

Marian Branny, Krzysztof Filek*, Bernard Nowak**

KSZTAŁT POLA PRĘDKOŚCI W WYROBISKACH PRZEWIETRZANYCH WENTYLATORAMI WOLNOSTRUMIENIOWYMI – SYMULACJA NUMERYCZNA PRZY UŻYCIU LEPKOŚCIOWYCH MODELI TURBULENCJI**

1. Wstęp

Do przewietrzania przodków w systemach komorowo-filarowych powszechnie stosowane są wentylatory wolnostrumieniowe. W Polsce ten system wentylacji stosowany jest w kopalniach rud miedzi. Wentylator instalowany jest na wlocie do komory. W celu ograniczenia recyrkulacji powietrza wentylatory zabudowywane są po stronie napływu powietrza w chodniku z prądem opływowym. Skuteczność przewietrzania zależy od zasięgu strumienia generowanego przez wentylator, a jej ocena może opierać się na istniejącym rozkładzie parametrów takich jak prędkość przepływu, temperatura powietrza czy stężenie gazów szkodliwych. Wpływ na zasięg strumienia generowanego przez wentylator wolnostrumieniowy ma wiele czynników, wśród których podstawowe znaczenie mają parametry początkowe strumienia takie jak prędkość początkowa powietrza, skala turbulencji i średnica dyfuzora. Kształt tworzonego pola prędkości istotnie zależy od miejsca zainstalowania wentylatora w przekroju poprzecznym wyrobiska. Obowiązujące w kopalniach LGOM wytyczne dotyczące stosowania wentylatorów wolnostrumieniowych [14] są wynikiem doświadczeń zdobytych w trakcie ich użytkowania oraz prowadzonych badań nad mechanizmem rozprzestrzeniania się strug powietrza [8, 9].

2. Modele turbulencji

Aktualnie do modelowania złożonych zagadnień przepływowych stosowana jest technika bazująca na metodach CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Klasyczne modelowanie

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

** Praca wykonana w ramach prac statutowych 11.11.100.281

turbulencji oparte jest na koncepcji Reynoldsa zakładającej, że ruch płynu może być traktowany jako superpozycja ruchu średniego i fluktuacyjnego. Przyjęcie tej koncepcji przekształca równania Naviera–Stokesa do postaci zawierającej dodatkowy człon, tensor naprężeń turbulentnych powodujący, że układ równań staje się niezamknięty. Najliczniejszą grupę wśród hipotez zamykających stanowią modele turbulencji zakładające istnienie lepkości wirowej (hipoteza Boussinesq’a). W tej grupie podstawowe znaczenie mają modele jedno i dwurównaniowe, a wśród nich jednorównaniowy Spalarta–Allmarasa oraz dwurównaniowe $k-\varepsilon$ i $k-\omega$ wraz z ich modyfikacjami. Do grupy modeli turbulencji bazujących na czasowym uśrednianiu Reynoldsa (RANS) należy również zaproponowany przez Hanjalica model transportu naprężeń Reynoldsa. Inne podejście przyjęto w metodzie uśredniania przestrzennego i filtracji równań LES (*Large Eddy Simulation*), polegające na numerycznym rozwiązywaniu pola wirów dużych, wykazujących anizotropowość, natomiast drobno skalowe wiry modelowane są analitycznie.

Nową klasę rozwiązań obejmuje metoda DNS (*Direct Numerical Solution*) polegająca na bezpośrednim rozwiązywaniu równań Naviera–Stokesa, bez konieczności ich uśredniania. Wymaga to jednak stosowania bardzo gęstych siatek numerycznych, w których komórki elementarne muszą być mniejsze od najdrobniejszych skal turbulencji. Uważa się, że perspektywa zastosowań metody DNS do analizy przepływów w zagadnieniach technicznych jest odległa w czasie. Istotną redukcję nakładów obliczeniowych w stosunku do metody DNS oferuje metoda LES, która aktualnie jest przedmiotem intensywnych badań między innymi w ramach akcji COST P20–LES AID. Jednak i ta metoda jest zbyt kosztowna do stosowania w praktyce.

Powszechnie do modelowania zagadnień technicznych stosowane są kody CFD oparte na modelach lepkościowych RANS. Ich istotnym ograniczeniem jest brak uniwersalności i wynikająca stąd konieczność walidacji. Problem weryfikacji i walidacji symulacji numerycznych badano między innymi w ramach inicjatyw ERCOFTAC Best Practice Guidelines for CFD czy QNET-CFD. W zastosowaniu do problematyki górniczej zespół A. Wali (University of Kentucky) prowadził badania nad przydatnością niektórych modeli RANS do obrazowania przepływu powietrza i rozkładu stężenia metanu w wyrobiskach ślepych (komorach), przewietrzanych za pomocą dodatkowych urządzeń wentylacyjnych w postaci przegród wentylacyjnych. Pomiary 3D pola prędkości wykonano na modelach laboratoryjnych przy wykorzystaniu metod anemometrii laserowej oraz przez punktowy pomiar wektora prędkości i stężenia metanu (NOIH Pittsburgh Research Laboratory) na modelach w skali 1:1. W Polsce do chwili obecnej nie prowadzono prac umożliwiających pełną walidację, natomiast podejmowano próby uwiarygodnienia kodów CFD na podstawie pomiaru *in situ*, te jednak odnoszą się jedynie do zmierzonych parametrów globalnych bądź niewielkiej liczby punktowo zmierzonych wielkości w obszarze przepływu [3, 5, 7].

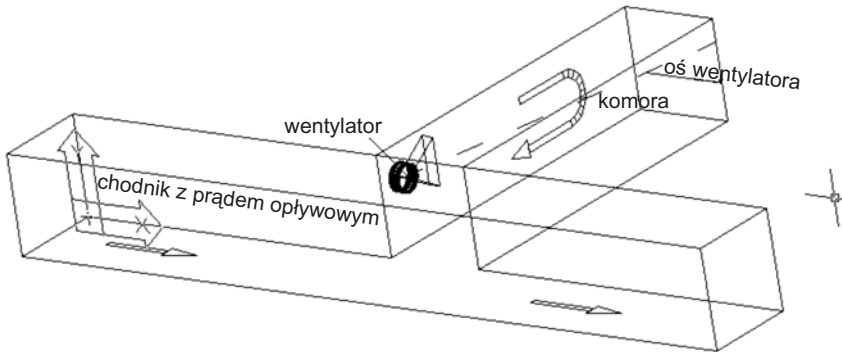
Z dotychczas wykonanych badań wynika, że obiecujące wyniki przy numerycznym modelowaniu zagadnień przepływowych w wyrobiskach górniczych uzyskuje się przy stosowaniu modeli dwurównaniowych $k-\varepsilon$ i $k-\omega$ oraz jednorównaniowym Spalarta–Allmarasa. Szczególnie interesujące są tutaj wnioski wynikające z wykonanej w pełnym zakresie walidacji w USA – University of Kentucky i NIOSH Pittsburgh Research Center, w których wskazano przydatność modeli Spalarta–Allmarasa i SST $k-\omega$ do symulacji przepływu w komorach.

W Południowej Afryce prowadzono badania nad skutecznością przewietrzania wyrobisk ślepych wentylatorami wolnostrumieniowymi w systemie komorowo-filarowym [6]. Mierzono prędkość przepływu powietrza w wybranych punktach komory i na tej podstawie określano zasięg strumienia generowanego przez wentylator.

Celem pracy jest wyznaczenie metodą CFD trójwymiarowego pola prędkości przepływu powietrza w komorze i skonfrontowanie wyników obliczeń z dostępnymi danymi z pomiarów [6]. Spośród lepkościowych modeli turbulencji w obliczeniach wykorzystano modele $k-\epsilon$, SST $k-\omega$ i Spalarta–Allmarasa. Pierwszy z nich z uwagi na to, iż jest to najczęściej wykorzystywany model w różnych aplikacjach praktycznych, w tym również w zagadnieniach górniczych [1, 5, 7], zaś pozostałe dwa z uwagi na rekomendacje literaturowe [11].

3. Obszar przepływu

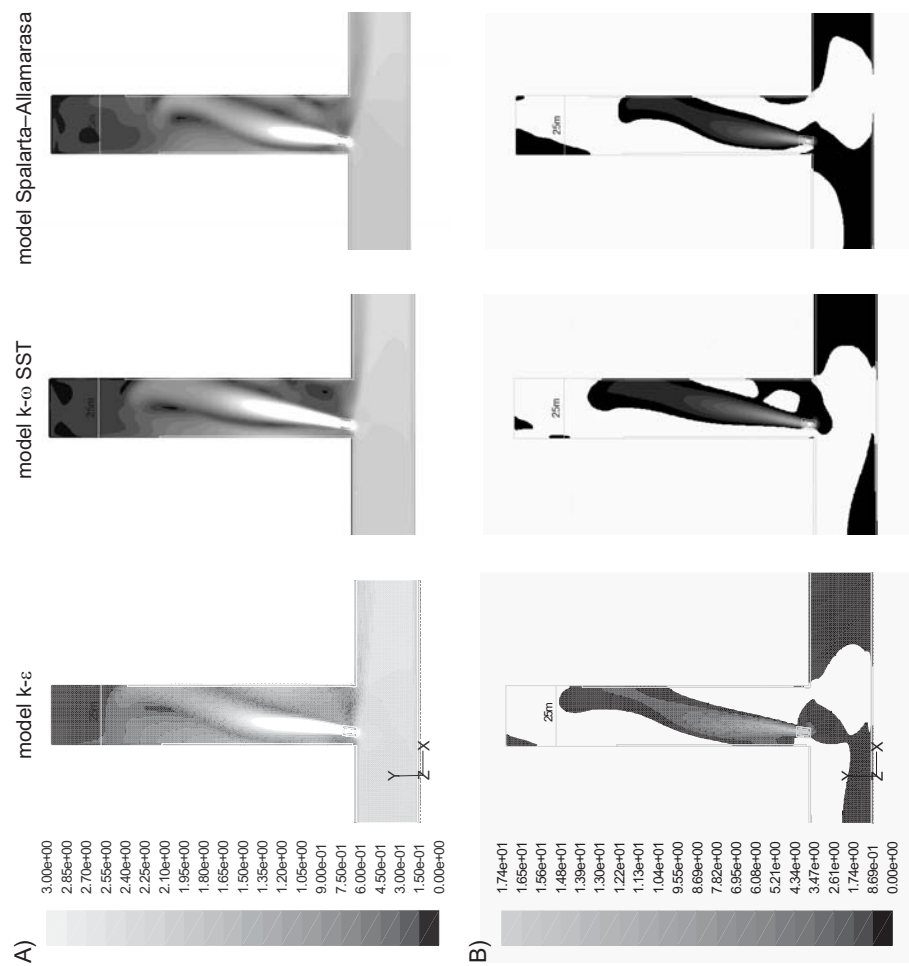
Badaniom poddaje się komorę o długości 30 m, szerokości 6,4 m i wysokości 3,8 m. Pole przekroju poprzecznego chodnika z opływowym prądem powietrza jest takie jak komory. Średnia prędkość przepływu powietrza w chodniku wynosi 2 m/s. Wentylator zainstalowany jest na wlocie do komory w odległości 1,3 m od stropu i ociosu, po stronie dopływu powietrza świeżego w chodniku z prądem opływowym. Oś wentylatora odchylona jest od osi komory o kąt $5,7^\circ$ w kierunku ociosu przeciwnego. Wydatek powietrza tłoczonego przez wentylator wynosi $4,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Przyjęte do obliczeń dane odpowiadają warunkom, w których wykonano pomiary [6]. Szkic obszaru przepływu przedstawiono na rysunku 1.



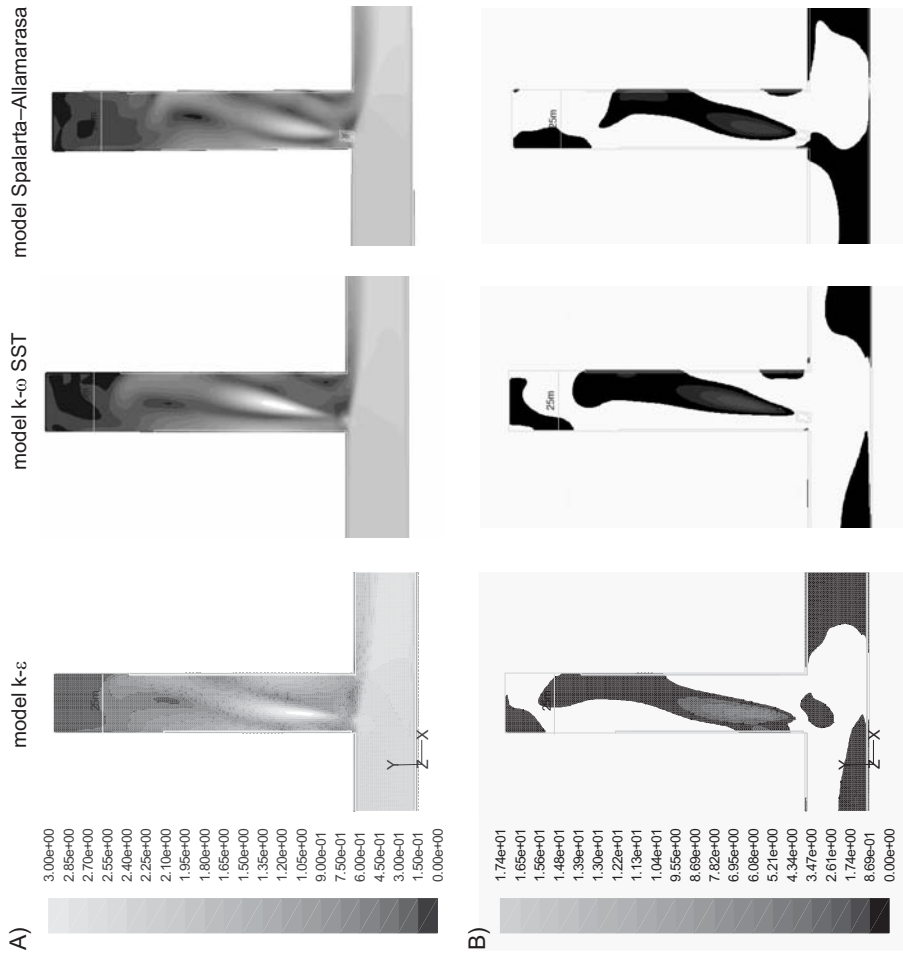
Rys. 1. Obszar przepływu

4. Analiza wyników obliczeń

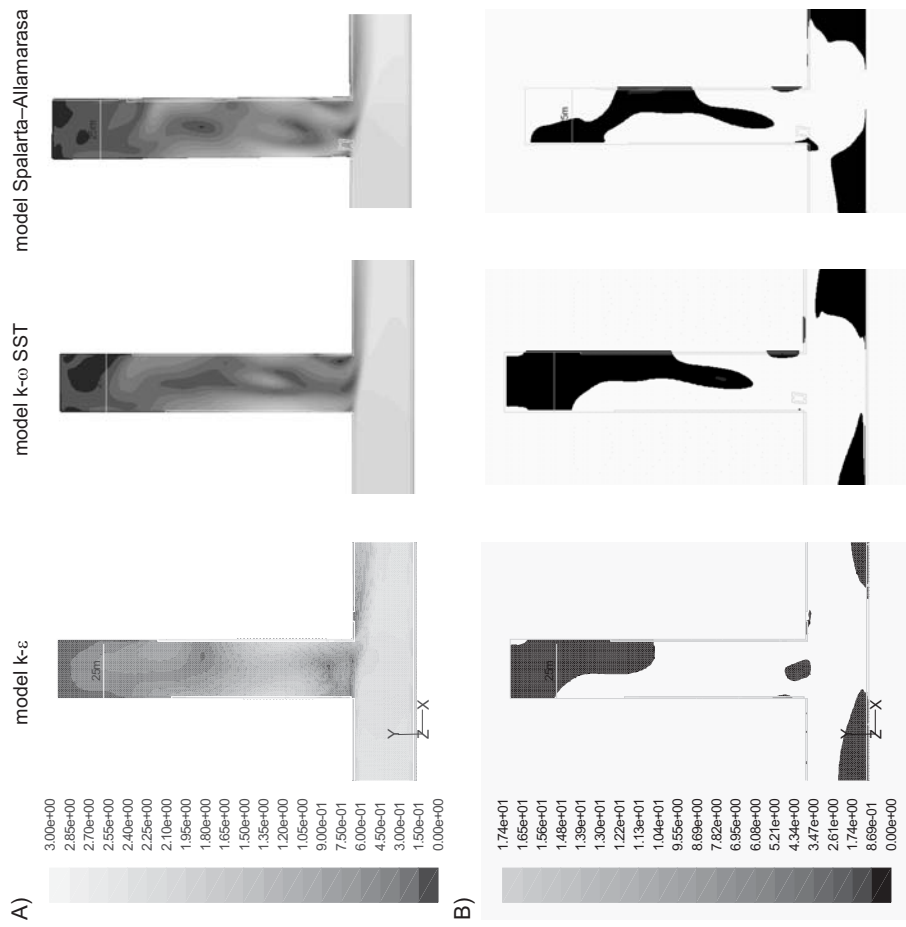
Wyniki obliczeń przedstawione są na rysunkach 2–4. Uzyskane obrazy pól prędkości przy użyciu trzech wymienionych wyżej modeli turbulencji pod względem jakościowym są podobne. Wygenerowany numerycznie strumień powietrza wytworzony przez wentylator po osiągnięciu ociosu przeciwnego płynie do przodka częścią przyspągową (rys. 4b). Pod względem ilościowym odnotowuje się znaczące różnice między wybranymi modelami.



Rys. 2. Obrazy pola prędkości w płaszczyźnie poziomej w osi wentylatora (1,3 m od stropu): A) moduły prędkości (skala szarości w zakresie 0–3 m/s powyżej kolor biały); B) dodatnia składowa wektora prędkości – w kierunku czoła przedka (kolor biały – ujemne wartości składowej prędkości)



Rys. 3. Obrazy pola prędkości w płaszczyźnie poziomej w połowie wysokości komory: A) moduły prędkości (skala szarości w zakresie 0–3 m/s powyżej kolor biały); B – dodatnia składowa wektora prędkości – w kierunku czoła przodka (kolor biały – ujemne wartości składowej prędkości)



Rys. 4. Obrazy pola prędkości w płaszczyźnie poziomej w odległości 0,5 m od spągu: A) moduły prędkości (skala szarości w zakresie 0–3 m/s); B) dodatnia składowa wektora prędkości – w kierunku czoła przodka (kolor biały – ujemne wartości składowej prędkości)

Niektóre parametry charakteryzujące przewietrzanie komory zestawiono w tabeli 1.

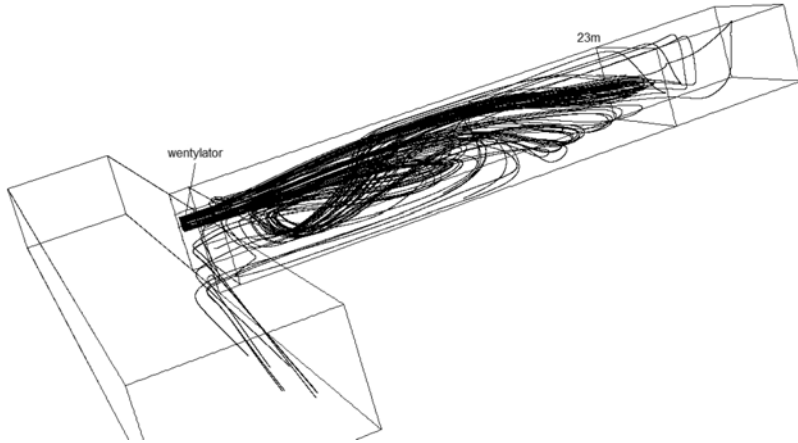
TABELA 1

Parametry charakteryzujące przepływ powietrza w komorze

Odległość od wentylatora [m]	Model $k-\varepsilon$		Model $k-\omega$ SST		Model Spalarta–Allamarasa	
	Strumień objętości powietrza płynący w kierunku przodka [m ³ /s]	Maksymalna prędkość przepływu [m/s]	Strumień objętości powietrza płynący w kierunku przodka [m ³ /s]	Maksymalna prędkość przepływu [m/s]	Strumień objętości powietrza płynący w kierunku przodka [m ³ /s]	Maksymalna prędkość przepływu [m/s]
10	24,52	3,46	26,38	3,80	16,38	3,21
20	4,64	0,97	4,63	1,09	3,63	1,00
23	2,20	0,55	2,56	0,61	2,60	0,62
25	1,27	0,34	2,45	0,57	1,87	0,44
27	0,97	0,26	2,11	0,46	1,76	0,42

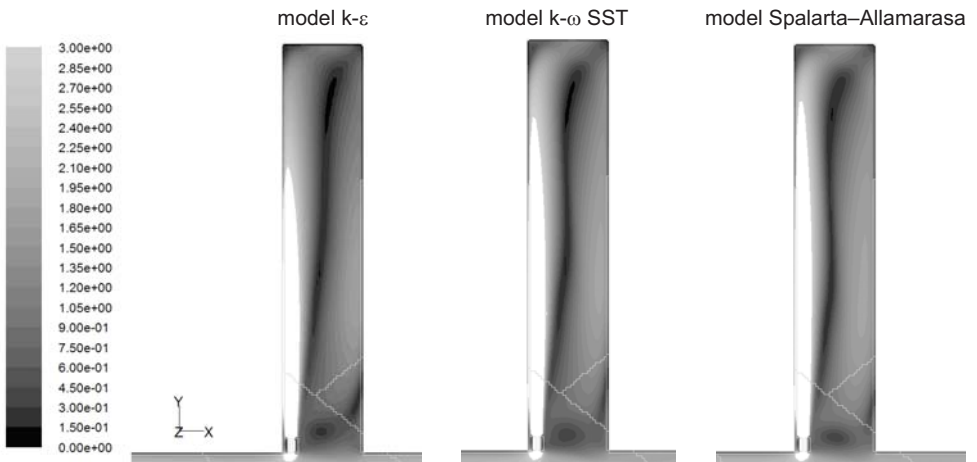
Strefa rozciągająca się od wentylatora na odległość około 18–20 m charakteryzuje się intensywnym mieszaniem powietrza. W tej strefie ilość powietrza recyrkulującego przewyższa nawet kilkakrotnie wydatek wentylatora. Odległość, przy której strumień objętości powietrza płynący w kierunku przodka jest równy wydatkowi wentylatora dla modeli $k-\varepsilon$ i $k-\varepsilon$ SST wynosi około 20 m, natomiast dla Spalarta–Allamarasa 18 m. Pola prędkości wyznaczone dwoma pierwszymi modelami w tej strefie komory są ilościowo zbliżone i różnią się od uzyskanych modelem Spalarta–Allamarasa. W tym ostatnim przypadku prognozowana ilość recyrkulującego powietrza jest wyraźnie mniejsza. Przy odległościach od wentylatora powyżej 20 m największe wartości strumienia objętości powietrza płynącego do przodka uzyskuje się przy użyciu modelu $k-\omega$ SST, zaś najmniejsze przy użyciu modelu $k-\varepsilon$. Różnice w prognozach parametrów charakteryzujących przepływ sięgają tutaj nawet 100%.

Autor pracy [6], bazując na wynikach pomiarów wykonanych w warunkach kopalniowych, strefę o długości 25 m określa jako strefę zasięgu oddziaływania wentylatora. Obliczone numerycznie pole prędkości (rys. 2–4) i jego wizualizacja przy użyciu linii prądu (rys. 5) odzwierciedlają powyższe spostrzeżenia. Zmierzona prędkość przepływu (maksymalna) w przekroju oddalonym od wentylatora o 25 m wynosi 0,4 m/s. Numerycznie wyznaczone prędkości maksymalne w tym przekroju wynoszą: 0,34 m/s (model $k-\varepsilon$), 0,57 m/s (model $k-\omega$ SST) oraz 0,44 m/s (model Spalarta–Allamarasa).



Rys. 5. Obraz linii prądu w komorze – model turbulencji $k-\epsilon$

Istotny wpływ na kształt pola prędkości ma zarówno miejsce zainstalowania wentylatora w przekroju poprzecznym komory, jak i kąt jaki tworzy oś wentylatora z płaszczyzną czoła przodka. Skierowanie osi wentylatora prostopadle do czoła przodka (równoległe do osi komory) zmienia opisany wyżej obraz przepływu. Zwiększa się odległość o około 5 m, przy której strumień powietrza wypływający z wentylatora osiąga ocios przeciwny. Jeżeli wentylator zabudowany jest w bliższej odległości od ociosu i stropu (0,7 m), wówczas strumień powietrza płynie do przodka wzdłuż ścian wyrobiska, przy których umieszczony jest wentylator, natomiast strumień powrotny wzdłuż ścian przeciwnych (rys. 6). Nie występuje tutaj charakterystyczne dla poprzednich położen wentylatora przemieszczanie się strumienia płynącego do przodka w kierunku przeciwnego ociosu.



Rys. 6. Obraz pola prędkości w płaszczyźnie poziomej w osi wentylatora (0,7 m od stropu) skierowanego równoległe do osi komory (skala szarości w zakresie 0–3 m/s powyżej kolor biały)

Opisany wyżej, jakościowy obraz przepływu uzyskuje się przy użyciu wszystkich trzech rozważanych modeli turbulencji i jest on zgodny z badaniami kopalnianymi [3, 8]. Jednak ocena ilościowa będzie możliwa dopiero po walidacji wybranych modeli turbulencji. W tym celu niezbędne będą pomiary trzech składowych prędkości w całym obszarze przepływu. Na podstawie pomiarów kopalnianych weryfikacja rezultatów symulacji numerycznych możliwa jest jedynie dla parametrów globalnych. Jest to spowodowane trudnymi warunkami środowiskowymi oraz brakiem odpowiednio dokładnych przyrządów pomiarowych. Alternatywą są pomiary wykonywane w warunkach laboratoryjnych przy wykorzystaniu anemometrii obrazowej [11].

5. Podsumowanie

- Aktualnie w modelowaniu przepływów do celów praktycznych podstawowe znaczenie mają lepkościowe modele turbulencji RANS.
- Głównym ograniczeniem w wykorzystaniu rozwiązań uzyskanych przy użyciu modeli RANS jest potrzeba ich uwiarygodnienia na drodze eksperymentalnej.
- Jakościowy obraz pola prędkości uzyskany przy użyciu trzech modeli turbulencji $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST i Spalarta–Allamarasa jest zgodny z informacjami literaturowymi [6, 9].
- Odnotowuje się pomiędzy testowanymi modelami istotne ilościowe różnice w prognozowanych parametrach charakteryzujących przepływ.
- Wyznaczoną eksperymentalnie długość strefy intensywnego mieszania [6] najwierniej odwzorowują modele $k-\varepsilon$ i $k-\omega$ SST.

LITERATURA

- [1] *Aminossadati S.M., Hooman K.*: Numerical simulation of ventilation air flow in underground mine workings. 12th U.S/North American Mine Ventilation Symposium, Reno, USA, 2009, s. 253–259
- [2] *Bogusławski A., Drobnik S., Tyliczszak A.*: Turbulencja – od losowości do determinizmu. Modelowanie Inżynierskie, Gliwice, 2008, s. 41–48
- [3] *Branny M.*: Numerical simulation of airflow in blind headings ventilated with jet fans. Archiwum Górnictwa, 2003, vol. 48, nr 4, s. 425–443
- [4] Fluent, Fluent 6.1 Documentation, Flunet Inc., 2005
- [5] *Krawczyk J.*: Jedno i wielowymiarowe modele niestacjonarnych przepływów powietrza i gazów w wyrobiskach kopalnianych. Przykłady zastosowań. Archiwum Górnictwa, 2007, nr 2
- [6] *Meyer C.F.*: Improving underground ventilation conditions in coal mines. SIMRAC, Project no. COL 029a, 1993
- [7] *Podleszczyk E., Lięża P., Skotniczny P.*: Metody termoanemometrycznego wyznaczania parametrów przepływu jako wspomaganie symulacji numerycznej procesu przewietrzania kopalni głębinowej. 5 Szkoła Aerologii Górniczej, Wrocław, 2009, s. 129–142
- [8] *Sulkowski J., Drenda J., Biernacki K., Domagala L.*: Opracowanie wytycznych stosowania wentylatorów wolnostrumieniowych do przewietrzania drażonych przodków o długości do 60 m. Politechnika Śląska, Gliwice, 1999 (praca niepublikowana)
- [9] *Sulkowski J., Drenda J., Biernacki K., Gumiński A., Różański Z., Wierzbicki K., Musioł D.*: Określenie skuteczności przewietrzania drażonych wyrobisk górniczych, których długość nie przekracza 60 metrów przy zastosowaniu wentylatorów wolnostrumieniowych. Politechnika Śląska, Gliwice, 2000 (praca niepublikowana)
- [10] *Tu J., Yeoh G.H., Liu Ch.*: Computational Fluid Dynamics. Elsevier, 2008
- [11] *Wala A.M., Vytla S., Huang G, Taylor C.D.*: Study on the effect of scrubber operation on the face ventilation. 12th U.S/North American Mine Ventilation Symposium, Reno, USA, 2009, s. 281–286

- [12] *Wala A.M., Vytla S., Taylor C.D., Huang G.:* Mine face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation. *Mining Engineering*, 2007, no. 10, s. 45–55
- [13] *Wierzbicki K.:* Modelowanie komputerowe rozkładu parametrów powietrza oraz koncentracji metanu w rejonie skrzyżowania z chodnikiem wentylacyjnym. 5 Szkoła Aerologii Górniczej, Wrocław 2009, s. 111–118
- [14] Wytyczne stosowania wentylatorów wolnostrumieniowych w wyrobiskach górniczych kopalń KGHM Polska Miedź S.A., Lublin, 1999