Prezentacja wstępnych wyników badań i symulacje przepływu w chodniku Kopalni Doświadczalnej Barbara ukierunkowanych na dobór modeli turbulencji

JERZY KRAWCZYK, BARTŁOMIEJ GŁUCH, JAKUB JANUS, PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY

Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk, Reymonta 27, 30-059 Kraków, Polska

G. HILDEBRANDT

Kopalnia Doświadczalna Barbara, Podleska 72, 43-190 Mikołów, Polska

Streszczenie

Artykuł przedstawia wyniki prac nad doborem optymalnych modeli turbulencji, opisujących przepływ powietrza kopalnianego w chodnikach wykonanych w obudowie łukowej. Poszukiwany jest opis, który zapewni zadowalającą dokładność symulacji przy możliwie niskim zapotrzebowaniu na moc obliczeniową. W ramach badań ukierunkowanych na dobór modeli turbulencji kontynuowano przegląd literatury oraz badania *in-situ*. Opracowano rodzinę modeli numerycznych przepływu powietrza w chodniku KD Barbara, w którym zespół IMG-PAN prowadził pomiary prędkości przepływu przy pomocy termoanemometrów i metanoanemometrów. Modele te wykorzystują metodę objętości skończonej i modele turbulencji k-e, k-ωSST, SAS i GEKO. Wykonano szereg obliczeń z zasto-sowaniem wybranych modeli turbulencji. Przeprowadzono analizę warunków przepływowych w miejscu pomia-rów. Porównano wyniki pomiarów i symulacji. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano plany dalszych eksperymentów *in-situ*.

Słowa kluczowe: modele turbulencji, chodnik kopalniany, numeryczna mechanika płynów

1. Wprowadzenie

Chodniki w polskich kopalniach węgla najczęściej są wyposażone w obudowę łukową. Periodycznie rozmieszczone żebra łuków obudowy mają specyficzny wpływ przepływ. Przepływ ten nie został dotychczas poznany w wystarczającym stopniu. Wiedza o naturze przepływu w chodnikach jest istotna dla wielu zagadnień dotyczących procesów zachodzących w samych chodnikach a także określenia wpływu na sąsiednie obiekty, takie jak na przykład ściana wydobywcza. W badaniach coraz powszechniej stosuje się symulacje przepływu metodą objętości skończonej. Jednak klasyczne modele numeryczne nie opisują w zadowalający sposób warstwy przyściennej dla chodników wykonanych w obudowie łukowej. Reprezentacja żeber poprzez liczbowe wartości chropowatości ścian nie zapewnia wystarczającej dokładności symulacji a dokładne odwzorowanie geometrii żeber nadmiernie komplikuje model numeryczny. Trudności te uzasadniają poszukiwanie możliwie prostego lecz wystarczająco dokładnego opisu. Dla ścian gładkich lub o nieznacznej chropowatości do stosuje się tak zwaną funkcję ściany, która zapewnia obliczenie odpowiedniego pola prędkości w pobliżu ścian pomimo nieznacznego zagęszczenia siatek przy ścianach. Opracowanie funkcji ściany reprezentującej wpływ żeber na warstwę przyścienną znacznie usprawniłoby badana symulacyjne w których problem ten występuje.

Warstwa przyścienna dla opływu periodycznie rozmieszczonych żeber była badana od dawna. Wybrane prace związane z tematyką artykułu omówiono w rozdziale 2.

Pełne poznanie rozpatrywanego zagadnienia wymaga badań eksperymentalnych. Przebieg wstępnych badań in situ i wstępną analizę wyników przedstawiono w pracy Skotnicznego z zespołem [2018]. Dla ułatwienia pełniejszej analizy i interpretacji wyników oraz zaplanowania dalszych eksperymentów zbudowano model numeryczny otoczenia miejsca pomiarów. Użyto go do symulacji przepływu z wykorzystaniem wybranych modeli turbulencji. Wyniki tych badań przedstawia Rozdział 3. Analiza wyników posłuży również do realizacji głównego celu prac – doboru optymalnych metod modelowania numerycznego przepływów w podobnych obiektach. Kontynuowano eksperymenty *in-situ*. Ich przebieg i wstępne rezultaty opisano w rozdział 4.

Równolegle zapoczątkowano eksperymenty laboratoryjne. Planuje się w nich zweryfikować przydatność oryginalnej metody metodę eksperymentalnego określania naprężeń stycznych przy ścianach o dowolnej chropowatości przy turbulentnym przepływie opisaną w pracy Leonardiego [Leonardi i in., 2005].

2. Omówienie przeglądu prac dotyczących turbulentnej warstwy przyściennej dla periodycznie użebrowanych ścian

W światowej literaturze naukowej bardzo mało uwagi poświęca się modelowaniu numerycznemu przepływu powietrza w wyrobiskach podziemnych. W polskich kopalniach węgla kamiennego przeważająca większość wyrobisk podziemnych posiada obudowę ŁP. Przepływ powietrza w tego typu wyrobiskach jest zaburzony w wyniku występowania żeber obudowy ŁP. Tego typu powierzchnię można przyrównać do rury z chropowatością w kształcie prążków. W literaturze światowej wykonano wiele badań dotyczących przepływu powietrza przez tego typu ośrodki porowate w kontekście wymiany ciepła. W badaniach wykorzystywano różnego rodzaju metody badawcze. W publikacji [Kang i in., 2016] w celu wyjaśnienia właściwości przenoszenia ciepła podczas przepływu turbulentnego wykorzystano symulację CFD przy pomocy modelu LES. W tego typu badaniach wykorzystuje się także metodę bezpośredniej symulacji obliczeniowej przepływów turbulentnych DNS. Przykładem zastosowania tej metody jest publikacja [Nadeem i in., 2015], gdzie opisano wyniki badań dotyczących bezpośrednich symulacji obliczeniowych przepływów turbulentnych DNS w chropowatym kanale. Z uwagi na to, że symulacje DNS wymagają dużych mocy obliczeniowych, pozwalają na badania prostych przepływów modelowych. Najbardziej miarodajną metodą badań są metody PIV, gdzie rejestrujemy rzeczywiste zjawisko. W badaniach [Cardwell i in., 2011] wpływu liczby Reynoldsa na rozkład pola prędkości w chropowatym kanale wykorzystano metodę TRDPIV (time-resolved digital particle image velocimetry). W badaniach oprócz uśrednionych w czasie i dokładnych rozkładów pola predkości w publikacji przedstawiono analize szybkości dyssypacji energii kinetycznej turbulencji. Na podstawie uśrednionego pola prędkości przepływu opisano charakter przepływu. Stwierdzono duży wpływ żeber na charakter przypływu. W wyniku obecności żebra zaobserwowano warstwę ścinającą oraz tworzenie się śladu zmian w rozkładzie prędkości, obszary recyrkulacji i obszary ponownego przyłączenia oddzielonego przepływu oraz silną warstwę mieszającą. Zachowanie pola prędkości doskonale obrazuje pięć chwilowych migawek pola przepływu ilustrujących pękanie i wyrzucanie obszaru recyrkulacji między żebrami przedstawionych na rysunku 1.

Wyniki omawianych badań łączy stwierdzenie dużego wpływu chropowatości na charakter przepływu oraz występowanie charakterystycznych wirów w okolicy chropowatości.

3. Symulacja przepływu w otoczeniu stanowiska pomiarowego

W ramach prowadzono analizy turbulentnego przepływu w miejscu pomiarów. Posłużą one do wspomagania interpretacji danych pomiarowych, planowania dalszych eksperymentów oraz realizacji głównego celu prac – doboru optymalnych metod modelowania numerycznego przepływów w podobnych obiektach.

3.1. Opis miejsca pomiarów wykonanych w roku 2018

Pomiary wykonano chodniku KD Barbara. Miejsce i przebieg pomiarów opisano w publikacji Skotnicznego z zespołem [Skotniczny i in., 2018].



Rys. 1. Pięć chwilowych migawek pola przepływu ilustrujących pękanie i wyrzucanie obszaru recyrkulacji między żebrami, Re = 2,5k-DEV [Cardwell i in., 2011]

3.2. Opis modelu numerycznego

Zgodnie z kształtem rzeczywistego odcinka wyrobiska górniczego, model geometryczny wyrobiska został podzielony na dwa odcinki. Pierwszy odcinek o długości 11 m, szerokości wyrobiska 3,65 m oraz wysokości 2,61 m, który nie zawierał w swojej budowie obudowy ŁP, co odzwierciedlało betonową wy-kładkę w modelu rzeczywistym (Rys. 2). W początkowej płaszczyźnie geometrii obszaru obliczeniowego uwzględniono odrzwia o wymiarach $1,0 \times 1,5$ m, oraz rurociąg hydrauliczny o średnicy 100 mm, znajdujący się na wysokości 2,21 m.

Po odcinku wyrobiska z wykładką betonową, nastąpiło zwiększenie przekroju wyrobiska górniczego do szerokości 4,25 m oraz wysokości 2,91 m (Rys. 3). Odcinek ten, o długości 44,0 m, uwzględniał obecność łuków obudowy ŁP o wysokości 0,11 m, szerokości 0,14 m, oraz rozstawie 0,55 m.



Rys. 2. Widok chodnika od strony napływu do miejsc pomiarów (stan z roku 2018)



Rys. 3. Geometria obszaru obliczeniowego



Rys. 4. Przekrój poprzeczny wyrobiska górniczego w świetle obudowy ŁP

W celu uzyskanie poprawnych wyników obliczeń konieczne było nałożenie gęstej siatki obliczeniowej, jednak użycie jednorodnej siatki na całym modelu obliczeniowym wydłużyłoby w znacznym stopniu obliczenia. Zdecydowano się na użycie funkcji kontroli rozmiaru siatki (ang. *size function*), która pozwala kontrolować wielkość siatki obliczeniowej w okolicach wybranego punktu, krawędzi lub powierzchni. Trójwymiarowe modele odcinaków chodnika kopalnianego z uwzględnieniem zapór przeciwwybuchowych wodnych zwykłych zostały zdyskretyzowane niestrukturalną siatką czworościenną (ang. *tri-pave*), która następnie została przekonwertowana na siatkę wielościenną (ang. *polyhedra*).

Ze względu na występowanie w modelu odcinka wyrobiska z "wykładką betonową", parametry nakładania siatki na ich powierzchnie różniły się od parametrów siatki nakładanej na odcinek wyrobiska w którym występowały łuki obudowy ŁP.

Parametry siatki dla odcinka wyrobiska w wykładką betonową:

- minimalny rozmiar 10,0 cm,
- maksymalny rozmiar
 15, 0 cm,
- współczynnik wzrostu 1,15.

Parametry siatki dla odcinka wyrobiska z łukami obudowy ŁP oraz rurociągu:

- minimalny rozmiar 5,0 cm,
- maksymalny rozmiar 15, 0 cm,
- współczynnik wzrostu 1,15.

Zaprojektowana siatka numeryczna składała się z 10,9 mln komórek czworościennych. Po konwersji na siatkę wielościenną, ilość komórek spadła do wartości 2,4 mln.

Współczynnik skośności dla siatki numerycznej o przedstawionych parametrach przedstawiony został w tabeli 1 w postaci udziału procentowego komórek siatki w danym zakresie współczynnika skośności.

Współczynnik skośności	udział procentowy [%]	Jakość komórki
1	0,00	bardzo zła
0,9 < 1	0,00	zła
0,75-0,9	0,00	słaba
0,5-0,75	10,05	umiarkowana
0,25-0,5	52,49	dobra
0 > 0,25	33,90	znakomita
0	3,56	równoboczna

Tab. 1. Udział procentowy komórek siatek numerycznych dla przedziałów współczynnika skośności

Dla przyjętego obszaru obliczeniowego warunki brzegowe dobierano tak, aby osiągnąć zakres prędkości przepływu możliwie bliski wartościom zmierzonym w kopalni. Skoncentrowano się na wynikach pomiarów metanoanemometrów, rozmieszczonych wzdłuż pionowej linii pomiarowej. We wstępnej wersji modelu zadano jednorodne pole prędkości w odrzwiach. Pomiary przeprowadzone w roku 2019 (Rozdział 4) pokazały, że odpowiada to rzeczywistemu przepływowi.

3.3. Omówienie przebiegu modelowania

Na podstawie średniej prędkości zmierzonych przez anemometry na linii pomiarowej oszacowano strumień objętości. W odrzwiach, będących wlotem do obszaru obliczeń zadano jednorodne pole prędkości o średniej wartości 11.32 m/s, odpowiadającej obliczonemu strumieniowi. Dla wylotu chodnika przyjęto warunki swobodnego wypływu (ang. *outflow*). Odpowiednio zróżnicowano chropowatości ścian spągu, wykładki betonowej i pokrytych produktami korozji elementów stalowych. Podczas obliczeń monitorowano chwilowe i średnie prędkości przepływu w miejscach odpowiadających położeniu czterech anemometrów (MA1 – MA4) oraz chwilowe prędkości w punktach odpowiadających położeniu czterech termoanemometrów w obu seriach pomiarowych (Hw1-1 – Hw4-2).

Wstępne obliczenia przeprowadzono przy pomocy modelu turbulencji k-e. Obliczenia prowadzono do chwili, gdy wahania średnich prędkości będą dostatecznie małe. Wówczas ponownie uruchamiano uśrednianie i nowo obliczone średnie wykorzystywano w dalszych analizach. Wartości chwilowe i średnie prędkości w punktach pomiarowych zarejestrowane podczas symulacji przedstawia Rysunek 5.

Po ustabilizowaniu się przepływu zmieniono model turbulencji na k-ωSST. Kontynuowano symulację do chwili gdy nowo obliczone średnie prędkości będą się dostatecznie mało wahać. Proces ustalania się średnie prędkości i wartości chwilowe w punktach pomiarowych przedstawia Rysunek 6.



Rys. 5. Chwilowe składowe poziome prędkości przepływu powietrza w miejscach pomiarów metanoanemometrami – obliczenia dla modelu turbulencji k-e



Rys. 6. Chwilowe i uśrednione składowe poziome prędkości przepływu powietrza w miejscach pomiarów metanoanemometrami – obliczenia dla modelu turbulencji k-ωSST

Obliczenia dla modelu SAS rozpoczęto od dostatecznie zaawansowanego modelowania przepływu przy pomocy modelu k-ωSST. Na wlocie zadano perturbacje prędkości generowane prze tzw spectral synthetizer. Wyniki otrzymane dla modelu k-ωSST posłużyły zapoczątkowania symulacji wykorzystującej model GEKKO [Menter, Lechner 2019]. Użyto domyślnych wartości współczynników.

3.4. Porównanie wyników badań eksperymentalnych i symulacji

W pierwszej kolejności przedstawiono wyniki pomiarów prędkości przepływu powietrza przy użyciu systemu czterech termoanemometrów w dwóch ustawieniach.

Wyniki pomiarów dla ustawienia 1 składają się z trzynastu jednominutowych pomiarów (nr pomiaru od 1 do 13) oraz jednego dziesięciominutowego pomiaru (nr pomiaru 14). Uśrednione wartości pomiarów



Rys. 7. Chwilowe i uśrednione składowe poziome prędkości przepływu powietrza w miejscach pomiarów metanoanemometrami – obliczenia dla modelu turbulencji SAS

prędkości przepływu, odchylenia standardowego oraz intensywności turbulencji przedstawiono w tabeli 2. Dodatkowo, celem prezentacji rozrzutów pomiarów prędkości przepływu powietrza dla poszczególnego czujnika, przedstawia je na rysunku 8. Wyniki pomiarów dla ustawienia 2 składają się z jedenastu jednominutowych pomiarów (nr pomiaru od 1 do 11) oraz jednego dziesięciominutowego pomiaru (nr pomiaru 12). Wyniki pomiarów zostały przedstawia w formie tabelarycznej tabeli 3, a rozrzuty prędkości dla poszczególnego punktu pomiarowego rysuneku 9.

Analizując wyniki pomiarów w ustawieniu 1 dla czujnika TA1, zaobserwować można rozrzut prędkości przepływu powietrza mieszczący się w przedziale 1,26 m/s-1,39 m/s, co daje średnią prędkość przepływu równą 1,33 m/s przy średnim odchyleniu standardowym równym 0,30 m/s, (Rys. 10). Przedział zarejestrowanych prędkości dla czujnika TA2 wynosi 1,47 m/s-1,62 m/s, średnia prędkość przepływu jest równa 1,57 m/s, średnie odchylenie standardowym jest równe 0,27 m/s. W przypadku czujnika TA3, przedział zarejestrowanych prędkości wynosi 1,91 m/s-2,0 m/s, średnia prędkość przepływu jest równa 1,96 m/s przy średnim odchyleniu standardowym wynoszącym 0,24 m/s. Ostatnim analizowanym czujnikiem w ustawieniu 1 jest termoanemometr TA4, którego przedział zarejestrowanych prędkości mieści się w zakresie 1,98 m/s-2,06 m/s, średnia prędkość przepływu jest równa 2,02 m/s przy średnim odchyleniu standardowym wynoszącym 0,20 m/s.

Analizując wyniki pomiarów w ustawieniu 2 dla czujnika TA1, zaobserwować można rozrzut prędkości przepływu powietrza mieszczący się w przedziale 1,26 m/s-1,35 m/s, co daje średnią prędkość przepływu równą 1,31 m/s przy średnim odchyleniu standardowym równym 0,29 m/s, (Rys. 11). Przedział zarejestrowanych prędkości dla czujnika TA2 wynosi 1,41 m/s-1,53 m/s, średnia prędkość przepływu jest równa 1,49 m/s, średnie odchylenie standardowym jest równe 0,28 m/s. W przypadku czujnika TA3, przedział zarejestrowanych prędkości wynosi 1,75 m/s-1,88 m/s, średnia prędkość przepływu jest równa 1,82 m/s przy średnim odchyleniu standardowym wynoszącym 0,27 m/s. Ostatnim analizowanym czujnikiem w ustawieniu 2 jest termoanemometr TA4, którego przedział zarejestrowanych prędkości mieści się w zakresie 1,81 m/s-1,96 m/s, średnia prędkość przepływu jest równa 1,90 m/s przy średnim odchyleniu standardowym wynoszącym 0,24 m/s.

W dalszej kolejności przystąpiono do przedstawienia wyników symulacji numerycznej dla czterech różnych modeli turbulencji: k-epsilon, k-ω SST, SAS oraz Gekko. Wyniki pomiarów średniej prędkości przepływu oraz odchyleń standardowych dla obydwu ustawień miejsc pomiarowych, odpowiadających ustawieniom rzeczywistych czujników w przekroju wyrobiska kopalnianego, zostały przedstawione w formie tabelarycznej, (Tab. 4, Tab. 5). Celem zobrazowania kształtu warstwy tworzącej się warstwy przyściennej,

w miejscu zdefiniowania punktów pomiarowych, utworzono linie prostą, biegnącą od punktu pomiarowego TA1 do punktu pomiarowego TA4. Dzięki wykorzystaniu prostej, można było wyznaczyć na wykresie krzywą kształtu prędkości przepływu w warstwie przyściennej, tworzącej się podczas obliczeń numerycznych, (Rys. 10, Rys. 11). Dodatkowo na wykresach wykreślono dwie przerywane linie odpowiadające odchyleniom standardowym dla uzyskanej krzywej prędkości przepływu. Aby uzyskane wyniki symulacji numerycznych można było odnieść do wyników pomiarów przy użyciu termoanemometrów, na wykresach uwzględniono wartości średnie uzyskane w pomiarów w wyrobisku kopalnianym oraz ich odchylenia standardowe.

Ustawienie 1												
	TA1			TA2			TA3			TA4		
Nr pom.	U	σ	Т	U	σ	Т	U	σ	Т	U	σ	Т
	[m/s]	[m/s]	[%]									
1	1,30	0,31	22,56	1,57	0,28	17,92	1,96	0,26	15,28	2,04	0,23	14,80
2	1,32	0,31	22,47	1,55	0,30	19,05	1,96	0,27	15,53	2,03	0,22	13,51
3	1,33	0,32	22,91	1,59	0,27	18,24	1,98	0,25	14,96	2,06	0,19	12,82
4	1,39	0,30	21,48	1,61	0,26	17,47	1,99	0,24	14,04	2,05	0,19	12,76
5	1,26	0,32	23,07	1,47	0,30	19,77	1,91	0,26	16,54	2,01	0,21	14,38
6	1,35	0,27	20,23	1,59	0,26	17,03	1,93	0,25	14,90	1,98	0,19	13,31
7	1,34	0,29	20,83	1,57	0,24	16,82	1,96	0,22	14,40	2,01	0,21	13,93
8	1,33	0,32	23,01	1,56	0,27	21,01	1,95	0,22	16,48	2,04	0,17	11,81
9	1,29	0,29	21,38	1,54	0,26	20,33	1,96	0,21	15,40	2,01	0,19	11,94
10	1,31	0,28	21,17	1,57	0,26	20,53	1,94	0,22	16,01	1,99	0,21	12,55
11	1,37	0,30	21,56	1,58	0,28	20,13	1,95	0,26	16,84	2,02	0,20	13,06
12	1,36	0,32	22,72	1,62	0,30	21,82	2,00	0,24	16,29	2,06	0,19	12,83
13	1,33	0,32	22,61	1,57	0,27	20,24	1,96	0,23	15,99	2,00	0,21	12,96
14	1,32	0,30	21,91	1,54	0,27	18,05	1,94	0,24	14,67	2,02	0,20	13,49

Tab. 2. Wyniki pomiarów termoanemometrami w ustawieniu 1



Rys. 8. Rozrzut zarejestrowanych prędkości przez poszczególne termoanemometry w ustawieniu 1

Ustawienie 2												
	TA1			TA2			TA3			TA4		
Nr pom.	U	σ	Т	U	σ	Т	U	σ	Т	U	σ	Т
	[m/s]	[m/s]	[%]									
1	1,32	0,29	21,76	1,51	0,28	18,68	1,85	0,26	17,16	1,94	0,24	16,39
2	1,34	0,32	22,61	1,51	0,30	19,26	1,86	0,28	16,85	1,94	0,24	15,41
3	1,30	0,27	21,03	1,52	0,25	18,00	1,86	0,23	15,71	1,92	0,22	15,56
4	1,29	0,29	20,76	1,46	0,28	19,09	1,75	0,29	17,53	1,81	0,25	16,56
5	1,33	0,29	21,75	1,51	0,27	18,21	1,85	0,28	17,09	1,94	0,23	15,47
6	1,32	0,30	21,82	1,52	0,27	17,64	1,86	0,27	16,45	1,94	0,24	15,57
7	1,26	0,29	21,41	1,41	0,29	19,20	1,76	0,29	17,73	1,83	0,27	17,62
8	1,32	0,26	20,32	1,48	0,27	18,02	1,81	0,25	16,31	1,88	0,23	15,32
9	1,29	0,30	22,23	1,49	0,27	18,31	1,79	0,26	17,09	1,86	0,25	16,73
10	1,35	0,29	22,16	1,53	0,28	19,07	1,88	0,26	17,10	1,96	0,25	16,08
11	1,26	0,30	22,15	1,46	0,28	18,79	1,79	0,26	16,84	1,86	0,23	15,82
12	1,30	0,29	21,86	1,48	0,28	18,75	1,81	0,27	17,05	1,89	0,25	16,10





Rys. 9. Rozrzut zarejestrowanych prędkości przez poszczególne termoanemometry w ustawieniu 2

Ustawienie 1										
Model turbulencji	TA	41	T	A2	T	A3	TA4			
	U	σ	U	σ	U	σ	U	σ		
	[m/s]									
k-epsilon	0,50	0,34	0,88	0,61	1,03	0,70	1,18	0,79		
k-ω SST	0,50	0,48	0,88	0,74	1,03	0,83	1,10	0,87		
SAS	0,52	0,60	0,83	0,73	1,01	0,80	1,12	0,85		
Geko	0,70	0,35	1,26	0,46	1,54	0,43	1,67	0,39		

 Tab. 4. Wyniki symulacji numerycznych w punktach pomiarowych odpowiadających położeniu termoanemometrów w ustawieniu 1



Rys. 10. Porównanie wyników pomiarów z wynikami symulacji numerycznej dla czterech modeli turbulencji w ustawieniu 1



Rys. 11. Porównanie wyników pomiarów z wynikami symulacji numerycznej dla czterech modeli turbulencji w ustawieniu 2

Ustawienie 2											
model turbulencji	T	41	T	42	T/	43	TA4				
	U	σ	U	σ	U	σ	U	σ			
	[m/s]										
k-epsilon	0,50	0,35	0,73	0,51	0,99	0,68	1,05	0,71			
k-ω SST	0,49	0,47	0,83	0,71	0,97	0,79	1,04	0,83			
SAS	0,52	0,61	0,80	0,72	0,93	0,77	1,03	0,81			
Gekko	0,69	0,34	1,20	0,46	1,42	0,45	1,54	0,43			

Tab. 5. Wyniki symulacji numerycznych w punktach pomiarowych odpowiadającychpołożeniu termoanemometrów w ustawieniu 2

Przystąpiono do analizy porównawczej wyników pomiarów prędkości przepływu powietrza w warstwie przyściennej przy użyciu termoanemometrów, do wyników symulacji numerycznych przeprowadzonych na geometrii odpowiadającej kształtem obiektowi rzeczywistemu. Analiza wyników symulacji numerycznych wykazuje znaczne różnice kształtowania się profilu prędkości w warstwie przyściennej przy wykorzystaniu różnych modelu turbulencji. Dla trzech modelu numerycznych: k-epsilon, k-ω SST oraz SAS, wyniki pomiarów uśrednionej prędkości przepływu, w punktach odpowiadających położeniom termoanemometrów w wyrobisku górniczym, jest do siebie zbliżona zarówno w ustawieniu 1 jak i w ustawieniu 2 (Tab. 4, Tab. 5). Kształt profilu na linie punktów pomiarowych, odpowiada kształtem średnim prędkościom przepływu uzyskanym przy pomocy termoanemometrów, jednak są one znacząco mniejsze, średnio o 0,6 m/s, na całej długości. (Rys. 10, Rys. 11). Biorąc pod uwagę odchylenia standardowe, wyniki symulacji numerycznych dla trzech pierwszych modeli turbulencji wpasowują się w niewielkim stopniu w wyniki pomiarów.

Znacznie lepsze wyniki uzyskano dla modelu turbulencji Gekko, gdzie uzyskane prędkości średnie są wyraźnie wyższe od prędkości średnich uzyskanych podczas obliczeń pozostałymi modelami turbulencji. Należy zauważyć również mniejszą skalę odchyleń standardowych, co świadczy o bardziej ustabilizowanym przepływie w okolicach warstwy przyściennej. Kształt profilu prędkości również dobrze wpasowuje się w prędkości średnie uzyskane w trakcie pomiarów. mimo tego, największą różnicę pomiędzy wynikami pomiarów a wynikami symulacji numerycznej dla modelu turbulencji Gekko, zaobserwować można dla punktu pomiarowego TA1, dla obydwu ustawień. Zastanawiające są same wyniki pomiarów dla tych punktów, który był oddalony od łuku obudowy ŁP o 55 mm. Biorąc pod uwagę, iż warstwa przyścienna ma logarytmiczny rozkład prędkości, zmierzona prędkość przepływu w tym punkcie powinna być znacząco mniejsza od średniej prędkości w punkcie sąsiednim (TA2). Sytuacja ta jest dobrze odwzorowana w wynikach symulacji numerycznych dla wszystkich modeli turbulencji, gdzie największy wzrost prędkości w miarę oddalania się od obudowy ŁP następuje pomiędzy punktem pomiarowym TA1 a punktem TA2.

4. Podsumowanie i wnioski

Pomiary przeprowadzone w chodniku KD Barbara w roku 2018 wykazały przydatność wybranego obiektu do badań. Uzyskano oryginalne i wartościowe dane, na podstawie których wykonano serię symulacji komputerowych. Jednak wspomniane pomiary były wstępem do planowanego cyklu rozleglejszych badań i nie były ukierunkowane na zebranie danych niezbędnych do określenia warunków brzegowych. Przeprowadzone symulacje numeryczne posłużyły do opracowania metodyki modelowania numerycznego obiektu. Uzyskano znaczne podobieństwo wyników pomiarów i symulacji. Rozbieżności w między obliczeniami i danymi z pomiarów mogą wynikać z niepełnych danych o warunkach przepływu panujących podczas eksperymentów. Dzięki uzyskanym doświadczeniom, opisanym w niniejszym artykule możliwe było zaplanowanie i przeprowadzenie kolejnej serii badań, obejmującej pomiary przy pomocy termoanemo-metrów oraz anemometrów skrzydełkowych dla określenia warunków brzegowych i danych do weryfikacji symulacji numerycznych przepływu. Wyniki drugiej serii eksperymentów i odpowiadających im symulacji zostaną przedstawione w kolejnych publikacjach.

Niniejsze opracowanie przygotowano w ramach realizacji podzadania 2 badań finansowanych z dotacji na utrzymanie potencjału badawczego Instytutu Mechaniki Górotworu w roku 2019.

- Cardwell D., Vlachos P., Thole K., 2011: Developing and fully developed turbulent flow in ribbed channels, Exp. Fluids **50**, 1357-1371.
- Kang Ch., Yang K., 2016: Characterization of Turbulent Heat Transfer in Ribbed Pipe Flow, Journal of Heat Transfer **138**, April 2016.
- Leonardi S., Orlandi P., Antonia R.A., 2005: A method for determining the frictional velocity in a turbulent channel flow with roughness on the bottom wall, Experiments in Fluids, June.
- Menter F., 2012: Turbulence Modeling for Engineering Flows. ANSYS Inc. www.ansys.com.
- Menter F.R. 2015: Best Practice of Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD, version 2.0. Technical paper ANSYS Inc. www.ansys.com.
- Menter F.R., Lechner R., 2019: Best Practice: Generalized k-ω Two Equation Turbulence Model in ANSYS CFD (GEKO) Version 1.0, Technical report ANSYS, pp 38.
- Nadeem M., Lee J. H., Lee J., Sung H.J., 2015: Turbulent boundary layers over sparsely-spaced rod-roughened walls, International Journal of Heat and Fluid Flow 56.
- Skotniczny P., Ostrogórski P., Krawczyk J., Janus J., 2018: Wyznaczenie wartości parametrów charakteryzujących turbulentny przepływ powietrza w pobliżu ociosu wyrobiska kopalnianego,
- Vogiatzis I.I., Denizopoulou A.C., Ntinas G.K., Fragos V.P., 2014: Simulation Analysis of Air Flow and Turbulence Statistics in a Rib Grit Roughened Duct, Scientific World Journal, Volume 2014.

Presentation of preliminary research results and flow simulations in the gallery of the Barbara Experimental Mine focused on the selection of turbulence models

Abstract

The article presents the results of work on the selection of optimal turbulence models describing the flow of mine air in airways with arched roof support. A description is sought that will ensure satisfactory simulation accuracy with the lowest possible computing power demand. As part of research aimed at selecting turbulence models, literature review and in-situ research were continued. A family of numerical models of air flow in the KD Barbara gallery, in which the IMG-PAN team carried out measurements of flow velocity using thermoanemometers and metanoanemometers was developed. These models use the finite volume method and k-e, k-wSST, SAS and GEKO turbulence models. A number of calculations were made using the selected turbulence models. An analysis of the flow conditions at the measurement site was carried out. Measurement and simulation results were compared. Based on the results obtained, plans for further in-situ experiments could be formulated

Keywords: turbulence models, mine gallery, computational fluid dynamics