy, jak zmienną losową wielowymiarową

$$X_j = \{x_{j1}, x_{j2} \dots x_{jm}\} \quad (2)$$

gdzie:

- j – numer ściany,
- m – liczba wszystkich zmiennych,
- x_{ji} – wystandaryzowane cechy opisujące daną ścianę X_j .

Zweryfikowaną macierz wyjściową \mathbf{X} [1:75; 1:6] poddano kolejnym etapom grupowania w oparciu o omawianą metodę.

Metoda grupowania zmiennych losowych wielowymiarowych polega na utworzeniu ze zbioru 75 ścian takich grup, aby w obrębie każdej z nich nie występowały między zmiennymi istotne różnice. Rozpoczynając grupowanie liczba podzbiorów równa jest liczbie 75 ścian. Między danymi grupami za pomocą wzoru (3) obliczane są wszystkie możliwe odległości między grupami

$$d_{kl} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ki} - x_{li})^2} \quad (3)$$

Wśród wszystkich odległości d_{kl} odszukuje się najmniejszą d_{\min} i określa numery grup s i t , dla których zależność ta zachodzi. Grupy x_s i x_t łączy się następnie w jedną grupę, nadając jej numer 1. Całkowita liczba grup zmniejsza się i wynosi $L = N - 1$. Proces postępowania jest powtarzany, aż do otrzymania wyłącznie jednej grupy. Podczas grupowania możliwe jest, iż nowa grupa powstanie przez łączenie dwóch wcześniej utworzonych grup. Nowa grupa charakteryzuje się zmienną średnią x_{GP} (4), której składowe są średnimi wartościami wszystkich zmiennych tworzących tę grupę

$$x_{(GP)i} = \frac{1}{N_{GP}} \sum_k x_{ki} \quad (x_k \in G_p) \quad (4)$$

gdzie N_{GP} – liczebność wartości zmiennych losowych wchodzących w skład grupy.

Dla każdej nowo utworzonej grupy oblicza się odległości wartości tworzących ją zmiennych od centrum grupy, posługując się wzorem

$$d_{(Gp)k} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ki} - x_{(Gp)i})^2} \quad (5)$$

gdzie k – numery zmiennych losowych wchodzących w skład rozpatrywanej grupy.

Na każdym etapie grupowania obliczana jest wariancja międzygrupowa odległości według wzoru

$$S_{mg}^2 = \frac{1}{L-1} \sum_{p=1}^L N_{Gp} \sum_{i=1}^m (x_{Gp} - x_i)^2 \quad (6)$$

oraz wariancja wewnątrzgrupowa

$$S_{wg}^2 = \frac{1}{N-L} \sum_{p=1}^L \sum_{k=1}^{N_{Gp}} \sum_{i=1}^m (x_{(p)ki} - x_{(Gp)i})^2 \quad (7)$$

Obliczone wartości wariancji wewnątrz i międzygrupowej pozwalają sprawdzić hipotezę o równości środków utworzonych grup (Ziembicki, Bruski 1975). Za pomocą wzoru (7), obliczając wartość zmiennej F

$$F = \frac{S_{mg}^2}{S_{wg}^2} \quad (8)$$

można porównać z wielkością F_α odczytaną z tablic Fischera-Snedecora na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, przy stopniach swobody $r_1 = L - 1$ i $r_2 = N - L$, gdzie L – liczba utworzonych podzbiorów i N – liczba badanych ścian. Podział optymalny dla określonych stopni swobody otrzymuje się przy spełnieniu warunku opisanego poniższym wzorem

$$\frac{F}{F_\alpha} = \max \quad (9)$$

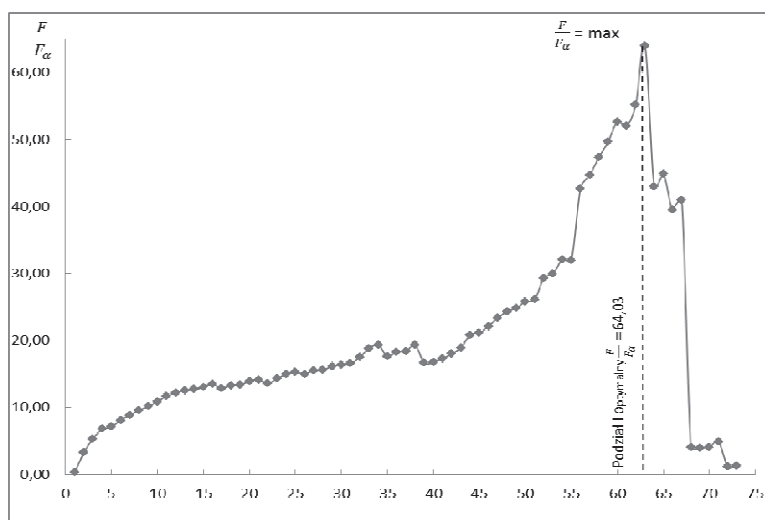
W tabeli 4 zestawiono wyniki utworzonych podzbiorów dla określonych stopni swobody. Graficzną interpretację wartości ilorazu F/F_α dla kolejnych iteracji tworzących się podzbiorów przedstawiono na rysunku 4.

Tabela 4. Wyniki utworzonych podzbiorów dla kolejnych stopni swobody

Stopnie swobody		Wartość F	Wartość F_α	Wartość F/F_α	Stopnie swobody		Wartość F	Wartość F_α	Wartość F/F_α
r_1	r_2				r_1	r_2			
73	1	65,04	252,57	0,26	37	37	31,70	1,73	18,33
72	2	62,87	19,48	3,23	36	38	33,38	1,73	19,30
71	3	45,78	8,57	5,34	35	39	28,65	1,72	16,66
70	4	38,22	5,68	6,73	34	40	28,78	1,72	16,73
69	5	31,28	4,42	7,08	33	41	29,80	1,72	17,33
68	6	30,15	3,73	8,08	32	42	30,95	1,72	17,99
67	7	29,14	3,30	8,83	31	43	32,51	1,72	18,90
66	8	28,64	3,00	9,55	30	44	35,83	1,72	20,83
65	9	28,25	2,78	10,16	29	45	36,31	1,72	21,11
64	10	28,42	2,62	10,85	28	46	38,04	1,72	22,12
63	11	29,03	2,49	11,66	27	47	40,18	1,72	23,36

62	12	28,96	2,38	12,17	26	48	42,01	1,73	24,28
61	13	28,88	2,30	12,56	25	49	42,88	1,73	24,78
60	14	28,18	2,22	12,69	24	50	44,90	1,74	25,80
59	15	28,27	2,16	13,09	23	51	45,33	1,74	26,05
58	16	28,34	2,11	13,43	22	52	51,24	1,75	29,28
57	17	26,47	2,06	12,85	21	53	52,69	1,76	29,94
56	18	26,88	2,02	13,31	20	54	56,72	1,77	32,05
55	19	26,67	1,99	13,40	19	55	56,94	1,78	31,99
54	20	27,20	1,96	13,88	18	56	76,46	1,79	42,72
53	21	27,29	1,93	14,14	17	57	80,86	1,81	44,67
52	22	25,80	1,90	13,58	16	58	86,23	1,82	47,38
51	23	26,88	1,88	14,30	15	59	91,44	1,84	49,70
50	24	27,81	1,86	14,95	14	60	97,93	1,86	52,65
49	25	28,04	1,84	15,24	13	61	97,70	1,88	51,97
48	26	27,42	1,83	14,98	12	62	105,47	1,91	55,22
47	27	28,05	1,81	15,50	11	63	124,21	1,94	64,03
46	28	28,07	1,8	15,59	10	64	85,13	1,98	43,00
45	29	28,83	1,79	16,10	9	65	91,05	2,03	44,85
44	30	29,07	1,78	16,33	8	66	82,13	2,08	39,48
43	31	29,23	1,77	16,51	7	67	88,13	2,15	40,99
42	32	30,74	1,76	17,46	6	68	8,89	2,24	3,97
41	33	32,92	1,75	18,81	5	69	9,17	2,35	3,90
40	34	33,82	1,75	19,32	4	70	10,10	2,50	4,04
39	35	30,59	1,74	17,58	3	71	13,31	2,73	4,88
38	36	31,66	1,73	18,30	2	72	3,52	3,12	1,13
					1	73	5,08	3,97	1,28

Wyróżnione pogrubioną czcionką dane dotyczą optymalnego podziału ścian



Rys. 4. Wykres F/F_{α} grupowania ścian metodą zmiennych losowych wielowymiarowych z zastosowaniem testu Fishera

Fig. 4. Graph F/F_{α} for longwall distinction with the use of dimensional random variables method and Fisher's exact test

Analizując dane zwarte w tabeli 4 oraz na rysunku 4 można zauważyć, iż podczas grupowania został wyodrębniony podział optymalny. W tabeli 5 przedstawiono natomiast podział optymalny na ilość podzbiorów i tworzące je numery ścian. Maksymal-

na wartość ilorazu F/F_a wynosi 64,03, a więc podział optymalny otrzymano dla $r_1 = 11$ i $r_2 = 63$ stopni swobody. W podziale optymalnym wyodrębnionych zostało 13 podzbiorów ścian, w tym sześć ścian tworzy podzbiory jednoelementowe.

Najliczniejsze podzbiory to:

- podzbiór pierwszy tworzy 20 ścian,
- podzbiór drugi tworzy 19 ścian,
- podzbiór czwarty tworzy 15 ścian,
- podzbiór szósty tworzy ośmiem ścian statystycznie jednorodnych.

Tabela 5. Podział optymalny zbioru ścian na podzbiory statystycznie jednorodne

Podział	Stopnie swobody	Numer podzbioru	Numery ścian
Podział optymalny	$r_1 = 11$ $r_2 = 63$	1	1, 3, 5, 6, 7, 13, 15, 23, 25, 27, 29, 32, 33, 34, 40, 41, 53, 66, 71, 75
		2	16, 18, 28, 30, 31, 35, 36, 42, 44, 45, 51, 58, 59, 67, 68, 69, 70, 73, 74
		3	50, 63
		4	4, 9, 11, 17, 20, 21, 22, 24, 26, 46, 47, 52, 56, 62, 65
		5	48, 49
		6	2, 19, 37, 39, 54, 55, 60, 61
		7	14, 38, 43
		8-13	pozostałe ściany tworzą jednoelementowe podzbiory

4. SYNTETYCZNY MIERNIK OCENY ZAGROŻENIA METANOWEGO W ŚCIANACH

Przedstawiony w tabeli 5 podział optymalny pozwala wnioskować o podobieństwie ścian w utworzonych podzbiorach jednorodnych. Nie charakteryzuje on jednak różnic między poszczególnymi podzbiorami oraz ich elementami (ścianami). Określenie względnych różnic między podzbiorami i ścianami możliwe jest w oparciu o wprowadzenie miernika poziomu zagrożenia metanowego.

W celu opracowania miernika oceny zagrożenia metanowego w ścianach eksploatowanych w roku 2011 w kopalniach węgla kamiennego, zastosowano następujący zestaw zmiennych:

X_{11} – efektywność odmetanowania, %;

X_{12} – metanowość relatywna względna, $m^3 CH_4$ w przeliczeniu na Mg wydobytego węgla.

Zmiennym przypisano jednakowy wpływ na poziom zagrożenia metanowego. W celu wyznaczenia syntetycznego miernika oceny zagrożenia metanowego w ścianach, w pierwszej kolejności należy wytypować abstrakcyjną ścianę X_0 o współrzędnych $\{X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0m}\}$, określonych za pomocą następujących relacji

$$X_{0k} = \max_j X_{jk} \quad (10)$$

gdy k należy do zbioru cech stymulant. W sytuacji, gdy k nie należy do tego zbioru, wykorzystywana jest następująca relacja

$$X_{0k} = \min_j X_{jk} \quad (11)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} j &= 1, 2 \dots N & N & - \text{liczba ścian,} \\ k &= 1, 2 \dots m & m & - \text{liczba parametrów i wskaźników.} \end{aligned}$$

Abstrakcyjna ściana X_0 pełni rolę wzorca oceny zagrożenia metanowego. Do zbioru cech stymulant należy zmienna X_{12} , a do zbioru destymulant X_{11} . Podstawowymi elementami wykorzystywanymi do obliczania syntetycznego miernika są odległości d_{jo} (12) między poszczególnymi punktami X_j oraz punktem X_0 obrazującym wzorzec ściany o poziomie zagrożenia metanowego

$$d_{jo} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{jk} - x_{ok})^2} \quad (12)$$

Syntetyczny miernik można wyznaczyć, wykorzystując następujący wzór

$$d_j = 1 - \frac{d_{jo}}{C} \quad (13)$$

gdzie:

$$C = \bar{d} + 2 \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (d_{jo} - \bar{d})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_{jo} \quad (15)$$

W celu wyeliminowania wyboru jednostek miary, wielkości $X_{j,k}$ są wielkościami standaryzowanymi, obliczanymi za pomocą poniższych wzorów (Hellwig 1968):

$$\frac{X_j - \bar{x}_j}{s_j} \quad \bar{x}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} \quad s_j = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Miara d_j konstruowana jest zawsze w taki sposób, aby przyjmować wartości nieujemne. Może przekraczać 1, ale prawdopodobieństwo takiego przypadku jest małe. Oznacza to, że w przeważającej liczbie badanych ścian zachowana jest następująca nierówność

$$0 \leq d_j \leq 1 \quad (17)$$

Rosnące wartości miernika dla poszczególnych ścian świadczą o potencjalnie większym zagrożeniu metanowym. Malejąca wartość miernika wpływa na zmniejszenie zagrożenia występującego w ścianie.

Obliczone wartości miernika syntetycznego pozwalają na określenie pozycji danej ściany w całym zbiorze. Umożliwia to także wyznaczenie różnic ścian należących do jednego podzbioru.

Na podstawie algorytmu grupowania zmiennych losowych wielowymiarowych utworzony został podział optymalny (tab. 6). W celu określenia różnic poziomu zagrożenia metanowego między danymi ścianami i podzbiarami, wstawiono lokatę war-

tości obliczonego syntetycznego miernika oceny dla każdej ściany. W kolorze czerwonym zaznaczono dwadzieścia ścian najbardziej zagrożonych metanem. Kolorem zielonym oznaczono ściany charakteryzujące się najniższym poziomem zagrożenia metanowego.

Tabela 6. Wyniki przedziału optymalnego i wartości syntetycznego miernika

Przedział optymalny $r_1 = 11$ $r_2 = 63$	1	nr ściany	1	3	5	6	7	13	15	23	25	27	29	32	33	34	40	41	53	66	71	75
		lokata miernika	58	64	69	71	54	49	61	68	70	55	53	41	46	44	27	57	56	37	50	51
	2	nr ściany	16	18	28	30	31	35	36	42	44	45	51	58	59	67	68	69	70	73	74	
		lokata miernika	66	60	39	48	28	35	45	65	47	34	52	30	26	43	40	62	42	16	36	
	3	nr ściany	50	63																		
		lokata miernika	2	18																		
	4	nr ściany	4	9	11	17	20	21	22	24	26	46	47	52	56	62	65					
		lokata miernika	8	5	29	6	20	17	14	21	7	1	11	4	31	10	15					
	5	nr ściany	48	49																		
		lokata miernika	67	33																		
	6	nr ściany	2	19	37	39	54	55	60	61												
		lokata miernika	12	13	74	63	72	75	23	9												
	7	nr ściany	14	38	43																	
		lokata miernika	73	19	22																	
	8-13	pozostałe ściany	8	10	12	57	64	72														
			25	32	59	24	38	3														

Obserwując wyniki grupowania zmiennych losowych wielowymiarowych oraz syntetycznego miernika oceny poziomu zagrożenia metanowego, można zauważyć, że dwa najliczniejsze podzbiory jednorodne, tzn. pierwszy i drugi, tworzą ściany o niewielkim poziomie zagrożenia metanowego (na co wskazują wartości lokat miernika). W skład podzbioru pierwszego weszło dwadzieścia ścian, zaś drugiego dziewiętnaście.

Kolejny pod względem liczebności ścian jest podzbiór czwarty, w skład którego wchodzi ściany o wysokich wartościach lokat miernika oceny poziomu zagrożenia. Spośród piętnastu ścian tego podzbioru tylko trzy ściany posiadają wartość lokaty powyżej 20. Dwie ściany tworzące podzbiór trzeci charakteryzują się wysokim zagrożeniem metanowym.

W skład podzbioru szóstego wchodzi osiem ścian o zróżnicowanym poziomie zagrożenia metanowego. W zbiorze tym znalazła się ściana 55, dla której wielkość miernika syntetycznego osiągnęła wartość najmniejszą i jest wzorcem poziomu zagrożenia (o najniższym poziomie zagrożenia).

Sześć zbiorów jednoelementowych tworzą ściany o średnim poziomie zagrożenia metanowego.

Przedstawiona powyżej interpretacja wyników klasyfikacji i systematyzacji ścian pod względem zagrożenia metanowego potwierdza zasadność zastosowanej metody służącej ocenie poziomu zagrożenia metanowego.

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona klasyfikacja i systematyzacja ścian eksploatowanych w pokładach metanowych w roku 2011, w świetle przyjętego zweryfikowanego zestawu parametrów i wskaźników opisujących kształtowanie się zagrożenia metanowego, pozwala stwierdzić, że utworzone podzbiory statystycznie jednorodne ścian zgrupowały ściany o podobnym poziomie zagrożenia metanowego. Zastosowanie miernika oceny zagrożenia metanowego, obliczonego dla każdej ściany, pozwala usystematyzować zarówno podzbiory, jak i ściany pod względem poziomu zagrożenia metanowego.

Literatura

1. Hellwig Z. (1968): Zastosowanie miary taksonomicznej do typologicznego podziału krajów ze względu na poziom ich rozwoju oraz zasoby i strukturę wykwalifikowanych kadr. Przegląd Statystyczny nr 4.
2. Kozdrój M., Przybyła H. (1986): Teoria organizacji i zarządzania. Część III: Modele matematyczne w organizacji produkcji górniczej. Skrypty uczelniane nr 1272. Gliwice, Politechnika Śląska.
3. Krause E. (2009): Usystematyzowanie pokładów projektowanych do eksploatacji w kopalniach w aspekcie stopnia rozpoznania górniczo-geologicznego oraz gazowego (Systematisation of seams designed for extraction in mines from the aspect of the mining-geological and gas recognition level). Archives of Mining Sciences issue 2.
4. Mańczak K. (1979): Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
5. Ziembicki L., Bruski J. (1975): Metoda grupowania zmiennych losowych. Przegląd Statystyczny nr 4.