Modele numeryczne turbulencji – źródła i dostosowanie do specyfiki aerologii górniczej

JERZY KRAWCZYK, JAKUB JANUS, BARTŁOMIEJ GŁUCH, PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY, PIOTR OSTROGÓRSKI

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

W artykule omówiono temat modelowania zjawisk turbulentnych w kopalniach podziemnych. Kopalnie podziemne ze względu na technologię wydobycia posiadają skomplikowaną sieć wentylacyjną. Dotychczas stosowane w wentylacji przemysłowej i nie tylko półempiryczne modele turbulencji posiadają stałe, które zostały określone w wyniku badań podstawowych dla geometrii odbiegających od tych spotykanych w górnictwie. Zastosowanie tego typu modeli umożliwia poszukiwanie rozwiązań dla wielu zagadnień, jednak kosztem konieczności sprawdzenia, czy dany model jest w stanie wystarczająco dobrze opisywać wybrane zagadnienia. Dla wentylacji kopalń podziemnych tego typu walidacje przeprowadzono w bardzo ograniczonym zakresie i nie wystarczają one do pełnej reprezentacji zjawisk występujących w wyrobiskach kopalnianych. W związku z tym pojawiła się potrzeba uaktualnienia lub rozszerzenia istniejących wartości stałych stosowanych w modelach numerycznych odpowiednich do geometrii wyrobisk górniczych. W artykule przeprowadzono przegląd dotychczas stosowanej metodyki określania stałych w wybranych modelach turbulencji na podstawie wyników badań eksperymentalnych typowych zagadnień przepływowych. Określono zarys analogicznego programu badań w zakresie wybranych zagadnień przepływowych charakterystycznych dla wentylacji kopalń.

Słowa kluczowe: numeryczna mechanika płynów, turbulentny przepływ, modele turbulencji, stałe modelu k- ε , termoanemometry, anemometria obrazowa PIV

1. Wprowadzenie

Kopalnie podziemne posiadają skomplikowaną i złożoną strukturę wyrobisk. Obecność ludzi i praca urządzeń związana z prowadzeniem wydobycia wymaga odpowiedniej wentylacji wyrobisk. Ze względu na wielkość wyrobisk i wymagane ilości powietrza w kopalniach podziemnych dominuje turbulentny charakter przepływu. Podczas przewietrzania wyrobisk w powietrzu zachodzą procesy wymiany ciepła i masy. Wiedza o przepływach turbulentnych w wyrobiskach podziemnych ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa jak i efektywności prac górniczych. Coraz większy udział w poszerzaniu stanu wiedzy w tym zakresie mają symulacje komputerowe wykorzystujące metody numerycznej mechaniki płynów, a w szczególności metoda objętości skończonej. Złożoność geometrii wyrobisk obszarów obliczeniowych i zakres liczb Reynoldsa uniemożliwiają stosowanie bezpośredniej symulacji numerycznej (ang. DNS – direct numerical simulation) opartej wprost na równaniach Naviera-Stokesa. W rozwiązywaniu złożonych zagadnień wykorzystuje się uproszczone modele półempiryczne. Uproszczenia powodują zastosowanie w równaniach stałych empirycznych, które zostały określone w wyniku badań podstawowych. Zastosowanie tego typu modeli umożliwia poszukiwanie rozwiązań dla wielu zagadnień, jednak kosztem konieczności tzw. walidacji, czyli sprawdzenia, czy dany model jest w stanie wystarczająco dobrze opisywać wybrane zagadnienia. Dla wentylacji kopalń podziemnych walidacje przeprowadzono w bardzo ograniczonym zakresie i nie wystarczają one do pełnej reprezentacji zjawisk występujących w wyrobiskach kopalnianych. W związku z tym pojawiła się potrzeba uaktualnienia lub rozszerzenia istniejących wartości stałych stosowanych w modelach numerycznych odpowiednich do specyfiki przepływów w wyrobiskach górniczych. Taki program badań wymaga przeglądu literatury celu opracowania koncepcji badań w aspekcie poprawności rozwiązań numerycznych różnych przypadków przepływowych w strukturach górniczych geometrycznie odbiegających od powszechnie spotykanych w przemyśle. Opracowana koncepcja badań pozwoli na zaprojektowanie cyklu eksperymentów laboratoryjnych oraz in situ mających na celu uzyskanie wiedzy na temat mechanizmu turbulentnej wymiany masy w otoczeniu ścian wyrobiska górniczego. Pozyskana wiedza będzie stanowiła podstawę do określenia wartości współczynników empirycznych stosowanych w modelowaniu turbulentnego przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych.

2. Wybrane metody opisu turbulencji

Klasyczne modelowanie turbulencji oparte jest na hipotezie Reynoldsa zgodnie z którą, chwilowe wartości wszystkich charakteryzujących przepływ wielkości fizycznych w danym punkcie obszaru przepływu są sumą wielkości uśrednionych w czasie i przestrzeni i składowych fluktuacyjnych. Zastosowanie tej koncepcji do równań Naviera-Stokesa przekształca je do postaci znanej jako równania Reynoldsa, nazwanych modelami RANS. Istnieją też alternatywne podejścia, wśród których można wymienić metody nazwane od ich anglojęzycznych skrótów LES i DNS. LES to metoda symulacji dużych wirów turbulentnych. Podstawowym założeniem metody jest separacja ciągłego widma energii turbulentnych fluktuacji na część rozwiązywaną (numeryczną) i modelowaną (analityczną).



Rys. 1. Modele turbulencji dostępne w środowisku ANSYS Fluent

DNS to metoda bezpośredniej symulacji obliczeniowej przepływów turbulentnych, Polega ona na bezpośrednim rozwiązywaniu równań Naviera-Stokesa bez jakichkolwiek uproszczeń, co oznacza uwzględnienie w obliczeniach wszystkich skal turbulencji. Obliczenia przy użyciu metody DNS umożliwiają prawidłowe odtworzenie dynamiki wszystkich skal liniowych i czasowych turbulencji, które w odróżnieniu do RANS nie są modelowane, lecz wynikają z numerycznego rozwiązania. Do rozwiązywania zagadnień z zakresu numerycznej mechaniki płynów często wykorzystuje się oprogramowanie ANSYS Fluent. Na rysunku 1 przedstawione zostały dostępne modele w środowisku omawianego oprogramowania.

3. Opis modelu turbulencji k- ε

Zaproponowany po raz pierwszy przez Chou w roku 1945 model turbulencji k- ε , jest półempirycznym modelem opartym na równaniach transportu energii kinetycznej turbulencji k oraz jej dyssypacji ε [1]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + R_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon$$
(3.1)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} R_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$
(3.2)

gdzie: $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_{\varepsilon}$ – stałe modelu.

Lepkość turbulentna wyznaczana jest z zależności:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.3}$$

Parametry stałe, zostały wyznaczone empirycznie i wynoszą:

$$C_{\mu} = 0.09$$
 $C_{1\varepsilon} = 1.44$ $C_{2\varepsilon} = 1.92$ $\sigma_k = 1.0$ $\sigma_{\varepsilon} = 1.3$

W modelu tym, przyjmuje się reprezentację tensora naprężeń Reynoldsa w postaci:

$$R_{ij} = \rho \overline{\hat{u}_i \hat{u}_k} = -\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right] + \frac{2}{3} \left(k + \mu_T \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \delta_{ik}$$
(3.4)

lub w bardziej uproszczonej postaci dla przepływów izochorycznych:

$$R_{ij} = \rho \overline{\hat{u}_i \hat{u}_k} = -\mu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right] + \frac{2}{3} k \delta_{ik}$$
(3.5)

gdzie: δ_{ik} – delta Kroneckera.

Jest to model turbulencji, który w praktyce jest stosowany najczęściej. Symulacje przy jego użyciu dobrze odzwierciedlają turbulentne przepływy swobodne, ale jednak dają gorsze rezultaty w pobliżu ścian sztywnych oraz gdy w przepływie występują krzywizny linii prądu lub silne zawirowania. Model ten jest zaliczany do tzw. modeli dla dużych liczb Reynoldsa.

4. Przegląd literatury

Początki powstania modeli turbulencji sięgają początku XX wieku. Za pierwszy model turbulencji uznaje się model mixing-length opracowany przez Prandtl'a [7]. Model mixing-length został zastosowany z sukcesem do modelowania swobodnych turbulentnych warstw granicznych. Modele turbulencji wraz z czasem ewoluowały. Nowe modele powstawały na podstawie wcześniej stworzonych. Porównanie ich bywa niekiedy utrudnione z uwagi na to, że w literaturze występuje zamieszanie w oznaczeniach różnych parametrów. Najwięcej informacji na temat określania stałych modelu modelu k- ε znaleziono w publikacjach, których autorami są B. E. Laundera, A. Morse, W. Roddiego oraz J. Laufera [2,3,5,8].

W doktoracie W. Rodiego zatytułowanym "The prediction of free turbulent boundary layers by use of a two-equation model of turbulence" z roku 1972 znajduje się opis eksperymentu dotyczący wyznaczania stałej lepkości C_{μ} modelu k- ε . W. Rodi określił wartość stałej lepkości C_{μ} modelu k- ε na podstawie wyznaczonych eksperymentalnie parametrów takich jak: lepkość wirowa v_t , energia kinetyczna k oraz dyssypacja energii kinetycznej ε . Do wyznaczenia stałej C_{μ} wykorzystał przekształcenie równania na lepkość wirową v_t :

$$v_t = C_D \cdot C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

równaniu występuje stała C_D która pojawiła się pierwotnie w równaniach Kołmogorowa i Prandtla. Współczynnik C_D jest funkcją $C_D = f(\overline{P}/\varepsilon)$ produkcji P do dyssypacji energii kinetycznej ε . W. Rodi wykonał optymalizację współczynników modelu dla płaskiej warstwy miesznia (ang. plane mixing layer), strugi płaskiej (ang. plane jet), strugi osiowosymetrycznej (ang. radial jet). W wyniku optymalizacji W. Rodi określił, że współczynnik C_D wartości 1 spełnia warunek najlepszego dopasowania modelu w tych środowiskach. W wyniku eksperymentu określono, że gdy C_D i $f(\overline{P}/\varepsilon) = 1$ współczynnik C_μ wynosi 0,09. W publikacji możemy znaleźć wyniki badań dotyczące wartości stałych modeli turbulencji. Na rysunku 2 zademonstrowano wykres przedstawiający iloczyn stałych modelu turbulencji $C_\mu \cdot C_D$ w funkcji stosunku produkcji Pdo dyssypacji energii kinetycznej ε dla różnych rodzajów środowisk, gdzie występuje turbulentny przepływ. Wykres na Rysunku 2 przedstawia wyniki badań eksperymentalnych i obrazuje w jaki sposób kształtują się stałe modeli turbulencji w zależności od środowiska w jakim występuje przepływ turbulentny.



Rys. 2. Wykres przedstawiający iloczyn stałych modelu turbulencji $C_{\mu} \cdot C_D$ w funkcji stosunku produkcji *P* do dyssypacji energii kinetycznej ε [8]

W publikacji J. Laufer "The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow. National Advisory Committee for Aeronautics" z 1953 roku znajduje się opis eksperymentu wyznaczania rozkładu prędkości średniej w warstwie przyściennej. Eksperyment przeprowadzono dla dwóch liczb Reynoldsa wynoszących 50 tysięcy i 500 tysięcy. Wartości te odpowiadały maksymalnym średnim prędkościom wynoszącym około 3 i 30 m/s. W celu zapewnienia pomiaru szerokiego zakresu ciśnień statycznych i dynamicznych użyto nachylonego manometru o długości 1,5 m. Czułość przyrządu zwiększono do jednej dziesięciotysięcznej centymetra wody poprzez użycie ruchomego mikroskopu i oddzielnej podziałki. Rozkład ciśnienia w kierunku przepływu wykonano dzięki otworom pomiarowym rozstawionym co 0.61 m wzdłuż tunelu aerodynamicznego. Na rysunku 3 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego wyznaczania rozkładu prędkości średniej w warstwie przyściennej [2]

Tunel składał się z wentylatora głównego, który napędzany był silnikiem elektrycznym o mocy 11,1 kW, generującego strumień powietrza o wartości 340 m³/min. Wentylator ten umieszczony był w skrzyni ciśnieniowej. Przekrój skrzyni był w kształcie sześciokąta o wymiarach 3 m × 4,87 m. Prędkość przepływu powietrza była regulowana poprzez dławienie wlotu wentylatora. Powietrze wdmuchiwane do skrzyni kierowane było w stronę ulownicy a następnie przepływało przez 3 ekrany aż do okrągłego konfuzora. Konfuzor zmniejszał przekrój poprzeczny ze średnicy 1,2 m do średnicy 0,45 m. Następnie przy użyciu kolanka przekrój poprzeczny został zmniejszony do średnicy 0,25 m. Na wyjściu z kolanka zamontowano tłumik drgań w celu zapobiegania wibracji przenoszonych ze skrzyni ciśnieniowej na część pomiarową. W dalszej części zamontowano fragment stalowej rury o długości 7,6 m. W celu ustabilizowania strugi powietrza, zaburzonej wpływem kołnierza, na wejściu do rurociągu zamontowano ulownicę. W celu przyśpieszenia wzrostu warstwy przyściennej zamontowano rurę chropowatą o długości 0,8 m, co pozwoliło na uzyskanie rozwiniętego profilu prędkości na długości 30 średnic hydraulicznych. Kolejnym elementem była mosiężna rura o długości 4,8 m, służąca do właściwych pomiarów przepływu powietrza.

Do pomiaru pełnego rozkładu prędkości w przypadku małej liczby Reynoldsa zastosowano małe rurki do mierzenia ciśnienia statycznego. Rurki o średnicy 1 mm wykonano z niklowej blachy o grubości ścianki wynoszącej około 0,01 mm. Do wyników pomiarów wykonanych w pobliżu ścianki tunelu trzeba było wprowadzić korektę ze względu na duży poziom wahań prędkości. Korekta była wykonywana poprzez zastosowanie równania:

$$U_{corr} = U_{\sqrt{1 - \frac{\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}}{U^2}}$$

W wyniku badań określono, że korekta nie przekraczała 5 procent wartości mierzonych. Wyniki pomiaru rozkładu prędkości średniej przedstawiono na rysunku 4.

Do pomiaru średniego rozkładu prędkości w pobliżu ścianki tunelu dla wysokiej liczby Reynoldsa użyto termoanemometrów. W tym wypadku także należało wprowadzić korektę fluktuacji prędkości z powodu nieliniowego zachowania się termoanemometru. Poprawkę wykonano za pomocą przybliżonej metody graficznej wykorzystującej znaną statyczną krzywą odpowiedzi termoanemometru i znaną wartość średniej kwadratowej fluktuacji napięcia. Maksymalna korekta wynosiła około 10 procent, a wartość średniej prędkość po wprowadzeniu korekty była większa niż obserwowana. Przy niskiej liczbie Reynoldsa profil prędkości wyznaczony przy użyciu termoanemometru i zastosowaniu poprawki, w znaczący sposób odbiegał kształtem od typowego profilu prędkości wyznaczanego dla geometrii o podobnym kształcie. Zgodność między wynikami termoanemometru a wynikami uzyskanymi na podstawie pomiaru ciśnienia była dobra. Pomiary przedstawiono na rysunku 4 i 5. Na rysunku 5 linie przerywane wskazują na gradienty prędkości ściany obliczone ze spadku ciśnienia.



Rys. 4. Rozkład prędkości średniej (U – średnia prędkość w dowolnym punkcie rury, U_o – maksymalna wartość średniej prędkości, a – promień rury, r' = a - r, r – współrzędna w kierunku promieniowym (r = 0 odpowiada środkowi rury)) [2]

Stosowanu przez Autorów program ANSYS Fluent umożliwiający wykonywanie symulacji CFD przy pomocy modelu *k-ɛ* w dokumentacji wskazuje, że stałe modelu turbulencji zostały określone na podstawie publikacji B.E. Laundera i D.B. Spalding zatytułowanej "Lectures in Mathematical Models of Turbulence" z 1972 roku [4]. W publikacji zostały podane wartości stałych modelu *k-ɛ* oraz podano, że zostały wyznaczone eksperymentalnie, lecz nie sprecyzowano w jakich badaniach zostały określone. Stałe modelu *k-ɛ* mają następujące wartości: $C_{\mu} = 0.09$, $C_{1e} = 1,43$, $C_{2e} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_e = 1,3$.



Rys. 5. Rozkład prędkości średniej w warstwie przyściennej (U- średnia prędkość w dowolnym punkcie rury, U_o - maksymalna wartość średniej prędkości, a- promień rury, r' = a - r, r- współrzędna w kierunku promieniowym (r = 0 odpowiada środkowi rury)) [2]

5. Przedstawienie koncepcji badań eksperymentalnych

W powszechnie stosowanych modelach turbulencji, a w szczególności modelu *k-c* człony zawierające fluktuacyjne składowe wektora prędkości są zastępowane przez funkcje parametrów charakteryzujących turbulencję, takich jak intensywność lub jej prędkość dyssypacji. Szczególnie istotnym parametrem jest tak zwana lepkość turbulentna. Parametry te są funkcjami tychże składowych fluktuacyjnych. Użycie parametrów i funkcji pozwala na wyeliminowanie z równań przepływu składowych fluktuacyjnych kosztem rozszerzenia układu równań o równania transportu wielkości charakteryzujących turbulencję na przykład energię kinetyczną turbulencji k i dyssypację energii kinetycznej ε . Pomimo dodatkowych równań ten uproszczony opis wymaga znacznie mniejszych nakładów obliczeniowych. Weryfikacja i ewentualna modyfikacja równań i stałych w nim występujących wymaga określenia czasoprzestrzennych rozkładów fluktuacyjnych składowych pól prędkości.

Dotychczas stałe w modelach turbulencji określano głównie na podstawie punktowych pomiarów prędkości przy pomocy rurek spiętrzeniowych i termoanemometrów. Stosowane sondy mierzą pojedyncze składowe względnie wektor prędkości. W bardziej złożonych konfiguracjach czujników możliwy jest też pomiar wielkości charakteryzujących pole, takich jak gradienty prędkości [6].

Nieporównanie większą ilość danych można uzyskać stosując metody anemometrii obrazowej (ang. PIV – particle image velocimetry). Umożliwia ona określenie pola przemieszczeń znaczników w wybranym obszarze (płaszczyźnie lub objętości). Znając czas, jakim te przemieszczenia nastąpiły określamy chwilowe pole prędkości. Niestety własności obecnie stosowanej aparatury powodują, że następne zdjęcia położeń znaczników mogą być wykonane po czasie znacznie dłuższym niż odstęp użyty dla pomiaru prędkości. Uzyskujemy więc sekwencję obrazów pól prędkości otrzymanych dla dość odległych od siebie punktów na osi czasu. Mając dostatecznie dużą ilość takich obrazów prędkości i zakładając stacjonarność i ergodyczność przepływu możemy również badać fluktuacyjne składowe pól prędkości.

Warto również wspomnieć, że od niedawna dla dostatecznie małych liczb Reynoldsa prowadzone są symulacje metodą DNS, których wyniki są traktowane jako równie wartościowe, a nawet bardziej użyteczne niż dane eksperymentalne [9]. Zastosowanie DNS do symulacji numerycznych w przyszłości będzie zależało od postępu w wydajności sprzętu do obliczeń numerycznych.

W koncepcji badań eksperymentalnych brane są pod uwagę zarówno eksperymenty laboratoryjne jak i pomiary *in-situ*, w warunkach możliwie zbliżonych do rzeczywistych. Rozważane jest przygotowanie stanowisk, w których będą możliwe pomiary zarówno metodą PIV jak i termoanemometrami. Pierwszą z rozpatrywanych możliwości jest zamknięty tunel aerodynamiczny dedykowany do pomiarów metodą PIV, którym dysponuje IMG-PAN. W tym tunelu znajduje się gotowy do użycia skalibrowany zestaw do pomiarów PIV. Jednak wybór ten ma pewne wady, wynikające z rozmiarów komory pomiarowej. W obszarze komory należałoby zmieścić nie tylko odcinek pomiarowy ale również zestaw urządzeń do wytworzenia na wlocie profilu prędkości i turbulencji reprezentatywnego dla rzeczywistych warunków. Alternatywą dla tego rozwiązania jest budowa dedykowanego stanowiska pomiarowego w innym pomieszczeniu. Zaletami tego wariantu są:

- mniejsze ograniczenia na wielkość modelu,
- · łatwiejszy projekt i budowa urządzeń do wygenerowania warunków na wlocie,

• większa swoboda w rozmieszczaniu sond termoanemometrycznych względnie zestawu PIV;

- wśród wad można wymienić:
 - większy nakład pracy,
 - konieczność kalibracji zestawu PIV i większe utrudnienia dla realizacji innych zadań badawczych w tunelu PIV,
 - otwarty obieg znacznika lub konieczność zmieszczenia i budowy układu zamkniętego obiegu.

W obu przypadkach koncepcja badań przewiduje:

- wykorzystanie wyników pomiarów in-situ w celu określenia parametrów turbulentnego przepływu w chodniku kopalnianym w obudowie łukowej,
- określenie skali modelu ścian wyrobiska w oparciu o symulacje numeryczne,
- wykonanie projektu i budowy modelu laboratoryjnego ścian wyrobiska w obudowie łukowej,
- wykonanie projektu i budowa oraz badania urządzeń do generacji turbulencji na dolocie komory pomiarowej tunelu,
- docelowe pomiary w celu określenia parametrów turbulentnego przepływu.

6. Podsumowanie

Celem przeglądu było uporządkowanie informacji odnośnie sposobu wyznaczania stałych współczynników wykorzystywanych w modelach turbulencji, a w szczególności podstawowego modelu *k-ɛ*. Dotarto do publikacji B. E. Laundera, A. Morse i W. Roddiego opisujących przebieg i wyniki eksperymentu wyznaczania stałej lepkości C_{μ} dla modelu *k-ɛ*. Uzyskane informacje posłużą do określenia koncepcji badań podstawowych w aspekcie poprawności rozwiązań numerycznych różnych przypadków przepływowych w strukturach górniczych geometrycznie odbiegających od powszechnie spotykanych w przemyśle. Koncepcja badań przewiduje wykonanie eksperymentów laboratoryjnych i badań in-situ. Tego typu badania mogę umożliwić zebranie unikatowych danych eksperymentalnych istotnych dla oceny możliwości i zasadności korekt dotychczas stosowanych w modelach empirycznych współczynników. Wykonanie planowanej koncepcji badań może dostarczyć wskazówki dotyczące stosowania dotychczasowych stałych wraz z możliwości i ch korekt w celu zwiększenia wiarygodności modelowania numerycznego zagadnień z aerologii górniczej oraz pokrewnych tematów.

Praca została wykonana w ramach prac statutowych 2018 Instytutu Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w Krakowie.

Literatura

- [1] Chou P.Y., 1945: *On velocity correlations and the solutions of the equations of turbulent fluctuations*. Quarterely of Applied Mathematics.
- [2] Laufer J., 1953: *The Structure of Turbulence in Fully Developed Pipe Flow*. National Advisory Committee for Aeronautics, NACA, Washington.
- [3] Launder B.E., Morse A., Rodi W., Spalding D.B., 1973: *Prediction of free shear flows a comparison of the performance of six turbulence models*. Imperial College of Science and Technology.
- [4] Launder B.E., Spalding D.B., 1972: Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England.
- [5] Launder B.E., Spalding D.B., 1974: *The Numerical Computation of Turbulent Flows*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, p. 269-289.
- [6] Lemonis G., 1997: *Three-Dimensional Measurement of Velocity*. Velocity Gradients and Related Properties in Turbulent Flows Aerospace Science and Technology, no 7, p. 453-461.
- [7] Prandtl L., 1925: Uber die ausgebildete Turbulenz, Zamm, 5, p. 136.
- [8] Rodi W., 1972: *The Prediction of Free Turbulent Boundary Layers by Use of Two-Equation Model of Turbulence*. Ph.D. Thesis, University of London.
- [9] Vukoslavčević P.V., Wallace J.M., 2016: On the Accuracy of Measurement of Gradient Statistics With Hot-Wire Probes. Thermal Science, 2016 (00), 116-116.

Numerical turbulencje models – sources and customizing to the specifics of the mining aerology

Abstract

Paper presents discusses about turbulent phenomena modelling in underground mining which, due to the mining technology, has complicated ventilation network. So far, in industrial ventilation semi-empirical turbulence models have been used. These models use constants, which were determined as a result of basic research on geometries of shapes, which in most cases are different from the shapes of workings of underground mines. The use of this type of models helps in searching solutions for many problems, but results of numerical calculations should be checked if the given model is able to describe to selected issues well enough. For underground mine ventilation systems, the validations have been carried out to a very limited extent and they are not sufficient to fully represent phenomena occurring in mine drifts. Therefore, it is necessary to update or extend the existing constants values used in turbulence models to customize them to specific conditions of trhe flow in the workings of underground mines. Paper conatins a review of used methodology for determining constants in selected turbulence models based on results of typical flow problems investigations and an outline of planned studies.

Keywords: computer fluid dynamics, turbulent flow, models of turbulence, *k-e* constants, thermoanemeter, particle image velocimetry