

## **ANALIZA NUMERYCZNA PRZEPIYU STRUMIENIA POWIETRZA I WYDZIELAJĄCEGO SIĘ METANU Z CZOŁA PRZODKA W ŚLEPYM WYROBISKU KORYTARZOWYM**

*Jarosław BRODNY, Magdalena TUTAK  
Politechnika Śląska*

**Streszczenie:** Jednym z większych problemów występujących w czasie drażenia podziemnych wyrobisk korytarzowych jest ich przewietrzanie. W trakcie wykonywania wyrobisko takie posiada tylko jedno połączenie z drogami przepływu świeżego strumienia powietrza, co istotnie utrudnia proces jego przewietrzania. W przypadku jego drażenia w węglu w pokładzie metanowym, wyrobisko to narażone jest także na wydzielanie się metanu. W takim przypadku proces jego przewietrzania jest jeszcze bardziej utrudniony. W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej przewietrzania ślepego wyrobiska korytarzowego z wykorzystaniem lutniociągu tłoczącego świeże powietrze do jego przodka. Analizę przeprowadzono dla czterech różnych prędkości wyloty powietrza z lutniociągu. Obliczenia wykonano dla wyrobiska z kombajnem chodnikowym i przenośnikiem taśmowym.

**Słowa kluczowe:** zagrożenie metanowe, wentylacja wyrobisk korytarzowych, analiza numeryczna

### **WPROWADZENIE**

Węgiel kamienny, będący jednym z podstawowych surowców energetycznych, wydobywany jest metodami podziemną i odkrywkową. Obecnie około 60% światowego wydobycia węgla uzyskuje się w wyniku podziemnej eksploatacji [7].

Eksploatacja ta z uwagi na liczne zagrożenia naturalne i techniczne jest bardzo niebezpieczna. Szczególnie zagrożenia naturalne stwarzają poważne niebezpieczeństwo dla życia i zdrowia pracującej załogi. Jednym z najczęściej występujących i najbardziej niebezpiecznych zagrożeń naturalnych jest zagrożenie metanowe. W ostatnich kilkudziesięciu latach w światowym górnictwie w wyniku wybuchów i zapaleń metanu doszło do wielu katastrof, w których wypadkom uległo wiele tysięcy górników [10].

Również w Polskim górnictwie węgla kamiennego zagrożenie metanowe jest jednym z najczęściej występujących zagrożeń. W latach 2005-2014 w polskich kopalniach węgla kamiennego miało miejsca 28 niebezpiecznych zdarzeń związanych z zagrożeniem metanowym (zapalenia i wybuchy metanu), z czego 8 (zapalenia metanu) zaistniało w drażonych wyrobiskach korytarzowych (chodnikach) [5].

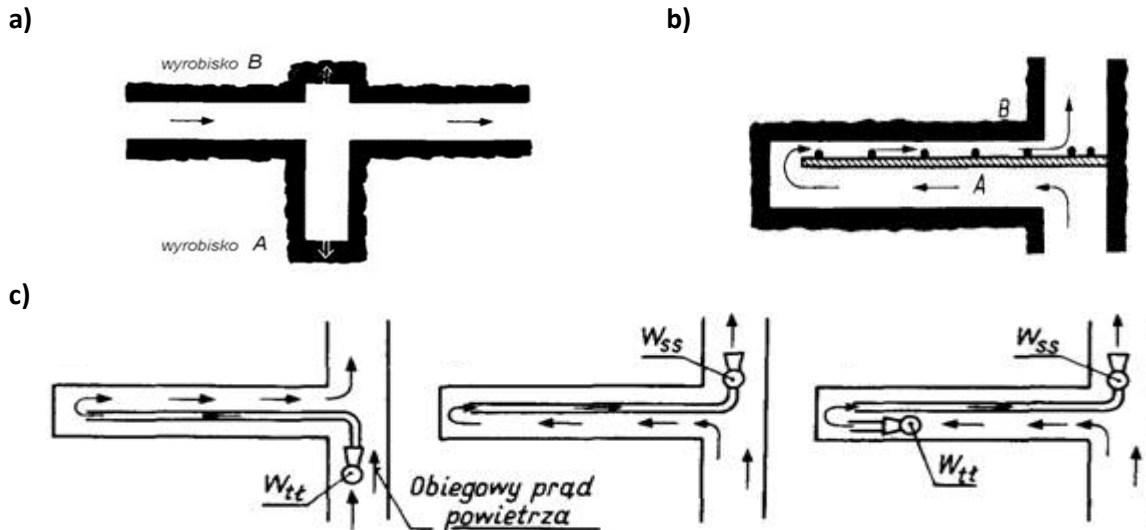
Drażone wyrobiska korytarzowe są wyrobiskami ślepyimi, tj. mającymi tylko jedno połączenie z drogami przepływu strumienia powietrza, co powoduje znaczne utrudnienia w procesie ich przewietrzania. Wyrobiska te wykonywane są najczęściej na etapie prowadzenia robót przygotowawczych, których zasadniczym celem jest rozcięcie partii pokładu i przygotowanie frontu do prowadzenia eksploatacji. W przypadku wykonywania tych wyrobisk w węglu w pokładzie metanowym, narażone są one dodatkowo na wydzielanie się metanu z przodka eksploatacyjnego oraz ociosów, stropu i spągu wydrążonej jego części, co dodatkowo utrudnia proces przewietrzania tych wyrobisk [9].

Zwalczanie zagrożenia metanowego w przodkach drażonych chodników odbywa się przede wszystkim przez niedopuszczenie do nagromadzenia się w nich niebezpiecznych ilości metanu powodujących jego wybuchowe stężenie. Głównym celem tego procesu jest doprowadzeniu do przodka takiej ilości powietrza wentylacyjnego, która spowoduje, iż stężenie metanu nie przekroczy wartości dopuszczalnej. Aby osiągnąć ten cel, strumień świeżego powietrza doprowadzanego do przodka drażonego wyrobiska powinien posiadać

odpowiednie parametry fizyczne (prędkość, wilgotność, temperaturę) oraz skład chemiczny. Parametry te powinny być tak dobrane aby powstająca w wyrobisku atmosfera zapewniała wymagane parametry niezbędne do prowadzenia prac eksploatacyjnych.

W celu spełnienia tych wymagań strumień świeżego powietrza może być doprowadzony do przodka ślepego wyrobiska korytarzowego w zależności od jego długości, kąta nachylenia oraz kategorii zagrożenia metanowego przy pomocy lutniociągu, z wykorzystaniem pomocniczych urządzeń wentylacyjnych lub przez dyfuzję [13].

Sposoby przewietrzania ślepych wyrobisk korytarzowych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1 Sposoby przewietrzania wyrobisk ślepych:

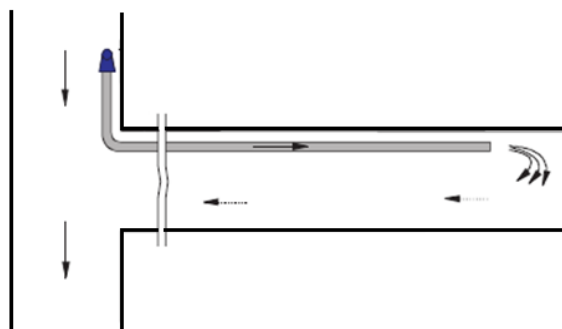
a) przez dyfuzję, b) z przegrodą wentylacyjną, c) lutniociągami (tłoczące, ssące, kombinowane)

Źródło: [2]

W praktyce najczęściej przewietrzanie chodników, w trakcie ich wykonywania, odbywa się przez doprowadzenie świeżego powietrza bezpośrednio do ich przodków za pomocą lutniociągu. Przewietrzanie z wykorzystaniem lutniociągów może być ssące, tłoczące lub kombinowane (rys. 1c) [15, 16].

W przypadku występowania dużego zagrożenia metanowego w wyrobiskach tych stosuje się wentylację tłoczącą, która charakteryzuje się doprowadzaniem większej ilości powietrza niż wentylacja ssąca, dzięki czemu jest bardziej skuteczna (rys. 2) [14, 15, 16, 17].

Zgodnie z [13] prędkość strumienia powietrza w wyrobiskach przewietrzanych za pomocą lutniociągów w polach metanowych II, III i IV kategorii zagrożenia metanowego nie może być mniejsza niż 0,30 m/s.



Rys. 2 Schemat wentylacji lutniowej tłoczącej

Źródło: [17]

W polach niemetanowych i zaliczonych do I kategorii zagrożenia metanowego prędkość ta musi wynosić co najmniej 0,15 m/s. Jednocześnie prędkość strumienia powietrza w wyrobisku korytarzowym nie może przekroczyć 8 m/s [13].

Można więc przyjąć, że prędkość strumienia powietrza doprowadzanego do drażonego przodka wyrobiska korytarzowego ma być taka aby nie została przekroczona wartość NDS metanu i jednocześnie zapewniała bezpieczeństwo pracującej załodze. Obecnie w coraz większym stopniu przy ustalaniu wartości tej prędkości uwzględnia się także koszty energii oraz pracy [11].

Powyższe uwagi uzasadniają zatem prowadzenie badań mających na celu wyznaczenie parametrów strumienia powietrza przepływającego przez ślepe wyrobisko korytarzowe z uwzględnieniem wydzielającego się metanu z czoła przodka tego wyrobiska. Badania takie mogą być prowadzone w warunkach rzeczywistych (dołowych) jak i z wykorzystaniem nowoczesnych metod symulacyjnych.

W ostatnich latach coraz szerzej do analizy zagadnień wentylacyjnych wykorzystuje się metody numeryczne [3, 8, 9, 12]. Niewiele jednak badań obejmuje trójwymiarowe analizy z uwzględnieniem zagrożenia metanowego.

Z tego też względu zasadnym wydaje się przeprowadzenie badań numerycznych mających na celu analizę przepływu strumienia powietrza i wydzielającego się metanu z czoła przodka w ślepym wyrobisku korytarzowym przewietrzanym lutniociągiem tłoczącym. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki takiej analizy przeprowadzonej z wykorzystaniem programu Fluent.

Generalnie można stwierdzić, że wykorzystanie numerycznej mechaniki płynów (CFD) umożliwi bardzo dokładne określenie parametrów fizycznych i chemicznych mieszaniny strumienia powietrza i metanu w dowolnym punkcie badanego wyrobiska górniczego. Wyznaczenie tych parametrów w oparciu o badania w warunkach rzeczywistych jest praktycznie niemożliwe.

Celem badań, których wyniki przedstawiono w pracy, było określenie wpływu prędkości strumienia powietrza doprowadzanego lutniociągiem do przodka wyrobiska korytarzowego z którego wydziela się metan na rozkład jego stężenia w tym wyrobisku. Obliczenia przeprowadzono dla przepływu w stanie nieustalonym w wyrobisku wyposażonym w lutniociąg, kombajn chodnikowy i przenośnik taśmowy.

### MODEL MATEMATYCZNY PRZEPŁYWU

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 [19].

Programy bazujące na numerycznej mechanice płynów CFD pozwalają na uzyskanie niezbędnych informacji, dotyczących masy przepływu strumienia powietrza lub płynu (rozkład pola prędkości i ciśnienia), ruchu ciepła (pole temperatury), a także przemian fizyko-chemicznych.

W niniejszym opracowaniu wyznaczono parametry fizyczne i chemiczne strumienia powietrza i metanu przepływającego przez drażone wyrobisko przewietrzane lutniociągiem tłoczącym wykorzystując program Fluent.

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 [19].

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

- równanie zachowania masy

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

gdzie:

$\vec{v}$  – prędkość, m/s

$\rho$  – gęstość, kg/m<sup>3</sup>

$t$  – czas, s

$S_m$  – dodatkowe źródło masy, zmienne lub stałe, kg/s

- równanie zachowania pędu

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

gdzie:

$p$  – ciśnienie statyczne, Pa

$\bar{\tau}$  – tensor naprężeń, Pa

$\vec{g}$  – przyspieszenie grawitacyjne, m/s<sup>2</sup>

$\vec{F}$  – wektor sił zewnętrznych, N

- równanie zachowania energii

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (3)$$

gdzie:

$E$  – energia całkowita właściwa, J/kg

$k_{eff}$  – efektywny współczynnik przewodzenia ciepła W/(mK)

$T$  – temperatura, K

$h_j$  – entalpia właściwa  $j$ -tego składnika mieszaniny, J/kg

$\tau_{eff}$  – źródło ciepła na skutek generowania z płynu energii sił ścinających, W/m<sup>3</sup>

$\vec{J}_i$  – strumień dyfuzji, kg/(m<sup>2</sup>s)

$S_h$  – wolumetryczne źródło ciepła, W/m<sup>3</sup>

Równanie transportu, które określa lokalny ubytek masy dla każdego składnika mieszaniny oraz równanie dyfuzji dla przepływu turbulentnego przyjmują następującą postać:

- równanie transportu substancji chemicznych

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

gdzie:

$\rho$  – gęstość, kg/m<sup>3</sup>

$\vec{v}$  – prędkość, m/s

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

$\vec{J}_i$  – strumień dyfuzji, kg/(m<sup>2</sup>s)

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

$S_i$  – człon źródłowy wynikający z przejścia  $i$ -tego składnika z fazy rozproszonej

- równanie dyfuzji dla przepływu turbulentnego

$$\vec{J}_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \nabla Y_i \quad (5)$$

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, a także wymiany ciepła z górotworem przyległym do wyrobiska.

Można więc stwierdzić, że do opisu przepływu mieszaniny strumienia powietrza i metanu przez drażony chodnik wykorzystuje się układ równań obejmujących mechanikę płynów, termodynamikę oraz równania konstytutywne.

Przepływ strumienia powietrza przez drażone wyrobisko korytarzowe przewietrzane lutniociągiem ma charakter turbulentny, czyli taki, w którym występuje nieregularny ruch cząsteczek powietrza, a parametry jego przepływu doznają nieprzewidywalnych losowych zmian w przestrzeni i w czasie. Dla takiego przepływu charakterystyczne jest zjawisko występowania wirów o różnych skalach wielkości [18]. Turbulencja przepływu charakteryzuje się trójwymiarowością (nie istnieją dwuwymiarowe przepływy turbulentne), dyfuzyjnością, a także losowością, kaskadą oraz hierarchizacją wirów [4].

W niniejszym artykule do przeprowadzenia analizy przepływu wykorzystano model turbulencji „*k-ε standard*”. Model ten opisuje składowe tensora naprężeń turbulentnych Reynoldsa według hipotezy Boussinesqa. Zgodnie z tą hipotezą naprężenia turbulentne są proporcjonalne do prędkości deformacji i wyrażone są za pomocą dynamicznego współczynnika lepkości turbulencji  $\mu_t$ . We wzorze na składowe tensora naprężenia występują wielkości  $k$  oraz  $\varepsilon$ . Wielkości te wymagają dodatkowych dwóch równań transportu dla przepływów jednofazowych w postaci:

- równanie energii kinetycznej turbulencji

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

- równanie dyssypacji energii kinetycznej turbulencji

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (7)$$

gdzie:

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$  – stałe w równaniu dyssypacji energii kinetycznej,

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  – turbulentna liczba Prandlta dla  $k$  oraz  $\varepsilon$ ,

$G_b$  – energia turbulencji kinetycznej na skutek wyporu,

$G_k$  – energia kinetyczna turbulencji spowodowana gradientem prędkości,

$Y_M$  – zmienność rozprzestrzeniania się turbulencji,

$S_k, S_\varepsilon$  – funkcje użytkownika.

## ANALIZA PRZEPLÝWU

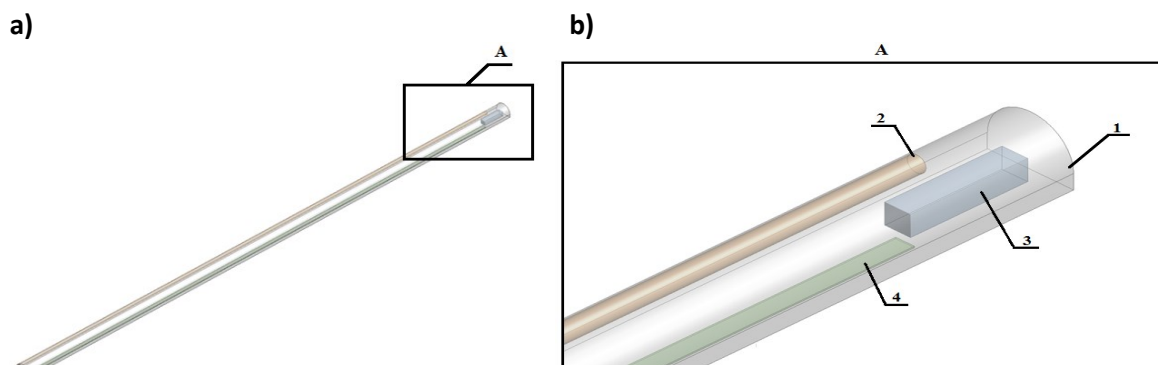
Analizie poddano drażone wyrobisko korytarzowe mające tylko jedno połączenie z drogami przepływu strumienia powietrza. Przyjęto, że wyrobisko to jest zasilane strumieniem świeżego powietrza z lutniociągu tłoczącego, a z jego przodka wydziela się metan.

W takim przypadku zadaniem procesu wentylacji oprócz zapewniania odpowiedniej ilości tlenu dla pracującej załogi konieczne jest niedopuszczenie do przekroczenia dopuszczalnego stężenia metanu (2%) w mieszaninie z powietrzem. Cel ten osiągnąć jest przez doprowadzenie lutniociągiem do drażonego przodka strumienia powietrza o określonych parametrach.

## Model przepływu

W celu przeprowadzenia analizy przepływu mieszaniny powietrza dostarczanego do przodka wyrobiska korytarzowego lutniociągiem i wydzielającego się metanu z czoła przodka

w drążonym wyrobisku korytarzowym opracowano model geometryczny tego wyrobiska wraz z lutniociągiem, przenośnikiem i kombajnem chodnikowym (rys. 3).



**Rys. 3 Model geometryczny analizowanego wyrobiska korytarzowego**

**1 – czoło drążonego wyrobiska z którego wydziela się metan,  
2 – lutniociąg tłoczący świeże powietrze do przodka 3 – maszyna urabiająca, 4 – przenośnik taśmowy**

Dla analizowanego modelu przyjęto, że długość drążonego chodnika wynosi 200 m, długość lutniociągu 194 m, natomiast przenośnika taśmowego – 190 m. Przyjęto, że drążone wyrobisko ma szerokość 5,5 m, a wysokość 3,85 m ( $S = 17,93 \text{ m}^2$ ). Założono, że przenośnik taśmowy znajduje się na wysokości 1,1 m, a jego szerokość wynosi 1,2 m. Kombajn chodnikowy zamodelowano w postaci prostopadłościanu o wymiarach: długość – 7,47 m, szerokość – 1,645 m, wysokość 1,65 m.

Analizę przeprowadzono wykorzystując modele fizyczne  $k - \epsilon$  *standard* oraz *species transport*, dla których zdefiniowano geometryczne warunki początkowe oraz warunki brzegowe.

Jako warunek brzegowy typu „inlet“ (*velocity-inlet*) przyjęto stałe pole prędkości strumienia powietrza tłoczonego przez lutniociąg do drążonego wyrobiska korytarzowego. Założono, że strumień powietrza tłoczonego przez lutniociąg dla analizowanych wariantów ma wartość: 25 m/s, 30 m/s, 35m/s oraz 40 m/s.

Dla analizowanego modelu warunek brzegowy typu „wylot” został zdefiniowany jako „outlet“ (*pressure-outlet*), natomiast warunek brzegowy typu „wall” zdefiniowano jako nieprzepuszczalny, dla którego chropowatość powierzchni odpowiadała wysokości 0,15 m.

Założono, że udział tlenu w strumieniu powietrza doprowadzanym przez lutniociąg wynosi 21%.

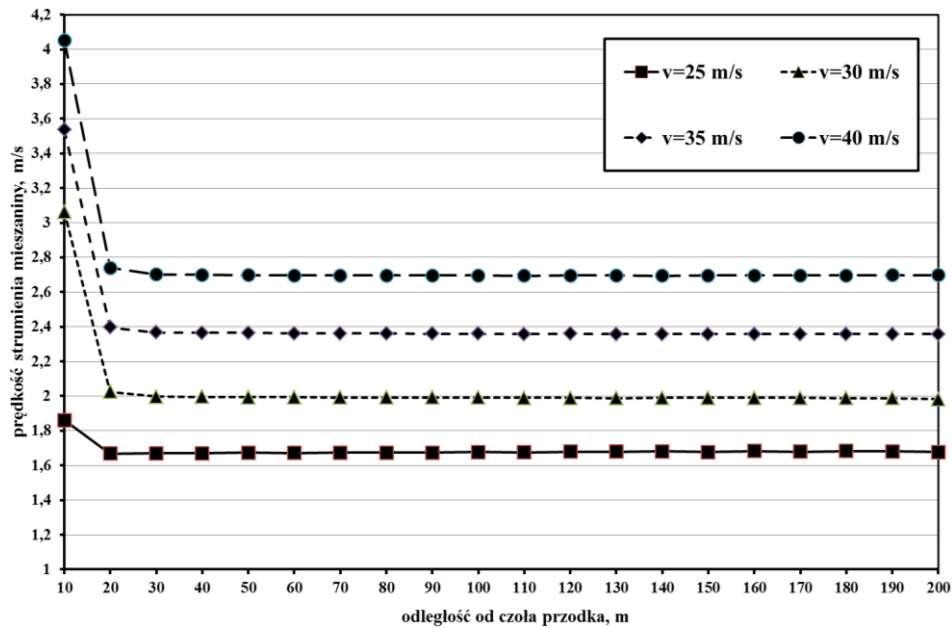
Przy modelowaniu wydzielania się metanu z czoła drążonego chodnika przyjęto, że metanowość bezwzględna wynosi  $0,084 \text{ m}^3/\text{s}$ . Czas analizy objął 600 sekund.

Opracowany model umożliwił rejestrację stężenia gazów w strumieniu powietrza, a także zmiany jego parametrów fizycznych w zależności od prędkości strumienia powietrza doprowadzanego przez lutniociąg do przodka drążonego wyrobiska.

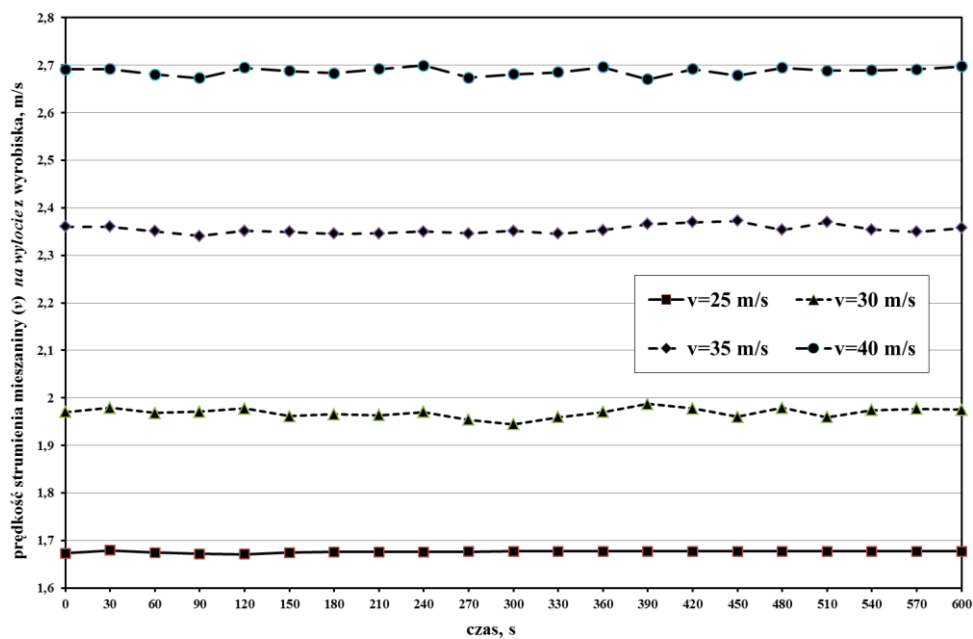
### Wyniki analizy

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono charakterystyki zmian prędkości strumienia mieszanki powietrza i metanu przepływającej przez analizowane wyrobisko oraz rozkłady stężenia metanu w tym wyrobisku.

Na rysunku 4 przedstawiono wartości prędkości strumienia mieszanki przepływającej przez drążone wyrobisko przewietrzane lutniociągiem tłoczącym po czasie 600 sekund, a na rysunku 5 –średnie wartości prędkości strumienia mieszanki *na wylocie* z drążonego wyrobiska korytarzowego dla różnych wartości prędkości ( $v$ ) strumienia powietrza tłoczonego przez lutniociąg w funkcji czasu analizy.

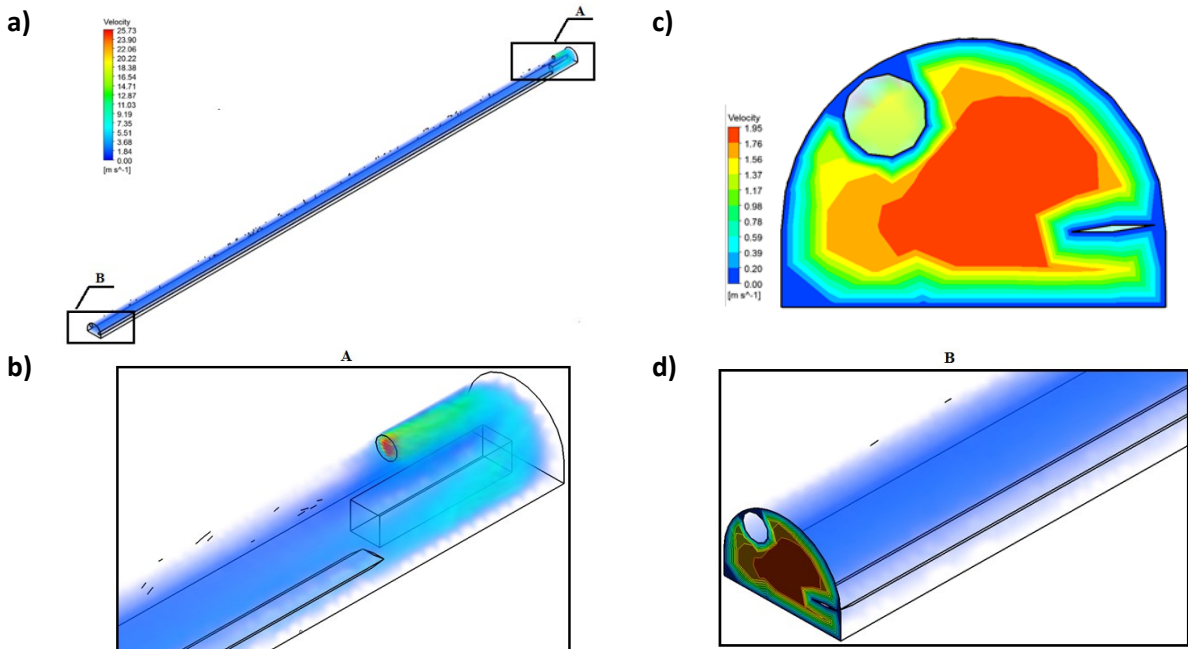


Rys. 4 Rozkład prędkość strumienia mieszaniny ( $v$ ) wzdłuż wyrobiska po czasie analizy 600 sekund dla różnych prędkości wylotowych strumienia powietrza z lutniociągu

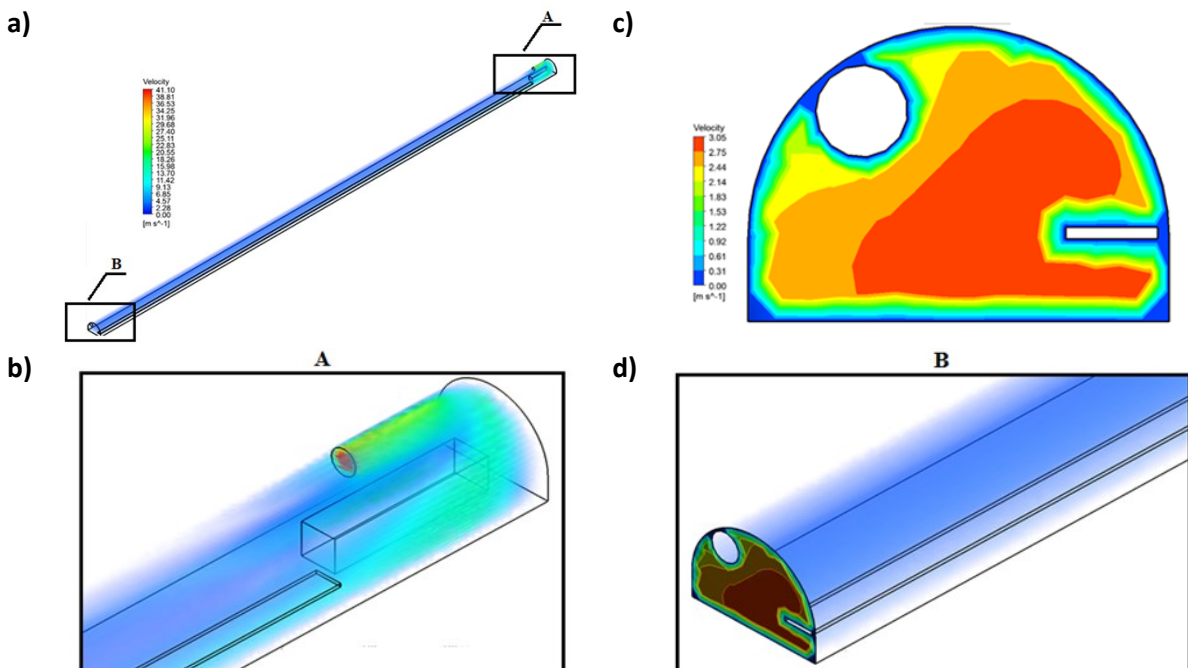


Rys. 5 Średnia prędkości strumienia mieszaniny na wylocie z drążonego wyrobiska korytarzowego dla różnych wartości prędkości ( $v$ ) strumienia powietrza tłoczonego przez lutniociąg w funkcji czasu analizy

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono rozkłady wektorów prędkości mieszaniny dla analizowanego wyrobiska dla prędkości na wylocie z lutniociągu równej 25 m/s i 40 m/s.



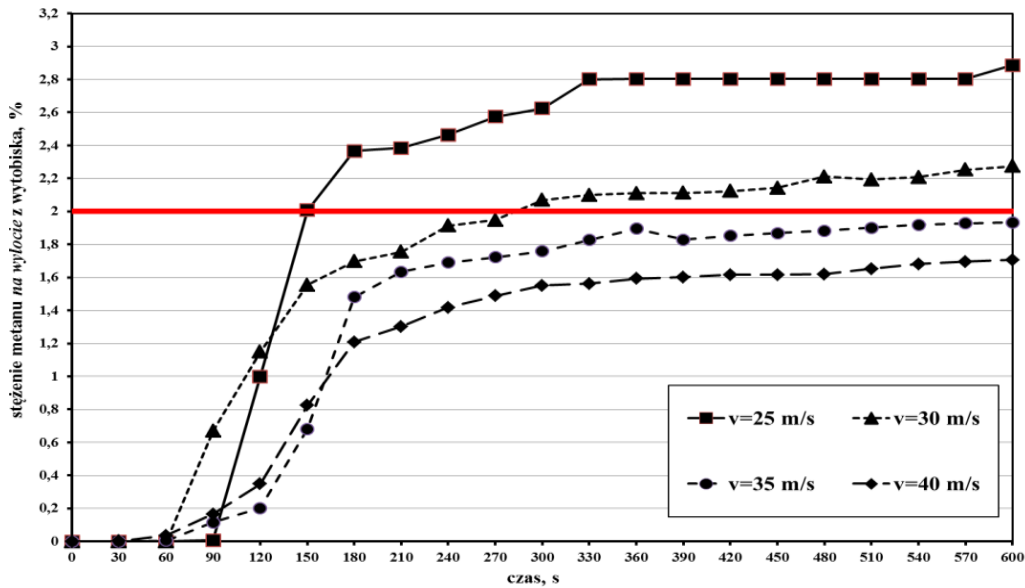
Rys. 6 Rozkłady prędkości mieszanki powietrza i metanu w wyrobisku po 600 sekundach analizy dla prędkości strumienia powietrza *na wylocie* z lutniociągu wynoszącej 25 m/s  
 a – rozkład prędkości w całym wyrobisku, b – rozkład prędkości w ślepyim przodku,  
 c – rozkład prędkości *na wylocie* z wyrobiska, d – rozkład prędkości w odcinku wylotowym z wyrobiska



Rys. 7 Rozkłady prędkości mieszanki powietrza i metanu w wyrobisku po 600 sekundach analizy dla prędkości strumienia powietrza *na wylocie* z lutniociągu wynoszącej 40 m/s  
 a – rozkład prędkości w całym wyrobisku, b – rozkład prędkości w ślepyim przodku,  
 c – rozkład prędkości *na wylocie* z wyrobiska, d – rozkład prędkości w odcinku wylotowym z wyrobiska

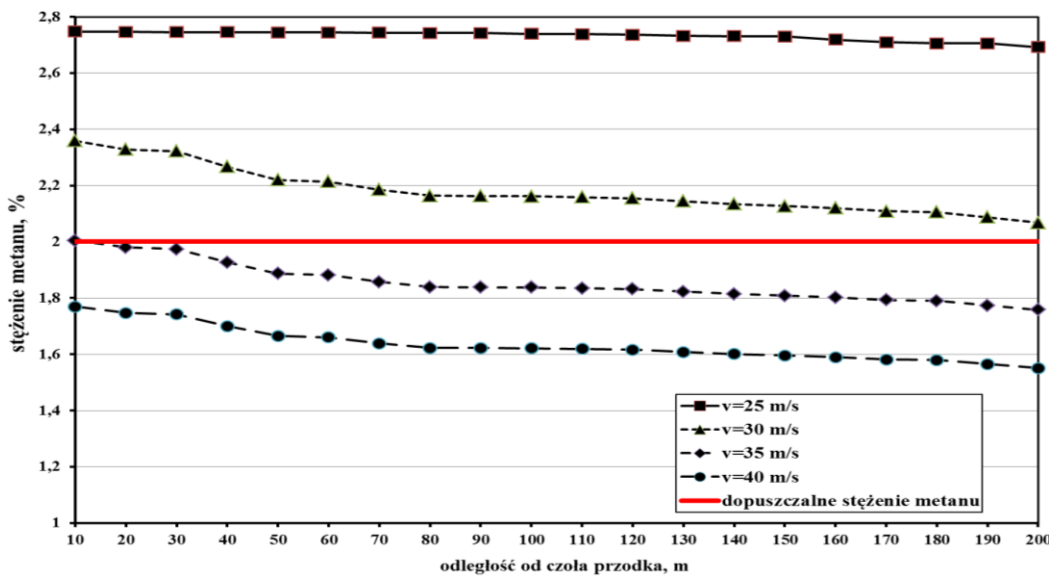
Na rysunku 8 przedstawiono zmiany stężenia procentowego metanu w mieszaninie z powietrzem *na wylocie* z wyrobiska w funkcji czasu analizy, a na rysunkach 9 i 10 w funkcji odległości od czoła przodka.



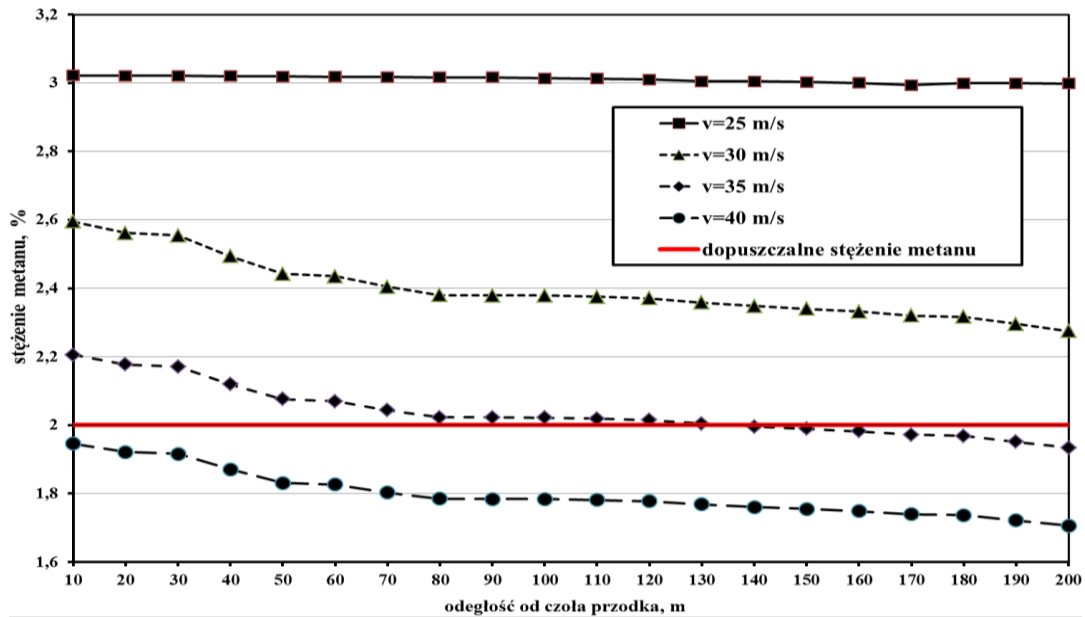


Rys. 8 Stężenie metanu *na wylocie* z drążonego wyrobiska korytarzowego dla różnych wartości prędkości (*v*) strumienia powietrza tłoczonego przez lutniociąg w funkcji czasu analizy

Przeprowadzona analiza wykazała, iż dopuszczalne stężenie metanu *na wylocie* z wyrobiska po 600 sekundach, nie zostało przekroczone dla prędkości strumienia *na wylocie* z lutniociągu wynoszących 35 m/s i 40 m/s. Natomiast dla wartości prędkości wynoszących 25 m/s i 30 m/s wartość dopuszczalna stężenia metanu zostaje przekroczona tym szybciej, im prędkość strumienia powietrza tłoczonego przez lutniociąg jest mniejsza.



Rys. 9 Rozkład stężenia metanu wzdłuż wyrobiska po czasie analizy 300 sekund dla różnych prędkości *wylotowych* strumienia powietrza z lutniociągu

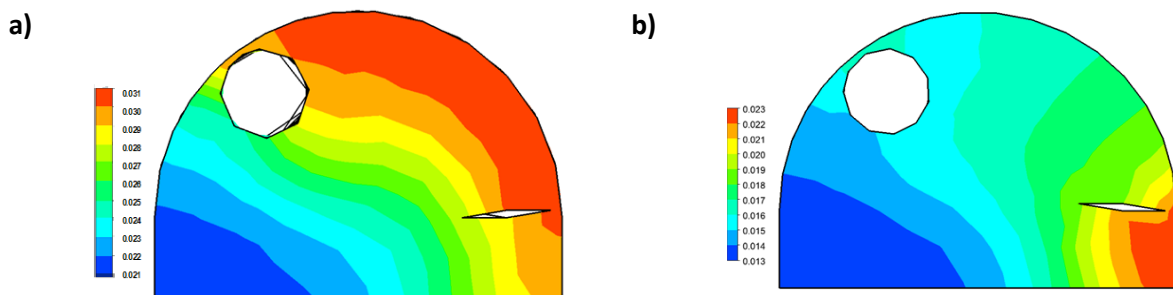


Rys. 10 Rozkład stężenia metanu wzdłuż wyrobiska po czasie analizy 600 sekund dla różnych prędkości wylotowych strumienia powietrza z lutniociągu

Najwyższe stężenia metanu po 300 i 600 sekundach analizy, występują w przodku drążonego chodnika (z którego wydziela się metan). Im odległość od czoła przodka jest większa, tym stężenie metanu w wyrobisku jest mniejsze. Zależność ta zachodzi dla wszystkich rozpatrywanych prędkości strumienia powietrza tłoczonego do przodka. Jednak tylko dla prędkości strumienia powietrza wynoszącej 40 m/s *na wylocie* z lutniociągu, wartość stężenia metanu w wyrobisku nie przekracza dopuszczalnej wartości 2% po czasie analizy 300 i 600 sekund.

Można więc przyjąć, iż wraz ze wzrostem czasu wydzielania się metanu z czoła przodka do wyrobiska rośnie jego stężenie w całym wyrobisku. W zakresie przeprowadzonej analizy stężenia metanu w wyrobisku, jego wartość nie przekroczyła wartości dolnej granicy wybuchowości, wynoszącej 5%.

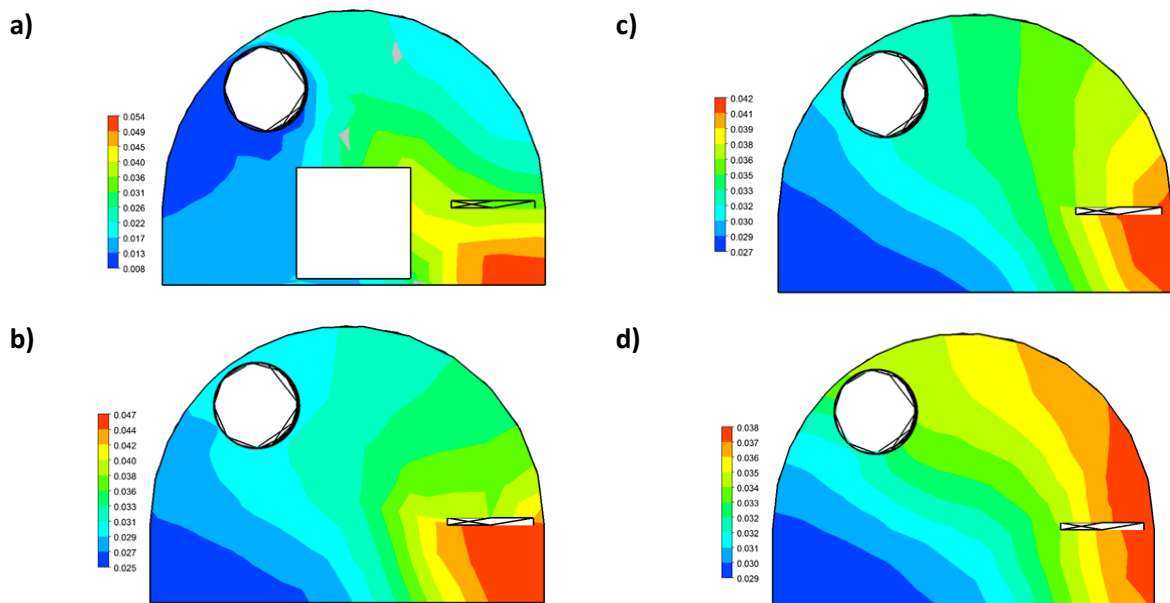
Na rysunku 11 przedstawiono rozkłady stężenia metanu w mieszaninie z powietrzem na wylocie z analizowanego wyrobiska (200 m od czoła przodka z którego wydziela się metan) dla strumienia powietrza doprowadzanego lutniociągiem do tego wyrobiska z prędkością równą 25 m/s (rys. 11a) i 40 m/s (rys. 11b).



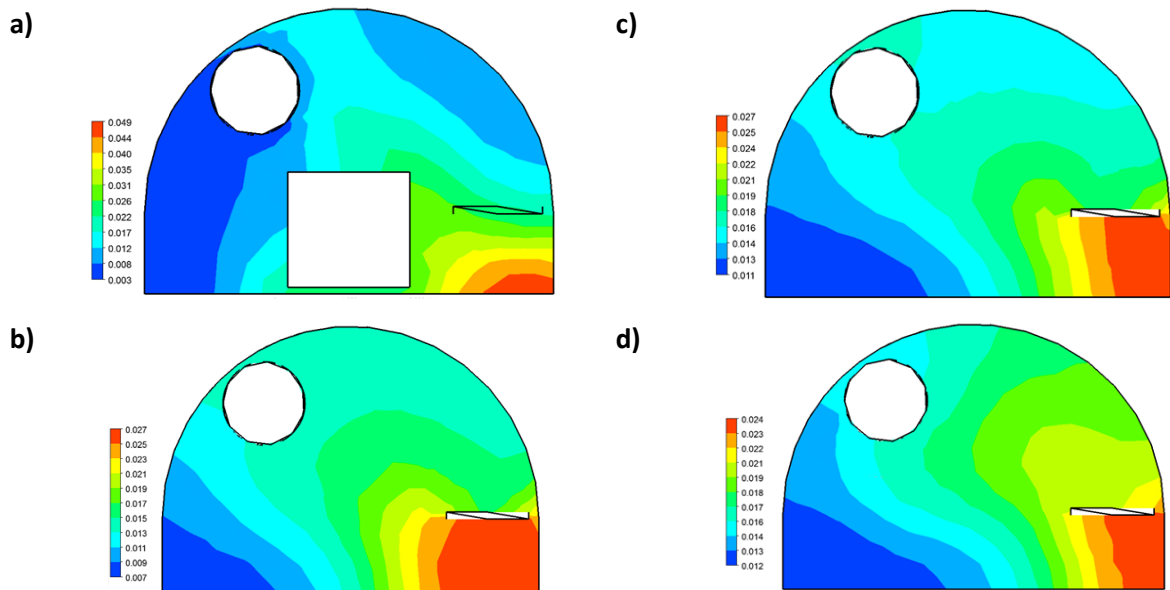
Rys. 11 Rozkłady stężenia metanu na wylocie z wyrobiska po czasie analizy 600 sekund  
 a – rozkład dla prędkości *na wylocie* z lutniociągu 25 m/s,  
 b - rozkład dla prędkości *na wylocie* z lutniociągu 40 m/s

Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono rozkłady stężenia metanu w mieszaninie z powietrzem w odległości 6, 50, 100 i 150 metrów od czoła przodka dla strumienia powietrza

doprowadzanego lutniociągiem do tego wyrobiska z prędkością równą 25 m/s (rys. 12) i 40 m/s (rys. 13).



**Rys. 12** Rozkłady stężenia metanu w przekroju poprzecznym wyrobiska po czasie analizy 600 sekund dla prędkości na wylocie z lutniociągu 25 m/s  
(a – w odległości 6 m od czoła przodka, b – w odległości 50 m od czoła przodka, c – w odległości 100 m od czoła przodka, d – w odległości 150 m od czoła przodka)



**Rys. 13** Rozkłady stężenia metanu w przekroju poprzecznym wyrobiska po czasie analizy 600 sekund dla prędkości na wylocie z lutniociągu 40 m/s  
a – w odległości 6 m od czoła przodka, b – w odległości 50 m od czoła przodka, c – w odległości 100 m od czoła przodka, d – w odległości 150 m od czoła przodka

Przeprowadzona analiza wykazała, że prędkość strumienia powietrza tłoczonego przez lutniociąg do wyrobiska, ma istotny wpływ na rozkład stężenia metanu wzdłuż badanego wyrobiska oraz w jego przekrojach poprzecznych w zależności od odległości od czoła przodka.

## PODSUMOWANIE

Opracowany i wykorzystany do analizy przepływu strumienia świeżego powietrza i wydzielającego się metanu z czoła przodka w ślepym wyrobisku korytarzowym model umożliwił wyznaczenie rozkładów prędkości strumienia tej mieszaniny oraz stężenia metanu w wyrobisku.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że prędkość strumienia powietrza *na wylocie* z lutniociągu ma istotny wpływ na rozkład prędkości mieszaniny powietrza i metanu w wyrobisku oraz na stężenie metanu w tej mieszaninie. Wraz ze wzrostem prędkości strumienia powietrza *na wylocie* z lutniociągu następuje zmniejszenie stężenia metanu wzdłuż całego badanego wyrobiska. Jest to wynikiem wzrostu wydatku objętościowego świeżego powietrza wpływającego do wyrobiska.

Wartość prędkości strumienia powietrza tłoczonego do przodka wyrobiska ma także wpływ na rozkład stężenia metanu wzdłuż badanego wyrobiska oraz w jego przekrojach poprzecznych. Uzyskane wyniki potwierdzają, iż metan jako gaz lżejszy od powietrza gromadzi się przy stropie wyrobiska. Przy mniejszych wartościach prędkości strumienia powietrza tłoczonego do przodka wyrobiska zarejestrowano także znacznie wzrosty stężenia metanu pod przenośnikiem taśmowym, których wartości były wyższe niż przy stropie wyrobiska. W takich przypadkach koniecznym wydaje się kontrolowanie stężenia metanu także pod przenośnikiem taśmowym.

Na podstawie uzyskanych wyników można w sposób dokładny określić wartość prędkości strumienia mieszaniny świeżego powietrza i metanu oraz stężenia metanu w analizowanym wyrobisku w dowolnej chwili czasu analizy oraz miejscu w wyrobisku. Ma to szczególnie istotne znaczenie przy wyznaczaniu w wyrobiskach stref, w których stężenie metanu może przekraczać dopuszczalną jego wartość.

Uzyskane wyniki jednoznacznie dowodzą, iż metody numeryczne 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. Bielewicz T., Prus B., Honysz J.: Górnictwo Część I. Wydawnictwo Śląsk 1993.
3. Branny M.: Computer Simulation of flow of air and methane mixture in the longwall-return crossing zone, Archives of Mining Sciences, 51, Issue 1, 2006.
4. Elsner J. W.: Turbulencja przepływów. Wyd. PWN, Warszawa 1987.
5. Kabiesz J. (red): Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2014.
6. Krytoń H.: Przegląd i weryfikacja metod prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych drażonych kombajnami w kopalniach węgla kamiennego. Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko, 4/2007.
7. Kurnia J. C., Sasmito A. P., Mujumdar A. S.: Computational study of thermal management in underground coal mines: effect of operating ventilation parameters. Singapore: National University of Singapore, 2012.
8. Kurnia J. C., Sasmito A. P., Mujumdar A. S.: CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces. Applied Mathematical Modelling 38/2014. DOI:10.1016/j.apm.2013.11.067
9. Kurnia J. C., Sasmito A. P., Mujumdar A. S.: Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines. Tunnelling and Underground Space Technology 42/2014. DOI: 0.1016/j.tust.2014.03.009

10. Pindór T., Preisner L. (red): Zagrożenia naturalne i techniczne a zarządzanie ryzykiem w górnictwie węgla kamiennego. Wydawnictwa AGH, Kraków 2009.
11. Reddy, A. C.: Development of a Coal Reserve GIS Model and Estimation of the Recoverability and Extraction Costs. Master of Science Thesis, Department of Mining Engineering, West Virginia University 2009.
12. Ren T. X., Edwards J. S., Józefowicz R. R.: CFD Modeling of methane flow around longwall faces, Proceedings of 6th International Mine Ventilation Congress, Pittsburg, 1997.
13. Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych, Dz. U. Nr 139 poz. 1169 z dnia 28 czerwca 2002 r.
14. Szlązak N., Obracaj D., Borowski M.: Optymalny dobór parametrów wentylacji lutniowej dla wyrobisk korytarzowych przy wykorzystaniu programu komputerowego AGHWEN. Kwartalnik AGH Górnictwo, r. 25, z. 3, 2001.
15. Szlązak N., Szlązak J., Tor A.: Systemy przewietrzania ślepych wyrobisk ślepych w kopalniach węgla kamiennego w warunkach zagrożenia metanowego i pyłowego. Kraków, UWND AGH 2003.
16. Szlązak N., Obracaj D., Borowski M.: Systemy przewietrzania ślepych wyrobisk ślepych w kopalniach węgla kamiennego. Przegląd Górniczy, nr 7–8, 2003.
17. Szlązak N., Obracaj D., Szlązak Ł.: Projektowanie parametrów wentylacji lutniowej w drażonych wyrobiskach podziemnych z wykorzystaniem programu komputerowego AGHWEN-3.0. Górnictwo i Geoinżynieria, r. 29, z. 3/1, Kraków 2005.
18. Sławomirski M. R., Skotniczny P.: Czynniki wpływające na deformację warstwy przyściennej przy statycznym przepływie powietrza nad złożem porowatym oraz ich wpływ na prędkość poślizgu. Część I: Turbulentna warstwa graniczna w sąsiedztwie ścianek chropowatych. Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, Vol. 14, No. 1-4, 2012.
19. Veersteeg K. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. Pearson Education 2007.