

Porównanie symulacji numerycznych z wynikami pomiarów rozkładów pól prędkości w przekrojach chodników kopalnianych

JAKUB JANUS, JERZY KRAWCZYK, JANUSZ KRUCZKOWSKI

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

Streszczenie

Wybór miejsca pomiaru w przekroju wyrobiska ma istotne znaczenie dla dokładności pomiaru strumienia objętości w wyrobiskach kopalnianych. Względy praktyczne powodują, iż nie zawsze jest możliwe wykonanie pomiarów w optymalnych dla uzyskania jak najmniejszej niepewności, warunkach. Lokalne zaburzenia przepływu w otoczeniu przekroju pomiarowego mają istotny wpływ na wynik pomiaru. Do oceny tego wpływu przydatne może być modelowanie trójwymiarowego przepływu w odcinku wyrobiska zawierającym miejsce pomiaru. Przeprowadzono serie symulacji przepływu metodą objętości skończonej w celu odtworzenia warunków panujących w miejscu pomiarów. Porównano wyniki symulacji ze zmierzonymi w warunkach rzeczywistych rozkładami pól prędkości. Porównania te umożliwiły zwiększenie wiarygodności interpretacji wyników symulacji. Wskazano na źródła błędów i możliwość opracowania zaleceń odnośnie optymalnego dla dokładności pomiaru rozmieszczenia czujników prędkości.

Słowa kluczowe: pole prędkości, symulacja numeryczna przepływu, anemometry skrzydełkowe

1. Wprowadzenie

Prowadzenie pomiarów parametrów fizycznych przepływów gazów w głębinowych kopalniach jest zadaniem wyjątkowo trudnym. Warunki środowiskowe i liczne zagrożenia, w tym występowanie atmosfer wybuchowych nakładają szczególne wymagania, które spełniają specjalnie zaprojektowane czujniki. Często w ich budowie należy stosować rozwiązania techniczne niespotykane w wykonaniach przeznaczonych dla laboratoriów czy przemysłu powierzchniowego.

W praktyce analizy systemów wentylacyjnych często dokonuje się pomiarów strumienia objętości. Dokładny obraz tego strumienia, również dla stanów przejściowych daje metoda wielopunktowego jednoczesnego pomiaru pola prędkości (Krach i in., 2006). Dane z tego pomiaru są również przydatne dla symulacji trójwymiarowych przepływów w wyrobiskach kopalnianych przy użyciu coraz popularniejszej metody objętości skończonej. Wierność tego opisu możliwa jest do eksperymentalnego zweryfikowania pod warunkiem posiadania metod pomiarowych niezbędnych do określenia wielkości fizycznych istotnych dla symulowanych zjawisk. Należy jednak mieć na uwadze, że symulacja będzie zawsze tylko przybliżonym opisem rzeczywistych zjawisk. Już sam pomiar, którym chcemy sprawdzić jej jakość, jest zawsze obciążony niepewnością. Porównywanie pomiarów i symulacji daje szansę na ulepszenie obydwu metod badawczych i uzyskanie wierniejszego obrazu analizowanych procesów.

2. Pomiar pola prędkości w przekroju chodnika kopalnianego przy pomocy czujników anemometrycznych

Jednym ze sposobów badania rozkładu pola prędkości przepływu gazu przez wybrany przekrój, jest rejestrowanie lokalnych prędkości przez rozmieszczenie w przepływie czujników pomiarowych. Ilość za-

stosowanych czujników jest kompromisem pomiędzy wymaganą dokładnością określenia rozkładu, a możliwie najmniejszą ingerencją w sam przepływ. Niestety, zastosowanie metod nieinwazyjnych jak np. metoda cyfrowej anemometrii obrazowej w warunkach środowiska kopalnianego jest z powodów technicznych i praktycznych obecnie nieosiągalne.

Z pośród różnych typów czujników szczególnie predysponowane do wykorzystania w wentylacyjnej sieci kopalnianej są anemometryczne czujniki skrzydełkowe. Wynika to z ich niewielkiej wrażliwości na środowisko pomiarowe, jednak pod warunkiem zastosowania profesjonalnych rozwiązań konstrukcyjnych uwzględniających wymagania stawiane przez warunki górnictwa podziemnego. W badaniach prowadzonych wcześniej przez autorów wykazano, że także rejestrowane przez wykorzystywane czujniki pasmo częstotliwości jest wystarczające do analiz zmian prędkości w warunkach wyrobisk kopalnianych (Janus i in., 2010). Do pomiarów wykorzystano system wielopunktowego pomiaru pola prędkości opracowany w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN (Krach i in., 2006). System ten jest wykorzystywany również do badania i pomiarów strumienia objętości powietrza w wyrobiskach kopalnianych.

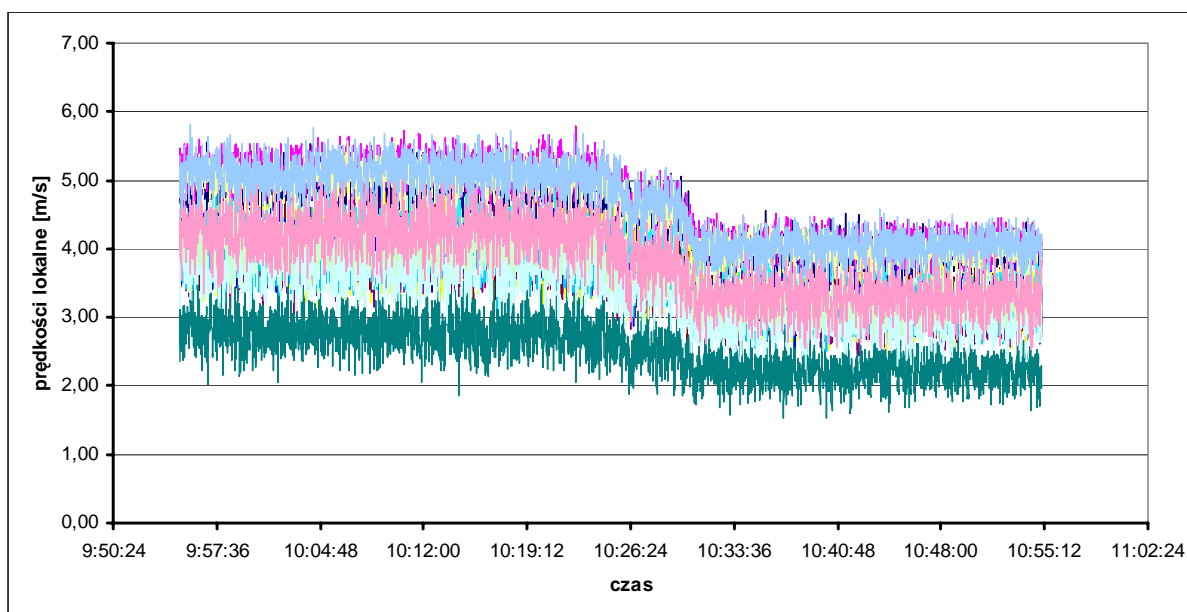
Pomiary zostały wykonane w pochylni wentylacyjnej. Wybór miejsca pomiarów warunkował sposób zabudowy wyrobiska. Rejon i sposób rozmieszczenia czujników pokazano na Rys. 1. Pochylnia była prowadzona w obudowie łukowej typu ŁP. Ociosy pochylni zabezpieczono siatką metalową. Część przystropowa wyłożona została bloczkami betonowymi. Strop został dodatkowo wzmocniony podporami z drewnianych bali. W miejscu wykonywania pomiarów występowała przerwa w podporach umożliwiająca rozłożenie stanowiska. Długość przerwy wynosiła 6 m.



Rys. 1. Rozmieszczenie czujników w rejonie wykonywania pomiarów wraz z ich numeracją

Podczas pomiarów rejestrowano mierzone przez czujniki anemometryczne wartości prędkości lokalnych. Zarejestrowano trzy stany przewietrzania wyrobiska. Wyniki rejestracji pokazano na Rys. 2. Zmiany prędkości przepływu były realizowane przy pomocy zmian parametrów pracy stacji inżynierskiej znajdującej się na wlocie do pochylni. Czujniki zostały zsynchronizowane czasowo, i z częstotliwością 1 Hz każdy z nich równocześnie z pozostałymi, zapisywał do pamięci daną pomiarową. Dane z pamięci czujników zostały przesłane na powierzchni do komputera. Na potrzeby niniejszego opracowania poddano analizie dane z rejestracji ustalonego stanu przepływu w przedziale czasowym od godz. 10.00 do 10.20.

Z Rys. 2 wynika, że wartości średnie prędkości lokalnych w przekroju wyrobiska w analizowanym przedziale czasu, zmieniają się w szerokim zakresie od około 2,8 m/s do 5,4 m/s. Widoczne są również lokalne turbulencje o dużej intensywności.



Rys. 2. Rejestracja prędkości lokalnych w przekroju wyrobiska

3. Komputerowe symulacje przepływu w odcinku chodnika zawierającym przekrój pomiarowy

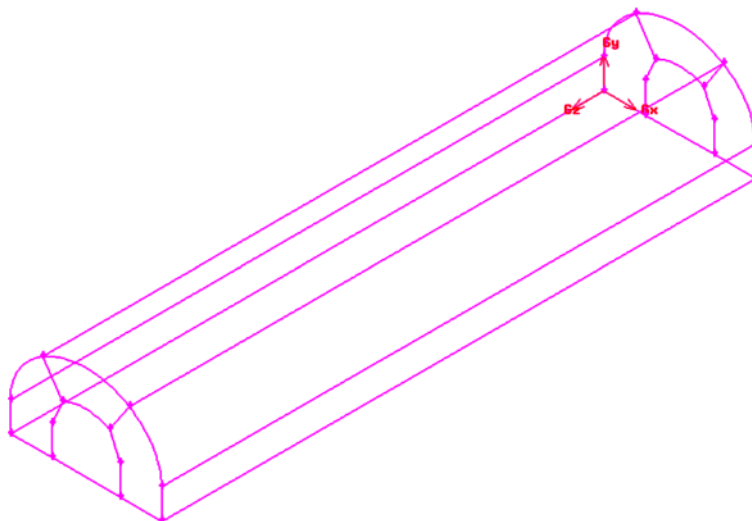
Przy numerycznym rozwiązywaniu zagadnień przepływowych stosowano rozmaite uproszczenia, by przy ograniczonych możliwościach prowadzenia obliczeń uzyskiwać zadowalające rezultaty. W szczególności dotyczyły one ilości niewiadomych, którą można było ograniczyć przez wykorzystanie symetrii obszaru oraz stosowanie dwu lub nawet jednowymiarowych reprezentacji obszaru obliczeniowego. Od początku lat dziewięćdziesiątych wprowadzenie wydajnego sprzętu komputerowego i oprogramowania, upowszechniło możliwość prowadzenia obliczeń dla trójwymiarowych modeli. Jednak nadal obliczenia te są czasochłonne i możliwe dla znacznie mniejszych obszarów niż w przypadku dwuwymiarowych reprezentacji. Z tego względu uzasadnione jest prowadzenie wielowariantowych, próbnych symulacji na modelach dwuwymiarowych. Symulacje na modelach dwuwymiarowych, poprzez swoją mniej skomplikowaną geometrię, jak również stosunkowo niewielką ilość niewiadomych, umożliwiają uzyskanie wyników obliczeniowych w krótkim czasie, a także mają możliwość szybkiego wprowadzenia zmian zarówno w geometrii badanego modelu jak i warunków brzegowych. Uzyskując wyniki obliczeń symulacji na modelach dwuwymiarowych, możliwe jest zaprojektowanie modelu trójwymiarowego w taki sposób, aby zachowując warunki przepływowe panujące w badanym fragmencie modelu maksymalnie uprościć jego geometrię w celu skrócenia czasu obliczeniowego. W sytuacjach, gdy względy praktyczne wymuszają stosowanie uproszczeń, można przewidywać ich wpływ na wynik symulacji.

3.1. Wstępne obliczenia trójwymiarowego pola prędkości w otoczeniu przekroju pomiarowego

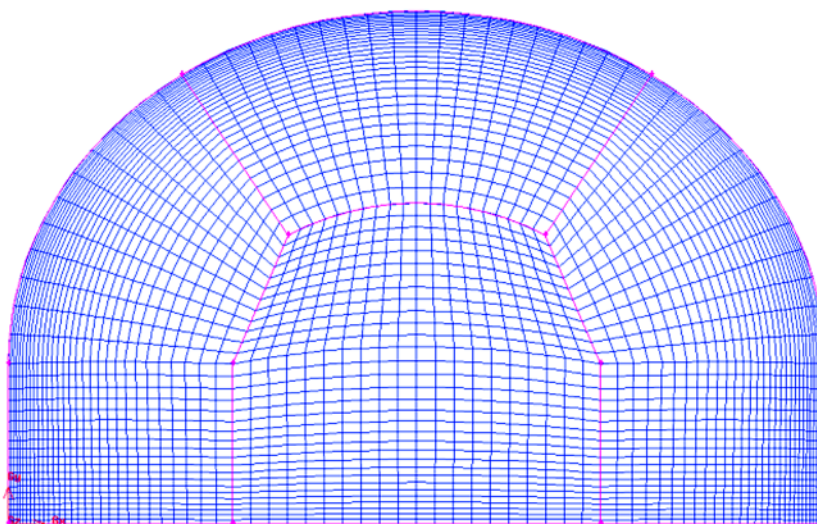
Celem wstępnych obliczeń na uproszczonym modelu trójwymiarowym chodnika kopalnianego, nie zawierającym w swojej budowie elementów konstrukcyjnych tj, obudowy łukowej czy podpór stropu, było zapoznanie się ze specyfiką badanego zadania. Posługując się preprocesorem Gambit, zaprojektowano odcinek chodnika kopalnianego o długości 50 m (Rys. 3).

Na model została nałożona sześciokątna strukturalna siatka (ang. *hex*) zagęszczona w okolicach warstwy przyściennej. Schemat siatki zaprezentowano na Rys. 4.

Jako warunek brzegowy przyjęto płaski profil prędkości na wlocie (ang. *velocity inlet*) o wartości 3.61 m/s, średnicę hydrauliczną 3.84 m oraz intensywności turbulencji rzędu 10 %. Wylot został zdefiniowany jako *outflow*, natomiast ściany jako nieprzepuszczalne z chropowatością o wysokości 5 cm. Przeprowadzono obliczenia ustalonego przepływu wykorzystując model turbulencji $k-\varepsilon$.



Rys. 3. Geometria obszaru obliczeniowego dla najprostszego z trójwymiarowych modeli

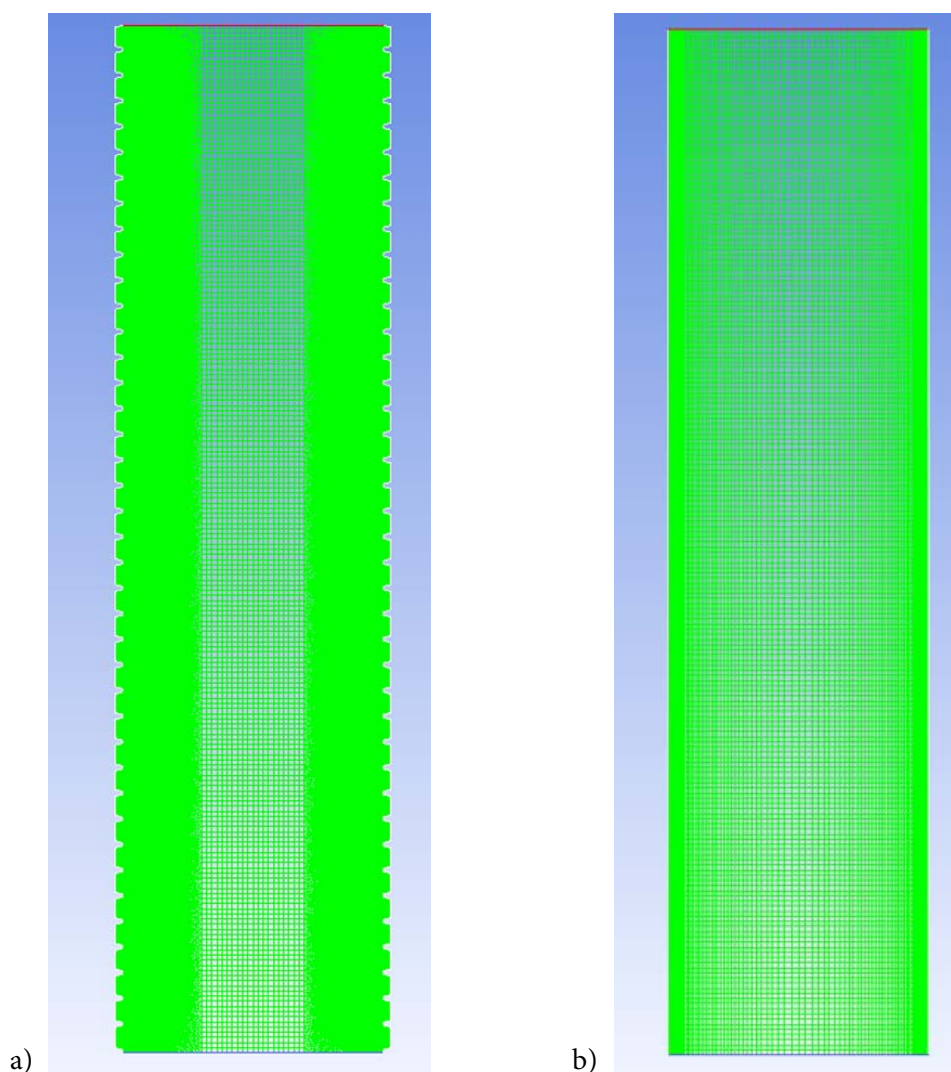


Rys. 4. Schemat siatki obliczeniowej w przekroju poprzecznym

Wyniki symulacji budziły duże wątpliwości co do poprawności modelu na którym został przeprowadzone obliczenia. Profile prędkości w znaczny sposób odbiegają kształtem od wartości zmierzonych przy użyciu czujników anemometrycznych. W celu uzyskania pełniejszego obrazu rzeczywistego rozkładu pól prędkości w wyrobisku, autorzy zastosowali metodę wielowariantowej analizy modelach dwuwymiarowych dla oszacowania wpływu niektórych z pośród uproszczeń, zastosowanych w pierwszym modelu trójwymiarowym. Wyniki tych badań będą stanowić wytyczne do poprawnego zaprojektowania modelu trójwymiarowego. Porównanie wyników z pomiarami zostało przedstawione w rozdziale 4.

3.2. Analiza wpływu lokalnych zaburzeń przepływu na profil prędkości w oparciu o dwuwymiarowe modele

W celu wstępnego zbadania zachodzących zjawisk przepływowych w badanym fragmencie wyrobiska kopalnianego, wskazane było wykonanie obliczeń na uproszczonych modelach dwuwymiarowych. Przeprowadzanie obliczeń na modelach dwuwymiarowych, w których geometrie nie były w wysokim stopniu skomplikowane, umożliwiło szybkie oszacowanie wpływu elementów tj. żeber obudowy łukowej oraz drewnianych podpór stropu, na przepływ w otoczeniu obszaru, w którym mierzono pole prędkości.



Rys. 5. Dwuwymiarowe modele do badań wpływu obudów łukowych z siatkami obliczeniowymi (długość – 20 m, szerokość – 5.1 m): a) – model z obudową ŁP; b) – model z gładkimi ścianami

3.2.1. Opis geometrii dwuwymiarowych modeli numerycznych oraz siatek obliczeniowych

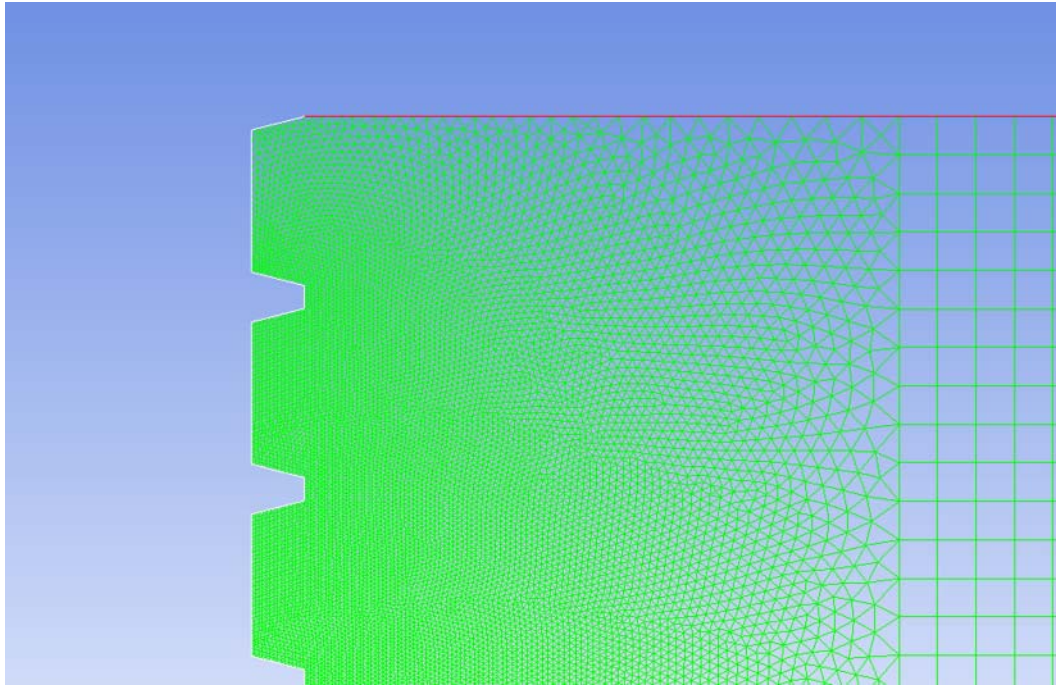
W pierwszej kolejności postanowiono zbadać wpływ jaki mają na przepływ w chodniku kopalnianym żebra obudowy typu ŁP, które oprócz funkcji wytrzymałościowej nadają specyficzny kształt ścianom wyrobiska. Posługując się preprocesorem Gambit, zaprojektowano 2 modele:

- a) z odtworzeniem obecności żeber obudowy łukowej (Rys. 5a)
- b) z prostoliniowymi ścianami o zadanej chropowatości 0.05 m (Rys. 5b) (Silvester, 2002)

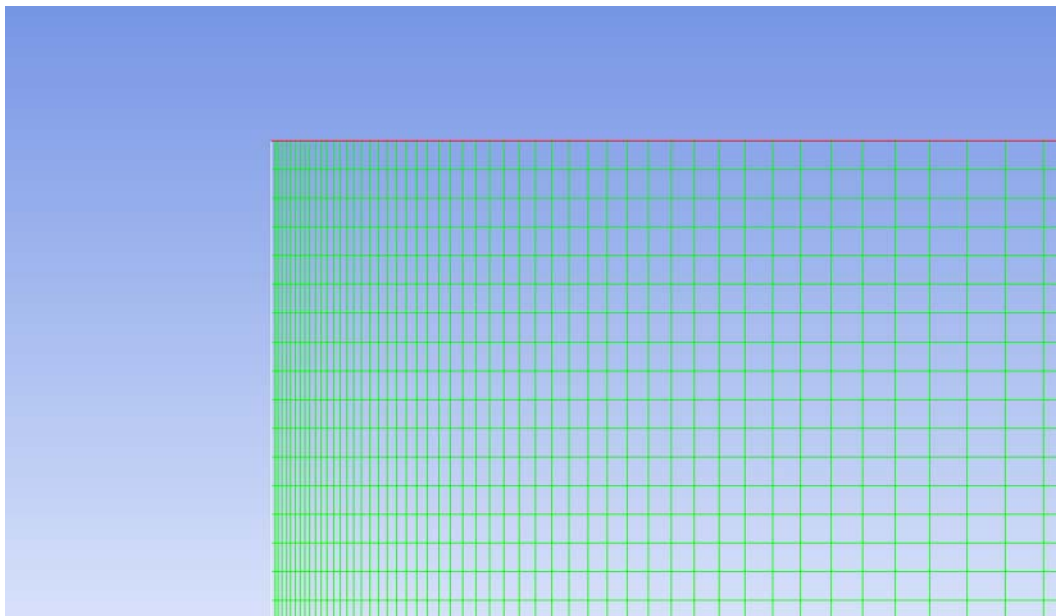
W celu uzyskanie poprawnych wyników obliczeń konieczne było nałożenie gęstej siatki obliczeniowej, jednak użycie jednorodnej siatki na całym modelu obliczeniowym wydłużyłoby w znacznym stopniu obliczenia. Zdecydowano się na użycie funkcji kontroli rozmiaru siatki (ang. *size function*), która pozwala kontrolować wielkość siatki obliczeniowej w okolicach wybranego punktu, krawędzi lub powierzchni.

Model a został zdyskretyzowany trójkątną siatką niestrukturalną (ang. *tri-pave*) oraz czworokątną siatką strukturalną (ang. *quad*). Użycie siatki niestrukturalnej *tri-pave* było zamierzone, gdyż użycie siatki strukturalnej typu *quad* w warstwie przyległej do żeber obudowy łukowej byłoby znacznie bardziej pracochłonne. Ponadto, siatka trójkątna jest zalecana w miejscach, gdzie a priori trudno przewidzieć kierunki przepływu, a w cieniu aerodynamicznym żeber obudowy należało spodziewać się obszarów recyrkulacji przepływu.

W modelu b, gdzie żebra nie występowały można było cały obszar zdyskretyzować siatką strukturalną typu *quad*, zagęszczoną w przy ścianach, dla właściwej reprezentacji warstw przyściennych (Rys. 7).



Rys. 6. Fragment siatki obliczeniowej modelu z obudową typu LP

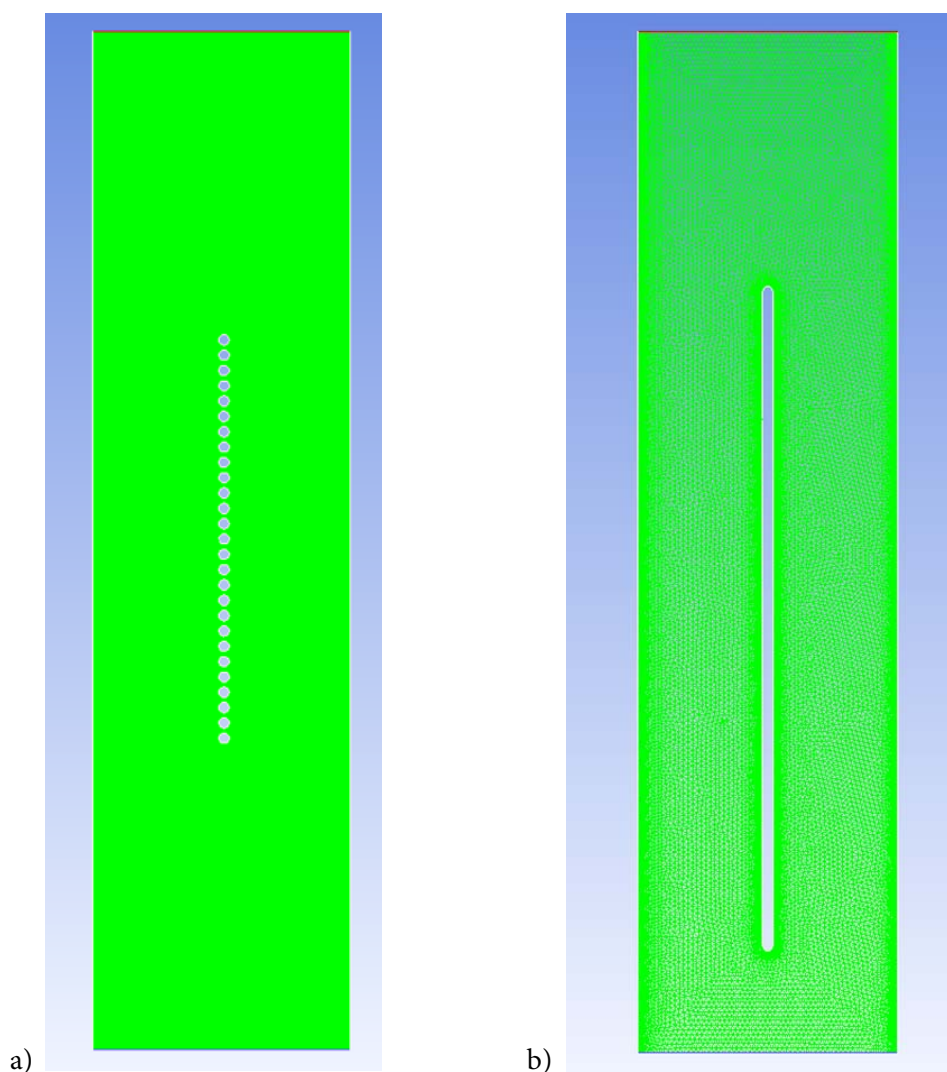


Rys. 7. Fragment siatki obliczeniowej modelu z gładkimi ścianami

W kolejnym etapie należało zbadać wpływ drewnianych podpór stropu, które mogą znacząco modyfikować kształt profilu prędkości w wyrobisku. Sprawdzone również sens stosowania uproszczonej reprezentacji podpór przez litą przegrodę umieszczoną w osi wyrobiska. Zaprojektowano 2 modele:

- a – model z kolistymi podporami stropu, $\varnothing = 20$ cm;
- b – model z litą przegrodą, $\varnothing = 20$ cm.

W obydwu modelach zdecydowano się na dyskretyzację siatką niestructuralną typu *tri-pave*. Do zagęszczenia siatki przy ścianach wyrobiska i słupów wykorzystano narzędzie *size function*.



Rys. 8. Dwuwymiarowe modele do badań wpływu drewnianych podpór stropu z siatkami obliczeniowymi (długość – 20 m, szerokość – 5.1 m): a) – model z kolistymi podporami stropu, $\varnothing = 20$ cm; b) – model z litą przegrodą, $\varnothing = 20$ cm

3.2.2. Warunki brzegowe

Jako kryterium podobieństwa dla dwuwymiarowej reprezentacji chodnika przyjęto równość średnich prędkości na wlocie. Bazując na geometrii chodnika kopalnianego oraz wynikach uzyskanych z pomiarów strumienia objętości wielopunktowym systemem pomiaru pola prędkości możliwe było obliczenie prędkości średniej. Zadając warunki brzegowe przekrój wlotowy zdefiniowano jako *velocity inlet*, w którym zadajemy profil prędkości. W tym warunku ciśnienie całkowite nie jest stałe lecz jest dopasowywane do wartości, jaka jest konieczna do zapewnienia określonego rozkładu prędkości.

Dla chodników bez podpór rozwinięty profil prędkości wygenerowano metodą iteracyjną zaczynając od przyjęcia płaskiego profilu na wlocie o wartości równej średniej prędkości wyliczonej ze strumienia objętości. Profil na wylocie był pierwszym przybliżeniem rozwiniętego profilu. W kolejnych obliczeniach profil ten zadano na wlocie. Proces iteracyjny powtórzono kilkakrotnie, do otrzymania zadowalającej zbieżności. Tak otrzymany rozwinięty profil zadano również dla przepływu w obecności podpór.

Przyjęto następujące parametry na wlocie:

- Prędkość średnia na wlocie – 3.61 m/s
- średnica hydrauliczna – 3.84 m
- intensywność turbulencji – 10%

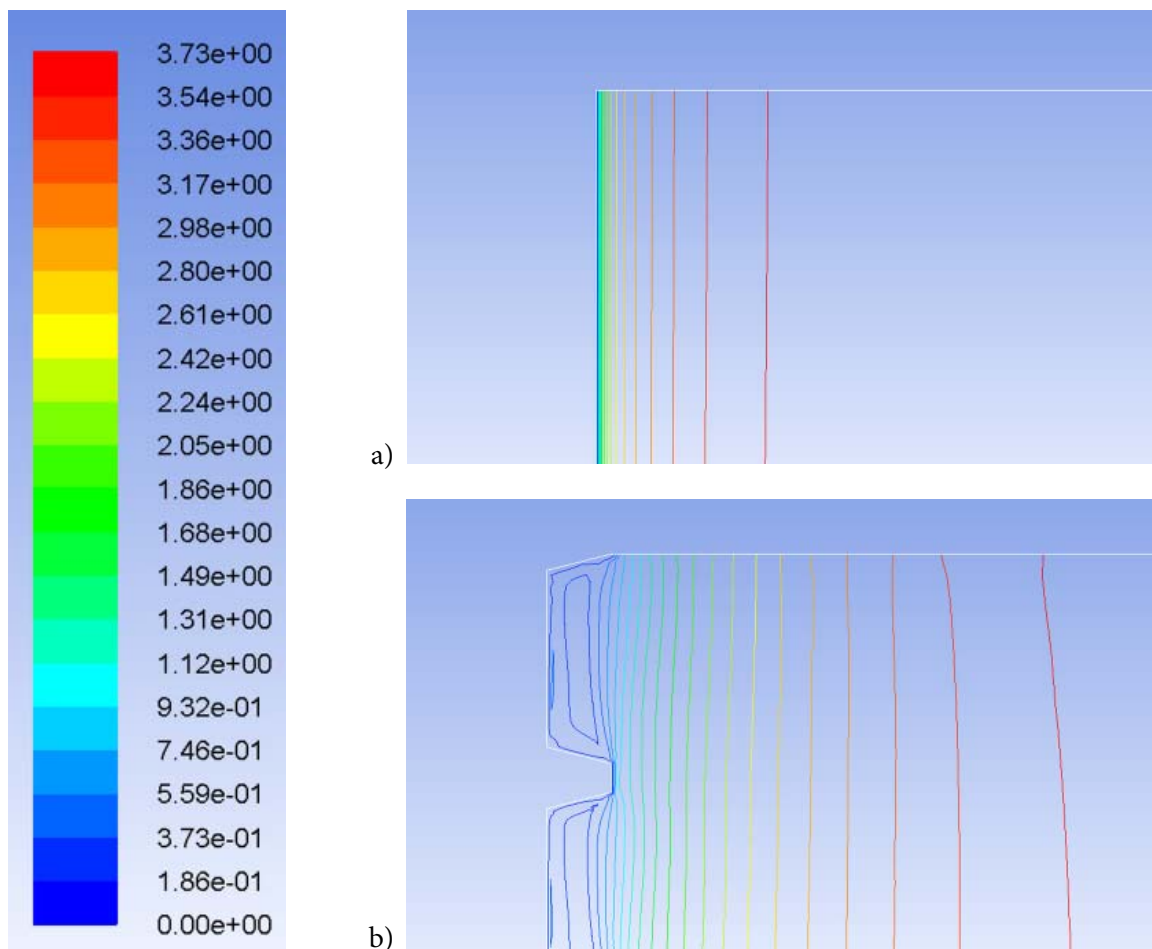
Intensywność turbulencji została zdefiniowana na podstawie badań pomiaru prędkości przepływu w chodniku kopalnianym przy użyciu termoanemometrów PT100 (Janus i in., 2010). Wylot został zdefiniowany jako *outflow*, warunkiem służącym do modelowania wpływu w którym nie definiuje się żadnych

warunków tj. prędkość czy ciśnienie. Ściany zdefiniowano jako *wall*, natomiast nierówności ścian w modelu rzeczywistym potraktowano jako chropowatość o wysokości rzędu 5 cm.

Ze względu na charakter przepływu powietrza w chodniku kopalnianym konieczne było modelowanie przepływu turbulentnego za pomocą modelu $k-\varepsilon$.

3.2.1. Wyniki symulacji komputerowej

Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rysunkach w postaci izolinii poszczególnych wartości obliczeniowych. Na rysunku 9 przedstawiono rozkład prędkości w modelach badającym wpływ żeber obudowy typu ŁP na przepływ w chodniku kopalnianym.



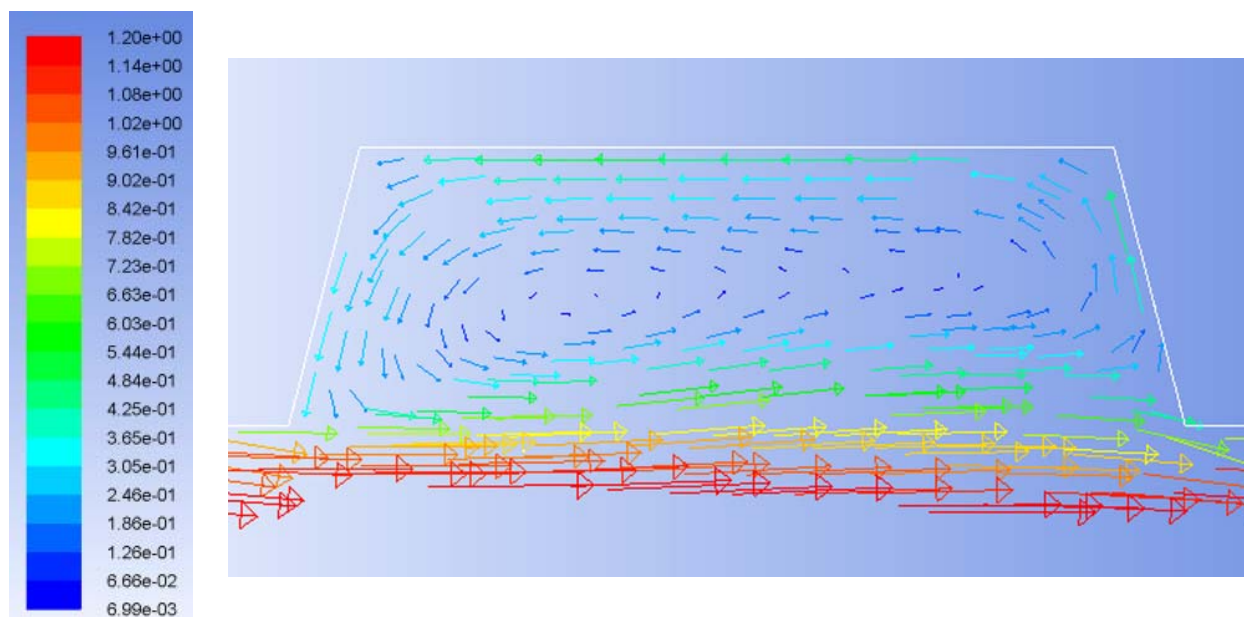
Rys. 9. Rozkład prędkości w okolicy warstwy przyściennej, skala m/s:

a) – model z gładkimi ścianami; b) – model z łukami obudowy

Analizując izolnie rozkładu prędkości można zauważyć, że dla modelu z obudową grubość warstwy przyściennej, w której prędkość przepływu powietrza jest mniejsza od jego prędkości w osi przewodu, jest znacznie większa w porównaniu z modelem o gładkich ścianach. Powodem kształtowania się tak grubej warstwy przyściennej jest zaobserwowane zjawisko recyrkulacji strugi powietrza we wnękach pomiędzy żebrami obudowy łukowej (Rys. 10). Zjawisko to ma zdecydowany wpływ na kształt i zasięg warstwy przyściennej.

Możliwość przewidywania kształtu profilu prędkości na podstawie symulacji będzie przydatna dla określenia optymalnego rozmieszczenia anemometrów podczas wielopunktowego pomiaru pola prędkości w celu określenia wydatku przepływu w wyrobisku.

Uzyskane wyniki obrazują znaczący wpływ łuków obudowy na kształtowanie się przepływu, stanowią kolejną przesłankę (Ligeża i in., 2009) dla unikania w modelach chodników kopalnianych stosowania standardowej metody reprezentacji wpływu chropowatości ścian. Na Rys. 11 przedstawiono rozkład prędkości w modelach badających wpływ drewnianych podpór stropu na przepływ w chodniku kopalnianym.



Rys. 10. Pole wektorowe prędkości pomiędzy dwiema łukami obudowy, skala m/s

Analiza izolinii rozkładu prędkości w modelu a) wykazała zdolność do powstawania ścieżki wirowej Karmana za podporami stropu. Wiry Karmana w których występują pola przepływu o poprzecznym gradientie prędkości oraz w których zachodni intensywny proces mieszania, mają znaczący wpływ na kształt profilu prędkości w danym odcinku chodnika kopalnianego. W modelu b) gdzie zastosowano litą przegrodę, zjawisko ścieżki wirowej Karmana nie występuje a otrzymane profile prędkości różnią się zauważalnie, co przemawia przeciwko stosowaniu takiej geometrii do badań w modelu trójwymiarowym..

W celu zbadania okresowości powstałych wirów Karmana, autorzy przeprowadzili obliczenia prognozy przepływu w modelu a) w czasie nieustalonym o kroku czasowym równym 0.005 s. W celu zobrazowania poprzecznych prędkości na model nałożono 2 punkty pomiarowe w odległości 25 cm od ostatniej podpory.

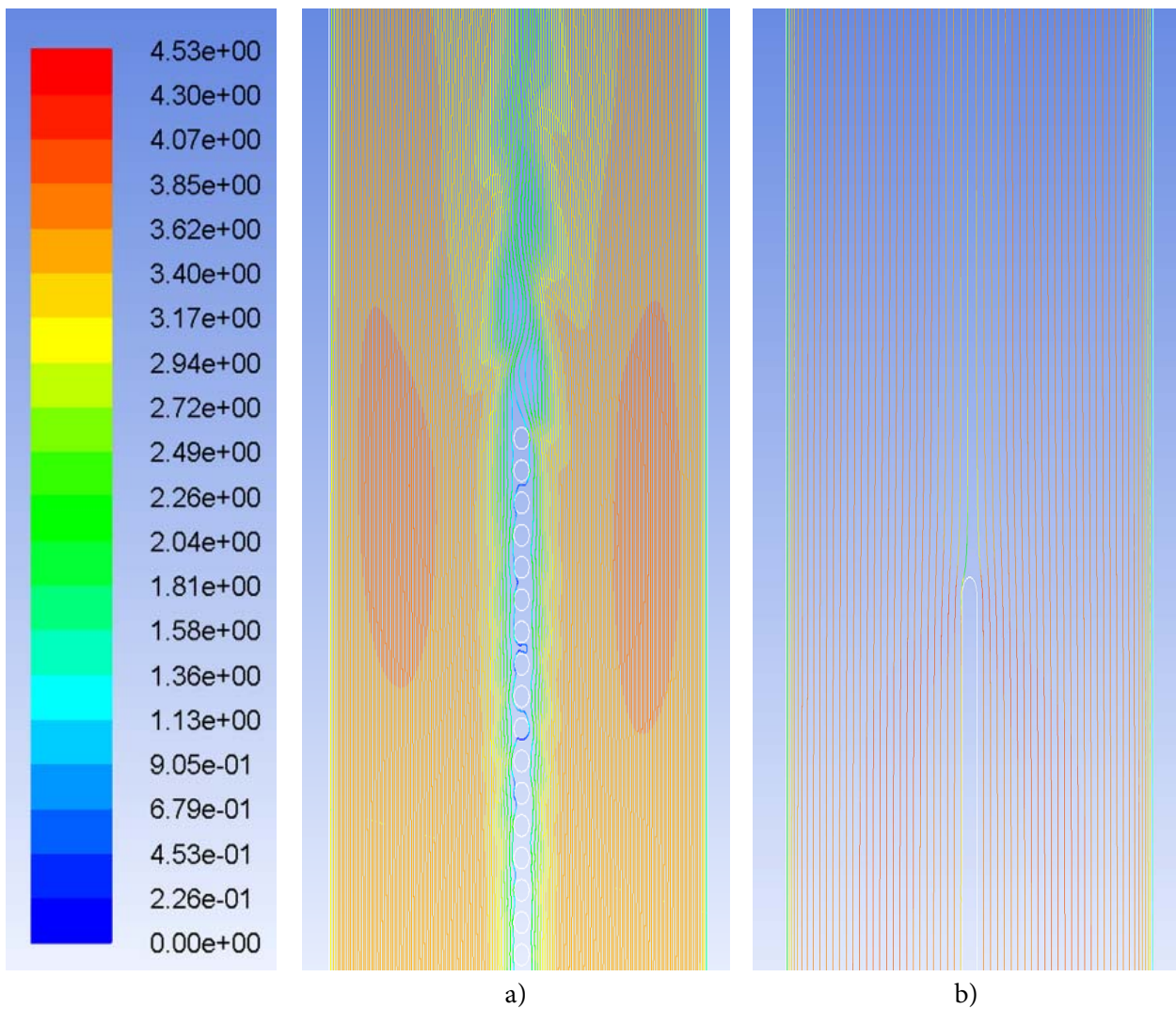
Uzyskane wyniki pozwoliły obliczyć okres powstałych wirów Karmana, który wynosi 1 s. Znana z literatury formuła na częstotliwość wirów daje w tym przypadku wartość 0.3 Hz. Częstotliwość wyliczona przy pomocy symulacji ma ten sam rząd wielkości, co jest zadowalające biorąc pod uwagę orientacyjny charakter obliczeń.

Dla niestacjonarnego przepływu profil prędkości był zmienny w czasie. Dzięki okresowości było możliwe porównanie rozwiązań, po uśrednieniu rozwiązania okresowego po kilku okresach dla ustabilizowanych oscylacji. Poprzez użycie funkcja zapisu prędkości na danej prostej, porównano powstałe ślady aerodynamiczne, powstałych w skutek przepływu wzdłuż przegród. Poprzez nałożoną na model prostą możliwy jest eksport wartości prędkości i uśrednienie ich w celach zobrazowania profilu prędkości. Na obydwu modele nałożono linię pomiarową w odległości 3 m za podporami. W modelu a), o czasie nieustalonym, wartości prędkości po linii były eksportowane co 0.02 s. Uśredniono zapisy z jednego okresu wynoszącego 1 s.

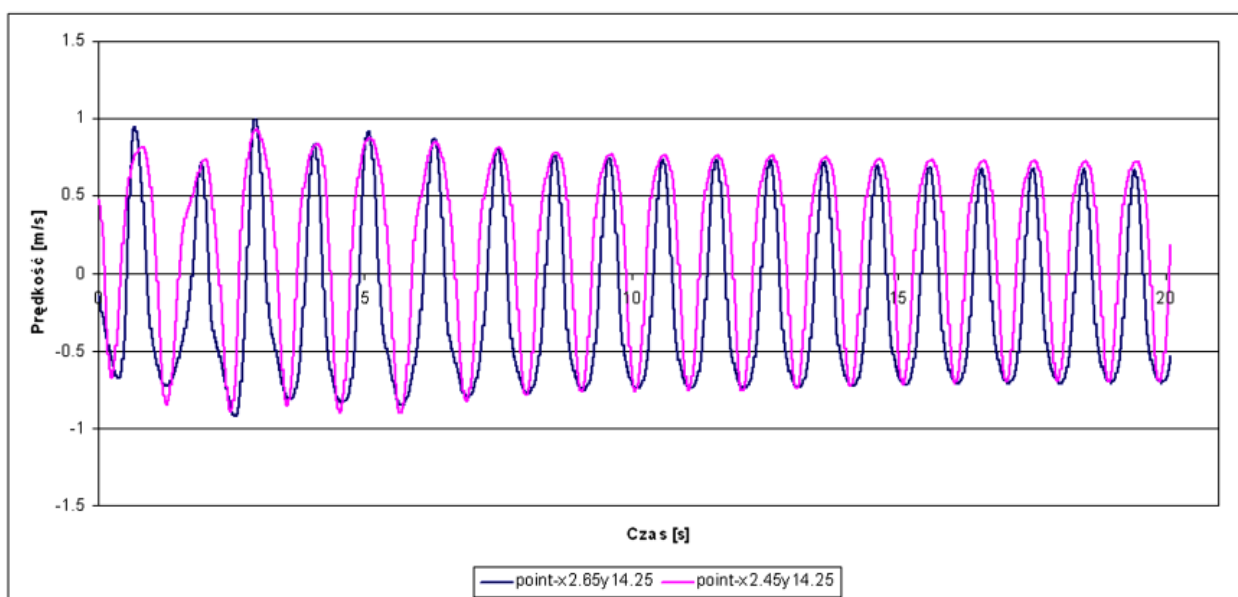
Porównanie danych dla obydwu modeli prezentuje znaczącą różnicę w kształtowaniu się profilu prędkości za podporami stropu i za litą przegrodą. Przepływ powietrza w chodniku kopalnianym z podporami stropu skutkuje powstaniem wirów Karmana, co niesie za sobą kształtowanie się większego śladu aerodynamicznego. Ma to wpływ na profil prędkości przepływu na całej szerokości chodnika. Tak duży wpływ podpór stropu nie może zostać pominięty poprzez uproszczenie typu lita przegroda.

Analizując wyniki prognozy przepływu należy stwierdzić, że poprzez umiejscowienie czujników anemometrycznych w przekroju chodnika kopalnianego nie uwzględniające obecności śladu aerodynamicznego za podporami w osi chodnika obniżono dokładność pomiaru strumienia przepływu powietrza. Podobnie jak w przypadku badania wpływu żeber obudowy typu ŁP, poprzez badanie wpływu podpór stropu na przepływ, jest możliwe określenie optymalnego sposobu rozmieszczenia czujników anemometrycznych w odcinku chodnika kopalnianego o takiej konstrukcji.

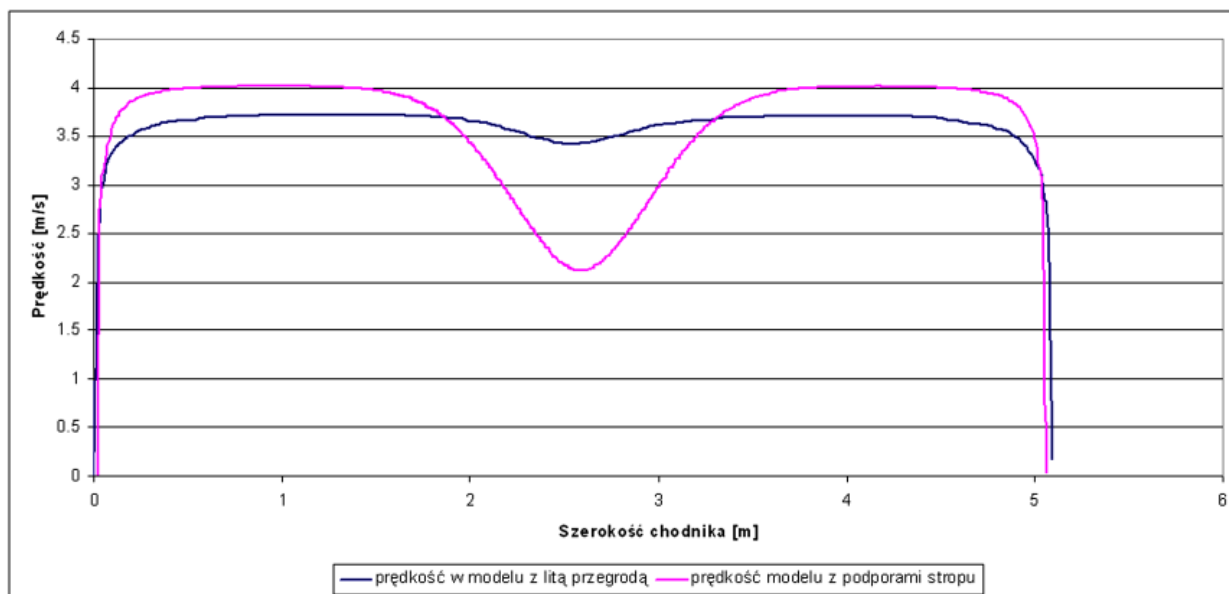
Uzyskane wyniki prognoz w różnych dwuwymiarowych modelach chodników kopalnianych pokazują wpływ elementów chodnika na rozkład profilu prędkości. Wpływ tych elementów jest tak znaczący,



Rys. 11. Rozkład prędkości w odcinku chodnika kopalnianego, skala m/s:
a) – model z podporami stropu; b) – model z litym przegrodą



Rys. 12. Rozkład prędkości w 2 punktach pomiarowych w czasie 20 s



Rys. 13. Profile prędkości dla prostej w odległości 3 m za podporami

że upraszczanie modeli obliczeniowych, w celu skrócenia czasu obliczeniowego, skutkowało by uzyskaniem błędnych wyników w porównaniu z odczytami z wielopunktowego systemu pomiaru pól prędkości. Szczególnie ważną informacją dla autorów był fakt występowania wirów Karmana, wywołanych podporami stropu, co wykluczyło możliwość przeprowadzania obliczeń numerycznych na modelu trójwymiarowym w stanie ustalonym.

3.3. Obliczenie niestacjonarnych pól prędkości w przekroju pomiarowym dla modelu trójwymiarowego uwzględniającego wpływ łuków obudowy oraz podpór stropu

Po przeprowadzeniu szczegółowych symulacji przepływu na modelach dwuwymiarowych, w celu uzyskania informacji o możliwościach uproszczenia modelu trójwymiarowego, autorzy uzyskali wiedzę wpływu elementów tj. obudowy łukowe typu ŁP oraz podpory stropu na kształtowanie się profilu prędkości w otoczeniu przekroju pomiarowego w chodniku kopalnianym. Okazało się że obliczenia numeryczne w takim środowisku (chodnik kopalniany) powinny być przeprowadzane na modelach, które w jak największym stopniu odzwierciedlają warunki geometryczne w modelu rzeczywistym.

Obliczenia dla przypadków dwuwymiarowych prowadziły do wniosku, że należy rozpatrywać trójwymiarowy model o chodnika o długości co najmniej 20 metrów. Dodatkowo należało odwzorować wpływ obecności żeber obudowy i podpór odpowiednio zagęszczając siatkę przy ścianach. W efekcie otrzymano by zagadnienie przekraczające możliwości obliczeniowe posiadanego sprzętu wskutek zbyt wielkiej ilości niewiadomych.

Przeprowadzono obliczenia dla dwóch wariantów. W pierwszym palisadę zastąpiono zastosowaną litą przegrodą. Analiza modeli dwuwymiarowych pokazała wady takiego podejścia, jednak przy swojej niedoskonałości, dawało ono szansę na otrzymanie realniejszego obrazu przy względnie małych nakładach obliczeniowych.

W drugim wariantcie najwierniej odtworzono szczegóły, lecz dla ograniczenia rozmiaru zadania przyjęto dodatkowe założenia o periodyczności rozwiązania, które pozwoliły ograniczyć długość obszaru do sześciu metrów. Założono, że przy trzeciej z rzędu podporze przepływ staje się periodyczny, to jest, będzie się powtarzał dla dalszych podpór z okresem równym rozstawowi słupów. Wtedy czterometrowy odcinek chodnika bez podpór odwzorowano w pełni. Za nim umieszczono jednowymiarowy odcinek zawierający trzy słupy. Zgodnie z założeniem periodyczności stan przepływu na wlocie tego odcinka jest identyczny ze stanem na wlocie analogicznego jednowymiarowego odcinka z trzema słupami umieszczonego przed obszarem pomiaru. Jako warunek zszycia początku i końca obszaru przyjęto stałość wydatku masowego.

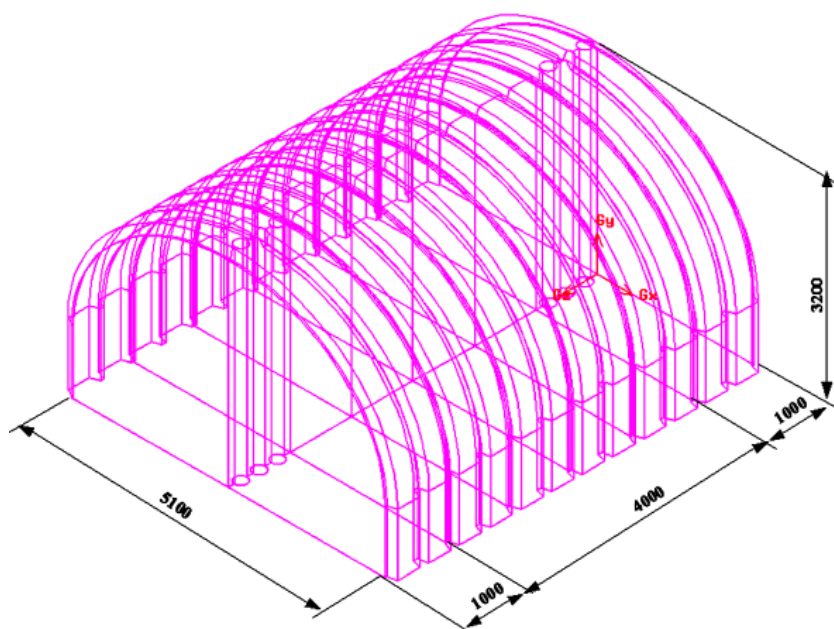
3.3.1. Opis geometrii trójwymiarowej modelu numerycznego oraz siatki obliczeniowej

Do celów obliczeniowych, posługując się preprocesorem Gambit, zaprojektowano dwa modele. W pierwszym w odcinku chodnika o długości 20 m wstawiono litą przegrodę w sposób analogiczny do dwuwymiarowego modelu opisanego na Rys. 8b.

W drugim wariancie, dzięki założeniu o periodyczności ograniczono się do 6 metrowego odcinka chodnika kopalnianego.

Rys. 14 przedstawia trójwymiarowy periodyczny model obliczeniowy. Odcinek chodnika o szerokości 5.1 m, wysokości 3.2 m oraz długości 6 m został podzielony na III strefy:

- I strefa – 1 metrowy odcinek trzech podpór stropu o średnicy $\varnothing = 20$ cm ustawionych w odległości 10 cm od siebie,
- II strefa – 4 metrowy odcinek pomiędzy rzędami podpór stropu w którym był umieszczony wielopunktowy system pomiaru pól prędkości,
- III strefa – 1 metrowy odcinek trzech podpór stropu o średnicy $\varnothing = 20$ cm ustawionych w odległości 10 cm od siebie.



Rys. 14. Wymiary modelu trójwymiarowego obszaru obliczeniowego

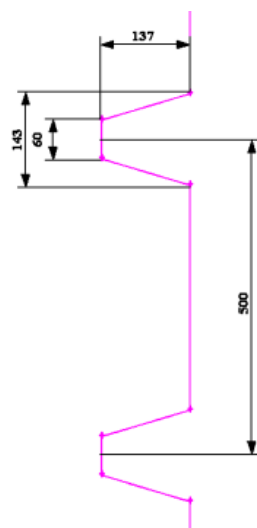
W modelu zostały również uwzględnione obudowy typu ŁP o wysokości 137 mm, szerokości u podstawy 143 mm oraz szerokości górnej krawędzi 60 mm. Obudowy typu ŁP zostały umieszczone odległości co 0.5 m. (Rys. 15).

W obu przypadkach skomplikowana konstrukcja trójwymiarowego modelu obliczeniowego wymagała dyskretyzacji siatką niestrukturalną (ang. *tri-pave*) przy użyciu funkcji kontroli rozmiaru siatki (ang. *size function*). Ze względu na duży rozmiar modelu i dobór gęstej siatki obliczeniowej autorzy zdecydowali się na konwersję siatki *tri-pave* na siatkę wielościanną (ang. *polyhedra*). Zaletą używania tego typu siatki jest dokładniejsze uzyskanie wyników poprzez konwertowanie wypaczonych komórek oraz szybsze uzyskanie wyniku końcowego dzięki mniejszej liczbie komórek w porównaniu do siatki typu *tri-pave*. Konwersję siatki dokonano przy użyciu oprogramowania Fluent 13.

3.3.2. Warunki brzegowe

Uzyskując dane o strumieniu objętości przepływu było możliwe porównanie metod numerycznych z wynikami pomiarów dla prędkości na wlocie (*velocity inlet*) 3.61 m/s. Przyjęto:

- średnice hydrauliczną – 3.84 m,
- intensywność turbulencji – 10%.



Rys. 15. Wymiary żeber obudowy typu LP [mm]

Dla pierwszego wariantu wylot został zdefiniowany jako *outflow*, w przypadku periodycznym założono równość wydatku masowego na wlocie i wylocie. Ściany oraz obudowa typu LP jako z chropowatością o wysokości rzędu 5 cm.

Model został poddany obliczeniom w czasie nieustalonym o skoku czasowym 0.01 s. Wykorzystano modelu turbulencji *k-ε* przy użyciu okresowego warunku brzegowego (ang. *periodic boundary condition*). Warunek ten pozwala na automatyczny eksport warunków z warstwy wylotowej na warstwę wlotową. Uzasadnieniem wyboru sposobu obliczeniowego jest budowa chodnika kopalnianego w którym wolna przestrzeń pomiędzy podporami stropu występuje cyklicznie.

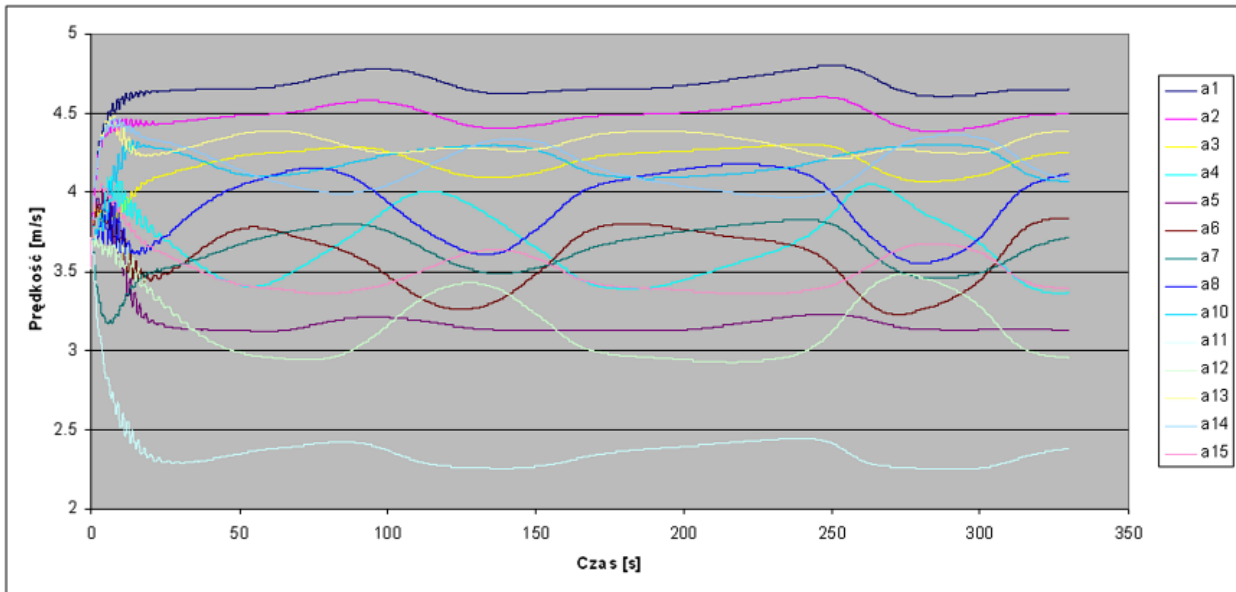
Poprzez rozmieszczenie punktów pomiarowych w przekroju modelu trójwymiarowego, możliwy będzie pomiar prędkości przepływu powietrza w sposób identyczny jak w przypadku pomiarów w chodniku kopalnianym z wykorzystaniem WSPPP. Pomiar prędkości ustawiono na każdy krok czasowy co daje częstotliwość 100 Hz.

4. Porównanie wyników symulacji komputerowych z pomiarami

Posługując się schematem umiejscowienia anemometrów w chodniku górniczym autorzy zdecydowali się na wybranie kilku prostych odcinków w przekroju, pokrywających się z liniami wzdłuż których rozmieszczono anemometry, które umożliwiły dokładniejsze zobrazowanie profili prędkości. Poprzez „x” oznaczono szerokość chodnika od prawego ociosu patrząc w kierunku przepływu, poprzez „y” wysokość chodnika od spągu.

Tab. 1. Zbiory anemometrów należących do danych prostych (Rys. 1)

Prosta	Nr anemometru	Prosta	Nr anemometru
$x = 1.1$	1	$y = 0.82$	1
	2		4
	3		8
$x = 2$	4		13
	5	2	
	6	5	
	7	10	
$x = 2.89$	8	14	
	10	3	
	11	6	
	12	12	
$x = 3.72$	13	15	
	14	7	
	15	11	
		$y = 2.19$	
		$y = 2.79$	



Rys. 16. Wskazania prędkości w punktach pomiarowych w czasie 330 sekund

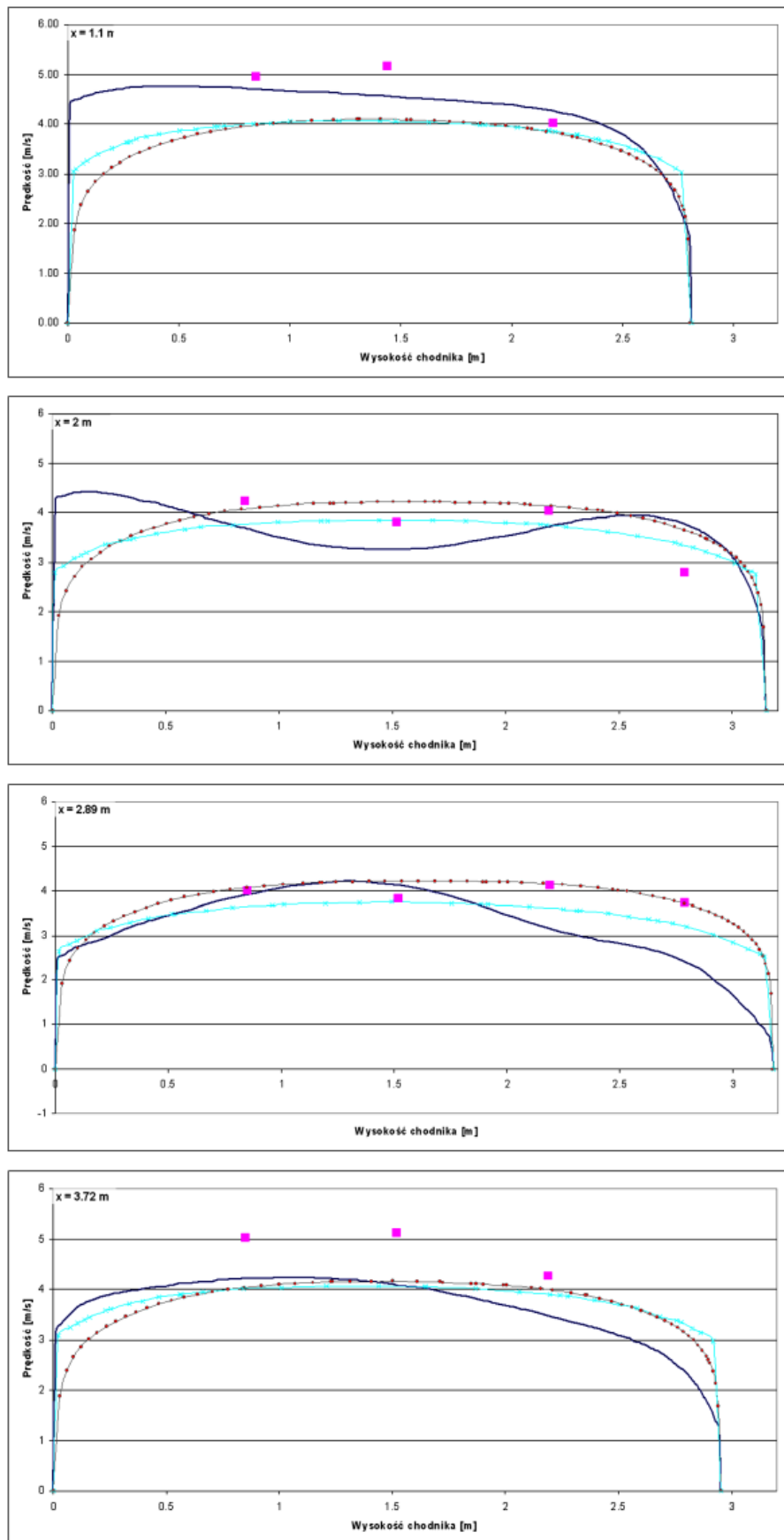
Dla najdokładniejszego modelu konieczne było modelowanie nieustalonego przepływu z powodu występujących oscylacji. Konieczność dojścia do ustabilizowanego cyklu granicznego znacznie wydłużyła czas obliczeń. Okres cyklu był znacznie dłuższy niż dla zadania dwuwymiarowego i wynosił około 147 s. Co więcej, nie osiągnięto spodziewanej symetrii rozwiązania. Prawdopodobnie przyjęto zbyt krótkie odcinki z podporami i warunek okresowości kępował proces naprzemiennej generacji wirów. W dalszych pracach planuje się użycie okresowych modeli dwuwymiarowych dla sprawdzenia tej hipotezy i ewentualnego doboru geometrii obszaru. Dla wstępnej analizy wyniki te zostaną uwzględnione. Podobnie jak dla dwuwymiarowego modelu do porównania wzięto profile prędkości uśrednione po dwóch okresach.

Tab. 2. Porównanie wartości zmierzonych z wartościami obliczonymi

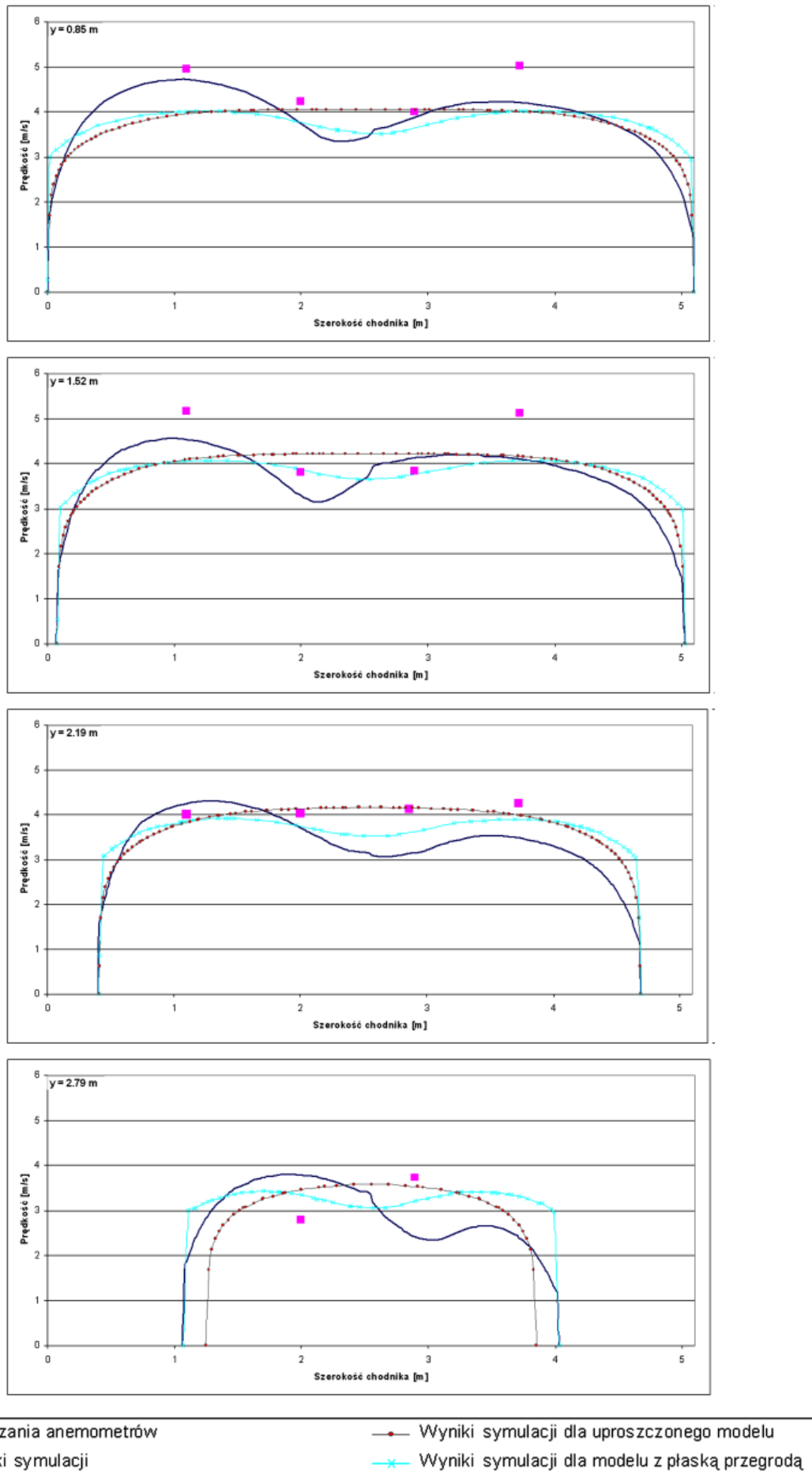
Numer anemometru	Wartości zmierzone [m/s]	Wartości obliczone [m/s]
1	4.96	4.66
2	5.17	4.46
3	4.01	4.17
4	4.24	3.68
5	3.81	3.14
6	4.03	3.51
7	2.79	3.60
8	4.00	3.85
10	3.83	4.22
11	3.73	2.31
12	4.13	3.19
13	5.03	4.30
14	5.12	4.21
15	4.27	3.52

Uzyskane wyniki przeprowadzonych obliczeń, przedstawione w postaci tabelarycznej, zawierają porównanie wartości prędkości zmierzonych czujnikami anemometrycznymi wielopunktowego systemu pomiaru pól prędkości, z wartościami dla trzech wariantów obliczeń zrealizowanych metodą objętości skończonej.

Wyniki zostały również przedstawione w formie graficznej, na wykresach rozkładu prędkości przepływu powietrza w wybranych miejscach przekroju chodnika kopalnianego, przy użyciu czterech prostych pionowych ($x = 1.1$, $x = 2$, $x = 2.89$, $x = 3.72$ m – Rys. 17) oraz czterech poziomych ($y = 0.85$, $y = 1.52$, 2.19 , $y = 2.79$ m – Rys. 18).



Rys. 17. Rozkład prędkości przepływu powietrza w pionowych przekrojach chodnika kopalnianego



Rys. 18. Rozkłady prędkości przepływu powietrza w poziomych przekrojach chodnika kopalnianego

Porównanie poszczególnych wariantów obliczeniowych z pomiarami przemawia za obecnością cienia aerodynamicznego w przekroju pomiarowym. W szczególności widać to na poziomych przekrojach z Rys. 18. Podobieństwo rozkładów rośnie wraz z wiernością modelu

Podczas pomiarów strumień objętości został obliczony bez uwzględnienia obecności śladu aerodynamicznego. Symulacje komputerowe wskazują na to, że faktyczna wartość strumienia jest prawdopodobnie mniejsza.

5. Podsumowanie

Przeprowadzono badania porównawcze pomiarów rozkładów pól prędkości wykonanych przy wykorzystaniu wielopunktowego systemu pomiaru pól prędkości i symulacji komputerowej, przy użyciu programu Fluent 13.

Pierwsze obliczenia przeprowadzono dla modelu trójwymiarowego, w którym nie uwzględniono obecności elementów konstrukcyjnych w wyrobisku. W porównaniu symulacji i pomiarów prędkości dostrzeżono znaczące różnice. Przeprowadzono dodatkowe analizy, które miały sprawdzić, w jakim stopniu pominięte elementy mają wpływ na kształtowanie się profilu prędkości. W pierwszej kolejności porównano modele dwuwymiarowe o różnych geometriach w celu wstępnego zbadania wpływu elementów chodnika górniczego oraz zbadanie zachodzących zjawisk przepływowych w wybranych odcinku chodnika kopalnianego.

Analiza badań wpływu żeber obudowy typu ŁP wykazała skłonność do kształtowania się grubszej warstwy przyściennej, co potwierdza znane z literatury zjawisko recyrkulacji strugi powietrza we wnękach pomiędzy żebrami obudowy. Podczas badania wpływu podpór stropu zaobserwowano powstawanie wirów Karmana oraz kształtowanie się większego śladu aerodynamicznego w porównaniu do modelu o litej przegrodzie. Uzyskane wyniki prognoz w różnych dwuwymiarowych modelach chodnika kopalnianego pokazują znaczący wpływ występujących w chodniku kopalnianym elementów na rozkład profilu prędkości, których pominięcie podczas kolejnych symulacji skutkowało by uzyskaniem błędnych wyników.

Pomiar strumienia objętości metodą pola prędkości w chodnikach kopalnianych nie zawsze może być prowadzony w sprzyjających warunkach. W szczególności obecność lokalnych zaburzeń przepływu może istotnie wpływać na kształt profilu. W takiej sytuacji symulacja komputerowa trójwymiarowego przepływu może być przydatna dla określenia właściwego rozmieszczenia anemometrów w przekroju pomiarowym, względnie pomóc w oszacowaniu dodatkowej niepewności pomiaru spowodowanej przez te zaburzenia.

Praca została wykonana w roku 2011 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Benocci C., Lohasz M., Rambaud P., 2003. *LES simulation of ribbed square duct flow with fluent and comparison with PIV data*. CMFF'03.
- Fluent User Manual, 2002.
- Janus J., Krawczyk J., Kruczkowski J., 2010. *Pomiary strumienia objętości przepływu w aspekcie dynamiki anemometrycznych czujników pomiarowych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworów PAN, Tom 12, nr 1-4. Kraków.
- Mushatet K.S., 2011. *Simulation of turbulent flow and heat transfer over a backward-facing step with ribs turbulators*. Thermal Science, Vol. 15, No. 1, pp. 245-255.
- Krach A., Krawczyk J., Kruczkowski J., Pałka T., 2006. *Zmienność pola prędkości i strumienia objętości powietrza w wyrobiskach kopalnianych kopalń głębinowych*. Arch. Min. Sci., Monografia, Nr 1.
- Krawczyk J., 2007. *Jedno i wielowymiarowe modele niestacjonarnych przepływów powietrza i gazów w wyrobiskach kopalnianych. Przykłady zastosowań*. Arch. Min. Sci., Monografia, Nr 2.
- Ligęza P., Poleszczyk E., Skotniczny P., 2009. *A three-dimensional Modeling of the Structure of Flow Parameter Fields in Mine Drifts*. Arch. Min. Sci., Vol. 54, No 4, p. 601-621.
- Ligęza P., Krawczyk J., Poleszczyk E., Skotniczny P., 2009. *Advanced Hot-Wire Anemometric Measurement of the Air velocity Fields in Mine Headings*. Arch. Min. Sci., Vol. 56, No 4, p. 683-699.
- Silvester S.A., 2002. *The Integration of CFD and VR Methods to Assist Auxiliary Ventilation Practice*. PhD Thesis. The University of Nottingham, Nottingham.
- 1Skotniczny P., 2005. *Symulacja przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych*. Przegląd Górniczy, nr 7-8, s. 54-62.

Comparing numerical simulations with the results of measurements of velocity field distributions in gallery cross-sections

Abstract

Selecting the right measurement spot in the excavation cross-section is essential for the accuracy of volume measurement in underground excavations. For practical reasons, it is not always possible to perform measurements in conditions that would ensure the smallest possible degree of uncertainty. Local disturbances of the flow in the area surrounding the measurement cross-section have a significant effect upon the measurement result. To estimate this effect, it might be useful to apply three-dimensional flow modeling in this part of the post-mining excavation where the measurement spot is localized. A series of flow simulations was carried out by means of the finite volume method in order to recreate the conditions in the measurement spot. The simulation results were compared with velocity field distributions, measured under real conditions. The comparisons enhanced the reliability of the interpretation of the simulation results. Sources of errors were stated, together with a possibility of formulating recommendations regarding the optimal placement of velocity sensors, with a view to ensuring measurement accuracy.

Keywords: velocity field, numerical flow simulation, vane anemometers