

*Marian Branny, Wiktor Filipek, Michał Karch**

ANALIZA POLA PRĘDKOŚCI W WYROBISKACH PRZEWIETRZANYCH PRZEZ DYFUZJĘ**

1. Wstęp

Rozważa się proces przewietrzania krótkiego wyrobiska ślepego realizowany wyłącznie pod wpływem działania wentylatorów głównych. W terminologii górniczej ten rodzaj wentylacji nosi nazwę przewietrzania przez dyfuzję. Jest oczywiste, że wewnątrz wyrobiska występuje również ruch ośrodka gazowego, o określonym, najczęściej turbulentnym polu prędkości liniowej. Transport składników gazowych wewnątrz ruchomej mieszaniny gazowej odbywa się za pośrednictwem dyfuzji oraz konwekcji i pozostaje w ścisłej współzależności z polem prędkości.

Według przepisów w polach niemetanowych i I kategorii zagrożenia metanowego wyrobiska mogą być przewietrzane przez dyfuzję, jeżeli ich długość nie jest większa niż 10 m przy nachyleniu do 10° po wzniosie i upadzie.

W Południowej Afryce prowadzono badania skuteczności przewietrzania przez dyfuzję wyrobisk w systemie komorowo-filarowym [5]. Pomiarami objęto wyrobiska ślepe (komory) charakteryzujące się różną długością i wysokością. Analizowano obrazy pól prędkości w komorach przy prędkościach przepływu w opływowym prądzie powietrza wynoszące od 0,65 m/s do 2,1 m/s. Stwierdzono, że zarówno prędkość przepływu w opływowym prądzie powietrza, jak i wysokość komory ma wpływ na zasięg oddziaływania strumienia generowanego w wyrobisku ślepym – charakterystyczne wyniki dla komory o długości 20 m zamieszczono w tabeli 1.

Maksymalny zasięg oddziaływania strumienia uzyskano przy wysokości komory 3 m i prędkości przepływu w prądzie opływowym wynoszącym około 1,4 m/s. Interesująca jest tutaj informacja, że zarówno przy większych, jak i mniejszych od 1,4 m/s prędkościach przepływu zasięg oddziaływania strumienia maleje.

W artykule podjęto próbę numerycznego odwzorowania pola prędkości w wyrobisku ślepym przewietrzanym przez dyfuzję o wymiarach identycznych z badanymi w pracy [5].

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, AGH, Kraków.

** Pracę wykonano w ramach Prac Statutowych nr 11.11.100.281.

W symulacji wykorzystano technikę bazującą na metodach CFD polegającą na numerycznym rozwiązywaniu pełnego układu równań mechaniki płynów. Przyjęto, że równaniami domykającymi ten układ są równania modelu turbulencji k-ε. Model k-ε jest często stosowany przy rozwiązywaniu zagadnień przepływowych, zaś w zastosowaniach do problematyki górniczej przy rozwiązywaniu lokalnych zadań wentylacji kopalń, takich jak: przewietrzanie ścian czy przodków wyrobisk ślepych [1, 3, 4, 6]. Istotnym kryterium przydatności danego modelu numerycznego jest dokładność, z jaką wyniki obliczeń numerycznych odwzorowują rzeczywistość. Zamieszczone w pracy [5] pomiary nie umożliwiają przeprowadzenie pełnej walidacji modelu, jednak mogą służyć do jakościowej oceny otrzymanych obrazów pól prędkości.

TABELA 1

Wyniki pomiarów dla komory o długości 20 m [5]

Średnia prędkość przepływu powietrza w prądzie opływowym m/s	Zasięg oddziaływania strumienia [m]		
	Wysokość komory 4,0 m	Wysokość komory 3,0 m	Wysokość komory 2,1 m
2,1	9,0	12,4	12,0
1,35	11,3	16,8	16,0
1,0	10,2	15,8	15,8
0,65	8,0	12,2	12,2

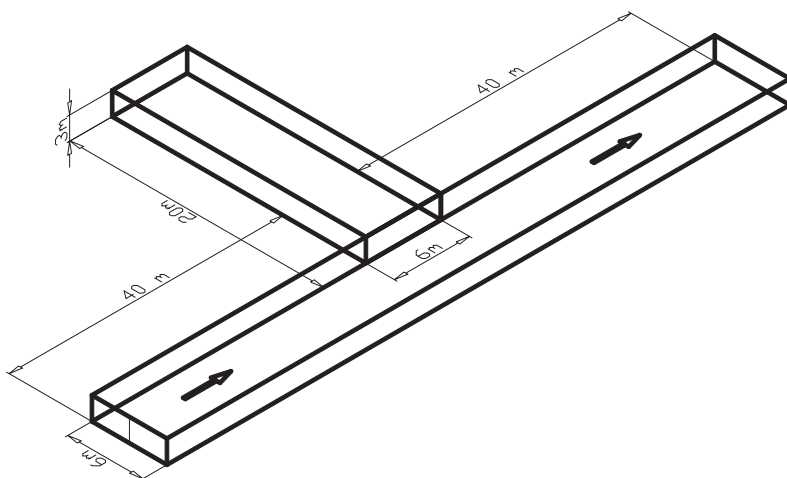
2. Testowane modele turbulencji

W pracy testowano dwa modele turbulencji: standardowy k-ε i jego modyfikację model RNG k-ε. Dwurównaniowy model k- jest najczęściej stosowanym modelem turbulencji i najszerzej eksperymentalnie zweryfikowanym. [7]. Dobre rezultaty uzyskano, stosując ten model między innymi do przepływów w przewodach i przestrzeniach zamkniętych, w których naprężenia Reynoldsa są znaczące. Pięć stałych modelu wyznaczono eksperymentalnie, badając szeroki zakres przepływów turbulentnych, jednak dla geometrycznie prostych przepływów. Przyjęcie stałych wartości dla współczynników jest z jednej strony zaletą modelu, ponieważ wpływa na szybkość zbieżności procesu iteracyjnego, a więc na czas obliczeń, zaś z drugiej jedną z przyczyn niezadawalających wyników w przypadku niektórych przepływów. W tym kontekście można wymienić modelowanie turbulentnej strugi swobodnej czy przepływ w kanale z uskokiem. Standardowy model k-ε zastosowany do takich przepływów przeszacowuje wartości kinetycznej energii turbulencji, jak i jej dyssypacji, a w konsekwencji wartości współczynnika lepkości turbulentnej, co jest uważane za jedną z przyczyn odnotowanych różnic między mierzonymi i obliczonymi wielkościami [7]. Standardowy model k-ε stosowany jest w przepływach charakteryzujących się dużymi liczbami Reynoldsa. Jego modyfikacją uwzględniającą również przepływy z małymi liczbami Re jest model turbulencji RNG k-ε. Podstawowe różnice polegają na uwzględnieniu w równaniu transportu dla kinetycznej energii turbulencji członu źródłowe-

go, który opisuje efekty związane z dużymi zmianami szybkości odkształcenia postacowego oraz znacznymi krzywiznami linii prądu, jak i wprowadzeniu analitycznie wyprowadzonego wzoru na wyznaczanie współczynnika lepkości efektywnej i turbulentnej liczby Prandtla. Wykorzystanie tych własności związane jest z odpowiednim modelowaniem przepływu w pobliżu ścian sztywnych. W założeniach model RNG k- ϵ obejmuje szerszy zakres zagadnień przepływowych niż model k- ϵ , jednak ilość udokumentowanych jego walidacji jest znacznie mniejsza niż modelu standardowego k- ϵ [2].

3. Obszar przepływu

Obszar przepływu przedstawia rysunek 1. Długość wyrobiska z opływowym prądem powietrza, po stronie dopływu, wynosi 40 m i pełni rolę odcinka początkowego. Na tej długości zadany na wlocie jednorodny rozkład prędkości jest już w pełni uformowany. W niektórych pracach można spotkać sugestię, że przy dokładnych obliczeniach długość odcinka początkowego powinna być wielokrotnością 30–40 średnic hydraulicznych, czyli co najmniej trzykrotnie dłuższa od przyjętego, jednak obliczenia sprawdzające nie wykazały potrzeby zwiększania tego wymiaru. Podobne obliczenia testowe wykonano dla odcinka wyrobiska z wylotowym prądem powietrza. Szerokość zarówno chodnika, jak i komory wynosi 6 m zaś ich wysokość 3 m.



Rys. 1. Obszar przepływu

4. Warunki brzegowe

Przyjmuje się, że przepływ powietrza jest ustalony i nieściśliwy oraz geometrycznie 3D. Model matematyczny złożony jest z równań ciągłości, Naviera-Stokesa oraz równań odpowiedniego modelu turbulencji: standardowego k- ϵ lub RNG k- ϵ . W przekroju otworu

wlotowego przyjmowano stałą prędkość przepływu, zaś na brzegu wylotowym założono tzw. warunki ciśnieniowe, co oznacza wyrównanie ciśnień w przekroju otworu wylotowego oraz przyjęcie zerowych wartości pochodnych pozostałych wielkości w kierunku przepływu. Warunki brzegowe na ścianach sztywnych przyjmowano w postaci funkcji ściany. Wpływ chropowatości ścian wyrobiska na uzyskiwane rozkłady prędkości kalibrowano poprzez przyjmowanie różnych wymiarów liniowych nierówności powierzchni ograniczających przepływ i ich porównanie z obrazami przepływu zamieszczonymi w [5].

Z uwagi na spodziewany ruch powietrza w komorze, charakteryzujący się małymi liczbami Reynoldsa, testowano również inną metodę modelowania przepływu w pobliżu ścian wyrobiska polegającą na połączeniu dwuwarstwowego modelu warstwy przyściennej z funkcją ściany – tzw. rozszerzona funkcja ściany (*Enhanced Wall Treatment* [2]). W dwuwarstwowym modelu warstwy przyściennej obszar dzieli się na dwa rejony. Podwarstwa lepka rozciąga się od ściany na odległość, przy której bezwymiarowa długość wynosi $y^+ \leq 30$. Wielkość y^+ definiuje się jako:

$$y^+ = y\rho u_\tau / \mu,$$

gdzie:

y — odległość w kierunku prostopadłym do ścian,

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}},$$

τ_w — naprężenie styczne na ścianie,

ρ — gęstość płynu,

μ — dynamiczny współczynnik lepkości molekularnej.

W podwarstwie lepkiej naprężenia styczne są efektem jedynie oddziaływań lepkich. Przyjmuje się, że poza tą warstwą przepływ jest turbulentny. Numeryczne rozwiązywanie dwuwarstwowego modelu wymaga stosowania odpowiednio zagęszczonej siatki w pobliżu ścian sztywnych. Zaleca się, by w podwarstwie lepkiej, jak i turbulentnej znajdowało się kilka węzłów – co najmniej 5–8 – zaś odległość węzłów bezpośrednio przylegających do ściany wynosiła $y^+ \approx 1$. Rozgraniczenie między warstwami zachodzi przy turbulentnej liczbie Reynoldsa, opartej o odległość od ściany równej 200. Turbulentną liczbę Reynoldsa definiuje się jako:

$$Re_t = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu},$$

gdzie k – kinetyczna energia turbulencji.

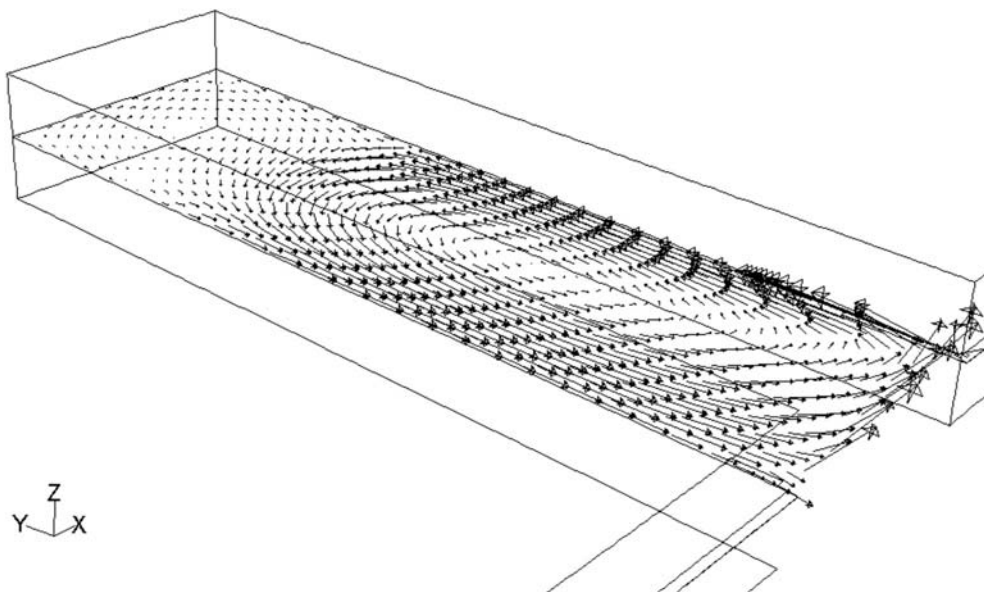
W obszarach przyściennych o gęstej sieci numerycznej, która umożliwi uwzględnienie podwarstwy lepkiej obliczenia realizowane są według klasycznego, dwuwarstwowego modelu warstwy przyściennej zaś przy siatce rozrzedzonej przy użyciu funkcji ściany [2, 7].

5. Symulacja numeryczna przepływu powietrza w komorze

O istotnym wpływie chropowatości wyrobiska na wygenerowane obrazy pola przepływu przekonują prezentowane na rysunkach 2, 3 i 4 pola prędkości. Wyniki te uzyskano przy użyciu modelu $k-\epsilon$ dla przyjętej wlocie prędkości przepływu wynoszącej 1,4 m/s oraz dla wysokości nierówności ścian wynoszącej 0 cm (przewód hydraulicznie gładki, rys. 3) oraz 4 cm (rys. 4). W przypadku ścian hydraulicznie gładkich obserwowany jest jeden obszar objęty przepływem recyrkulacyjnym sięgający czoła komory (rys. 5a), natomiast dla ścian chropowatych wyróżnić można dwa takie rejony (rys. 5b).

Z informacji zamieszczonych w [5] wynika, że przy średniej prędkości przepływu w chodniku z opływowym prądem powietrza wynoszącym 1,4 m/s, zasięg strumienia w wyrobisku ślepym wynosi 16,8 m i jakościowo odpowiada wynikom prezentowanym na rysunku 4.

W dalszych obliczeniach przyjęto, że wyrobiska charakteryzują się jednorodną chropowatością o wymiarze liniowym wynoszącym 4 cm. Autorzy pracy [3] proponują przyjmowanie tej wielkości na poziomie 5 cm.



Rys. 2. Obraz pola prędkości w komorze w płaszczyźnie symetrii

Najogólniej przepływ w wyrobisku ślepym można zobrazować kształtem cyfry 8. Struga powietrza skierowanego do czoła płynie wzdłuż ociosu przeciwnego do kierunku przepływu w wyrobisku z opływowym prądem powietrza, zaś wypływa po stronie ociosu

przeciwnego. Czoło przodka omywane jest strugą powietrza o kierunku zgodnym z kierunkiem przepływu w chodniku z prądem opływowym.

Z przedstawionych obrazów pól prędkości widać, że operowanie w takim przepływie pojęciem zasięgu oddziaływania strugi – rozumianym jako maksymalną odległość, przy której przepływ skierowany do czoła przodka zmienia kierunek na przeciwny – jest nieprecyzyjne.

Wygenerowany numerycznie obraz przepływu ma charakter trójwymiarowy. Stosunkowo dokładnie można tą odległość wyznaczyć dla pola prędkości zrzutowanego na płaszczyznę symetrii (rys. 4a), natomiast dla płaszczyzn równoległych do wymienionej, znajdujących się bliżej stropu bądź spągu określenie strefy oddziaływania strugi jest kwestią interpretacji i dla warunków z rysunku 4b można ją oszacować na około 15,5 m.

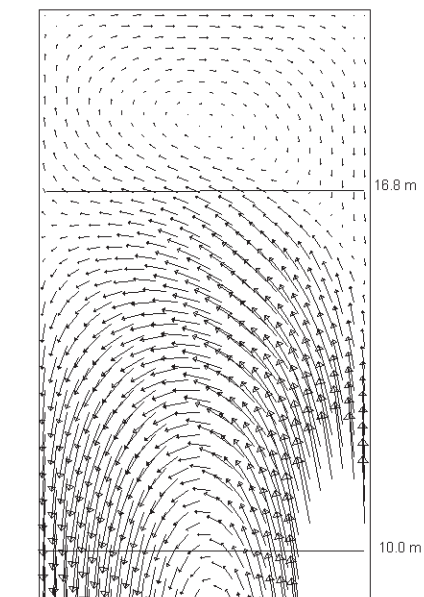
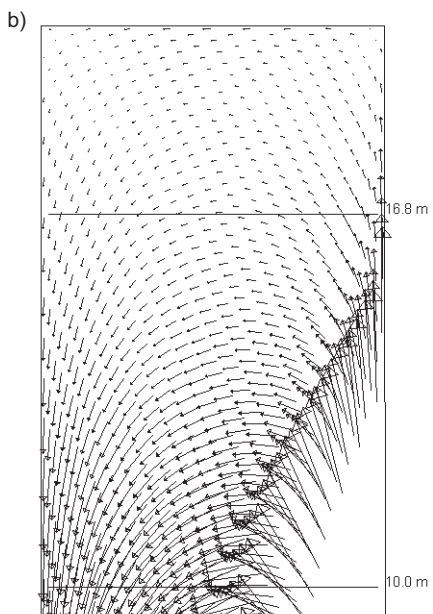
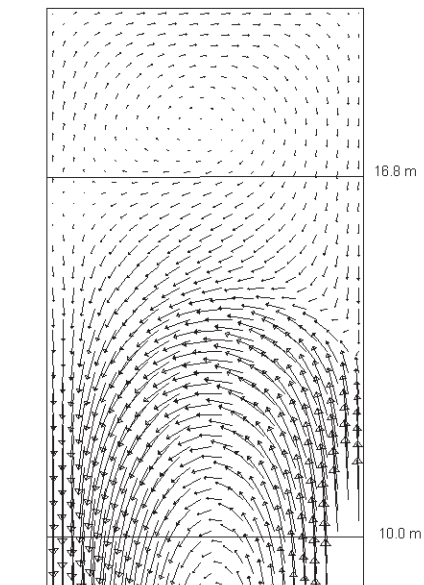
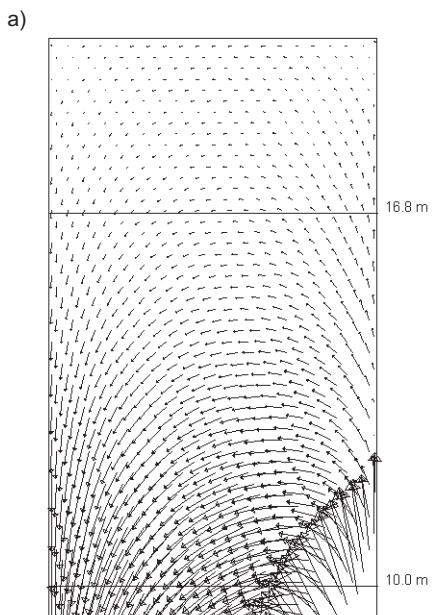
Przy użyciu modelu RNG $k-\epsilon$ uzyskuje się prawie identyczne obrazy przepływu, jak przy standardowym modelu $k-\epsilon$. W dotychczas prezentowanych obliczeniach do opisu warunków przyściennych stosowano funkcję ściany. Z uwagi na rodzaj rozważanego przepływu zasadne wydaje się pytanie o poprawność tak zadawanych warunków brzegowych w obszarach o małych liczbach Reynoldsa. W tym celu wykonano obliczenia, w których warstwę przyścienną modelowano przy pomocy rozszerzonej funkcji ściany.

Ze względu na wymagania dotyczące gęstości sieci numerycznej obliczenia wykonano dla przepływu 2D. Wybrane, charakterystyczne obrazy modułów prędkości w komorze, uzyskane przy średniej prędkości przepływu w prądzie opływowym wynoszącej 1,4 m/s i przy użyciu turbulentnych modeli $k-\epsilon$ i RNG $k-\epsilon$ oraz przy opisie przepływu w pobliżu ścian przy pomocy funkcji ściany, jak i dwuwarstwowego modelu warstwy przyściennej, przedstawiono na rysunku 6.

Jakościowo, prezentowane obrazy są niemal identyczne natomiast pod względem ilościowym rejestruje się niewielkie różnice, szczególnie widoczne w zakresie małych prędkości przepływu. W uzupełnieniu tych rozważań, na rysunku 7 przedstawiono rozkład turbulentnej liczby Reynoldsa z widocznym rejonem obejmującym subwarstwę lepłą, gdzie $Re_t < 200$ – białe pole wewnątrz konturu wyrobiska. Biorąc pod uwagę czas obliczeń związany z gęstością sieci numerycznej, można stwierdzić, że dla tego typu przepływu wystarczająco dokładne wyniki uzyskuje się przy modelowaniu warstwy przyściennej funkcją ściany.

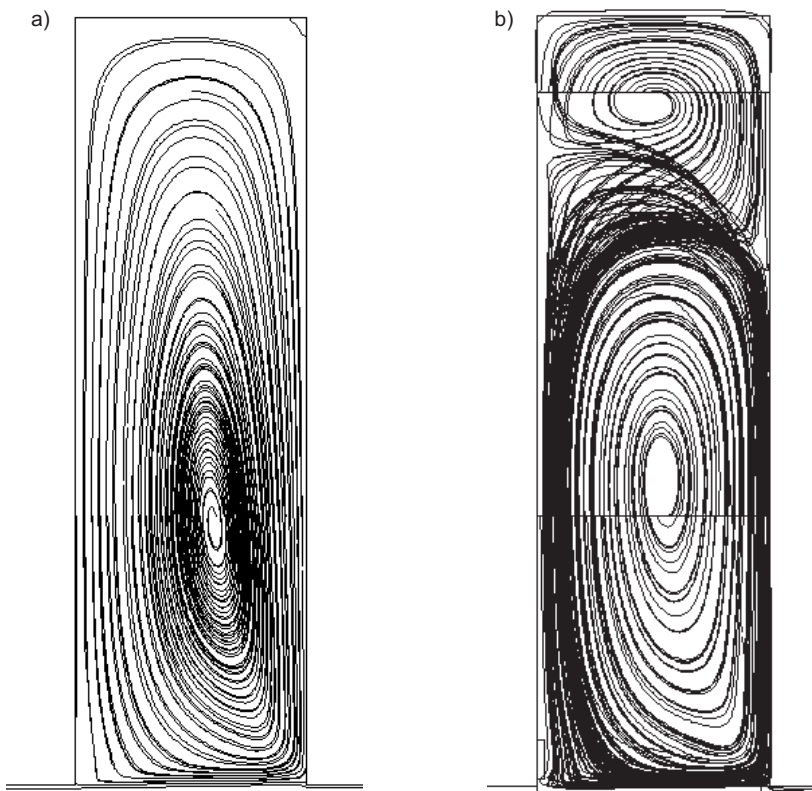
Wykonane obliczenia symulacyjne nie potwierdziły istotnego spostrzeżenia wynikającego z pracy [5] a mianowicie, że w badanym zakresie prędkości przepływu w prądzie opływowym wynoszącym od 0,65 m/s do 2,1 m/s maksymalny zasięg oddziaływania strugi powietrza w wyrobisku ślepych ma miejsce przy prędkości około 1,4 m/s i wynosi 16,8 m.

Natomiast przy prędkościach mniejszych (0,65 m/s), jak i większych (2,1 m/s) odległość ta była znacząco mniejsza i wynosiła odpowiednio 12,4 m i 12,2 m (tab. 1). Z obliczeń wykonanych w zakresie prędkości od 0,65 m/s do 2,1 m/s wynika, że zasięg oddziaływania strumienia w komorze zmienia się nieznacznie i we wszystkich rozważanych wariantach wynosi około 14,8 m (w płaszczyźnie symetrii wyrobiska ślepego). Natomiast wraz ze wzrostem prędkości średniej przepływu w prądzie opływowym, zwiększa się również prędkość przepływu w komorze co wpływa na intensyfikację procesu wentylacji wyrobiska ślepego (rys. 8).



Rys. 3. Pole prędkości przy założeniu hydraulicznie gładkich ścian:
a) w płaszczyźnie symetrii, b) w płaszczyźnie oddalonej od stropu/spągu o 0,25 m

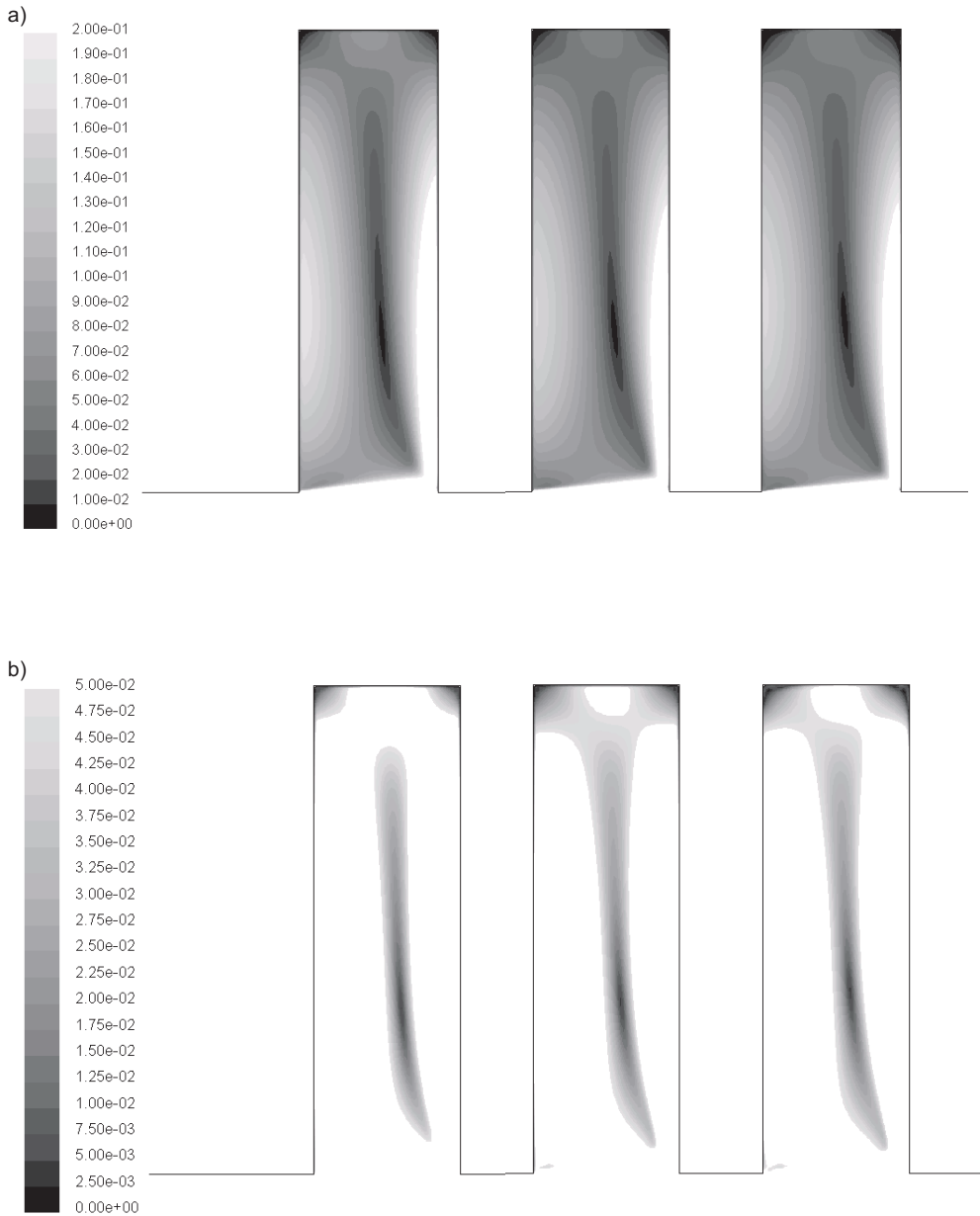
Rys. 4. Pole prędkości przy założeniu chropowatości ścian wynoszącej 4 cm:
a) w płaszczyźnie symetrii, b) w płaszczyźnie oddalonej od stropu/spągu o 0,25 m



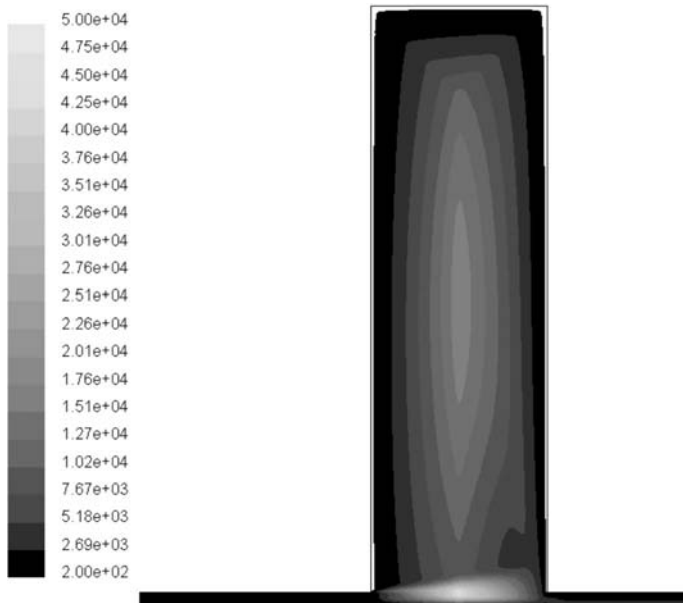
Rys. 5. Graficzna prezentacja przepływu przy pomocy linii prądu:
 a) ściany hydraulicznie gładkie,
 b) chropowatość ścian 4 cm

6. Podsumowanie

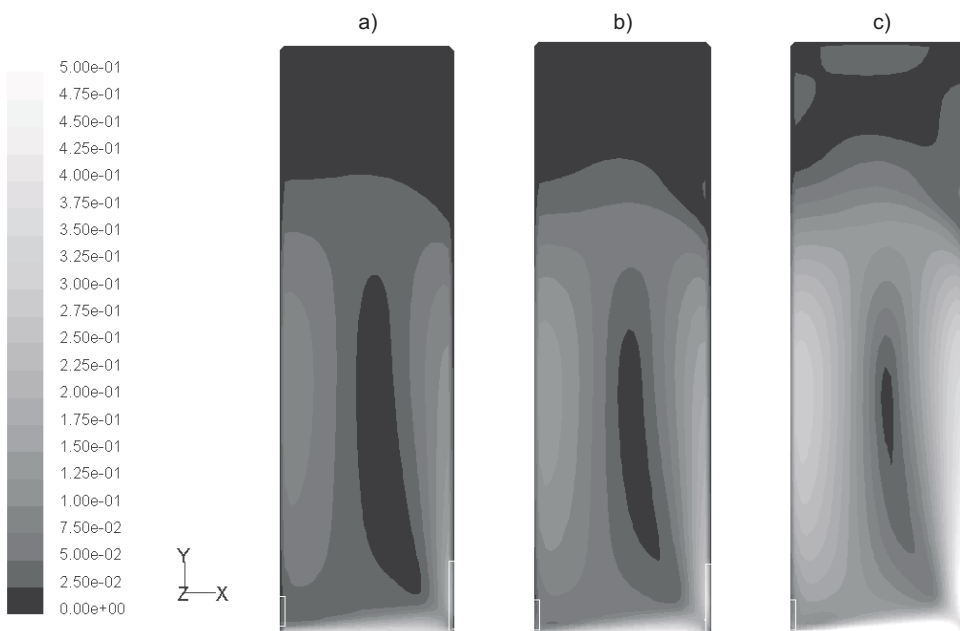
Fundamentalne znaczenie przy komputerowej symulacji zjawisk ma odpowiedź na pytanie, z jaką dokładnością odzwierciedlają one rzeczywistość. Wyniki numerycznej symulacji przepływu w wyrobisku ślepych są jakościowo zgodne z pomiarami, natomiast odnotowuje się różnice ilościowe takiej wielkości, jak odległość oddziaływania strugi powietrza w komorze. I tak przy prędkości przepływu wynoszącej 1,4 m/s w chodniku z opływowym prądem powietrza wyznaczona numerycznie odległość oddziaływania strugi wynosi od 14,8 m do około 15,5 m (przepływ 3D), zaś zmierzona 16,8 m. Należy zauważyć, że poprzez przyjęcie odpowiedniego wymiaru chropowatości ścian, można dla tego konkretnego przypadku uzyskać wynik bliższy wartości zmierzonej, jednak uwzględniając pomiary przy innych prędkości przepływu w prądzie opływowym, brak przesłanek dla takiego postępowania.



Rys. 6. Porównanie modułów prędkości dla przepływu 2D przy użyciu modeli turbulencji – licząc od lewej: standardowego $k-\epsilon$ i RNG $k-\epsilon$ z warunkiem brzegowym w postaci funkcji ściany oraz RNG $k-\epsilon$ z warunkiem brzegowym w postaci rozszerzonej funkcji ściany: a) kolor biały prędkość powyżej 0,2 m/s, b) kolor biały prędkość powyżej 0,05 m/s



Rys. 7. Rozkład turbulencji liczby Reynoldsa, turbulenty model RNG k-ε, rozszerzona funkcja ściany



Rys. 8. Porównanie modułów prędkości w komorze przy prędkościach w prądzie opływowym: a) 0,65 m/s; b) 1 m/s; c) 2,1 m/s

Obliczenia nie potwierdziły istnienia optymalnej (krytycznej) prędkości przepływu w prądzie opływowym powyżej i poniżej której zasięg oddziaływania strugi powietrza w komorze maleje. Z symulacji wynika, że w zakresie rozważanych prędkości zasięg ten zmienia się nieznacznie.

Bazując na wykonanych obliczeniach przepływu powietrza w komorze przy użyciu dwóch modeli turbulencji, można wysnuć następujące spostrzeżenia:

- obliczenia wykonane przy pomocy standardowego modelu $k-\varepsilon$ i jego modyfikacji RNG $k-\varepsilon$ są niemalże identyczne,
- potwierdza się odnotowany w publikacjach istotny wpływ przyjętego wymiaru chropowatości na wyznaczone pole prędkości,
- modelowanie warunków przyściennych przy użyciu funkcji ściany jest dla zagadnień praktycznych wystarczająco dokładne.

Powyższe uwagi odnoszą się jedynie do badanego rodzaju przepływu i nie mają charakteru ogólnego.

LITERATURA

- [1] *Branny M., Filipek W.*: Modelowanie procesu przewietrzania wyrobisk ślepych przy występujących zagrożeniach skojarzonych metodami CFD, XXV Seminarium ROP, Rybnik 2008
- [2] Fluent Inc., Fluent 6.1 Documentation, 2005
- [3] *Hargreaves D.M., Lowndes I.S.*: An assessment of future use of computer fluid dynamics for network modelling. Proceedings of the 8th Int.Mine Vent. Congress, Kraków, 2001
- [4] *Krawczyk J.*: Jedno i wielowymiarowe modele niestacjonarnych przepływów powietrza i gazów w wyrobiskach kopalnianych. Przykłady zastosowań. Archiwum Górnicztwa, nr.2,2007
- [5] *Meyer C.F.*: Improving underground ventilation conditions in coal mines. SIMRAC, Project no. COL 029a, 1993
- [6] *Podleszczyk E., Ligęza P., Skotniczny P.*: Metody termooanemometrycznego wyznaczania parametrów przepływu jako wspomaganie symulacji numerycznej procesu przewietrzania kopalni głębinowej. 5 Szkoła Aerologii Górniczej, Wrocław 2009
- [7] *Tu J., Yeoh G.H., Liu Ch.*: Computational Fluid Dynamics. Elsevier, 2008
- [8] *Wierzbicki K.*: Modelowanie komputerowe rozkładu parametrów powietrza oraz koncentracji metanu w rejonie skrzyżowania z chodnikiem wentylacyjnym. 5 Szkoła Aerologii Górniczej, Wrocław 2009