



## NUMERICAL ANALYSIS OF AIRFLOW AND METHANE EMITTED FROM THE MINE FACE IN A BLIND DOG HEADING

Jarosław BRODNY, Magdalena TUTAK  
Silesian University of Technology

### Abstract:

Ventilation is one of the most common presented problems during the driving of dog headings. During driving such heading has only one connection with air stream routes, which significantly make difficult the process of its ventilation. In a case of its driving in coal in the methane seam, this heading is endangered also to methane emission. In such case process of its ventilation is much more difficult. In the paper there are presented results of numerical analysis of ventilation of blind dog headings using air-duct forcing the air into its mine face. The analysis was performed for four different velocities of the air at the outlet from air-duct. The calculations were made for the excavation of heading with heading machine and conveyor belt.

**Key words:** methane hazard, ventilation of dog headings, numerical analysis

### INTRODUCTION

Underground coal exploitation is dangerous due to many natural and technological hazards. One of the most common and most dangerous natural hazards is methane hazard. In the last few years in global mining industry as a result of explosion and inflammation of methane, there have been many disasters, in which many thousands of miners were subjected to accidents [6, 7, 10, 11].

In Polish hard coal mining, methane hazard is one of the most commonly present risks. In the years 2005-2014 in Polish mines 28 hazardous events associated with methane hazard took place (inflammation and explosions of methane), of which 8 occurred in a driven dog headings [5].

Driven dog headings are blind headings, *i.e.* they have only one connection with the air flow routes, which causes significant difficulties in their ventilation process. In a case of implementation of these headings in coal in the methane seam, they are additionally exposed to the release methane from the mine face, side walls, roof and floor of driven part, what additionally complicates their ventilation process [9].

Fighting methane hazard in the mine face of driven sidewalks is done primarily by preventing the accumulation of dangerous amounts of methane which causes its explosive concentrations. The main aim of this process is to supply to the mine face such amount of ventilation air that ensures that the methane concentration will not exceed the allowed value. To achieve this aim, stream of fresh air supplied to mine face of driven heading should have proper physical parameters and chemical composition. These parameters should be chosen so that the atmosphere formed in the heading assures demanded parameters necessary for exploitation works.

In order to fulfill these requirements, a stream of fresh air can be supplied to the blind mine face of dog heading by

air-duct, depending on its length, angle of inclination and category of methane hazard, using additional ventilation devices or by diffusion [13].

Methods of ventilation of the blind heading are presented in Figure 1.

In practice, the most common ventilation of sidewalks during their execution, is carried out by supplying fresh air directly to their mine faces using an air-duct. Ventilation using air-ducts may be of negative pressure, positive pressure, or combined type (Fig. 1c) [15, 16].

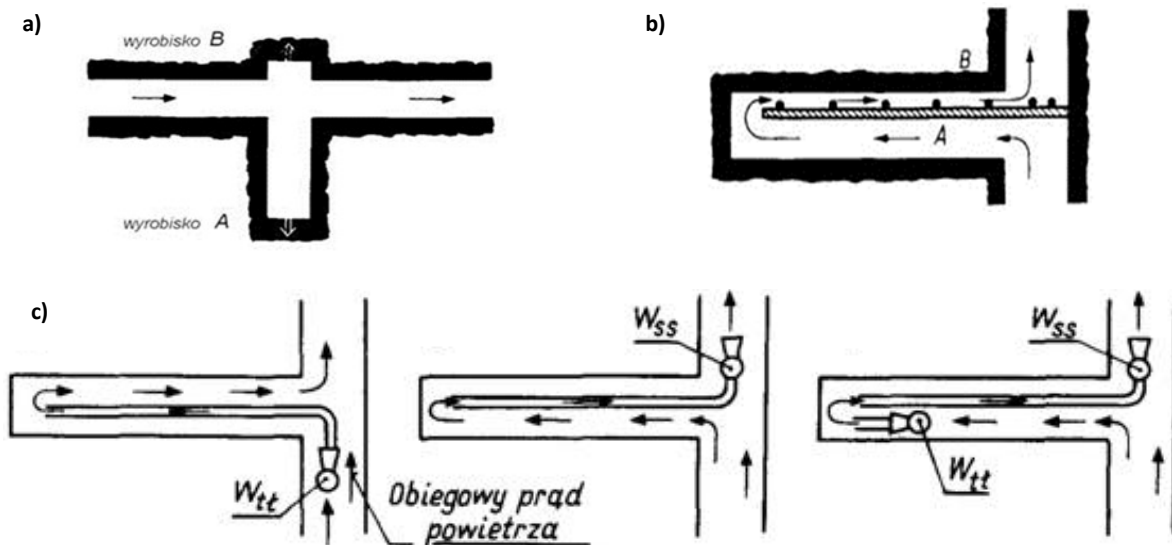
In a case of methane hazard in headings, the positive pressure type of ventilation is being used, which is characterized by feeding more air than the exhaust ventilation, making it more effective (Fig. 2) [14, 15, 16, 17].

According to [13] velocity of air stream in the headings ventilated by duct lines in methane fields in 2<sup>nd</sup> category of methane hazard cannot be less than 0,30 m/s.

In non-methane fields and classified in 1<sup>st</sup> category of methane hazard, this velocity must be at least 0,15 m/s. Simultaneously, velocity of air stream in dog heading does not exceed 8,0 m/s [13].

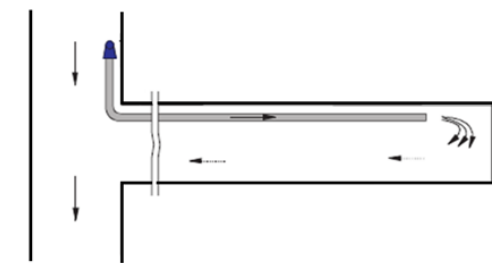
It can be assumed, that the velocity of the air flow supplied to the driven mine face of dog heading should be such that limit TLV of methane is not exceeded and simultaneously, the safety of the working crew is provided.

Therefore, it is appropriate to conduct research in order to determine parameters of the air stream flowing through the blind dog heading considering methane evolving from the mine face of this heading. Such research can be carried out in underground conditions as well as with use of simulation methods [3, 8, 9, 12]. In recent years, these methods are widely used to analyze the ventilation problems. However, not many researches include three-dimensional analysis considering the methane hazard.



**Fig. 1 Methods of ventilation of the blind heading:**  
 a) by diffusion, b) using additional ventilation devices, c) by air-duct (pressuring ventilation, suction ventilation, press-suction combined ventilation)

Source: [2].



**Fig. 2 Scheme of pressuring ventilation**

Source: [2].

Also due to this regard, this paper presents the results of numerical research which aims to analyze the air flow and methane evolution from the mine face in blind dog heading ventilating by positive pressure air-duct.

The aim of the study was to determine the effect of velocity of air stream supplied by air-duct to mine face of dog heading from which methane is emitted, on distribution its concentration in this heading.

Calculations were performed for transient flow in the heading equipped with air-duct, heading machine and belt conveyor.

**THE MATHEMATICAL MODEL OF THE FLOW**

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a simulation method of processes connected with flow of liquids and gases, heat and mass transfer, or chemical reactions [19].

Software based on the Computational Fluid Dynamics (CFD) allow to obtain necessary information, concerning the mass flow of air stream or liquid (distribution of velocity field, distribution of pressure field), heat transfer (temperature field), and also the physical-chemical changes.

In the study, the physical and chemical parameters of air and methane mixture flowing through the driven heading ventilated by positive pressure air-duct were determined using the ANSYS Fluent software.

Turbulent flow of a viscous, incompressible fluid is described by Navier-Stokes system of equations, which together with the continuity equation are complete relation-

ship system, which allows determining pressure and the flow velocity field [19].

Problems connecting with fluid transport in this software are solved basing on following fluid mechanics and thermodynamic equations [1]:

- the continuity equation

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

where:

- $\vec{v}$  - velocity, m/s
- $\rho$  - density, kg/m<sup>3</sup>
- $t$  - time, s
- $S_m$  - the mass added to the continuous phase from the dispersed second phase, kg/s
- momentum equation

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

where:

- $p$  - static pressure, Pa
- $\vec{\tau}$  - the stress tensor, Pa
- $\vec{g}$  - the gravitational body force, m/s<sup>2</sup>
- $\vec{F}$  - the external body force, N
- energy equation

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

where:

- $E$  - total energy, J/kg
- $k_{eff}$  - the effective conductivity, W/(mK)
- $T$  - temperature, K
- $h_j$  - entalpia właściwa j-tego składnika mieszaniny, J/kg
- $\vec{\tau}_{eff}$  - turbulent stress tensor, Pa
- $\vec{J}_i$  - the diffusion flux of species, kg/(m<sup>2</sup>s)
- $S_h$  - the heat of chemical reaction, W/m<sup>3</sup>

Transport equation determining the local mass loss for each component of the mixture and the diffusion equation takes the following form:

- species transport equation

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

where:

$Y_i$  – the local mass fraction of each species

$\vec{J}_i$  – the diffusion flux of species  $i$ , kg/(m<sup>2</sup>s)

$R_i$  – the net rate of production of species  $i$  by chemical reaction

$S_i$  – the rate of creation by addition from the dispersed phase plus any user-defined sources

- mass diffusion in turbulent flows

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

$D_{i,m}$  – the mass diffusion coefficient for species  $i$  in the mixture, m<sup>2</sup>/s

$\mu$  – the viscosity, Pa·s

$Sc_t$  – the turbulent Schmidt number, 0.7

Presented model connects description of the airflow and gases transport, and also the heat exchange.

Flow of air stream through the driven dog heading ventilated by air-duct has turbulent character, in which there is an irregular movement of air molecules, and the parameters of its flow experience unpredictable random changes in space and time [18]. Turbulence of flow is characterized by three-dimensionality, diffusivity, as well as randomness, cascade and hierarchization of vortices [4].

For the analysis there was used the „ $k$ - $\epsilon$ ” turbulence model belonging to semi-empirical models, characterizing by parameters determined basing on experimental tests. This model describes components of Reynolds turbulent stress tensor according to Boussinesq hypothesis [8]. According to this hypothesis, turbulent stresses are proportional to the velocity of deformation and are expressed using the dynamic viscosity coefficient of turbulence  $\mu_t$ . In the equation for components of stress tensor,  $k$  and  $\epsilon$  values occur. In order to their determination there is necessary to introduce two additional transport equations in a form:

- a)  $k$ -transport equation

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t S^2 - \rho \epsilon \quad (6)$$

- b)  $\epsilon$ -transport equation

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} \left( C_{1\epsilon} \mu_t S^2 - \rho C_{2\epsilon} \epsilon \right) \quad (7)$$

where:

$C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$  – constants,

$\partial_k$ ,  $\partial_\epsilon$  – turbulent Prandtl numbers for  $k$  and  $\epsilon$ ,

$S$  – user-defined source terms.

## ANALYSIS OF THE FLOW

Driven dog heading was subjected to analysis. It was assumed that this heading is supplied by fresh air from forced duct line, and methane is emitted from its mine face.

In such a case, the task of the ventilation process, besides providing sufficient amount of oxygen for the operating crew, is to prevent exceeding the permissible methane concentration (2%) in the mixture with air. This aim is achieved by providing through an air-duct to the driven mine face an air stream with specified parameters.

### The flow model

In order to perform an analysis, geometrical model of this heading with air-duct, conveyor belt and heading machine was developed (Fig. 3).

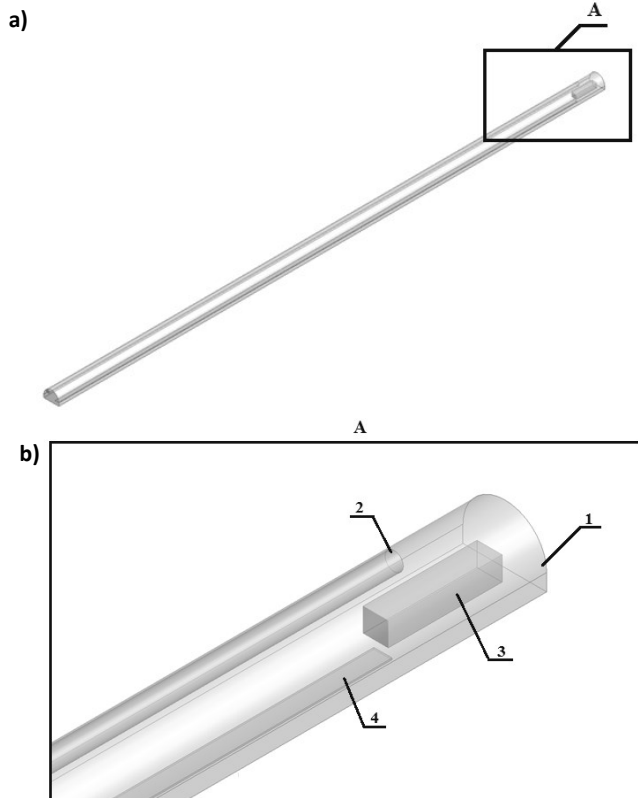


Fig. 3 Models of mining headings

1 – surface emission of methane, 2 – the air-duct  
3 – the heading machine, 4 – the conveyor belt

For the model it was assumed that the length of side-walk equals to 200 m, the length of the air-duct equals to 194 m, whereas length of belt conveyor equals to 190 m. It was assumed that heading has width of 5.5 m and 3.85 m of height ( $S = 17.93 \text{ m}^2$ ). It was assumed that the conveyor is at a height of 1 m, and its width equals 1.2 m. Heading machine was modeled in a form of a cuboid with dimensions 7.47x1.645x1.65 m.

Analysis was performed using physical models  $k - \epsilon$  standard and species transport.

As an “inlet” boundary condition, a constant velocity field of air forced through the air-duct to the driven heading was assumed. It was assumed also that velocity of forced air stream through air-duct will be: 25, 30, 35 and 40 m/s.

For analyzed model, exit was defined as an “outlet” boundary condition, while the walls were defined as impermeable.

During modeling of methane emission from the face of mine face of driven heading, it was assumed the absolute methane content equals to 0.084 m<sup>3</sup>/s. Time of analysis took 600 seconds.

*The analysis results*

Based on performed calculations the characteristics of changes of velocity of air and methane mixture stream and distributions of methane concentration in this heading were determined.

In Figure 4 there is presented distribution of velocity of mixture stream along heading after 600 seconds, and in a Figure 5 – an average value of velocities of mixture stream at the outlet from the heading for different values of air stream velocity ( $v$ ) forced through air-duct in a function of time analysis.

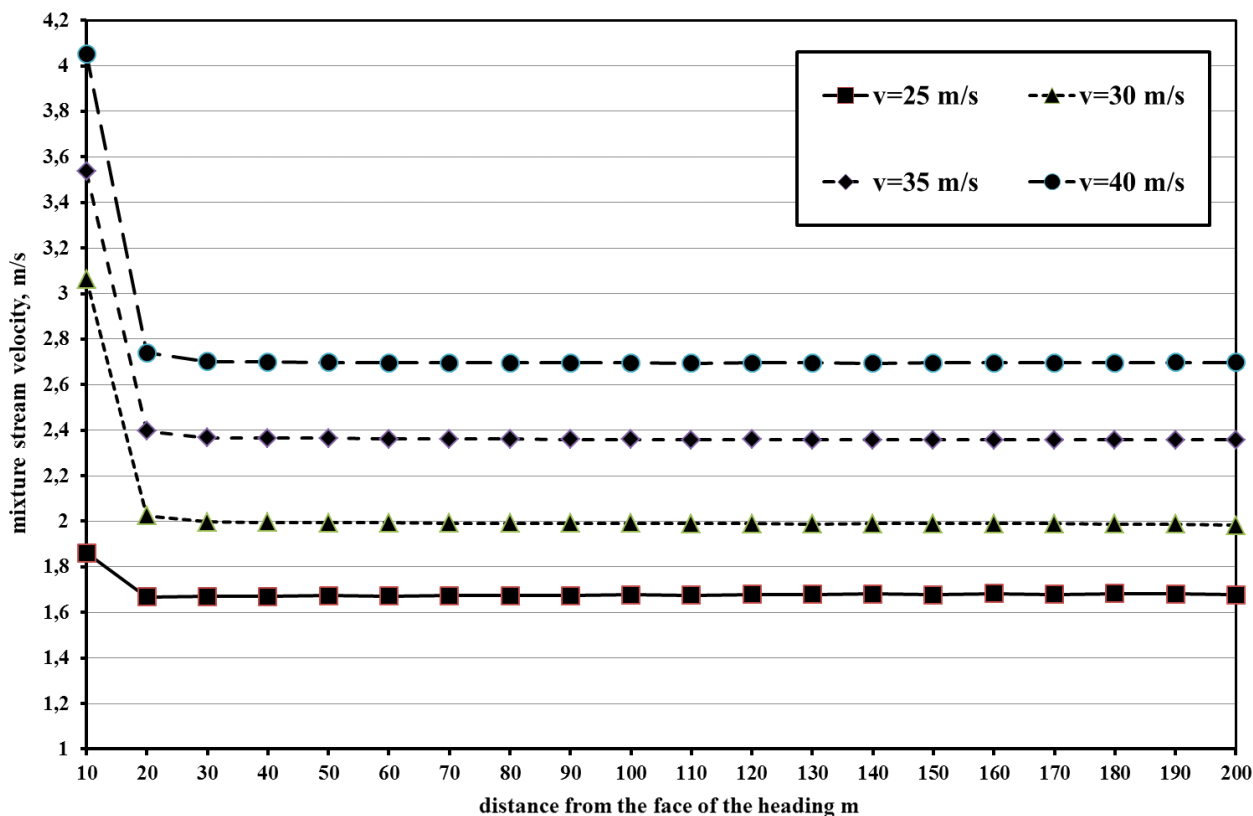


Fig. 4 Distribution of velocity of the mixture stream ( $v$ ) along heading after 600 seconds for different values of air stream velocity

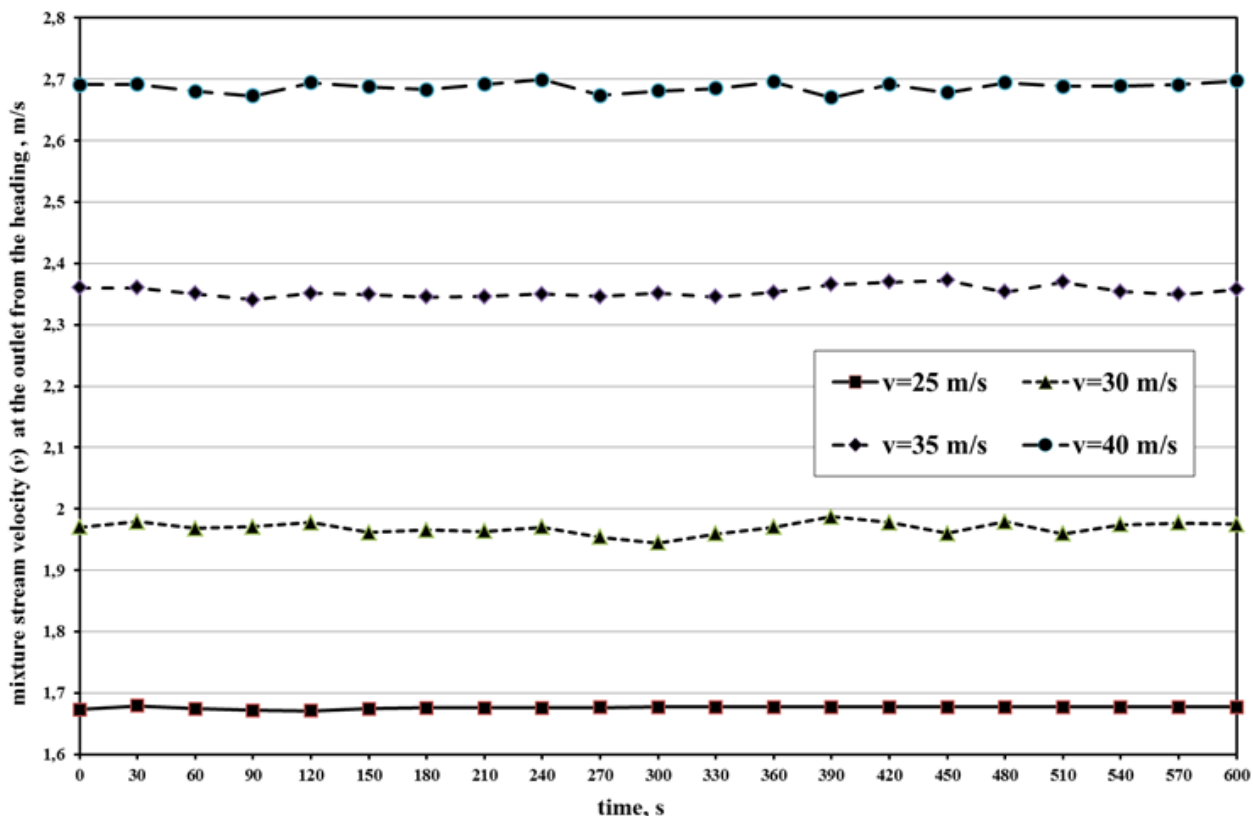


Fig. 5 Average value of velocities of mixture stream at the outlet from the heading for different values of air stream velocity ( $v$ ) forced through air-duct in a function of time analysis

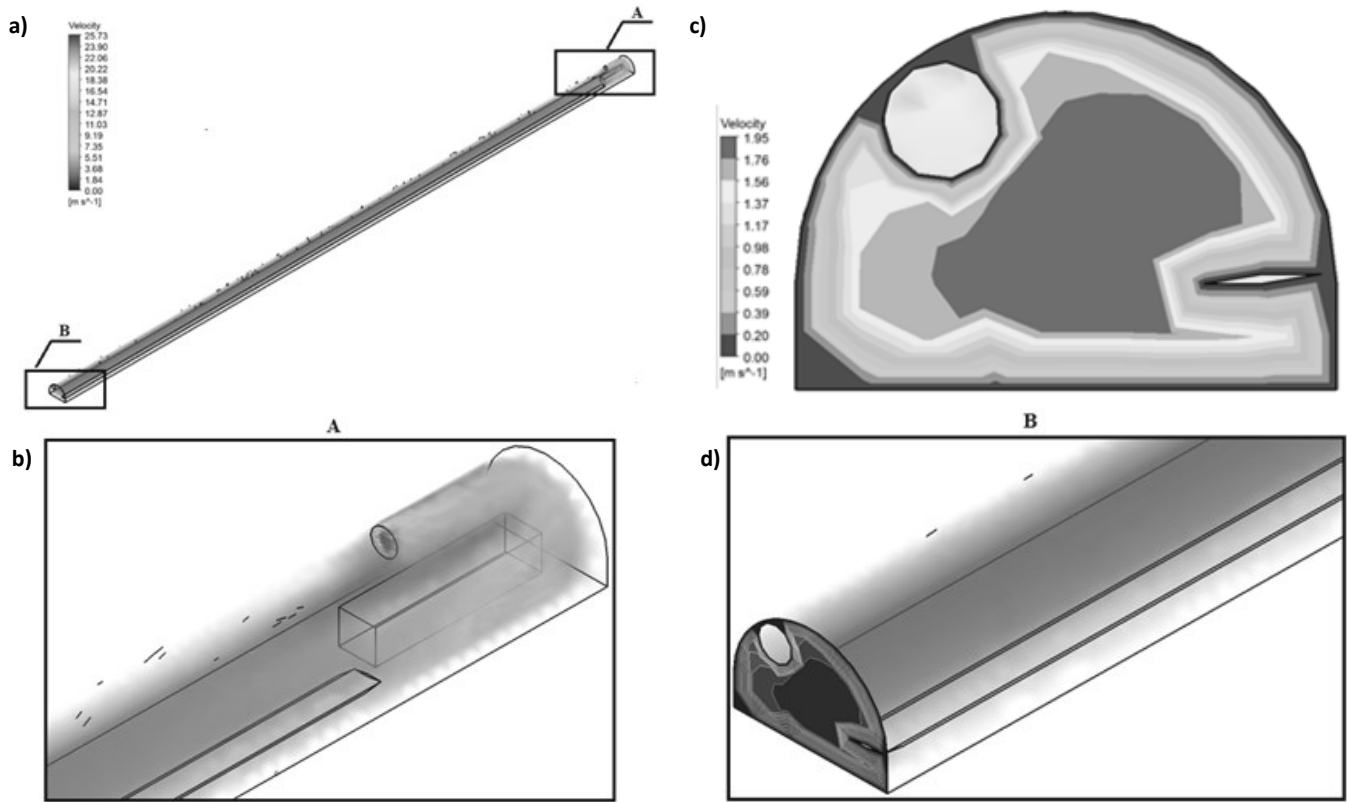


Fig. 6 Distributions of velocities of air and methane mixture in heading after 600 seconds of analysis for velocity of air stream at outlet from air-duct equals 25 m/s (a - in heading, b - in mine face, c - at outlet from heading, d - in outlet section from heading)

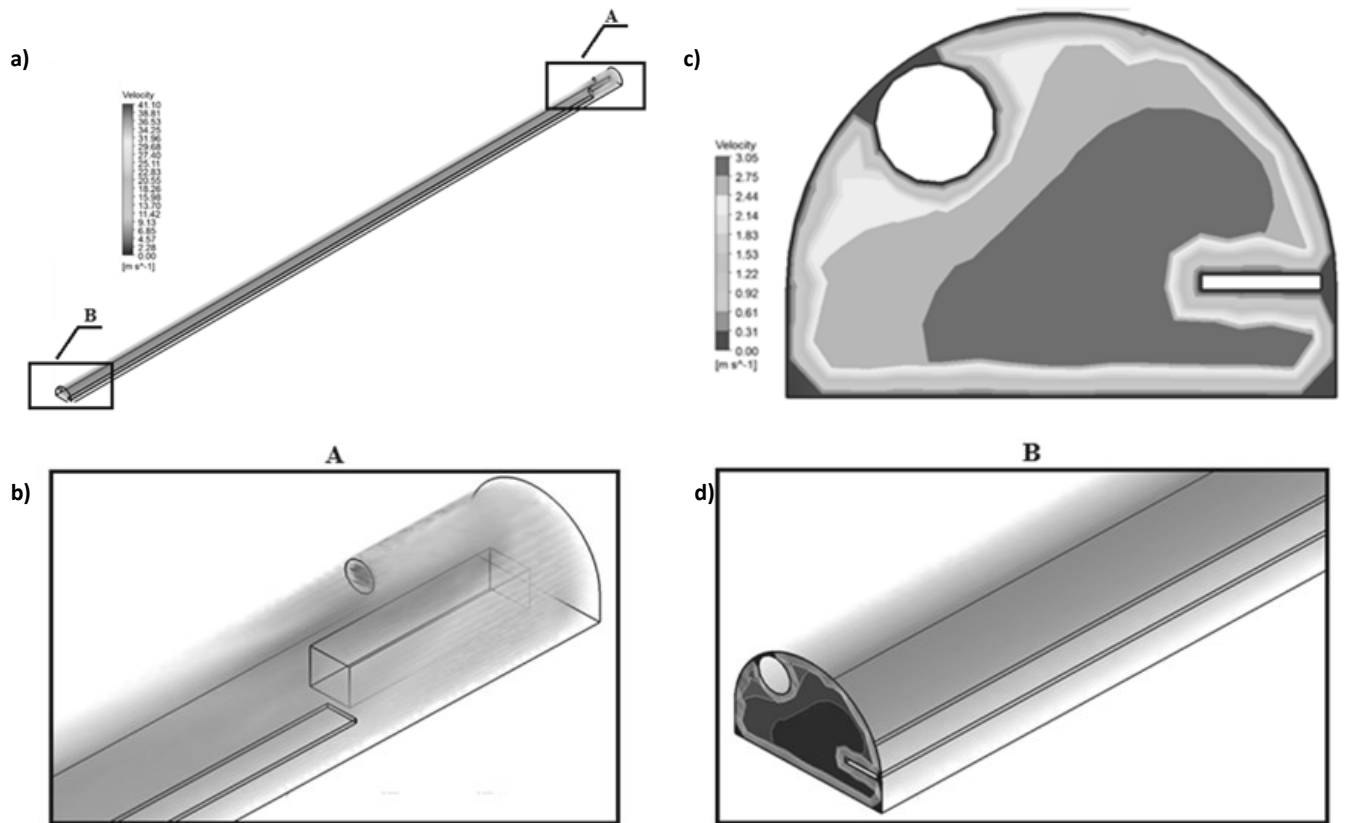


Fig. 7 Distributions of velocities of air and methane mixture in heading after 600 seconds of analysis for velocity of air stream at outlet from air-duct equals 40 m/s (a - in heading, b - in mine face, c - at outlet from heading, d - in outlet section from heading)

In Figures 6 and 7 distributions of vectors of velocity of the mixture for analyzed heading, for velocity at outlet from air-duct equal to 25 and 40 m/s are presented.

In Figure 8 there are presented changes of methane percentage concentration in the air mixture at outlet from heading in a function of time analysis, and in Figures 9 and 10 as function of distance from mine face.

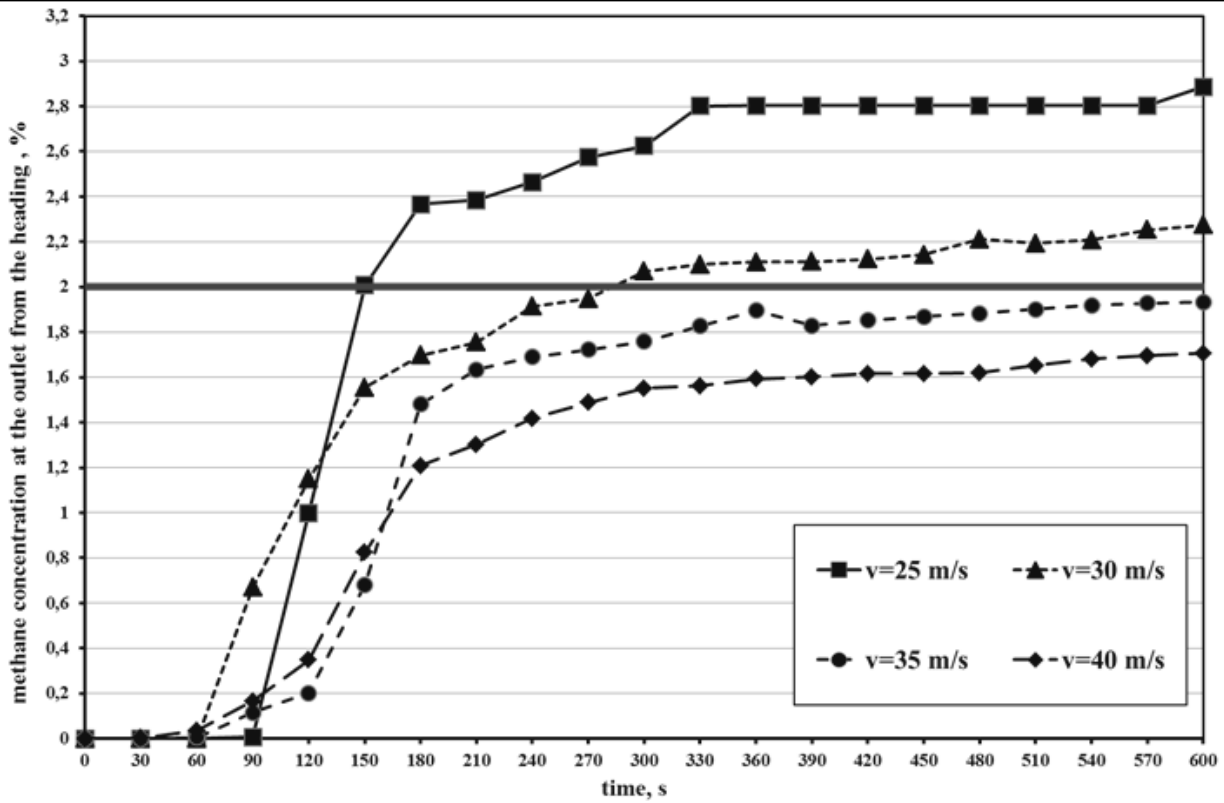


Fig. 8 Changes of methane percentage concentration in the air mixture at outlet from heading in a function of time analysis

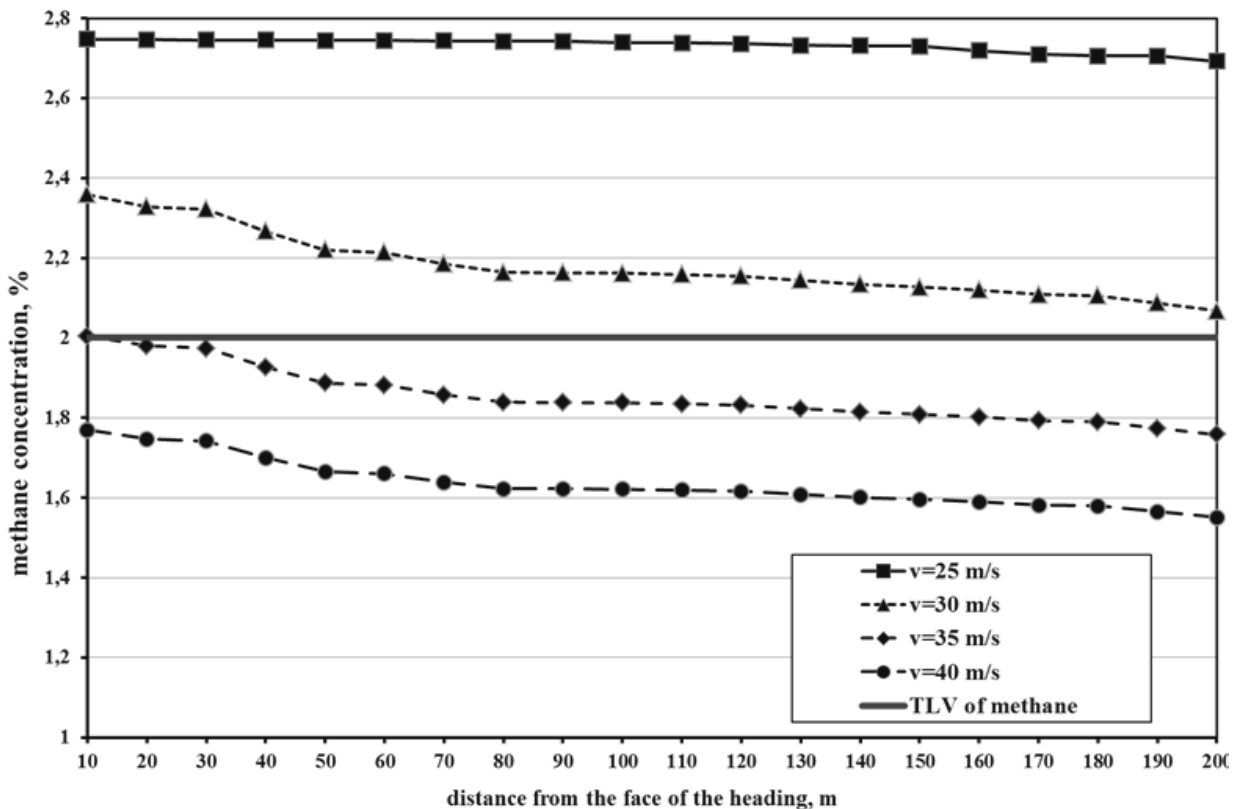


Fig. 9 Distribution of methane concentration along heading after 300 seconds for different values of air stream velocity

Performed analysis showed that the allowable methane concentration at the outlet from heading after 600 seconds, has not been exceeded at the stream velocity at the outlet of the air-duct equal 35 and 40 m/s. However, for velocity 25 and 30 m/s allowed value of methane concentration is exceeded faster as the air forced to air-duct stream velocity decreases. The highest methane concentration after 300 and 600 seconds of analysis, are observed in

mine face of driven heading. As a distance from the mine face increases, methane concentration in the heading decreases. This dependence is valid for all considered stream velocities of air forced into the heading. Although, only for air stream velocity at the air-duct outlet equal to 40 m/s, methane in the heading concentration value does not exceed the allowed value of 2% after 300 and 600 seconds of analysis.

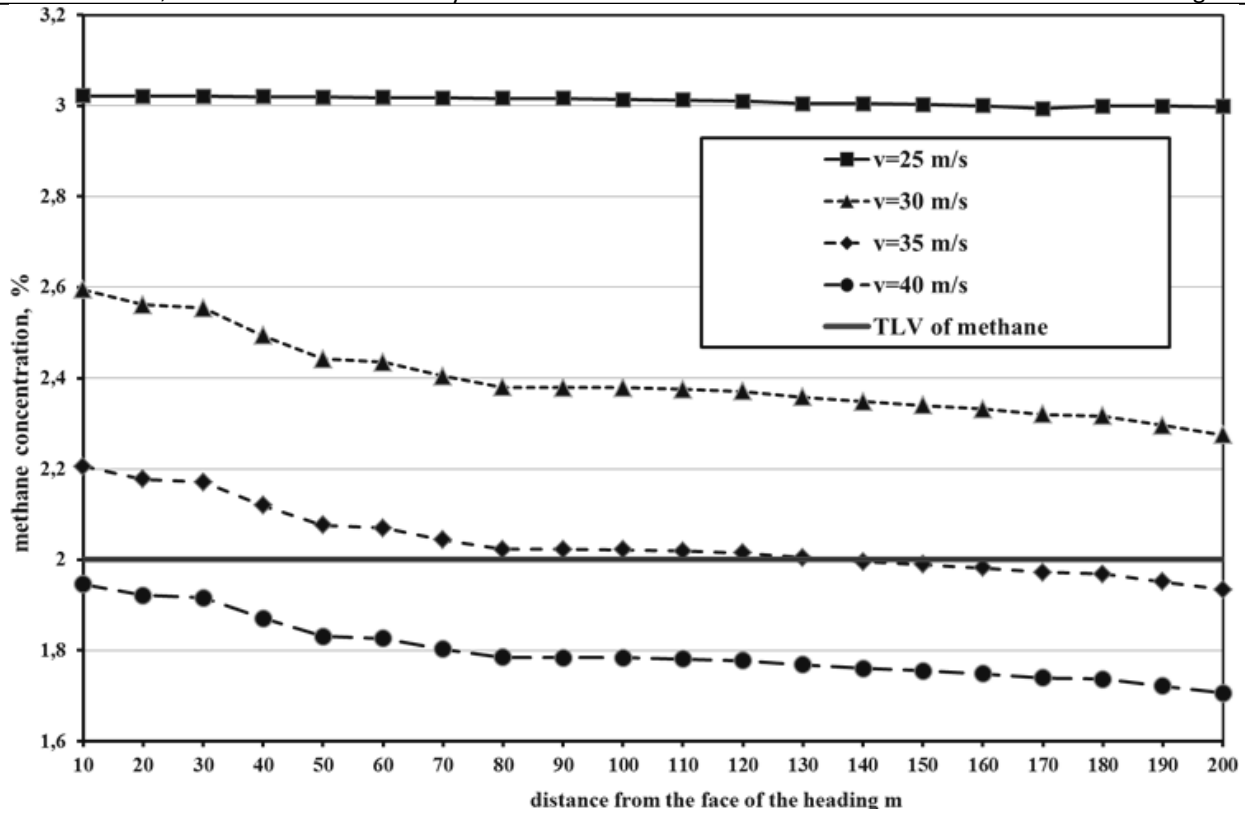


Fig. 10 Changes of methane percentage concentration in the air mixture at outlet from heading in a function of time analysis

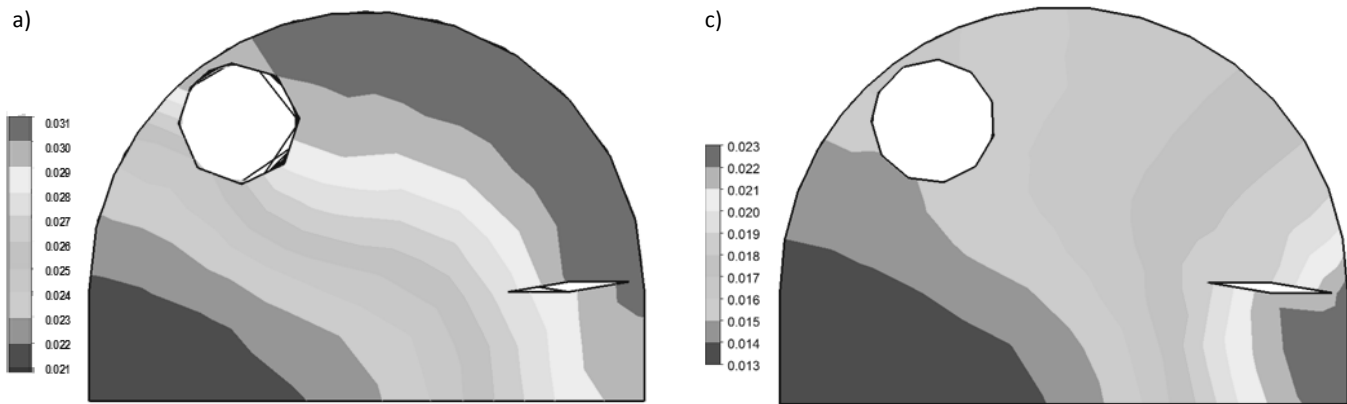


Fig. 11 Distribution of methane concentration in the mixture with air at outlet from analyzed heading after 600 seconds  
 a – distribution air stream supplied by air-duct to heading from velocity 25 m/s,  
 b - distribution air stream supplied by air-duct to heading from velocity 40 m/s

Therefore, it can be assumed that together with increasing time of methane emission from the mine face to the heading increases its concentration in entire heading.

In Figure 11 there is presented distribution of methane concentration in the mixture with air at outlet from analyzed heading for air stream supplied by air-duct to this heading from velocity equals 25 (Fig. 11a) and 45 m/s (Fig. 11b).

In Figures 12 and 13 there are presented distributions of methane concentration in mixture with air in distance 6, 50, 100 and 150 meters from mine face for air stream supplies by air-duct for this heading with velocity equals 25 m/s (Fig. 12) and 40 m/s (Fig. 13).

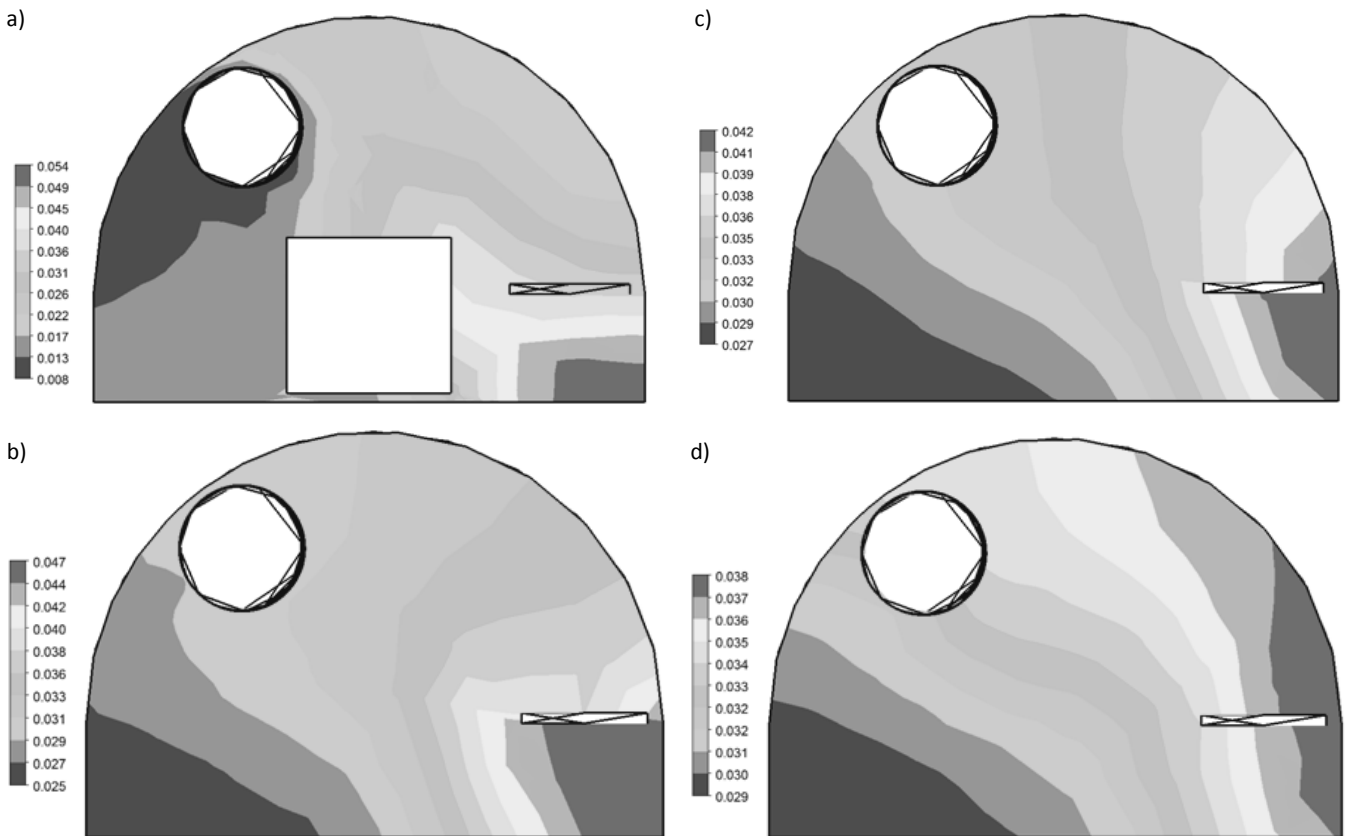
Performed analysis indicated that velocity of air stream forced through air-duct to the heading, has significant impact on methane concentration distribution along examined heading and in its cross-section depending on a distance from the mine face.

**CONCLUSIONS**

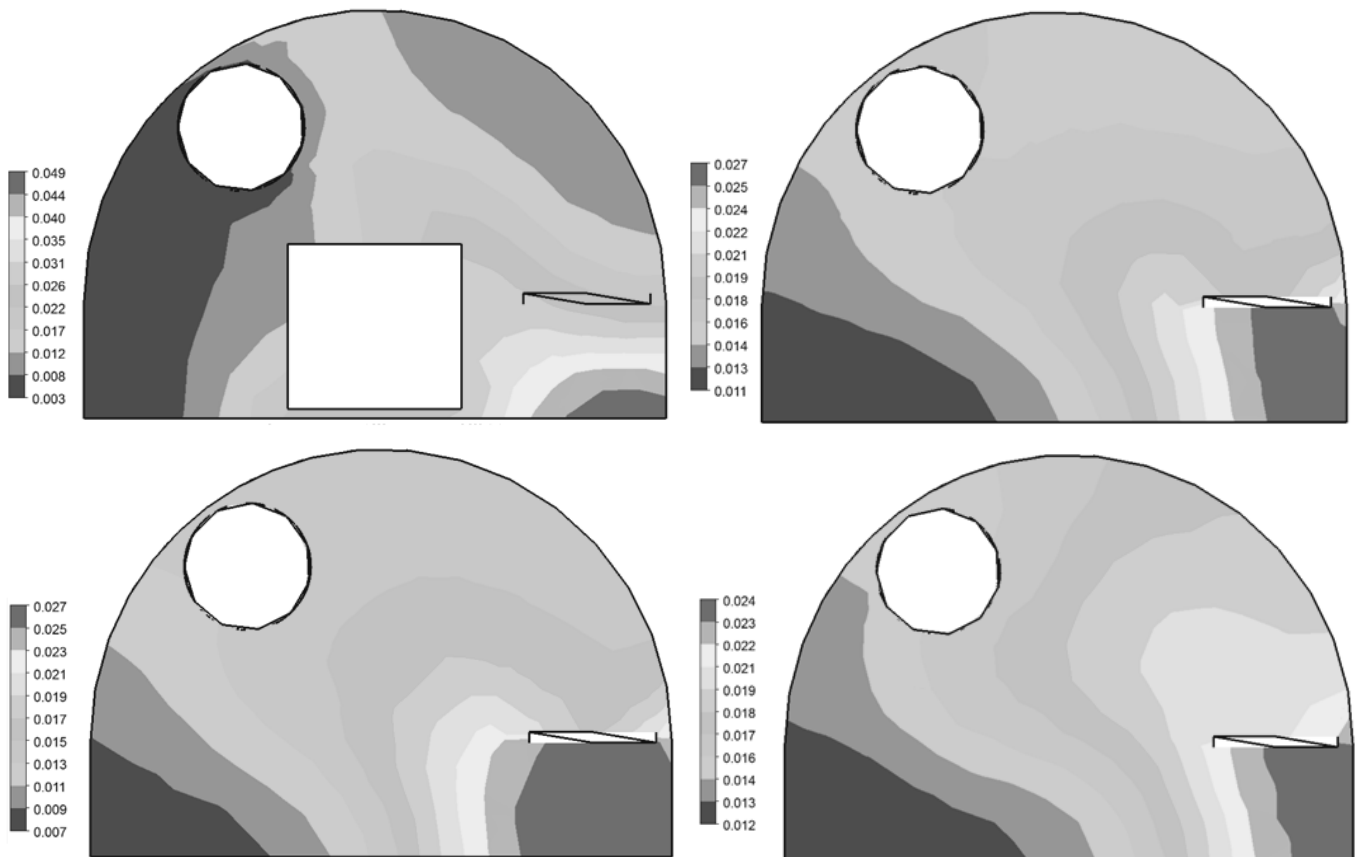
Developed and used model allowed to determine distribution of velocity of the mixture stream and methane concentration in heading.

Based on obtained results, one can conclude that air stream velocity at the outlet from air-duct has significant impact on the mixture velocity distribution in heading and on the methane concentration in this mixture. Together with increase of air stream velocity at the outlet from air-duct, methane concentration decreases along entire heading. It results from an increase of volumetric airflow rate incoming into heading.

The value of velocity of an air stream forced into the mine face of heading has also impact on methane concentration distribution along heading and in its cross-section. Obtained results confirm that methane accumulates at the roof of heading.



**Fig. 12** Distribution of methane concentration in the mixture in cross-section excavation after 600 seconds for air stream supplies by air-duct with velocity equals 25 m/s  
 a – with in distance 6 m meters from mine face, b –with in distance 50 m meters from mine face,  
 c – with in distance 100 m meters from mine face, d – with in distance 150 m meters from mine face



**Fig. 12** Distribution of methane concentration in the mixture in cross-section excavation after 600 seconds for air stream supplies by air-duct with velocity equals 40 m/s  
 a – with in distance 6 m meters from mine face, b –with in distance 50 m meters from mine face,  
 c – with in distance 100 m meters from mine face, d – with in distance 150 m meters from mine face



Also at lower values of velocity of an air stream forced into the mine face of heading, there was observed considerable increases of methane concentration under belt conveyor, which values were higher than that at roof of a heading. In such cases it seems necessary to control methane concentration also under the belt conveyor.

Based on obtained results, one can precisely determine the value of fresh air and methane mixture velocity and methane concentration at analyzed heading at any moment and point in heading. This has significant meaning during determination of zone in headings, at which methane concentration could exceed allowed value.

## REFERENCES

- [1] Ansys Fluent Theory Guide 14.0., 2011.
- [2] T. Bielewicz, B. Prus, J. Honysz. *Górnictwo Część I*. Wydawnictwo Śląsk 1993.
- [3] M. Branny. "Computer Simulation of flow of air and methane mixture in the longwall-return crossing zone". *Archives of Mining Sciences*, 51, Issue 1, 2006.
- [4] J. W. Elsner. *Turbulencja przepływów*. Warszawa, Wyd. PWN, 1987.
- [5] J. Kabiesz. *Raport roczny o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego*. Katowice, Główny Instytut Górnictwa, 2014.
- [6] H. Kryptoń. „Przegląd i weryfikacja metod prognozowania metanowości bezwzględnej wyrobisk korytarzowych drążonych kombajnami w kopalniach węgla kamiennego”. *Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko*, nr 4, 2007.
- [7] J. C. Kurnia, A. P. Sasmito, A. S. Mujumdar. *Computational study of thermal management in underground coal mines: effect of operating ventilation parameters*. Singapore, National University of Singapore, 2012.
- [8] J. C. Kurnia, A. P. Sasmito, A. S. Mujumdar. "CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces". *Applied Mathematical Modelling*, no. 38, 2014. DOI: 10.1016/j.apm.2013.11.067
- [9] J. C. Kurnia, A. P. Sasmito, A. S. Mujumdar. "Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines". *Tunnelling and Underground Space Technology*, no. 42, 2014. DOI: 0.1016/j.tust.2014.03.009
- [10] T. Pindór, L. Preisner. *Zagrożenia naturalne i techniczne a zarządzanie ryzykiem w górnictwie węgla kamiennego*. Wydawnictwa AGH, 2009.
- [11] A. C. Reddy. "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] T. X. Ren, J. S. Edwards, R. R. Józefowicz. "CFD Modeling of methane flow around longwall faces" in 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] N. Szlązak, D. Obracaj, M. Borowski. „Optymalny dobór parametrów wentylacji lutniowej dla wyrobisk korytarzowych przy wykorzystaniu programu komputerowego AGHWEN”. *Kwartalnik AGH Górnictwo*, r. 25, z. 3, 2001.
- [15] N. Szlązak, J. Szlązak, A. Tor. *Systemy przewietrzania ślepych wyrobisk w kopalniach węgla kamiennego w warunkach zagrożenia metanowego i pyłowego*. Kraków, UWND AGH 2003.
- [16] N. Szlązak, D. Obracaj, M. Borowski. „Systemy przewietrzania ślepych wyrobisk ślepych w kopalniach węgla kamiennego”. *Przegląd Górniczy*, nr 7-8, 2003.
- [17] N. Szlązak, D. Obracaj, Ł. Szlązak. „Projektowanie parametrów wentylacji lutniowej w drążonych wyrobiskach podziemnych z wykorzystaniem programu komputerowego AGHWEN-3.0”. *Górnictwo i Geoinżynieria*, r. 29, z. 3/1, 2005.
- [18] M. R. Sławomirski, P. Skotniczny. „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] K. K. Veersteg, W. Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method*. Pearson Education, 2007.

---

dr hab. inż. Jarosław Brodny, prof. Pol. Śl.  
Silesian University of Technology, Faculty of Organisation and Management  
Institute of Production Engineering  
ul. Roosevelta 26-28, 41-800 Zabrze, POLAND  
e-mail: jaroslaw.brodny@polsl.pl  
mgr inż. Magdalena Tutak  
Silesian University of Technology, Faculty of Mining and Geology  
Institute of Mining  
ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, POLAND  
e-mail: magdalena.tutak@polsl.pl

## **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].

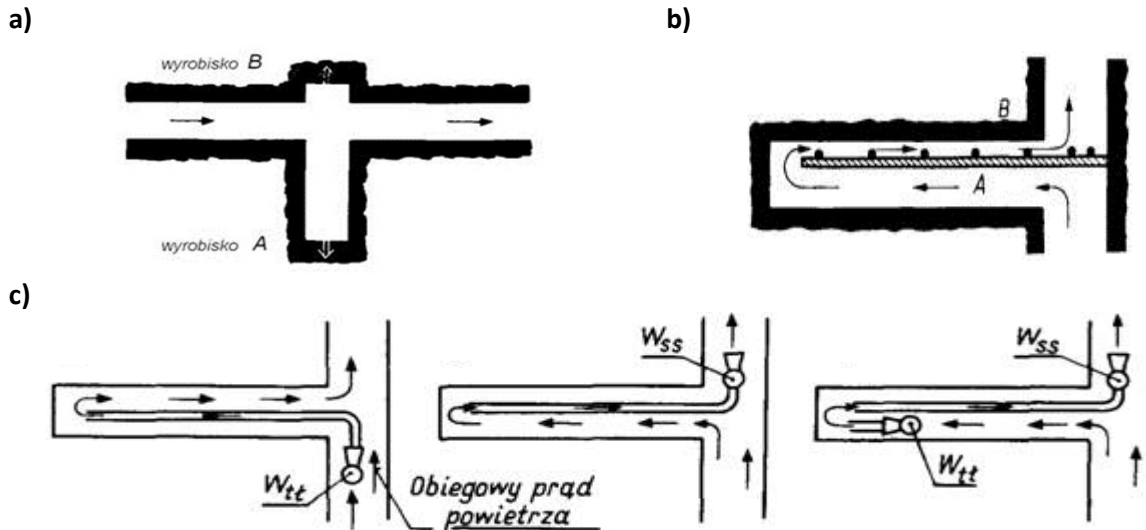
Drażone wyrobiska korytarzowe są wyrobiskami ślepyimi, tj. mającymi tylko jedno połączenie z drogami przepływu strumienia powietrza, co powoduje znaczne utrudnienia w procesie ich przewietrzania. Wyrobiska te wykonywane są najczęściej na etapie prowadzenia robót przygotowawczych, których zasadniczym 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:

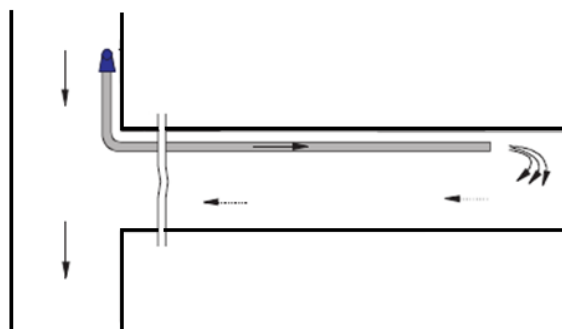
a) przez dyfuzję, b) z przegrodą wentylacyjną, c) lutniociągami (tłoczące, ssące, kombinowane)

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 PRZEPLYWU

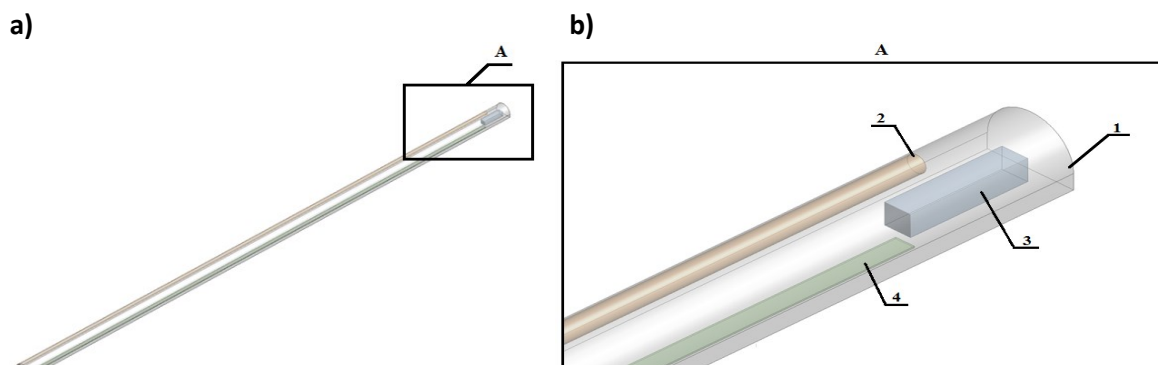
Analizie poddano drażone wyrobisko korytarzowe mające tylko jedno połączenie z drogami przepływu strumienia powietrza. Przyjęto, że wyrobisko to jest zasilane strumieniem świeżego powietrza z lutniociągu tłoczącego, a z jego przodka wydziela się metan.

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 lutniociągami, 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, 35 m/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%.

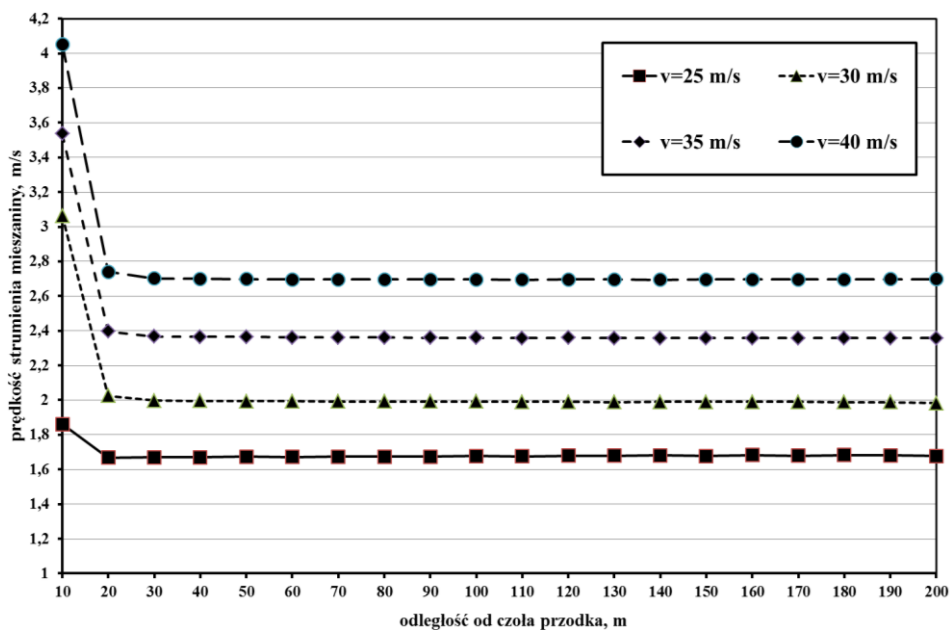
Przy modelowaniu wydzielania się metanu z czoła drążonego chodnika przyjęto, że metanowość bezwzględna wynosi  $0,084 \text{ m}^3/\text{s}$ . Czas analizy objął 600 sekund.

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.

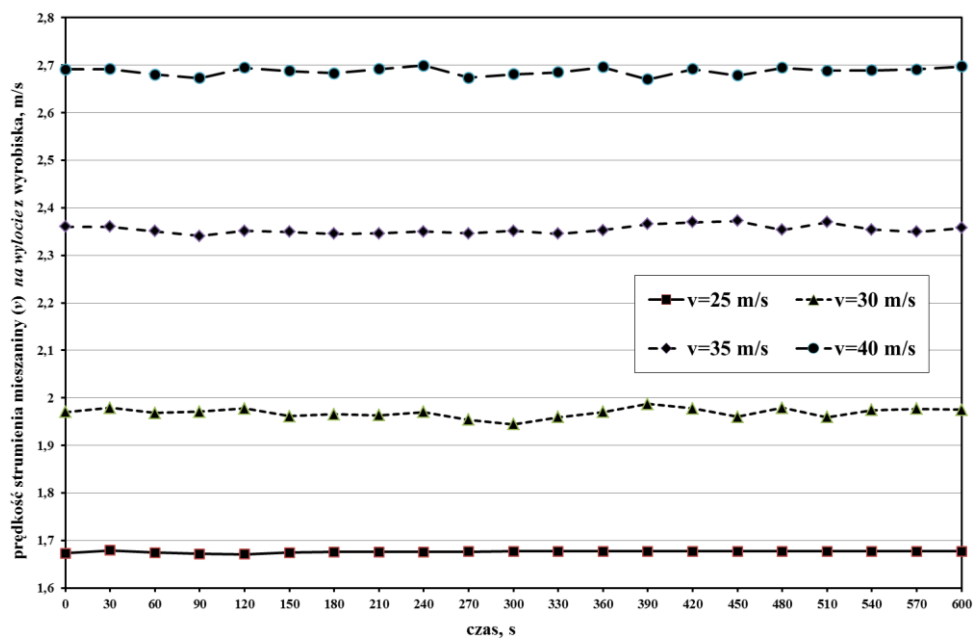
### Wyniki analizy

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 lutniociągami tłoczącymi 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.



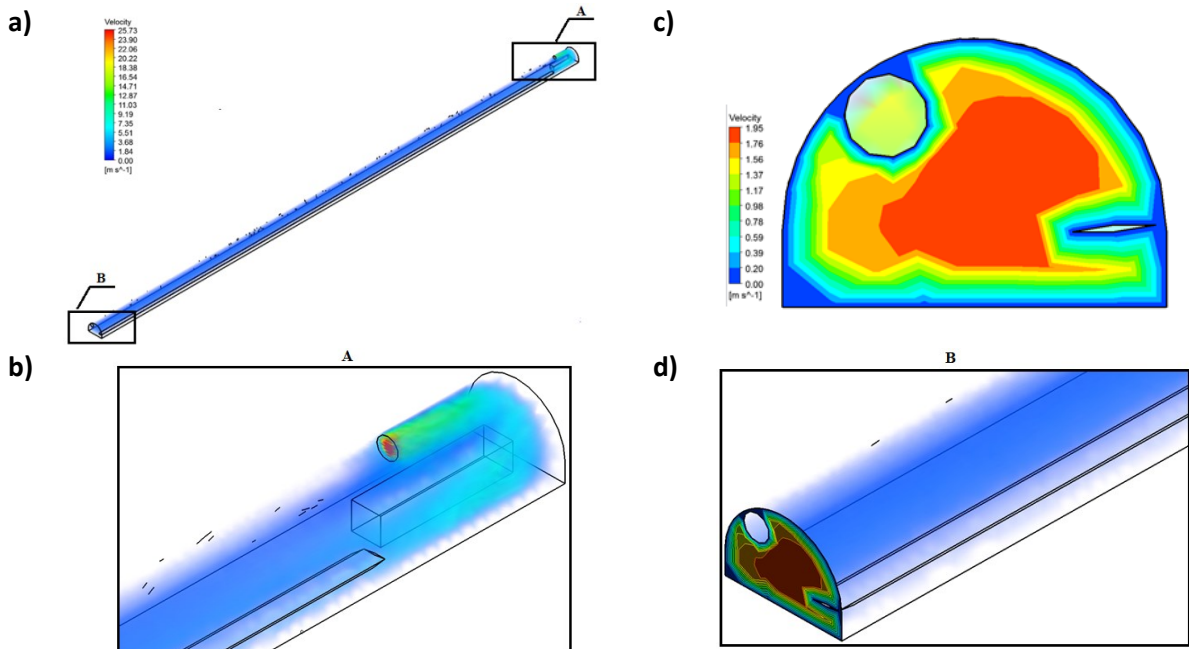
Rys. 4 Rozkład prędkość strumienia mieszaniny ( $v$ ) wzdłuż wyrobiska po czasie analizy 600 sekund dla różnych prędkości wylotowych strumienia powietrza z lutniociągu



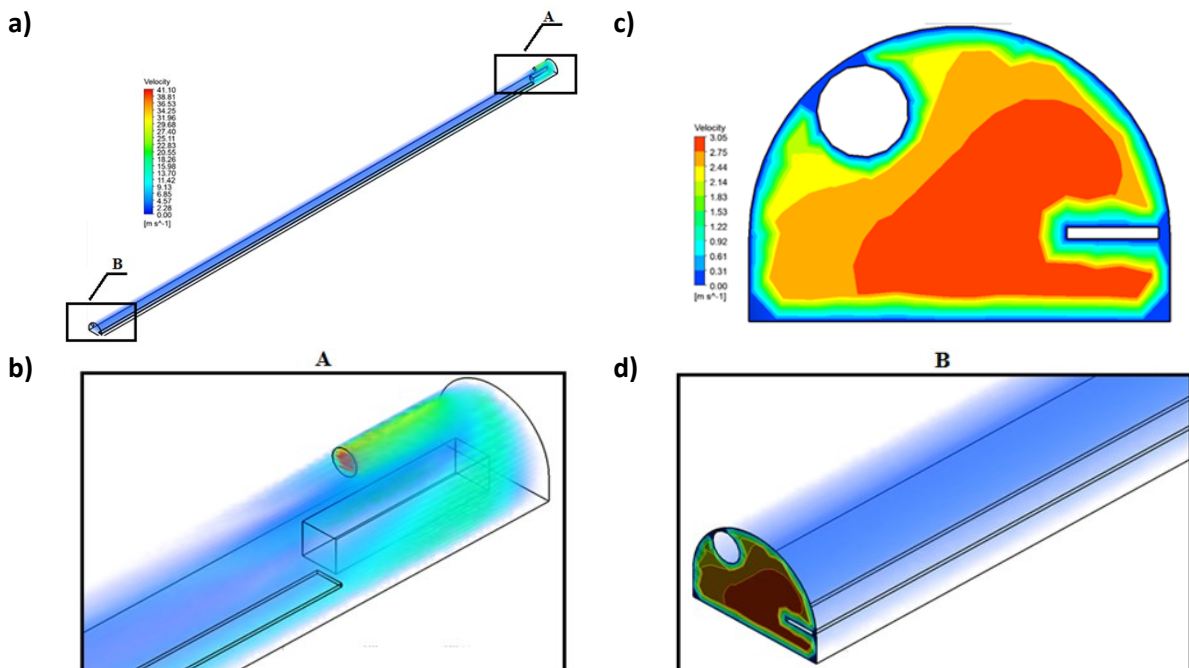
Rys. 5 Średnia prędkości strumienia mieszaniny na wylocie z drążonego wyrobiska korytarzowego dla różnych wartości prędkości ( $v$ ) strumienia powietrza tłoczonego przez lutniociąg w funkcji czasu analizy

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.



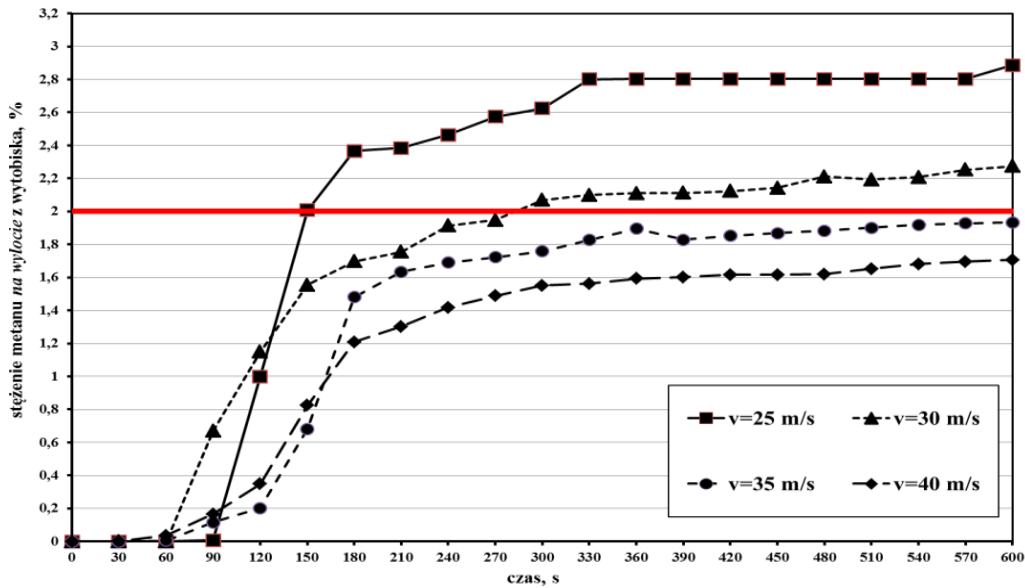


Rys. 6 Rozkłady prędkości mieszanki powietrza i metanu w wyrobisku po 600 sekundach analizy dla prędkości strumienia powietrza *na wylocie* z lutniociągu wynoszącej 25 m/s  
 a – rozkład prędkości w całym wyrobisku, b – rozkład prędkości w ślepych przodkach,  
 c – rozkład prędkości *na wylocie* z wyrobiska,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



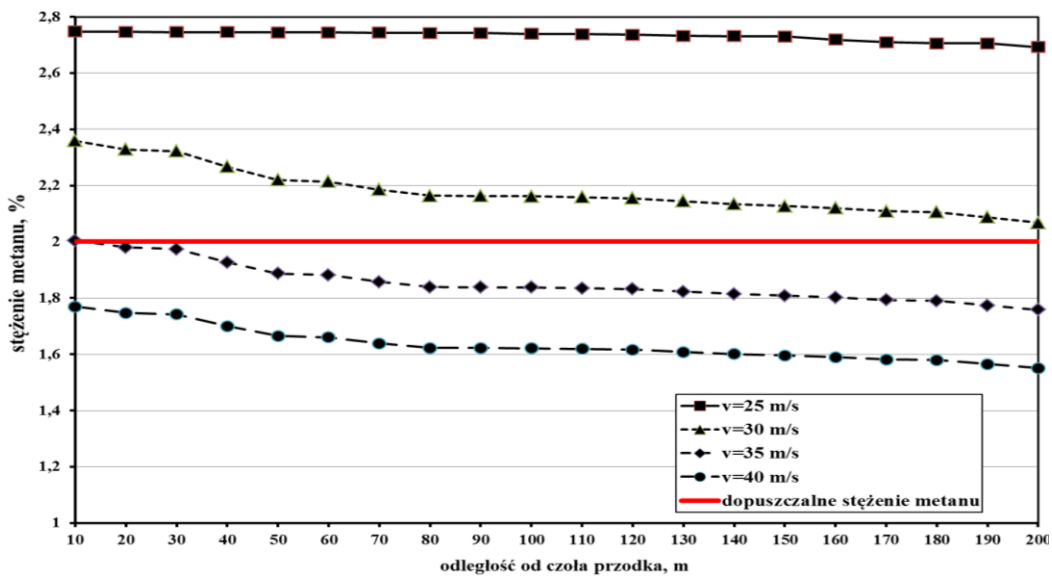
Rys. 7 Rozkłady prędkości mieszanki powietrza i metanu w wyrobisku po 600 sekundach analizy dla prędkości strumienia powietrza *na wylocie* z lutniociągu wynoszącej 40 m/s  
 a – rozkład prędkości w całym wyrobisku, b – rozkład prędkości w ślepych przodkach,  
 c – rozkład prędkości *na wylocie* z wyrobiska,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

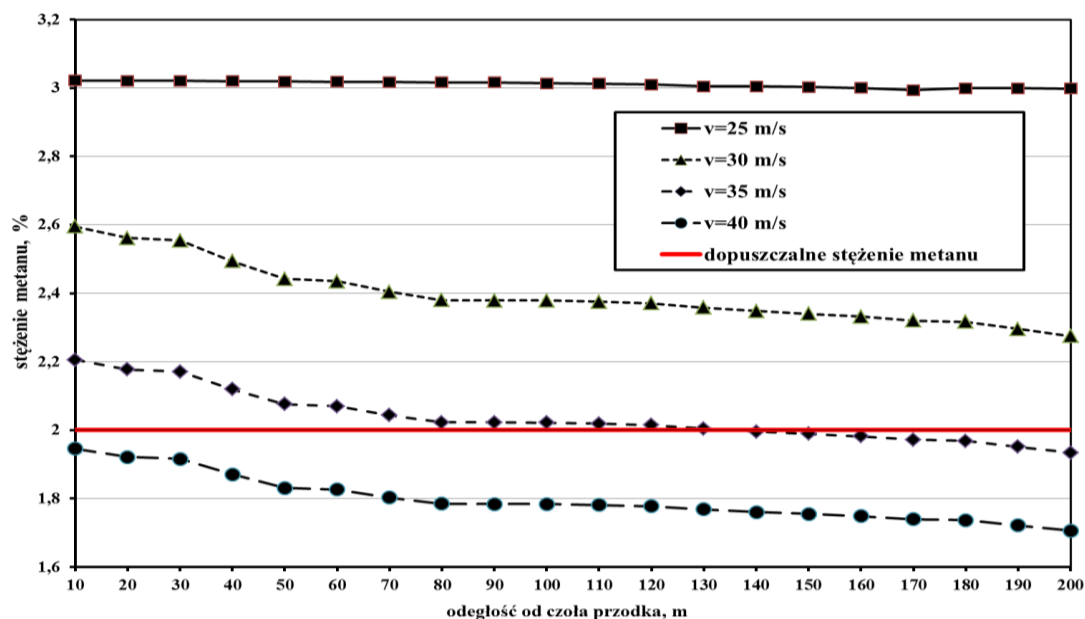


Rys. 8 Stężenie metanu *na wylocie* z drążonego wyrobiska korytarzowego dla różnych wartości prędkości (*v*) strumienia powietrza tłoczonego przez lutniociąg w funkcji czasu analizy

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

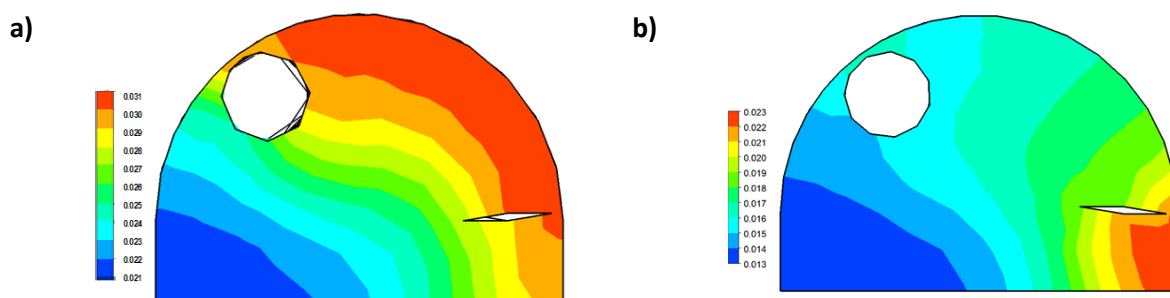


Rys. 10 Rozkład stężenia metanu wzdłuż wyrobiska po czasie analizy 600 sekund dla różnych prędkości wylotowych strumienia powietrza z lutniociągu

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%.

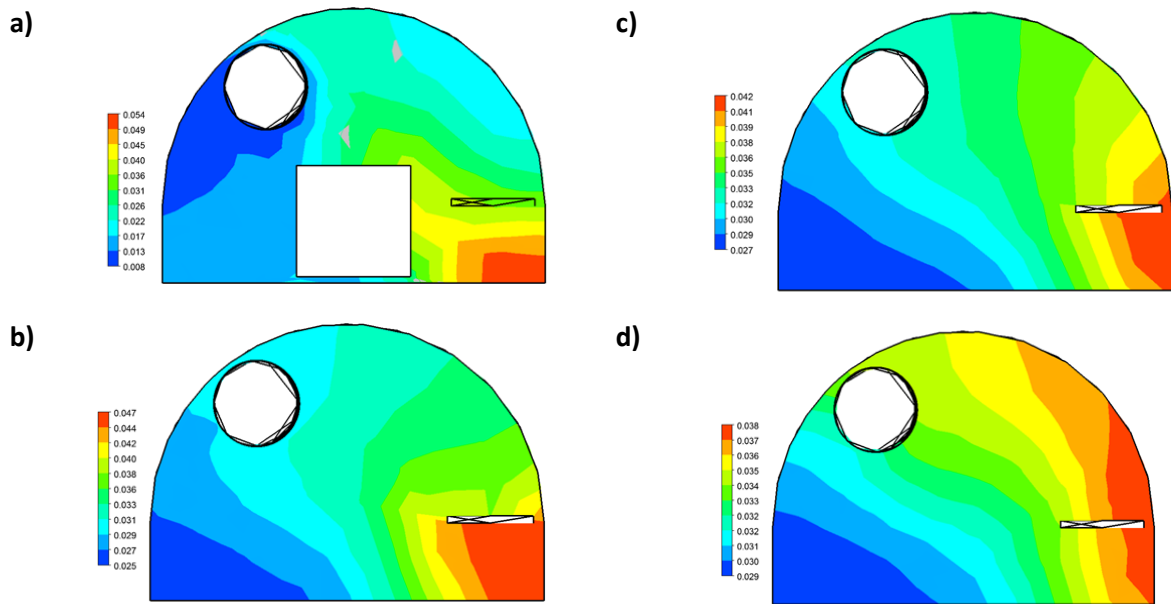
Na rysunku 11 przedstawiono rozkłady stężenia metanu w mieszaninie z powietrzem na wylocie z analizowanego wyrobiska (200 m od czoła przodka z którego wydziela się metan) dla strumienia powietrza doprowadzanego lutniociągiem do tego wyrobiska z prędkością równą 25 m/s (rys. 11a) i 40 m/s (rys. 11b).



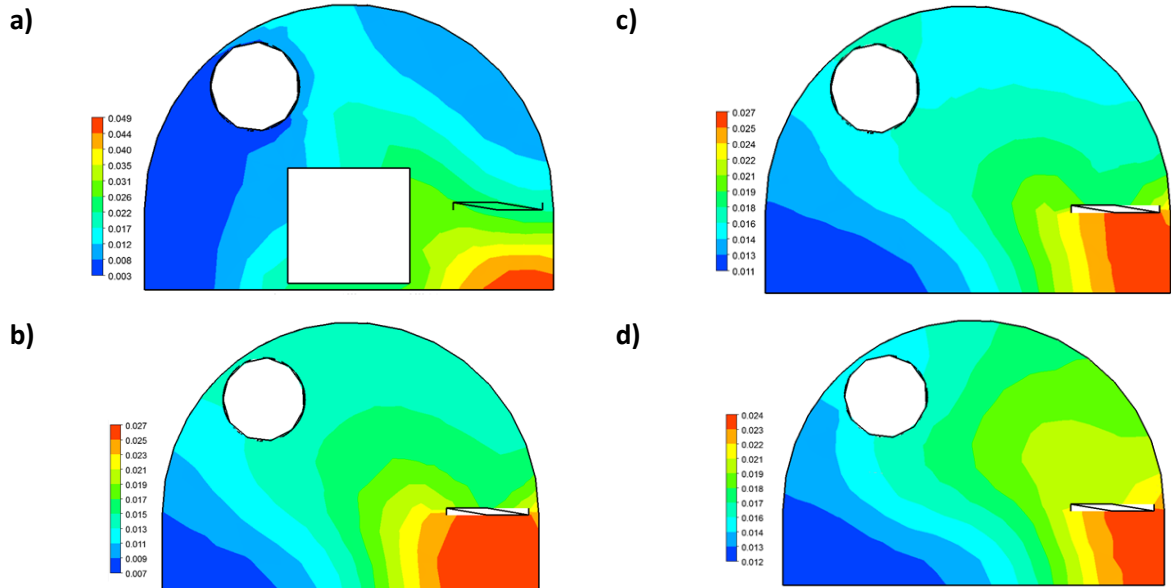
Rys. 11 Rozkłady stężenia metanu na wylocie z wyrobiska po czasie analizy 600 sekund  
a – rozkład dla prędkości *na wylocie* z lutniociągu 25 m/s,  
b - rozkład dla prędkości *na wylocie* z lutniociągu 40 m/s

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. Kryptoń 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.