

ANALIZA NUMERYCZNA WPLYWU POŻARU EGZOGENICZNEGO W WYROBISKU KORYTARZOWYM NA PARAMETRY STRUMIENIA POWIETRZA PRZEPLYWAJĄCEGO PRZEZ TO WYROBISKO

NUMERICAL ANALYSIS OF INFLUENCE OF EXOGENOUS FIRE IN DOG HEADING ON PARAMETERS OF THE AIR STREAM FLOWING THROUGH THIS HEADING

Magdalena TUTAK
Politechnika Śląska

Streszczenie: Przepływ strumienia powietrza wentylacyjnego przez wyrobisko korytarzowe z ogniskiem pożaru jest przepływem o złożonym charakterze, podczas którego, w wyniku wydzielania się do atmosfery kopalnianej gazów pożarowych, dochodzi do zaburzeń jego przepływu. W artykule przedstawiono analizę numeryczną wpływu pożaru egzogenicznego w wyrobisku korytarzowym na parametry strumienia powietrza wentylacyjnego przepływającego przez to wyrobisko. Badania modelowe przeprowadzono przy wykorzystaniu programu Ansys Fluent, bazującym na metodzie objętości skończonych. Dla przyjętych założeń wyznaczono parametry fizyczne strumienia powietrza przepływającego przez wyrobisko z ogniskiem pożaru, a także zmiany udziałów masowych gazów w tym strumieniu podczas jego przepływu przez analizowane wyrobisko: tlenu oraz tlenku węgla i dwutlenku węgla. W wyniku przeprowadzonej analizy nad ogniskiem pożaru zanotowano lokalny przyrost prędkości i temperatury oraz gwałtowny spadek ciśnienia statycznego. Zaprezentowany w artykule model wyrobiska daje możliwości rozbudowy, a następnie analizy bardziej skomplikowanych zagadnień z zakresu wentylacji wyrobisk górniczych.

Słowa kluczowe: strumień powietrza, badania modelowe, Ansys Fluent, ognisko pożaru

1. WSTĘP

Jednym z podstawowych zagrożeń występujących w górnictwie węgla kamiennego jest zagrożenie pożarowe. Potwierdza ta liczba zarejestrowanych w ostatnich latach pożarów w podziemnych wyrobiskach górniczych. W latach 2000-2013 doszło łącznie do 91 pożarów w górnictwie węgla kamiennego, z czego 70 stanowiły pożary endogeniczne (powstałe wskutek samozapalenia się węgla), a 21 – pożary egzogeniczne (powstałe w wyniku zapalenia się materiału palnego, np. drewna, oleju, taśmy przenośników, przewodów elektrycznych itp.). W latach 1989-2007 doszło do piętnastu zapaleń taśmy przenośnika, w wyniku których śmierć poniosło trzech pracowników kopalń węgla kamiennego [12].

Pod pojęciem pożaru podziemnego, zdefiniowanego w rozporządzeniu Ministra Gospodarki w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych [7], należy rozumieć wystąpienie w wyrobisku podziemnym otwartego ognia, tj. żarzącej lub palącej się płomieniem otwartym substancji, jak również utrzymywanie się w powietrzu kopalnianym dymów lub utrzymywanie się w przepływowym prądzie powietrza stężenia tlenu węgla powyżej 0,0026 %. Warunek dotyczący stężenia tlenu węgla nie obejmuje przypadków, gdy takie jego stężenie jest związane ze stosowaniem dopuszczonych procesów technologicznych w wyrobiskach górniczych.

Požary endogeniczne i egzogeniczne stanowią duże zagrożenie dla załogi pracującej w wyrobiskach górniczych oraz powodują straty ekonomiczne dla zakładów górniczych. Szczególnie niebezpieczne są pożary egzogeniczne, które rozwijają się bardzo szybko. W przypadku pożarów endogenicznych czas ich inkubacji jest znacznie dłuższy, co stwarza

możliwość podjęcie działań profilaktycznych, niedopuszczających do jego powstania, a następnie rozwoju [2].

Wystąpienie pożaru w podziemnym wyrobisku górniczym zaburza proces jego prawidłowego przewietrzania [4, 5]. Strumień powietrza wentylacyjnego, staje się w tym przypadku źródłem tlenu podtrzymującym płomień oraz nośnikiem dymu i gazów przemieszczanych do kolejnych wyrobisk górniczych [11].

Prowadzenie badań związanych z przepływem strumienia powietrza przez wyrobiska w czasie pożaru w warunkach in situ jest trudne oraz kosztowne. W celu badania zjawisk występujących w czasie pożaru konieczne staje się wykorzystanie innych metod umożliwiających ich analizę.

Takie możliwości stwarzają badania modelowe przepływów oparte o symulacje numeryczne. W ostatnich latach metody te coraz częściej stosuje się do rozwiązywania zagadnień związanych z przewietrzaniem wyrobisk górniczych [3, 6, 9, 10, 11].

W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej przepływającego przez wyrobisko korytarzowe powietrza podczas pożaru taśmy przenośnika.

Głównym celem badań było wyznaczenie pól prędkości, ciśnienia oraz temperatury powietrza w analizowanym wyrobisku. Opracowany model umożliwił także określenie zmian stężenia tlenu w strumieniu powietrza oraz tlenku węgla i dwutlenku węgla emitowanych do atmosfery wyrobiska podczas pożaru.

Analizę przeprowadzono wykorzystując metodę objętości skończonych. Opracowany model przepływu powietrza przez wyrobisko, w którym doszło do powstania pożaru stwarza duże możliwości rozbudowy i symulacji bardziej skomplikowanych zagadnień związanych z procesami przepływu powietrza przez wyrobiska górnicze.

2. MODEL MATEMATYCZNY PRZEPLYWU

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 [8].

Programy bazujące na numerycznej mechanice płynów umożliwiają wyznaczenie parametrów fizycznych przepływu strumienia powietrza lub płynu (rozkład pola prędkości, rozkład pola ciśnienia), ruchu ciepła (pole temperatury), a także przemian fizyko-chemicznych.

Do modelowania zagadnienia przepływu powietrza przez górnicze wyrobisko korytarzowe w którym doszło do pożaru taśmy przenośnikowej, wykorzystano program Ansys Fluent. 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
ρ	-	gęstość, kg/m ³
t	-	czas, s
S_m	-	dodatkowe źródło masy, zmienne lub stałe, kg/s

- równanie zachowania pędu

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

gdzie:

- p - ciśnienie statyczne, Pa
- $\bar{\tau}$ - tensor naprężeń, Pa
- \vec{g} - przyspieszenie grawitacyjne, m/s^2
- \vec{F} - wektor sił zewnętrznych, N

- równanie zachowania energii

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

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
- \vec{J}_i - strumień dyfuzji, $kg/(m^2 \cdot s)$
- S_h - wolumetryczne źródło ciepła, W/m^3

Do analizy wykorzystano model turbulencji „*k-ε realizable*” należący do modeli półempirycznych, charakteryzujących się parametrami wyznaczonymi na podstawie badań doświadczalnych. Model ten opisuje składowe tensora naprężeń turbulentnych Reynoldsa według hipotezy Boussinesqa [8]. Zgodnie z tą hipotezą naprężenia turbulentne są proporcjonalne do prędkości deformacji i wyrażone są za pomocą dynamicznego współczynnika lepkości turbulencji μ_t . W równaniu na składowe tensora naprężenia występują wielkości k oraz ε . W celu ich wyznaczenia konieczne jest wprowadzenie dodatkowych dwóch równań transportu w postaci [1]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4)$$

oraz

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (5)$$

gdzie:

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

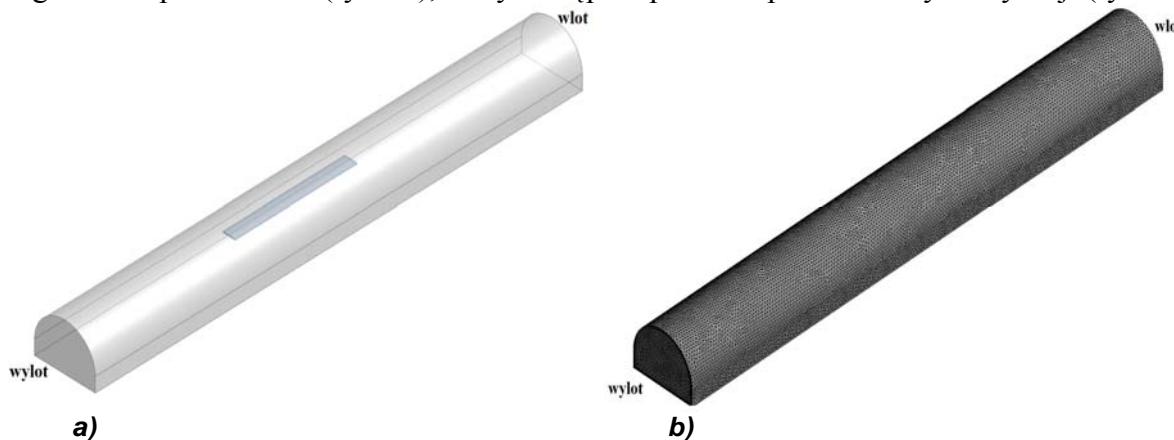
gdzie:

- μ_t - dynamiczny współczynnik lepkości turbulencji, Pa·s
- k - energia kinetyczna turbulencji, $m^2 \cdot s^{-2}$
- ε - dyssypacja energii kinetycznej turbulencji, $m^2 \cdot s^{-3}$

Wykorzystany program umożliwia także modelowanie zjawisk, w których zachodzi mieszanie i transport substancji chemicznych (np. wydzielających się w czasie pożaru gazów) poprzez rozwiązywanie równań opisujących źródła konwekcji, dyfuzji oraz reakcji chemicznych dla każdego elementu. W celu przeprowadzenia tej analizy wykorzystano model „*species transport*”, w którym uwzględniono dodatkowe parametry, takie jak: udział masowy i-tego składnika mieszaniny oraz szybkość jego powstawania [1].

3. MODEL DYSKRETNY PRZEPLYWU

W celu przeprowadzenia analizy opracowano model geometryczny wyrobiska wraz z fragmentem przenośnika (rys. 1a), który następnie poddano procesowi dyskretyzacji (rys. 1b).



Rys. 1 Model geometryczny (a) i dyskretny (b) wyrobiska korytarzowego z fragmentem przenośnika

Przyjęto, że długość wyrobiska wynosi 40 m, jego przekrój poprzeczny $15,32 \text{ m}^2$, natomiast powierzchnia przenośnika, będącego źródłem pożaru wynosi 10 m^2 .

W procesie dyskretyzacji zagęszczono siatkę w rejonie warstwy przyściennej i modelu fragmentu przenośnika. Przyjęto, że powietrze jest płynem nieściśliwym o temperaturze na wlocie wynoszącej $293,0 \text{ °K}$.

Jako warunek brzegowy typu „inlet“ przyjęto stałe pole prędkości strumienia powietrza oraz stałe wartości kinetycznej energii turbulencji i szybkości jej dyssypacji, które wyznaczono przy założeniu 5-procentowej intensywności turbulencji na wlocie. W przekroju wlotowym dla analizowanego wyrobiska zadano równomierne pole prędkości o wartości $2,0 \text{ m/s}$. Dla analizowanego modelu warunek brzegowy typu „wylot” został zdefiniowany jako „outlet“ (presssure-outlet), natomiast ściany zdefiniowano jako nieprzepuszczalne, których chropowatość powierzchni odpowiadała wysokości $0,2 \text{ m}$. Obliczenia wykonano dla ciśnienia, którego wartość odniesienia wynosiła 101325 Pa .

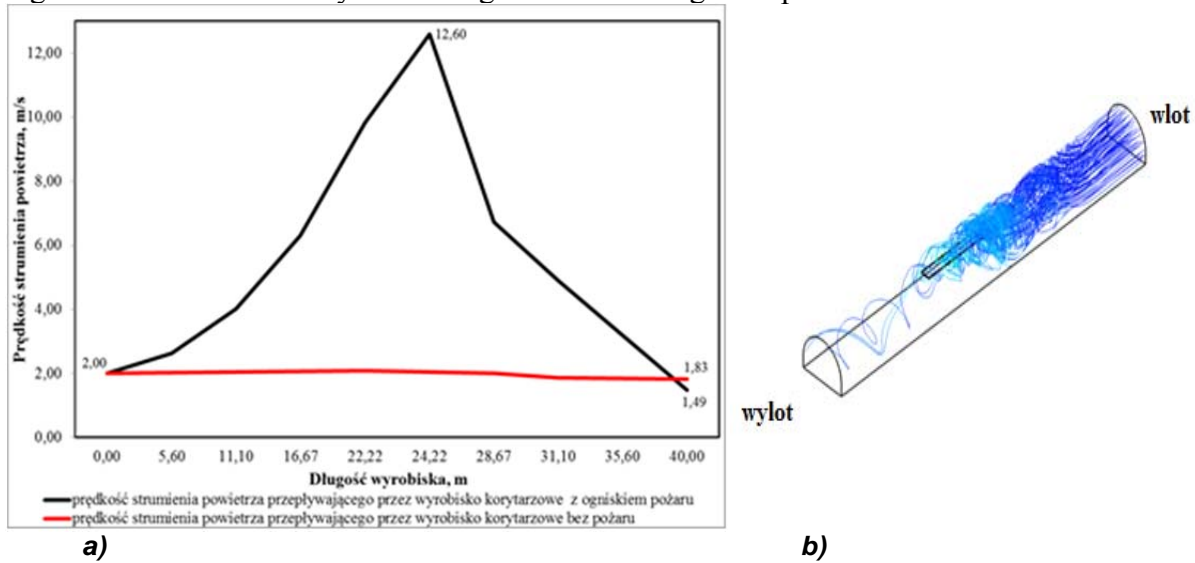
Przy modelowaniu pożaru, przyjęto, że źródło ciepła (taśma przenośnika) uwalnia do otoczenia strumień masowy gazów, zawierający produkty powstałe w wyniku spalania. Jako materiał palny wybrano gumę o następujących parametrach: gęstość 1200 kg/m^3 , ciepło właściwe $1,4 \text{ kJ/kgK}$, przewodność cieplna $0,17 \text{ W/mK}$.

Założono także, że na wlocie do wyrobiska udział masowy tlenu w powietrzu wynosi 21% , natomiast gazami emitowanymi do atmosfery w wyniku pożaru są tlenek węgla i dwutlenek węgla. Temperaturę zapłonu taśmy przenośnika ustalono na 1200 °K . Tak opracowany model poddano analizie numerycznej.

4. WYNIKI ANALIZY

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono rozkłady zmian pól prędkości, temperatury i ciśnienia strumienia powietrza przepływającego przez wyrobisko korytarzowe z ogniskiem pożaru. Określono także zmiany stężenia tlenu w strumieniu powietrza oraz tlenku węgla i dwutlenku węgla emitowanych ze źródła pożaru do atmosfery wyrobiska. Wyznaczone parametry fizyczne strumienia powietrza oraz udziały masowe poszczególnych gazów w wyrobisku z ogniskiem pożaru porównano z ich odpowiednimi wartościami uzyskanymi w czasie przepływu powietrza przez wyrobisko bez pożaru.

Na rysunku 2a przedstawiono rozkład prędkości strumienia powietrza wzdłuż wyrobiska korytarzowego w czasie pożaru taśmy przenośnika, a na rysunku 2b charakterystyki prędkości tego strumienia wzdłuż wyrobisk z ogniskiem i bez ogniska pożaru.

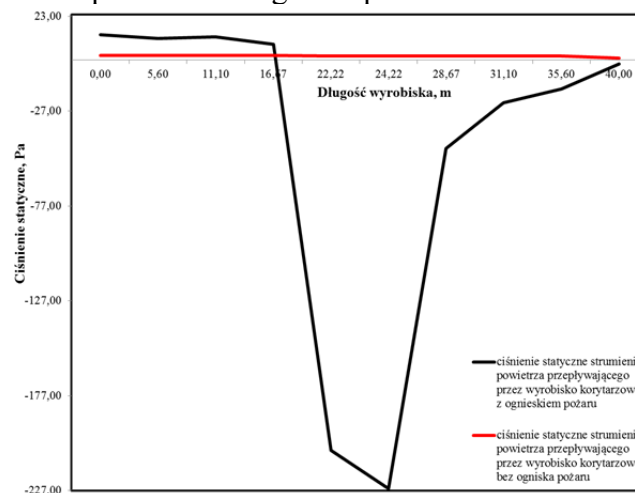


Rys. 2 Charakterystyki prędkości (a) oraz trajektoria cząstek powietrza przepływającego przez wyrobisko korytarzowe podczas pożaru taśmy przenośnika (b)

Z przeprowadzonej analizy wynika, że lokalny przyrost prędkości strumienia powietrza występuje w strefie nad ogniskiem pożaru. Związane to jest z emitowanym do atmosfery strumieniem masowym gazów podczas pożaru, który powoduje lokalne zaburzenie przepływu powietrza. Strumień powietrza wentylacyjnego wciągany jest do strumienia konwekcyjnego nad ogniskiem pożaru, a następnie w wyniku konwekcji przemieszczany w kierunku stropu wyrobiska. Maksymalną wartość prędkości, która wynosi 12,6 m/s, strumień ten osiąga w połowie długości przenośnika taśmowego.

W przypadku przepływu strumienia powietrza przez wyrobisko korytarzowe bez ogniska pożaru wartość prędkości ulega niewielkiemu spadkowi (do 1,83 m/s na wylocie) wskutek występowania oporów lokalnych.

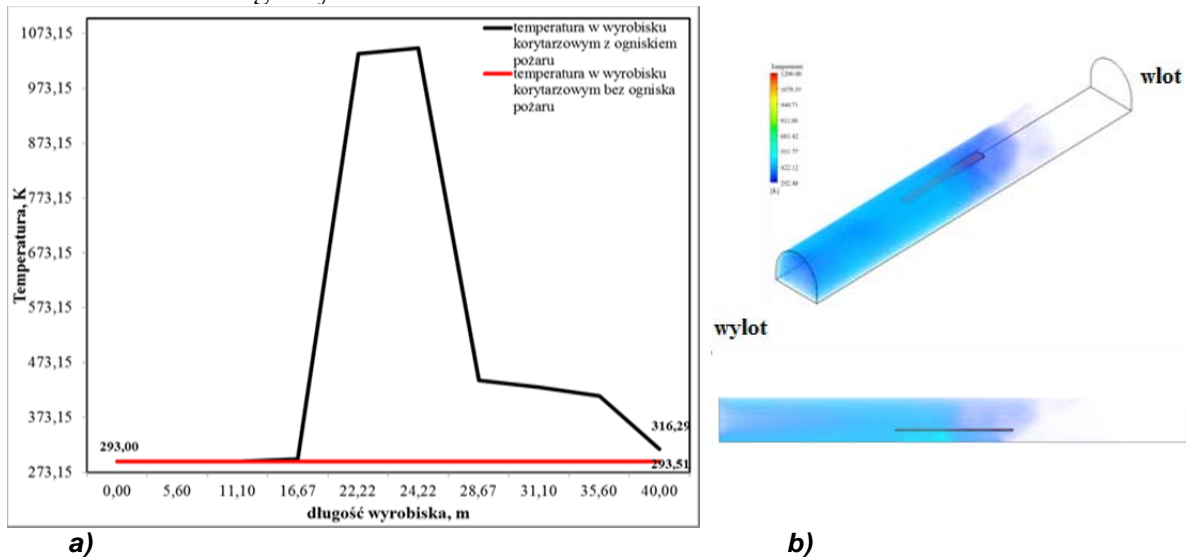
Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyki ciśnienia statycznego wzdłuż wyrobiska korytarzowego z ogniskiem pożaru i bez ogniska pożaru.



Rys. 3 Charakterystyki ciśnienia statycznego powietrza przepływającego przez wyrobisko korytarzowe z ogniskiem i bez ogniska pożaru

Analizując uzyskane charakterystyki można stwierdzić, że gwałtowny spadek ciśnienia statycznego występuje w strefie pożaru tworząc strefę podciśnienia. W przypadku przepływu strumienia powietrza przez wyrobisko bez ogniska pożaru można zaobserwować niewielki, liniowy spadek ciśnienia statycznego wzdłuż jego długości (rys. 3).

Na rysunku 4a przedstawiono charakterystyki temperatury, a na rysunku 4b jej rozkład wzdłuż analizowanego wyrobiska.

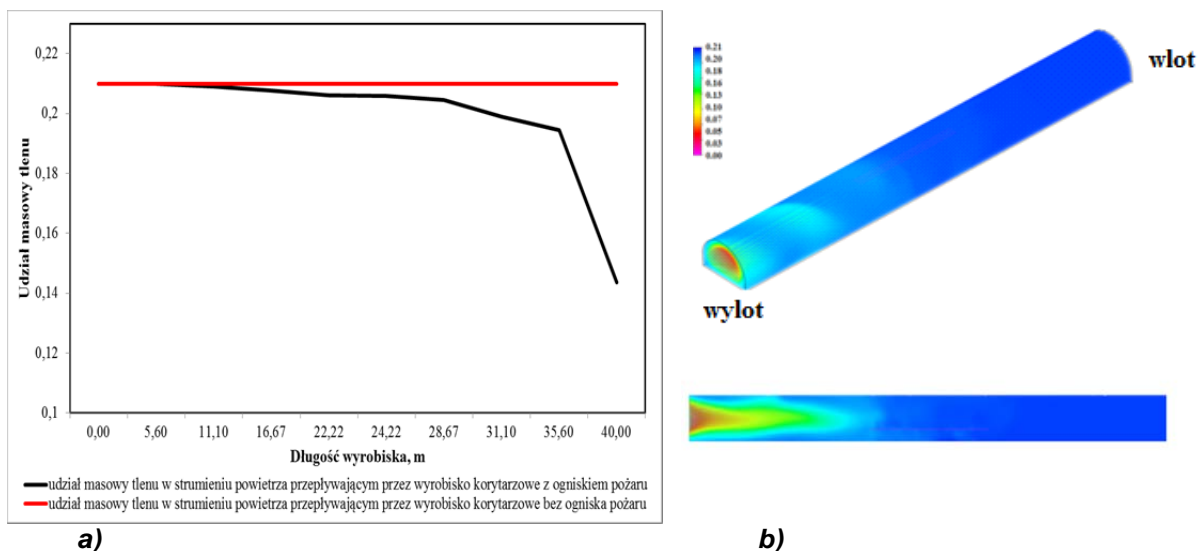


Rys. 4 Charakterystyki temperatury (a) oraz rozkład temperatury (b) w wyrobisku korytarzowym podczas pożaru taśmy przenośnika.

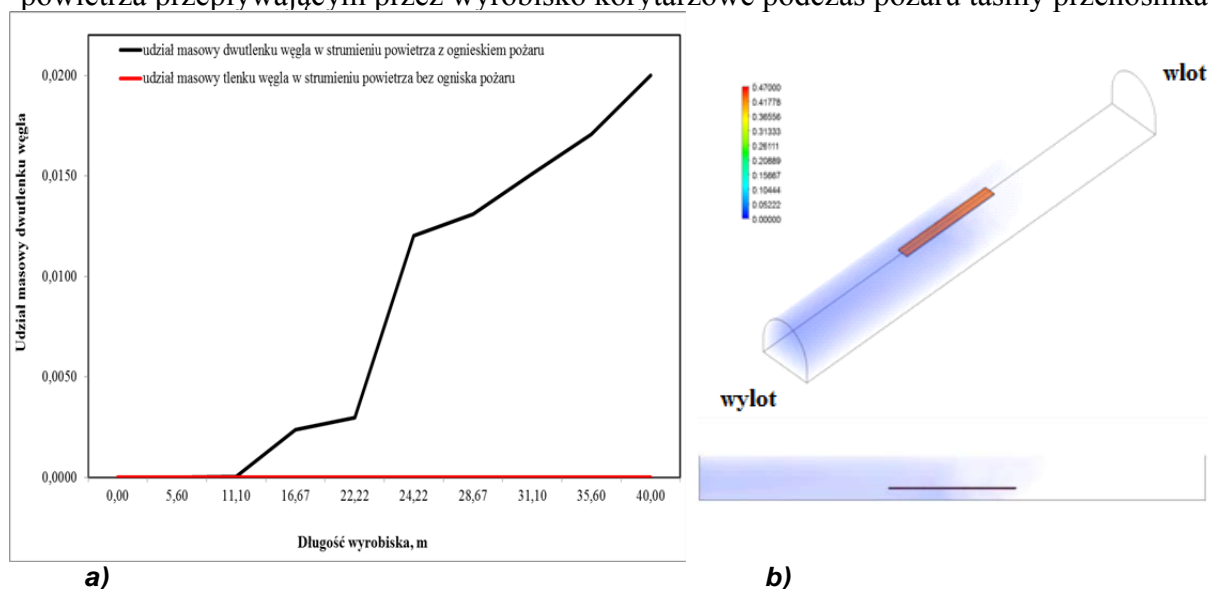
Przeprowadzona analiza wykazała, że gwałtowny wzrost temperatury występuje na odcinku wyrobiska z palącą się taśmą przenośnika. W wyniku emisji ciepła do atmosfery na wylocie z wyrobiska temperatura strumienia powietrza wynosi około 3160K, co oznacza jej wzrost o ponad 20 °K. W wyniku wystąpienia pożaru, temperatura powietrza nad samym przenośnikiem wzrasta do 1050 °K.

W przypadku przepływu strumienia powietrza przez wyrobisko bez ogniska pożaru jego temperatura na wylocie wzrasta o ok. 0,5 °K.

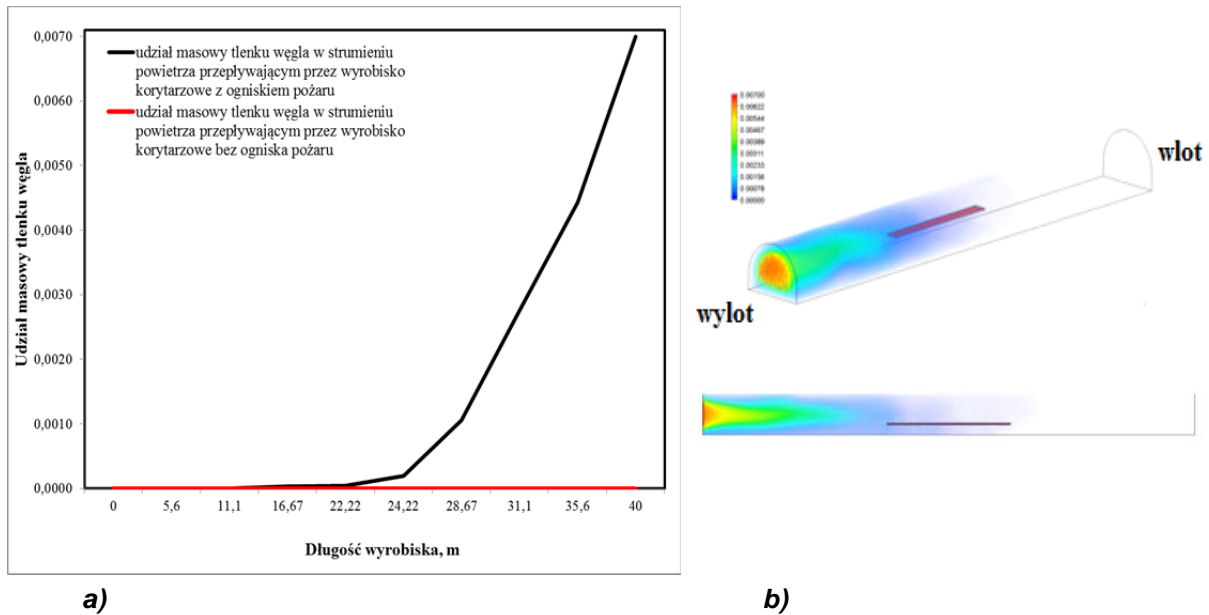
Na rysunkach 5a, 6a i 7a przedstawiono charakterystyki udziału masowego tlenu, tlenku węgla i dwutlenku węgla w wyrobisku korytarzowym z ogniskiem pożaru. Na rysunkach 5b, 6b oraz 7b przedstawiono uzyskane rozkłady udziału masowego tych gazów w formie graficznej.



Rys. 5 Charakterystyki udziału masowego tlenu (a) oraz jego rozkład (b) w strumieniu powietrza przepływającym przez wyrobisko korytarzowe podczas pożaru taśmy przenośnika



Rys. 6 Charakterystyki udziału masowego dwutlenku węgla (a) oraz jego rozkład (b) w strumieniu powietrza przepływającym przez wyrobisko korytarzowe podczas pożaru taśmy przenośnika



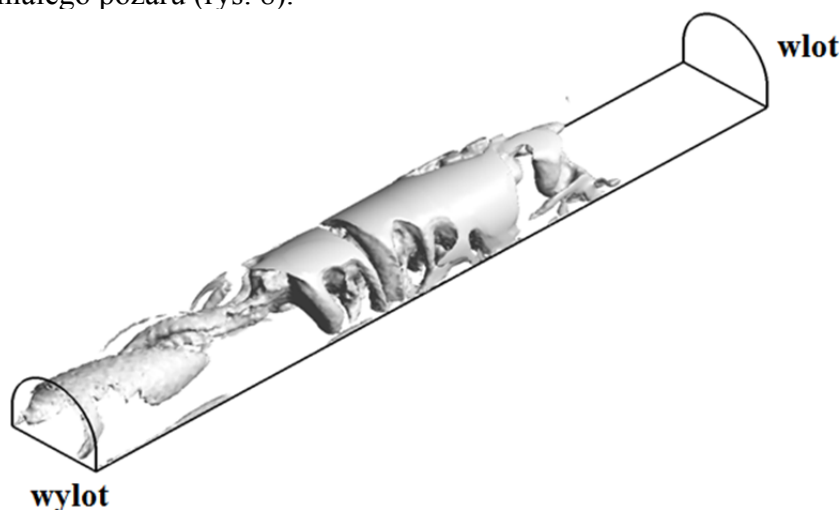
Rys. 7 Charakterystyki udziału masowego tlenku węgla (a) oraz jego rozkład (b) w strumieniu powietrza przepływającym przez wyrobisko korytarzowe podczas pożaru taśmy przenośnika

W analizowanym modelu, na wlocie do wyrobiska, przyjęto zerowe stężenia tlenku węgla i dwutlenku węgla w strumieniu powietrza. W wyniku emisji tych gazów do atmosfery podczas pożaru ich stężenie na wylocie wyniosło: dla tlenku węgla 0,7 %, a dla dwutlenku węgla 2 %.

Stężenie tlenu w przepływającym strumieniu powietrza przez analizowane wyrobisko z ogniskiem pożaru spadło z 21 % do 14,3 %.

W przypadku przepływu strumienia powietrza przez wyrobisko bez ogniska pożaru, udział masowy tlenu, tlenku węgla i dwutlenku węgla nie ulega zmianom (rys. 5a, 6a, 7a).

W wyniku przeprowadzonej analizy wyznaczono także strefę zadymienia wyrobiska w wyniku zaistniałego pożaru (rys. 8).



Rys. 8 Strefa zadymienia w wyrobisku korytarzowym podczas pożaru taśmy przenośnika

Strefa ta obejmuje obszar nad ogniskiem pożaru, natomiast przepływ dymu odbywa się głównie pod stropem wyrobiska, a jego kierunek jest zgodny z kierunkiem przepływu powietrza. Dla przyjętej prędkości strumienia powietrza wentylacyjnego na wlocie wynoszącej 2 m/s, nie doszło do przepływu wstecznego dymów pożarowych.

5. WNIOSKI

Wykorzystany do analizy przepływu powietrza wentylacyjnego przez wyrobisko górnicze z ogniskiem pożarowym model umożliwił wyznaczenie pól prędkości, ciśnienia i temperatury przepływającego strumienia powietrza. W wyniku przeprowadzonej symulacji wyznaczono także zmiany stężenia tlenu, tlenku węgla i dwutlenku węgla w strumieniu powietrza wentylacyjnego. Trójwymiarowa analiza tego przepływu wykazała, że wystąpienie pożaru w wyrobisku górniczym powoduje istotne jego zaburzenie.

Podczas przepływu strumienia powietrza przez strefę pożaru występują lokalne, bardzo gwałtowne zmiany jego parametrów fizycznych. W analizowanym przypadku zanotowano lokalny przyrost prędkości i temperatury oraz gwałtowny spadek ciśnienia statycznego nad ogniskiem pożaru.

W przepływającym przez ognisko pożarowe strumieniu powietrza zaobserwowano duże masowe zmiany jego składników. W wyniku emisji do atmosfery gazów pożarowych zanotowano istotne zmniejszenie stężenia tlenu w powietrzu oraz duży wzrost stężenia tlenku węgla i dwutlenku węgla.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że zastosowanie metod numerycznych do analizy przepływu powietrza przez wyrobiska górnicze z ogniskiem pożaru może stanowić alternatywę w stosunku do badań w warunkach dołowych. Bezpośrednie pomiary parametrów fizycznych strumienia powietrza w wyrobisku górniczym w czasie pożaru wymagają zastosowania specjalistycznej i kosztownej aparatury oraz mogą stanowić duże niebezpieczeństwo dla osób je prowadzących.

Należy podkreślić, że opracowany model oraz zastosowane oprogramowanie daje bardzo duże możliwości analizy bardziej skomplikowanych zagadnień z zakresu wentylacji wyrobisk górniczych.

Uzyskane wyniki należy uznać jako wstępne, a opracowany model jako bazę do dalszej analizy przepływu powietrza przez wyrobiska górnicze.

6. LITERATURA

- [1] Ansys Fluent Theory Guide 14.0., 2011.
- [2] Badura H.: Drogi ewakuacyjne załogi ze stref zagrożenia pożarowego w kopalniach węgla kamiennego. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [3] Branny M., Karach M., Wodziak W., Jaszczur M., Nowak R., Szmyd J.: Eksperymentalna weryfikacja modeli CFD stosowanych w wentylacji kopalń. Przegląd Górniczy Nr 5/2013, Katowice 2013.
- [4] Dziurzyński W., Krawczyk J.: Nieustalony przepływ gazów pożarowych w kopalnianej sieci wentylacyjnej – symulacja numeryczna. Archives of Mining Sciences vol. 46, issue 2, Kraków 2001.
- [5] Dziurzyński W., Pałka T.: Komputerowa symulacja wpływu pożaru podziemnego na rozkład potencjału sieci wentylacyjnej kopalni. Archives of Mining Sciences vol. 46, issue 2, Kraków 2001.
- [6] Janus J., Krawczyk J., Kruczkowski J.: Porównanie symulacji numerycznych z wynikami pomiarów rozkładów pól prędkości w przekrojach chodników kopalnianych. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 13, nr 1-4/2011.
- [7] 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.
- [8] Veersted K. K., Malalasekera W.: An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. Pearson Education 2007.

- [9] Wala A. W., Stoltz J. R., Jacob J. D: Numerical and experimental study of a mine face ventilation system for CFD code validation, Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress, Krakow 2001.
- [10] Wala A. M., Vytla S., Taylor C. D., Huang G.: Mine face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments for CFD code validation, Mining Engineering, Vol.59, 2007.
- [11] Wrona P.: Wpływ prędkości powietrza na rozwój pożaru egzogenicznego w wyrobisku górniczym – symulacja w programie Fire Dynamics Simulator (FDS) – Pyrosim. Przegląd Górniczy nr 7/2013, Katowice 2013.
- [12] WUG – Dane statystyczne pożarów w kopalniach węgla kamiennego, Katowice 2008.