

# Zastosowanie numerycznej mechaniki płynów do analizy przepływu strumienia powietrza przez wyrobisko górnicze z ogniskiem pożaru

## Zastosowanie numerycznej mechaniki płynów do analizy przepływu strumienia powietrza przez wyrobisko górnicze z ogniskiem pożaru



Dr hab. inż. Jarosław Brodny, prof. w Pol. Śl. \*)



Mgr inż. Magdalena Tutak \*)

**Treść:** Przepływ strumienia powietrza przez wyrobiska górnicze z ogniskiem pożaru jest przepływem o złożonym charakterze. Wydzielanie się do atmosfery kopalnianej gazów pożarowych powoduje duże zaburzenia tego przepływu. W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej wpływu pożaru egzogenicznego w ścianie eksploatacyjnej na parametry strumienia powietrza przepływającego przez to wyrobisko oraz wyrobiska przyścianowe. Analizę przeprowadzono wykorzystując program Ansys Fluent, bazujący na metodzie objętości skończonych. Dla przyjętych założeń wyznaczono parametry fizyczne strumienia powietrza przepływającego przez ścianę eksploatacyjną z ogniskiem pożaru i wyrobiska przyścianowe, a także zmiany udziałów masowych gazów (tlenku oraz tlenku węgla i dwutlenku węgla) w tym strumieniu podczas przepływu przez analizowany układ wyrobisk dla różnych prędkości *na wlocie*.

**Abstract:** The airflow through excavations with fire source is very complex. The release of fire gases to the atmosphere of a mine significantly disturbs the airflow. This paper presents the results of numerical analysis of the influence of the exogenic fire in longwall on the parameters of air flowing through this excavation and main excavations. The analysis was performed by the use of Ansys Fluent program which is based of the Finite Volume Method (FVM). For the assumption made, physical parameters of the airflow through longwall with the source of fire and main excavations as well as changes in mass fraction of gases (oxygen and carbon monoxide and carbon dioxide) in the air stream during its flow through the analyzed system of excavations for different inlet velocities.

### Słowa kluczowe:

przepływ powietrza, pożar podziemny, analiza numeryczna

### Key words:

airflow, underground fire, numerical analysis

## 1. Wprowadzenie

Požary podziemne są jednym z głównych zagrożeń występujących w górnictwie węgla kamiennego w Polsce oraz na świecie. Potwierdza to, rejestrowana każdego roku, ich liczba w wyrobiskach podziemnych. W Polsce w latach 2004 ÷ 2013 wystąpiło 70 pożarów podziemnych, z czego 15 stanowiły pożary egzogeniczne, a 55 – pożary endogeniczne.

Pod pojęciem pożaru podziemnego, zdefiniowanego w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r., 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 tlenku węgla powyżej 0,0026 %. Warunek dotyczący stężenia tlenku węgla nie obejmuje przypadków, gdy takie jego stężenie jest związane ze stosowaniem dopuszczonych procesów technologicznych w wyrobiskach górniczych

Požary podziemne stanowią zagrożenie dla załogi pracującej w wyrobiskach górniczych oraz powodują duże straty ekonomiczne dla zakładów górniczych. Szczególne niebezpieczne są pożary egzogeniczne, które rozwijają się bardzo szybko. W przypadku pożarów endogenicznych czas ich inkubacji jest znacznie dłuższy, co stwarza możliwość podjęcia przez służby wentylacyjne kopalń niezbędnych działań niedopuszczających do ich powstania oraz rozwoju.

\*) Politechnika Śląska w Gliwicach

Wystąpienie pożaru w podziemnym wyrobisku górniczym jest zdarzeniem, które w sposób istotny zaburza proces jego prawidłowego przewietrzania [2, 3, 4]. Strumień powietrza wentylacyjnego staje się w tym przypadku źródłem tlenu, podtrzymującym płomień oraz nośnikiem dymu i gazów pożarowych przemieszczanych do kolejnych wyrobisk górniczych [12].

Szczególnie duże zagrożenie pożarowe występuje w rejonach ścian eksploatacyjnych wraz z przyległymi zrobami zawałowymi. Przepływ powietrza w rejonie ścian ma charakter turbulentny, czyli taki, w którym występuje nieregularny ruch jego cząstek, a parametry przepływu doznają nieprzewidywalnych losowych zmian w przestrzeni i w czasie [7]. Wystąpienie pożaru w wyrobisku powoduje dodatkowe zaburzenie tego przepływu.

Na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że prac poświęconych analizie przepływu strumienia powietrza przez wyrobiska górnicze z ogniskiem pożaru jest niewiele. Dotyczą one głównie metod opisu przepływu powietrza i gazów pożarowych w sieciach wentylacyjnych [3, 4] oraz przepływu strumienia powietrza przez wyrobiska korytarzowe z ogniskiem pożaru [8, 11, 12]. W opracowaniach [2, 3, 4, 9, 11, 12] przedstawiono wyniki badań numerycznych dotyczących przepływu powietrza przez wyrobiska górnicze z ogniskiem pożaru i jego wpływu na ten przepływ. Jednak tylko w pracach [9, 11, 12] dokonano trójwymiarowej analizy tego przepływu.

Niewielka liczba opracowań dotyczących przepływu strumienia powietrza przez wyrobiska z ogniskiem pożaru wynika z niebezpiecznych warunków środowiskowych panujących w tych wyrobiskach w czasie pożaru oraz trudnym do przewidzenia momentem jego wystąpienia. Prowadzenie badań w warunkach dołowych lub stanowiskowych jest więc bardzo utrudnione, a w praktyce wręcz niemożliwe do przeprowadzenia. W szczególności dotyczy to pożarów egzogenicznych, powstających niespodziewanie w trudnych do przewidzenia miejscach i charakteryzujących się dynamicznym przebiegiem.

W celu badania takich zjawisk, a w szczególności ich wpływu na przepływ strumienia powietrza przez rejon ściany eksploatacyjnej podczas pożaru nieodzowne staje się zatem wykorzystanie innych, alternatywnych metod umożliwiających ich analizę. Takie możliwości stwarzają badania modelowe oparte na symulacjach numerycznych. Symulacje numeryczne to szeroko stosowane narzędzie badawcze, które coraz powszechniej wykorzystywane jest w badaniach modelowych oraz analizach wariantowych procesów związanych z przewietrzaniem podziemnych wyrobisk górniczych oraz w analizach stanów awaryjnych, a za taki należy uznać wystąpienie w nich pożaru.

Obecnie stosowane programy do analizy przepływów powietrza stwarzają duże możliwości w zakresie wyznaczania parametrów przepływu i ich rozkładów, a także eliminują niedokładności związane z ewentualnym błędem pomiaru. Programy te umożliwiają także wprowadzenie reakcji spalania oraz określenia właściwości spalanych materiałów.

W procesie spalania dochodzi do dynamicznej wymiany masy i energii w strefie reakcji, której przebieg wyznaczają równocześnie zachodzące zjawiska chemiczne, termiczne i przepływowe [5]. Pożar jest więc bardzo złożonym zjawiskiem, trudnym do jednoznacznego opisu. Dlatego też w obliczeniach, których wyniki przedstawiono w artykule zastosowano wiele uproszczeń, koncentrując się głównie na wyznaczeniu jego ogólnych skutków dla procesu przewietrzania wyrobisk górniczych.

Uwzględniając powyższe uwagi przyjęto, że badania wpływu ogniska pożaru w ścianie eksploatacyjnej na parametry strumienia powietrza przepływającego przez to wyrobisko

i wyrobiska przyścianowe przeprowadzone zostaną za pomocą analizy numerycznej z wykorzystaniem programu Ansys Fluent.

Celem badań było wyznaczenie parametrów fizycznych i chemicznych strumienia powietrza przepływającego przez ścianę eksploatacyjną z ogniskiem pożaru oraz wyrobiska przyścianowe. W wyniku przeprowadzonych analiz wyznaczono rozkłady prędkości, ciśnienia i temperatury strumienia powietrza przepływającego przez te wyrobiska oraz określono rozkłady stężenia produktów spalania (CO oraz CO<sub>2</sub>) powstających w wyniku pożaru.

## 2. 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 [10].

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 fizykochemicznych.

W niniejszym opracowaniu wyznaczono parametry fizyczne i chemiczne strumienia powietrza przepływającego przez wyrobiska z ogniskiem pożaru, wykorzystując program Ansys Fluent, bazujący na metodzie objętości skończonych.

Metoda objętości skończonych polega na podziale obszaru przepływu na skończoną liczbę objętości kontrolnych i całkowaniu równań opisujących zagadnienie przepływu po każdej objętości kontrolnej, w wyniku czego otrzymuje się równania dyskretne, spełniające prawa zachowania objętości w obrębie każdego elementu. Dowolność kształtowania się obszarów kontrolnych umożliwia generowanie odpowiednich równań wyznaczających wartości węzłowe poszukiwanych funkcji [10].

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 [10]. Układ ten obejmuje powszechnie znane i często publikowane równania zachowania masy, pędu i energii [1, 8, 9, 11].

Wykorzystując program Ansys Fluent można modelować także zagadnienia transportu substancji chemicznych jako produktów spalania – opierając się na równaniach opisujących konwekcję, dyfuzję i reakcje chemiczne dla każdego składnika mieszaniny [1]. Należy podkreślić, iż ilość tych substancji, wydzielanych do atmosfery kopalnianej w czasie reakcji spalania, ulega zmianom w czasie i przestrzeni.

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

– równanie transportu dla substancji chemicznych

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (1)$$

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

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_i}{Sc_i}\right) \nabla Y_i \quad (2)$$

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

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

$Sc_i$  – turbulentna liczba Schmidta, 0.7

Przedstawiony model matematyczny przepływu łączy opis przepływu strumienia powietrza oraz transportu gazów powstałych w wyniku spalania, a także wymiany ciepła z górotworem przyległym do wyrobisk.

Można więc stwierdzić, że do opisu przepływu strumienia powietrza przez wyrobiska z ogniskiem pożaru wykorzystuje się układ równań obejmujących mechanikę płynów, termodynamikę oraz równania konstytutywne.

W ogólnej postaci równania te są równaniami różniczkowymi zawierającymi pochodne cząstkowe funkcji wielu zmiennych, które w nielicznych przypadkach posiadają rozwiązania analityczne, dla których istnieje możliwość jednoznacznego obliczenia zmiennych przepływu w każdym elemencie objętości w funkcji czasu. Metody numeryczne umożliwiają przybliżone rozwiązanie tych równań.

### 3. Analiza przepływu strumienia powietrza przez ścianę eksploatacyjną z ogniskiem pożaru egzogenicznego i wyrobiska przyścianowe

Analizie wpływu ogniska pożaru egzogenicznego w ścianie eksploatacyjnej na parametry strumienia powietrza przepływającego przez to wyrobisko i wyrobiska przyścianowe, poddano ścianę przewietrzaną systemem na „U” od granic. Taki system przewietrzania jest stosowany w około 75 % wszystkich ścian eksploatacyjnych.

Oczywistym jest, iż w ścianach eksploatacyjnych znajduje się wiele materiałów palnych, takich jak kable i przewody elektryczne, smary, oleje, a także metan wydzielający się z górotworu oraz pył węglowy powstający w procesie urabiania, które mogą stanowić potencjalne źródło pożaru egzogenicznego. W prezentowanej analizie nie zdefiniowano jednoznacznej przyczyny pożaru, a jedynie jego lokalizację w początkowym odcinku ściany eksploatacyjnej.

### 3.1. Model przepływu

W celu przeprowadzenia analizy opracowano model geometryczny przepływu strumienia powietrza przez ścianę eksploatacyjną przewietrzaną systemem na „U” z ogniskiem pożaru wraz z przyległymi wyrobiskami przyścianowymi (rys. 1). Tak opracowany model geometryczny poddano procesowi dyskretyzacji.

Dla przyjętego układu wyrobisk określono, że powietrze świeże dopływa chodnikiem podścianowym do skrzyżowania ze ścianą eksploatacyjną, następnie zmienia kierunek przepływu o 90 stopni i przepływa przez ścianę, po czym ponownie zmienia kąt przepływu o 90 stopni i wypływa do chodnika nadścianowego. W odległości 10 m od wlotu do ściany eksploatacyjnej zlokalizowano „przeszkodę” w postaci ogniska pożaru.

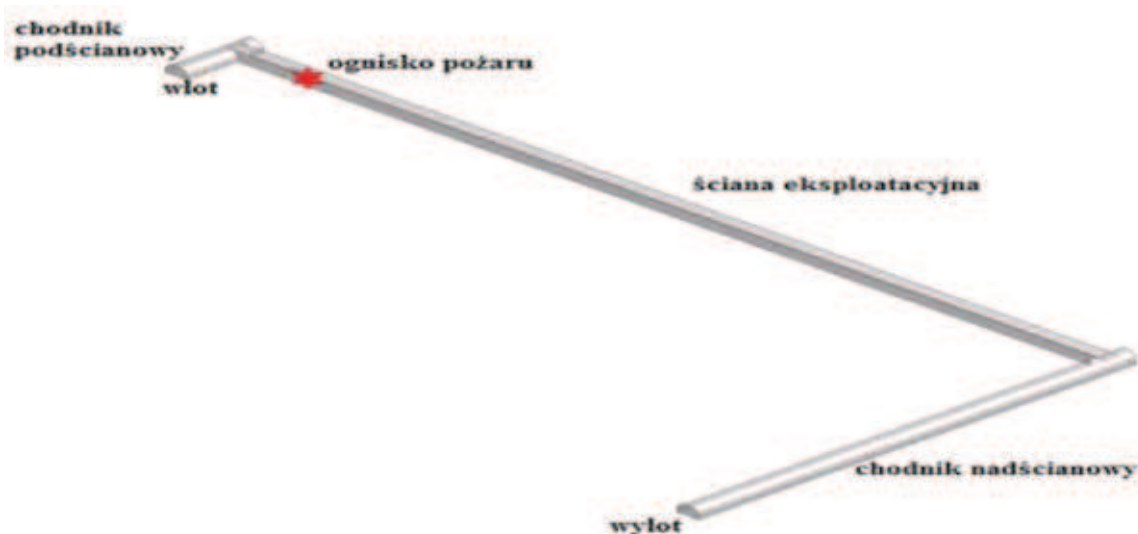
Dla analizowanego układu przyjęto, że długość chodnika podścianowego wynosi 15 m, a chodnika nadścianowego – 100 m, natomiast długość ściany – 200 m. Wysokość ściany wynosi 3,6 m, a jej szerokość – 3 m ( $S=10,85 m^2$ ), natomiast chodniki przyścianowe mają szerokość 5 m, a wysokość 3,6 m ( $S=15,78 m^2$ ).

Analizę przepływu strumienia powietrza przez ścianę z ogniskiem pożaru oraz wyrobiska przyścianowe 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. W przekroju wlotowym dla analizowanych wyrobisk zadano równomierne pola prędkości o wartościach: 1,0; 1,3; 1,5; 1,8; 2,0; 2,3 oraz 2,5 m/s. Dla analizowanego modelu warunek brzegowy typu „wylot” został zdefiniowany jako „outlet” (*pressure-outlet*), natomiast ściany zdefiniowano jako nieprzepuszczalne, których chropowatość powierzchni odpowiadała wysokości 0,2 m, a ich temperatura (traktowana jako temperatura otaczającego górotworu) wynosiła 295 K. Obliczenia wykonano dla ciśnienia, którego wartość odniesienia wynosiła 101 325 Pa.

Przy modelowaniu pożaru przyjęto, że źródło ciepła (ognisko pożaru) uwalnia do otoczenia strumień masowy gazów, zawierający produkty powstałe w wyniku procesu spalania.

Założono, że na wlocie do wyrobiska podścianowego udział masowy tlenu w strumieniu powietrza wynosi 21 %,



Rys. 1. Model geometryczny przepływu strumienia powietrza przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego

Fig. 1. Geometric model of airflow through the system of excavations with the source of exogenic fire



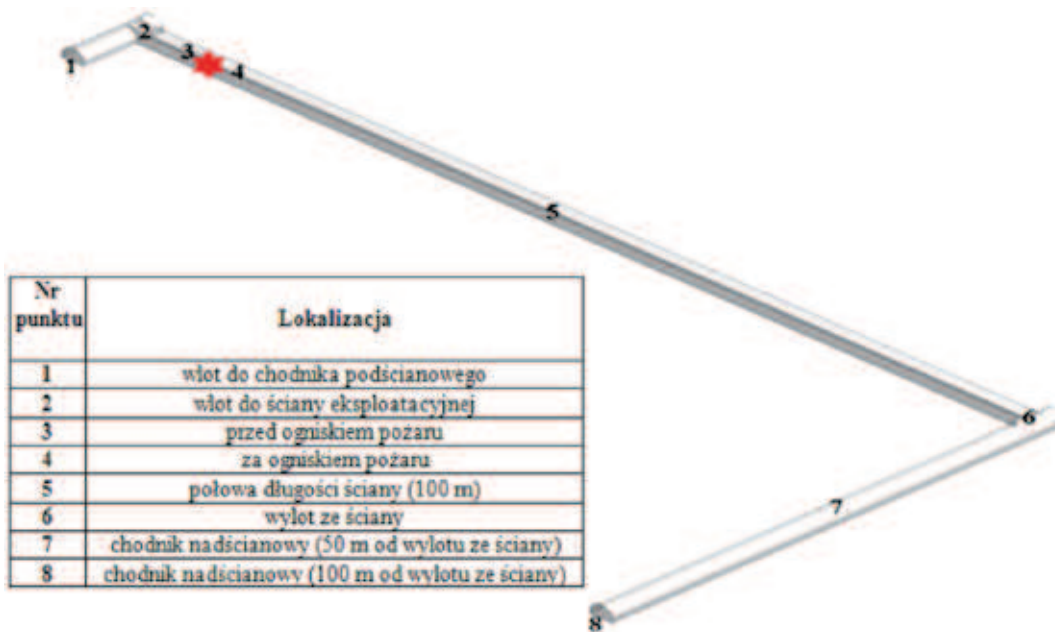
natomiast gazami emitowanymi do atmosfery w wyniku pożaru są tlenek węgla (CO) i dwutlenek węgla (CO<sub>2</sub>). Opracowany model umożliwił rejestrację stężenia tych gazów w strumieniu powietrza, a także zmiany jego parametrów fizycznych w zależności od prędkości strumienia powietrza na wlocie do analizowanego układu wyrobisk.

**3.2. Wyniki analizy**

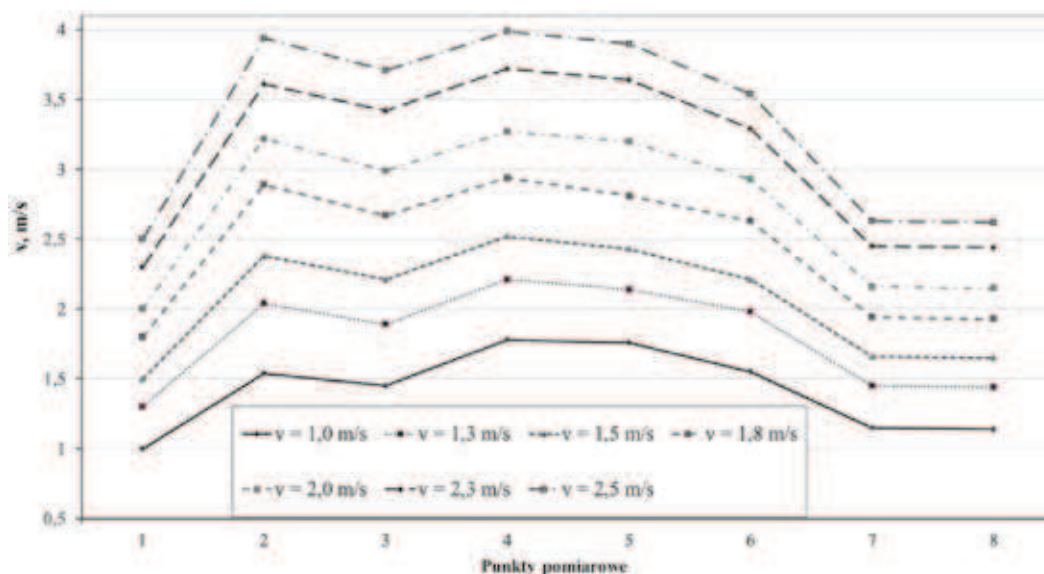
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono charakterystyki zmian prędkości strumienia powietrza przepływającego przez analizowany układ wyrobisk z ogniskiem pożaru oraz rozkłady jego temperatury i ciśnienia. Określono

także zmiany stężenia tlenu w strumieniu powietrza oraz tlenku węgla i dwutlenku węgla emitowanych ze źródła pożaru do atmosfery wyrobisk. W celu wyznaczenia tych rozkładów i charakterystyk przyjęto osiem charakterystycznych punktów pomiarowych w analizowanym układzie wyrobisk. Lokalizację punktów wraz z ich opisem przedstawiono na rysunku 2.

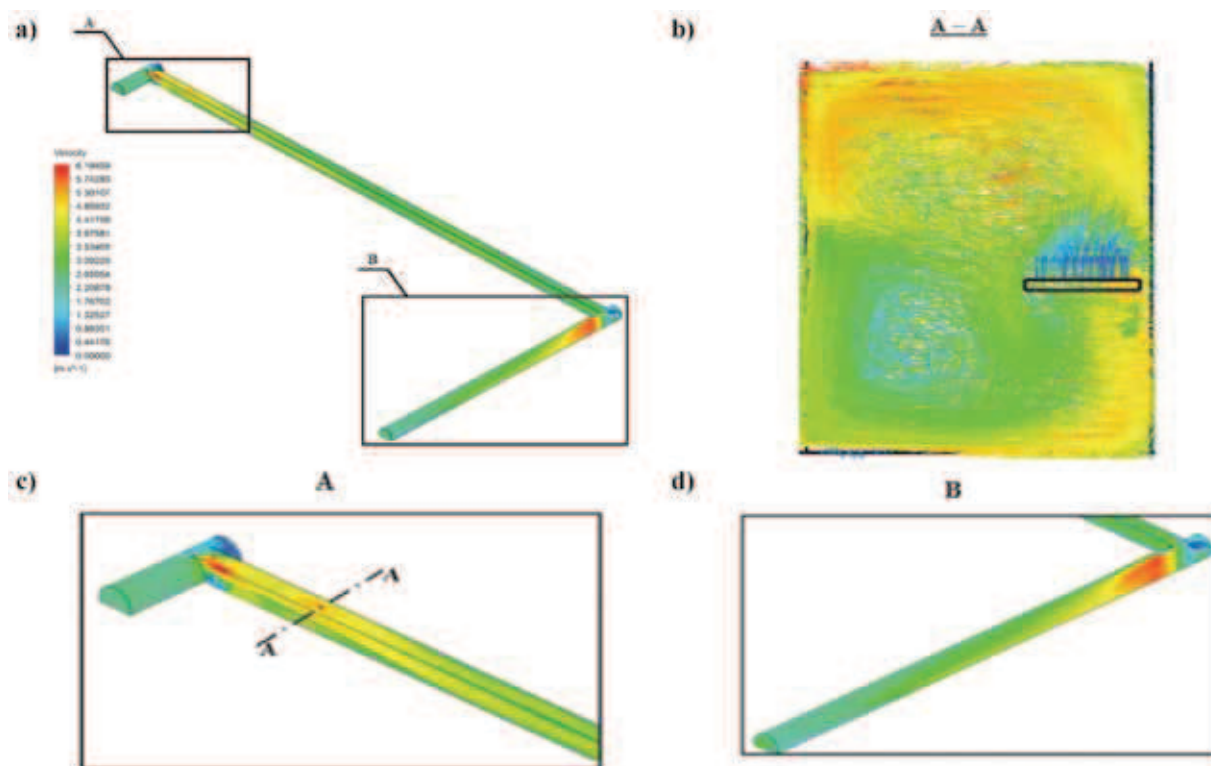
Na rysunku 3 przedstawiono wartości prędkości strumienia powietrza przepływającego przez ścianę eksploatacyjną z ogniskiem pożaru i wyrobiska przyścianowe dla poszczególnych punktów pomiarowych, a na rysunku 4 – rozkład wektorów prędkości powietrza dla analizowanego układu dla prędkości *na wlocie* równej 2,5 m/s.



Rys. 2. Lokalizacja punktów pomiarowych  
 Fig. 2. Location of measurement points



Rys. 3. Prędkości strumienia powietrza przepływającego przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego dla różnych wartości prędkości (v) *na wlocie*  
 Fig. 3. Velocities of airflow through the system of excavations with the source of exogenic fire for different values of inlet velocities (v)



Rys. 4. Rozkład wektorów prędkości strumienia powietrza przepływającego przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego dla prędkości na wlocie do chodnika podścianowego równej 2,5 m/s

Fig. 4. Distribution of velocities of airflow through the system of excavations with the source of exogenic fire for velocity on inlet (2,5 m/s) to the bottom road

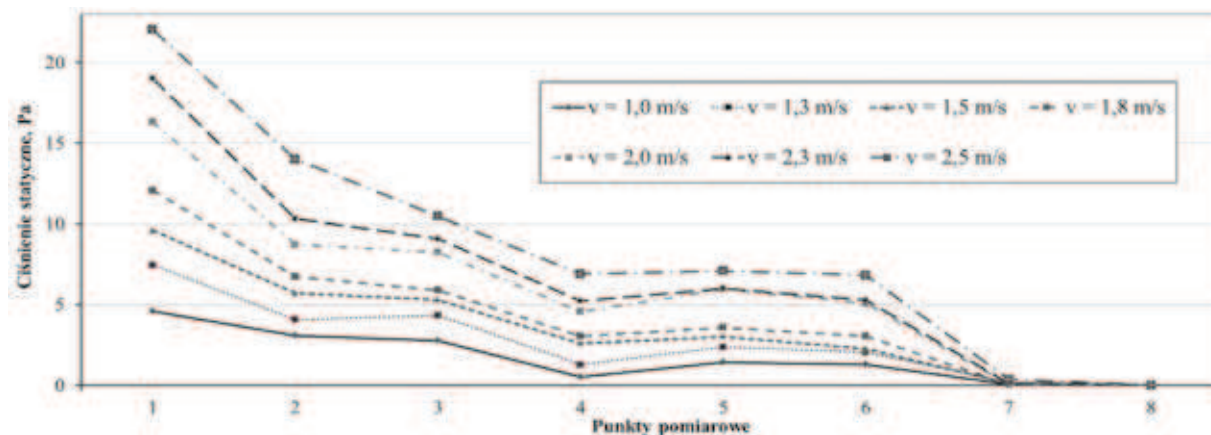
Uzyskane wyniki wskazują, że największy przyrost prędkości strumienia powietrza występuje w strefie nad ogniskiem pożaru. Zjawisko to jest wynikiem emisji strumienia masowego gazów o podwyższonej temperaturze do atmosfery ściany eksploatacyjnej, które powoduje lokalne zaburzenie przepływu. Na strumień wpływającego do wyrobiska powietrza działa strumień konwekcyjny z nad ogniska pożaru. Następnie całość przemieszcza się wzdłuż wyrobiska. Maksymalne wartości prędkości, dla wszystkich analizowanych wariantów, strumień powietrza osiąga bezpośrednio za ogniskiem pożaru (punkt pomiarowy 4).

Przyrost prędkości pomiędzy wlotem do chodnika podścianowego a wlotem do ściany eksploatacyjnej związany jest ze

zmniejszeniem pola przekroju poprzecznego tych wyrobisk (pomiędzy punktami pomiarowymi 1 i 2).

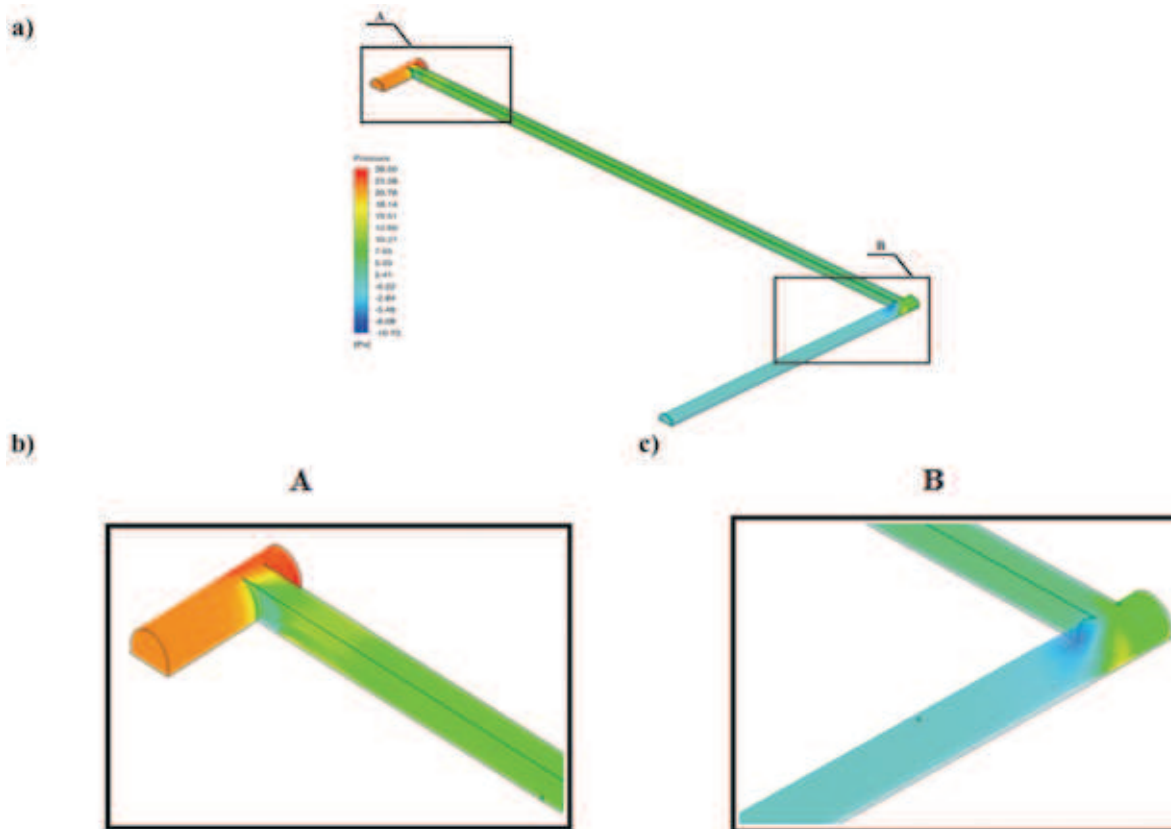
Na rysunku 5 przedstawiono wartości ciśnienia statycznego strumienia powietrza przepływającego przez analizowany układ wyrobisk dla przyjętych punktów pomiarowych, a na rysunku 6 – pole ciśnienia statycznego tego strumienia dla prędkości na wlocie równej 2,5 m/s.

Strumień powietrza wpływając do ściany eksploatacyjnej od strony chodnika podścianowego zmienia kierunek przepływu o 90 stopni. Spadek ciśnienia w tym rejonie (pomiędzy punktami pomiarowymi 1 i 2) jest wynikiem zmniejszenia się pola przekroju poprzecznego wyrobiska ścianowego w stosunku do chodnika podścianowego.



Rys. 5. Wartości ciśnienia statycznego strumienia powietrza przepływającego przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego dla różnych wartości prędkości ( $v$ ) na wlocie

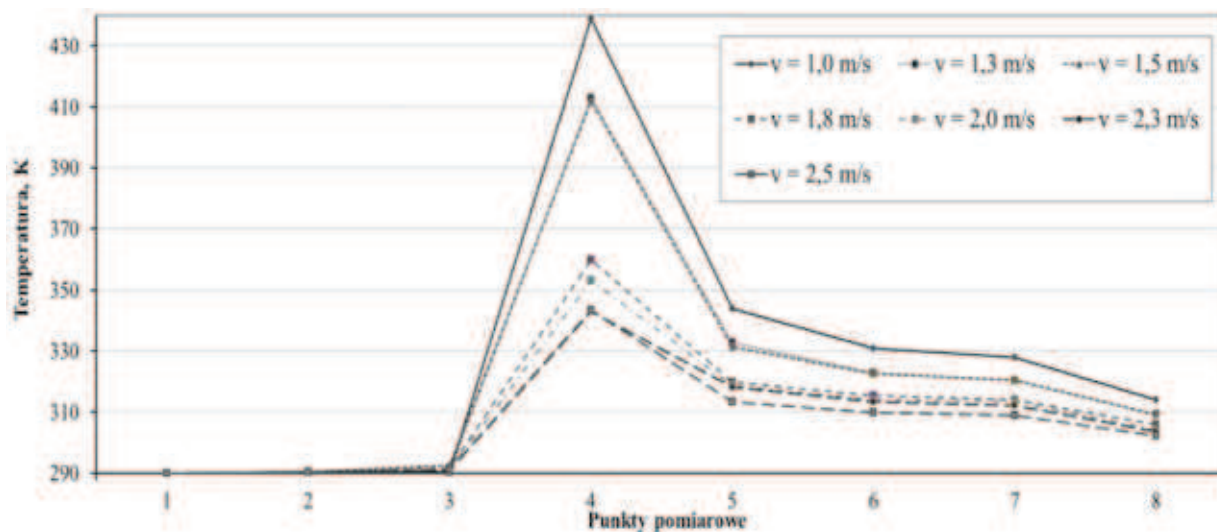
Fig. 5. Values of static pressure of airflow through the system of excavations with the source of exogenic fire for different values of inlet velocities ( $v$ )



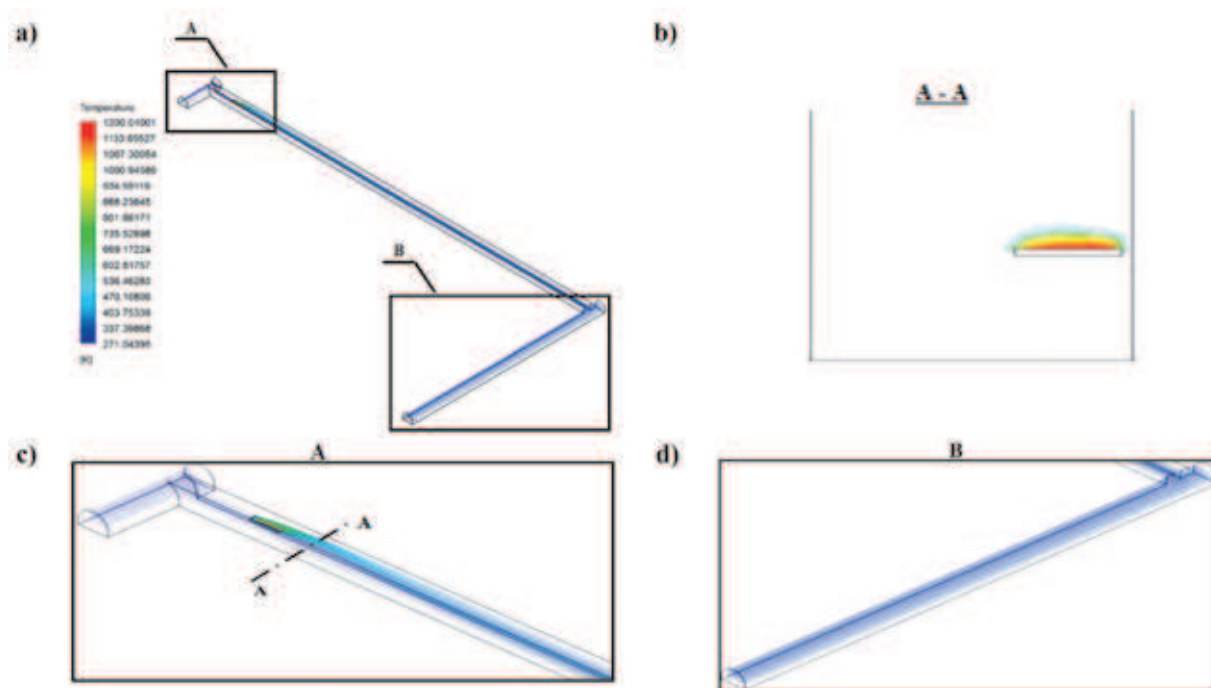
Rys. 6. Rozkład ciśnienia statycznego strumienia powietrza przepływającego przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego dla prędkości *na wlocie* do chodnika podścianowego równej 2,5 m/s  
 Fig. 6. Distribution of static pressure of airflow through the system of excavations with the source of exogenic fire for velocity on inlet (2,5 m/s) to the bottom road

Na rysunku 7 przedstawiono wartości temperatury strumienia powietrza przepływającego przez analizowany układ wyrobisk dla przyjętych punktów pomiarowych, a na rysunku 8 – pole temperatur tego strumienia dla prędkości *na wlocie* równej 2,5 m/s.

Uzyskane wyniki wskazują, że prędkość strumienia powietrza na wlocie do chodnika podścianowego ma istotny wpływ na rozkład temperatury w analizowanych wyrobiskach. Wraz ze wzrostem prędkość strumienia powietrza na wlocie do chodnika podścianowego następuje zmniejszenie przyrostu



Rys. 7. Wartości temperatury strumienia powietrza przepływającego przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego dla różnych wartości prędkości (v) *na wlocie*  
 Fig. 7. Values of air stream temperature flowing through the system of excavations with the source of exogenic fire for different values of inlet velocity (v)



Rys. 8. Rozkład temperatury strumienia powietrza przepływającego przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego dla prędkości *na wlocie* do chodnika podścianowego równej 2,5 m/s

Fig. 8. Distribution of air stream temperature flowing through the system of excavations with the source of exogenic fire for velocity on inlet (2,5 m/s) to the bottom road

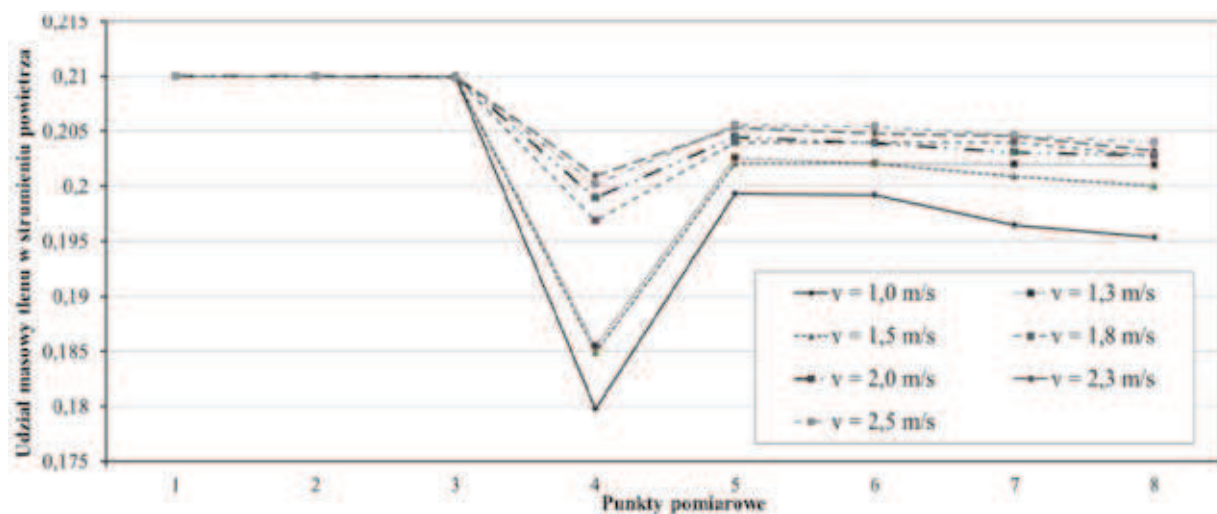
temperatury w wyrobiskach zlokalizowanych za ogniskiem pożaru. Jest to wynikiem intensywniejszego odprowadzania ciepła. Gwałtowny przyrost temperatury występuje na odcinku ściany eksploatacyjnej z ogniskiem pożaru dla wszystkich analizowanych wariantów. Główną przyczyną tego wzrostu jest ognisko pożaru oraz, w mniejszym stopniu, temperatura otaczającego górotworu.

Na rysunkach 9, 10 oraz 12 przedstawiono masowe udziały tlenu, tlenku węgla i dwutlenku węgla dla analizowanego układu wyrobisk z ogniskiem pożaru, przez które przepływa strumień powietrza, a na rysunkach 11 i 13 rozkłady udziałów masowych tych gazów dla strumienia o prędkości *na wlocie* równej 2,5 m/s.

W analizowanym układzie, *na wlocie* do chodnika podścianowego, przyjęto zerowe stężenia tlenku węgla i dwutlenku węgla w strumieniu powietrza.

Spadek stężenia tlenu w przepływającym strumieniu powietrza przez analizowany układ wyrobisk z ogniskiem pożaru ściśle uzależniony jest od prędkości strumienia powietrza zadanego na *wlocie* do chodnika podścianowego. Wraz ze zmniejszeniem tej prędkości następuje spadek stężenia tlenu na *wylocie* z chodnika nadścianowego.

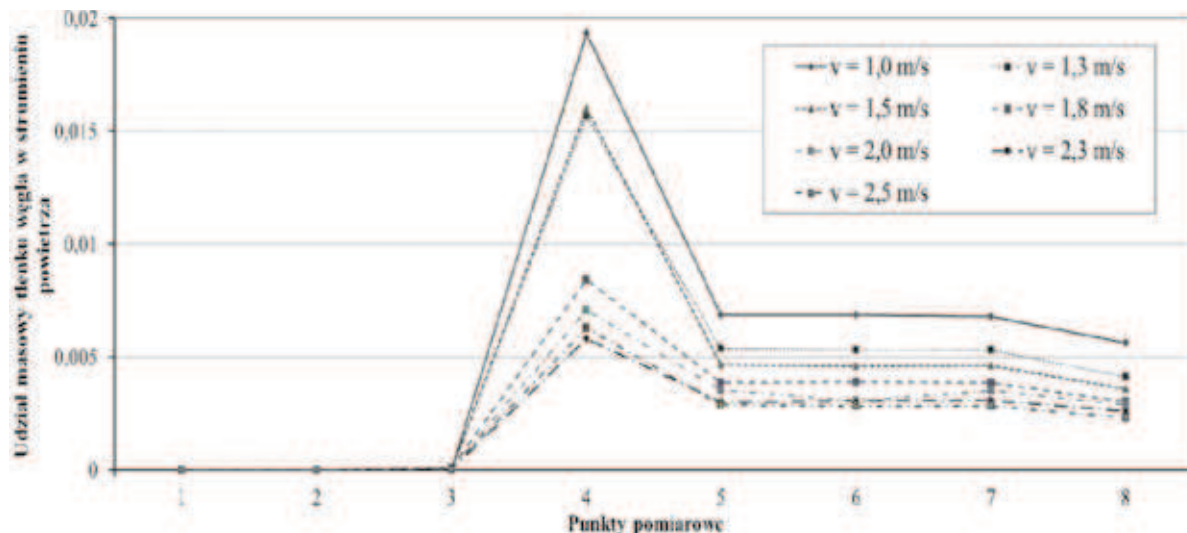
Prędkość strumienia powietrza *na wlocie* do chodnika podścianowego wpływa także na rozkład stężenia tlenku węgla i dwutlenku węgla wzdłuż ściany i chodnika nadścianowego. Wzrost tej prędkości wpływa na zmniejsze-



Rys. 9. Udział masowy tlenu w strumienia powietrza przepływającym przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego dla różnych wartości prędkości *na wlocie*

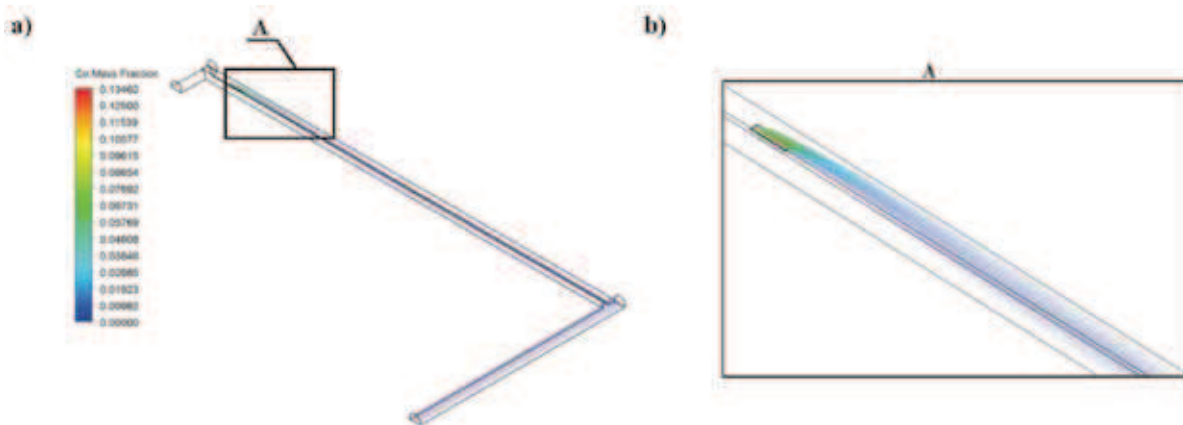
Fig. 9. Mass fraction of oxygen in the air stream flowing through the system of excavations with the source of exogenic fire for different values of inlet velocity





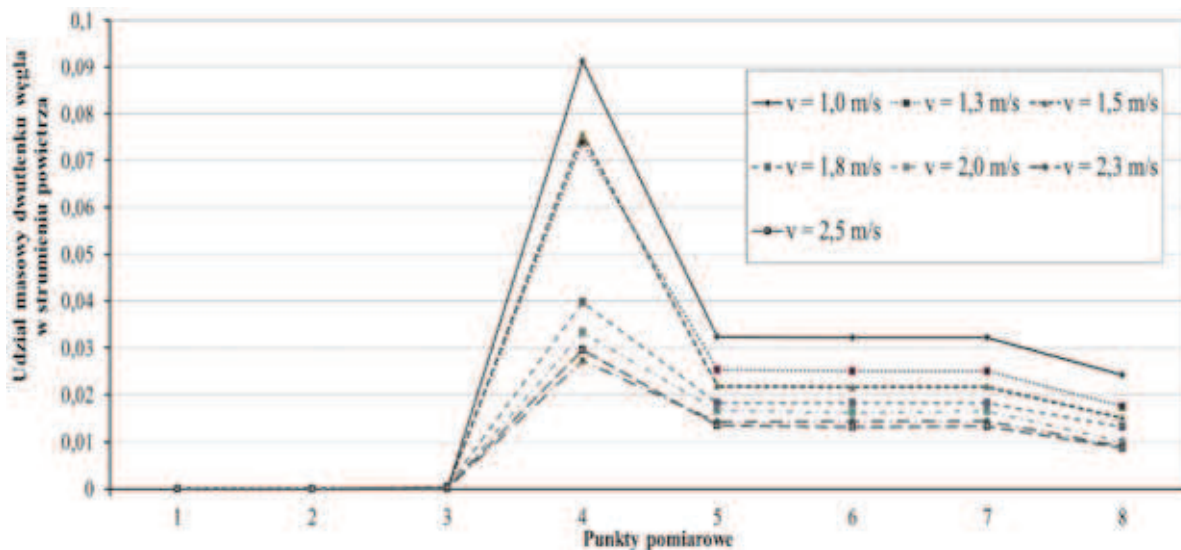
Rys. 10. Udział masowy tlenku węgla w strumienia powietrza przepływającym przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego

Fig. 10. Mass fraction of carbon monoxide in the airflow through the system of excavations with the source of exogenic fire



Rys. 11. Rozkład udziału masowego tlenku węgla w strumieniu powietrza przepływającym przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego dla prędkości *na wlocie* do chodnika podścianowego równej 2,5 m/s

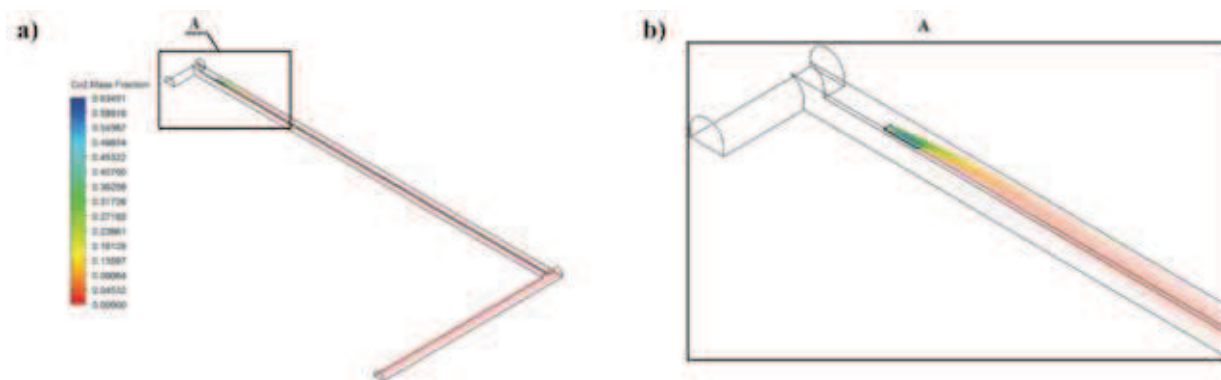
Fig. 11. Distribution of mass fraction of carbon monoxide in the airflow through the system of excavations with the source of exogenic fire for velocity on inlet (2,5 m/s) to the bottom road



Rys. 12. Udział masowy dwutlenku węgla w strumienia powietrza przepływającym przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego dla różnych wartości prędkości *na wlocie*

Fig. 12. Mass fraction of carbon dioxide in the airflow through the system of excavations with the source of exogenic fire for different values of inlet velocity





Rys. 13. Rozkład udziału masowego dwutlenku węgla w strumieniu powietrza przepływającym przez układ wyrobisk z ogniskiem pożaru egzogenicznego dla prędkości *na wlocie* do chodnika podścianowego równej 2,5 m/s

Fig. 13. Distribution of mass fraction of carbon dioxide in the airflow through the system of excavations with the source of exogenic fire for velocity on inlet (2,5 m/s) to the bottom road

nie stężenia tlenu węgla i dwutlenku węgla na wylocie z chodnika nadścianowego. Największe stężenie tlenu węgla i dwutlenku węgla występuje nad ogniskiem pożaru w ścianie bez względu na zadaną prędkość *na wlocie*.

#### 4. Wnioski

Wykorzystany do analizy przepływu strumienia powietrza przez wyrobisko z ogniskiem pożaru model umożliwił wyznaczenie rozkładów prędkości, ciśnienia i temperatury tego strumienia oraz stężenia tlenu, tlenu węgla i dwutlenku węgla w tym strumieniu dla przyjętego układu wyrobisk. Przeprowadzone dla różnych prędkości strumienia powietrza *na wlocie* analizy wykazały, że wystąpienie pożaru w wyrobisku górniczym powoduje istotne zaburzenie jego przepływu.

Strefa pożaru istotnie wpływa na parametry fizyczne przepływającego przez wyrobiska strumienia powietrza. W analizowanym układzie zanotowano lokalne przyrosty prędkości i temperatury oraz spadek ciśnienia statycznego nad ogniskiem pożaru. W przepływającym strumieniu powietrza zarejestrowano istotne zmiany udziałów masowych jego składników. W wyniku emisji do atmosfery gazów pożarowych nastąpiło zmniejszenie stężenia tlenu w powietrzu oraz duży wzrost stężenia tlenu węgla i dwutlenku węgla.

Przeprowadzona analiza wykazała, że im mniejsza jest wartość prędkości strumienia powietrza *na wlocie* do wyrobiska z ogniskiem pożaru, tym większe jest stężenie tlenu węgla i dwutlenku węgla na jego wylocie, a mniejsze stężenie tlenu. Zmniejszenie prędkości *na wlocie* powoduje natomiast wzrost temperatury strumienia powietrza *na wylocie*. Większa prędkość przepływu strumienia powietrza powoduje bowiem intensywniejsze odprowadzanie ciepła z wyrobiska.

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 jest uniwersalny i po rozbudowie (modyfikacji) może zostać wykorzystany do symulacji bardziej skomplikowanych zagadnień zwią-

zanych z przepływem powietrza przez wyrobiska górnicze w tym do prognozowania stanu warunków wentylacyjnych w wyrobiskach górniczych, np. w przypadku wystąpienia ogniska pożaru.

#### Literatura

1. Ansys Fluent Theory Guide 14.0. (2011).
2. Dziurzyński W.: Prognozowanie procesu przewietrzania kopalni głębinowej w warunkach pożaru podziemnego. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energii PAN z. 56. Kraków 1998.
3. Dziurzyński W., Krawczyk J.: Nieustalony przepływ gazów pożarowych w kopalnianej sieci wentylacyjnej – symulacja numeryczna. Archives of Mining Sciences vol. 46, issue 2, Kraków 2001.
4. Dziurzyński W., Palka T.: Komputerowa symulacja wpływu pożaru podziemnego na rozkład potencjału sieci wentylacyjnej kopalni. Archives of Mining Sciences vol. 46, issue 2, Kraków 2001.
5. Nagórski Z.: Wybrane zagadnienia termodynamiki technicznej. Politechnika Warszawska. Warszawa 2011.
6. 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.
7. 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 Górotworu PAN, Vol. 14, No. 1-4 2012.
8. Tutak M.: Numerical analysis of influence of exogenous fire in dog heading on parameters of the air stream flowing through this heading. Management Systems in Production Engineering Nr 2/2014. Gliwice 2014.
9. Tutak M., Brodny J.: Wpływ długości wyrobiska podścianowego za czołem ściany na przepływ powietrza. Wiadomości Górnicze Nr 6/2014, Katowice 2014.
10. Veerstedt K.K., Malalasekera W.: An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method. Pearson Education 2007.
11. Wachowicz J., Janoszek T.: Komputerowe modelowanie pożaru taśmy przenośnikowej z wykorzystaniem metody CFD. Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko. Nr 2. Katowice 2009.
12. 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.