

**WYZNACZENIE STREFY ZAGROŻONEJ WYBUCHEM METANU W ZROBACH  
ZAWAŁOWYCH ŚCIANY EKSPLOATACYJNEJ  
PRZEWIETRZANEJ SYSTEMEM NA "Y"**

*Jarosław BRODNY, Magdalena TUTAK  
Politechnika Śląska*

**Streszczenie.** Jednym z najbardziej niebezpiecznych i najczęściej występujących zagrożeń w kopalniach węgla kamiennego jest zagrożenie metanowe. Przy eksploatacji systemem ścianowym z zawałem skał, metan wydziela się do wyrobisk górniczych z urabianego oraz pozostawionego w zawałe węgla. Duża ilość metanu dopływa także z pokładów sąsiednich przez powstałe w górotworze szczeliny i spękania. W przypadku nagromadzenia się metanu o stężeniu wybuchowym w zrobach zawałowych i przy odpowiednim stężeniu tlenu oraz wystąpieniu inicjału (np. iskra lub pożar endogeniczny), może dojść do wybuchu tego gazu. W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej przepływu mieszaniny strumienia powietrza i metanu przez rzeczywisty układ wyrobisk jednej z kopalń, charakteryzującej się dużym zagrożeniem metanowym. Celem badań była analiza systemu wentylacyjnego rozpatrywanego układu wyrobisk oraz wyznaczenie w zrobach ściany zawałowej stref, w których mogą wystąpić niebezpieczne, wybuchowe stężenia metanu przy dostatecznym stężeniu tlenu wynoszącym min. 12%. Wyznaczenie położenia takich stref jest konieczne dla doboru odpowiednich parametrów systemu wentylacyjnego w celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy załogi. Analiza skali zagrożenia metanowego pozwala na dobranie takiego systemu przewietrzania ściany eksploatacyjnej i sąsiednich wyrobisk, który zapewni wymagany przepisami skład chemiczny atmosfery kopalnianej, a także wymaganą efektywność procesu odmetanowania. Uzyskane rezultaty jednoznacznie dowodzą, iż metody numeryczne, w połączeniu z wynikami badań w warunkach rzeczywistych mogą z powodzeniem być stosowane do wariantowych analiz procesów związanych z przewietrzaniem podziemnych wyrobisk górniczych, a także w analizach stanów awaryjnych.

**Słowa kluczowe:** zagrożenie metanowe, zroby zawałowe, CFD, Ansys Fluent

## **WPROWADZENIE**

Podziemna eksploatacja węgla kamiennego ze względu na szereg występujących zagrożeń naturalnych jest bardzo niebezpieczna [2]. Jednym z najczęściej występujących i najbardziej niebezpiecznych zagrożeń naturalnych jest zagrożenie metanowe, które związane jest z możliwością zapalenia i/lub wybuchu metanu w mieszaninie z powietrzem.

W latach 2005-2015 w polskich kopalniach węgla kamiennego miało miejsca 31 zdarzeń związanych z zagrożeniem metanowym (zapalenia i wybuchy metanu), w których zginęło 59 osób a 114 zostało poszkodowanych [4].

Najczęstszym miejscem wystąpienia tych zdarzeń są rejony ścian eksploatacyjnych. Wynika to z faktu, iż w Polsce eksploatacja węgla kamiennego najczęściej prowadzona jest systemem ścianowym z zawałem skał stropowych, a pokłady węglowe charakteryzują się wysoką metanowością. Największa ilość metanu wydziela się podczas urabiania węgla z odsłoniętej calizny węglowej. Nieco mniejsza jego ilość przedostaje się do wyrobisk górniczych ze zrobów zawałowych. Źródłem tego metanu jest pozostawiony w zrobach

węgiel oraz metan wypływający z pokładów nadebranych i podebranych poprzez występujące w górotworze szczeliny i spękania.

Metan jest gazem wybuchowym. Najczęściej granice wybuchowości mieszaniny metanu, powietrza i gazów inertnych są opisywane przez tzw. trójkąt wybuchowości Cowarda [6]. W granicach występowania stężenia wybuchowego metanu, inicjałem wybuchu może być pożar endogeniczny, roboty strzałowe lub iskry powstające w wyniku tarcia przemieszczających się brył skał.

Bardzo istotne znaczenie dla oceny stopnia zagrożenia metanowego w rejonie prowadzonej eksploatacji ma znajomość lokalizacji w zrobach zawałowych stref o wybuchowym stężeniu metanu. Wiedza ta stanowi bowiem podstawę do prowadzenia działań profilaktycznych w celu obniżenia jego stężenia.

Wyznaczenie takich stref w oparciu o badania w warunkach rzeczywistych jest praktycznie niemożliwe. Z tego też względu zachodzi konieczność zastosowania innych metod badawczych, które umożliwią wyznaczenie parametrów gazów wypełniających zrobów zawałowych w dowolnym punkcie tych zrobów. Takie możliwości stwarzają badania modelowe oparte o symulacje numeryczne.

Symulacje te, to szeroko stosowane narzędzie badawcze, które coraz powszechniej wykorzystywane jest w wielu obszarach nauki [3, 5, 10], w tym w analizach wariantowych procesów związanych z rozplywem gazów w wyrobiskach górniczych oraz w analizach stanów awaryjnych, a za taki należy uznać wystąpienie w dołowym środowisku pracy wybuchowego stężenia metanu.

W ostatnich latach coraz szerzej do analizy zagadnień wentylacyjnych związanych z kontrolą składu atmosfery kopalnianej w wyrobiskach górniczych oraz w zrobach, traktowanych jako ośrodek porowaty, wykorzystuje się właśnie metody numeryczne [3, 7, 8, 9].

W artykule przedstawiono wyniki analizy mającej na celu wyznaczenie strefy zagrożonej wybuchem metanu w zrobach zawałowych ściany eksploatacyjnej przewietrzanej systemem (zwanym w literaturze także sposobem, układem lub typem) na „Y” z odprowadzaniem powietrza wzdłuż zrobów zawałowych (doświeżanie po caliznie węglowej) przeprowadzonej

z wykorzystaniem numerycznej mechaniki płynów (CFD). Do obliczeń wykorzystano program ANSYS Fluent oparty o metodę objętości skończonych, który umożliwia bardzo dokładne określenie parametrów fizycznych i chemicznych mieszaniny strumienia powietrza i metanu w dowolnym punkcie badanego wyrobiska górniczego oraz zrobów zawałowych. Tak precyzyjne wyznaczenie tych parametrów w oparciu o badania w warunkach rzeczywistych jest praktycznie niemożliwe.

### MODEL MATEMATYCZNY PRZEPIYWU

Numeryczna mechanika płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics*) jest metodą symulacji zjawisk związanych z przepływem płynów i gazów, wymianą ciepła oraz masy, a także reakcjami chemicznymi [11].

Przepływ burzliwy płynu lepkiego (w tym przypadku gazu), nieściśliwego opisany jest układem równań Naviera-Stokesa, które wraz z równaniem ciągłości stanowią kompletny układ zależności, pozwalający wyznaczyć ciśnienie oraz pole prędkości przepływu [11].

Zagadnienia związane z transportem płynu rozwiązywane są w oparciu o następujące równania mechaniki płynów [1]:

– **równanie zachowania ciągłości:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

gdzie:

$u, v, w$  – składowe wektora prędkości, m/s,

$\rho$  – gęstość, kg/m<sup>3</sup>,

$t$  – czas, s.

– **równanie zachowania pędu**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (v v) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g + F \quad (2)$$

gdzie:

$p$  – ciśnienie statyczne, Pa,

$\tau$  – tensor naprężeń, Pa,

$g$  – przyspieszenie grawitacyjne, m/s<sup>2</sup>,

$F$  – siły wewnętrzne, N.

Podstawą opisu matematycznego procesu transportu wydzielającego się do podziemnego środowiska pracy metanu jest zasada zachowania masy odniesiona do tego gazu. Model matematyczny transportu, będący układem równań adwekcji – dyfuzji, który dla  $i$ -tej substancji  $i = 1, \dots, n$ , przyjmuje następującą postać:

– **równanie transportu substancji chemicznych**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho v Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i + S_i \quad (4)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość, kg/m<sup>3</sup>,

$v$  – prędkość, m/s,

$Y_i$  – udział molowy  $i$ -tego składnika,

$J_i$  – strumień dyfuzji, kg/(m<sup>2</sup>s),

$R_i$  – produkcja netto  $i$ -tego składnika w wyniku reakcji chemicznej,

$S_i$  – człon źródłowy (np. emisji).

– **równanie dyfuzji dla przepływu turbulentnego – prawo Fick'a**

$$J_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_i}{Sc_t}\right) \nabla Y_i \quad (5)$$

gdzie:

$D_{i,m}$  – masowy współczynnik dyfuzji  $i$ -tego składnika mieszaniny, m<sup>2</sup>/s,

$\mu$  – współczynnik lepkości dynamicznej, Pa·s,

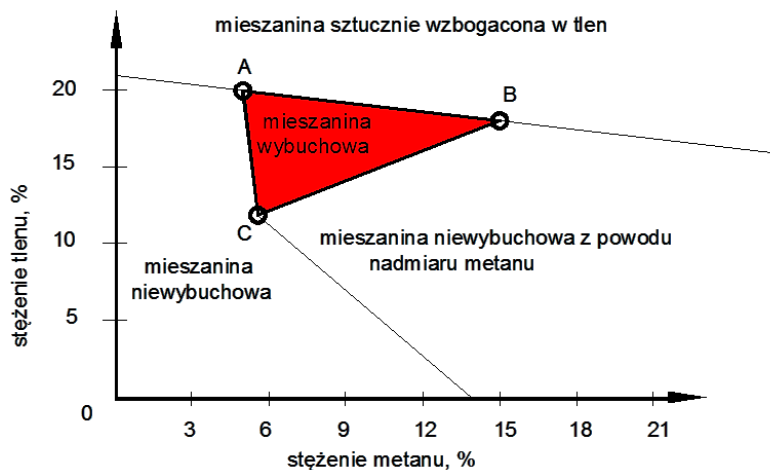
$Sc_t$  – turbulentna liczba Schmidta, 0,7.

Przedstawiony model matematyczny przepływu łączy opis przepływu strumienia powietrza oraz transportu gazów.

## MODEL PRZEPLYWU

Analizie poddano przepływ mieszaniny powietrza i metanu przez zroby zawałowe ściany eksploatacyjnej B-11 w pokładzie 358/1 wraz z przyległymi wyrobiskami zaliczone do IV kategorii zagrożenia metanowego.

Celem analizy było wyznaczenie w zrobach zawałowych stref z wybuchową koncentracją metanu (5%-15%) przy minimum 12% stężeniu tlenu w powietrzu przepływającym przez te zroby. Dokładne granice wybuchowości przedstawia trójkąt wybuchowości Cowarda (rys. 1) [4].



Rys. 1 Trójkąt wybuchowości Cowarda

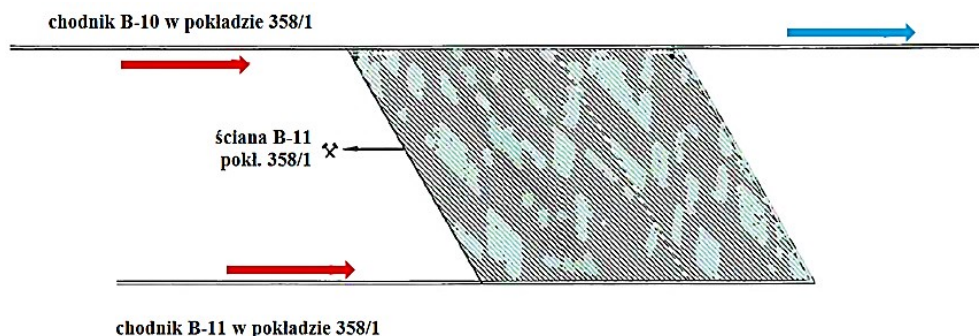
## Charakterystyka warunków geologiczno – górniczych ściany B – 11 w pokładzie 358/1

Ściana B-11 w pokładzie 358/1 eksploatowana jest systemem podłużnym z zawałem stropu w kierunku od granic pola eksploatacji, a jej parametry górnicze wynoszą:

- długość ściany: 250,0 m
- wybieg ściany: 1220,0 m
- miąższość: 2,8 m
- nachylenie poprzeczne: ok. 2°
- nachylenie podłużne: ok. 4°

Ściana ta przewietrzana jest systemem na „Y” z odprowadzaniem powietrza wzdłuż zrobów zawałowych (doświeżanie po caliznie węglowej).

Na rysunku 2 przedstawiono schemat przewietrzania ściany wraz z zaznaczonymi kierunkami rozplywu powietrza.



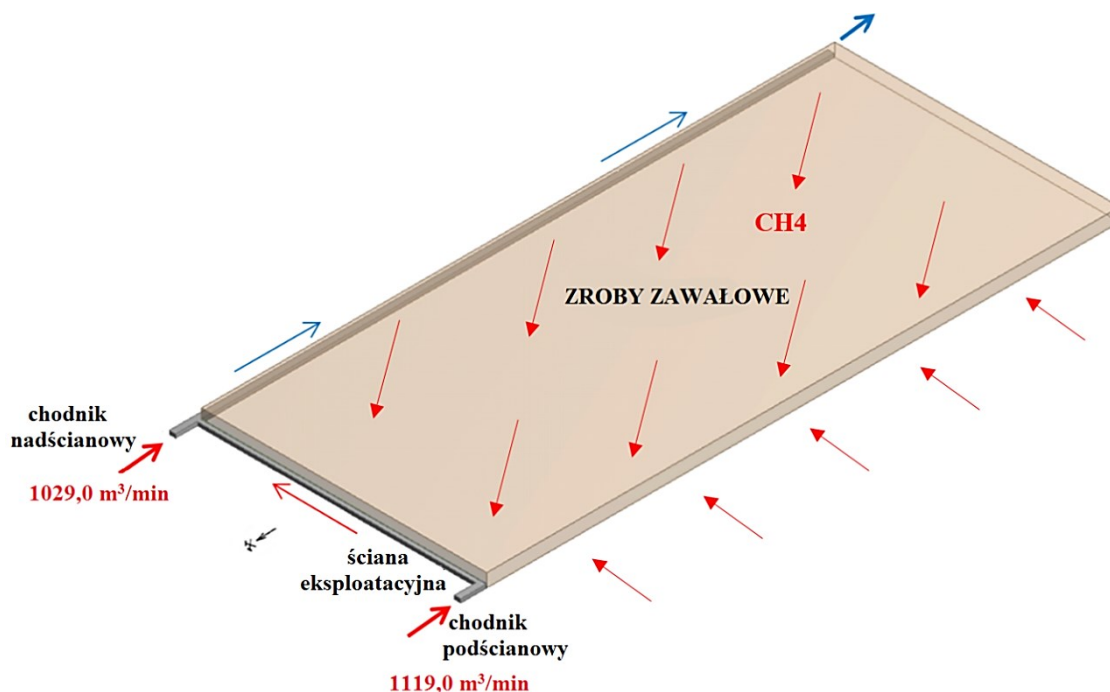
Rys. 2 Schemat przewietrzania ściany B-11 w pokładzie 358/1

Do ściany chodnikiem podścianowym B-11 doprowadzano średnio około 1119,0 m<sup>3</sup>/min powietrza, a chodnikiem B-10 doprowadzano w rejon skrzyżowania ściany z tym chodnikiem (wylot ze ściany) około 1029,0 m<sup>3</sup>/min powietrza. Wydzielanie metanu ze zrobów zawałowych wynosiło średnio 9,6 m<sup>3</sup>/min, a średnia wartość jego stężenia na wylocie z chodnika nadścianowego wynosiła 0,64%.

Badania modelowe przepływu powietrza przez zrobry zawałowe tej ściany przeprowadzono dla jej wybiegu wynoszącego 435,0 m.

### Wyniki analizy

W celu przeprowadzenia analizy opracowano model geometryczny zrobów zawałowych oraz ściany eksploatacyjnej i wyrobisk przyścianowych (rys. 3). Pionowy zasięg przepływu powietrza w zrobach zawałowych wynosił 3,5-krotność wysokości eksploatowanego pokładu (9,8 m).



Rys. 3 Model geometryczny zrobów zawałowych i sąsiednich wyrobisk

Warunki brzegowe, niezbędne do wykonania obliczeń numerycznych, przyjęto w oparciu o rzeczywiste pomiary parametrów fizycznych i chemicznych strumienia powietrza doprowadzanego do ściany oraz metanowość bezwzględną ściany.

Dla przedstawionego układu wyrobisk powietrze świeże dopływa chodnikiem podścianowym do skrzyżowania ze ścianą eksploatacyjną, następnie zmienia kierunek przepływu o 90 stopni i przepływa przez ścianę, po czym ponownie zmienia kąt przepływu o 90 stopni i wypływa do chodnika nadścianowego.

Jako warunek brzegowy typu „inlet” (*velocity-inlet*) przyjęto stałe pole prędkości strumienia powietrza. W przekroju wlotowym dla analizowanego wyrobiska zadano równomierne pola prędkości w chodniku podścianowym.

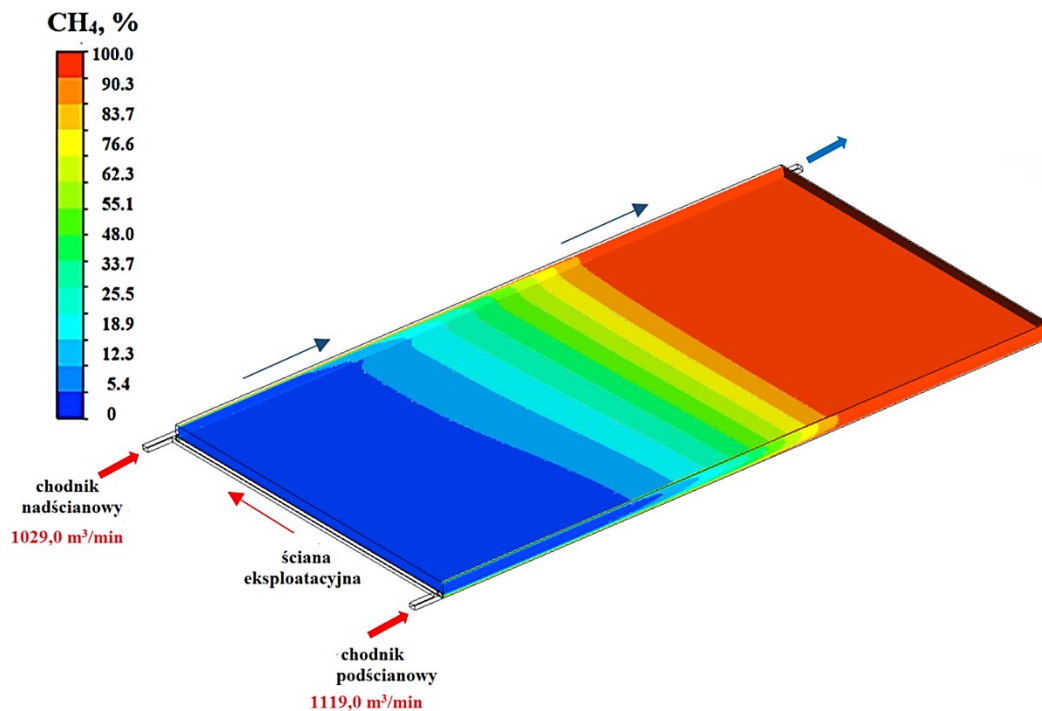
Dla analizowanego modelu warunek brzegowy typu „wylot” został zdefiniowany jako „outlet” (*pressure-outlet*), natomiast ściany zdefiniowano jako nieprzepuszczalne, których

chropowatość powierzchni odpowiadała wysokości 0,2 m, a ich temperatura (traktowana jako temperatura otaczającego górotworu) wynosiła 305°K. Obliczenia wykonano dla ciśnienia, którego wartość odniesienia wynosiła 111945 Pa.

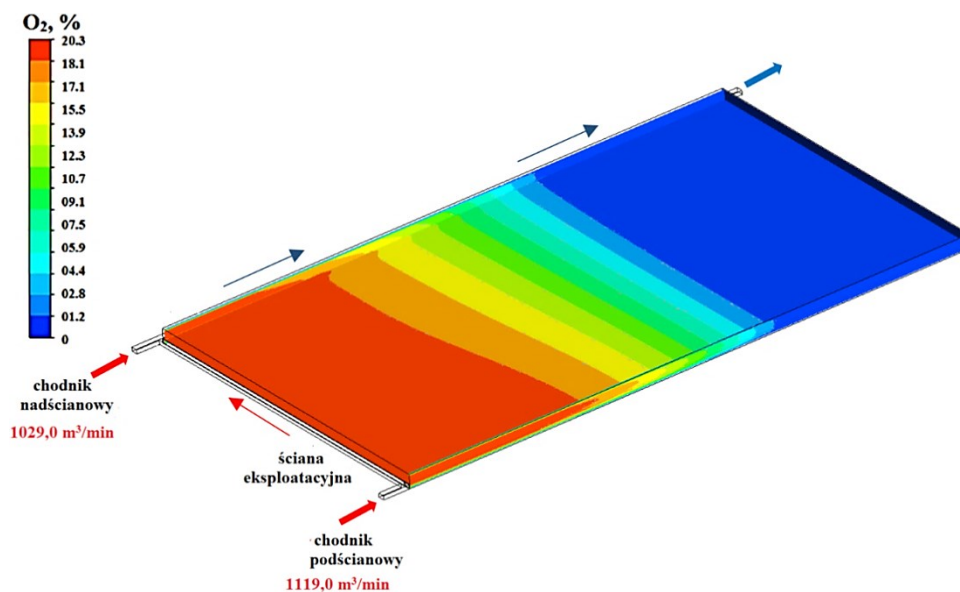
Przyjęto, że zroby zawałowe tworzą anizotropowy ośrodek porowaty o różnej przepuszczalności, zbudowany z łupka ilastego oraz piaskowca. Udział tlenu w strumieniu powietrza doprowadzanym do ściany wynosi 21%.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono charakterystyki i rozkłady zmian stężenia metanu i tlenu w zrobach zawałowych ściany B-11 w pokładzie 358/1.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład stężenia metanu w zrobach zawałowych ściany eksploatacyjnej, a na rysunku 5 – rozkład stężenia tlenu.

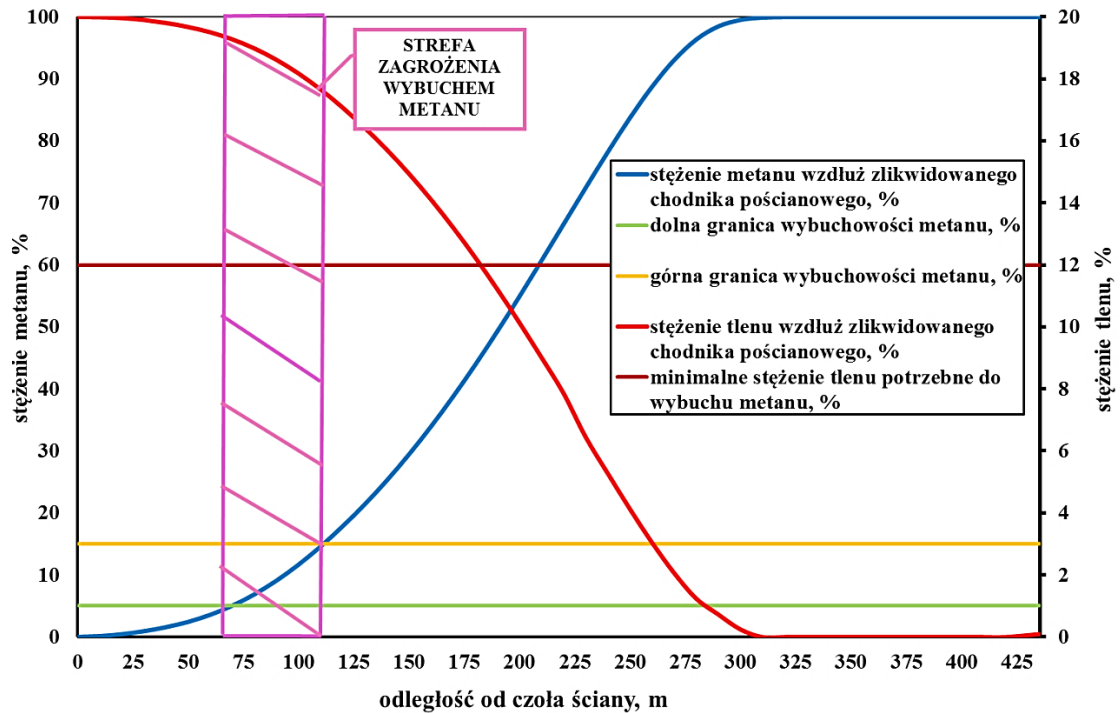


Rys. 4 Rozkład stężenia metanu w zrobach zawałowych ściany B-11 w pokładzie 358/1

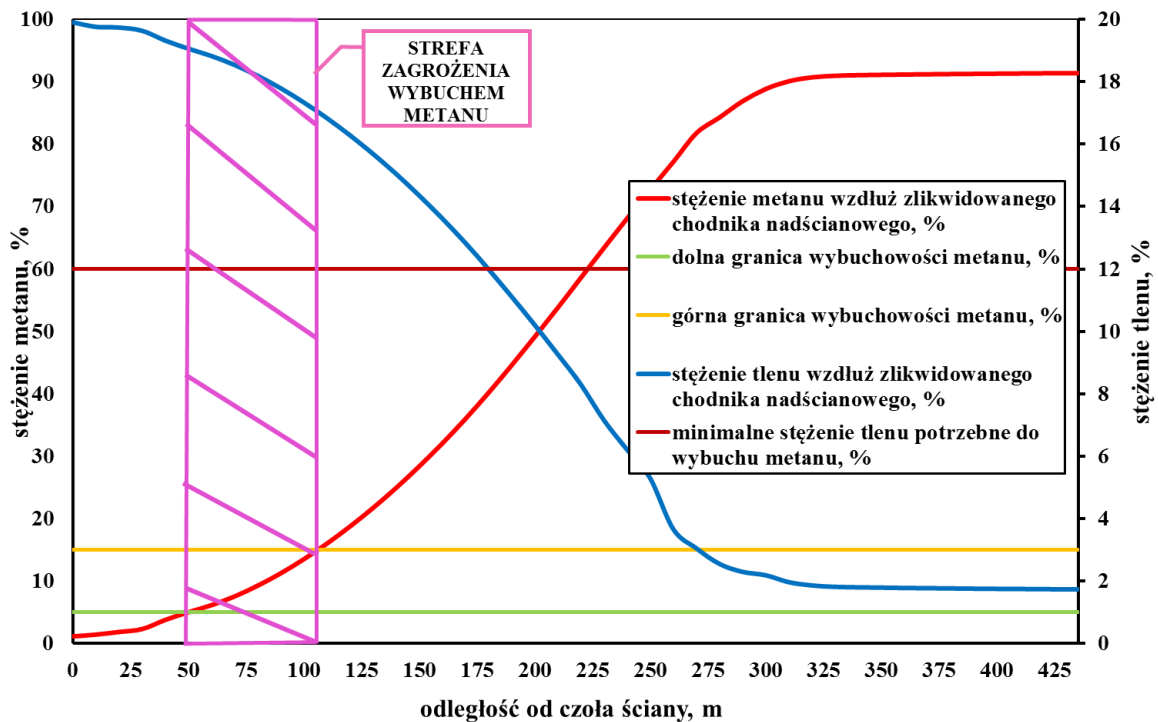


Rys. 5 Rozkład stężenia tlenu w zrobach zawałowych ściany B-11 w pokładzie 358/1

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono rozkłady stężenia metanu oraz tlenu w zrobach zawałowych ściany eksploatacyjnej wzdłuż zlikwidowanego chodnika podścianowego i utrzymywanego chodnika nadścianowego.



Rys. 6 Rozkład stężenia tlenu i metanu w zrobach zawałowych ściany B-11 w pokładzie 358/1 wzdłuż zlikwidowanego chodnika podścianowego



Rys. 7 Rozkład stężenia tlenu i metanu w zrobach zawałowych ściany B-11 w pokładzie 358/1 wzdłuż utrzymywanego chodnika nadścianowego

Przeprowadzona analiza wykazała, że wybuchowe stężenie metanu w mieszaninie z powietrzem (o minimum 12% stężeniu w nim tlenu) w zrobach zawałowych ściany eksploatacyjnej występuje w odległości od 69,0 m do 112,0 m od czoła ściany wzdłuż zlikwidowanego chodnika podścianowego, oraz w odległości od 50,0 m do 115,0 m od czoła ściany wzdłuż utrzymywanego chodnika nadścianowego.

Większe zagrożenie wybuchem, z punktu widzenia jego skutków dla pracującej w ścianie eksploatacyjnej załogi, występuje w zrobach wzdłuż utrzymywanego chodnika nadścianowego (obszar bliżej strefy roboczej). W tym układzie istnieje bowiem możliwość szybkiego przemieszczenia się wybuchu do przestrzeni roboczej ściany.

### PODSUMOWANIE

Aktywizacja zagrożenia metanowego, tj. wybuch lub zapalenie się metanu, w podziemnym środowisku pracy stanowi duże zagrożenie dla bezpieczeństwa pracy całej załogi oraz może być przyczyną dużych strat materialnych dla kopalni. Bardzo ważne jest więc wyznaczenie potencjalnych stref, w których może dojść do takich zdarzeń. Wyniki takich analiz stanowić mogą podstawę dla działań profilaktycznych, których celem jest zmniejszenie stężenia metanu w zagrożonej strefie bądź też odcięcie dopływu powietrza do niej.

Bardzo często w celu przeprowadzenia tych działań następują przerwy w procesie eksploatacyjnym. Aby podjęte działania profilaktyczne były jednak skuteczne konieczne jest dokładne określenie położenia stref szczególnego zagrożenia.

Przedstawiona w artykule metodyka badań oraz uzyskane wyniki pozwalają w sposób dokładny określić położenie w zrobach zawałowych stref, w których spełnione są warunki niezbędne do wystąpienia wybuchu metanu. Wiarygodność tych wyników uzależniona jest jednak w znacznej mierze od wyników pomiarów parametrów przepływającego strumienia powietrza, wyznaczonej metanowości pokładu oraz parametrów fizycznych zrobów (np. przepuszczalności).

Uzyskane wyniki jednoznacznie dowodzą, iż zastosowanie metod numerycznych w połączeniu z wynikami badaniami w warunkach rzeczywistych (cząstkowymi) mogą z powodzeniem być stosowane do wariantowych analiz procesów związanych z przewietrzaniem podziemnych wyrobisk górniczych, a także w analizach stanów awaryjnych.

### LITERATURA

- [1] *Ansys Fluent Theory Guide 14.0*, 2011.
- [2] K. Kurus and B. Białecka. „Analysis of safety at work rate in chosen mines of Upper Silesian Coal Basin”, in *Management Systems in Production Engineering*, vol. 4(8), 2012, pp. 19-24.
- [3] J. Brodny and M. Tutak. „Numerical analysis of airflow and methane emitted from the mine face in a blind dog heading”, in *Management Systems in Production Engineering*, vol. 2(18), 2015, pp. 110-118.
- [4] J. Kabiesz *et al.* *Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego*, Katowice: Główny Instytut Górnictwa, 2014.
- [5] A. Klimanek. „Numerical modelling of natural draft wet-cooling towers”, in *Archives Computers Methods Engineering*, vol. 20(1), 2013, pp. 61-109.



- [6] B. Kozłowski. *Zagrożenie wyrzutami gazów i skał w górnictwie węglowym*, Warszawa-Kraków: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1980.
- [7] J.C. Kurnia, A.P. Sasmito and A.S. Mujumdar. *Computational study of thermal management in underground coal mines: effect of operating ventilation parameters*, Singapore: National University of Singapore, 2012.
- [8] J.C. Kurnia, A.P. Sasmito and A.S. Mujumdar. „CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces”, in *Applied Mathematical Modelling*, vol. 38(14), 2014, pp. 3467-3484.
- [9] J.C. Kurnia, A.P. Sasmito and A.S. Mujumdar. „Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines”, in *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 42, 2014, pp. 206-215.
- [10] M. Tutak. „Numerical analysis of influence of exogenous fire in dog heading on parameters of the air stream flowing through this heading”, in *Management Systems in Production Engineering*, vol. 2(14), 2014, pp. 76-80.
- [11] K.K. Veersteg and W. Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Pearson Education, 2007.

dr hab. inż. Jarosław Brodny, prof. Pol. Śl.  
Politechnika Śląska, Wydział Organizacji i Zarządzania  
Instytut Inżynierii Produkcji  
ul. Roosevelta 26-28, 41-800 Zabrze, Polska  
e-mail: jaroslaw.brodny@polsl.pl

mgr inż. Magdalena Tutak  
Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii,  
Instytut Eksploatacji Złóż  
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska  
e-mail: magdalena.tutak@polsl.pl

*Data przesłania artykułu do Redakcji: 05.2016*

*Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 08.2016*