

# Pola prędkości w zakrętach i skrzyżowaniach chodników kopalnianych

## Velocity field in the corners and intersections of mine drifts



*Dr hab. inż. Jerzy Krawczyk\**



*Mgr inż. Jakub Janus\**

**Treść:** W strukturze wyrobisk kopalnianych są miejsca, w których strumień powietrza zmienia swój kierunek. Są nimi zakręty i skrzyżowania. Zmiana ta powoduje powstanie lokalnych zakłóceń przepływu, które mogą sprzyjać powstawaniu zagrożeń względnie ograniczać możliwości wykonywania pomiarów wentylacyjnych. Jednym ze sposobów określania formy i zasięgu zakłóceń przepływu jest coraz powszechniej stosowana symulacja komputerowa metodą objętości skończonej. Przy współczesnym stopniu rozwoju metod numerycznych, oprogramowania i sprzętu możliwe jest rozwiązywanie trójwymiarowych zagadnień przepływowych dla odcinków chodników kopalnianych o sumarycznej długości rzędu kilkudziesięciu metrów. Wynikiem są pola prędkości w tych obszarach. Analizując je, można z zadowalającym przybliżeniem ocenić rodzaj i zasięg zakłóceń przepływu. W artykule rozpatrywano wiele przypadków zmian kierunku przepływu, które w większości były oparte na rzeczywistych obiektach. W szczególności analizowano przypadek łagodnego łuku oraz często spotykane przypadki skrzyżowań prostokątnych chodników. Przedstawiono sposób modelowania oraz szczególne cechy przepływu w zakrętach i skrzyżowaniach. Wyniki odniesiono do kryteriów wyboru miejsc instalowania anemometrów stacjonarnych i prowadzenia pomiarów średniej prędkości metodą trawersowania w rozpatrywanych obszarach.

**Abstract:** In the structure of mine there are places where airflow direction changes. There are corners and intersections. Those changes cause local flow disturbances that can further the emergence of threats or reduce measurement capability. One of the methods of determining the form and range of flow disturbance is the finite volume method computer simulation. Nowadays, it is possible to solve the three-dimensional flow problems for the sections of mine drifts with a total length of several tens of meters. The result is the velocity field in those areas. This paper presents several cases of flow direction changes, most of which were based on real objects. Most of all, the mild turns and frequently encountered cases of perpendicular intersections were analyzed.

### Słowa kluczowe:

wentylacja kopalń, numeryczna mechanika płynów, skrzyżowania chodników, zakręty

### Key words:

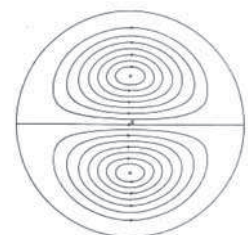
mine ventilation, numerical fluid mechanics, sidewalks intersections, turns

## 1. Wprowadzenie

Większość chodników kopalnianych ma przebieg zbliżony do prostoliniowego. Zmiany kierunku przepływu występują w rozgałęzieniach i mają dość gwałtowny charakter. Jednak niekiedy warunki geologiczne lub wymogi techniczne sprawiają, że odcinki chodników są nachylone lub przyjmują kształt łagodniejszych łuków.

Zmiana kierunku przepływu powoduje powstawanie tak zwanych wirów wtórnych. Zagadnienie to było analizowane przez wielu autorów. Fundamentalne znaczenie mają prace

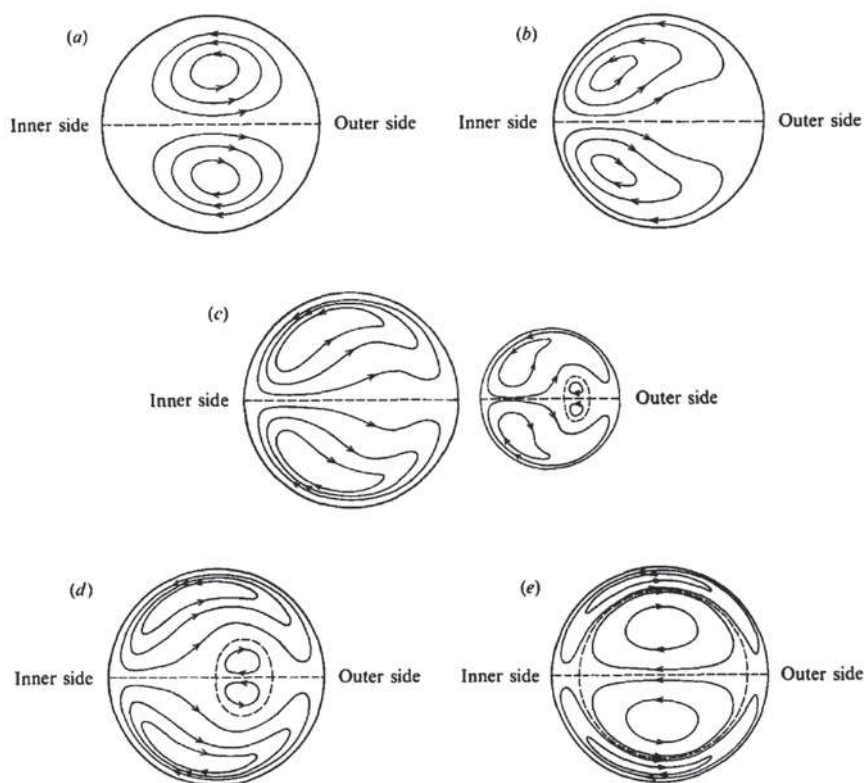
Deana [1927], który sformułował i zdefiniował tak zwaną liczbę Deana, która jest używana jako miara warunków do powstawania takich wirów. W turbulentnym przepływie wiry te mogą występować w różnych postaciach, [8].



**Rys. 1. Klasyczna forma wirów wtórnych, [2]**

**Fig. 1. Classic form of secondary vortices, [2]**

\* ) Instytut Mechaniki Górniczej PAN w Krakowie



Rys. 2. Wybrane postaci wirów wtórnych dla turbulentnego przepływu w zakrzywionych przewodach o przekroju kołowym [8]

Fig. 2. Selected secondary vortices for turbulent flow in a cross section circle curved pipes [8]

Badania tego zjawiska prowadzono głównie dla przewodów o przekroju kołowym. Brak danych literaturowych odnośnie przepływu w zakrzywionych przewodach dla kształtu przekroju wyrobisk w obudowie łukowej uzasadniał przeprowadzenie szeregu symulacji i pomiarów dla uzyskania obrazu tego zjawiska. Wiry wtórne dodają składową prędkości w płaszczyźnie przekroju. Może ona mieć wpływ na wskazania anemometrów. Co więcej wiry te mogą być niestacjonarne, to znaczy okresowo zmieniać swoją postać, co może być dodatkowym źródłem trudnych do interpretacji zakłóceń.

Przeanalizowano także skrajne warianty, jak np. łagodny poziomy zakręt i przepływ w skrzyżowaniach, gdzie często następuje skokowa zmiana kierunku przepływu.

## 2. Symulacje numeryczne pola prędkości w zakrętach i skrzyżowaniach chodników kopalnianych

### 2.1. Łagodna zmiana kierunku osi wyrobiska - przepływ w zakręcie chodnika

Dla zobrazowania wpływu zakrętów przeprowadzono symulację przepływu w obszarze zawierającym odcinek chodnika wydrążony po łuku. Obliczenia pozwolą ocenić, na ile znane z literatury [7] zjawiska przepływowe występujące w zakrętach przewodów o przekrojach kołowym i prostokątnym mogą pojawiać się w chodnikach kopalni i jaki jest ich zasięg w dalszym prostoliniowym odcinku chodnika. Jak wspomniano wcześniej, zmiana kierunku przepływu powoduje generowanie tak zwanych wirów wtórnych i pojawienie się składowych prędkości prostopadłych do osi chodnika. Mogą one być porównywalne ze składową prędkością równoległą do osi. Forma tych wirów zmienia się na długości zakrętu. Za zakrętem kształt profilu stopniowo wraca do rozwiniętego, jednak wpływ zakrętu na rozkład prędkości bywa zauważalny nawet w odległości kilkudziesięciu średnic hydraulicznych wyrobiska.

Zagadnienie przepływu w zakręcie było analizowane dla przewodów o przekrojach kołowym i prostokątnym. Przykładowe obrazy charakterystycznych cech przepływu, zaczerpnięte z pracy [4] przedstawia rys. 3. Przepływy i rozkład prędkości dla różnych przekrojów pokazane na rys. 4, 5, 6.

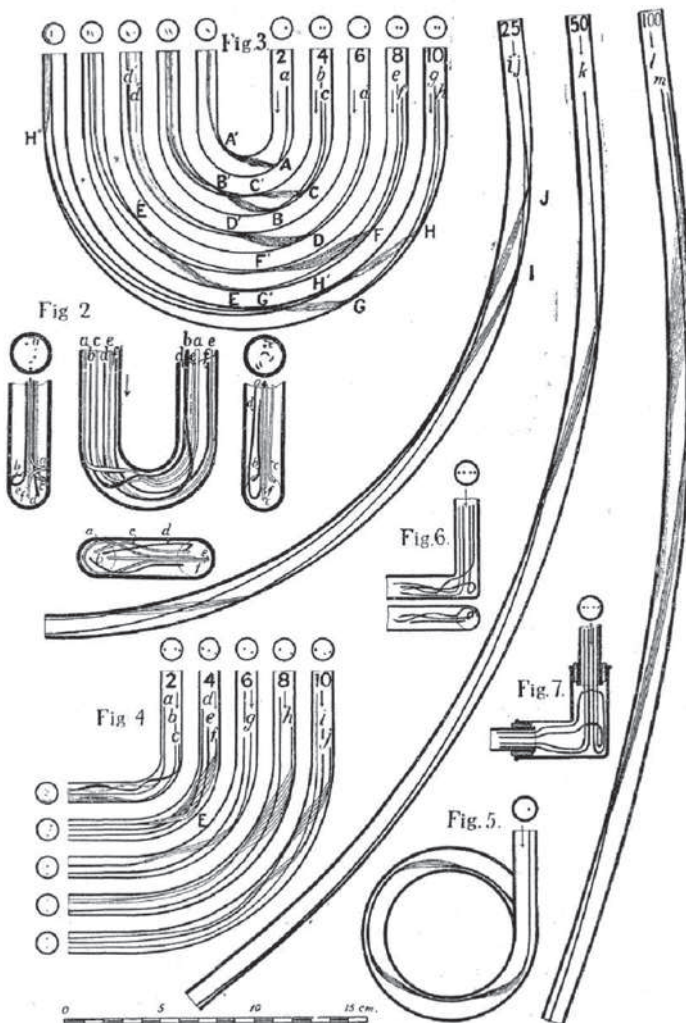
W prostoliniowym odcinku chodnika za zakrętem wiry wtórne stopniowo zanikają. Zmiany kształtu profilu prędkości utrzymują się na znacznej długości odcinka, [6].

### 2.2. Charakterystyka przepływu w początkowym odcinku chodnika za skrzyżowaniem

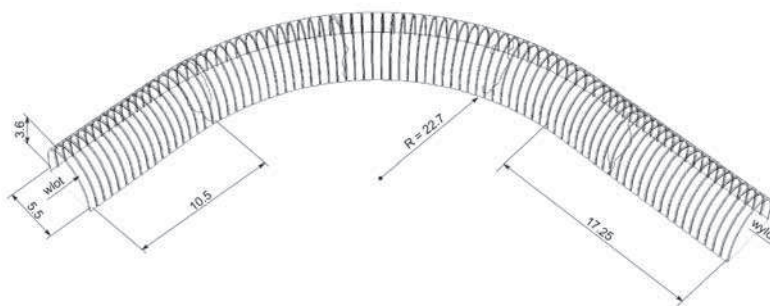
Częstym miejscem lokalizacji anemometrów stacjonarnych w chodnikach doprowadzających powietrze do ścian wydobywczych jest odcinek w pobliżu skrzyżowania z przekopem udostępniającym rejon. Zwykle chodnik jest drażony prostopadle do przekopu lub pod zbliżonym kątem. Na dolocie chodnika następuje zmiana kierunku przepływu, najczęściej o 90 stopni, co wraz z ewentualną zmianą pola przekroju poprzecznego jest źródłem zaburzeń przepływu, które mogą mieć wpływ na jakość punktowych pomiarów prędkości przy pomocy umieszczonych tam anemometrów stacjonarnych, [5]. Zasięg i postać zaburzeń przepływu można ocenić na podstawie symulacji przepływu. Wiarygodność tych symulacji oparto na wcześniejszych doświadczeniach i przypadku testowym zweryfikowanym pomiarami in situ.

Niestety nie dysponowano danymi pomiarowymi dla skrzyżowania z prostopadłym ułożeniem chodników bez dodatkowych źródeł zakłóceń przepływu. Z tego powodu wykorzystano dane dla skrzyżowania chodników pod kątem 70°, które użyto jako przypadek testowy do weryfikacji przyjętej metodyki symulacji. Przypadek ten dotyczył otoczenia początkowego odcinka chodnika C-3 kopalni P (rys. 7). W chodniku tym przekroju odległym o 25 m od wlotu wykonano rejestrację pola prędkości przy pomocy systemu wielopunktowego. Zgodność pomiarów i symulacji w tym przekroju

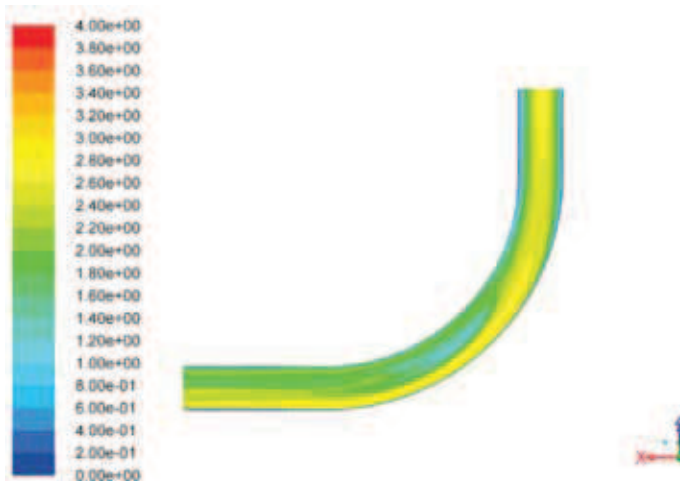
Eustice (1911)



Rys. 3. Obrazy charakterystycznych cech przepływu w zakrzywionych przewodach [4]  
 Fig. 3. Image of the characteristic flow in curved lines [4]

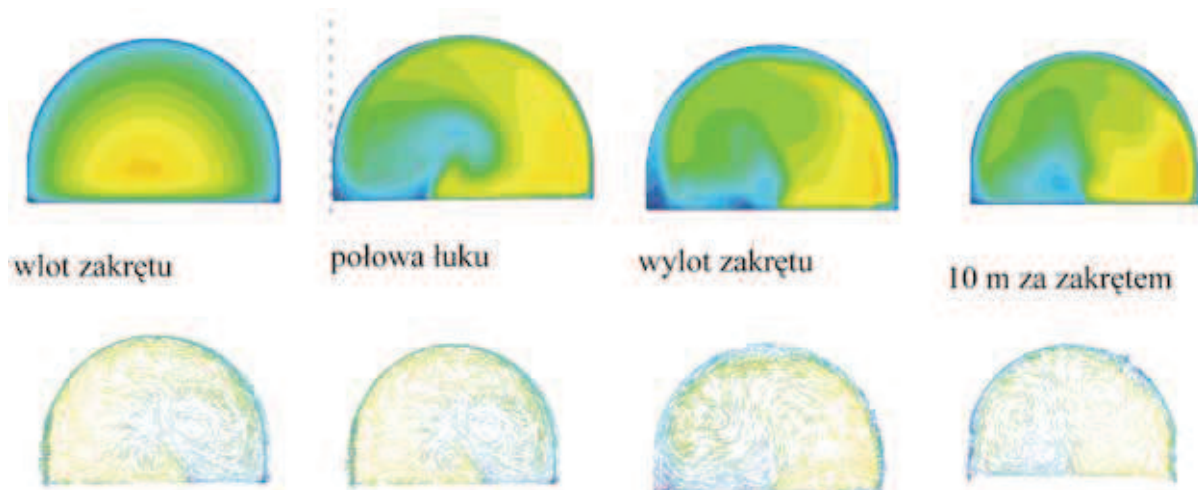


Rys. 4. Przepływ w zakręcie – geometria obszaru  
 Fig. 4. Flow in turn-areas geometry



Rys. 5. Rozkład prędkości w poziomej płaszczyźnie przekroju  
 Fig. 5. Velocity distribution in the horizontal cross-section





Rys. 6. Rozkłady i wektory prędkości w wybranych przekrojach wyrobiska

Fig. 6. Distributions and velocity vectors in selected cross-sections

uzasadniła wiarygodność użytej metody analizy numerycznej. Po potwierdzeniu prawidłowości wyboru metody rozpatrzono przepływ dla skrzyżowania z powszechnie stosowanym układem prostopadłych chodników. Użyto w nich geometrii z kopalni K, której w chodniku podścianowym znajdowały się odrzwia tam bezpieczeństwa. W analizie przepływu w otoczeniu skrzyżowania pominięto obecność odrzwii. Dodatkowo stan przepływu na wylotach modelowanych odcinków posłużył jako warunek brzegowy symulacji kształtowania się rozwiniętego profilu w chodniku za skrzyżowaniami.

### 2.2.1. Przepływ w skrzyżowaniu chodnika C2 i C-3 kopalni P

Model wlotowego odcinka chodnika został opracowany na przykładzie fragmentu rejonu ściany C-1 kopalni P. W rejonie tym wykonano szereg pomiarów wentylacyjnych, między innymi we wlotowym odcinku pochylni C-3. W odległości 25 m od wlotu rozmieszczono system wielopunktowego pomiaru prędkości przepływu powietrza.

Do analizy wybrano początkowy odcinek pochylni C-3 wraz ze skrzyżowaniem z chodnikiem C-2 i krótkimi odcinkami tegoż chodnika, przed i za skrzyżowaniem. Miejsce to wybrano jako przypadek testowy ze względu na regularną geometrię wyrobisk i brak przeszkód w przekroju.

Dla systemu przewietrzania na U często umieszcza się odrzwia tam bezpieczeństwa blisko wlotu chodnika, co uniemożliwia analizę wpływu samego skrzyżowania na przepływ w chodniku. Pewną niedogodnością wybranej geometrii jest to, że pochylnia C-3 nie jest prostopadła do chodnika C-2. Jednak kąt ten ( $102^\circ$ ) jest zbliżony do prostego na tyle, że dobra zgodność pomiarów i obliczeń dla tego przypadku stanowi o wiarygodności metody numerycznej dla prostopadłych układów chodników.

Rejon ściany C-1 jest przewietrzany w systemie na Y. Powietrze do rejonu dopływa pochylnią C-2, a następnie chodnikiem C-2. Z chodnika C-2 odchodzi pochylnia C-3. W pochylni tej wykonano rejestrację pola prędkości w przekroju odległym o 25 m od wlotu. Pomiar średniej prędkości metodą trawersowania dał wyniki 1.28, 1.27 i 1.25 m/s.

Według służb kopalni do rejonu dopływało  $2700 \text{ m}^3/\text{min}$  (ściana  $1500 \text{ m}^3/\text{min}$ ). Wydatki i średnie prędkości obliczone według modelu VentZroby i przeskalowanie odpowiednio do wydatku w pochylni C-2 ( $1123 \text{ m}^3/\text{min}$ ) określa tabl. 1.



Rys. 7. Schemat rejonu ściany w pobliżu skrzyżowania

Fig. 7. Diagram of the longwall area near the intersection

Tablica 1. Przepływ w chodnikach C-2 i C-3

Table 1. Flow in C-2 and C-3 sidewalks

	VentZroby		$v_{sr}$	pomiar		$v_{sr}$
	Q	$v_{sr}$		Q	$v_{sr}$	
wyrobisko	$\text{m}^3/\text{min}$	$\text{m}^3/\text{s}$	m/s	$\text{m}^3/\text{min}$	$\text{m}^3/\text{s}$	m/s
Ch C-2 do pochylni C-3	1676	27,9	1,7	1958,5	32,6	2,00
Ch C-2 za pochylnią C-3	715	11,9	0,7	835,5	13,9	0,85
Pochylnia C-3 początek	961	16,0	1,0	<b>1123,0</b>	18,7	1,15

Przyjęto kształt przekroju pochylni zgodny z przekrojem pomiarowym. Dla chodnika C-2 skorzystano z dokumentacji projektowej (wymiary jak pochylnia C-3). Nachylenia wyrobisk odczytano z map pokładowych. W początkowym odcinku pochylni ma nachylenie 8%. Podobne nachylenie ma odcinek chodnika C2 doprowadzający powietrze do skrzyżowania. Przyjęto, że w odcinku zaraz za skrzyżowaniem chodnik C2 ma nadal takie samo nachylenie. Uznano, że można pominąć wpływ nachylenia na geometrię wyrobisk.

Przygotowano model skrzyżowania chodników (rys. 8), w którym można wyróżnić cztery fragmenty:

- odcinek chodnika C2 10 m przed skrzyżowaniem,
- skrzyżowanie o długości 5.77 m,
- odcinek 17 m chodnika C2 za skrzyżowaniem,
- odcinek 31.5 m pochylni C-3 za zakrętem skrzyżowania.

Chodniki miały szerokość 5.77 m i wysokość .6 m (w świetle łuków). Geometria modelu uwzględniła łuki obudowy typu ŁP o wysokości 137 mm, szerokości u podstawy 143 mm oraz szerokości górnej krawędzi 60 mm. Łuki te zostały umieszczone co 0.75 m. Dla spągu przyjęto chropowatość o wysokości 0.05 m, zaś dla wykładki oraz obudowy typu ŁP chropowatość o wysokości 0.001 m.

Geometria obszaru obliczeniowego i trudny do przewidzenia układ kierunków przepływu w otoczeniu skrzyżowania uzasadniał dyskretyzację czworościenną siatką niestrukturalną (ang. *tetrahedral*) 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 *tetrahedral* na siatkę wielościenne (ang. *polyhedra*). Zaletą używania tego typu siatki jest uzyskanie dokładniejszych wyników poprzez konwertowanie wypaczonych komórek oraz szybsze uzyskanie wyniku końcowego dzięki mniejszej liczbie komórek w porównaniu do siatki typu *tetrahedral*. Konwersji siatki dokonano przy użyciu oprogramowania ANSYS Fluent 15.

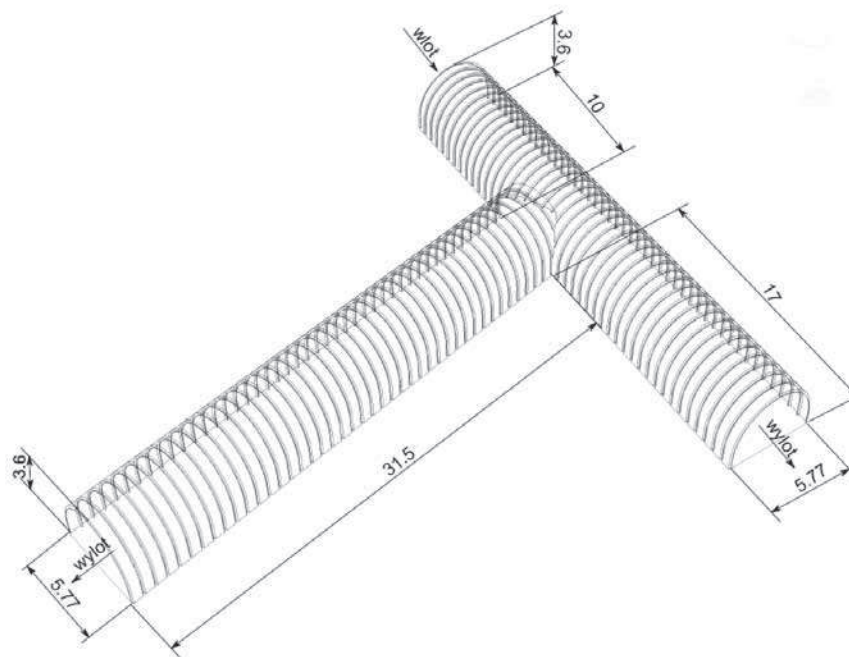
Na podstawie ilości powietrza płynącego w rejonie i wyników pomiarów systemu wielopunktowego zadano warunki brzegowe dla modelu zgodne z danymi z tabelicy 1.

Na wlocie chodnika C-2 zadano wygenerowany uprzednio rozwinięty profil prędkości i turbulencji (ang. *velocity inlet*) o wartości średniej 2 m/s. Warunki te dotyczyły zarówno wektora prędkości, jak i ciśnienia statycznego oraz parametrów turbulencji.

Dla zaprojektowanego modelu obliczeniowego wyloty z chodników za skrzyżowaniem zostały zdefiniowane jako swobodny wypływ (ang. *outflow*). Dla wylotów dobrano proporcje rozdziału strumieni, tak by w chodniku C-3 średnia prędkość była zgodna z pomiarami.

Obliczenia przeprowadzono dla modeli turbulencji k-e i k-w SST. Dla k-e otrzymano rozwiązanie stacjonarne. Model k-w SST osiągał dobrą zbieżność dla obliczeń przepływu niestacjonarnego z krokiem czasowym 0.1 s, [1].

Porównano pole prędkości w przekroju pomiarowym. Jak pokazuje tabl. 2 dla uśrednionych po czasie przebiegów prędkości obliczonych przy pomocy modelu turbulencji k-w SST osiągnięto zadowalającą zgodność obliczeń z danymi pomiarowymi. Największe różnice występują dla czwartej kolumny przy spągu i sąsiadujących czujników. W modelu struga pozostaje przyklejona do prawego ociosu przy spągu wskutek efektu Coandy (rys. 9). Za przekrojem pomiarowym struga odrywa się i ulega rozproszeniu, dając pole prędkości bardziej podobne do zmierzonego.



Rys. 8. Wymiary trójwymiarowego obszaru obliczeniowego skrzyżowania chodnika C2 i C3 KWK Pniówek, [m]

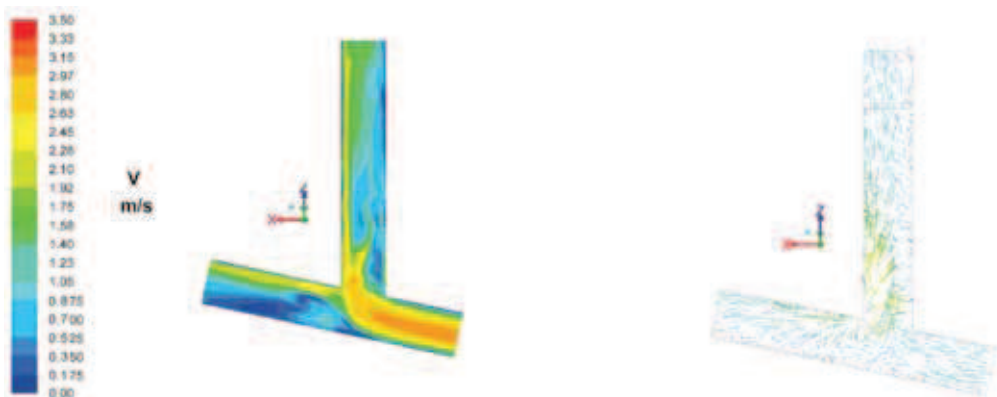
Fig. 8. Dimensions of three-dimensional computational area of C-2 and C-3 sidewalks intersection, Pniówek Coal Mine

Tablica. 2. Porównanie zarejestrowanych prędkości przepływu z obliczeniami dla modelu k-w SST  
Table 2. Comparison of the registered flow rates calculated in k-w SST model

czujnik nr	Kolumna I		czujnik nr	Kolumna II		czujnik nr	Kolumna III		czujnik nr	Kolumna IV	
	Fluent m/s	Pomiary m/s		Fluent m/s	Pomiary m/s		Fluent m/s	Pomiary m/s		Fluent m/s	Pomiary m/s
4	0,90	0,89	3	1,42	1,57	2	1,04	1,51	1	1,04	1,40
8	0,93	0,95	7	1,13	1,49	6	1,30	1,57	5	1,27	1,53
12	0,88	1,00	11	1,20	1,44	10	1,40	1,57	9	1,30	1,45
16	0,77	1,04	15	1,30	1,27	14	1,46	1,46	13	1,77	1,47



Rys. 9. Przepływ w skrzyżowaniu – widoki powierzchni stałej prędkości 1.8 m/s  
Fig. 9. Flow in the intersections – view of isosurface for 1.8 m/s velocity



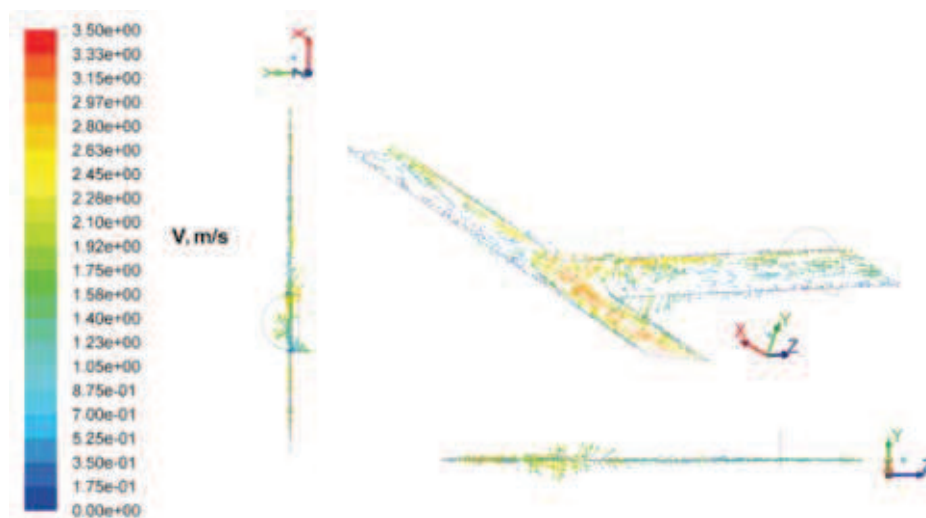
Rys. 10. Stan przepływu 0.8 m nad spągiem – rozkład prędkości i pole wektorów prędkości  
Fig. 10. State flow 0.8 m above floor – velocity distribution and velocity vectors field

Dla zweryfikowanego w ten sposób opisu przeprowadzono analizę pól prędkości w samym skrzyżowaniu i początkowym odcinku chodnika C-3. Stosując taki sam sposób modelowania, w kolejnym rozdziale analizowano również przepływ w typowej konfiguracji skrzyżowania, gdy chodnik jest drążony prostopadle do wyrobiska udostępniającego.

Chodnik i wyrobisko udostępniające są umieszczone niemal pod kątem prostym. W skrzyżowaniu struga powietrza

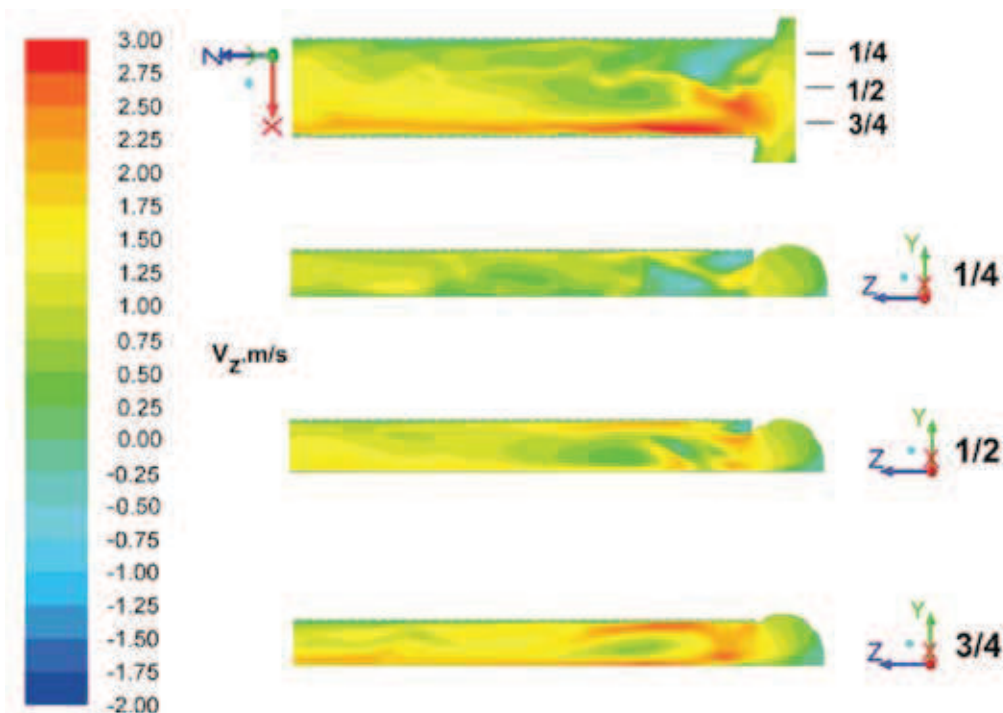
dopływająca przekopem rozgałęzia się. Siły bezwładności powodują, że struga wpływająca do chodnika przykleja się do ociosu po stronie napływu. W początkowym odcinku chodnika struga ta nie wypełnia całego przekroju wyrobiska. Powoduje to powstawanie wirów i stref recyrkulacji przepływu przy przeciwnym ociosie. Strefa ta rozciąga się na długości około 8 metrów, licząc od wlotu chodnika C-3.

Pola prędkości, rozkłady składowe, linie prądu przedstawiono na rys. 11 – 15.

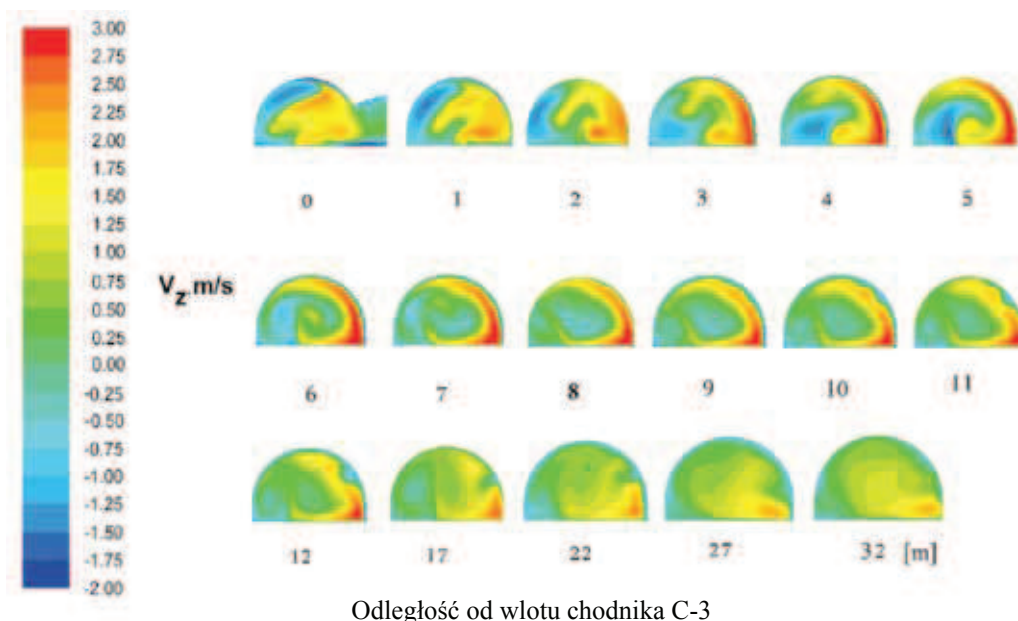


Rys. 11. Widoki pola prędkości dla wektorów zaczepionych do wybranej poziomej powierzchni (0.8 m nad spągiem)

Fig. 11. Views of the vectors velocity field on selected horizontal surface (0.8 m above floor)



Rys. 12. Rozkłady składowej prędkości równoległej do osi chodnika C-3  $v_z$  dla poziomego przekroju na wysokości 0.8 m nad spągiem i pionowych w  $1/4$ ,  $1/2$  i  $3/4$  szerokości chodnika  
 Fig. 12. Velocity component schedules parallel to the axis of the C-3 sidewalk for horizontal sections at 0.8 m above floor and vertical sections for  $1/4$ ,  $1/2$  i  $3/4$  sidewalk width



Rys. 13. Rozkłady składowej prędkości równoległej do osi chodnika C-3  $v_z$  w poprzecznych przekrojach chodnika, co 1 m od wlotu  
 Fig. 13. Velocity component schedules parallel to the axis of the C-3 side walk in transverse cross-sections of the sidewalk, 1 m from the inlet

Obszary lokalnego odwrócenia kierunku przepływu (kolor niebieski na skali barwnej) są widoczne na rozkładach prędkości, przedstawionych na kolejnych ilustracjach (rys. 16, rys. 17). W rozwiniętym przepływie w chodnikach dominuje składowa prędkości równoległa do osi. W otoczeniu skrzyżowania zmiana kierunku i rozgałęzienie przepływu powodują, że powstają lokalne trójwymiarowe struktury

w przepływie. Odpowiednio wektory prędkości mają składowe prostopadłe do osi wyrobisk. Pokazuje to rys. 11, na którym zamieszczono kilka widoków pola prędkości dla wektorów zaczepionych do wybranej poziomej powierzchni (0.8 m nad spągiem). Linie prądu wypływające z dwóch linii położonych 0.8 m nad spągiem – jedna w chodniku C-2 za skrzyżowaniem, a druga w chodniku C-3 przedstawia rys. 14.





Rys. 14. Linie prądu wypływające z wybranych linii w chodniku C-2 i C-3

Fig. 14. Flowing pathlines from the selected lines in the C-2 and C-3 sidewalks



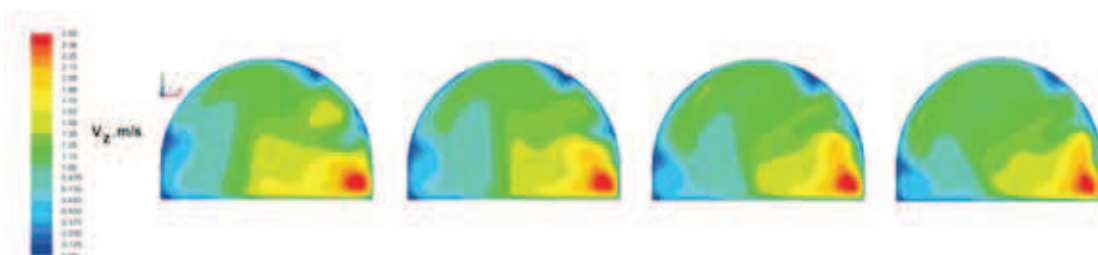
Rys. 15. Linie prądu wychodzące z powierzchni przekroju przy wlocie chodnika C-3, skala barwna określa składową w kierunku osi chodnika  $v_z$

Fig. 15. Output pathlines from inlet cross-sections of the C-2 and C-3 sidewalk, color scale determines the component in the direction of the sidewalk axis  $v_z$

W centralnej części przekroju chodnika C-3 powstaje spiralny wir widoczny na obrazach linii prądu wychodzących z powierzchni przekroju drugiego łuku chodnika, licząc od wlotu.

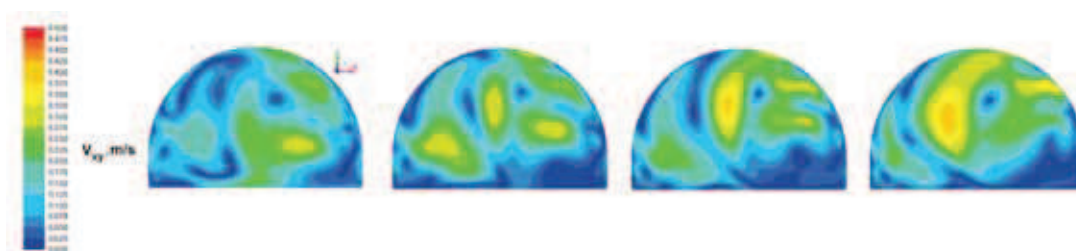
Obliczenia prowadzono dla modelu niestacjonarnego. Chwilowe obrazy przepływu co 1 sekundę symulacji po-

kazano na kolejnych ilustracjach (rys. 16, rys. 17, rys. 18). Obserwując obrazy dla kolejnych chwil czasowych, można stwierdzić, że opisane tutaj struktury zmieniają swoją postać i położenie w sposób zbliżony do okresowego, podobnie jak monitorowane w czasie obliczeń przebiegi prędkości.



Rys. 16. Rozkłady prędkości w kierunku osi wyrobiska  $v_z$  w przekroju pomiarowym co 1 sekundę symulacji

Fig. 16. Velocity distribution in the direction of the sidewalk axis  $v_z$  in cross-sections by measuring every second of simulation



Rys. 17. Rozkłady prędkości poprzecznej do osi wyrobiska  $v_{xy}$  w przekroju pomiarowym co 1 sekundę symulacji

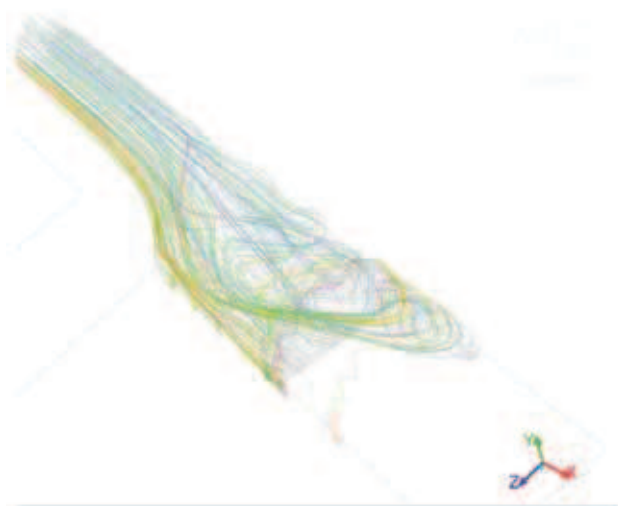
Fig. 17. Velocity distribution in the direction of the sidewalk axis  $v_{xy}$  in cross-sections by measuring every second of simulation





**Rys. 18. Powierzchnie stałej prędkości poprzecznej do osi wyrobiska  $v_{xy} = 0.3$  m/s co 1 sekundę symulacji**  
**Fig. 18. Isosurface of constant velocity transverse to the axis of sidewalk  $v_{xy} = 0.3$  m/s by measuring every second of simulation**

Oddalając się od skrzyżowania, struga rozszerza się i wypełnia cały przekrój chodnika. Rozmiary modelu skrzyżowania wybrano tak, by wyloty chodników znajdowały się za obszarami recyrkulacji.



**Rys. 19. Linie prądu prowadzące do przekroju w chodniku C-2 za skrzyżowaniem**  
**Fig. 19. Pathlines leading to the section of the C-2 sidewalk after intersection**

Struga płynąca nadal przekopem również zawęża się i przykleja do ociosu przyległego do wlotu chodnika (rys. 9, rys. 19).

**2.2.2. Przepływ w skrzyżowaniu o prostym ułożeniu chodników**

Drugi wariant to hipotetyczne skrzyżowanie chodników bez przeszkód. Służy on do analizy przepływu w sąsiedztwie zmiany kierunku przepływu o  $90^\circ$ , jaki następuje w takim skrzyżowaniu, [3]. Wykorzystano w nim geometrię z kopalni H po usunięciu odrzwi. Zaprojektowano model skrzyżowania chodników kopalnianych o wysokości 4.1 m oraz szerokości 5.9 m (rys. 20). Model składał się z 4 fragmentów:

- odcinek powierzchni przed skrzyżowaniem o długości 7 m,
- skrzyżowanie z przekopem o długości 5.9 m,
- odcinek 7 m powierzchni za skrzyżowaniem,
- początkowy odcinek przekopu o długości 27.75 m, licząc od skrzyżowania.

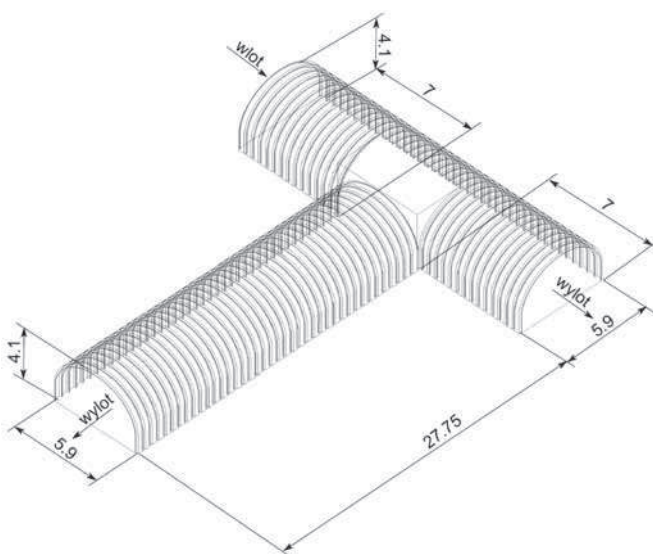
Podobnie jak w pokrewnych zagadnieniach, w modelu zostały również uwzględnione łuki obudowy typu ŁP rozsta-

wione w odległości 0.5 m, a obszar obliczeniowy podzielono na objętości czworokątne (ang. *tetrahedral*), a następnie przekonwertowano na objętości wielościenne (ang. *polyhedra*) przy użyciu oprogramowania ANSYS Fluent 15.

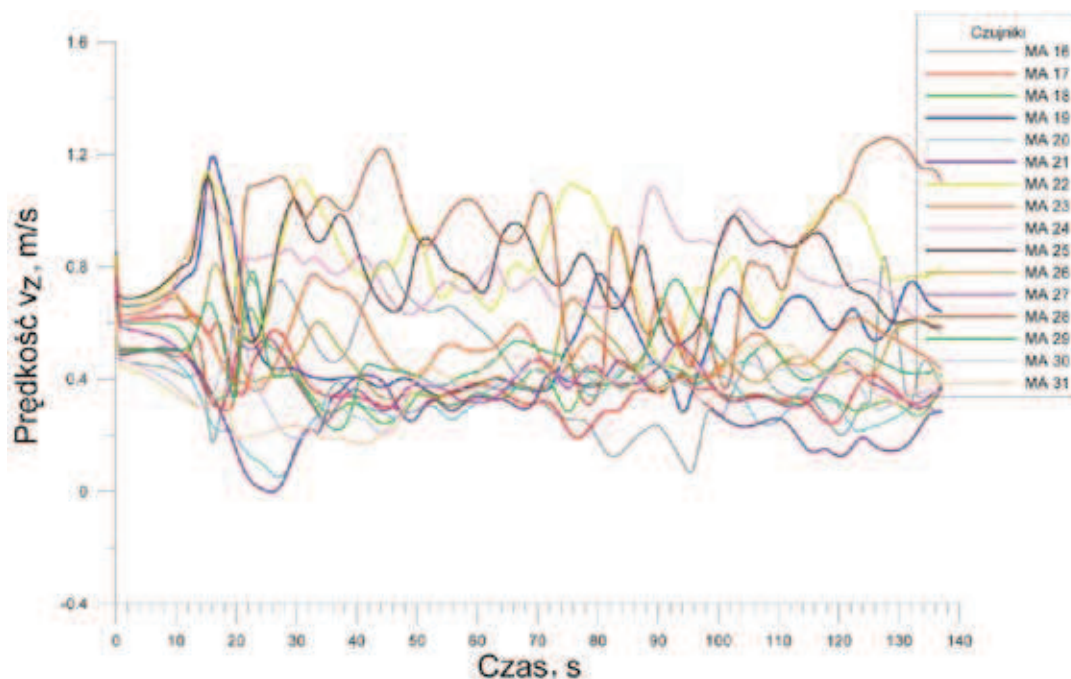
Jako warunek brzegowy na wlocie zadano uprzednio obliczony rozwinięty profil prędkości (ang. *velocity inlet*). Warunki określały rozkłady wektora prędkości, parametrów turbulencji oraz ciśnienia statycznego w przekroju. Rozpatrywano również uproszczony wariant z płaskim profilem prędkości na wlocie powierzchni.

Dla zaprojektowanego modelu obliczeniowego wyloty z chodników za skrzyżowaniem zostały zdefiniowane jako swobodne wypływy (*outflow*), z zadaniem udziałem wypływu z powierzchni i chodnika. Dla ociosu oraz obudowy typu ŁP przyjęto chropowatość o wysokości rzędu 1 mm, a dla spągu 5 cm.

Zastosowano typową metodykę obliczeń, rozpoczynając od hybrydowej inicjalizacji stacjonarnego przepływu dla modelu turbulencji k-e. Po otrzymaniu rozwiązania dla modelu ustalonego przepływu analizowano niestacjonarne przepływy dla modeli turbulencji k-e i k-w SST. W analizie procesu odtwarzania rozwiniętego profilu za skrzyżowaniem wykorzystano profil prędkości na wlocie chodnika otrzymany dla stacjonarnego rozwiązania i modelu k-e.



**Rys. 20. Wymiary trójwymiarowego obszaru obliczeniowego prostokątnego skrzyżowania chodników w metrach**  
**Fig. 20. Dimensions of three-dimensional computational area perpendicular intersection sidewalks, [m]**



Rys. 21. Przebiegi  $v_z$  - składowej prędkości równoległej do osi dowerzchni obliczone w wybranych punktach obszaru podczas symulacji niestacjonarnego przepływu (model k-w SST)

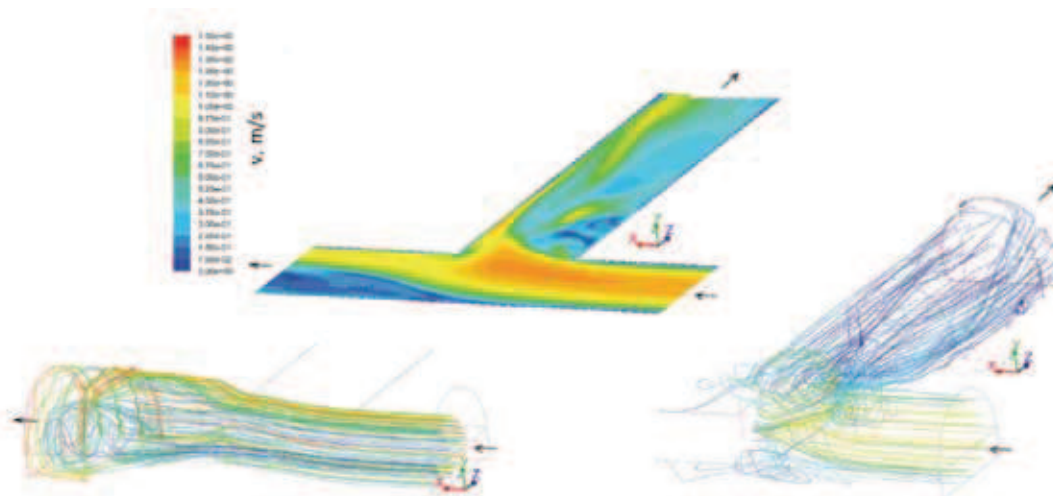
Fig. 21. Runs of  $v_z$  - velocity component parallel to the axis of the sidewalk calculated in selected points in the area during the simulation of unsteady flow (model k-w SST)

Symulacje niestacjonarnego przepływu wymagały przeprowadzenia wstępnych obliczeń. Realizując je, obserwowano zmienność prędkości w wybranych punktach obszaru rozmieszczonych w wybranych przekroju przekopu (rys. 21). Analizę można było rozpocząć, gdy oscylacje przepływu w pełni się rozwinęły i przebiegi były wystarczająco długie, by ocenić, że nie wykazują one trendów zmian wartości średnich. Obliczenia kontynuowano dla czasu 150 sekund. Do analizy wykorzystano końcowy odcinek tego przedziału.

Struga dopływająca dowerzchnią rozgałęzia się w skrzyżowaniu. Przyjęte warunki brzegowe narzucają proporcje strumieni objętości na wylotach dowerzchni i przekopu, zgodnie z rozplywem w rzeczywistym obiekcie.

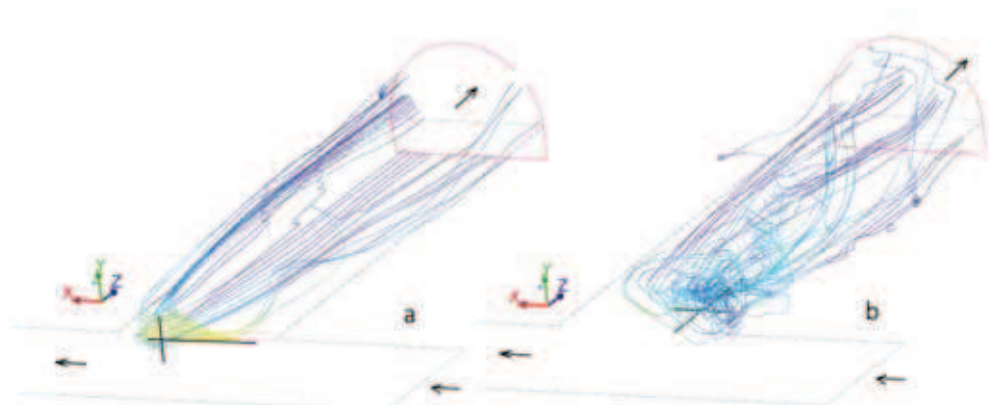
Analiza przepływu jest ilustrowana obrazami. Przedstawiają one przebieg linii prądu oraz rozkłady prędkości. Przebieg strug zasilających dowerzchnię i przekop zobrazowano wyznaczając linie prądu dopływające do ich wylotów (rys. 22). W pozostałych przypadkach linie prądu są wyznaczone od wybranych przekrojów.

Struga wpływająca do przekopu przykleja się do jego nawietrznego ociosu. Siły bezwładności powodują jej zwężenie. Po stronie zawiętrznej blisko wlotu przekopu jest obszar o bardzo złożonym i silnie niestacjonarnym polu prędkości. Występują w nim obszary recyrkulacji i powstają struktury koherentne, które są unoszone przez strugę dopływającą z dowerzchni w stronę wylotu przekopu. Obszary te pokazano

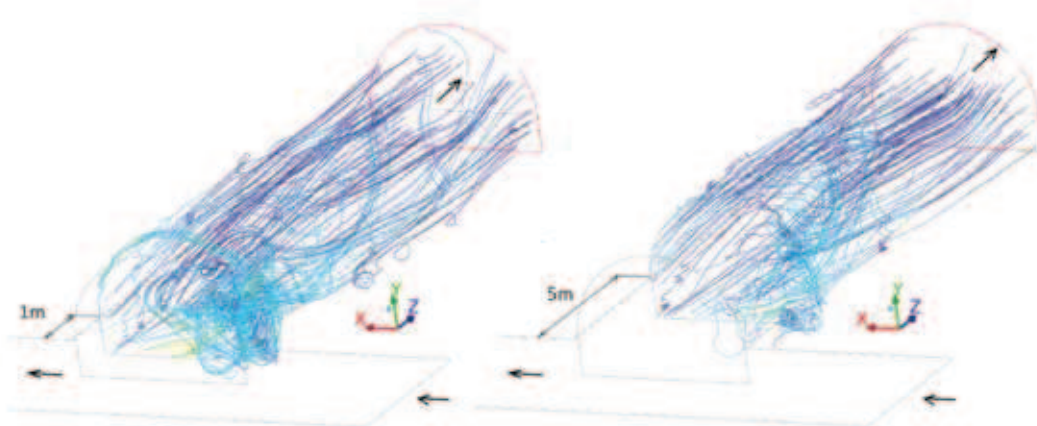


Rys. 22. Obraz linii prądu dopływających do wylotu dowerzchni i przekopu oraz rozkład prędkości 1.2 m nad spągiem

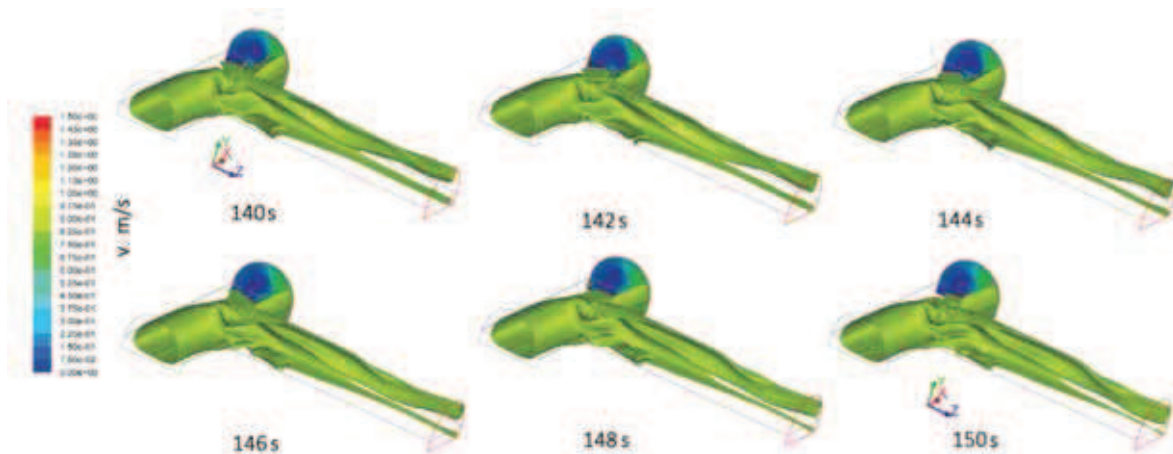
Fig. 22. Pathlines flowing to the sidewalks outlets and velocity distribution 1.2 m above floor



Rys. 23. Linie prądu wychodzące z linii w obszarze strugi dopływającej z dowerzchni (a) i linii w obszarze zawirowania przepływu w początkowym odcinku przekopu (b)  
 Fig. 23. Output pathlines from the lines in the area of flowing steam from the sidewalk (a) and lines in the swirl flow in the initial section of the sidewalk (b)



Rys. 24. Linie prądu wychodzące z przekrojów przekopu odległych o 1 i 5 m od wlotu  
 Fig. 24. Output pathlines from the sidewalk cross-section 1 and 5 m from the inlet



Rys. 25. Powierzchnie prędkości 0.9 m/s przedstawione w odstępach dwusekundowych  
 Fig. 25. Isosurface for 0.9 m/s velocity measuring every two-second simulation

na kolejnych rysunkach. Rys. 23 przedstawia przebieg linii prądu wychodzących z wybranych linii przy wlocie chodnika i drugiej pary linii w obszarze największego zawirowania.

Rysunek 23 ma ułatwić interpretację kolejnych. Linie prądu wychodzące z całych powierzchni przekrojów – odległego o 1 i 5 m od wlotu przekopu przedstawia rys. 24.

Stopień niestacjonarności przepływu można ocenić obserwując zmienność kształtu powierzchni stałej prędkości  $v=0.9$  m/s przedstawianej w dwusekundowych odstępach, które przedstawia rys. 25.

Ta część strugi, która nadal płynie dowerzchnią odrywa się od ociosu leżącego naprzeciw wlotu chodnika i przykleja



do ociosu od strony wlotu przekopu (rys. 22). Od połowy skrzyżowania przy ociosie przeciwnym wlotowi przekopu powstaje obszar recyrkulacji przepływu. Można spodziewać się, że na odcinku kilkudziesięciu metrów za skrzyżowaniem struga z powrotem wypełni cały przekrój powierzchni i obszar recyrkulacji zaniknie.

W zakresie modelowanego odcinka przekopu (ok. 30 m) struga jest początkowo przyklejona do nawietrznego ociosu, lecz w pobliżu wlotu odrywa się od niego i kieruje się w stronę środka przekroju.

### 3. Podsumowanie

W analizowanych modelach skrzyżowań w początkowym odcinku chodnika, położonego poprzecznie do kierunku dopływającego powietrza, zaburzenia przepływu wywołane przez zmianę kierunku przepływu o prawie 90° spowodowały powstanie znacznej niejednorodności rozkładu prędkości w przekrojach. W początkowym odcinku następowały lokalne odwrócenia kierunku przepływu po stronie zawietrznej. W obszarze tym trawersowanie przyrządem nierozróżniającym kierunku przepływu może dać dodatkowe błędy. Kolejnym źródłem błędów pomiaru prędkości mogą być występujące w początkowym odcinku chodnika znaczne odchylenie wektorów prędkości od osi chodnika i znaczne niejednorodności rozkładu prędkości.

*Niniejsza publikacja została opracowana w ramach realizacji Zadania nr 9 Projektu strategicznego pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR). Numer umowy SP/K/9/208300/13*

### Literatura

1. ANSYS [2013] Fluent User Manual, Ansys Inc.
2. Dean W., R.: Note on the motion of fluid in a curved pipe, Phil. Mag 4 1927, pp 208-223.
3. Dziurzyński W, Krawczyk J., Skotniczny P., Janus J., Ostrogórski P.: Badania eksperymentalne rozszerzonego systemu wraz z weryfikacją metodami symulacji komputerowych, w tym z wykorzystaniem modeli 3D. raport z realizacji Etapu 8 - części strategicznego projektu badawczego PS8 pt. Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach, IMG-PAN, 2014.
4. Eustice J.: Experiments on steam-line motion in curved pipes. Proc. Roy. Soc. 85, 1911.
5. Krawczyk J., Skotniczny P., Janus J.: Badania modelowe i eksperymentalne zakresu zmian prędkości powietrza rejestrowanych przez czujnik w zależności od jego umieszczenia oraz profilu prędkości powietrza w przekroju jego zabudowy, Raport końcowy z realizacji Zadania badawczego nr 1 Zadania nr 9 Projektu strategicznego pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach, SP/K/9/208300/13, wyd. IMG-PAN 2015, str. 173.
6. Menter F.: Turbulence Modeling for Engineering Flows, ANSYS 2012 Inc. www.ansys.com
7. Rove M.: Measurement and computations of flow in pipe bends, J. Fluid Mech. 1970, Vol 43, part 4, pp 771-783.
8. Sudo, K., Sumida M., Yamanae R.: Secondary motion of fully developed oscillatory flow in a curved pipe, J. Fluid Mech 237, 1992, pp 189-208.