

Zastosowanie termooanemometrycznej metody pomiaru prędkości przepływu powietrza w górnictwie głębinowym

Część 6 – Zastosowanie wyników pomiarów in situ w modelowaniu przepływu powietrza w wyrobisku górniczym

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY^{ID}, ELŻBIETA POLESZCZYK^{ID}, PAWEŁ LIGĘZA^{ID}

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

Streszczenie

Analiza i pomiary sieci wentylacyjnej stanowią ważny element badania stanu i przebiegu procesu wentylacji kopalń. Sprawność i niezawodność systemu sieci wentylacyjnej wpływa na przebieg procesu eksploatacji i bezpieczeństwa pracy w kopalni. W artykule przedstawiono koncepcję i prototyp termooanemometrycznego systemu pomiarowego do wielopunktowych pomiarów pola prędkości. System oparty jest na czujnikach zintegrowanych z układem przetwarzania sygnału. Matryca takich czujników rozmieszczonych w badanym przekroju wyrobiska współpracuje z przenośnym, komputerowym systemem akwizycji danych pomiarowych. Umożliwia to symultaniczny, wielopunktowy pomiar prędkości przepływu w badanym przekroju. W czujnikach zastosowano oryginalny układ pomiarowy oparty na modyfikacji mostkowego układu stałotemperaturowego z kompensacją temperatury. Układ ten jest przedmiotem patentu autorów. Opracowany system pomiarowy posłużył do weryfikacji komputerowych symulacji przepływów powietrza w wybranych rejonach wyrobisk górniczych. W tej części cyklu publikacji przedstawiono zastosowanie wyników pomiarów in situ w modelowaniu przepływu powietrza w wyrobisku górniczym.

Słowa kluczowe: Wentylacja kopalń; pomiary sieci wentylacyjnych; systemy pomiarowe; termooanemometria; kompensacja temperaturowa; symulacja komputerowa

1. Wprowadzenie

Symulacja numeryczna trójwymiarowego przepływu powietrza w wyrobisku górniczym jest zagadnieniem istotnym w aspekcie wyznaczenia lokalnych strat przepływu powietrza, które mają wpływ na sprawność procesu przewietrzania kopalń głębinowych. W wyrobiskach górniczych, w przeciwieństwie do innych przewodów zamkniętych redukcja niekorzystnego wpływu turbulencji na efektywność przepływu powietrza polegająca na zastosowaniu przystawek, zróżnicowania kształtu i chropowatości ścian kanału jest trudna do realizacji z uwagi na duże gabaryty wyrobisk wentylacyjnych. Zastosowanie elementów redukujących niekorzystny wpływ struktur turbulentnych wymaga zgromadzenia odpowiedniej ilości danych opisujących proces przepływu powietrza przez charakterystyczne fragmenty sieci. Najkorzystniejszym w aspekcie czasochłonności oraz możliwości adaptacyjnych rozwiązania jest zastosowanie metod numerycznych do wyznaczenia wielkości charakteryzujących turbulencje przepływu. Z powodu znacznej rozległości sieci wentylacyjnej kopalni, obliczenia mogą być prowadzone jedynie dla wybranych rejonów, takich jak: podszybia, skrzyżowania wyrobisk, otamowania, których rozległość nie przekracza paruset metrów.

Do eksperymentalnej weryfikacji modelu numerycznego konieczne jest dysponowanie metodą umożliwiającą wyznaczenie profilów prędkości w wybranych przekrojach i składowych fluktuacyjnych wektora prędkości celem wyznaczenia intensywności turbulencji lub innych wielkości kinematycznych

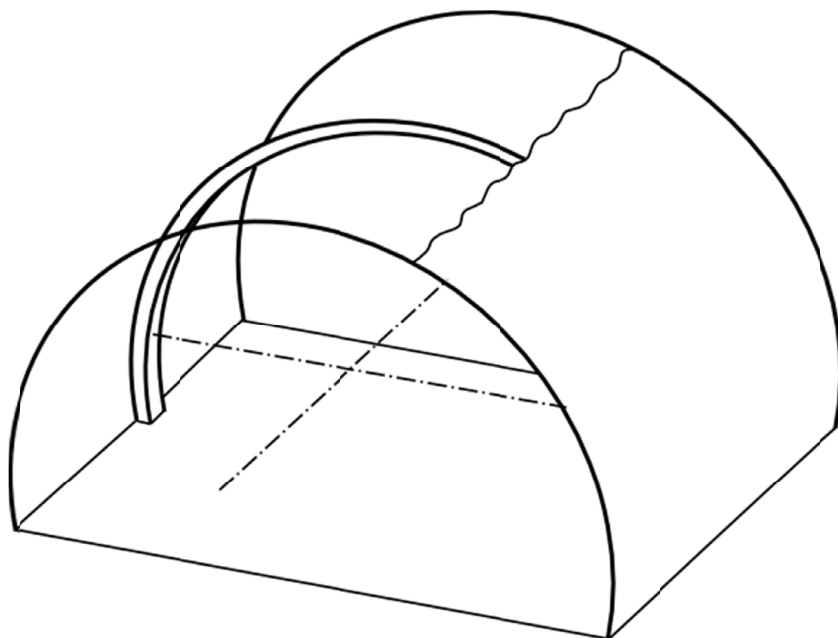
strugi powietrza. Do prowadzenia badań stanów nieustalonych w sieciach wentylacyjnych i innych pomiarów dynamicznych stosowane są termoanemometry, które w przeciwieństwie do tradycyjnie stosowanych w górnictwie anemometrów skrzydełkowych, charakteryzują się szerokim pasmem przenoszonych częstotliwości, sięgającym setek kiloherców. Autorzy zaproponowali eksperymentalną weryfikację numerycznej symulacji przepływu powietrza w wyrobisku górnictwym z zastosowaniem termoanemometrycznego systemu wielopunktowego pomiaru pola prędkości, przystosowanego do specyficznych warunków pracy w kopalni (przepływ nieustalony i nieizotermiczny o znacznym zanieczyszczeniu i wilgotności). Prototypowe czujniki pomiarowe i koncepcja tego systemu została opracowana i przebadana eksperymentalnie w Instytucie Mechaniki Górniczej PAN.

2. Model geometrii zjawiska

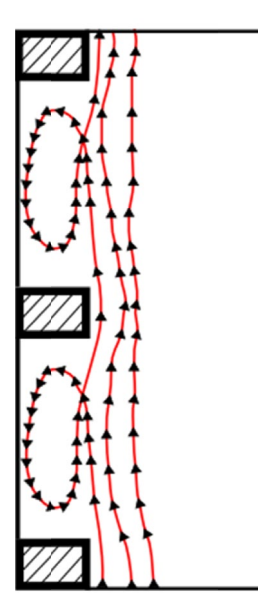
Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych stanowiły podstawę do przeprowadzenia eksperymentu numerycznego polegającego na wyznaczeniu parametrów strugi powietrza przepływającego w wyrobisku górnictwym. Istotą symulacji numerycznej było określenie tych parametrów w geometrii możliwie najbardziej zbliżonej do rzeczywistości. Dotychczasowo w obliczeniach numerycznych posługiwano się geometriami, które z uwagi na rozległość obszarów obliczeniowych, oraz na stopień komplikacji obliczanych wielkości przedstawiane były w maksymalnym uproszczeniu [33]. W rzeczywistości, w większości przypadków wyrobiska górnictwe są prowadzone w obudowie typu ŁP, która oprócz oczywistej funkcji wytrzymałościowej nadaje specyficzny kształt ścianom wyrobiska, stanowiąc dodatkową przeszkodę dla przepływającego nim powietrza.

Na Rys. 1 zamieszczono schematyczny rysunek fragmentu wyrobiska prowadzonego w obudowie typu ŁP. Przypadek jest tym bardziej interesujący z uwagi na fakt, że w takiego typu geometrii spodziewane są strefy recyrkulacji strugi powietrza we wnękach pomiędzy obudową (Rys. 2) które mogą mieć wpływ na kształt i zasięg warstwy przyściennej. Obliczenia przeprowadzono w programie FLUENT.

Przed przystąpieniem do obliczeń należało odpowiednio przygotować model geometryczny omawianego wyrobiska. Posłużono się do tego celu preprocesorem GAMBIT. Wykonany model geometrii zamieszczono na Rys. 3. Wymiary główne przedstawia schemat na Rys. 4.



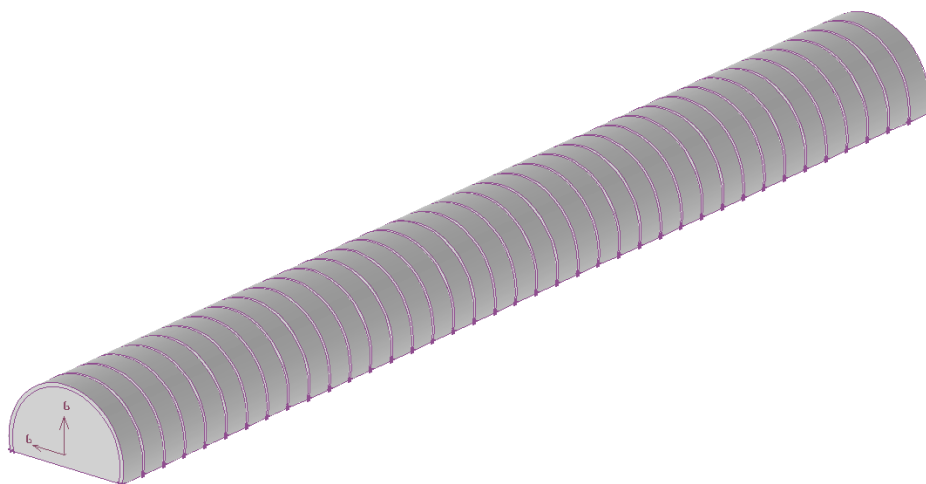
Rys. 1. Fragment wyrobiska górnictwego w obudowie typu ŁP



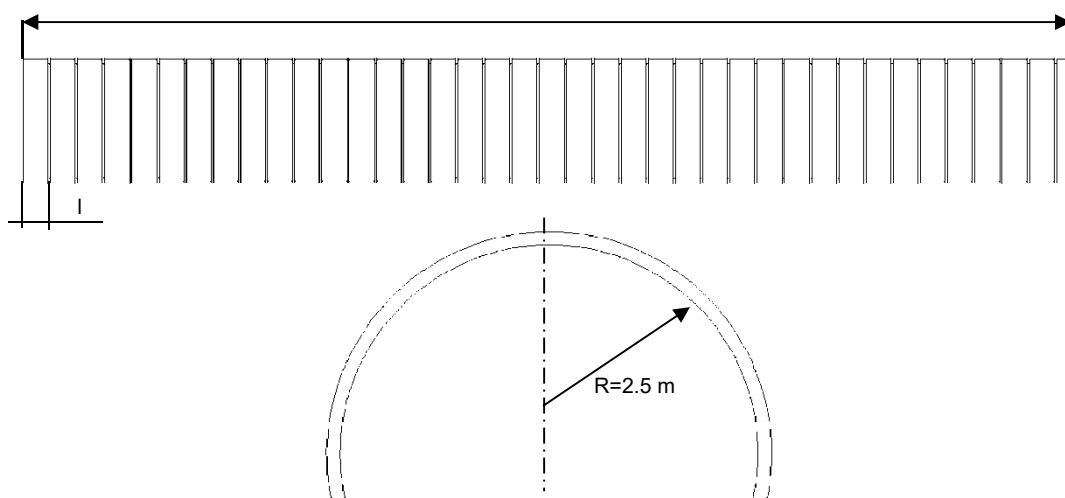
Rys. 2. Spodziewana strefa recyrkulacji strugi powietrza

Długość omawianego wyrobiska $L = 40$ m, a odległość pomiędzy poszczególnymi łukami obudowy $l = 1$ m. Pole powierzchni przekroju $A = 12$ m².

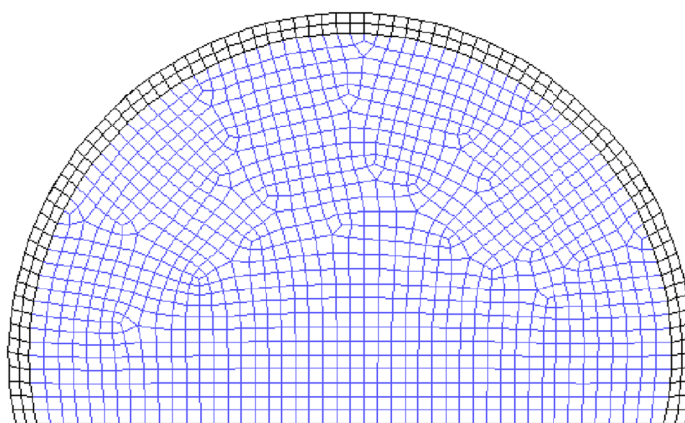
Skonstruowana geometria została zdyskretyzowana siatką obliczeniową typu quad o wielkości elementu 0.1 m. (Rys. 5) Całkowita liczba elementów w domenie obliczeniowej wynosiła 547 876.



Rys. 3. Widok ogólny geometrii obliczeniowej.



Rys. 4. Główne wymiary geometryczne

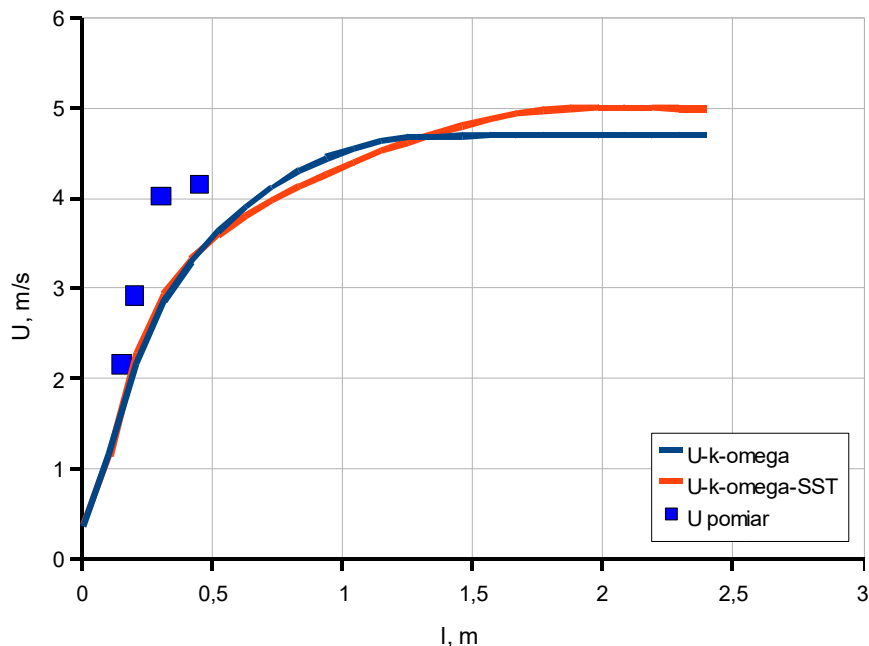


Rys. 5. Fragment siatki obliczeniowej

3. Model turbulencji

W dotychczasowo opisywanych przez różnych autorów [32,33] zagadnieniach dotyczących przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych stosowany był model $k-\omega$ -SST. Wyniki uzyskane z obliczeń z wykorzystaniem tego modelu dobrze pokrywają się ze zmierzonymi wartościami prędkości w przekroju wyrobiska. Z tego powodu zdecydowano się na zastosowanie go do opisu zjawisk zachodzących w obrębie

strefy przyściennej. Wyniki porównawcze przeprowadzonych analiz wykazały jednak brak zgodności pomiędzy wyznaczonymi profilami prędkości zmierzonej oraz obliczonej (Rys. 6).



Rys. 6. Porównanie profili prędkości przy ścianie wyznaczonych numerycznie z prędkościami zmierzonymi

Przyczyn takiego stanu rzeczy może być wiele. Za najbardziej prawdopodobną uznano różnice w ukształtowaniu ścian wyrobisk w przypadkach omawianych w pracach innych autorów a omawianym obecnie. Wprowadzenie do geometrii wyrobiska łuków obudowy, które stanowią periodyczną przeszkodę w obrębie warstwy przyściennej spowodowało zmianę w mechanizmie wymiany masy przepływającego powietrza pomiędzy warstwą przyścienną a strefa rdzenia potencjalnego.

Problem ten można próbować rozwiązać poprzez zastosowanie rozszerzonego modelu przepływu powietrza w pobliżu ściany.

Tego typu podejście dostępne jest przy zastosowaniu jednego z dostępnych we FLUENCIE modeli $k-\varepsilon$ jako hipotezy domykającej w równaniach Naviera-Stockesa.

Standardowy model $k-\varepsilon$ jest półempirycznym modelem opartym na równaniach transportu energii kinetycznej turbulencji k (1) oraz jej dyssypacji ε (2) [34].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

W powyższych równaniach poszczególne wyrazy oznaczają:

G_k – produkcja energii kinetycznej turbulencji spowodowana średnim gradientem prędkości,

G_b – produkcja energii kinetycznej turbulencji spowodowana działaniem sił wyporności,

Y_M – człon źródłowy będący stosunkiem fluktuacyjnej dylatacji turbulencji w przepływie ściślimym do całkowitego współczynnika dyssypacji,

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ – stałe modelu,

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – Liczby Prandtla, odpowiednio dla k i ε ,

S_k, S_ε – definiowalne przez użytkownika dodatkowe człony źródłowe.

Stosując w obliczeniach model $k-\varepsilon$ użytkownik może wybrać odpowiednią do danego przypadku funkcję ściany.

4. Model warstwy przyściennej

Program obliczeniowy Fluent umożliwia dwojaki sposób do zagadnień wyznaczania wartości parametrów przepływowych w obrębie warstwy przyściennej. W pierwszym z nich, wewnętrzny obszar warstwy przyściennej, tzw. subwarstwy lepka, wraz ze strefą buforową nie jest modelowana. W zamian za to do obliczeń jest wprowadzona pół empiryczna funkcja zwana „funkcją ściany”. Drugi sposób polega na prowadzeniu obliczeń wewnątrz zdyskretyzowanego obszaru leżącego w pobliżu ściany. Ten sposób wymaga zaprojektowania siatki o znacznie mniejszych elementach celem odwzorowania subwarstwy lepkiej, a co jest z tym związane, wymaga większych mocy obliczeniowych. Biorąc pod uwagę rozległość domeny obliczeniowej w zastosowaniach związanych z przepływem powietrza w wyrobisku górniczym w dalszym ciągu zdecydowano się na implementację odpowiedniej funkcji ściany. Oprócz tego istotne jest również określenie właściwej dla omawianych zagadnień postaci tej funkcji do późniejszych zastosowań.

Domyślnie do wyznaczania zagadnień przyściennych używana jest funkcja standardowa, zaproponowana przez Laundera i Spaldinga w postaci:

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^*) \quad (3)$$

gdzie:

$$U^* = \frac{U_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad (4)$$

$$y^* \equiv \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu} \quad (5)$$

wyrazy występujące w powyższych równaniach oznaczają odpowiednio:

- κ – stała Von Karmana = 0.4187,
- E – stała empiryczna = 9.793,
- U_p – prędkość średnia w punkcie P ,
- y_p – odległość punktu P od ściany,
- μ – lepkość dynamiczna powietrza.

Występująca w równaniach (4) i (5) stała C_μ jest jedną ze stałych modelu.

Oprócz wyżej wymienionej, Fluent oferuje bardziej zaawansowane funkcje opisujące dodatkowe zjawiska pojawiające się w obrębie warstwy przyściennej. Należą do nich: nierównowagowa funkcja ściany, stosowana w przepływach, w których istnieje duże prawdopodobieństwo wystąpienia separacji warstwy przyściennej, oraz rozszerzona funkcja ściany, która umożliwia stosowanie siatek o mniejszych ilościach elementów w obszarze przyściennym, co powoduje radykalne zmniejszenie objętości zadania oraz zapotrzebowania na moc obliczeniową.

Z uwagi na charakter przepływu powietrza w wyrobisku, oraz na zasadniczo niewielki obszar obliczeniowy zdecydowano się w pierwszym przybliżeniu na wykonanie obliczeń z użyciem standardowej funkcji ściany.

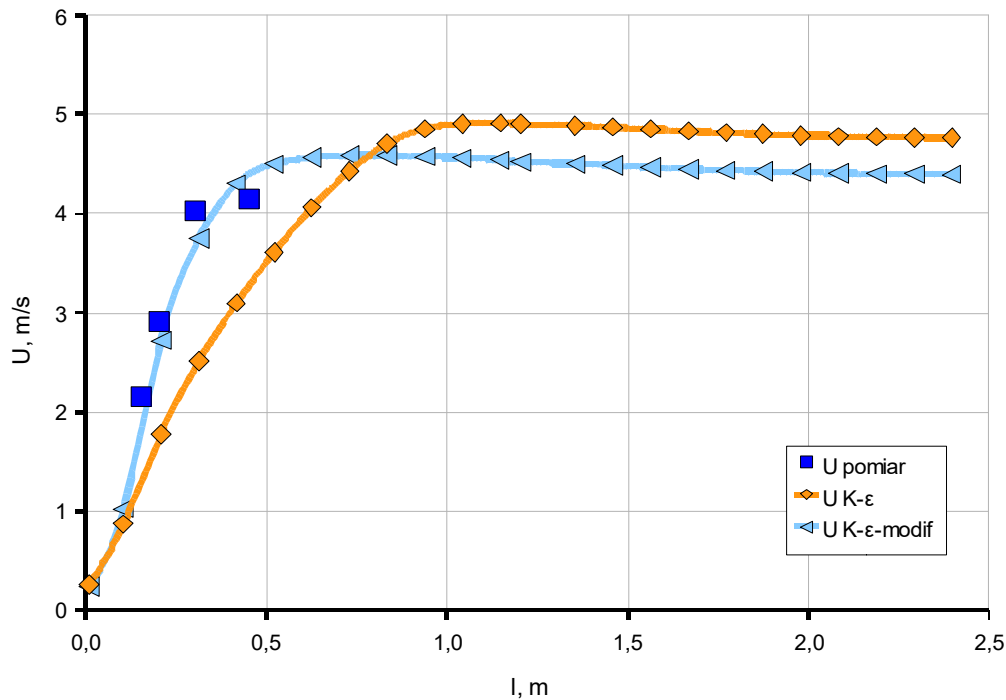
5. Wyniki obliczeń

Poniżej przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przepływu powietrza w omawianym wyrobisku.

Pierwszą z interesujących rzeczy, przed przystąpieniem do analizy pól prędkości, wirowości i turbulencji a więc wielkości mających istotny wpływ na wymianę masy w wyrobisku, jest odniesienie się do wykonanych wcześniej pomiarów prędkości w obrębie warstwy przyściennej.

Jak zostało wcześniej wspomniane, pierwsze obliczenia przeprowadzono z użyciem standardowej funkcji ściany. Funkcja ta opisana jest wyrażeniem (3). Przebieg wartości wektora prędkości wyznaczonego z użyciem tej funkcji zaprezentowano na Rys. 7. w postaci linii pomarańczowej z rombami. Jak widać, zastosowanie w obliczeniach standardowej funkcji ściany w postaci (3) nie przyniosło oczekiwanych rezultatów. Punkty wyznaczone z pomiarów w wyrobisku (niebieskie kwadraty na Rys. 7) nie pokrywają się z profilem wyznaczonym numerycznie.

Przyczyną może być to, że standardowe podejście do zagadnień przepływów przyściennych a co za tym idzie stosowanie standardowej funkcji ściany nie uwzględnia występowania gradientów ciśnienia, tak więc modelowanie zjawisk przepływowych w których występuje zmiana gradientu ciśnienia, która może doprowadzić do oderwania warstwy przyściennej jest niedokładne.



Rys. 7. Porównanie obliczonych wartości prędkości w obrębie warstwy przyściennej dla modelu $k-\varepsilon$, z wartościami zmierzonymi

Zakładając, że pomiary zostały wykonane poprawnie, można wprowadzić do obliczeń funkcję ściany, która przybliży rozwiązanie numeryczne z danymi eksperymentalnymi. Taką alternatywą jest *rozszerzona funkcja ściany*.

Zadanie to realizowane jest we FLUENCIE poprzez wprowadzenie rozszerzonego modelu obszaru przyściennego.

Odbywa się to poprzez założenie dwustrefowego modelu warstwy przyściennej. W tym ujęciu cała domena obliczeniowa jest podzielona na obszar silnie zależny od lepkości oraz na obszar swobodnej turbulencji. Granica tych obszarów określona jest liczbą Reynoldsa, w której wymiarem charakterystycznym jest odległość od ściany y (6).

$$Re_y \equiv \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \quad (6)$$

gdzie:

- ρ – gęstość płynu (powietrza),
- y – odległość od ściany,
- k – energia kinetyczna turbulencji,
- μ – lepkość dynamiczna płynu (powietrza).

W wyrażeniu (6) wyrażenie y jest definiowane jako odległość środka danego elementu w kierunku normalnym do najbliższej ściany:

$$y \equiv \min_{\vec{r}_w \in \Gamma_w} \|\vec{r} - \vec{r}_w\| \quad (7)$$

gdzie \vec{r} i \vec{r}_w – są promieniami wodzącymi odpowiednio w punkcie pola i na ścianie.

Dla w pełni rozwiniętego obszaru turbulentnego ($Re_y > 200$) do obliczeń wykorzystywany jest model $k-\varepsilon$ lub RSM , natomiast dla obszaru „wewnętrznego” jednorównaniowy model Wolfsteina, w którym wartość lepkości turbulentnej μ_t wyznaczana jest z równania (8).

$$\mu_{t,2layer} = \rho C_\mu \ell_\mu \sqrt{k} \quad (8)$$

gdzie:

C_μ – stała modelu,
 ℓ_μ – skala długości, określana jako:

$$\ell_w = y C_\ell^* \left(1 - e^{-Re_y/A_\mu}\right) \quad (9)$$

Przedstawiony powyżej opis wyznaczania lepkości turbulentnej w obrębie wewnętrznej subwarstwy jest częścią składową modelu rozszerzonego. Wyznaczenie lepkości turbulentnej dla całej domeny obliczeniowej odbywa się zgodnie z zależnością (10).

$$\mu_{t,tot} = \lambda_\epsilon \mu_t + (1 - \lambda_\epsilon) \mu_{t,2layer} \quad (10)$$

w której μ_t jest lepkością turbulentną dla wysokich wartości liczb Reynoldsa (w obszarze zewnętrznym) która jest wyznaczana w oparciu o modele *standardowy*, *RNG* lub *Realizable k-ε*. Obecna w równaniu (10) funkcja łącząca λ_ϵ (*blending function*) wyraża się jako:

$$\lambda_\epsilon = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{Re_y - Re_y^*}{A} \right) \right] \quad (11)$$

Obecna w równaniu (11) stała A określa szerokość funkcji łączącej

$$A = \frac{|\Delta Re_y|}{\tanh(0.98)} \quad (12)$$

Prędkość płynu w tak zdefiniowanym obszarze uzyskuje się przez wprowadzenie funkcji ściany określonej równaniem:

$$u^+ = e^\Gamma u_{lam}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} u_{urb}^+ \quad (13)$$

W przypadku równania (13) funkcja łącząca Γ jest dana wzorem:

$$\Gamma = -\frac{a(y^+)^4}{1 + by^+} \quad (14)$$

Stałe obecne w równaniu (14) wynoszą: $a = 0.01$ i $b = 5$.

Bezwymiarowa prędkość u^+ dla podobszaru wewnętrznego (laminarnego) wyznaczana jest z równania:

$$\frac{du_{lam}^+}{dy^+} = 1 - \alpha y^+ \quad (15)$$

a dla obszaru zewnętrznego (w pełni rozwinięta turbulencja):

$$\frac{du_{urb}^+}{dy^+} = \frac{1}{\kappa} \left[S' \left(1 - \beta u^+ - \gamma (u^+)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

gdzie:

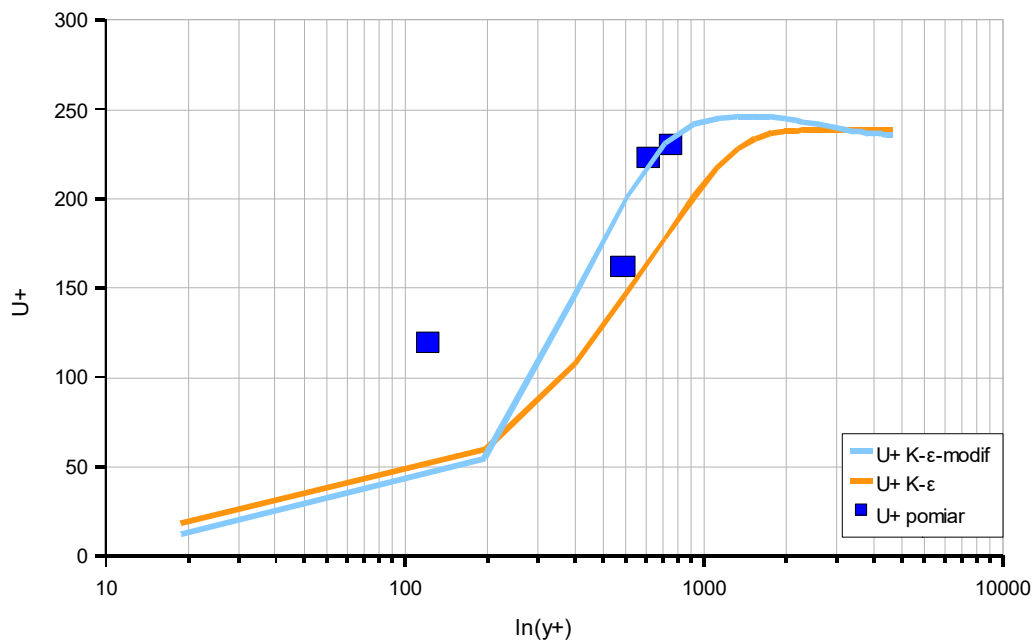
$$S' = \begin{cases} 1 + \alpha y^+ & \text{dla } y^+ < y_s^+ \\ 1 + \alpha y_s^+ & \text{dla } y^+ \geq y_s^+ \end{cases} \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{u}{\rho^2 (u^*)^3} \frac{dp}{dx} \quad (18)$$

Wartości β i γ z uwagi na izotermiczność przepływu są równe zero.

Po zdefiniowaniu rozszerzonej funkcji ściany przeprowadzono powtórne obliczenia, których rezultatem jest profil prędkości (Rys. 7) zaznaczony kolorem niebieskim. Jak można zauważyć wartości prędkości w poszczególnych punktach są zbliżone do tych uzyskanych na drodze eksperymentalnej z użyciem zintegrowanych czujników termooanemometrycznych.

Celem lepszej interpretacji wyników przedstawiono uzyskane profile w półlogarytmicznym układzie współrzędnych u^+ , y^+ , zamieszczonym na Rys. 8.

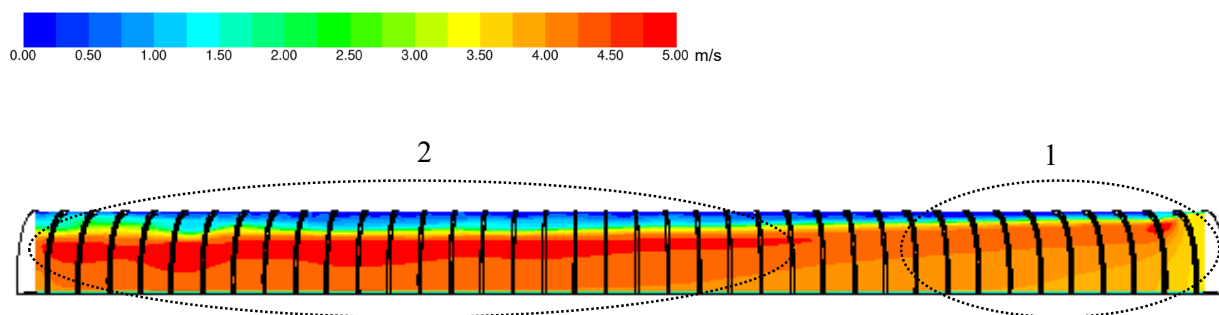


Rys. 8. Porównanie obliczonych wartości prędkości dla modelu k - ϵ , z wartościami zmierzonymi. Dane przedstawione w półlogarytmicznym układzie odniesienia U^+ , y^+

Sądząc po wartościach prędkości u^+ uzyskanych z pomiarów (Rys. 8. – U^+ pomiar) można stwierdzić, że zmierzone punkty mieściły się w obszarze strefy intermencji a więc w obszarze zewnętrznym warstwy przyściennej. To jest bardzo ważne spostrzeżenie, ponieważ pomimo bardzo małej odległości sondy od ociosu strefa logarytmicznego rozkładu wektora prędkości praktycznie uległa degradacji. Pierwszy punkt z pomiaru (czujnik najbliższy ścianie) sugeruje wprawdzie obecność tej strefy, jednak nie jest ona w pełni interpretowalna.

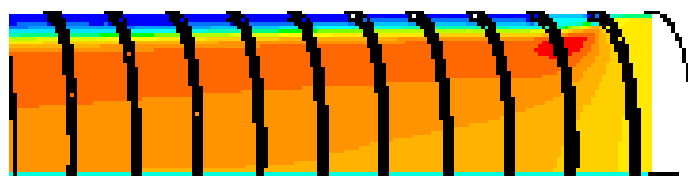
Wyniki w postaci pól prędkości, intensywności turbulencji, wektora wirowości uzyskane z analizy numerycznej omawianej geometrii z zastosowaniem rozszerzonego modelu warstwy przyściennej zamieszczono poniżej.

Przy opracowywaniu wyników przyjęto pewną konwencję. Ponieważ najistotniejszą informacją w aspekcie pomiarów wentylacyjnych w wyrobiskach górniczych jest rozkład poszczególnych wielkości w przekroju poprzecznym wyrobiska zdecydowano się na opracowanie umożliwiające prześledzenie zmian wielkości opisywanych w kolejnych przekrojach oddalonych od przekroju wlotowego. W ustaleniu żądanych odległości pomocne okazały się przekroje podłużne w omawianym wyrobisku. Na Rys. 9 zamieszczono rozkład wartości prędkości w przekroju podłużnym położonym w osi symetrii wyrobiska.



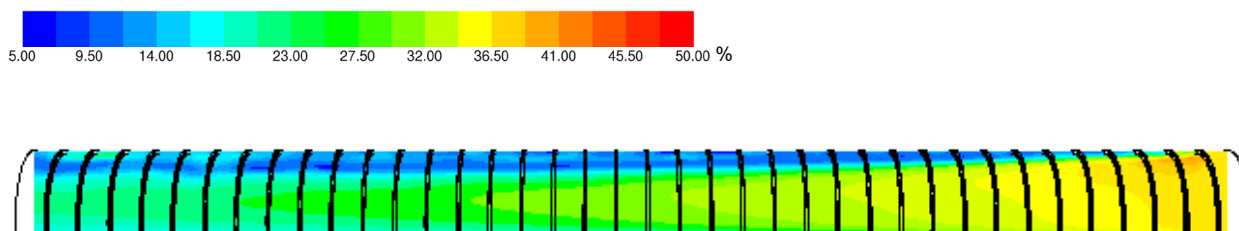
Rys. 9. Rozkład prędkości u w przekroju podłużnym wyrobiska.
Na rysunku zaznaczono charakterystyczne obszary w przepływie

W obrazie przepływu zilustrowanego na Rys. 9 można zauważyć dwa zasadnicze obszary. Pierwszy z nich, którego powiększony obraz znajduje się na Rys. 9a obszar wlotowy, w którym obserwuje się silny wpływ pierwszego z łuków obudowy na kształt i wartości prędkości, obszar ten rozciąga się do około 14 metra. W obszarze nr 2 (na Rys. 9) następuje stopniowe rozwijanie się i stabilizacja przepływu



Rys. 9a. Wpływ pierwszego łuku obudowy na rozkład prędkości

Podobnie kształtują się rozkłady intensywności turbulencji, zamieszczone na Rys. 10.



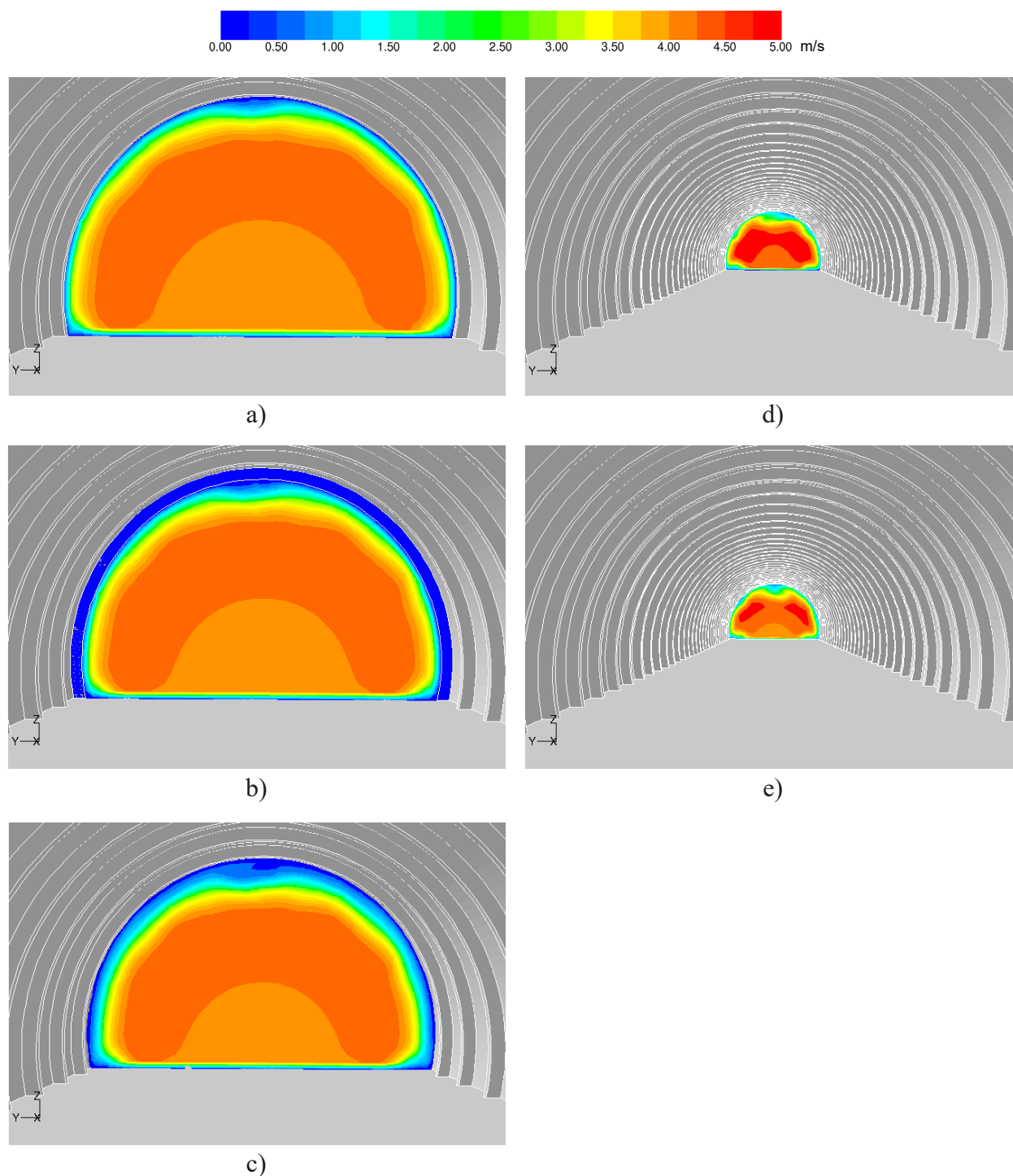
Rys. 10. Rozkład intensywności turbulencji u w przekroju podłużnym wyrobiska

Początkowe przekroje, począwszy od wlotowego charakteryzują się zwiększoną wartością intensywności turbulencji, której „generatorem” jest pierwszy łuk obudowy. W dalszych przekrojach, począwszy od około 13 metra, intensywność turbulencji utrzymuje się na stałym poziomie, wynoszącym około 20%.

Na podstawie powyższych spostrzeżeń zdecydowano się przeprowadzić analizę wartości poszczególnych wielkości w 5 przekrojach poprzecznych omawianego wyrobiska. Pierwsze 3, na Rys. 11a-11c, znajdują się w strefie rozwoju profilu prędkości – w odległości odpowiednio 11, 11.5 i 12 m od przekroju wlotowego, natomiast pozostałe 2 – w strefie rozwiniętego profilu prędkości, w odległości odpowiednio 38 i 39 m od przekroju wlotowego (Rys. 11d-11e)

W podobny sposób przedstawiono wartości intensywności turbulencji w poszczególnych przekrojach poprzecznych. Wyniki zamieszczono na Rys. 12a-12e.

Dodatkową informację szczególnie istotną w aspekcie wykonanych serii pomiarów w wyrobisku jest rozkład wartości wektora wirowości w poszczególnych przekrojach poprzecznych. Wielkość ta została zaprezentowana na Rys. 13a-13e.



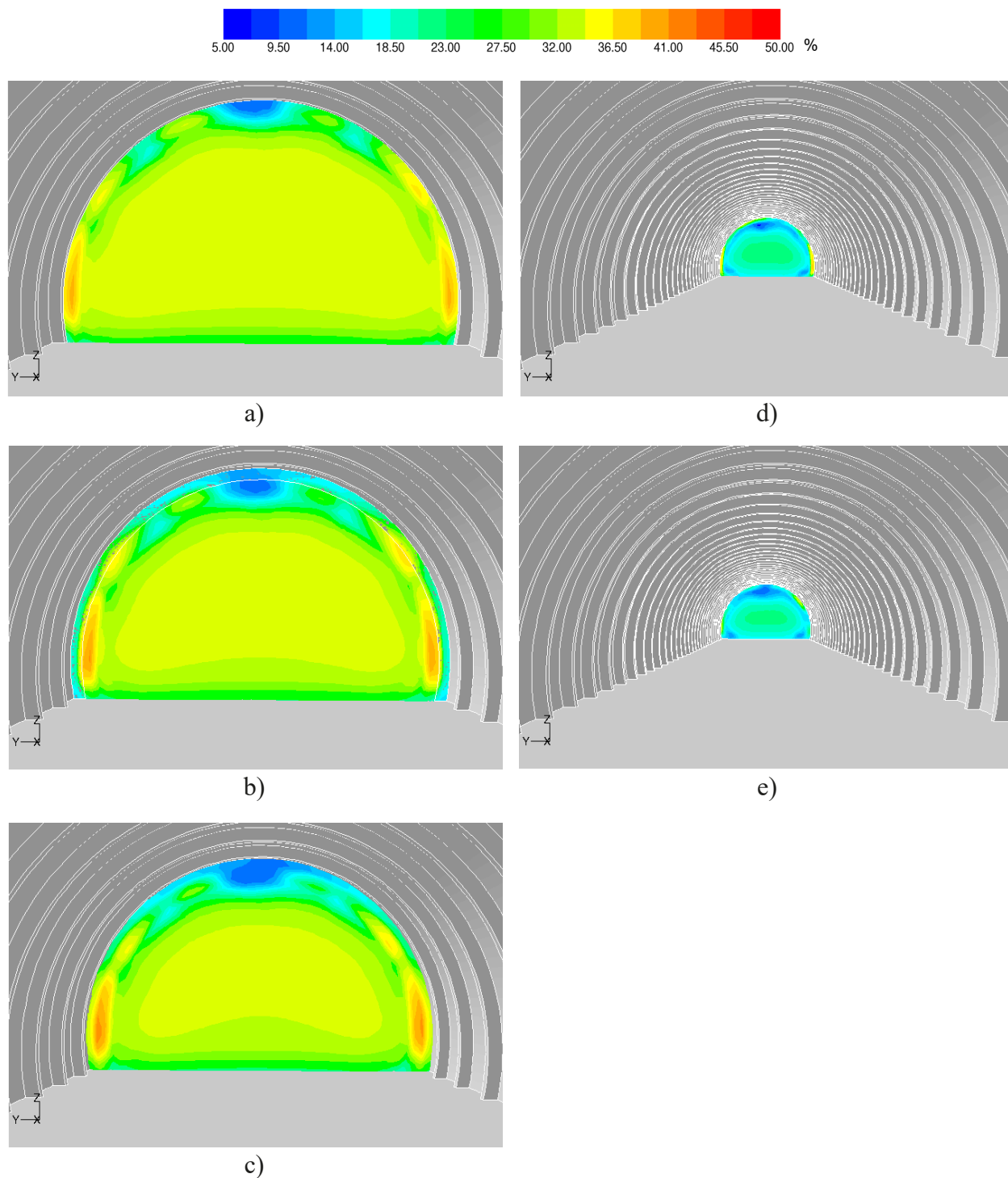
Rys. 11. Zmiana kształtu profili prędkości w funkcji odległości od przekroju wlotowego

6. Analiza uzyskanych wyników

Zaprezentowane powyżej wartości prędkości, intensywności turbulencji oraz wartości wektora wirowości w poszczególnych przekrojach omawianego wyrobiska wskazują na szereg zjawisk interesujących w aspekcie pomiarowym.

Zasięg strefy rozwoju turbulentnego profilu prędkości jest bardzo duży. Jak wynika z analiz powyższych rysunków sięga aż do 14 metra od przekroju wlotowego. Jeżeli za wymiar charakterystyczny przyjmie średnicę hydrauliczną D_h zdefiniowana jako:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (19)$$



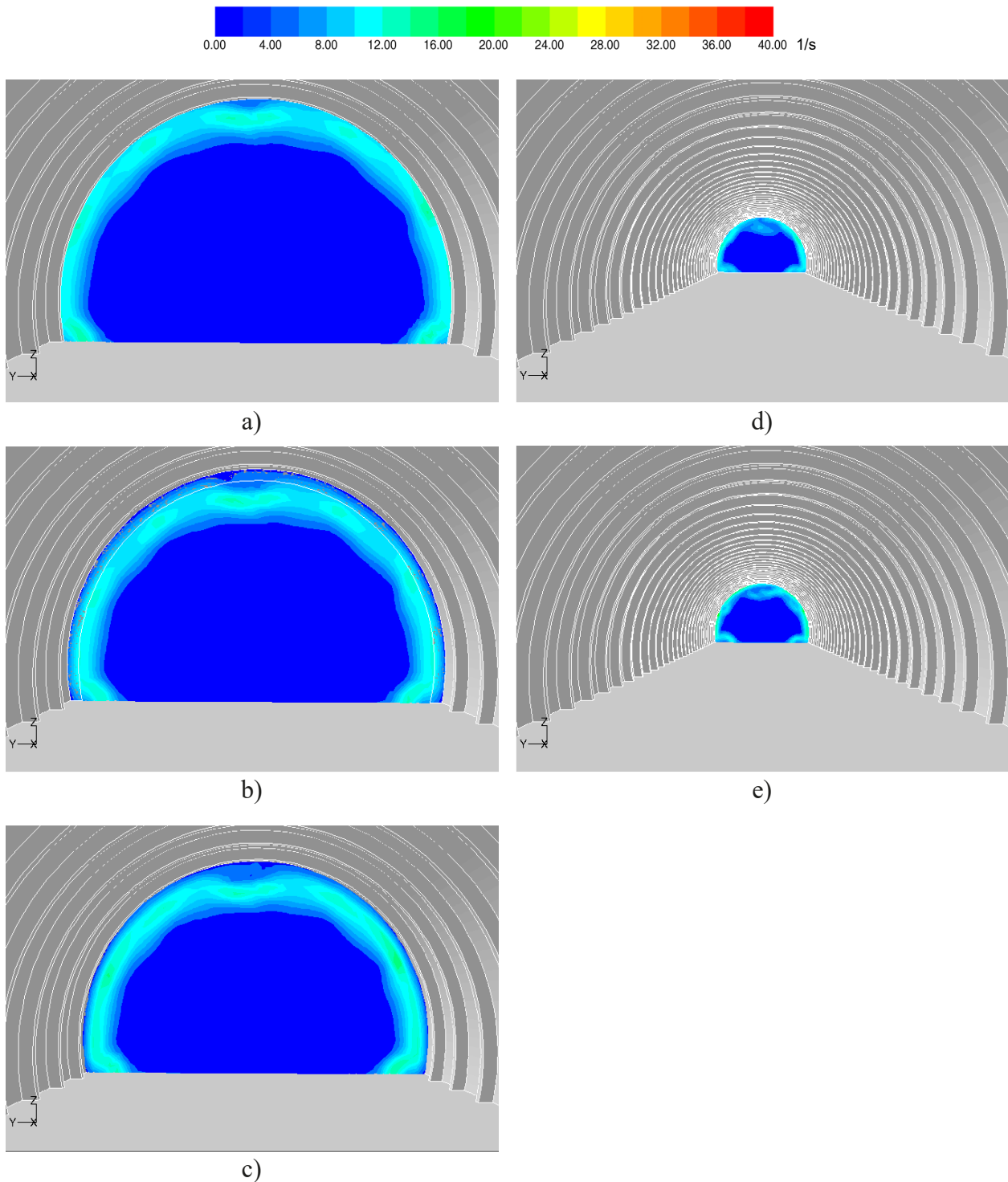
Rys. 12. Zmiana wartości intensywności turbulencji w funkcji odległości od przekroju wlotowego

gdzie:

A – pole powierzchni przekroju poprzecznego

P – obwód „zwilżony”, w przypadku omawianego przykładu równy całkowitemu obwodowi przekroju wyrobiska,

to zasięg strefy wpływu przekroju wlotowego, dla jego pola powierzchni $A = 12 \text{ m}^2$ można określić jako $L_{\min} = 1.67 D_h$. Wartość 14 m jest wielkością minimalną, w praktyce (Roszczyński i in.) podaje się wartość $L_{\min} = 6-20 D_h$, jednak w warunkach górniczych może być to trudne do osiągnięcia z uwagi na nierzadko krótsze odcinki wyrobisk o dużej wartości średnicy hydraulicznej w których należy wykonać pomiar. Poniżej, na Rys. 14A i 14B dodatkowo zamieszczono trójwymiarowe izopowierzchnie trzech prędkości – 1, 3 i 5 m/s.

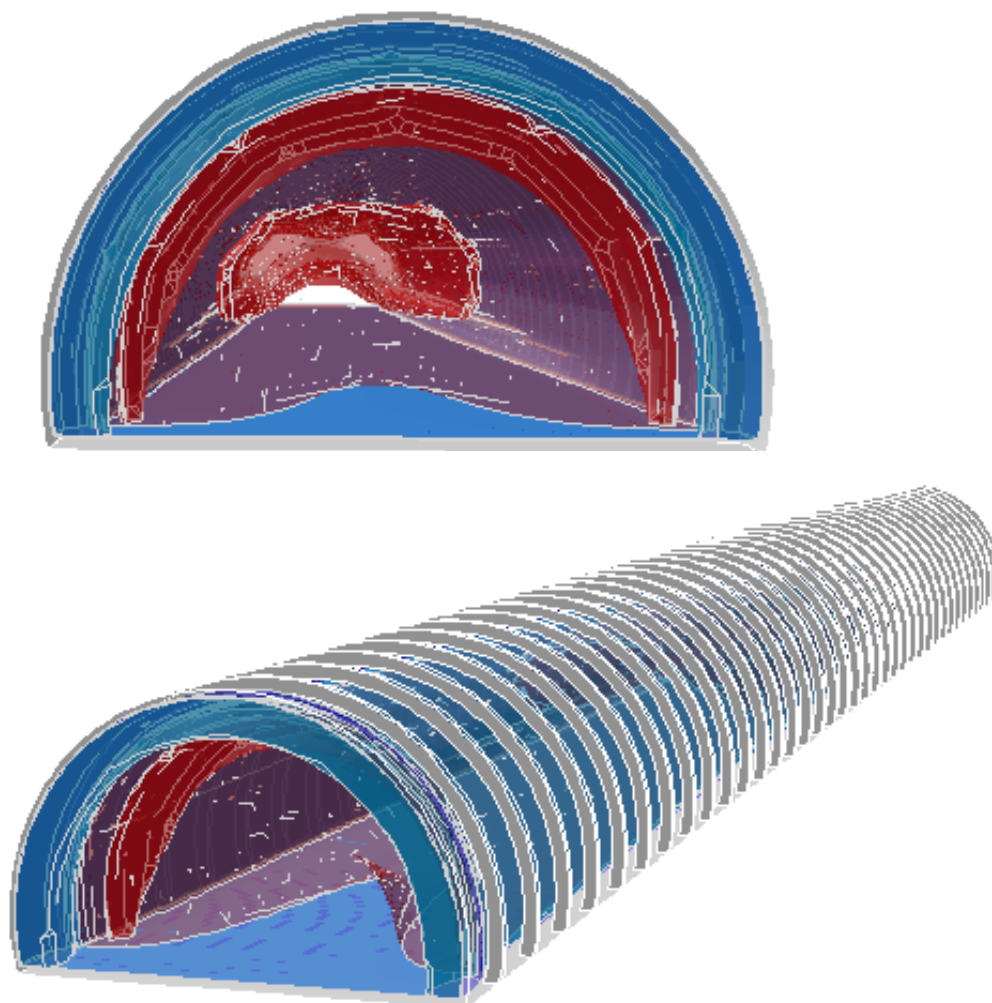


Rys. 13. Zmiana wartości wektora wirowości w funkcji odległości od przekroju wlotowego

Kształt przedstawionych izopowierzchni wskazuje zasięg strefy rozwoju rdzenia potencjalnego. Rozwój oraz zmiana wartości intensywności turbulencji, która ma duży wpływ na błąd pomiaru pola prędkości w przekroju zaprezentowana została na Rys. 12. Wartości intensywności turbulencji wykazują duży rozrzut – $T = 5-50\%$. Przyczyną tego jest sposób wyznaczania tej wielkości w programie FLUENT.

Przyjmuje się, że intensywność turbulencji zdefiniowana jest jako:

$$T = \sqrt{\frac{1}{3}(T_1^2 + T_2^2 + T_3^2)} \quad (20)$$



Rys. 14. Trójwymiarowe izopowierzenie trzech prędkości – 1, 2 i 5 m/s

gdzie wyrażenia T_i ; $i = 1, 2, 3$ oznaczają turbulencje podłużną, T_1 oraz dwie składowe poprzeczne. Z kolei wartość poszczególnych składowych wyznacza się zgodnie z:

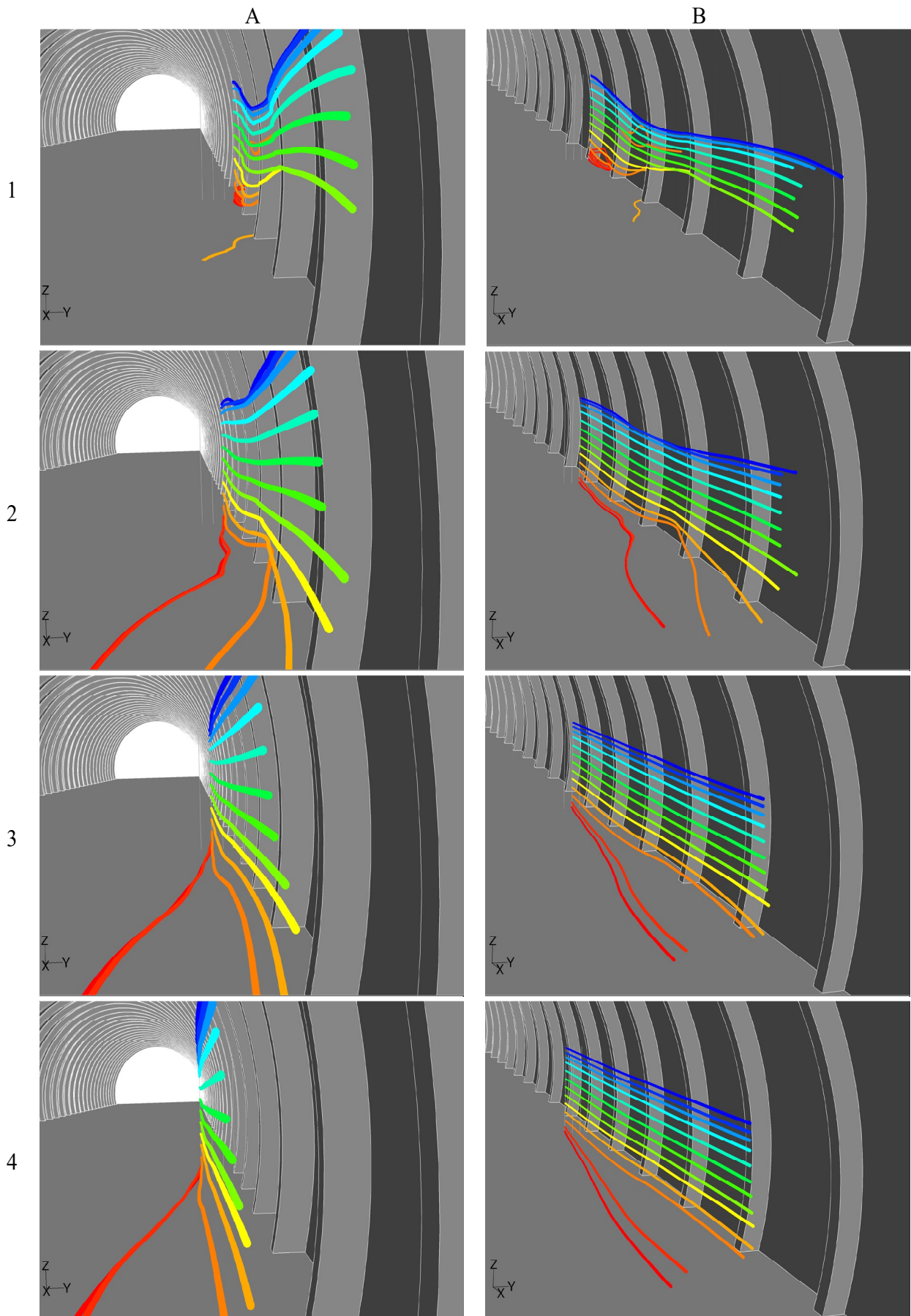
$$T_i = \frac{\sigma}{u_i} \quad (21)$$

gdzie:

- σ_i – oznacza odchylenie standardowe fluktuacji i -tej składowej wektora prędkości,
- u_i – wartość i -tej składowej.

Zagadnienie polega na odpowiednim doborze wartości prędkości normalizującej u_i . Domyślnie zaimplementowane w programie FLUENT procedury przyjmują wartość tej prędkości w punkcie, to znaczy, że istnieje możliwość wystąpienia w przepływie obszaru, dla którego intensywność turbulencji przekroczy wartość 100%. Stanie się to wówczas, gdy wartość prędkości normalizującej będzie mniejsza od wartości odchylenia standardowego fluktuacji tej prędkości. Z jednej strony tego typu zjawisko jest niepożądane, ale z drugiej dzięki temu sposobowi normalizacji można łatwiej analizować rozkłady pól turbulentnych.

W omawianym przypadku wyraźny rozkład pól intensywności turbulencji był pożądanym z uwagi na możliwość oceny ich potencjalnego wpływu na charakter przepływu. Analizując rozkłady T (Rys. 12) można wyróżnić charakterystyczne obszary przepływu. W pobliżu ociosów dodatkowo wzmocnionych obudową łukową wartość T wzrasta z powodu lokalnych separacji warstwy przyściennej tworzącej się na łuku obudowy. Zjawisko to jest szczególnie wyraźne w początkowych przekrojach wyrobiska (Rys. 12a-12c). Wraz ze wzrostem odległości od przekroju wlotowego zjawisko to zanika, przenosząc się bliżej strefy rdzenia potencjalnego (Rys. 12d i 12e). Ponadto w ostatnich przekrojach wyrobiska można wyróżnić strefy, w których



Rys. 15. Linie prądu dla 4 linii sondowania w pobliżu ociosu

intensywność turbulencji $T \leq 5\%$, co może być spowodowane specyficznym ukształtowaniem ociosów jak również charakterystycznym kształtem przekroju poprzecznego.

Dodatkowe informacje umożliwiające lepszą interpretację uzyskanych wyników dostarczają pola wartości wektora wirowości obecnego w omawianym przepływie. Rys. 13 zawiera rozkłady wartości wirowości w kolejnych przekrojach wyrobiska. Na uwagę zasługuje fakt, że zasadniczo w całej domenie obliczeniowej wartość oraz zasięg występowania pola wirowości jest stały. Ma to bezpośredni związek z kształtem i rozmieszczeniem poszczególnych segmentów obudowy łukowej. W najbardziej oddalonych przekrojach, tam gdzie wpływ wlotu jest najmniejszy, zauważalny jest tzw. „efekt blokowania” polegający na zauważalnym zmniejszeniu konwekcyjnej wymiany masy. W celu lepszej ilustracji tego zjawiska na Rys. 15. zamieszczono przebieg linii prądu dla 4 linii sondowania umieszczonych w przekroju oddalonym od wlotu o 20 m. Linie sondowania, każda o długości 1 m zostały rozmieszczone w odległości odpowiednio 10, 20 30 i 40 cm od ociosu. W celu lepszej interpretacji Rys. 14 zawiera po dwa widoki A i B z każdego przypadku. Kolory linii prądu mają na celu łatwiejszą ich identyfikację.

7. Konkluzje

W aspekcie uzyskanych wyników analiz numerycznych oraz porównań z przeprowadzonymi pomiarami w wyrobisku górniczym można sformułować następujące wnioski:

- 1) Przepływ powietrza w wyrobisku górniczym głównie z uwagi na jego gabaryty jest zawsze turbulentny. Niezależnie od wartości prędkości średniej, średnica hydrauliczna przekroju wyrobiska D_h jest na tyle duża, że wartość liczby Reynoldsa, definiowanej jako

$$Re = \frac{uD_h}{\nu}$$

gdzie u oznacza prędkość strugi powietrza, ν , jego lepkość, jest zawsze większa od kryterialnej wartości 2300 (2500). W związku z tym obliczenia numeryczne przepływu powietrza w wyrobisku górniczym musi się odbywać w oparciu o pewien model turbulencji.

Do wyboru pozostają modele z grupy RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), ponieważ bardziej zaawansowane modele typu LES (*Large Eddy Simulation*) wymagają innych technik pomiarowych do celów weryfikacyjnych, w których hipotezy o stacjonarności i ergodyczności procesów nie mogą być stosowane.

Najefektywniejszym modelem okazał się być model $k-\varepsilon$ (jego rozszerzenie *Realizable- $k-\varepsilon$*) z uwagi na dużą szybkość uzyskiwania wyników – szybka zbieżność oraz możliwość stosowania odmiennej niż standardowa funkcji ściany.

- 2) Wyznaczanie parametrów przepływowych w wyrobisku górniczym oparte na modelowaniu wartości k oraz ε w warstwie przyściennej (tzw *near-wall approach*) dla tak rozległej domeny obliczeniowej jaką jest wyrobisko górnicze jest niezwykle czasochłonnym i energochłonnym procesem, w większości przypadków niemożliwym do realizacji z uwagi na duże różnice w skalach przepływów. Ponieważ warstwa przyścienna występująca w przepływie powietrza przez wyrobisko górnicze różni się w sposób zasadniczy od klasycznej warstwy przyściennej występującej w przewodach hydraulicznie gładkich, podczas obliczeń numerycznych należy wziąć to pod uwagę i stosować bardziej wyrafinowane modele obszaru przyściennego, jak również funkcji ściany. Najkorzystniejszym w aspekcie uzyskanych wyników porównawczych (Rys.4.7) wydaje się być *model rozszerzony*, w którym funkcja ściany opisywana jest zestawem równań (15) oraz (16).
- 3) Stałe, wykorzystywane w półempirycznym modelu transportu wielkości turbulentnych ($k-\varepsilon$), pochodzą z pomiarów eksperymentalnych. Wydaje się być interesującym zagadnienie oszacowania ich wartości dla przepływów w wyrobiskach kopalnianych. Szczególnie istotne mogłoby być wyznaczenie wartości stałej C_{μ} , jako tej, która występuje w większości zależności w tym modelu, a więc ma największy wpływ na wartość lepkości turbulentnej μ_t . Do tego celu jednakże konieczna jest stworzenie aparatury pomiarowej, dzięki której byłoby możliwe wyznaczenie bardziej zaawansowanych wielkości przepływowych (korelacje punktowe, czasowe itp.)
- 4) Dysponując sondą termoanemometryczną umożliwiającą pomiar fluktuacji składowych wektora prędkości w warunkach górniczych można zmierzyć wartość energii kinetycznej turbulencji przypadającej na jednostkę masy przepływającego płynu. W związku z tym występująca we wzorach (2) i (3)

wielkość k_p mogłaby zostać wyznaczona z pomiarów. Tego typu wiedza byłaby szczególnie przydatna w procesie porównawczo-weryfikacyjnym analiz numerycznych.

- 5) Zastosowanie zintegrowanych głowic termooanemometrycznych do pomiarów prędkości w przekroju wyrobiska górniczego umożliwiło dokonanie procesu kalibracji rozwiązania numerycznego w zakresie stosowanego modelu warstwy przyściennej. Dalszym celem Autorów jest ulepszenie konstrukcji czujnika, tak aby możliwy był pomiar wielkości, których stałe czasowe są niższe od stałych czasowych stosowanych na chwilę obecną elementów aktywnych. Przykładem może być rozkład pola wirowości, której wartość wynosi średnio około 12 1/s, a więc poza zakresem pomiarowym czujników, które umożliwiają efektywny pomiar z częstotliwościami $f < 10\text{Hz}$.
- 6) Należy również zwrócić uwagę na różnice geometryczne w budowie w modelu numerycznego i rzeczywistego wyrobiska górniczego. Nie jest możliwe zaprojektowanie geometrii, która byłaby identyczna z rzeczywistością. Na przeszkodzie stoją przede wszystkim możliwości sprzętowe stosowanych współcześnie komputerów, jak i zbyt wielkie różnice w skalach długości uniemożliwiające przeprowadzenie symulacji numerycznej.
Stąd też Autorzy wskazują na konieczność wykonywania w dalszym ciągu szeregu pomiarów *in situ*, których celem ma być budowa bazy danych przypadków przepływowych mających miejsce w kopalnianych wyrobiskach, która w późniejszym okresie, po wykonaniu pewnych obliczeń statystycznych umożliwiłaby pełniejszą weryfikację analiz numerycznych.
- 7) Przedstawione wyniki symulacji numerycznych są istotne w aspekcie poprawności wykonywania pomiarów wentylacyjnych w kopalniach głębinowych. Źle wybrane miejsce pomiaru lub niedokładny pomiar w obrębie zmiennych pól prędkości może wnieść błędną informację co do wartości objętościowego strumienia przepływającego powietrza a co jest z tym związane może doprowadzić do powstania stanów awaryjnych.
- 8) Stosowanie analiz numerycznych w zagadnieniach związanych z przepływem powietrza w wyrobiskach górniczych powinno pomagać w ocenie warunków panujących w wyrobisku. W zastosowaniach górniczych szczególnie istotnym elementem jest czas otrzymania odpowiedzi na postawione pytanie. Czynniki mające wpływ na zjawiska przepływowe występujące w wyrobiskach górniczych są na tyle dynamiczne, że w obliczeniach zachodzi konieczność stosowania możliwie prostych i uniwersalnych, aczkolwiek zweryfikowanych modeli do wyznaczania interesujących parametrów.

Podziękowania: Rezultaty prac przedstawione w artykule stanowią wyniki realizacji Projektu Badawczego 4 T12A 008 30, artykuł opracowano w celach dokumentacyjnych w ramach Prac Statutowych 2025 Instytutu Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w Krakowie.

Literatura

- [1] Roszczynialski W., Trutwin W., Waclawik J., *Kopalniane pomiary wentylacyjne*. wyd. „Śląsk”, Katowice 1992.
- [2] Kruczkowski J., *Wpływ własności dynamicznych czujnika anemometru skrzydełkowego na dokładność pomiaru prędkości przepływu powietrza w wyrobisku kopalnianym*. Praca doktorska IMG PAN Kraków, 1999.
- [3] Ligęza P., *Układy termooanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, Rozprawy, Monografie nr 98, Kraków 2001.
- [4] Ligęza P., Poleszczyk E., *Badanie właściwości cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych w aspekcie konstrukcji sondy do wyznaczania wektora prędkości przepływu w warunkach kopalnianych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2007.
- [5] Ligęza P., Poleszczyk E., *Hybrydowy termooanemometryczny system pomiaru składowych wektora prędkości przepływu powietrza w wyrobisku górniczym*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2007.
- [6] Poleszczyk E., *Termooanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości*. Monografie Rozprawy, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2002.
- [7] Błocki J., Godlewski J., Pakoński K., *Gas Cooling for Silicon Strip Detectors*. Nuclear Instruments and Methods, 1993.
- [8] Bremhorst K., Graham L.J.W., *A fully compensated hot/cold wire anemometer system for unsteady flow velocity and temperature measurement*. Meas. Sci. Technol. 425-430, 1990.
- [9] Bruun H.H., *Hot-wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*. University Pres, Oxford, 1995.

- [10] Drubka R.E., Tan-atchat J., Nagib H.M., *Analysis of Temperature Compensating Circuits for Hot-wires and Hot-films*; DISA Info. 5-14, 1977.
- [11] Elsner J., Drobnik St., *Metrologia turbulencji przepływów*. Ossolineum, Wrocław, 1995.
- [12] Ligęza P., Sitko S.J., *Problem kompensacji temperaturowej i linearyzacji w anemometrze stalotemperaturowym*. Metrologia i Systemy Pomiarowe nr 9, 1991.
- [13] Ligęza P., *Thermoanemometric method for measuring velocity and temperature in non-isothermal flows*. Archives of Mining Sciences nr 3, 1994.
- [14] Ligęza P., *Sposób kompensacji temperaturowej mostkowego termoanemometru stalotemperaturowego oraz mostkowy termoanemometr stalotemperaturowy skompensowany temperaturowo*. Patent PL 175092 B1, Warszawa, 1994.
- [15] Ligęza P., *High – precision CTA*. MST News, 4, 1997.
- [16] Ligęza P., *A modified temperature-compensation circuit for CTA*. Measurement Science and Technology, 9, 1998.
- [17] Ligęza P., *A four-point constant-current/temperature controlled circuit for anemometric applications*. Review of Scientific Instruments, 1, 2000.
- [18] Ligęza P., Poleszczyk E., *Termoanemometryczne metody pomiaru prędkości – aparatura pomiarowa w kopalni*. Archives of Mining Sciences, Vol. 49, Special Issue, 2004.
- [19] Ligęza P., Poleszczyk E., *Charakterystyki metrologiczne cienkowarstwowych sensorów platynowych w zastosowaniu do wielopunktowych pomiarów pola prędkości przepływu*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, nr 3-4, 2004.
- [20] Ligęza P., Poleszczyk E., *Koncepcja i badania modelowe sondy do wielopunktowych pomiarów pola prędkości*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, nr 3-4, 2004.
- [21] Ligęza P., Poleszczyk E., *Sonda termoanemometryczna do wielopunktowych pomiarów pola prędkości*. Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, nr 8, 2005.
- [22] Ligęza P., Poleszczyk E., *Multipoint measurements of flow velocity fields*. Archives of Mining Sciences, Vol. 50, 2005.
- [23] Dziurzyński W., Trutwin W., Cierniak W., *Stany nieustalone w kopalnianych sieciach wentylacyjnych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Kraków, 1996.
- [24] Lomas C.G., *Fundamentals of hot wire anemometry*. Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- [25] Sakao F., *Constant temperature hot wires for determining velocity fluctuations in an air flow accompanied by temperature fluctuations*; J. Phys. E: Sci. Instrum. 913-916, 1973.
- [26] Skotniczny P., *Rozwój strugi powietrza w dyfuzorze prostokątnym*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, Seria: Monografie Rozprawy, Monografia nr 8, 2005.
- [27] Skotniczny P., *Symulacja przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych*. Przegląd Górniczy, 2004.
- [28] Elsner J.W., *Turbulencja przepływów*. PWN Warszawa 1985.
- [29] Ligęza P., Poleszczyk E., Skotniczny P., *Measurements of Velocity Profile in Heading with the Use of Integrated Hot-Wire Anemometric System*. Archives of Mining Sciences, Vol. 53, 2008.
- [30] Szymkat M., *Komputerowe wspomaganie w projektowaniu układów regulacji*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; Warszawa, 1993.
- [31] Waluś St., *Optymalizacja metrologiczna pomiaru strumienia płynu za pomocą przepływomierzy próbkujących*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia, Gliwice, 2003.
- [32] Wala M.A., Jacob J.D. et al., *How scrubbers help ventilate the face during deep cut mining with a blowing curtain*. Proceedings :10-th U.S. Mine Ventilation Symposium / North American, Anchorage, AL, May 2004.
- [33] Branny M., Filipek W., *Numerical simulation of ventilation of blind drifts with a force-exhaust overlap system in condition of methane and dust hazards*. Archives of Mining Science vol. 53, 2, Kraków 2008.
- [34] Fluent Inc. *User manual*. 2005.

Application of the thermal anemometric airflow velocity measurement method in underground mining

Part 6 – Application of in situ measurement results in modeling air flow in a mine working

Abstract

Analysis and measurements of ventilation networks are an important element in examining the condition and course of mine ventilation. The efficiency and reliability of the ventilation network system influences the mining

process and work safety in the mine. This article presents the concept and prototype of a thermal anemometric measurement system for multi-point velocity field measurements. The system is based on sensors integrated with a signal processing system. An array of such sensors, distributed throughout the examined excavation cross-section, cooperates with a portable, computer-based data acquisition system. This enables simultaneous, multi-point measurement of flow velocity within the examined cross-section. The sensors utilize a unique measurement system based on a modification of a constant-temperature bridge system with temperature compensation. This system is the subject of the authors' patent. The developed measurement system was used to verify computer simulations of air flows in selected areas of mining excavations. This part of the publication series presents application of in situ measurement results in modeling air flow in a mine working.

Keywords: Mine ventilation; ventilation network measurements; measurement systems; thermal anemometry; temperature compensation; computer simulations