

## Zastosowanie termooanemometrycznej metody pomiaru prędkości przepływu powietrza w górnictwie głębinowym

### Część 4 – Eksperymentalna weryfikacja numerycznej symulacji przepływu powietrza w wyrobisku

PRZEMYSŁAW SKOTNICZNY<sup>ID</sup>, ELŻBIETA POLESZCZYK<sup>ID</sup>, PAWEŁ LIGĘZA<sup>ID</sup>

*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 wyniki eksperymentalnej weryfikacji numerycznej symulacji przepływu powietrza w wyrobisku.

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

#### 1. Wprowadzenie

Symulacja numeryczna trójwymiarowego przepływu powietrza w wyrobisku górnictwym 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 paru set 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 termooanemometry, 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 górnictw 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 Górotworu PAN.

## 2. Przykład numerycznej symulacji przepływu w wyrobisku górnictw

Przepływowi płynu rzeczywistego w przewodzie zamkniętym towarzyszy szereg zjawisk, z których większość ma niekorzystny wpływ na wielkość strat, a więc i na sprawność przepływu płynu. Do najważniejszych należy zaliczyć zjawiska związane z turbulentnym charakterem przepływu płynu:

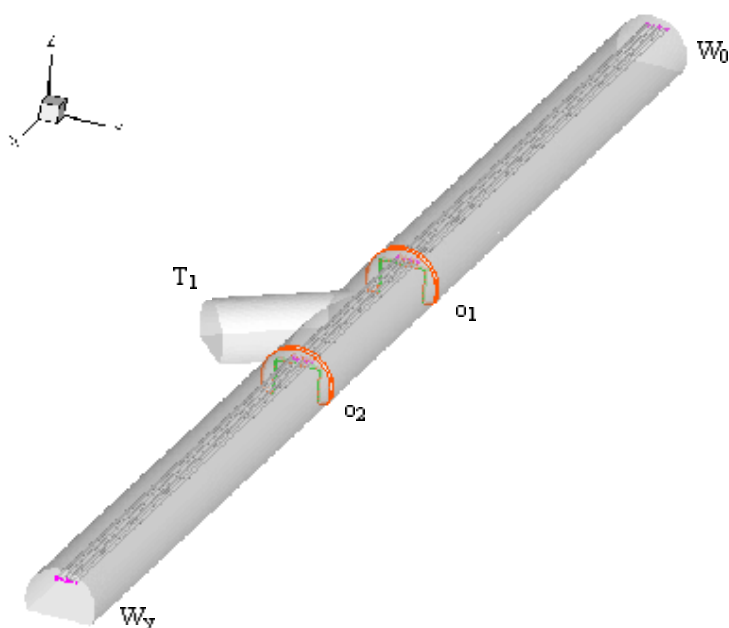
- powstawanie i rozwój warstwy przyściennej,
- obszary recyrkulacji,
- strefa rdzenia potencjalnego.

Najczęstszym sposobem redukcji wymienionych zjawisk jest specyficzne geometryczne ukształtowanie kanału. Stosuje się różnego rodzaju przystawki, zróżnicowania kształtu i chropowatości ścian kanału, które powodują zmniejszenie wpływu struktur turbulentnych na proces przepływu płynu w przewodzie zamkniętym [26].

W górnictwie, tego typu rozwiązania są trudne 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.

Symulacja numeryczna trójwymiarowego przepływu powietrza w wyrobisku górnictw jest zagadnieniem interesującym w aspekcie wyznaczenia lokalnych strat przepływu powietrza, które mają wpływ na sprawność procesu przewietrzania kopalń głębinowych. Obliczenia mogą być przeprowadzane dla wybranych rejonów, takich jak podszybia, skrzyżowania wyrobisk, otamowania, czyli takich, których rozległość nie przekracza paru set metrów [27].

Przykładowo przedstawiono wyniki symulacji przepływu powietrza w skrzyżowaniu przekopu północnego do szybu na poziomie 713 m z przekopem łączącym w kopalni B, przeprowadzone w programie Fluent 6.1.22. Poniżej zamieszczono Rys. 1, który ilustruje schemat zaprojektowanego skrzyżowania.

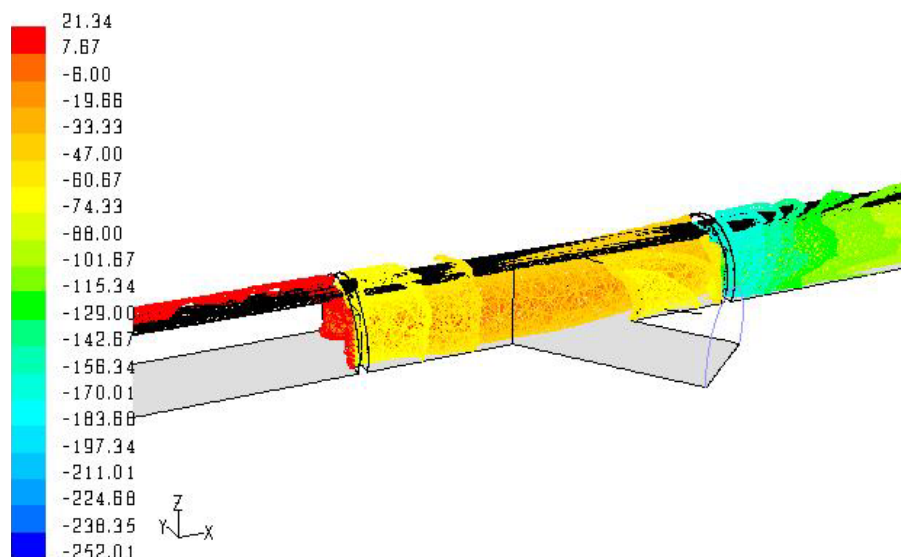


Rys. 1. Schemat skrzyżowania dwóch wyrobisk

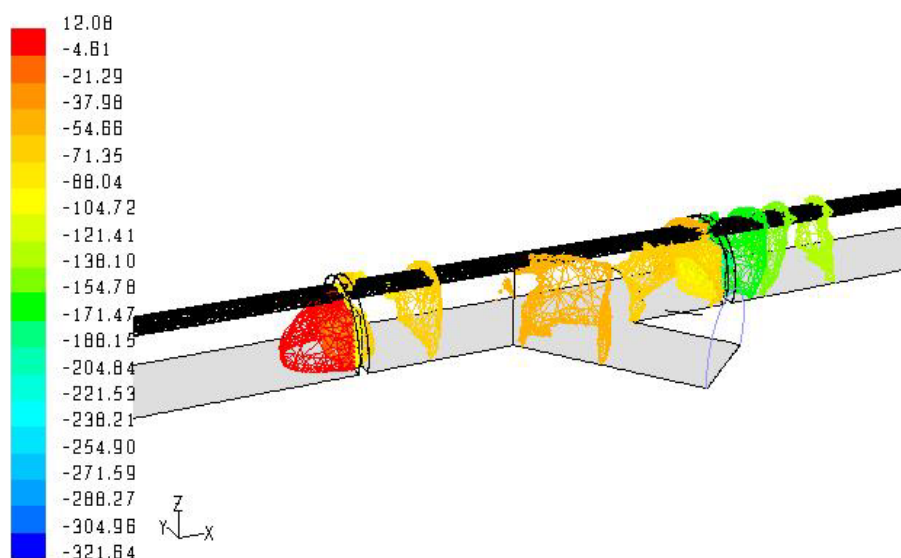
Powietrze przepływa od wlotu W0 poprzez odrzwia O1 oraz O2 opuszczając rejon przez wylot Wy. Dodatkowo, struga powietrza jest zasilana poprzez nieszczelności tamy T1 wprowadzające do układu stałą wartość strumienia objętości dodatkowego powietrza. Do obliczeń przyjęto następujące wielkości:

- Prędkość strugi powietrza na wlocie do rejonu  $W_0 = 5$ , m/s;
- Prędkość strugi powietrza płynącej z nieszczelności otamowania  $T_1 = 1.2$ , m/s;
- ciśnienie barometryczne odniesienia  $p_b = 108500$ , Pa;
- wilgotność względna  $f = 94\%$ .

Wyniki symulacji zaprezentowano na poniższych rysunkach. Na Rys. 2 przedstawiono rozkłady ciśnień całkowitych (Rys. 2a) oraz ciśnień statycznych (Rys. 2b) w omawianym rejonie.

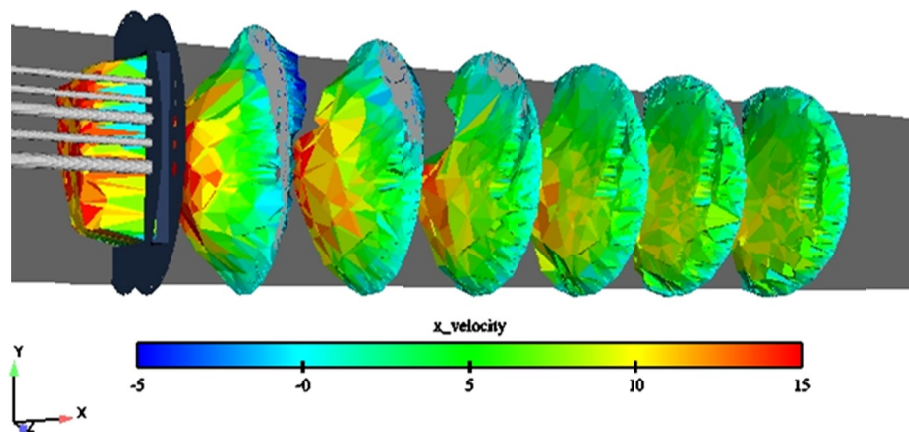


Rys. 2a. Rozkład ciśnień całkowitych



Rys. 2b. Rozkład ciśnień statycznych

Na szczególną uwagę zasługuje rozkład ciśnień, zarówno całkowitych jak i statycznych za odrzwiami  $O_2$ . W przebiegu izobar można zaobserwować występowanie obszarów o wartości ciśnienia paruset Pa poniżej ciśnienia odniesienia. Tego typu zjawisko wskazuje na istnienie w tym obszarze lokalnych stref recyrkulacji spowodowanych najprawdopodobniej zjawiskiem kontrakcji strugi za odrzwiami  $O_2$  oraz działaniem strugi powietrza wydostającej się z nieszczelności tamy  $T_1$ . Słuszność tego stwierdzenia potwierdza analiza profili prędkości za odrzwiami  $O_2$  zamieszczona na Rys. 3. (dotądnie wartości prędkości skierowane są przeciwnie do kierunku ruchu powietrza w celu lepszego uwypuklenia występowania strefy recyrkulacji).



Rys. 3. Zmiana profilu prędkości za odzwami

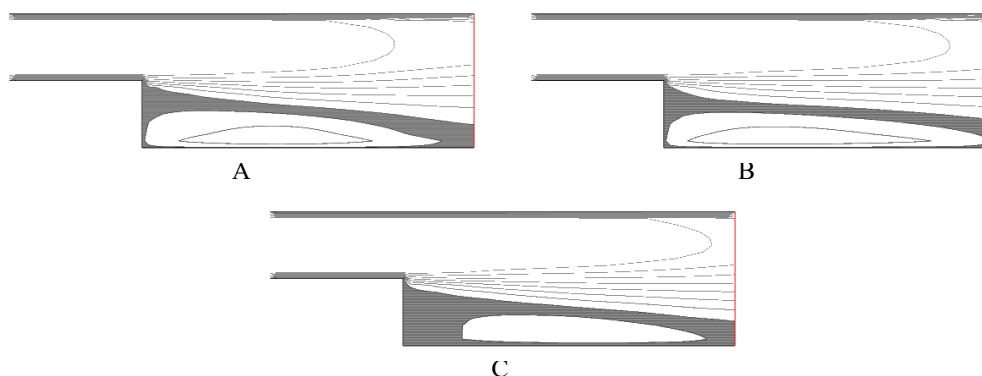
Na Rys. 3. przedstawiono trójwymiarowy rozkład profili prędkości za odzwami  $O_2$ . Na rysunku widać tworzącą się strefę recyrkulacji o maksymalnej wartości prędkości w kierunku osi X równej 5 m/s. Zasięg strefy szacuje się na 18 m za odzwami  $O_2$ .

Prezentowana metoda wyznaczania wielkości kinematycznych strugi powietrza przepływającej w wyrobisku górniczym (skrzyżowanie) wnosi szereg interesujących wyników w rozważania na temat wentylacji kopalń. Duża liczba danych otrzymana z symulacji numerycznej daje pełny jakościowy obraz przepływu w badanym skrzyżowaniu. Z przeprowadzonej symulacji komputerowej można określić miejsce, w którym należy mierzyć rozkład prędkości w przekroju poprzecznym wyrobiska celem określenia natężenia przepływu powietrza z jak najmniejszym błędem. Przykładowo pomiar wartości wektora prędkości za odzwami jest obarczony większym błędem z powodu występowania stref recyrkulacji niż pomiar przed odzwami. Powstające w wyniku przepływu powietrza w omawianym rejonie struktury turbulენტne powodują znaczny spadek ciśnienia, co z kolei ma wpływ na sprawność przewietrzania.

Następnym etapem pracy powinno być porównanie uzyskanych wyników numerycznych z danymi pomiarowymi poprzez eksperyment, który potwierdzi słuszność zastosowanego modelu przepływu turbulენტnego. Do tego celu konieczne jest dysponowanie odpowiednią metodą i aparaturą pomiarową umożliwiającą wyznaczenie profili prędkości w wybranych przekrojach i składowych fluktuacyjnych wektora prędkości celem wyznaczenia intensywności turbulencji lub innych wielkości kinematycznych strugi powietrza [11].

### 3. Weryfikacja modelu profilu prędkości przepływu w wyrobisku górniczym

Z reguły, podczas rozwiązywania zagadnień przepływu płynu w przekroju o dowolnej geometrii pojawia się problem poprawności rozwiązania. Z pośród wielu uzyskanych i bardzo prawdopodobnych wyników należy wybrać ten, który w sposób możliwie najdoskonalszy odzwierciedla rzeczywisty proces. Przykładowo, rozwiązując elementarne zagadnienie polegające na przepływie płynu w kanale z uskokiem wykorzystując 3 różne modele turbulencji uzyskujemy wyniki zamieszczone na Rys. 4.



Rys. 4. Wyniki symulacji przepływu płynu w kanale z uskokiem. Wypełnieniem zaznaczono strefę recyrkulacji

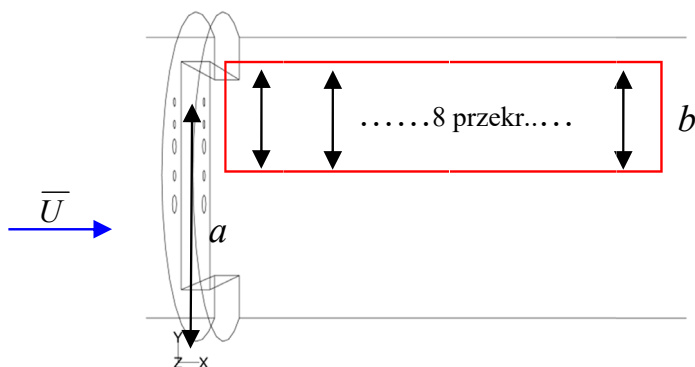
Przedstawione na Rys. 4. wyniki nie różnią się od siebie w sposób zasadniczy. Wszystkie z zastosowanych modeli turbulencji wykazały istnienie strefy recyrkulacji strugi w obszarze za uskokiem (początek tego obszaru zaznaczono na rysunku wypełnieniem). Jednakże, kiedy istotną rzeczą jest informacja co do kształtu i zasięgu strefy, pojawia się zasadnicze pytanie, które z wyżej przedstawionych rozwiązań jest prawdziwe? Dla większości przepływów mających miejsce w elementach maszyn przepływowych takich jak wirniki, kanały dyfuzorowe itp. istnieje skatalogowana baza rozwiązań numerycznych, powszechnie uważanych za poprawne (tzw. test case), aczkolwiek w przypadku rozwiązywania zagadnień przepływowych w słabo przebadanych geometriach, bardzo ważną rzeczą jest uzyskanie maksymalnie dużej liczby danych eksperymentalnych celem porównania ich z uzyskanymi wynikami analiz numerycznych.

Do celu weryfikacji wyników numerycznych niezbędna jest odpowiednia aparatura pomiarowa, która umożliwi wyznaczenie wielkości związanych z turbulentnym charakterem przepływu powietrza w wyrobisku górniczym. Do tego celu, po odpowiednim przygotowaniu mogą być wykorzystywane systemy termoanemometryczne. Na Fot. 1. zamieszczono zdjęcie powszechnie stosowanego, gotowego systemu pomiarowego opartego na jednowłókowym termoanemometrze ANT'93 oraz przetworniku analogowo-cyfrowym z interfejsem USB.



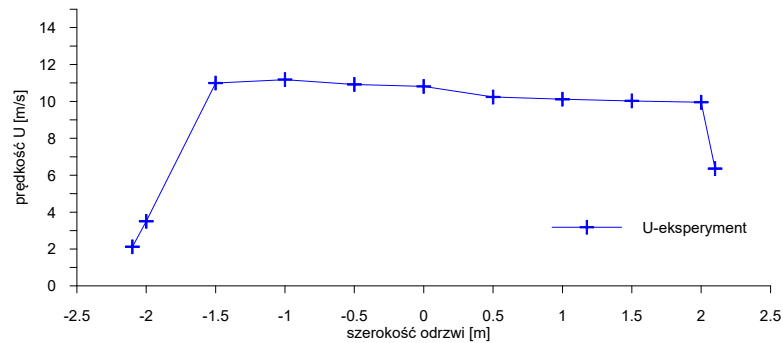
Fot. 1. Przenośny system pomiarowy

Całością steruje komputer klasy PC, który ponadto pełni rolę data – loggера. Omawiany system został sprawdzony w warunkach kopalnianych. Pomiary zostały przeprowadzone za wymurówką odrzwi w chodniku transportowym kopalni X (Rys. 5), to znaczy w miejscu, w którym spodziewano się występowania rozległej i stabilnej strefy recyrkulacji strugi powietrza.

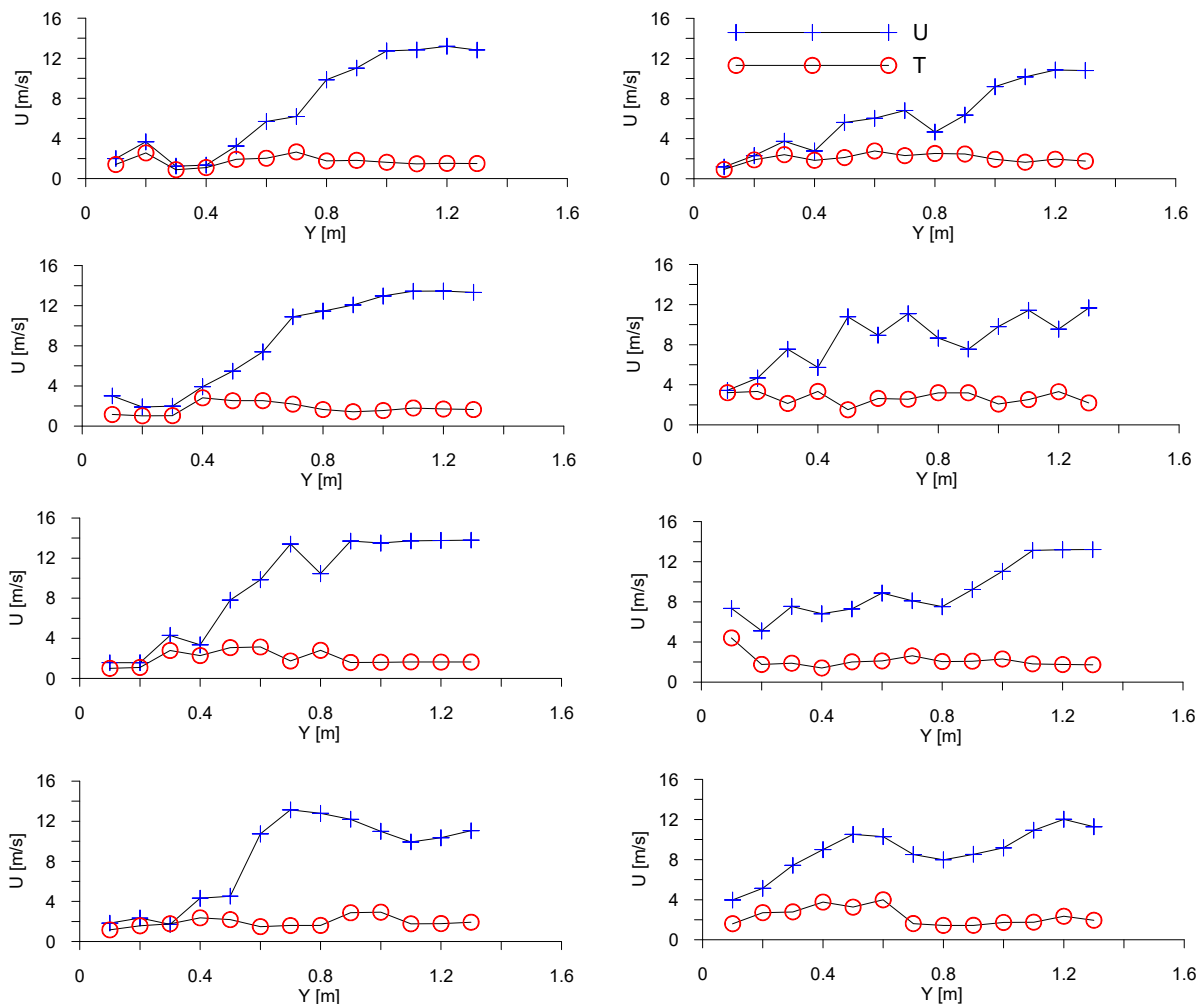


Rys. 5. Miejsce i sposób przeprowadzenia pomiarów termoanemometrycznych

Ze względu na rozległy obszar zdecydowano się na przeprowadzenie pomiarów w dwóch obszarach umiejscowionych na wysokości  $h = 1.5$  m, na Rys. 5 zaznaczonych jako  $a$  (odrzwi) i  $b$  (przewidywana strefa recyrkulacji). Liczba punktów pomiarowych wynosiła odpowiednio: dla  $a - 11$ , dla  $b - 8 \times 13 = 104$ .



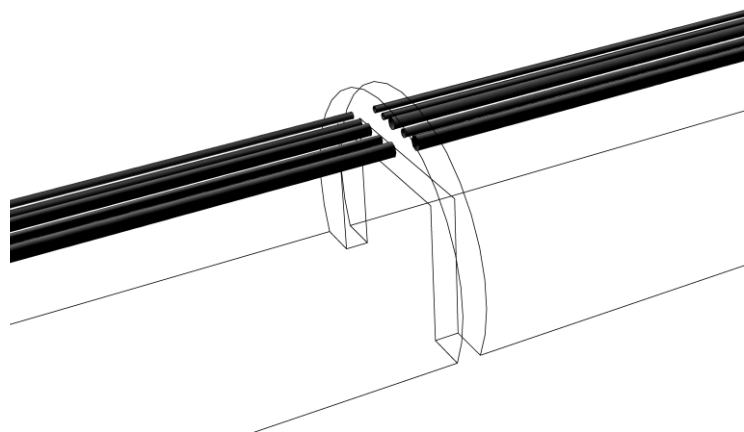
Rys. 6. Zmierzony profil prędkości w odzwiach (strefa  $a$ )



Rys. 7. Poprzeczne profile prędkości i intensywności turbulencji w strefie  $b$

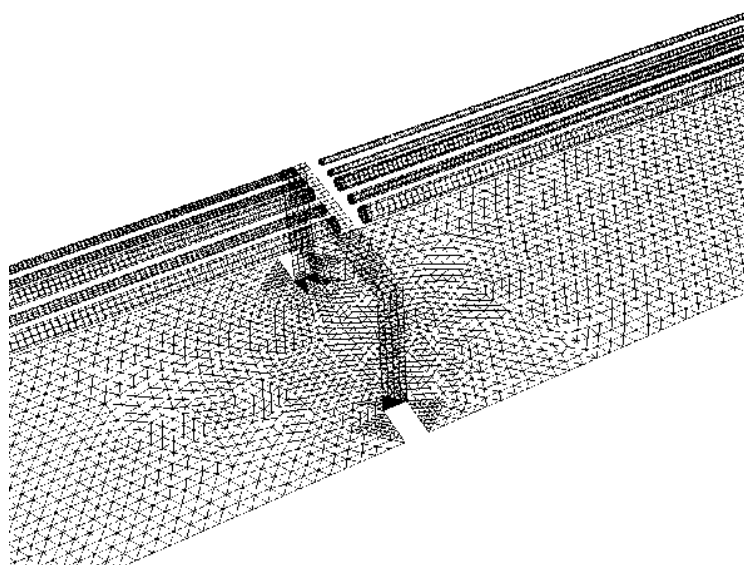
Wyniki pomiarów w formie graficznej przedstawiono na powyższych rysunkach. Na Rys. 6 przedstawiono profil wektora prędkości w odzwiach z kolei Rys. 7 przedstawia rozkład prędkości i intensywności turbulencji w strefie recyrkulacji za odzwiami. Z uwagi na fakt, że stosowany w pomiarach przyrząd nie był kierunkowy zmierzone wartości prędkości są większe od zera. Jednakże analizując zamieszczone na Rys. 7 rozkłady intensywności turbulencji można zauważyć, że przy zmianie kierunku wektora prędkości wzrastają wartości intensywności turbulencji.

W przypadku modelowania numerycznego przepływu płynu – powietrza w wyrobiskach górniczych, szczególnie wtedy, gdy omawiana jest kwestia wysokości strat przepływu, otrzymanie możliwie najbardziej zbliżonych do rzeczywistości wyników jest bardzo istotnym elementem. Przeprowadzono szereg eksperymentów numerycznych polegających na wyznaczeniu wielkości kinematycznych przepływającej strugi powietrza w omawianym przekopie transportowym. Schemat modelu geometrycznego obliczonego obszaru przedstawiono na Rys. 8.



Rys. 8. Geometria

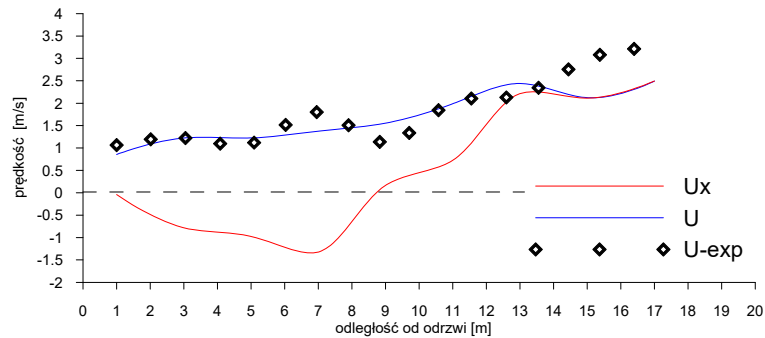
Na rysunku 9 przedstawiono fragment siatki obliczeniowej przyjętej dla omawianego przykładu. Jak widać na załączonym rysunku siatka jest hybrydowa (elementy typu quad oraz tri-pave, liczba elementów - 300 000). W obliczeniach założono prędkość strugi w przekroju wlotowym  $U = 5$  m/s.



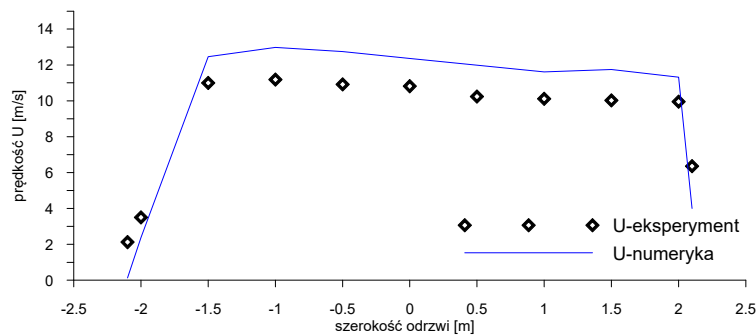
Rys. 9. Fragment siatki obliczeniowej omawianego przykładu

Przeprowadzone obliczenia z użyciem szeregu istniejących modeli turbulencji wykazały, że zgodnie z przypuszczeniem, występowanie rozległej strefy recyrkulacji w przekrojach znajdujących się za odrzwiami. Analizując wyniki z przeprowadzonych pomiarów i zestawiając je z uzyskanymi wynikami eksperymentu numerycznego zdecydowano, że najbardziej odpowiadający zmierzonym wartościom jest model  $Rk-e$ . Zjawisko całościowo ukazano na Rys. 12, na którym zamieszczono mapę prędkości składowej  $U_x$  w przekroju poprzecznym, w płaszczyźnie X-Y na wysokości  $h = 1.5$  m nad spągiem. Porównanie wyników danych pomiarowych i numerycznych przedstawione jest na Rys. 10, na którym zamieszczono profile podłużne prędkości  $U$  oraz  $U_x$  w odległości 0.4 m od ociosu w strefie recyrkulacji za odrzwiami, oraz zmierzoną wartość modułu prędkości w tym samym obszarze. Jak widać przedstawione wielkości wykazują dobrą zgodność,

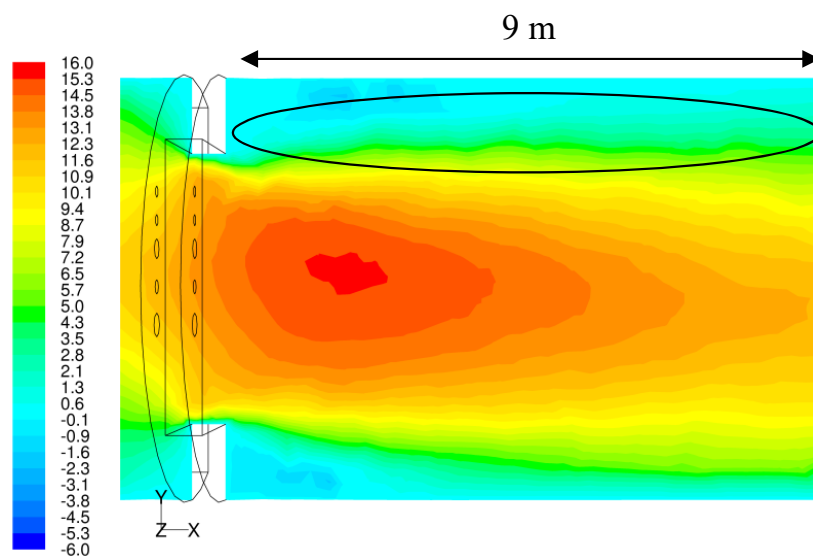
a obserwowane rozbieżności w wartości modułu prędkości zmierzonej (punkty) i obliczonej (linia koloru niebieskiego) mogą świadczyć o wpływie przyrządów pomiarowych oraz obsługi wykonującej pomiar w badanym rejonie. Podobnie w przypadku porównania profilu prędkości w odrzwiach (Rys. 8). Zastanawiającą rzeczą jest zaniżona wartość wektora prędkości uzyskanego z pomiarów w stosunku do wartości obliczonej przy zachowaniu ogólnej tendencji. Przyczyn takiej reakcji może być kilka. Do najbardziej prawdopodobnych należy różna od obliczeniowej geometria obszaru. Do przedstawionego procesu obliczeniowego zastosowano precyzyjnie zaprojektowaną geometrię, natomiast w rzeczywistości przekrój odrzwi mógł się zmieniać w funkcji wysokości od spągu, co spowodowało różnice w wartości wektora prędkości.



Rys. 10. Porównanie profilu prędkości wzdłuż ściany w strefie recykulacji

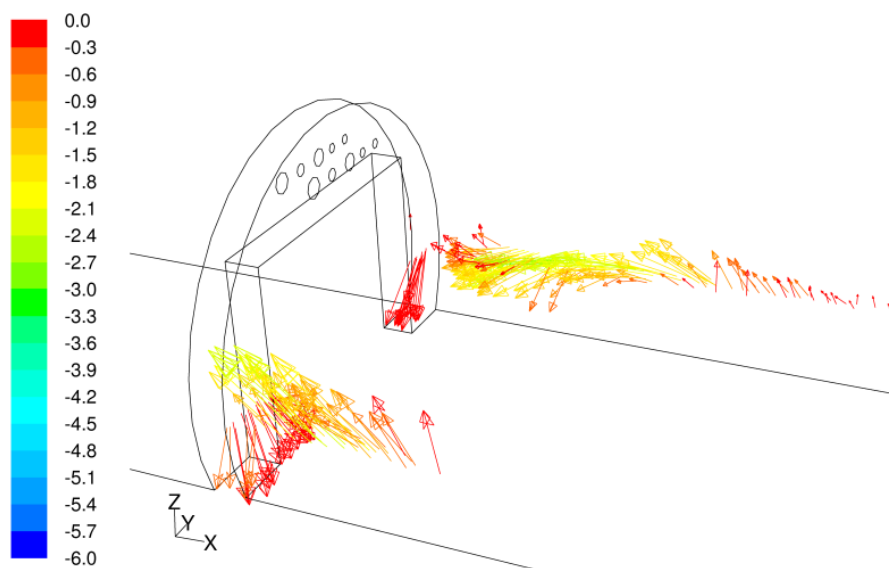


Rys. 11. Porównanie profili prędkości w odrzwiach



Rys. 12. Mapa prędkości  $U_x$  w przekroju  $h = 1.5$  m. Elipsą zaznaczono strefę recykulacji

Poniżej przedstawiono strefę recykulacji za odrzwiami w postaci „filtrowanych” pól wektorowych. Uwagę zwraca silnie trójwymiarowy charakter recykulacji szczególnie w pobliżu odrzwi.

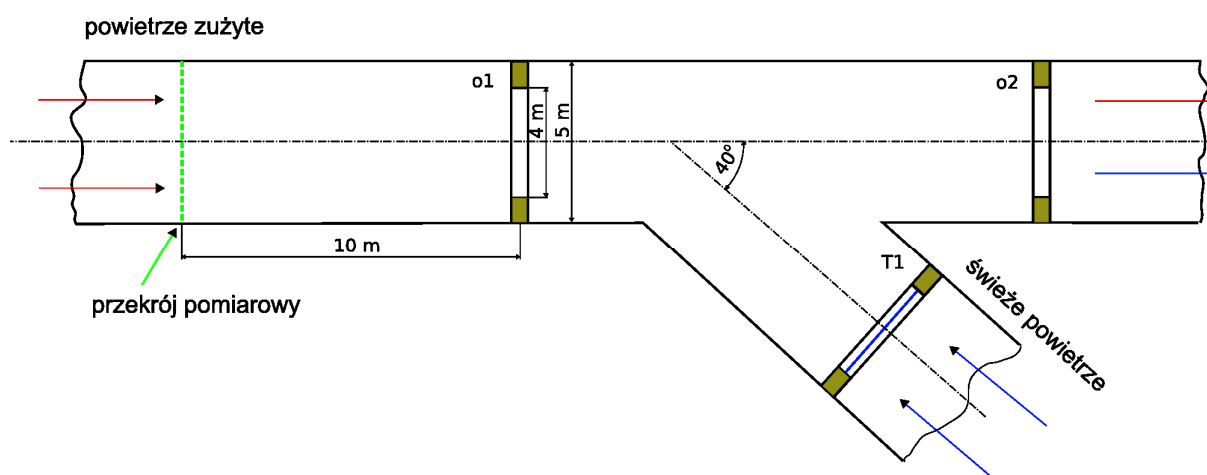


Rys. 13. Wektory prędkości wzdłuż osi za odrzwiami (wartości filtrowane). Przekrój na wysokości  $h = 1.5$  m

Jak wykazały wyniki wstępnych prób, istnieje duża potrzeba wykonywania pomiarów weryfikacyjnych z uwagi na brak odpowiednich test case'ów. Zastosowanie wielopunktowego i wielokanałowego systemu pomiarów i rejestracji zjawisk przepływowych w wyrobiskach górniczych umożliwia uzyskanie bezcennych danych weryfikujących uzyskane rozwiązania.

#### 4. Pomiary profilu prędkości w przekroju wyrobiska górniczego

Pomiary zostały przeprowadzone w przekopie 713, KWK „Borynia”. Przekop był głównym wyrobiskiem wentylacyjnym o przekroju  $14 \text{ m}^2$ , przy wymiarach przekroju poprzecznego  $5 \times 3,5$  m. W celu wyeliminowania zbędnych struktur turbulentnych w przekroju, które mogłyby mieć wpływ jakościowy na uzyskane wyniki, pomiary były wykonywane w odległości 10 m od drzwi O1. Rozszerzony schemat pomiarowego fragmentu wyrobiska górniczego przedstawia Rys. 14. Warunki przepływowe miały charakter stacjonarny, ze średnią prędkością  $U_{sr} = 5 \text{ m/s}$ , temperatura przepływającego powietrza wynosiła  $t_p = 24^\circ\text{C}$ , wilgotność  $f = 95\%$ .



Rys. 14. Schemat wyrobiska, w którym wykonywano pomiary. Linia przerywaną zaznaczono przekrój pomiarowy

Do pomiaru chwilowych rozkładów modułu prędkości użyto czterech czujników termoanemometrycznych umieszczonych na specjalnie skonstruowanym wysięgniku. Taki sposób zamocowania umożliwił symultaniczne pomiary wartości modułu prędkości. Fot. 2, 3, 4 przedstawiają wysięgnik wraz z zamontowanymi głowicami termoanemometrycznymi.



Fot. 2. Matryca głowic termooanemometrycznych w warstwie przyściennej

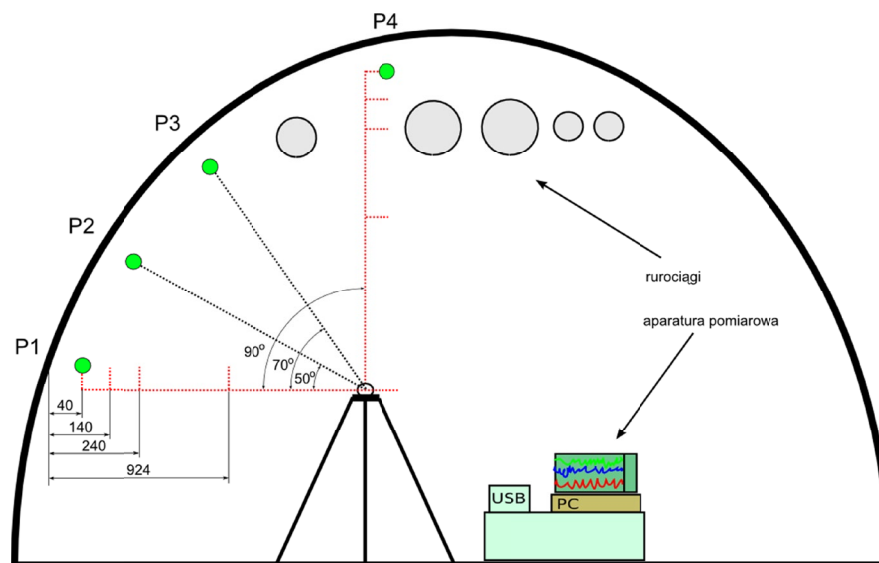


Fot. 3. Matryca głowic termooanemometrycznych w warstwie przyściennej na zbliżeniu



Fot. 4. Głowice zintegrowane na wsięgniku

Schematycznie rozmieszczenie czujników oraz badane miejsca w przekroju ilustruje Rys. 15.



Rys. 15. Rozkład czujników pomiarowych w przekroju wyrobiska

## 5. Przebieg i wyniki pomiarów

Przeprowadzone pomiary miały na celu sprawdzenie przydatności metrologicznej systemu pomiarowego opartego na termoanemometrycznych głowicach zintegrowanych, w których element mierzący stanowiły miniaturowe sensory platynowo-ceramiczne w specyficznych warunkach wyrobiska górniczego. Termoanemometryczny system pomiarowy użyto do zmierzenia rozkładu modułu prędkości przepływu powietrza w wybranym przekroju poprzecznym wyrobiska.

Termoanemometryczne głowice pomiarowe były podłączone do wielokanałowej aparatury akwizyjno-pomiarowej, w skład której wchodziły:

- przetwornik analogowo cyfrowy,
- moduł zasilający (zintegrowany z przetwornikiem A/C),
- notebook z oprogramowaniem akwizycyjnym,
- zasilanie akumulatorowe umożliwiające przeprowadzenie pomiarów w czasie około 3 godzin.

Wymieniona powyżej aparatura umożliwiała zapis otrzymywanych przebiegów czasowych z zadaną częstotliwością próbkowania. Zastosowanie czterech głowic pomiarowych pozwoliło na wielopunktowy i symultaniczny pomiar modułu wektora prędkości.

Pomiary zostały wykonane w czterech płaszczyznach nachylonych pod kątami 0, 50, 70 oraz 90° do spągu wyrobiska. W każdej pozycji wysięgnika zmierzono 4 przebiegi czasowe modułu wektora prędkości. Minimalna odległość pierwszej głowicy od osi wynosiła 4 cm, ostatniej 92,4 cm.

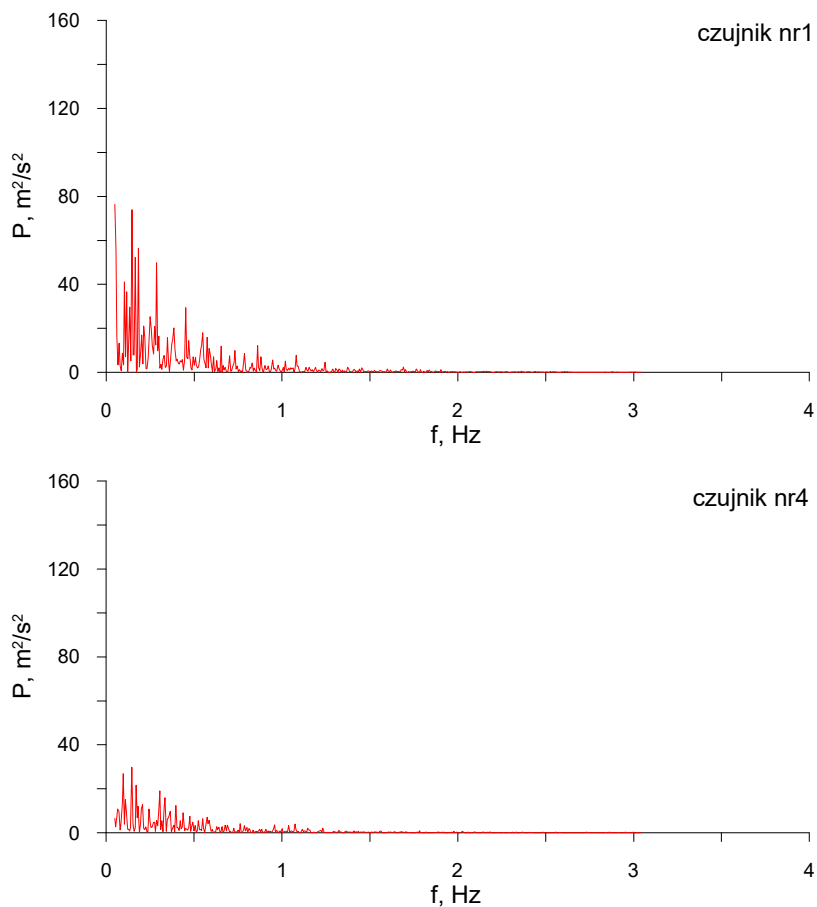
Pierwszą istotną rzeczą, którą należało wykonać przed przystąpieniem do pomiarów właściwych było określenie minimalnej częstotliwości próbkowania sygnału. W związku z tym, że  $f_s$  – częstotliwość minimalna określona jest zgodnie z twierdzeniem Shannona jako

$$f_s = \frac{1}{2h} \quad (1)$$

gdzie  $h$  oznacza okres próbkowania.

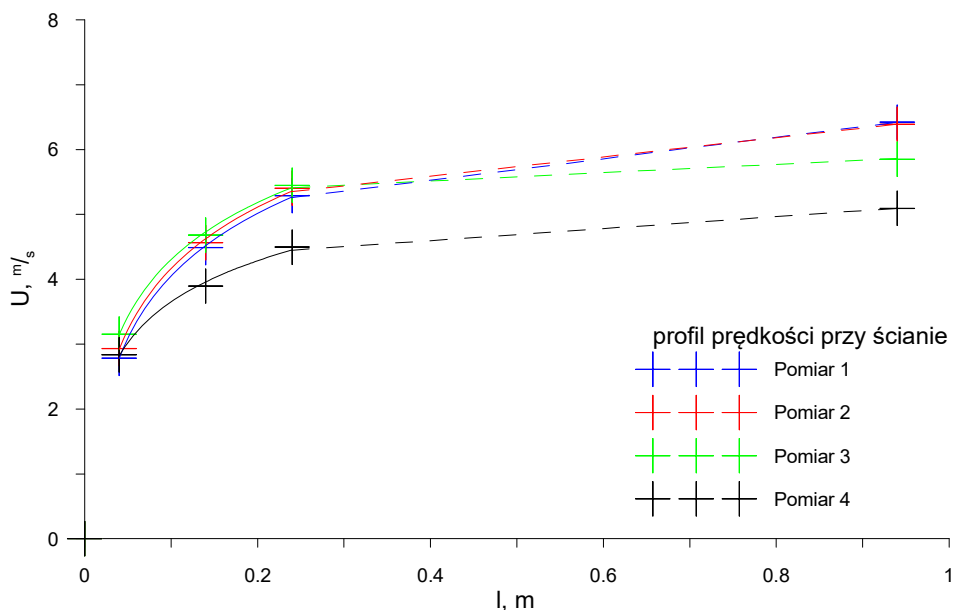
Z uwagi na to, że bieżąca analiza sygnału w warunkach kopalnianych jest utrudniona głównie z powodu ograniczonego czasu pracy układu przy zasilaniu akumulatorowym, wysokość  $f_{pr}$  określono na podstawie wcześniejszych pomiarów w podobnym wyrobisku [23]. Zgodnie z danymi pochodzącymi z tej pracy najwyższa częstotliwość istniejąca w widmie amplitudowo-częstotliwościowym wahała się na poziomie 10 Hz. Na tej podstawie przyjęto częstotliwość pomiarowa  $f_{pr} = 40$  Hz, jako przynajmniej dwa razy większą niż maksymalna częstotliwość zaobserwowana w widmie.

Przykładowe widma gęstości mocy sygnału przedstawiono na Rys. 16. Jak można zauważyć, struktury periodyczne występujące w zmierzonych sygnałach w całości są odwzorowane. W związku z tym, można przyjąć, że częstotliwość próbkowania dla danych warunków przepływowych została dobrana prawidłowo.



Rys. 16. Widmowa gęstość mocy sygnału z sondy 1 i sondy 4

Na podstawie wykonanych pomiarów sporządzono wykresy przedstawiające rozkład modułu wektora prędkości w przedstawionych powyżej płaszczyznach sondowania.



Rys. 17. Zmierzone profile prędkości dla 4 linii sondowania

Linia ciągłą zaznaczono krzywą dopasowania logarytmicznego, linią przerywaną dopasowanie liniowe. Funkcja logarytmiczna opisująca profil prędkości w bezpośrednim sąsiedztwie ociosu dla linii 1,2,3 oraz 4 jest w postaci:

$$1: Y = 1.15 * \ln(X) + 6.67$$

$$2: Y = 1.10 * \ln(X) + 6.67$$

$$3: Y = 0.86 * \ln(X) + 6.23$$

$$4: Y = 0.72 * \ln(X) + 5.29$$

Zgodnie z danymi literaturowymi [28] funkcja opisująca rozkład prędkości w obrębie subwarstwy logarytmicznej dla gładkiej płyty jest opisywana równaniem w postaci:

$$Y = 2.5 \ln(X) + 5 \quad (2)$$

Wynikłe rozbieżności pomiędzy danymi literaturowymi a pomiarowymi można wytłumaczyć dużą chropowatością ścian wyrobiska górniczego oraz różnicami w warunkach wyjściowych analizowanego przepływu. W omawianym przypadku mamy do czynienia z opływem nieskończonej rozległej płyty i wyrobiskiem jako przewodem zamkniętym.

Jednak mimo tych rozbieżności, najistotniejszą informacją jaką uzyskano wykonując opisane badania jest to, że opisywany system pomiarowy umożliwia pomiary w obrębie sub-warstwy logarytmicznego rozkładu prędkości warstwy przyściennej, co z kolei daje możliwość głębszego zbadania lokalnych zjawisk przepływowych w wyrobiskach górniczych.

## 6. Konkluzje

Oceniając właściwości i przydatność metrologiczną zastosowanego termoanemometrycznego układu głowic zintegrowanych należy podkreślić, że czas trwania pomiarów wynosił 90 minut w trakcie rejestracji wyników zainstalowana aparatura działała bez zarzutów. Nasuwają się jednak pewne uwagi dotyczące szerszej eksploatacji systemu pomiarowego. Korzystnym byłoby zwiększenie pojemności źródła zasilania, co umożliwiłoby wydłużenie czasu pomiarów i uzyskiwanie w ten sposób pełniejszych obserwacji czasowych rozkładu modułu wektora prędkości. Na stabilność mechaniczną montażu i rozkładu w przekroju wyrobiska głowic pomiarowych pozytywny wpływ miałyby połączenie długich i licznych kabli we wspólną wiązkę, które ułatwiłoby swobodniejsze manipulowanie elementami układu pomiarowego w przestrzeni.

Z wykonanych badań wynikają następujące wnioski:

1. na podstawie danych uzyskanych z systemu można przeprowadzać analizy zjawisk występujących w przepływie w granicach osi przepływu – sub-warstwa logarytmicznego rozkładu prędkości warstwy przyściennej,
2. przedstawiona aparatura umożliwia symultaniczne pomiary prędkości przepływu powietrza w wybranych przekrojach pomiarowych,
3. pasmo przenoszenia czujników termoanemometrycznych umożliwia prowadzenie pomiarów niestacjonarnego przepływu powietrza w wyrobisku górniczym,
4. zastosowane w głowicach cienkowarstwowe sensory platynowo-ceramiczne wykazują w warunkach pomiarów kopalnianych dużą odporność mechaniczną.

**Podziękowania:** *Rezultaty prac przedstawione w artykule stanowią wyniki realizacji Projektu Badawczego 4 TI2A 008 30, artykuł opracowano w celach dokumentacyjnych w ramach Prac Statutowych 2025 Instytutu Mechaniki Górniczej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie.*

## Literatura

- [1] Roszczyński 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 termoanemometryczne – 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 Górniczej (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 Górniczej (Transactions of the Strata Mechanics Research Institute), 2007.
- [6] Poleszczyk E., *Termooanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości*. Monografie Rozprawy, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej (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 Press, 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 anemometrize stałotemperaturowym*. 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 termooanemometru stałotemperaturowego oraz mostkowy termooanemometr stałotemperaturowy 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., *Termooanemometryczne 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 termooanemometryczna 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 Górniczej 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. at 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 4 – Experimental verification of numerical simulation of air flow in the excavation**

#### **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 experimental verification of numerical simulation of air flow in the excavation.

**Keywords:** mine ventilation, ventilation network measurements, measurement systems, thermal anemometry, temperature compensation, computer simulations