



Krzysztof CYBULSKI¹, Zdzisław DYDUCH¹, Robert HILDEBRANDT¹, Henryk KOPTON¹

Badania przebiegu wybuchów metanu w warunkach wzrostu ciśnienia w wyrobiskach doświadczalnych GIG KD Barbara

Streszczenie: Wybuchy metanu są jednym z największych zagrożeń w polskim górnictwie węglowym i niestety ciągle przyczyną wielu katastrof. Stały wzrost głębokości eksploatacji węgla w warunkach wysokiej koncentracji wydobywania powoduje zwiększenie metanonośności bezwzględnej i ciśnienia złożowego metanu z wybieranych pokładów. Sytuacja ta przekłada się bezpośrednio na wzrost poziomu zagrożeń wynikających z obecności metanu w podziemnym środowisku pracy. Oczywiście wydaje się zatem podjęcie wzmożonych prac badawczych, które pozwolą na opracowanie odpowiednich rozwiązań wykluczających ryzyko wystąpienia katastrof górniczych, wynikających z zapalenia i/lub wybuchu metanu. Nieodzownym elementem takiego podejścia jest, oprócz rozwoju metod profilaktyki zagrożenia metanowego, bardzo dokładne rozpoznanie mechanizmów samego przebiegu spalania i wybuchu tego gazu.

W artykule przedstawiono sposób przeprowadzania i przykładowe wyniki badań wybuchów metanu w chodniku doświadczalnym 400 m Kopalni Doświadczalnej Barbara Głównego Instytutu Górnictwa. Badano dwa różne mechanizmy wydzielania się metanu do wyrobiska górniczego: gwałtowne uwolnienie znacznej objętości metanu i ciągły, stosunkowo wolny wypływ określonej ilości gazu do wyrobiska. Dokonano analizy wpływu sposobu wydzielania się metanu na rozkład stężeń gazu oraz, w zależności od tego rozkładu, na przebieg jego wybuchu lub spalania. Zgromadzone dane charakteryzują zjawiska termodynamiczne, które określają poziom zagrożenia związanego z wybuchem.

Przeprowadzone na dużą skalę badania umożliwiły również oszacowanie ryzyka powstania warunków wystarczających do wybuchu pyłu węglowego, zapoczątkowanego wybuchem metanu. Duża skala doświadczeń i zastosowany system ciągłej rejestracji przebiegu wybuchu pozwoliły na identyfikację i wyodrębnienie specyficznych cech propagacji frontu płomienia i fali ciśnienia w podziemnych wyrobiskach górniczych.

Po raz pierwszy przebiegi doświadczeń były rejestrowane za pomocą systemu kamer rozmieszczonych w chodniku doświadczalnym.

Słowa kluczowe: metan, wybuch, badania

¹ Główny Instytut Górnictwa, Katowice; e-mail: kcybulski@gig.eu; zdyduch@gig.eu; rhildebrandt@gig.eu; hkopton@gig.eu

Development of methane explosions in the underground experimental facilities of GIG EM Barbara

Abstract: Methane explosions are among the greatest hazards in the Polish coal mining industry and unfortunately continue to cause many catastrophes. The constant growth of the depth of coal exploitation in the conditions of the high concentration of mining causes the increase of absolute methane content and methane seam pressure from the mined seams. This situation directly affects the increase in the level of methane hazard in the underground work environment. It is therefore obvious to undertake intensive research that will allow for the development of appropriate solutions that help to exclude the risk of mining catastrophes resulting from the ignition and/or methane explosion. In addition to the development of methane hazard prevention methods, an indispensable element of this approach is a very accurate identification of the mechanisms of the combustion and explosion of this gas.

The article presents the method of investigation and examples of results of methane explosions carried out in the 400 m experimental gallery of the Experimental Mine "Barbara" of the Central Mining Institute – the only large scale underground experimental facility in Europe. An analysis has been performed of the influence of the methane release into mining workings on the distribution of the gas concentration and on the course of its explosion or combustion. The data collected characterizes thermodynamic phenomena that form the basis for determining the level of the explosion hazard.

Large scale studies have also allowed to assess the risk of conditions that are sufficient for the development of a coal dust explosion initiated by methane explosions. The large scale of the experiments and the system of continuous recording of the course of the experiments allowed the specific characteristics of the methane explosion and burning in underground mining workings to be identified and isolated.

For the first time, the course of experiments was recorded via a camera system deployed along the gallery.

Keywords: methane, explosion, research

Wprowadzenie

Wydzielanie się metanu podczas prowadzenia robót górniczych i wynikające stąd zagrożenie jego zapaleniem czy też wybuchem jest zawsze bardzo groźnym zjawiskiem występującym w kopalniach węgla kamiennego. Wzrost tego zagrożenia wynika zarówno z coraz większej głębokości prowadzenia robót, jak i koncentracji wydobycia. Zwalczanie zagrożenia metanowego polega przede wszystkim na eliminowaniu możliwości powstania niebezpiecznych koncentracji metanu oraz na stosowaniu odpowiednich środków zabezpieczających przed jego zapłonem. Odpowiednio do występującego zagrożenia metanowego stosuje się różne środki profilaktyczne – od wymagań stawianych urządzeniom energomechanicznym, zabezpieczeniom metanometrycznym, po rygory w zakresie odpowiednich warunków wentylacyjnych oraz odmetanowania włącznie (Krause 2003, 2009; Krause i Dziurzyński 2015; Krzystolik 2000). Ocena zagrożenia metanowego w rejonie ściany eksploatowanej w kopalniach węgla powinna być oparta na bilansie metanowo-wentylacyjnym, który uwzględnia zarówno wydzielanie metanu do środowiska ściany, jak i rzeczywiste warunki wentylacyjne w rejonie (Krause i Łukowicz 2004; Koptoń i Wierziński 2014).

Niestety, pomimo nabywanych doświadczeń, dobrego rozpoznania i postępu technicznego, w ciągu ostatnich 10 lat (2006–2016) w polskim górnictwie węgla kamiennego doszło do 33 zdarzeń związanych z zapaleniem czy też wybuchem metanu w kopalniach (Raporty roczne 2007–2017). Statystyka tych zdarzeń jest w dziejach górnictwa podziemnego węgla najtragiczniejsza zarówno ze względu na liczbę ofiar wypadków śmiertelnych i ciężkich, jak też wyrządzone szkody materialne.

Należy zaznaczyć, że w warunkach zagrożenia metanowego, nagromadzenia metanu w strumieniu powietrza kopalnianego mogą wynikać ze stałego jego dopływu do wyrobisk (np. ze zrobów do chodnika wentylacyjnego przy przewietrzaniu ścian sposobem „U” po caliźnie węglowej), czy też dopływ metanu może być nagły i mieć charakter dynamiczny (np. w wyniku zaistnienia wstrząsu górotworu, wypływu lub wyrzutu gazu).

Badania zaistniałych dotychczas wybuchów metanu bez wątpienia przyczyniły się do rozwoju metod rozpoznawania, prognozowania, jak i zwalczania zagrożenia metanowego, w tym odmetanowania. Rozpoznawanie stanu zagrożenia metanowego ma bardzo duże znaczenie przy jego zwalczaniu, co warunkuje prowadzenie bezpiecznej eksploatacji węgla.

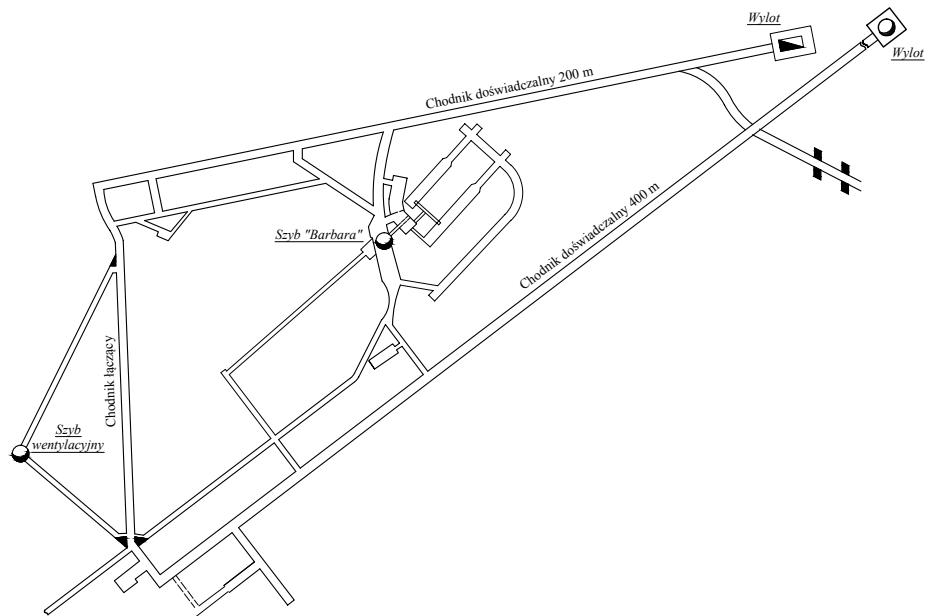
Prowadzone w tym zakresie prace laboratoriów badawczych Kopalni Doświadczalnej Barbara Głównego Instytutu Górnictwa obejmują, między innymi, eksperymenty związane z zapaleniem i wybuchem metanu w podziemnych chodnikach doświadczalnych, co jest przedmiotem niniejszego artykułu. Przybliżając sposób realizacji i wybrane wyniki tych badań, autorzy wyodrębnili charakterystyczne cechy wybuchu i wypalenia mieszaniny metanowo-powietrznej w warunkach stałego lub nagłego dopływu metanu do wyrobisk podziemnych. Analizie poddano również wpływ sposobu wydzielania się metanu do wyrobisk górniczych na koncentrację i rozkład stężeń tego gazu. Przeprowadzone badania umożliwiły też wstępne oszacowanie ryzyka powstania warunków wystarczających do wybuchu pyłu węglowego, zapoczątkowanego wybuchem metanu.

1. Część doświadczalna

1.1. Warunki prowadzenia badań

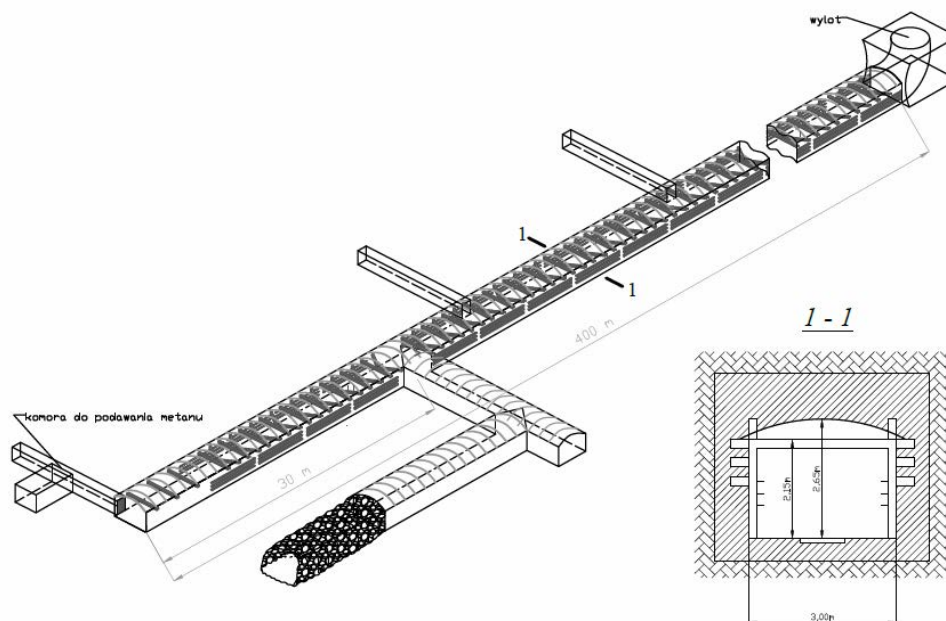
Główny Instytut Górnictwa, Kopalnia Doświadczalna Barbara dysponuje podziemnym poligonem badawczym – siecią chodników doświadczalnych wyposażonych w systemy pomiarowe zjawisk fizycznych, umożliwiające, między innymi, przeprowadzanie badań wybuchów gazów i pyłów w warunkach rzeczywistych. Schemat sieci chodników doświadczalnych przedstawiono na rysunku 1.

Badania zjawisk wypalenia i wybuchów metanu przeprowadzono w chodniku doświadczalnym 400 m, na poziomie –46 m. Chodnik na całej swojej długości (400 m) wykonany jest w obudowie betonowej, wzmocnionej dodatkowo elementami stalowymi, które podczas badań stanowiły miejsce montażu aparatury pomiarowej gazów. Przekrój poprzeczny na całej długości wyrobiska wynosi 7,5 m². Dostęp do chodnika oraz jednocześnie wyodrębnienie od sieci wentylacyjnej kopalni podczas prowadzenia doświadczeń umożliwiają stalowe tamy, sterowane zdalnie z dyspozytorni kopalnianej. Chodnik posiada wylot na powierzchnię dla swobodnego wyrzutu podmuchu i produktów wybuchów, a w odległości 30 m od jego początku znajduje się skrzyżowanie z wyrobiskiem o tym samym przekroju. Wentylację chodnika doświadczalnego po wybuchach umożliwia sieć wyrobisk, z których powietrze odprowadzane jest bezpośrednio do szybu wydechowego kopalni. W omawianym rejonie znajdują się również komora do podawania metanu oraz rozdzielnie z instalacjami pomiarowymi. Podstawowe dane chodnika doświadczalnego 400 m przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Schemat sieci chodników doświadczalnych na poziomie -46 m w KD Barbara

Fig. 1. Diagram of the network of experimental galleries at the level -46 m in KD Barbara



Rys. 2. Schemat i podstawowe parametry chodnika doświadczalnego 400 m

Fig. 2. Geometry of the 400 m experimental entry

1.2. Systemy pomiarowe

Na potrzeby badań chodnik doświadczalny wyposażono w system umożliwiający monitoring składu mieszaniny gazów przed i po wybuchu metanu. Do realizacji tych zadań zastosowano Zintegrowany System Bezpieczeństwa SMP-NT/S, składający się ze stanowiska dyspozytorskiego i czujników montowanych w wyrobiskach.

Zestaw czujników obejmował:

- czujniki absorpcyjne w paśmie podczerwieni metanu DCHIR (0 do 100% v/v CH₄),
- katalityczny (0 do 5% v/v CH₄) i termokonduktometryczny (5 do 100% v/v CH₄) czujnik metanu MM-4,
- czujniki absorpcyjne w paśmie podczerwieni dwutlenku węgla DCD (0 do 5% v/v CO₂),
- czujniki elektrochemiczne tlenku węgla DCO-H (0 do 10 000 ppm CO),
- czujniki elektrochemiczne tlenku węgla MCO (0 do 1000 ppm CO),
- czujniki elektrochemiczne tlenu MO₂,
- czujniki temperatury i wilgotności CT i MH.

Dla zwiększenia ochrony ww. urządzeń przed skutkami wybuchów (ciśnienie i temperatura) wszystkie czujniki zabudowano w dodatkowych metalowych osłonach, a sposób montażu umożliwiał ich dowolne rozmieszczenie w przekroju wyrobiska (rys. 3)



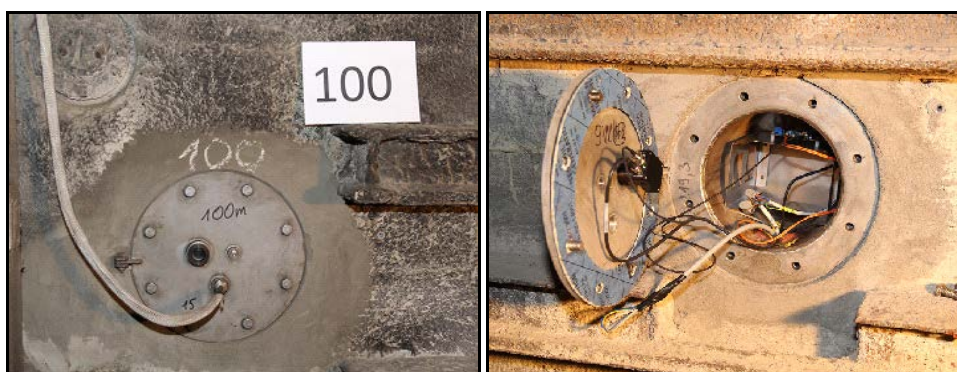
Rys. 3. Sposób montażu czujników metanu

Fig. 3. Installation method of methane sensors

Względy bezpieczeństwa prowadzonych prac badawczych narzucały dodatkowo konieczność ciągłego pomiaru parametrów powietrza wentylacyjnego wyrobiska w rejonie, w szczególności na trasie dojścia do chodnika doświadczalnego po wybuchach. Do tego celu zastosowano między innymi czujniki tlenku węgla (zakresy: 0 do 100 ppm CO oraz 0 do 1000 ppm CO), włączone również do systemu SMP-NT/S.

Detekcję i rejestrację wielkości charakteryzujących wybuch metanu zapewniał system czujników umieszczonych w stacjach pomiarowych, zabudowanych w ociosach chodnika doświadczalnego. Stacje pomiarowe rozmieszczono co 20 m, a sposób ich montażu przedstawia rysunek 4. Każdą stację pomiarową wyposażono w niezależne łącze światłowodowe do punk-

tu zbiorczego zlokalizowanego w dolowej rozdzielni pomiarowej, skąd sygnały pomiarowe transmitowano na powierzchnię do stanowiska komputerowego. Do badań zastosowano piezorezystywne czujniki ciśnienia Kistler typu 4045 A10 wraz z dedykowanymi wzmacniaczami. Do pomiaru intensywności promieniowania płomienia zastosowano fotodetektory ze zintegrowanym wzmacniaczem typu Thorlabs model PDA20H EC. Fotodetektory zostały oddzielone od przestrzeni chodnika szafirową soczewką, zwiększającą kąt widzenia czujnika i zabezpieczającą go przed działaniem wysokiej temperatury i wnikiem pyłu.



Rys. 4. Stacja pomiarowa i jej wyposażenie

Fig. 4. The measurement station and its equipment

Wizualizację przebiegu doświadczeń zrealizowano za pomocą kamer z zapisem cyfrowym obrazu, których parametry pozwalały na zapis video w sekwencji klatek 240/s, przy zachowaniu dużej rozdzielczości obrazu. Urządzenia te posiadały własne źródło zasilania oraz pamięć wewnętrzną. Dla ochrony przed spodziewanym ciśnieniem i temperaturą wybuchów kamery zabudowane były w specjalnie wykonanych osłonach.

1.3. Sposób prowadzenia badań

Na podstawie przeprowadzonej analizy sposobu wydzielania się metanu do podziemnych wyrobisk kopalnianych w badaniach przyjęto symulację dwóch wariantów zdarzeń:

- Wariant **A** – nagły wypływ (wyrzut) dużej ilości metanu do wyrobiska.
- Wariant **B** – stałe wydzielanie się metanu o określonej ilości do wyrobiska.

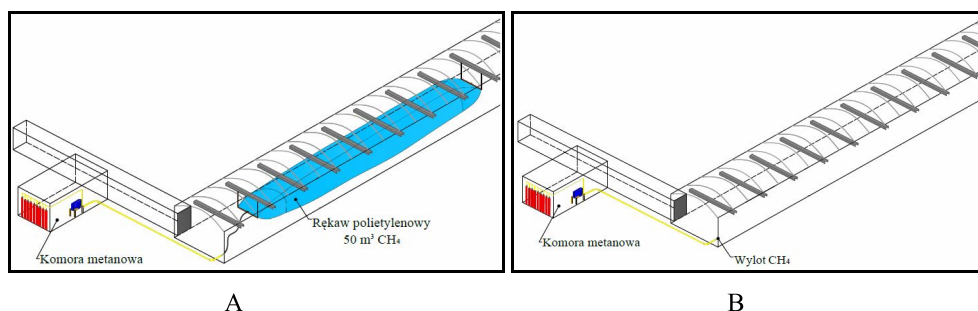
We wszystkich eksperymentach strumień wentylacji tłoczącej, podczas uwalniania metanu w chodniku doświadczalnym, wynosił 0,2 do 0,3 m/s.

Dla realizacji powyższych założeń metan o stężeniu 100% v/v był podawany w zamkniętym końcu chodnika na dwa sposoby.

W wariacie A – za pośrednictwem rękawa wykonanego z folii polietylenowej, którego całkowita objętość po wypełnieniu metanem wynosiła 50 m³ (rys. 5A). Nagłe uwolnienie zgromadzonego gazu odbywało się poprzez rozerwanie rękawa za pomocą kilku odcinków

lontu detonującego bezpiecznego w obecności metanu. Detonację lontu inicjowano z dyspozytorni kopalnianej na powierzchni.

W wariantcie B – bezpośrednio z komory metanowej poprzez instalację, zakończoną rurą o średnicy 2". Otwór wylotowy rury pozostawiano całkowicie otwarty (rys. 5B)



Rys. 5. Schemat sposobu podawania metanu do wyrobiska doświadczalnego

Fig. 5. Methane release methods into the experimental workings

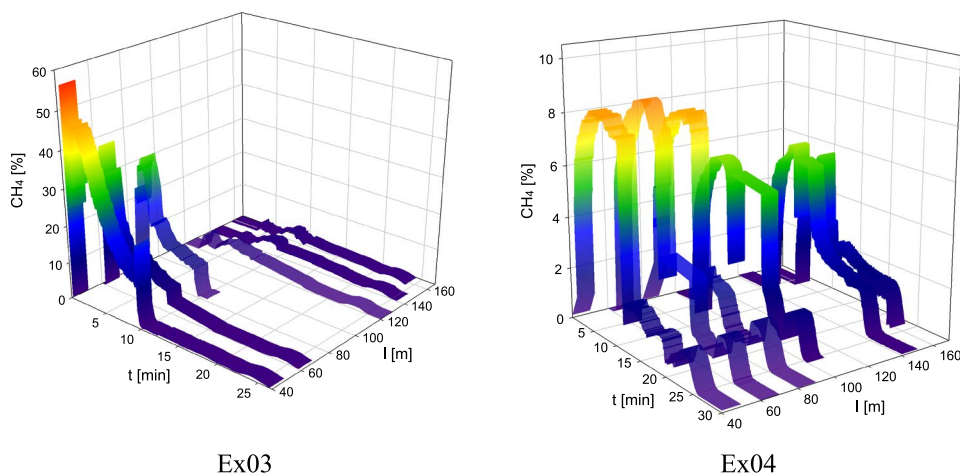
Monitoring stężeń gazów w chodniku doświadczalnym umożliwiał ciągłą obserwację aktualnego stanu atmosfery, w szczególności stężenia metanu przed wybuchem oraz stężeń gazów powybuchowych. Wskazania czujników podczas wszystkich eksperymentów były rejestrowane i archiwizowane. Repetycja odczytu wyników pomiarów stężeń gazów i temperatury wynosiła 2 s. Do inicjowania doświadczeń zastosowano główki zapalcze o energii 10 kJ, rozmieszczone co 10 m, pod stropem wyrobiska. Główki uruchamiane były sygnałem elektrycznym z powierzchni, selektywnie – w oparciu o odczyty stężeń metanu – w miejscach, w których panowały warunki optymalne z punktu widzenia celu eksperymentu.

Czujniki metanu były montowane pod stropem, w połowie wysokości wyrobiska oraz 50 cm ponad jego spągiem, co każde 10 lub 20 metrów chodnika.

2. Wyniki

Typowe wyniki badań przedstawiono na wykresach zamieszczonych na kolejnych rysunkach. Przedstawiają one rezultaty uzyskane w doświadczeniach Ex03 i Ex04. W pierwszym z doświadczeń metan został uwolniony z rękawa polietylenowego o objętości 50 m³ (wariant A). Źródło zapłonu zostało zainicjowane po czasie 9,5 min od momentu rozerwania rękawa, na 80 m chodnika doświadczalnego. W eksperymencie Ex04 metan został wprowadzony do chodnika przez rurę o średnicy 2" (wariant B). Źródło zapłonu zainicjowano na 100 m chodnika po upływie czasu 11 min od momentu rozpoczęcia wprowadzania metanu do chodnika.

Wykresy zamieszczone na rysunku 6 obrazują zmiany stężenia metanu wzdłuż chodnika w czasie uwalniania gazu i po wybuchu.



Rys. 6. Zmiany stężenia metanu podczas doświadczeń Ex03 i Ex04

Fig. 6. Methane concentration histories in tests Ex03 and Ex04

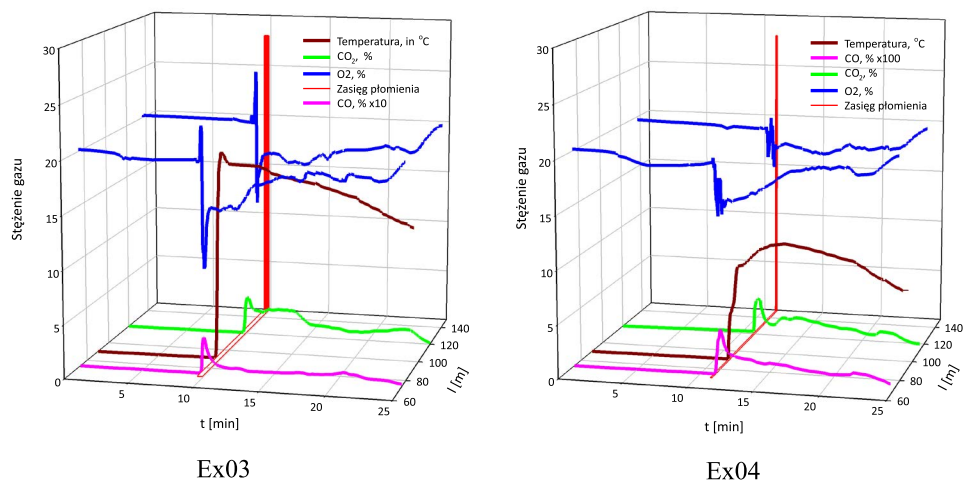
W wyniku zniszczenia rękawa (Ex03) stężenia metanu w pobliżu zamkniętego końca chodnika są początkowo bardzo wysokie. Metan przemieszcza się wzdłuż chodnika tak, że w momencie zainicjowania spalania stężenie metanu na odcinku chodnika do 100 m jest na poziomie ok. 10%. W przypadku wolnego wypływu metanu (Ex04) jego stężenie rozkłada się bardziej równomiernie. W początkowym odcinku chodnika, przez dłuższy czas stężenie to utrzymuje się na poziomie ok. 8%. Dłuższa jest też część chodnika wypełniona mieszaniną wybuchową metanu w momencie zainicjowania spalania.

Kolejny rysunek (rys. 7) przedstawia wykresy zmian stężenia pozostałych gazów rejestrowanych podczas doświadczeń i zmiany temperatury gazów.

Podczas badań mierzono także typowe parametry wybuchu: położenie frontu płomienia i zmiany ciśnienia wybuchu. W obu opisywanych doświadczeniach zmiany ciśnienia wybuchu były praktycznie niemierzalne. W doświadczeniu Ex04 maksymalne zmierzone ciśnienie nie przekroczyło wartości 4 kPa. Na rysunku 8 przedstawiono położenie frontu płomienia i jego zasięg. Zamieszczono także średnie szybkości płomienia na odcinkach pomiędzy poszczególnymi stacjami pomiarowymi.

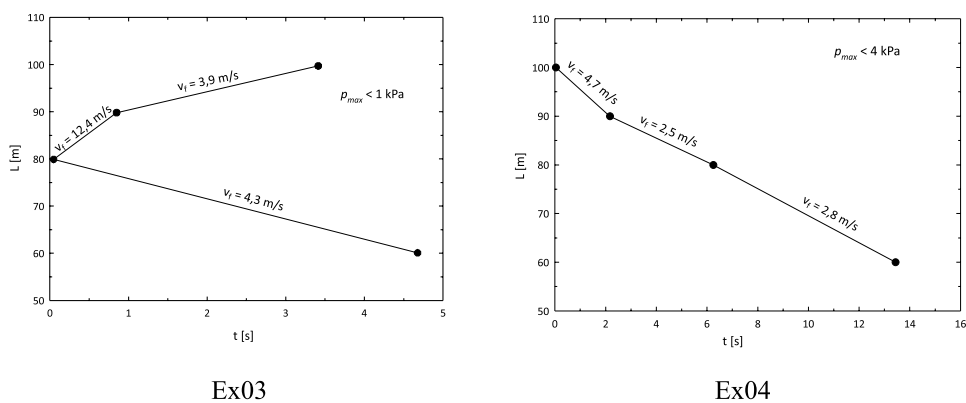
W obu przypadkach zasięg płomienia wyniósł 40 m, przy czym w doświadczeniu Ex04 płomień przemieszczał się tylko w kierunku zamkniętego końca chodnika. Zaskakująco małe były szybkości przemieszczania się płomienia. W doświadczeniu Ex04 średnia szybkość płomienia nie przekroczyła 5 m/s (18 km/h). W Ex03 szybkości płomienia były nieco większe, choć i w tym przypadku trudno mówić o wybuchu metanu. Był to raczej przemieszczający się front spalania, co potwierdzają również nagrania z kamer, których przykładowe ujęcie zamieszczono na rysunku 9.

Taką obserwację potwierdzają też wyniki pomiaru ciśnienia. W obu przypadkach przyrosty ciśnienia były bardzo małe, nieprzekraczające 1 i 4 kPa odpowiednio w doświadczeniach Ex03 i Ex04.



Rys. 7. Zmiany stężenia gazów i zmiany temperatury podczas doświadczeń Ex03 i Ex04

Fig. 7. Gas concentrations and temperature changes in tests Ex03 and Ex04



Rys. 8. Położenie frontu płomienia podczas doświadczeń Ex03 i Ex04

Fig. 8. Flame front positions in tests Ex03 and Ex04

Warto jednak zaznaczyć, iż wypalenie metanu w chodniku może przybrać lokalnie charakter bardziej dynamiczny (wybuchowy), czego potwierdzeniem są zgromadzone nagrania video. Analizy zarejestrowanego w doświadczeniu Ex3 obrazu świadczą o występowaniu lokalnych nagromadzeń wybuchowych stężeń metanu, powodujących wyraźną zmianę przebiegu spalania.



Rys. 9. Przykład przebiegu frontu płomienia podczas doświadczenia Ex03

Fig. 9. An example of the flame development in test Ex03

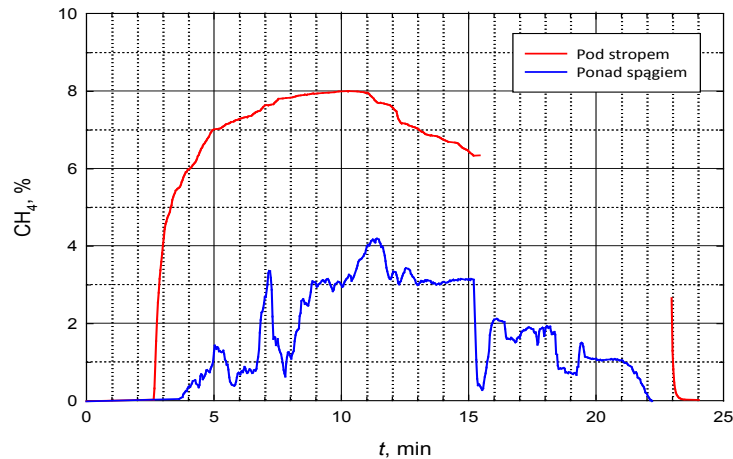
Dyskusja wyników i wnioski

Seria wybuchów doświadczalnych metanu w wyrobiskach podziemnych KD Barbara Głównego Instytutu Górnictwa doprowadziła do uzyskania dość zaskakujących wyników. Uwolnienie znacznych ilości metanu (50 m^3) do chodnika doświadczalnego, w którym szybkość przepływu powietrza nie przekracza $0,5 \text{ m/s}$ prowadzi do nierównomiernego rozkładu stężenia metanu w wyrobisku. Wykresy na rysunku 10 obrazują zmiany stężenia metanu w tym samym miejscu chodnika, na dwóch różnych wysokościach. W rezultacie zapalenia utworzonej w ten sposób mieszaniny następuje raczej spalanie niż jej wybuch. Świadczą o tym bardzo małe przyrosty ciśnienia nieprzekraczające kilku kPa i małe szybkości przemieszczania się frontu płomienia charakterystyczne raczej dla spalania niż dla wybuchu metanu.

Uzyskane wyniki badań korespondują z relacjami górników, którzy znaleźli się w obszarze oddziaływania wybuchu metanu w kopalniach. Często mówią oni, że zauważyli „wybuch“ i udało im się przed nim schronić. Oczywiście, taka sytuacja jest możliwa tylko wtedy, kiedy w kopalni dochodzi do zapalenia niejednorodnej mieszaniny metanu z powietrzem. Rzeczywisty wybuch metanu jest zjawiskiem zachodzącym zbyt szybko, aby można było się przed nim schronić.

Rejestrowane, minimalne zmiany ciśnienia wywołane spalaniem metanu w wyrobisku nie powinny powodować uniesienia zalegającego tam pyłu węglowego i jego wybuchu.

Ex05
Methane concentration at 100 m



Rys. 10. Zmiany stężenia metanu 10 cm pod stropem i ok. 50 cm ponad spągiem

Fig. 10. Methane concentrations 10 cm below the roof and app. 50 cm above the floor

Należy jednak przyjąć, że zmienne w czasie i lokalizacji nagromadzenia metanu mogą miejscami stanowić środowisko dla jego wybuchu, a w konsekwencji zapoczątkować wybuch pyłu węglowego. Potencjalną sytuację ryzyka tworzenia się takich miejsc w kopalniach potęgują zmiany warunków wentylacji wyrobisk, będące wynikiem ich konwergencji i wyposażenia, w których uzyskanie mieszaniny jednorodnej jest bardziej prawdopodobne.

Uzyskane wyniki sugerują, że wybuchy metanu w kopalniach, jeżeli nie uczestniczy w nich pył węglowy, są raczej szybkim wypalaniem się metanu, który tworzy w wyrobiskach niejednorodne mieszaniny niż rzeczywistym wybuchem tego gazu, jaki ma miejsce w przypadku dobrego wymieszania z powietrzem.

Prezentowane wyniki badań zostały uzyskane w ramach realizacji projektu EXPRO pt. „Prognozowanie i ograniczenie efektów wybuchów metanu dla zwiększenia ochrony infrastruktury kopalnianej i kluczowego wyposażenia” współfinansowanego przez Fundusz Badawczy dla Węgla i Stali (nr projektu RFCR-CT-2014-00005) oraz ze środków finansowych na naukę w latach 2014–2017 przyznanych na realizację projektu międzynarodowego współfinansowanego.

Literatura

- Koptoń, H. i Wierziński, K. 2014. The balance of methane and ventilation as a tool for methane hazard assessment in the areas of longwalls exploited in hard coal mines. *Journal of Sustainable Mining* 13(4), s. 40–46, DOI: 10.7424/jsm140408.
- Krause, E. 2003. Ocena poziomu zagrożenia metanowego w środowisku projektowanych i eksploatowanych ścian w pokładach metanowych. *Wiadomości Górnicze* 7.

- Krause, E. i Łukowicz, K. 2004. Zasady prowadzenia ścian w warunkach zagrożenia metanowego. *Instrukcja nr 17 GIG*. Katowice: Główny Instytut Górnictwa.
- Krause, E. 2009. Ocena i zwalczanie zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego. *Prace Naukowe GIG 878*. Katowice: Główny Instytut Górnictwa.
- Krause, E. i Dziurzyński, W. 2015. *Projektowanie eksploatacji pokładów węgla kamiennego w warunkach skojarzonego zagrożenia metanowo-pożarowego*. Katowice: Główny Instytut Górnictwa.
- Krzystolik, P.A. 2000. Czujniki na potrzeby górnictwa. *Elektronizacja. Podzespoły i Zastosowania Elektroniki 6*, s. 5–8.
- Raporty roczne (2006–2016) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego (2007–2017)*. Katowice: Główny Instytut Górnictwa.