

Jarosław BRODNY  
Politechnika Śląska  
Wydział Organizacji i Zarządzania  
Instytut Inżynierii Produkcji  
jaroslaw.brodny@polsl.pl

Magdalena TUTAK  
Politechnika Śląska  
Wydział Górnictwa i Geologii  
magdalena.tutak@polsl.pl

## **SYMULACJA NUMERYCZNA JAKO NARZĘDZIE WSPOMAGAJĄCE OCENĘ ZAGROŻENIA METANOWEGO W KOPALNI WĘGLA KAMIENNEGO**

**Streszczenie.** Jednym z narzędzi, które mogą być wykorzystane w procesie oceny stanu zagrożenia metanowego, są symulacje numeryczne z wykorzystaniem metody objętości skończonych. Wykorzystując tę metodę, w artykule dokonano analizy rozkładu stężenia metanu w obszarze objętym eksploatacją górnictw. Obszar ten objął wyrobisko ścianowe wraz z wyrobiskami przyległymi oraz zrobry zawałowe potraktowane jako ośrodek porowaty. Na podstawie uzyskanych wyników określono potencjalne stężenia metanu na wylocie ze ściany eksploatacyjnej oraz w zrobach zawałowych. Wyniki te powinny stanowić istotne źródło informacji dla oceny stanu zagrożenia metanowego.

**Słowa kluczowe:** zagrożenie metanowe, bezpieczeństwo pracy, symulacje numeryczne

## **NUMERICAL SIMULATION AS AN INSTRUMENT OF SUPPORTING ASSESSMENTS METHANE HAZARD IN COAL MINE**

**Abstract.** One of the tools, which can be used in the process of assessment of methane hazard state, are numerical simulations based on the Finite Volume Method. Using this method, in the paper an analysis of the decrease in the methane concentration in the area of conducted mining exploitation were performed. This area included longwall heading together with adjacent headings and rockfall goaves. Based on the obtained results potential methane concentration at the outlet from the mining heading and rockfall goaves was determined. These results should

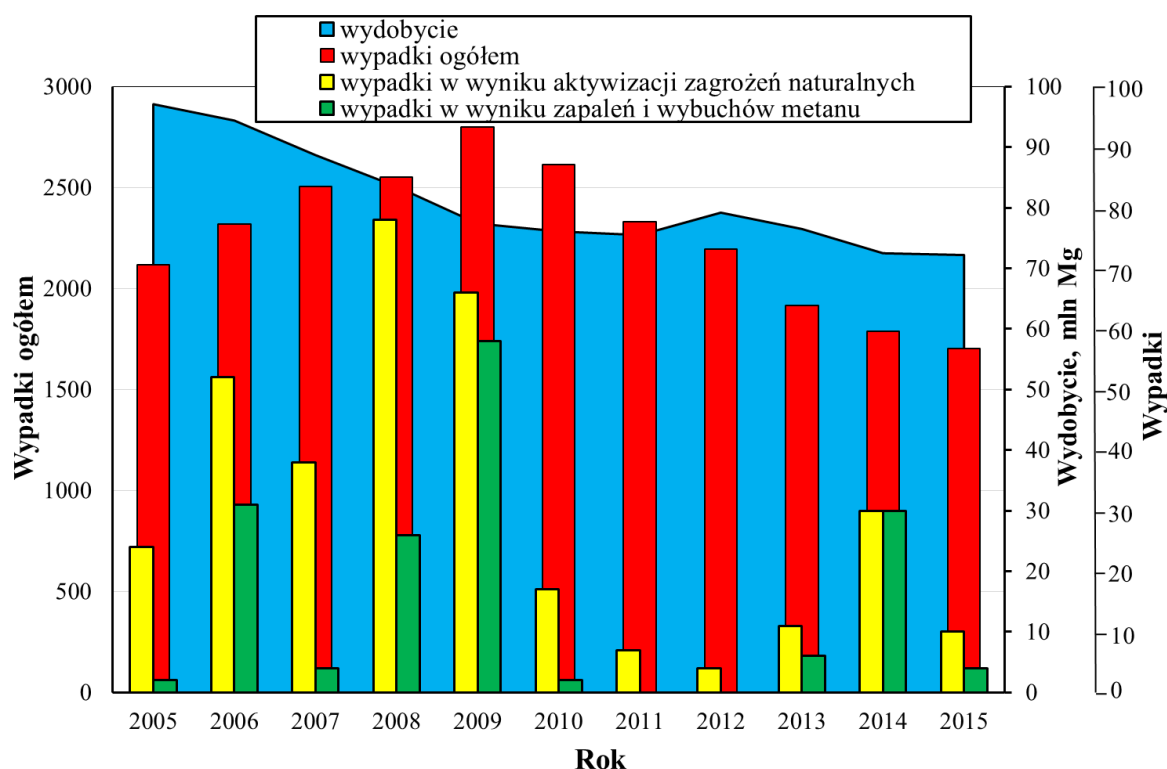
be an important source of information for the assessment of the methane hazard state.

**Keywords:** methane hazard, work safety, numerical simulations

## 1. Wprowadzenie

W podziemnym górnictwie węgla kamiennego występuje szereg zjawisk zagrażających bezpieczeństwu pracy i procesowi eksploatacji. Najczęściej zjawiska te wynikają z zagrożeń naturalnych i stanowią istotne źródło ryzyka, powodując zarówno straty ludzkie, jak i materialne. Za najbardziej niebezpieczne zagrożenia uważa się te, które powodują największą liczbę ofiar śmiertelnych [6]. Czołowe miejsce w tej grupie zajmują zagrożenia metanowe.

W latach 2005-2015 w polskim górnictwie węgla kamiennego zarejestrowano łącznie 337 wypadków spowodowanych zagrożeniami naturalnymi, z czego 214 stanowiły wypadki powstałe w wyniku aktywizacji zagrożeń wentylacyjnych (metan, pożary endogeniczne, wybuch pyłu węglowego oraz wyrzuty gazów) (rys. 1.) [11].



Rys. 1. Wypadki przy pracy w krajowych kopalniach węgla kamiennego w latach 2005–2015 na tle całkowitego rocznego wydobycia

Źródło: Opracowanie własne.

Za jedno z najbardziej niebezpiecznych zagrożeń wentylacyjnych występujących w kopalniach węgla kamiennego uznać należy zagrożenie metanowe, które w latach 2005-2015 było przyczyną 31 zdarzeń, w których łącznie zginęło 56 osób, a 107 zostało poszkodowanych [11].

Najczęstszym miejscem występowania niebezpiecznych zdarzeń związanych z zagrożeniem metanowym (zapalenia i wybuchy metanu) są rejony ścian eksploatacyjnych [11]. 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. W czasie eksploatacji metan wydzielają się z odsłoniętej calizny węglowej oraz urobionego węgla, a także przedostają się ze zrobów zawałowych wyrobisk górniczych. W ostatnim przypadku jego źródłem jest pozostawiony w zrobach zawałowych węgiel oraz metan wypływający z pokładów nadebranych i podebranych przez występujące w górotworze szczeliny i spękania.

Metan należy do grupy gazów wybuchowych, którego zakres wybuchowości jest uzależniony od jego stężenia oraz stężenia tlenu w powietrzu. Stężenia te tworzą tzw. trójkąt wybuchowości Cowarda, który przedstawiono na rys. 2 [2].



Rys. 2. Trójkąt wybuchowości Cowarda dla metanu

Źródło: Opracowanie własne.

Aby doszło do zapalenia, a następnie wybuchu metanu, konieczne jest wystąpienie inicjału, którym może być pożar endogeniczny, roboty strzałowe oraz iskry powstające w wyniku tarcia przemieszczających się brył skał lub powstałe w procesie urabiania [10].

Ze względu na bardzo negatywne skutki zapaleń i wybuchów metanu istotne znaczenie mają działania prognostyczne, których celem jest ocena potencjalnych parametrów powietrza, jakie mogą wystąpić w wyrobiskach górniczych w stosunku do parametrów krytycznych.

Skuteczność tych działań uzależniona jest od zastosowanej metody prognozowania ilości metanu, który może wydzielić się do przestrzeni roboczej wyrobisk górniczych oraz jego stężenia. Najczęściej do oceny tego stanu stosuje się metody:

- empiryczne,
- analityczne,
- numeryczne (symulacyjne),
- prognozowania krótkoterminowego (pseudorzeczywiste),
- hybrydowe, jako komputerowe systemy wspomaganie kontroli zagrożenia metanowego (pracujące w czasie rzeczywistym i współpracujące z monitoringiem systemu dyspozytorskiego kopalni).

Metody te umożliwiają określenie przewidywanej ilości metanu, która może się wydzielić do danych wyrobisk. Informacja ta pozwala na odpowiedni dobór środków profilaktycznych, których zadaniem jest obniżenie stężenia tego gazu w wyrobisku górniczym, a co za tym idzie – zmniejszenie poziomu zagrożenia metanowego.

W praktyce jednak tylko metoda numeryczna (symulacji komputerowej) umożliwia dokładne wyznaczenie rozkładów stężenia metanu w każdym punkcie badanego wyrobiska górniczego (ściana eksploatacyjna, wyrobiska przyścianowe). Na tej podstawie można wyznaczyć potencjalnie niebezpieczne strefy, w których dopuszczalne stężenie metanu może zostać przekroczone. W przypadku prowadzenia eksploatacji systemem ścianowym z zawałem, metoda ta umożliwia także wyznaczenie w zrobach zawałowych potencjalnej strefy o wybuchowej koncentracji tego gazu. Wyznaczenie takiej strefy przy zastosowaniu innych metod, a w szczególności badania w warunkach rzeczywistych, jest praktycznie niemożliwe.

Zasadnym zatem wydaje się prowadzenie badań mających na celu szersze wykorzystanie metod numerycznych do oceny stanu zagrożenia metanowego w wyrobiskach górniczych. Metody te są obecnie coraz częściej wykorzystywane jako narzędzia badawcze, w wielu obszarach nauki, 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 podziemnym środowisku pracy wybuchowego stężenia metanu.

Metody te wykorzystuje się z powodzeniem do analizy zagadnień wentylacyjnych związanych z kontrolą składu atmosfery kopalnianej w wyrobiskach górniczych oraz w zrobach zawałowych, traktowanych jako ośrodek porowaty [7, 9].

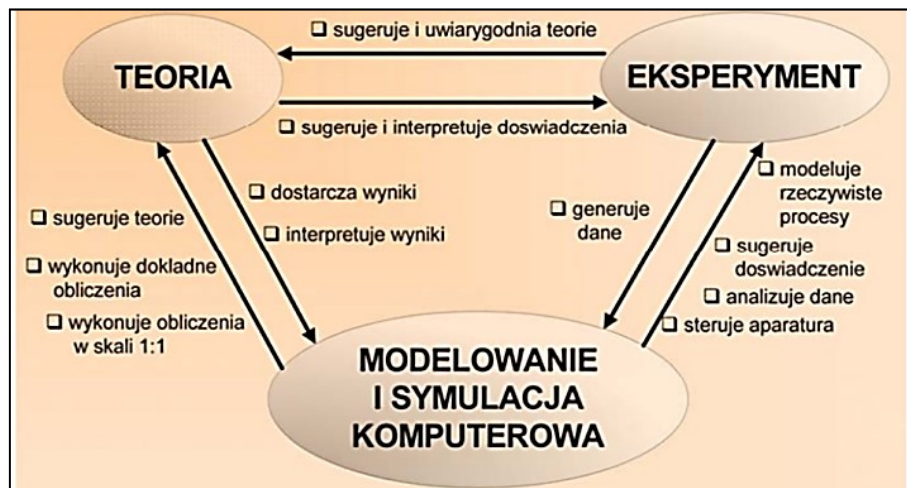
W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, których celem było wyznaczenie rozkładu stężeń metanu na wylocie ze ściany eksploatacyjnej przewietrzanej systemem na „U” od granic oraz w jej zrobach zawałowych. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem numerycznej mechaniki płynów, a do obliczeń wykorzystano program ANSYS Fluent, bazujący na metodzie objętości skończonych. Obliczenia umożliwiły dokładne określenie parametrów fizycznych i chemicznych mieszaniny powietrza i metanu w każdym punkcie badanego układu wyrobisk górniczych oraz zrobów zawałowych.

Analizę przeprowadzono dla rzeczywistego układu wyrobisk górniczych, wykorzystując znane ich wymiary geometryczne oraz budowę geologiczną górotworu, a także znane parametry dostarczanego do tych wyrobisk świeżego strumienia powietrza. Dodatkowo w analizie numerycznej wykorzystano wyznaczoną metodą analityczną prognozowaną ilość metanu, która może wydzielić się do tych wyrobisk. Dane te są niezbędne do zbudowania modelu badanego układu oraz przyjęcia prawidłowych warunków brzegowych.

Uzyskane wyniki mogą stanowić istotne źródło informacji dla służb odpowiedzialnych za zapewnienie bezpieczeństwa pracy, w zakresie identyfikacji miejsc o niebezpiecznych stężeniach metanu i doboru metod w celu jego zmniejszenia.

## 2. Charakterystyka metody badawczej

W ostatnich latach coraz szerzej do analizy górniczych zagadnień wentylacyjnych, w tym prognozowania i oceny zagrożeń wentylacyjnych, stosuje się badania modelowe z wykorzystaniem metod numerycznych. Modelowanie i symulacje komputerowe obok badań teoretycznych i eksperymentalnych są jednym z trzech podstawowych filarów współczesnej nauki [1]. Przedstawiony na rys. 3 schemat potwierdza, iż wykorzystanie badań modelowych i symulacyjnych ma sens tylko w przypadku posiadania wiarygodnych danych wejściowych oraz zastosowania odpowiedniej teorii do budowania modeli.



Rys. 3. Współczesne filary nauki

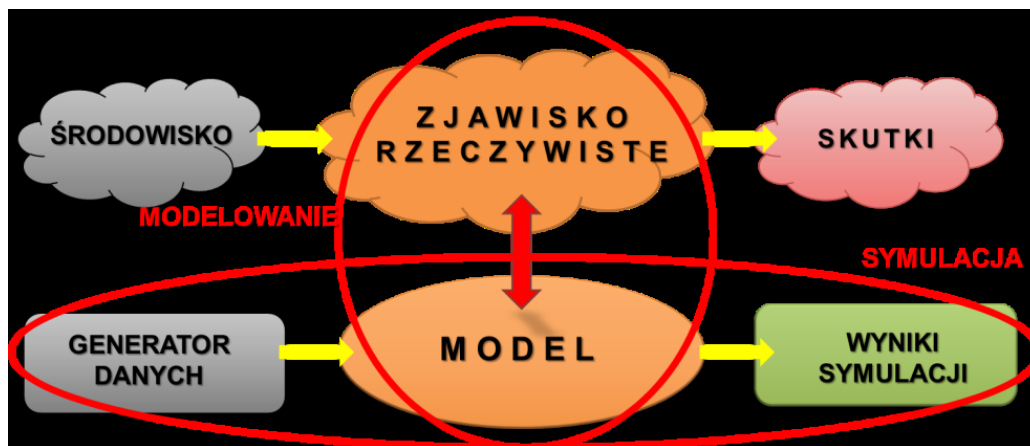
Źródło: Burczyński T.: Metoda elementów brzegowych w mechanice. WNT, Warszawa 1995.

Najpopularniejszą z metod wykorzystywanych w numerycznej mechanice płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics* – CFD) jest metoda objętości skończonych (ang. *Finite Volume Method*), a najbardziej rozwiniętą i najczęściej stosowaną metodą dyskretyzacji w analizach związanych z przepływami płynów (cieczy i gazów) jest metoda objętości

skończonych. Na metodzie tej bazuje wiele komercyjnych programów wykorzystywanych w numerycznej mechanice płynów CFD, w tym program ANSYS Fluent, który wykorzystano w prezentowanej analizie.

Modelowanie i symulacje komputerowe uznać można za bardzo nowoczesną metodę wykorzystywaną do oceny wydzielania metanu do wyrobisk górniczych. Przy ocenie tej uwzględnia się wydzielanie metanu ze ściany eksploatacyjnej, utrzymywanych chodników przyścianowych w rejonie ściany oraz zrobów zawałowych (wyeksploatowanych przestrzeni), a także z pokładów nadebranych i podebranych (pokłady naruszone eksploatacją górniczą).

W badaniach tych obiekt rzeczywisty zastępowany jest przestrzennym modelem, w którym przez przyjęcie odpowiednich warunków brzegowych odwzorowuje się stan rzeczywisty. Proces ten, zwany modelowaniem, wykorzystuje zależności i wnioski prowadzone przy użyciu aparatu logicznego i formalizmu matematycznego, a jego wynikiem są przewidywania co do pewnych cech i zachowań rozpatrywanego układu (rys. 4) [1, 5].



Rys. 4. Proces modelowania w badaniach numerycznych  
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [1, 5, 8].

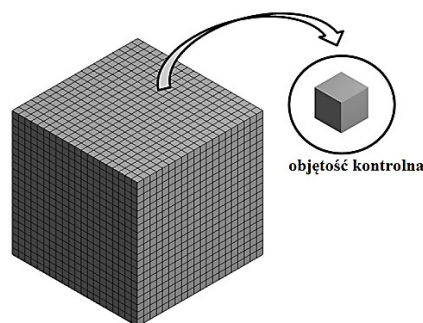
Tak przeprowadzone modelowanie obejmuje zatem cały cykl badawczy – od utworzenia modelu poprzez jego weryfikację, interpretację wyników, aż do uzyskania kolejnego rozwiązania. Proces ten jest zatem zestawem czynności, którymi posługujemy się w naukowym opisie rzeczywistości i polega na badaniu modeli, stanowiących przybliżenie tej rzeczywistości [8].

Dla badanego zjawiska modelowanie i symulacje komputerowe pozwalają z dużym prawdopodobieństwem na ilościową ocenę wydzielającego się metanu do wyrobisk górniczych, wraz z wyznaczeniem jego rozkładu, co w konsekwencji umożliwi dobór metod i środków profilaktycznych, które należy zastosować w celu poprawy stanu bezpieczeństwa w badanym obszarze.

## 2.1. Metoda objętości skończonych

Metoda objętości skończonych jest metodą numeryczną wykorzystywaną do rozwiązywania różniczkowych równań cząstkowych. Podstawowym założeniem tej metody jest przedstawienie równania różniczkowego jako układu równań algebraicznych [4].

Metodyka postępowania badawczego obejmuje dyskretyzację (podział) domeny obliczeniowej (przestrzennego obszaru przepływu) na skończoną liczbę nienakładających się na siebie objętości kontrolnych. Objętość kontrolna budowana może być, w zależności od wykorzystywanego narzędzia badawczego, wewnątrz objętości elementu płynu (gazu) lub wokół węzła elementu objętości (rys. 5).



Rys. 5. Domena obliczeniowa zdyskretyzowana na skończoną liczbę objętości kontrolnych

Źródło: Opracowanie własne.

W każdej z objętości kontrolnych domeny obliczeniowej całkowane są podstawowe równania opisujące przepływ płynu, na podstawie: zasady zachowania masy, opracowanej przez Leonharda Eulera, a także zasady zachowania pędu, sformułowanej przez C. Naviera i uzupełnionej do współczesnej postaci przez G. Stokesa [3].

Przepływ burzliwy płynu lepkiego, w tym przypadku nieściśliwego gazu, opisany jest układem równań Naviera-Stokesa, które wraz z równaniem ciągłości stanowią kompletny układ zależności, pozwalający wyznaczyć ciśnienie oraz pole prędkości przepływu [8].

Zagadnienia związane z transportem płynu rozwiązywane są na podstawie następujących równań mechaniki płynów [3]:

– **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**

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

gdzie:

$p$  – ciśnienie statyczne, Pa,

$\tau$  – tensor naprężeń, Pa,

$g$  – przyspieszenie grawitacyjne,  $m/s^2$ ,

$F$  – 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,  $kg/m^3$ ,

$v$  – prędkość,  $m/s$ ,

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

$J_i$  – strumień dyfuzji,  $kg/(m^2s)$ ,

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

$S_i$  – człon źródłowy (np. emisji);

– **równanie dyfuzji dla przepływu turbulentnego**

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

gdzie:

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

$\mu_t$  – współczynnik lepkości dynamicznej,  $Pa \cdot s$ ,

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

Przedstawiony model matematyczny przepływu łączy opis przepływu strumienia powietrza oraz transportu gazów i stanowi podstawę praktycznego zastosowania metody objętości skończonych do analizy przepływu gazów w badanym obszarze.



### 3. Badania modelowe

Badaniom modelowym poddano zroby zawałowe ściany eksploatacyjnej C-31 w pokładzie 415/1-2 wraz z przyległymi wyrobiskami, zaliczone do III kategorii zagrożenia metanowego.

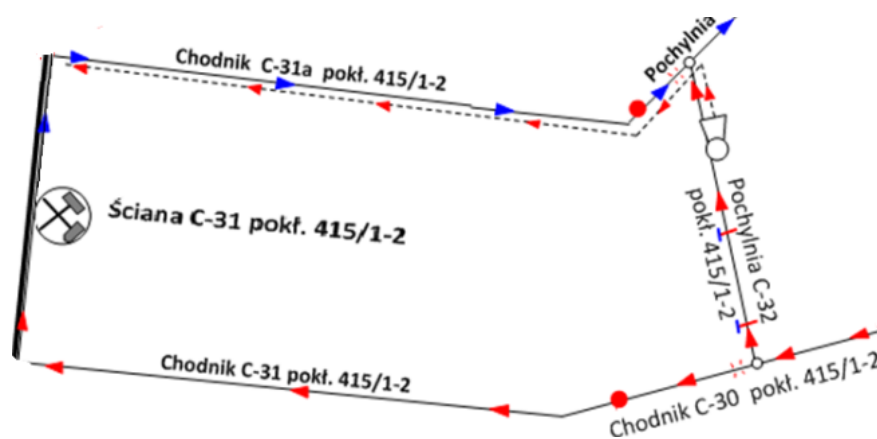
Celem analizy było wyznaczenie w zrobach zawałowych stref z wybuchową koncentracją metanu (5-15%) przy minimum 12% stężeniu tlenu w powietrzu przepływającym przez te zroby.

#### 3.1. Charakterystyka warunków geologiczno-górnich

Ściana C-31 w pokładzie 415/1-2 eksploatowana była systemem podłużnym z zawałem stropu w kierunku od granic pola eksploatacji na głębokości 950,0 m i ma następujące parametry geometryczne:

- długość ściany: 234,0 m,
- wybieg ściany: 573,0 m,
- miąższość: 3,0 m,
- nachylenie poprzeczne: ok. 4°,
- nachylenie podłużne: ok. 8°.

Ściana ta przewietrzana była systemem na „U” od granic, którego schemat wraz z zaznaczonymi kierunkami rozplywu powietrza przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Schemat przewietrzania ściany C-31 w pokładzie 415/1-2

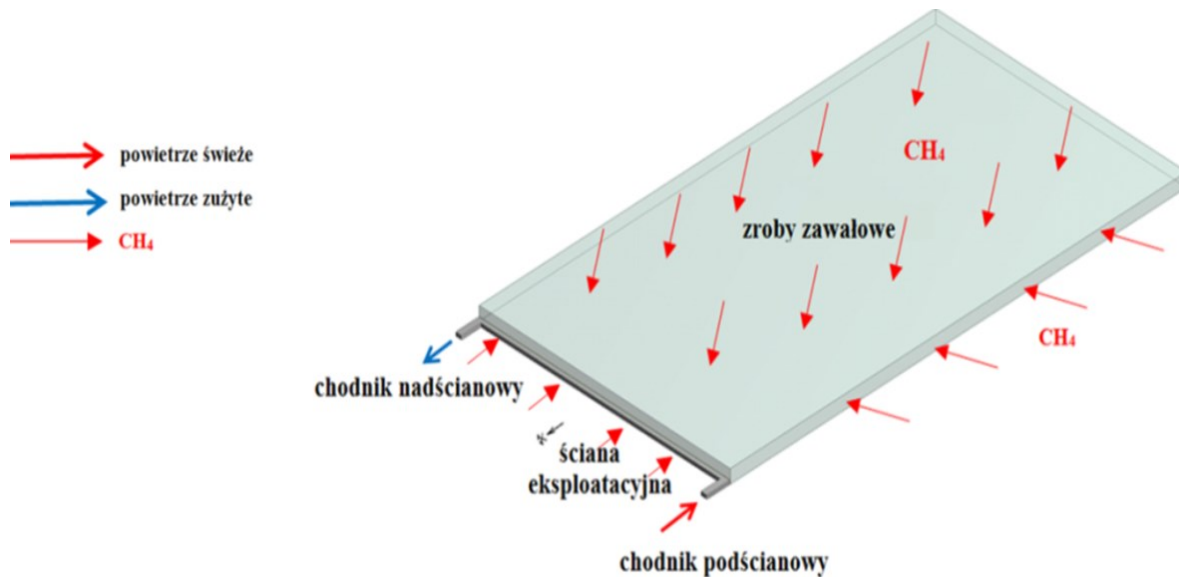
Źródło: Opracowanie własne.

Do ściany chodnikiem podścianowym C-31 doprowadzano średnio około 1153 m<sup>3</sup>/min powietrza. Wydzielanie metanu do ściany eksploatacyjnej wynosiło średnio 5,4 m<sup>3</sup>/min, a średnia wartość jego stężenia na wylocie z chodnika nadścianowego (na podstawie pomiarów) wynosiła 0,31%.

Badania modelowe przepływu powietrza przez zroby zawałowe tej ściany przeprowadzono dla jej wybiegu wynoszącego 372,5 m.

### 3.2. Model przepływu

W celu przeprowadzenia analizy opracowano model geometryczny zrobów zawałowych oraz ściany eksploatacyjnej i wyrobisk przyścianowych (rys. 7). Pionowy zasięg przepływu powietrza w zrobach zawałowych wynosił 3,5-krotność wysokości eksploатовanego pokładu.



Rys. 7. Model geometryczny analizowanego obszaru badań

Źródło: Opracowanie własne.

Warunki brzegowe, niezbędne do wykonania obliczeń numerycznych, przyjęto na podstawie rzeczywistych pomiarów parametrów fizycznych i chemicznych strumienia powietrza doprowadzanego do ściany oraz metanowości bezwzględnej ściany.

Dla przedstawionego obszaru powietrze świeże dopływa chodnikiem podścianowym do skrzyżowania ze ścianą eksploatacyjną, następnie zmienia kierunek przepływu o  $90^\circ$  i przepływa przez ścianę, po czym ponownie zmienia kąt przepływu o  $90^\circ$  i wypływa do chodnika nadścianowego.

Jako warunek brzegowy typu *velocity-inlet* przyjęto stałe pole prędkości strumienia powietrza.

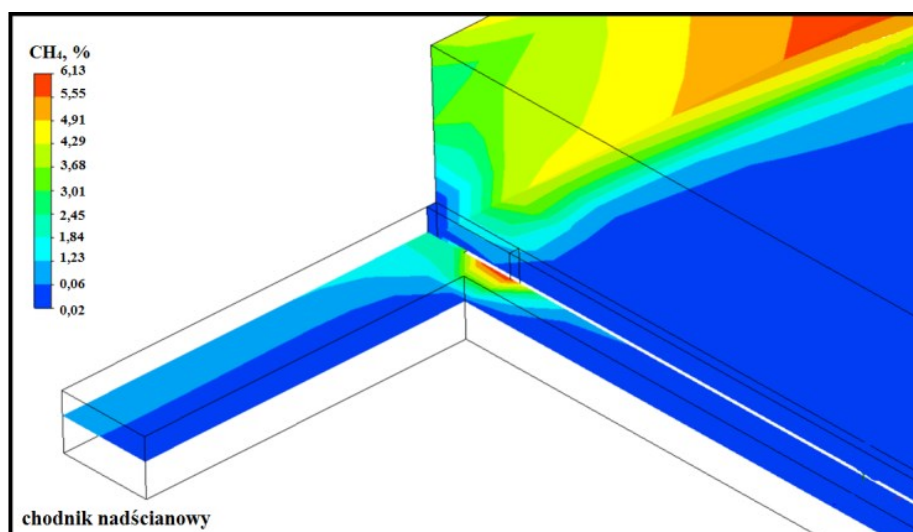
Dla analizowanego modelu warunek brzegowy typu *outlet* został zdefiniowany jako *pressure-outlet*, natomiast ściany zdefiniowano jako nieprzepuszczalne, których chropowatość powierzchni odpowiadała wysokości 0,2 m, a ich temperatura (traktowana jako temperatura otaczającego górotworu) wynosiła 305 K.

Zroby zawałowe tworzą anizotropowy ośrodek porowaty o różnej przepuszczalności, zbudowany z łupka ilastego oraz piaskowca. Udział tlenu w strumieniu powietrza doprowadzanym do ściany wynosił 20,5%

### 3.3. Wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono charakterystyki zmian stężenia metanu na wylocie ze ściany eksploatacyjnej (w górnym narożu chodnika nadścianowego) oraz rozkłady stężenia metanu i tlenu w zrobach zawałowych ściany C-31 w pokładzie 415/1-2 wzdłuż zlikwidowanych chodników podścianowego i nadścianowego.

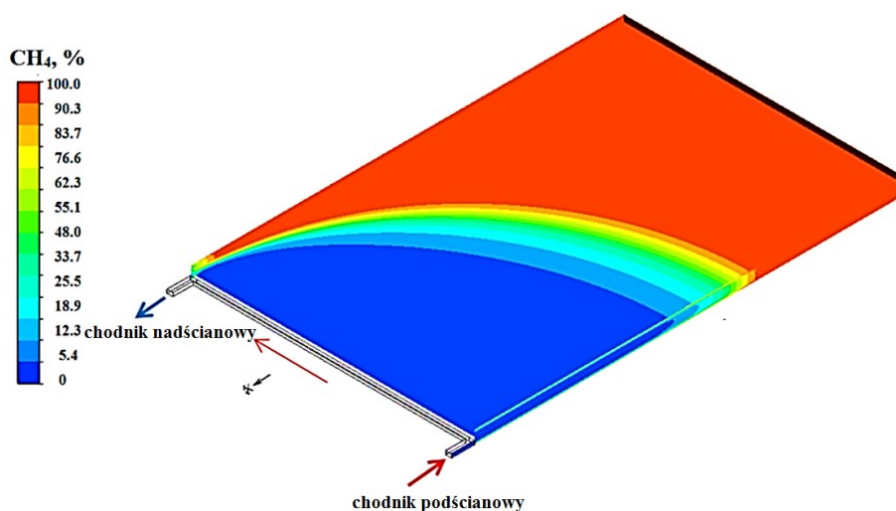
Na rys. 8 przedstawiono rozkład stężenia metanu w górnym narożu ściany eksploatacyjnej.



Rys. 8. Rozkład stężenia metanu na wylocie ze ściany eksploatacyjnej

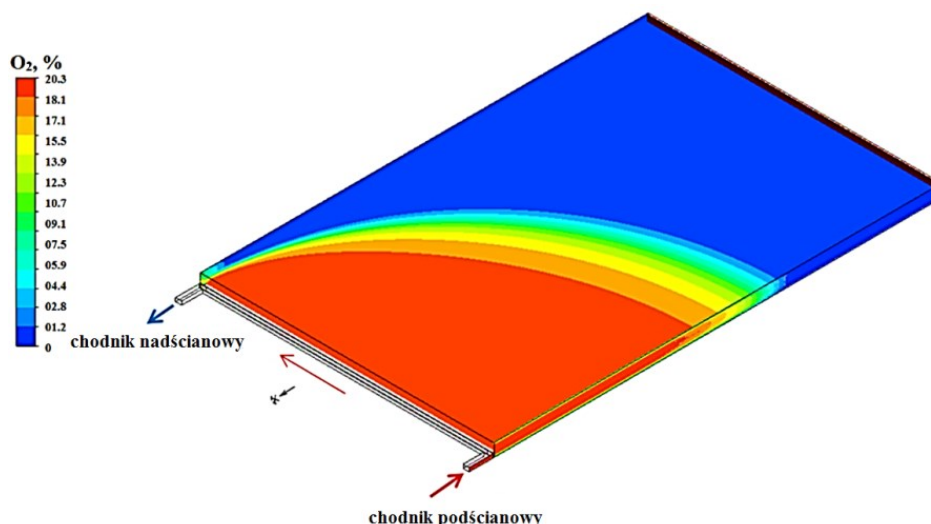
Źródło: Opracowanie własne.

Na rys. 9 przedstawiono rozkład stężenia metanu w zrobach zawałowych ściany eksploatacyjnej, a na rys. 10 – rozkład stężenia tlenu.



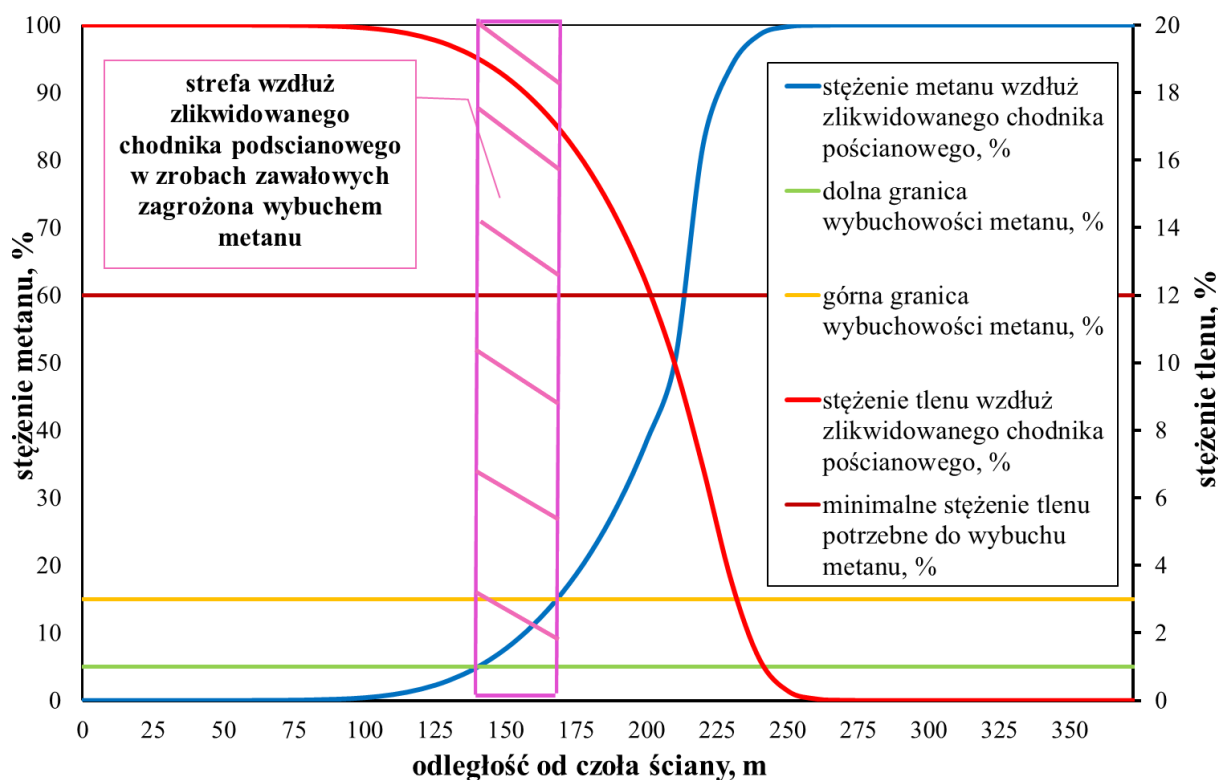
Rys. 9. Rozkład stężenia metanu w zrobach zawałowych ściany eksploatacyjnej

Źródło: Opracowanie własne.

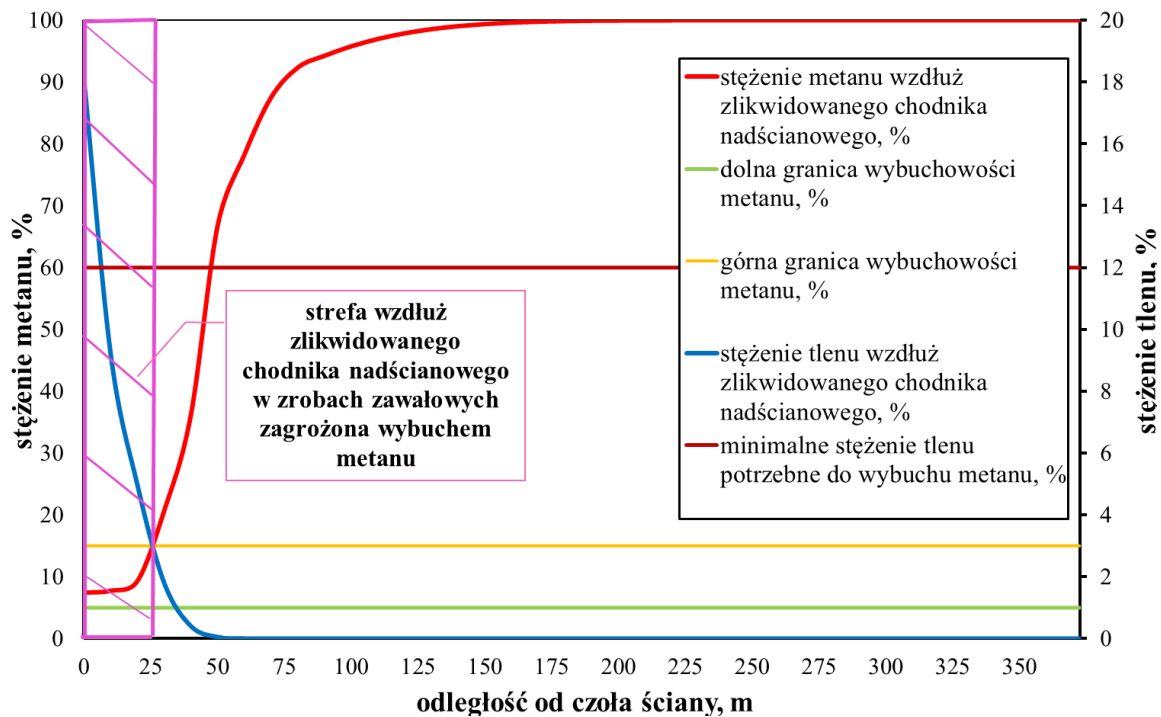


Rys. 10. Rozkład stężenia tlenu w zrobach zawałowych ściany  
Źródło: Opracowanie własne.

Na rys. 11 i 12 przedstawiono rozkłady stężenia metanu oraz tlenu w zrobach zawałowych ściany eksploatacyjnej wzdłuż zlikwidowanych chodników przyścianowych.



Rys. 11. Rozkład stężenia tlenu i metanu w zrobach zawałowych wzdłuż zlikwidowanego chodnika podścianowego  
Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 12. Rozkład stężenia tlenu i metanu w zrobach zawałowych wzdłuż zlikwidowanego chodnika nadścianowego

Źródło: Opracowanie własne.

Przeprowadzona analiza wykazała, że wybuchowe stężenie metanu w mieszaninie z powietrzem, w którym stężenie tlenu wynosi minimum 12%, występuje w strefie znajdującej się w odległości od 140 m do 168 m od czoła ściany wzdłuż zlikwidowanego chodnika podścianowego oraz w odległości do 35 m w głąb zrobów wzdłuż zlikwidowanego chodnika nadścianowego.

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

#### 4. Podsumowanie

Aktywizacja zagrożenia metanowego, tj. wybuchu lub zapalenia się metanu, w podziemnym środowisku pracy stanowi istotne zagrożenie dla bezpieczeństwa całej załogi oraz może być przyczyną dużych strat materialnych dla przedsiębiorstwa górniczego. Z tych też względów bardzo ważne stają się podejmowanie działań mających na celu wyznaczenie potencjalnych stref, w których może dojść do takich zdarzeń. Znajomość położenia tych stref może stanowić podstawę dla działań profilaktycznych, których celem jest zmniejszenie stężenia

metanu w tak zidentyfikowanej strefie, bądź też ograniczenie dopływu do niej tlenu, np. poprzez odcięcie dopływu powietrza.

Działania profilaktyczne w zakresie zmniejszenia zagrożenia metanowego nakierowane na dokładnie zidentyfikowane obszary powinny wykazywać dużą skuteczność, a co za tym idzie – mieć także pozytywny wpływ na efekty ekonomiczne przedsiębiorstwa górniczego.

Przedstawiona w artykule metodyka badań oraz uzyskane wyniki umożliwiają w sposób dokładny określenie położenia w zrobach zawałowych stref, w których spełnione są warunki niezbędne do wystąpienia wybuchu metanu oraz jego zapalenia. 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). Dlatego też przy tego typu analizach konieczne jest wspomaganie się wynikami badań rzeczywistych modelowanych obiektów.

Uzyskane wyniki jednoznacznie dowodzą, iż zastosowanie metod numerycznych 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. Działania te skutecznie powinny wspomagać ocenę stanu zagrożenia metanowego, a w dalszej kolejności wpływać na poprawę stanu bezpieczeństwa pracy w kopalniach.

## Bibliografia

1. Burczyński T.: Metoda elementów brzegowych w mechanice. WNT, Warszawa 1995.
2. Kozłowski B.: Zagrożenie wyrzutami gazów i skał w górnictwie węglowym. PWN, Warszawa-Kraków 1980.
3. Malczewski J., Piekarski M.: Modele procesów transportu masy, pędu i energii. PWN, Warszawa 1994.
4. Veersteg K.K., Malalasekera W.: An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. Pearson Education, Upper Saddle River, New Jersey 2007.
5. Zienkiewicz O.C., Taylor R.C.: The Finite Element Method. Butterworth-Heinemann, London 2000.
6. Pindór T., Preisner L. (red): Zagrożenia naturalne i techniczne a zarządzanie ryzykiem w górnictwie węgla kamiennego. AGH, Kraków 2009.
7. Ren T.X., Edwards J.S.: Goaf gas modeling techniques to maximize methane capture from surface gob wells. Mine Ventilation, 2002.
8. Brodny J.: Badania modelowe złącza ciernego obciążonego udarem masy. „Kwartalnik Górnictwo i Geologia”, t. 7, z. 1, Gliwice 2012.

9. Brodny J., Tutak M.: Numerical analysis of airflow and methane emitted from the mine face in a blind dog heading. "Management Systems in Production Engineering", No. 2, 2015, p. 110-118.
10. Strumiński A., Madeja-Strumińska B.: Ocena możliwości wybuchu lub zapalenia gazów w zrobach ścian zawałowych. „Kwartalnik Górnictwo i Geologia”, t. 8, z. 3, 2013.
11. Stan bezpieczeństwa i higieny pracy w górnictwie 2005-2015. Wyższy Urząd Górniczy, Katowice 2006-2016.