

METODA OCENY WYBUCHOWOŚCI MIESZANINY GAZOPODOBNYCH AZOTU, TLENU, METANU

Streszczenie: Przedstawiono teoretyczne uzasadnienie metody określania właściwości wybuchowych flegmatyzowanych mieszanek powietrza i gazów palnych

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЗРЫВАЕМОСТИ СМЕСЕЙ ГАЗООБРАЗНЫХ АЗОТА, КИСЛОРОДА, МЕТАНА

Представлено теоретическое обоснование методики определения взрывчатых свойств флегматизированных смесей воздуха и горючих газов

W ratownictwie górniczym dla prognozy wybuchowości kopalnianego środowiska używano tak zwanego "trójkąta wybuchowości" (diagram wybuchowości) [1,3], figury płaskiej, wykonanej we współrzędnych "utleniacz - paliwo". Jego wierzchołkami są dolna i górna granice wybuchowości mieszanki i szczyt jej zapłonu. Dolnej i górnej granicami wybuchowości nazywa się takie stosunki stężenia palnych gazów i powietrza poniżej i powyżej jakich mieszaniny nie mogą zapalić i rozpowszechnić wybuch [2].

W obecności mieszaniny kilku składników palnych, określenie dolnej i górnej granicy wybuchowości mieszaniny wykonują za pomocą znanego wzoru Le Chateliera, biorąc pod uwagę wkład każdego składnika i jego granicę wybuchowości, %:

$$L = \frac{100}{\frac{p_1}{L_1} + \frac{p_2}{L_2} + \frac{p_3}{L_3}}, \quad (1)$$

gdzie L – granica wybuchowości (dolna albo górna) sumy gazów palnych, %;

p_1, p_2, p_3 – zawartość każdego składnika w mieszaninie gazów palnych, %;

$$p_1 + p_2 + p_3 = 100, \quad (2)$$

$$p_1 = \frac{100 \cdot C_1}{C_1 + C_2 + C_3}, \quad p_2 = \frac{100 \cdot C_2}{C_1 + C_2 + C_3}, \quad p_3 = \frac{100 \cdot C_3}{C_1 + C_2 + C_3} \% \quad (3)$$

gdzie C_1, C_2, C_3 – zawartość palnych składników w środowisku na podstawie analizy próbki powietrza, %;

L_1, L_2, L_3 – odpowiednio dolne albo górne granice wybuchowości każdego składnika mieszniny, %.

W górniczych wyrobiskach kopalń węgla kamiennego dominują metan, tlenek węgla i wodór. Wartości interwałów palności (wybuchowości) dla kilku gazów podane są w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości interwałów palności mieszanek gazów [2]

Таблица 1. Значения интервалов горючести газовоздушных смесей [2]

Gazy	Granice palności, %	
	Dolna, L_u	Górna, L_g
Wodór	7,12	66,0
Tlenek węgla	12,8	75,0
Metan	5,0	15,0
Propan	2,4	9,5
Butan	1,86	8,4
Pentan	1,45	6,5
Amoniak	15,5	27,0

Szczytem zapłonu nazywają się takie stężenie mieszanki palnych gazów, dla zapobiegania wybuchu której niezbędne maksymalne obniżenie zawartości tlenu w atmosferze [1]. Współrzędne szczytu zapłonu są wyznaczane z następujących wyrażen:

$$C_{ze} = \frac{100}{\frac{p_1}{L_1} + \frac{p_2}{L_2} + \frac{p_3}{L_3} + \dots + \frac{p_i}{L_i}}, \quad (4)$$

gdzie C_{ze} – stężenie gazów palnych w szczycie palności, %:

$$p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_i = 100, \%$$

$$p_1 = \frac{C_1 100}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i}, \%$$

$$p_2 = \frac{C_2 100}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i}, \%$$

$$p_3 = \frac{C_3 100}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i}, \%$$

$$p_i = \frac{C_i 100}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i}, \%$$

$$C_{oe} = \frac{C_1 \cdot C_{oe1} + C_2 \cdot C_{oe2} + C_3 \cdot C_{oe3} + \dots + C_i \cdot C_{oei}}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i}, \quad (5)$$

gdzie $C_{oe1}, C_{oe2}, \dots, C_{oei}$ – bezpieczna zawartość tlenu w szczycie palności każdego palnego gazu podczas zastosowanie konkretnego flegmatyzatoru, %.

Tabela 2. Wartości szczytów zapłonu mieszanek gazu i powietrza [1]

Таблица 2. Значения пиков воспламенения газоздушных смесей [1]

Palny składniki mieszaniny	Granice wybuchowości, %		Szczyt zapłonu (%) podczas flegmatyzacji:			
	L_H , dolny	L_B , górný	azotem		dwutlenkiem węgla	
			C_{oe} , po tlenu	C_{ze} , po azotu	C_{oe} , po tlenu	C_{ze} , po dwutlenku węgla
CH ₄	4,3	13,5	10,2	13,5	13,5	5,75
H ₂	4,0	75,0	5,0	5,9	5,9	5,00
CO	12,5	74,0	5,6	13,5	5,9	15,00

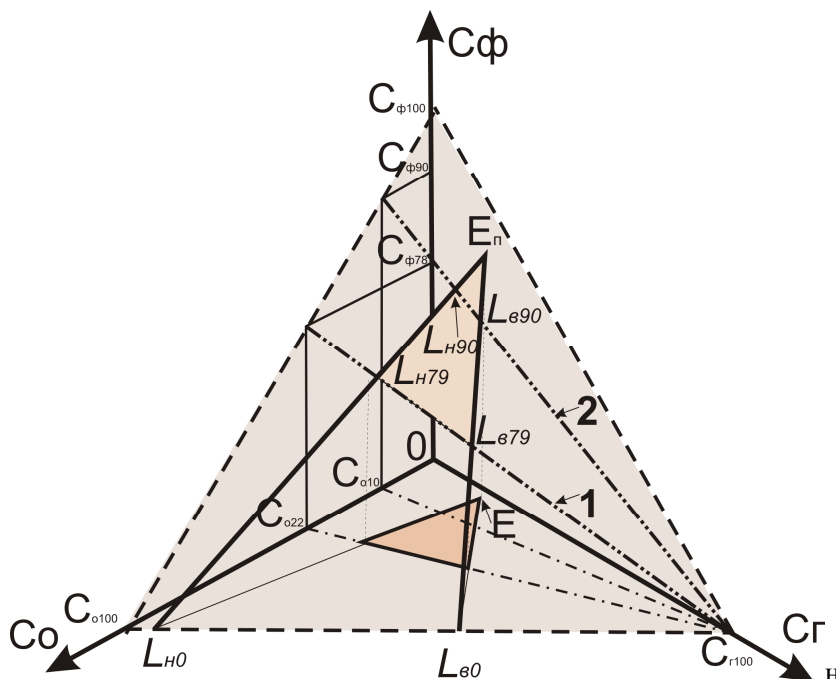
Z porównania danych tabel 1 i 2 wynika, że w zależności od warunków badań zakres wybuchowości mieszanki powietrza i gazów palnych mogą się nieznacznie różnić. Tak, zgodnie [1] interwał wybuchowych stężeń metanu w powietrze składa 4,3...13,5%, a zgodnie [2] – 5,0...15,0 %. To samo można również zauważyć dla innych gazów palnych. Można argumentować, że takie rozbieżności są nieistotne i w pierwszym przybliżeniu można zaniedbać.

W związku z wyposażeniem jednostek ratownictwa górniczego technicznymi środkami gaśniczymi podziemnych pożarów za pomocą gazów inertnych, było niezbędne dostosować istniejącą metodę oceny wybuchowości mieszaniny gazów, uwzględnić wpływ flegmatyzatoru.

Wygodnie jest rozglądać mieszaninę gazów, jako system trzech składników: utleniacza, paliwa, flegmatyzatoru. Utleniaczem jest zwykle tlen. W jakości paliwa jest metan, tlenek węgla, wodór, ich mieszaniny kombinowane. Flegmatyzatorem jest azot, dwutlenek węgla, para wodna i ich mieszaniny. Przy tym komponenty systemu jest w stosunku:

$$C_o + C_z + C_\phi = 100, \%, \quad (6)$$

gdzie C_o, C_z, C_ϕ - odpowiednio całkowite stężenia utleniacza, paliwa, flegmatyzatoru, %.



Rys.1. Schemat do określenia obszaru wybuchowości mieszanek gazów składających z trzech komponentów:

C_{oi}, C_{fi}, C_{hi} - stężenia w składzie mieszaniny odpowiednio utleniacza, flegmatyzatora, paliwa; L_{hi} , L_{hi} - odpowiednio dolna i górna granice wybuchowości mieszniny gazowej, gdzie i - wartość procentowa flegmatyzatora w mieszaninie; E_{II} -szczyt zapłonu mieszniny po tleniu; 1,2 - linii, które charakteryzują środowiska gazowe z zawartością flegmatyzatora odpowiednio 79 i 90%.

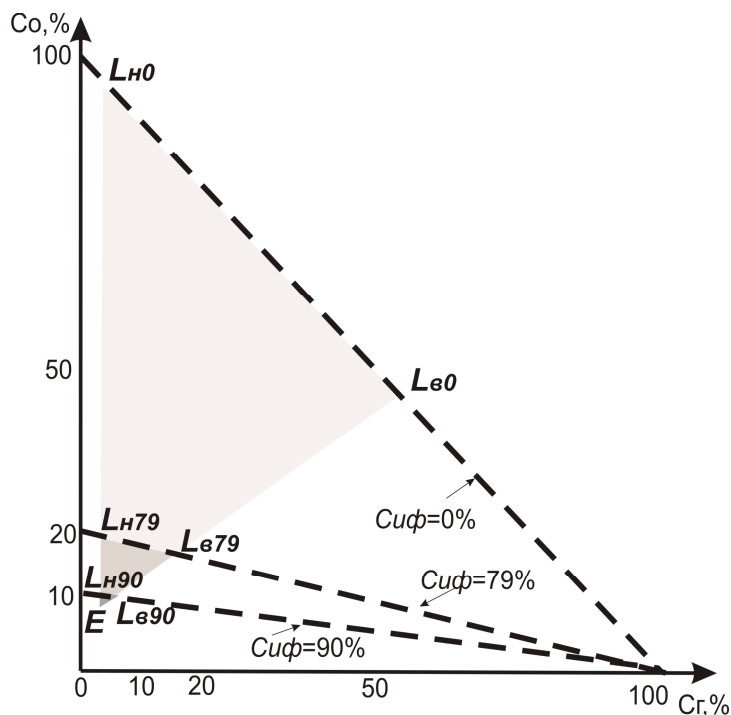
Рис.1. Схема определения области взрывчатости трехкомпонентных газовых смесей:

C_{oi}, C_{fi}, C_{hi} - концентрации в составе смеси соответственно окислителя, флегматизатора, горючего; L_{hi} , L_{hi} - соответственно нижний и верхний пределы взрываемости газовой смеси, где i - процентное содержание флегматизатора в составе смеси; E_{II} - пик воспламеняемости смеси по кислороду; 1,2 - линии, характеризующие газовые среды с содержанием флегматизатора соответственно 79 и 90%.

Geometrycznie taki system trzech składników gazowych może być reprezentowany w systemie trzech współrzędnych "utleniacz - paliwo - flegmatyzator" jako płaszczyzna, która przecina osi w punktach 100% (Rys.1). Każdej kombinacji składników mieszaniny gazów odpowiada punkt na tej płaszczyźnie. Zakres mieszanin wybuchowych zawarte wewnątrz trójkąta L_{hi}, L_{hi}, E_{II} ; gdzie wielkości L_{hi} i L_{hi} - odpowiednio dolna i górna granice wybuchowości mieszniny palnego i tlenu, E_{II} - szczyt zapłonu. Wartości te są znane z badań laboratoryjnych miesznin palnych gazów [1,2].

Jeśli do mieszaniny gazów z tlenem dodawać flegmatyzator, to powierzchnia tego trójkąta zostanie zmniejszona. Tak dla mieszanek z zawartościami flegmatyzatora 79% (powietrze) i 90% otrzymujemy trójkąty L_{h79}, L_{h79}, E_{II} (wydzielony kolorem) i L_{h90}, L_{h90}, E_{II} . Dynamikę mieszanek utleniacza i flegmatyzatora przy rozcieńczeniu ich paliwem może być określona linijami $C_{o79} - L_{h79}, L_{h79} - C_{z100}$ i $C_{o90} - L_{h90}, L_{h90} - C_{z100}$ (Rys.1). Przy tym wewnątrz przedziału $L_{hi} - L_{hi}$ mieszanina gazów jest wybuchowa. Tradycyjny trójkąt wybuchowości jest projekcją zbudowanego nami $\Delta L_{hi}, L_{hi}, E_{II}$ na płaszczyźnie poziomej, jej osi współrzędnych "utleniacz - paliwo" (Rys.2).

Analiza charakteru zmian interwału wybuchowości mieszanin z różną zawartością gazów flegmatyzujących dozwoliła zwrócić uwagę na następujące istotne cechy. Ze wzrostem odsetka gazów inertnych w mieszaninie znacznie zmniejsza się interwał wybuchowości. Przy tym dolna granica wybuchowości zmienia się powoli, głównie dynamika zależy od zmiany górnej granicy.



Rys.2. Diagram tworzenia wybuchowych mieszanek gazowych przy podawaniu flegmatyzatorów: C_{uf} – zawartość gazów flegmatyzujących w składzie powietrza w górniczych wyrobkach; inne oznaczenia jak na rys.1

Rys.2. Диаграмма формирования взрывчатых газовых смесей при подаче флегматизаторов в аварийные горные выработки: C_{uf} – содержание флегматизирующих газов в составе подаваемого в выработки воздуха; остальные обозначения как на рис.1

Dynamikę zmiany składów mieszanin gazowych (na rys.2 zobrazowane liniami przerywanymi), przy wykonaniu (6), mogą być reprezentowane przez następujące równanie:

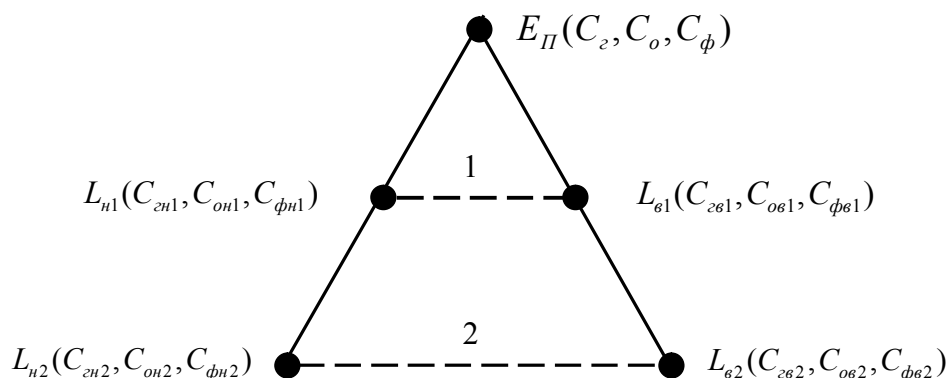
$$\frac{C_z}{100} + \frac{C_o}{100 - C_{uf}} = 1, \quad (7)$$

gdzie C_z, C_o, C_{uf} - zawartość odpowiednio paliwa, utleniacza i flegmatyzatora w składzie mieszaniny gazowej.

Jednak używać tradycyjnyj diagram do obliczania wybuchowości mieszanin flegmatyzowanych niemożliwe ze względu na to, że wyrażenie (6) nie jest przestrzegane. W celu uzasadnienia rozrachunkowego algorytmu powinny rozważyć fragment $\Delta L_{ni}, L_{ei}, E_{II}$, przedstawiony na rys.3.

Strony trójkąta $\Delta L_{ni}, L_{ei}, E_{II}$ można opisać za pomocą matematycznych zależności linii prostych, przechodzących przez dwa punkty. Razem iz (6) oni tworzą układ trzech równań liniowych algebraicznych z trzema niewiadomymi:

$$\begin{cases} \frac{C_z - C_{zn1}}{C_{zn2} - C_{zn1}} = \frac{C_o - C_{on1}}{C_{on2} - C_{on1}} = \frac{C_\phi - C_{\phi n1}}{C_{\phi n2} - C_{\phi n1}} \\ \frac{C_z - C_{ze1}}{C_{ze2} - C_{ze1}} = \frac{C_o - C_{oe1}}{C_{oe2} - C_{oe1}} = \frac{C_\phi - C_{\phi e1}}{C_{\phi e2} - C_{\phi e1}} \\ \frac{C_z}{100} + \frac{C_o}{100} + \frac{C_\phi}{100} = 1 \end{cases} \quad (8)$$



Rys.3 Fragment $\Delta L_{ni}, L_{\phi i}, E_{II}$:

1,2 – segmenty, które obejmują zakres wybuchowych mieszanin gazów, mających dolne L_{n1}, L_{n2} i górne $L_{\phi1}, L_{\phi2}$ granice wybuchowości z odpowiadającymi im stężeniami paliwa - C_{zi} , utleniacza - C_{oi} , flegmatyzatora - $C_{\phi i}$

Рис.3 Фрагмент $\Delta L_{ni}, L_{\phi i}, E_{II}$:

1,2 – отрезки, характеризующие диапазоны взрывчатости газовых смесей, имеющих нижние L_{n1}, L_{n2} и верхние $L_{\phi1}, L_{\phi2}$ пределы взрываемости с соответствующими значениями концентраций горючего - C_{zi} , окислителя - C_{oi} , флегматизатора - $C_{\phi i}$

Natomiast, każde równanie prostej, przechodzącej przez dwa punkty, można zamienić na układ dwóch równań liniowych. Pierwsze wyrażenie (8) można przekształcić w następujący sposób:

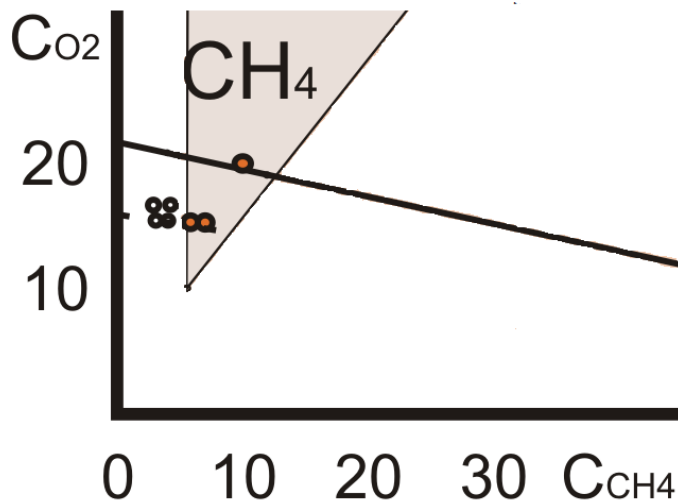
$$\begin{aligned} \frac{C_z - C_{zn1}}{C_{zn2} - C_{zn1}} &= \frac{C_o - C_{on1}}{C_{on2} - C_{on1}} = \frac{C_{\phi} - C_{\phi n1}}{C_{\phi n2} - C_{\phi n1}} = \\ &= \begin{cases} (C_z - C_{zn1})(C_{on2} - C_{on1}) = (C_{zn2} - C_{zn1})(C_o - C_{on1}) \\ (C_z - C_{zn1})(C_{\phi n2} - C_{\phi n1}) = (C_{zn2} - C_{zn1})(C_{\phi} - C_{\phi n1}) \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

Podobnie przekształcone drugie wyrażenie:

$$\begin{aligned} \frac{C_z - C_{z\phi1}}{C_{z\phi2} - C_{z\phi1}} &= \frac{C_o - C_{o\phi1}}{C_{o\phi2} - C_{o\phi1}} = \frac{C_{\phi} - C_{\phi\phi1}}{C_{\phi\phi2} - C_{\phi\phi1}} = \\ &= \begin{cases} (C_z - C_{z\phi1})(C_{o\phi2} - C_{o\phi1}) = (C_{z\phi2} - C_{z\phi1})(C_o - C_{o\phi1}) \\ (C_z - C_{z\phi1})(C_{\phi\phi2} - C_{\phi\phi1}) = (C_{z\phi2} - C_{z\phi1})(C_{\phi} - C_{\phi\phi1}) \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

Tak więc, rozwiązanie stosowno wybuchowości mieszaniny metana i powietrza sprowadza się do wyznaczenia współrzędnych końców odcinków 1 czy 2 (rys.3), które stworzyli się pomiędzy (9) i (10).

Prawdziwość teoretycznych rezultatów była sprawdzona eksperymentalnie w laboratorium naukowo-badawczej intuicji VVUU (Ostrawa-Radwanice, Czechy). Na rys.4 przedstawiono pozioma projekcja teoretyczno wyznaczonego trójkąta wybuchowości mieszniny metanu, tlenu i azotu. Białe kółki – niewybuchowe mieszaniny, ciemne - wybuchowe mieszaniny. Rezultaty eksperymentalne zupełnie zbiegły się z rozrachunkami teoretycznymi.



Rys.4 Porównanie teoretycznych i eksperymentalnych badań: kółka – rezultaty zapłonu eksperymentalnych mieszanek gazowych, ciągła linia – mieszanka metanu i powietrza, linia kropkowana – powietrze rozcieńczane azotem do 15...17%.

Рис.4. Сопоставление теоретических и экспериментальных исследований: кружочки – результаты воспламенения экспериментальных газовых составов, залиты теоретически рассчитанные диаграммы смесей метана и водорода с кислородом и азотом; линии: сплошная метановоздушная смесь, пунктир – кислород разбавлен азотом до 15...17%.

Można zrobić wniosek o tym, że teoretyczne uzasadnione metody określania właściwości wybuchowych mieszanek powietrza, gazów palnych i flegmatyzowanych. Badania laboratoryjne potwierdziły prawdziwość teoretycznych położeń.