

Magdalena TUTAK, Jarosław BRODNY  
Politechnika Śląska

## **PROGNOZOWANIE ROZKŁADU STĘŻENIA METANU W WYROBISKACH GÓRNICZYCH Z WYKORZYSTANIEM BADAŃ MODELOWYCH ORAZ POMIARÓW W WARUNKACH IN SITU**

**Streszczenie.** Zagrożenie metanowe jest jednym z najbardziej niebezpiecznych zagrożeń w górnictwie węgla kamiennego. W pewnych zakresach stężeń, metan jest gazem palnym i wybuchowym. Z tego też względu, dla zapewnienia ciągłości procesu produkcyjnego oraz bezpieczeństwa pracy załogi podejmuje się różne działania, których celem jest niedopuszczenie do przekroczenia tych stężeń. Bardzo istotne znaczenie w tym procesie ma prognozowanie stężenia metanu w wyrobiskach górniczych. W artykule skoncentrowano się właśnie na tym problemie. W oparciu o dyskretne pomiary stężenia metanu w wyrobiskach górniczych oraz parametry wentylacyjne, przeprowadzono prognozowanie rozkładu stężenia metanu w tych wyrobiskach. Proces ten przeprowadzono w oparciu o badania modelowe z zastosowaniem techniki CFD. Na podstawie przyjętej metodyki opracowano model strukturalny badanego rejonu, dla którego w oparciu o wyniki pomiarów w warunkach rzeczywistych, przyjęto warunki brzegowe. W wyniki przeprowadzonych analiz określono rozkłady stężenia metanu w badanym rejonie oraz wyznaczono przewidywane przyszłe wartości tych stężeń. Wyniki uzyskane z badań modelowych porównano z wynikami pomiarów w warunkach rzeczywistych, uzyskując zadowalającą ich zgodność. Opracowana metodyka wykorzystująca techniki CFD oraz wyniki badań, stwarza duże możliwości ich zastosowania do skutecznego diagnozowania oraz prognozowania stanu zagrożenia metanowego w wyrobiskach górniczych.

## **FORECASTING THE DISTRIBUTION OF METHANE CONCENTRATION LEVELS IN MINE HEADINGS BY MEANS OF MODEL-BASED TESTS AND IN-SITU MEASUREMENTS**

**Summary.** The methane hazard is one of the most dangerous phenomena in hard coal mining. In a certain range of concentrations, methane is flammable and explosive. Therefore, in order to maintain the continuity of the production process and the safety of work for the crew, various measures are taken to prevent these concentration levels from being exceeded. A significant role in this process is played by the forecasting of methane concentrations in mine headings. This very problem has been the focus of the present article. Based on discrete measurements of methane concentration in mine headings and ventilation parameters, the distribution of methane concentration levels in these headings

was forecasted. This process was performed on the basis of model-based tests using the CFD technique. The methodology adopted was used to develop a structural model of the region under analysis, for which boundary conditions were adopted on the basis of the measurements results in real-world conditions. The analyses conducted helped to specify the distributions of methane concentrations in the region at hand and determine the anticipated future values of these concentrations. The results obtained from model-based tests were compared with the results of the measurements in real-world conditions, and there was satisfactory coherence between them. The methodology using the CFD techniques and the results of the tests offer extensive possibilities of their application for effective diagnosis and forecasting of the methane hazard in mine headings.

## 1. Wprowadzenie

W przypadku górnictwa węgla kamiennego jednym z najbardziej niebezpiecznych zagrożeń jest zagrożenie metanowe [2, 3, 7, 11]. Wynika ono z faktu wydzielania się w trakcie procesu eksploatacji węgla metanu, który w pewnych zakresach stężeń jest gazem palnym i wybuchowym. Dla bezpieczeństwa procesu eksploatacji górniczej bardzo istotne znaczenie mają wszelkie działania prognostyczne w tym zakresie. Skuteczność takich działań uzależniona jest od zastosowanej metody prognozowania ilości metanu, która może wydzielić się do przestrzeni roboczej wyrobisk górniczych oraz jego stężenia w mieszaninie z powietrzem. Najczęściej do oceny tego stanu stosuje się metody: empiryczne, analityczne, numeryczne, prognozowania krótkoterminowego, oraz hybrydowe, jako komputerowe systemy wspomaganie kontroli zagrożenia metanowego [7].

Obecnie stosowane metody charakteryzują się bardzo zróżnicowaną dokładnością, a ich wyniki nie do końca odpowiadają rzeczywistości. W zasadzie, w sposób bardzo przybliżony, określa się potencjalne wartości stężenia metanu w oparciu o prognozy eksploatacyjne, najczęściej w jednym lub kilku punktach obszaru wydobywczego [5, 6]. W ostatnim okresie pojawiły się także prace nad zastosowaniem inteligentnych systemów do prognozowania tego zagrożenia w oparciu o automatyczne systemy rejestracji parametrów wentylacyjnych w zagrożonych wyrobiskach [4]. Metody te jednak, mimo wielu zalet charakteryzują się tym, że najczęściej określają stan zagrożenia tylko w określonych kilku punktach wyrobisk. Jednocześnie, część z nich bazuje tylko na założonych planach eksploatacyjnych, co nie zawsze odpowiada rzeczywistości.

Z tego też względu Autorzy pracy postanowili opracować nową metodykę prognozowania stanu zagrożenia metanowego w wyrobiskach górniczych bazującą na wykorzystaniu modelowania numerycznego, w połączeniu z wynikami pomiarów parametrów wentylacyjnych. Zaproponowane w pracy rozwiązanie umożliwi wyznaczenie rozkładu stężenia metanu, oraz innych gazów kopalnianych w dowolnym obszarze prowadzonej eksploatacji. Jednocześnie parametry te można wyznaczyć w każdym dowolnym punkcie tego obszaru. Bardzo istotnym elementem opracowanej metodyki jest oparcie się na rzeczywistych pomiarach wartości parametrów

wentylacyjnych w kopalni przez system czujników gazometrii automatycznej, a także przez pomiary ręczne.

W opracowanej metodyce, dane z systemów gazometrycznych kopalni stanowią podstawę dla zbudowanego modelu numerycznego, który opisuje procesy wentylacyjne zachodzące w badanym rejonie. Dokładność uzyskanych wyników w dużej mierze zależy od stopnia złożoności opracowanego modelu, który w miarę pozyskiwania nowych danych może być w dość swobodny sposób rozbudowywany. Aby sprawdzić skuteczność opracowanej koncepcji Autorzy przeprowadzili badania dla wybranego obszaru eksploatacji górniczej. W oparciu o wyniki bezpośrednich pomiarów parametrów wentylacyjnych w warunkach in situ, opracowano model numeryczny badanego rejonu i poddano go analizie. Uzyskane wyniki porównano z wynikami pomiarów uzyskując zadowalające ich zbieżności.

W pracy omówiono sposób pozyskiwania danych, opracowany model numeryczny oraz przedstawiono uzyskane wyniki. Zaprezentowane także możliwości wyznaczania wybranych parametrów wentylacyjnych oraz sposobu ich prezentacji dzięki zastosowaniu narzędzi numerycznych. Autorzy mają nadzieję, że zaprezentowane wyniki znajdą praktyczne zastosowanie w górnictwie, wpływając na poprawę bezpieczeństwa pracy oraz efektywności procesu produkcji górniczej.

## 2. Przygotowanie danych z systemu gazometrycznego kopalni do badań numerycznych

Do badań numerycznych wykorzystane zostały dane zarejestrowane przez system gazometryczny kopalni. System ten składa się z metanomierzy automatycznych, anemometrów, mierników ciśnienia barometrycznego, a także m.in. z czujników tlenków węgla i tlenu oraz czujników wilgotności i temperatury.

Metanomierze automatyczne rejestrują stężenia metanu z rozdzielczością 0,1 CH<sub>4</sub>, anemometry z rozdzielczością do 0,1 m/s, a mierniki ciśnienia barometrycznego – 1 hPa. Rozdzielczości te czasami są za niskie i nie do końca oddają charakter zmian parametrów powietrza. Z tego też względu, w przypadku wykorzystania tych danych do prognozowania np. zagrożenia metanowego lub weryfikacji i walidacji modelu numerycznego konieczne jest ich wygładzenie. W prezentowanym przypadku do wygładzenia przebiegów czasowych zmiany wartości stężenia metanu i prędkości strumienia powietrza wykorzystano metodę Holta, będącą jedną z metod wygładzania wykładniczego. Metoda ta polega na wygładzaniu szeregu czasowego za pomocą średniej ruchomej. Model Holta opisany jest równaniami [8]:

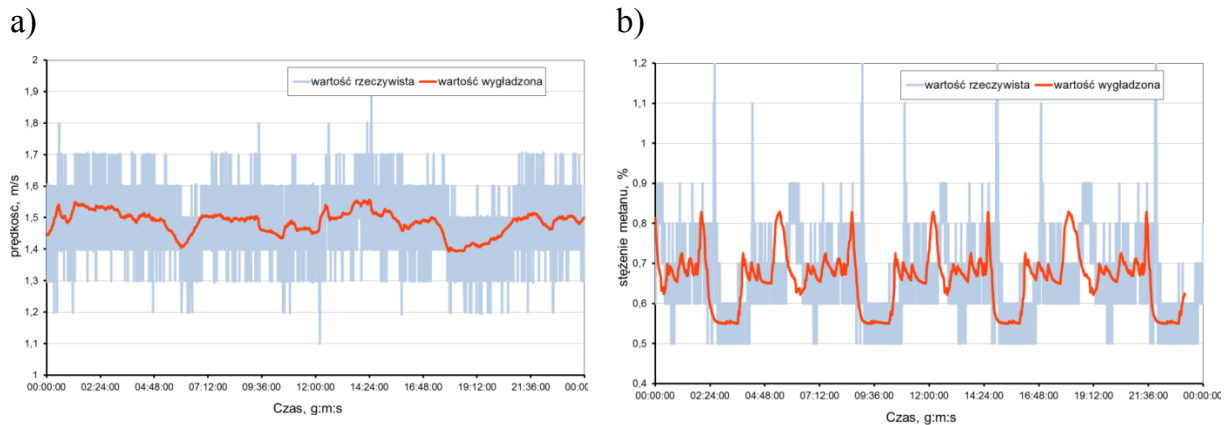
$$F_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)(F_{t-1} + S_{t-1}) \quad (1)$$

$$S_t = \beta(F_t - F_{t-1}) + (1 - \beta)S_{t-1} \quad (2)$$

gdzie:  $t = 2, 3, \dots, n-1$ ;  $F_t$  – wygładzona wartość szeregu czasowego;  $S_t$  – wygładzona wartość przyrostu trendu na moment  $t$ ;  $\alpha, \beta$  – parametry wygładzenia modelu,  $\alpha, \beta \in [0,1]$ . Parametry wygładzenia dobierane są na podstawie kryterium najmniejszego błędu średniego prognoz wygasłych [8]:

$$s^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - y_t^*(\alpha, \beta))^2} \quad (3)$$

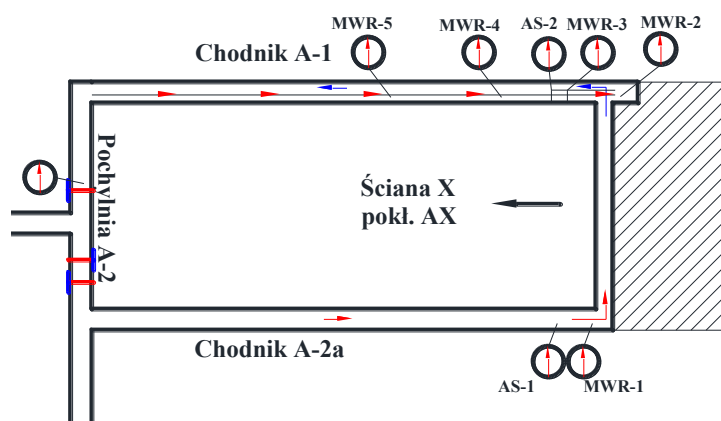
Przykład wygładzonych danych pochodzących z metanomierza automatycznego i anemometru stacjonarnego znajdujących się w wyrobisku odprowadzającym powietrze ze ściany eksploatacyjnej (chodnik wentylacyjny), z wykorzystaniem metody Holta przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys.1. Przykład wygładzania przebiegu czasowego prędkości powietrza na wylocie ze ściany (a) oraz przebiegu czasowego stężenia metanu (w chodniku 10 m od wylotu ze ściany) (b)

### 3. Model rejonu ściany eksploatacyjnej

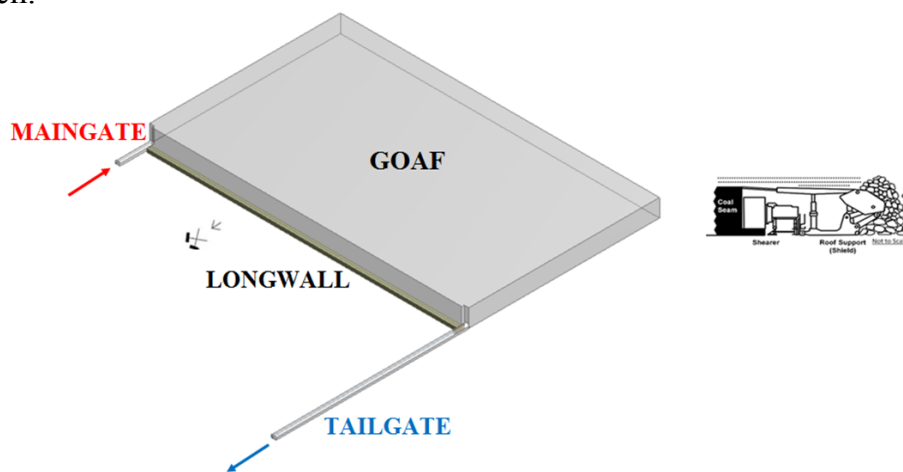
Ściana „X” w pokładzie „W” była w całości objęta systemem gazometrii automatycznej. Rozmieszczenie czujników do pomiaru parametrów powietrza w rejonie badanej ściany przedstawiono na rysunku 2. Oznaczenia czujników stanowią jednocześnie oznaczenie punktów pomiarowych.



Rys. 2. Rozmieszczenie czujników do pomiaru parametrów powietrza w rejonie badanej ściany

Na podstawie danych geometrycznych, rzeczywistej ściany eksploatacyjnej (X), chodników przyścianowych i zrobów zawałowych tej ściany, zbudowano jej trójwymiarowy model geometryczny (rys. 3). Parametry geometryczne rozpatrywanego układu wyrobisk oraz parametry wentylacyjne przepływającego przez nie strumienia powietrza zestawiono w tabeli 1.

W kolejnym etapie analizy przeprowadzono dyskretyzację modelu geometrycznego na skończoną liczbę nienakładających się na siebie objętości kontrolnych.



Rys. 3. Model geometryczny badanego rejonu

Tabela 1

Parametry geometryczne układu wyrobisk oraz parametry wentylacyjne powietrza

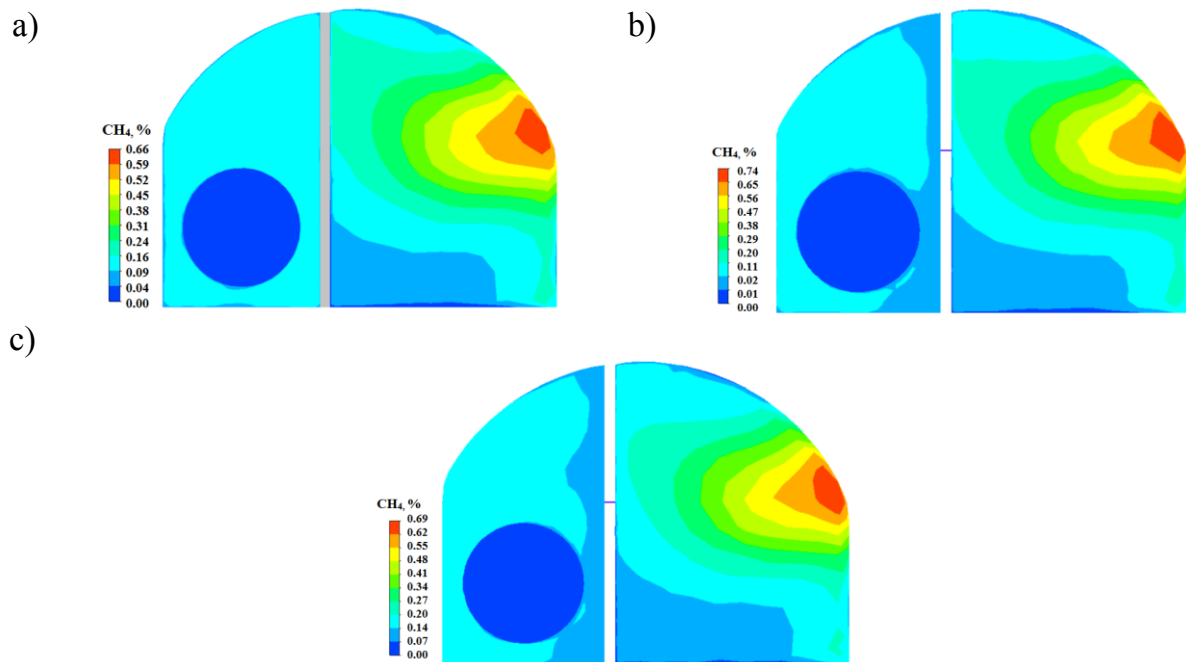
Wydatek powietrza doprowadzany do ściany, m <sup>3</sup> /min	1000,0
Wydatek powietrza doprowadzany lutniociągiem zabudowanym w chodniku wentylacyjnym, m <sup>3</sup> /min	400,0
Metanowość bezwzględna, m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /min	11,36
Wysokość ściany, m	2,2
Długość ściany, m	216,0
Szerokość ściany, m	4,54
Szerokość chodników przyścianowych, m	3,8
Wysokość chodników przyścianowych, m	5,5

Analizowany przypadek rozpatrywano w warunkach izotermicznych, przy założeniu przepływu wieloskładnikowego (mieszanka powietrza i metanu), tak jak to jest w warunkach rzeczywistych. Warunki brzegowe, niezbędne do wykonania obliczeń numerycznych, przyjęto w oparciu o rzeczywiste pomiary parametrów fizycznych i chemicznych strumienia powietrza doprowadzanego do ściany oraz metanowość ściany z uwzględnieniem procesu wygładzania danych metodą Holta.

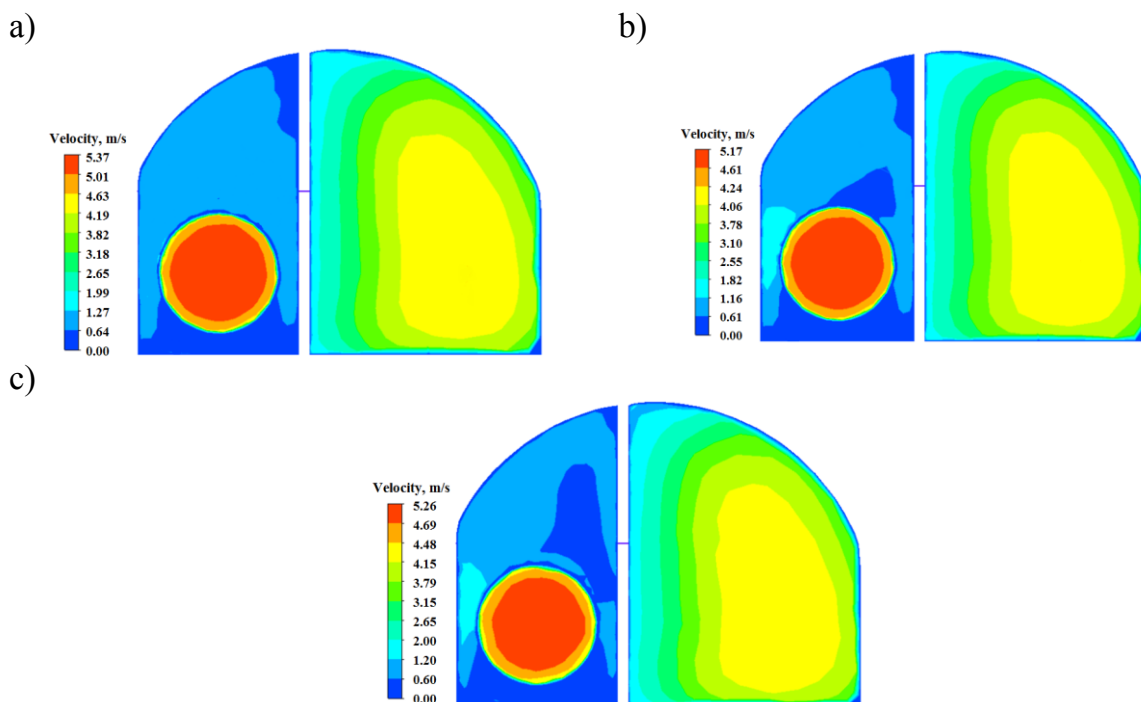
#### 4. Wyniki

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono prognozowane rozkłady stężenia metanu oraz rozkłady prędkości w rejonie skrzyżowania ściany z chodnikiem nadścianowym (wentylacyjnym) dla różnych czasów prognozy.

Na rysunku 4 przedstawiono rozkłady stężenia metanu w przekroju poprzecznym chodnika nadścianowego (wentylacyjnego) w odległości 6.0 m od wylotu ze ściany eksploatacyjnej dla różnych czasu prognozy. Jest to miejsce oznaczone na rysunku 2 jako punkt MWR-3. Natomiast na rysunku 5 przedstawiono rozkłady prędkości dla tych samych czasów, w miejscu zabudowy czujnika-anemometru stacjonarnego (7 m od wylotu ze ściany eksploatacyjnej (punkt AS-2).

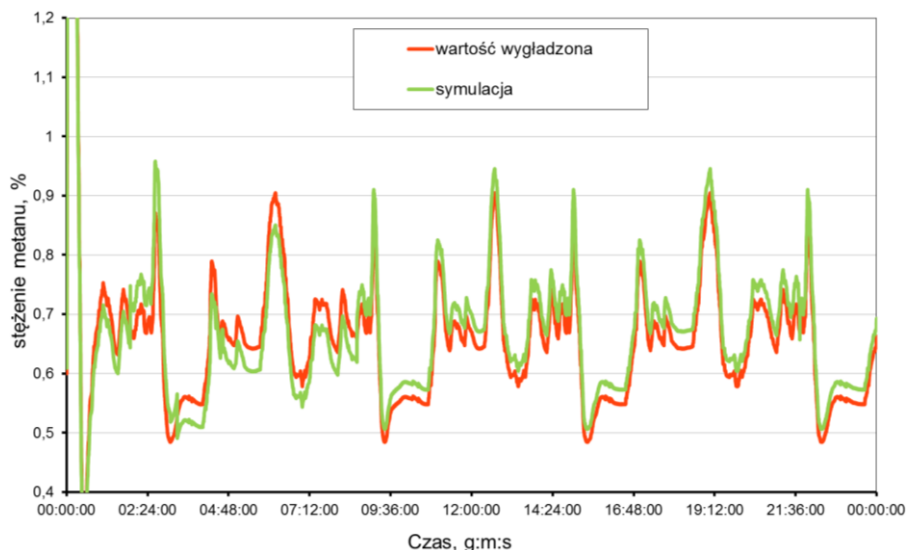


Rys. 4. Rozkłady stężenia metanu w przekroju poprzecznym chodnika nadścianowego (wentylacyjnego) w odległości 6.0 m od wylotu ze ściany eksploatacyjnej dla wybranych czasów prognozy: a – dla 15 333 sekund (4:15:33), b – dla 42 637 sekund (11:50:37), c – dla 75 189 sekund (20:53:09)

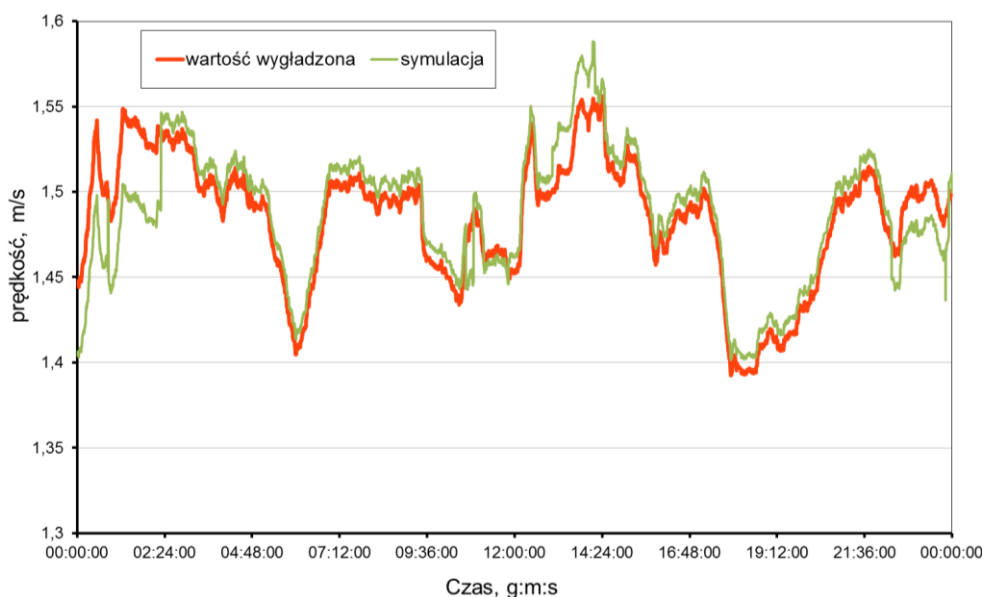


Rys. 5. Rozkład prędkości w przekroju poprzecznym chodnika wentylacyjnego w odległości 7.0 m od wylotu ze ściany, dla wybranych czasów prognozy [a – 15333 sekund (4:15:33), b – 42637 sekund (11:50:37), c – 75189 (20:53:09)]

W celu sprawdzenia jakości uzyskanych wyników, dokonano ich porównania z wartościami mierzonymi dla jednej doby. Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono porównanie stężenia metanu i prędkości w punktach pomiarowych dla danych wygładzonych i wyników pochodzących z badań modelowych.



Rys. 6. Stężenia metanu dla danych wygładzonych i wyników pochodzących z badań modelowych w punkcie pomiarowym nr MWR-3



Rys. 7. Prędkość powietrza dla danych wygładzonych i wyników pochodzących z badań modelowych w punkcie pomiarowym nr AS-2

Uzyskane wyniki z badań modelowych wykazują dużą zbieżność z wynikami pomiarów w prezentowanych punktach.

W oparciu o uzyskane wyniki dokonano porównania wartości średnich stężeń metanu i prędkości przepływu powietrza zarejestrowanych przez czujniki systemu gazometrii automatycznej, z otrzymanymi w wyniku badań modelowych (tabela 2).

Tabela 2

Zestawienie wyników pomiarów z wynikami z badań modelowych

Czujnik/pkt pomiarowy	Wartość zmierzona w warunkach dołowych	Wyniki badań modelowych	Błąd względny %
MWR-1, CH <sub>4</sub> %	0,153	0,141	7,843
MWR-2, CH <sub>4</sub> %	0,758	0,785	3,562
MWR-3, CH <sub>4</sub> %	0,752	0,771	2,527
MWR-4, CH <sub>4</sub> %	0,718	0,706	1,671
MWR-5, CH <sub>4</sub> %	0,663	0,621	6,335
AS-2, v, m/s	1,481	1,496	1,013
AS-1, v, m/s	1,027	1,100	7,108

Dane zestawione w tabeli 2 wskazują, że wyniki uzyskane z badań modelowych są zbliżone do wartości pomiarów zarejestrowanych przez czujniki gazometrii automatycznej. Największa wartość błędu względnego wyniosła około 7%. Dotyczyło to różnicy pomiędzy średnią prędkością na wlocie do ściany zarejestrowaną przez czujnik AS-1, a średnią wartością uzyskaną w symulacji. Przyczyną tego błędu jest najprawdopodobniej fakt, iż odcinek chodnika podścianowego (chodnik, którym powietrze doprowadzane jest do ściany) modelu geometrycznego był niewystarczający dla wyrównania profilu prędkości strumienia powietrza w odcinku wlotowym. W pozostałych przypadkach zanotowane różnice są bardzo niewielkie.

## 6. Wnioski

Zastosowanie metod numerycznych do analizy zjawisk wentylacyjnych w kopalniach ma coraz większe zastosowanie. Zasadnym jest zatem zastosowanie tej metody także do prognozowania zjawisk związanych z zagrożeniami wentylacyjnymi. Bardzo istotne znaczenie ma w tym procesie wiarygodność uzyskanych wyników. Z tego też względu konieczne jest, oprócz prawidłowego opracowania samego modelu, oparcie się na obiektywnych danych pomiarowych. W tym zakresie, w pracy skorzystano z automatycznych systemów rejestracji parametrów wentylacyjnych, co zapewniło ich niezależność od wielu różnych czynników oraz wiarygodność. Ma to szczególnie istotne znaczenie w przypadku prognozowania zagrożenia metanowego. Błędne wyniki, w tym obszarze mogą bowiem spowodować bardzo negatywne konsekwencje.

Analizując opracowaną metodykę oraz uzyskane wyniki można stwierdzić, że badania modelowe mogą z powodzeniem być stosowane do prognozowania parametrów fizycznych i chemicznych w sieci wentylacyjnej w kopalni. Jedynymi ograniczeniami, w stosowaniu tej metodyki może być brak dostępu do wiarygodnych danych pomiarowych oraz możliwości obliczeniowe.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują miejsca i czas w których istnieje możliwość powstania niebezpiecznych stężeń metanu. Można także prześledzić kształtowanie się rozkładu stężenia metanu oraz innych gazów w całym badanym obszarze. Natomiast wiarygodność prognozy można łatwo zweryfikować



w wybranych punktach, np. badając odchylenie prognozy od rzeczywistej wartości (metoda *ex post*).

Uzyskane wyniki wskazują, że miejscem najbardziej narażonym na powstanie niebezpiecznych stężeń metanu, dla analizowanego układu jest rejon skrzyżowania ściany z chodnikiem podścianowym. W praktyce informacja ta powinna skutkować objęciem tego rejonu szczególną kontrolą, łącznie z instalacją dodatkowych czujników pomiarowych. Należy także podkreślić uniwersalność opracowanego modelu, który można wykorzystać do wielowariantowych analiz i prognozowania stanu zagrożenia dla różnych wariantów emisji metanu oraz parametrów wentylacyjnych zasilającego strumienia powietrza oraz geometrii wyrobisk.

## LITERATURA

1. Petrilă T., Trif D.: Basics of fluid mechanics and introduction to computational fluid dynamics. Springer, Boston 2005.
2. Brodny J., Tutak M.: Determination of the zone endangered by methane explosion in goaf with caving of operating longwalls. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. SGEM 2016. pp 299-306. DOI: 10.5593/SGEM2016/B12/S03.039.
3. Brodny J., Tutak M.: Analysis of methane hazard conditions in mine headings. Tehnički vjesnik/Technical Gazette, Vol. 25/No. 1 2018, pp. 271-276. DOI:10.17559/TV-20160322194812.
4. Felka D., Brodny J.: Application of neural-fuzzy system in prediction of methane hazard. Intelligent systems in production engineering and maintenance. Proceedings of the First International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance, ISPEM 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing; vol. 637, ISBN 978-331964464-6978-3-319-64465-3.
5. Krause E., Łukowicz K.: Dynamiczna prognoza metanowości bezwzględnej ścian. Instrukcja nr 14. Katowice, GIG, 2000.
6. Krause E., Krzystolik P., Łukowicz K.: Rozpoznawanie, prognozowanie, kontrola i zwalczanie zagrożenia metanowego w kopalniach węgla kamiennego. Katowice, GIG, 2001.
7. Dziurzyński W., Pałka T., Krach A., Wasielewski S.: Rozwój systemów symulacji procesu przewietrzania w rejonie ściany z uwzględnieniem czujników systemu gazometrii. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 17, nr 1-2, czerwiec 2015, s. 3-19.
8. Szostak R.: Uogólniony model Holta na przykładzie prognozowania liczby pasażerów w transporcie lotniczym w o Polsce, Ekonometria, nr 2, 2012, s. 16–26.
9. Veerstedt K. K., Malalasekera W.: An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. Pearson Education 2007.
10. Xiu S. N., Wang N. N., Yi W.M.; Li B. M.; Shahbazi G. (2008). Validation of Kinetic Parameter Values for Prediction of Pyrolysis Behaviour of Corn Stalks in

a Horizontal Entrained-flow Reactor. Biosystems Engineering, Vol. 100, pp. 79-85.

11. Zeliaś A.: Teoria Prognozy. Wyd. PWN, Warszawa 1997.