

Zastosowanie termoanemometrycznej metody pomiaru prędkości przepływu powietrza w górnictwie głębinowym

Część 5 – Analiza rozkładu prędkości powietrza w warstwie przyściennej w warunkach przepływu w wyrobisku górniczym

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

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

Streszczenie

Analiza i pomiary sieci wentylacyjnej stanowią ważny element badania stanu i przebiegu procesu wentylacji kopalń. Sprawność i niezawodność systemu sieci wentylacyjnej wpływa na przebieg procesu eksploatacji i bezpieczeństwa pracy w kopalni. W artykule przedstawiono koncepcję i prototyp termoanemometrycznego 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 analizę rozkładu prędkości powietrza w warstwie przyściennej w warunkach przepływu w wyrobisku górniczym.

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

1. Wprowadzenie

Symulacja numeryczna trójwymiarowego przepływu powietrza w wyrobisku górniczym jest zagadnieniem istotnym w aspekcie wyznaczenia lokalnych strat przepływu powietrza, które mają wpływ na sprawność procesu przewietrzania kopalń głębinowych. W wyrobiskach górniczych, w przeciwieństwie do innych przewodów zamkniętych redukcja niekorzystnego wpływu turbulencji na efektywność przepływu powietrza polegająca na zastosowaniu przystawek, zróżnicowania kształtu i chropowatości ścian kanału jest trudna do realizacji z uwagi na duże gabaryty wyrobisk wentylacyjnych. Zastosowanie elementów redukujących niekorzystny wpływ struktur turbulentnych wymaga zgromadzenia odpowiedniej ilości danych opisujących proces przepływu powietrza przez charakterystyczne fragmenty sieci. Najkorzystniejszym w aspekcie czasochłonności oraz możliwości adaptacyjnych rozwiązania jest zastosowanie metod numerycznych do wyznaczenia wielkości charakteryzujących turbulencje przepływu. Z powodu znacznej rozległości sieci wentylacyjnej kopalni, obliczenia mogą być prowadzone jedynie dla wybranych rejonów, takich jak: podszybia, skrzyżowania wyrobisk, otamowania, których rozległość nie przekracza 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 termoanemometry, które w przeciwieństwie do tradycyjnie stosowanych w górnictwie anemometrów skrzydełkowych, charakteryzują się szerokim pasmem przenoszonych częstotliwości, sięgającym setek kiloherców. Autorzy zaproponowali eksperymentalną weryfikację numerycznej symulacji przepływu powietrza w wyrobisku górnictwem z zastosowaniem termoanemometrycznego systemu wielopunktowego pomiaru pola prędkości, przystosowanego do specyficznych warunków pracy w kopalni (przepływ nieustalony i nieizotermiczny o znacznym zanieczyszczeniu i wilgotności). Prototypowe czujniki pomiarowe i koncepcja tego systemu została opracowana i przebadana eksperymentalnie w Instytucie Mechaniki Górniczej PAN.

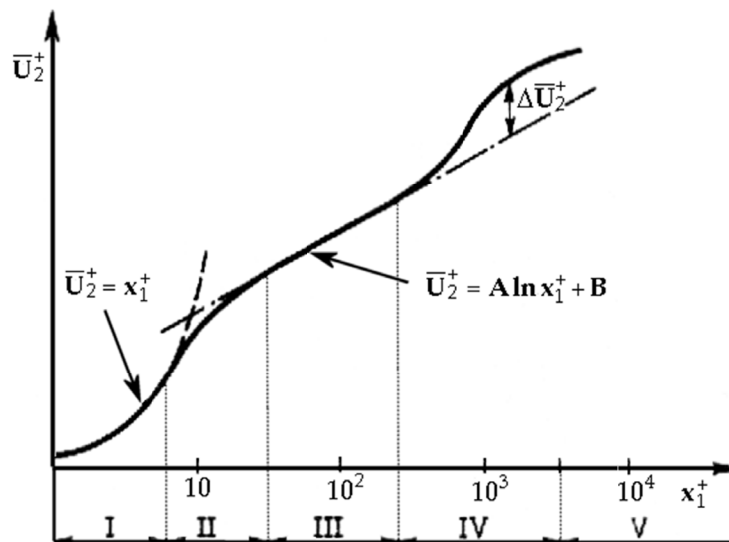
2. Model warstwy przyściennej

Znajomość dokładnego profilu prędkości w wyrobisku górnictwem ma ogromne znaczenie w aspekcie poprawności pomiarów wentylacyjnych a co za tym idzie oceny efektywności przewietrzania zagrożonych rejonów kopalni głębinowej. Z uwagi na specyficzne ukształtowanie ścian wyrobisk zastosowanie powszechnie znanych wzorów opisujących rozkład prędkości przepływającego powietrza w przekroju wyrobiska musi zostać zweryfikowane.

Zgodnie z wielostrefowym modelem [28] wyróżnia się następujące obszary warstwy przyściennej tworzącej się podczas przepływu płynu wokół płaskiej płyty:

- Strefa wewnętrzna:
 - I. subwarstwa lepka,
 - II. strefa pośrednia,
 - III. strefa logarytmicznego rozkładu prędkości,
- Strefa zewnętrzna:
 - IV. strefa „prawa śladu”,
 - V. strefa intermitencji.

Reprezentacją powyższego podziału jest wykres zamieszczony na Rys. 1.



Rys. 1. Wielostrefowy model warstwy przyściennej.

Wykres przedstawiający rozkład prędkości w obrębie warstwy przyściennej na ogół jest przedstawiany w układzie współrzędnych U^+ , $\ln x^+$, gdzie

$$U_2^+ = \frac{U_2}{U^*} \quad (1)$$

oznacza bezwymiarową składową wektora prędkości równoległą do ściany,

U_2^+ – oznacza składową wektora prędkości, równoległą do ściany,

U^* – wyraża tzw. prędkość dynamiczną wyznaczaną z zależności:

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2)$$

w której:

T_w – naprężenia styczne przy ścianie,

ρ – gęstość płynu.

Z kolei bezwymiarową odległość od ściany x_1^+ oblicza się z następującej zależności:

$$x_1^+ = \frac{U^* x_2}{\nu} \quad (3)$$

gdzie:

ν – oznacza współczynnik lepkości kinematycznej płynu,

x_1 – współrzędna prostopadła do ściany.

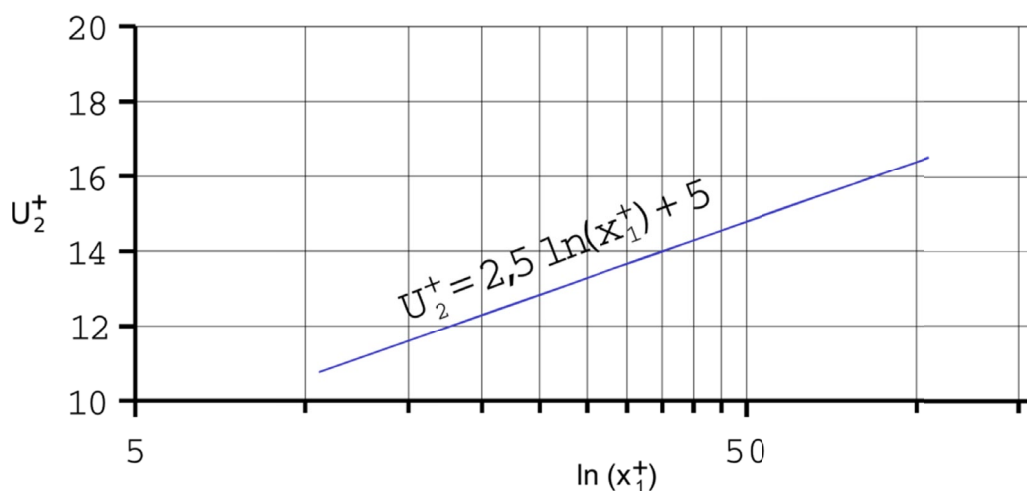
Z uwagi na to, że omawiany przepływ odbywa się w wyrobisku górniczym, a więc w przewodzie zamkniętym powyższy podział warstwy przyściennej powinien się ograniczyć do pierwszych z trzech wymienionych stref.

W artykule [29] autorzy wstępnie poruszyli zagadnienie rozkładu prędkości przepływu powietrza w przekroju wyrobiska górniczego. Pierwsze wyniki uzyskane dzięki pomiarom wykorzystującym zintegrowane głowice termoanemometryczne z ceramiczno-płatynowym elementem aktywnym wykazały pewne różnice pomiędzy ogólnie przyjętym modelem opisu prędkości w pobliżu ściany. Przedstawiane wyniki pomiarów niezależnie od stosowanego przyrządu pomiarowego mogą się ograniczać jedynie do określenia parametrów prędkości płynu w obrębie sub-warstwy „logarytmicznego rozkładu prędkości”. Przyczyną tego stanu rzeczy jest ukształtowanie ścian wyrobiska, które uniemożliwia precyzyjne pomiary bezpośrednio przy ścianie oraz powoduje degradację wewnętrznego obszaru warstwy przyściennej.

Równanie opisujące rozkład prędkości w obrębie sub-warstwy logarytmicznego rozkładu prędkości zgodnie z obowiązującym wielostrefowym modelem warstwy przyściennej podaje się w postaci [28]:

$$U_2^+ = A \ln x_1^+ + B \quad (4)$$

Wartości współczynników A i B zawierają się w szerokim zakresie, jednakże w przypadku przepływu płynu wokół płaskiej płyty zwykle przyjmuje się $A = 2.5$ oraz $B = 5$.



Rys. 2. Strefa logarytmicznego rozkładu wektora prędkości dla przyjętych wartości współczynników A i B

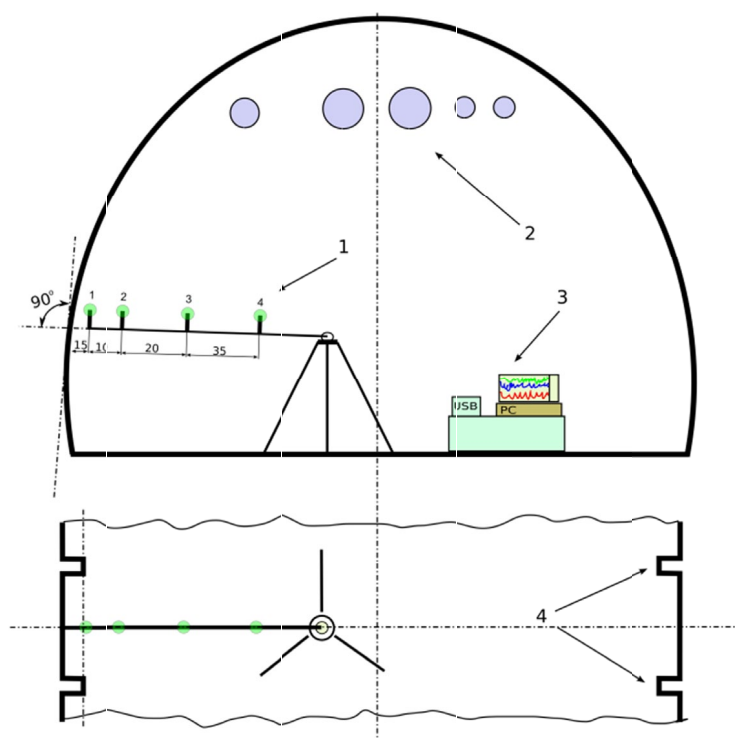
3. Opis i wyniki pomiarów

Pomiary zostały wykonane w przekopie 713 w KWK Borynia. W tym przypadku, z uwagi na to, że głównym celem był pomiar warstwy przyściennej ograniczono się wyłącznie do jednej pozycji pantografu (Fot. 1), oraz do stałego rozstawu czujników pomiarowych.



Fot. 1. Zdjęcie stanowiska pomiarowego

Miejsce pomiarów zostało dobrane w taki sposób, aby występowało jak najmniej zakłóceń przepływu spowodowanych nierównościami ociosów bądź występowaniem elementów powodujących zakłócenia przepływu, takich jak wycofane elementy obudowy zmechanizowanej, czy wagony spągowego transportu szynowego. Linia sondowania znajdowała się poniżej rurociągów 2, czujniki 1 zostały rozmieszczone



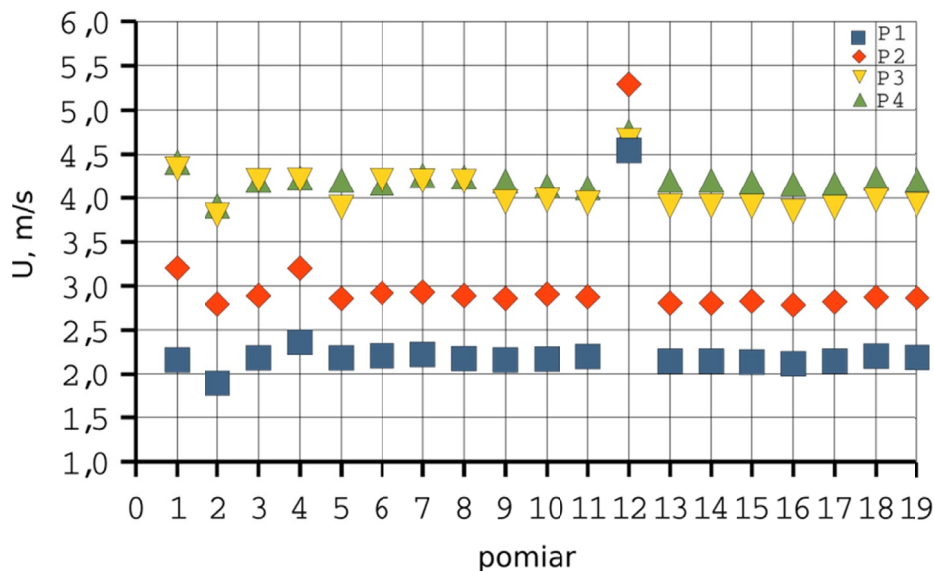
Rys. 3. Stanowisko w przekroju pomiarowym

w rzędzie, w osi wnęki pomiędzy łukami obudowy 4 w taki sposób, że oś czujnika nr 1 znajdowała się w płaszczyźnie łuku obudowy (Rys. 3).

Pomiar polegał na wielokrotnej rejestracji na aparaturze 3 przebiegów czasowych fluktuacji prędkości w czterech punktach przekroju w pobliżu ociosu wyrobiska.

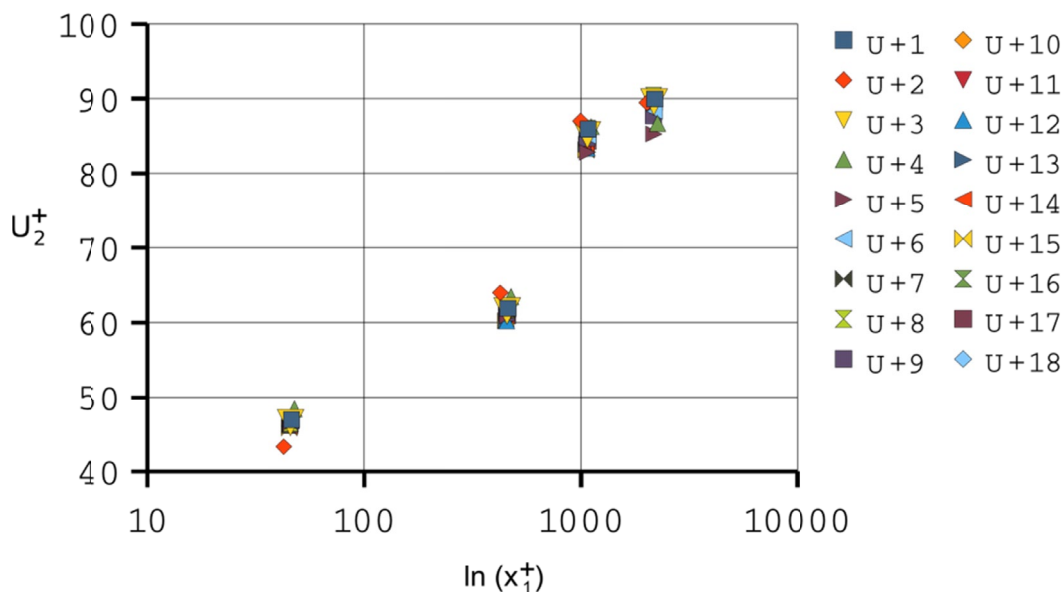
Podczas pomiarów zostały zarejestrowane przebiegi czasowe fluktuacji prędkości składowej równoległej do ociosu. Sumaryczny czas trwania eksperymentu wyniósł 2,5 godziny.

Na Rys. 4. zostało przedstawione zestawienie 19-tu pomiarów średnich wartości prędkości zarejestrowanych czterema czujnikami.



Rys. 4. Zestawienie średnich wartości prędkości dla 19 pomiarów

Zmierzone wartości prędkości po przeliczeniu na wielkości bezwymiarowe x^+ , U^+ przedstawiono na Rys. 5. Ponieważ jak można wywnioskować z Rys. 5. pomiar nr 12 był błędny, dlatego w dalszej części wyeliminowano go z rozważań, przesuując numerację pomiarów o jedno miejsce.



Rys. 5. Zmierzona warstwa przyścienna w bezwymiarowym układzie U^+ , $\ln x^+$

Dla omawianych przypadków współczynniki równania (4) opisującego rozkład prędkości w sub-warstwie logarytmicznej przyjmują wartości podane w Tab. 1.

Tab. 1. Współczynniki równania (4)

Nr pomiaru	A	B
1	7,89	16,15
2	8,97	9,64
3	6,50	21,68
4	6,54	23,12
5	6,24	22,68
6	6,52	21,85
7	6,49	22,58
8	6,62	21,58
9	6,51	21,83
10	6,82	20,78
11	6,24	23,27
12	6,00	23,86
13	6,13	23,15
14	6,46	21,81
15	6,24	22,46
16	6,28	22,56
17	6,14	23,72
18	6,25	23,14

4. Dyskusja wyników pomiarów

Wykonywanie pomiarów w wyrobisku górniczym jest zagadnieniem niezwykle złożonym. Podczas pojedynczej realizacji przebiegu spotyka się szereg czynników wpływających niekorzystnie na otrzymywany wynik. Do tych czynników należą przede wszystkim duże zapylenie powietrza przepływającego w wyrobisku oraz jego duża wilgotność. Otrzymane pomiary, których zestawienie całościowe znajduje się na Rys. 5. wykazują dużą powtarzalność, co sugeruje stabilność przyrządów pomiarowych oraz niewielki wpływ chwilowej zmienności parametrów powietrza na uzyskanie wyników.

Podczas poprzednich pomiarów prowadzonych w tym samym wyrobisku [29] zarejestrowano 4 profile prędkości powietrza, opisane równaniami:

$$1: U_1 = 1,15 \ln x_2^+ + 6,67$$

$$2: U_1 = 1,10 \ln x_2^+ + 6,67$$

$$3: U_1 = 0,67 \ln x_2^+ + 6,23$$

$$4: U_1 = 0,72 \ln x_2^+ + 5,29$$

Zestawienie wyników obecnych oraz poprzednich pomiarów zaprezentowano na Rys. 6, który przedstawia rozkład prędkości w obrębie sub-warstwy logarytmicznej. Na wykresie umieszczono również teoretyczny rozkład prędkości wykreślony zgodnie z równaniem $U_1 = 2,5 \ln x_2^+ + 5,00$ zaznaczony jako U_t .

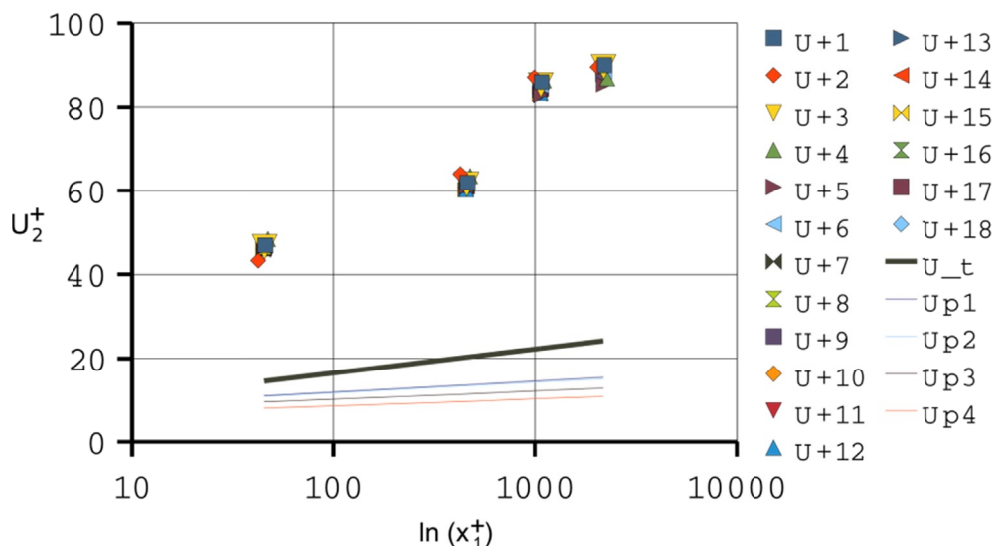
Jak łatwo można zauważyć obecnie zmierzone wartości U^+ ($U + 1 - U + 18$) mocno odbiegają od wartości teoretycznych (U_t), jak i od tych zmierzonych podczas poprzedniego eksperymentu ($Up1-Up4$). Głównym powodem rozbieżności może być fakt, że poprzednie pomiary zostały wykonane bezpośrednio przy łuku obudowy a obecne we wnęce pomiędzy obudową, tak więc mierzona wartość prędkości czujnika 1 oraz 2, pomimo dokładnego ustawienia ramienia pomiarowego mogła zostać powiększona przez recyrkulację we wnęce.

Istnieje również inny potencjalny powód rozbieżności. Celem jego zrozumienia należy sięgnąć do równania opisującego rozkład bezwymiarowej prędkości U^+ . Wartość U^+ jak wynika z równania (2) zależy od wartości prędkości dynamicznej, która z kolei jest funkcją naprężeń stycznych oraz gęstości płynu.

Naprężenia styczne występujące w przepływie płynu w pobliżu ściany wyznacza się na podstawie równania:

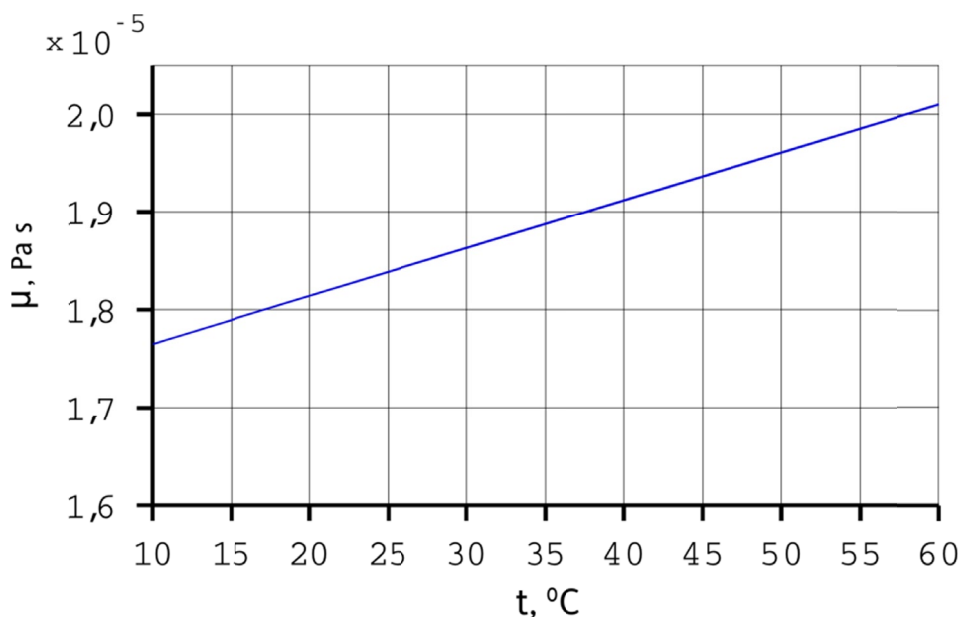
$$\tau_w = \mu \frac{dU_1}{dx_1} \quad (5)$$

gdzie μ – współczynnik lepkości dynamicznej.



Rys. 6. Zestawienie wyników pomiarów warstwy przyściennej w wyrobisku górnym

Współczynnik lepkości dynamicznej powietrza jest zależny głównie od temperatury powietrza a jego wartość zmienia się zgodnie z krzywą zamieszczoną na Rys. 7.



Rys. 7. Zmiana wartości współczynnika lepkości dynamicznej w funkcji temperatury

W warunkach kopalnianych zmiana temperatury w wyrobiskach spowodowana głównie zmiennością pór roku nie powinna przekroczyć kilkunastu °C, w związku z tym wpływ temperatury powietrza na zmianę wartości współczynnika lepkości dynamicznej, a przez to na wartość naprężeń stycznych na ścianie wyrobiska wyznaczanych dla stałej wartości gradientu prędkości jest pomijanie mały.

Z kolei gęstość powietrza występująca w mianowniku wyrażenia określającego wartość prędkości dynamicznej jest zależna zarówno od temperatury jak i ciśnienia barometrycznego. Zależność tę opisuje równanie:

$$\rho_w = \frac{1}{T} \left[\frac{p_w}{R_s} + \Psi E \left(\frac{1}{R_p} - \frac{1}{R_s} \right) \right] \quad (6)$$

gdzie:

T – temperatura powietrza,

p_w – ciśnienie barometryczne powietrza wilgotnego,
 ψ – wilgotność względna powietrza,
 E – prężność pary nasyconej,
 R_s – indywidualna stała gazowa powietrza suchego,
 R_p – indywidualna stała gazowa pary wodnej.

Występującą w równaniu (6) prężność pary wodnej E opisuje równanie:

$$E = 610.6 \exp\left(\frac{b(T - 273.15)}{T - c}\right) \quad (7)$$

przy czym wartość stałych ustalono według pracy [1] $b = 17,27$, $c = 35,86$.

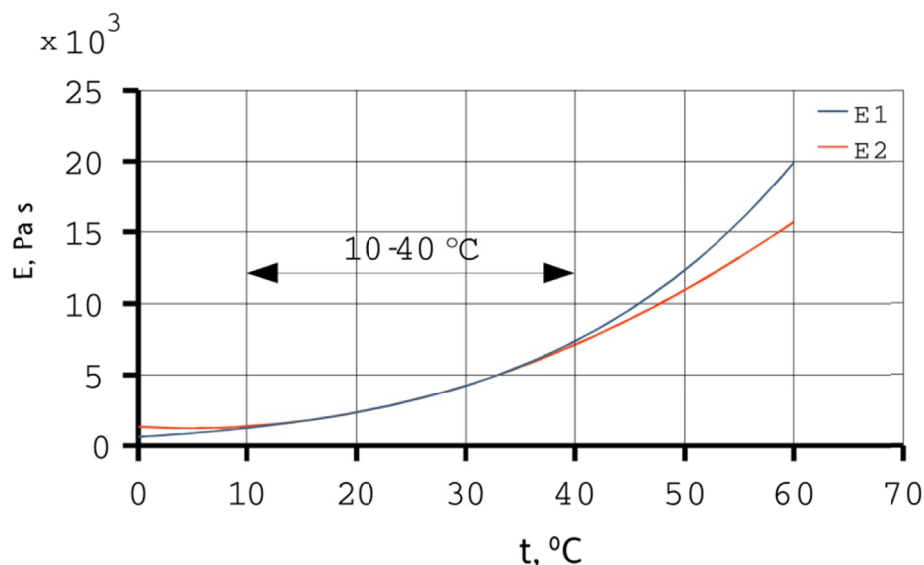
Uproszczoną postać wzoru (3.9) w postaci wielomianu drugiego stopnia podaje równanie:

$$E = 1320 - 44,7t + 4,74t^2 \quad (8)$$

w którym t określa temperaturę w $^{\circ}\text{C}$.

Ponieważ wartość prężności pary zależy od temperatury zgodnie z krzywą zamieszczoną na Rys. 8, (krzywa E1), średnio można przyjąć, że zakres temperatur panujących w wyrobiskach kopalnianych waha się w zależności od pory roku w granicach 20 do 30 $^{\circ}\text{C}$, a więc jak wynika z wykresu wartość E zmienia się od około 2000 do około 4000 Pa.

Porównując krzywe zamieszczone na Rys. 8 można zauważyć, że w interesującym zakresie temperatur 10 do 40 $^{\circ}\text{C}$ przebieg krzywych określających prężność pary wodnej E zawartej w powietrzu dla równań w postaci (7) i (8) w funkcji temperatury jest do siebie zbliżony, a co za tym idzie w obliczeniach dotyczących przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych może być używany wygodniejszy wzór w postaci (8).

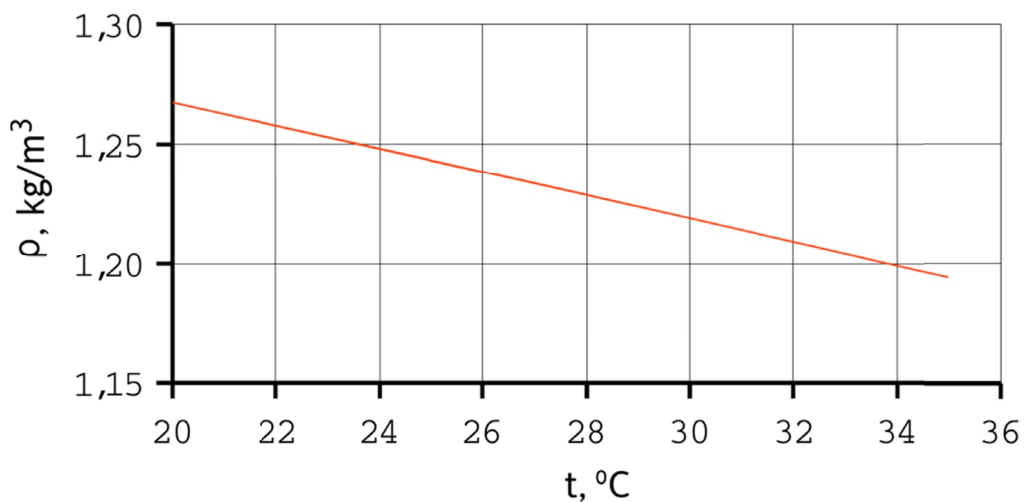


Rys. 8. Zmiana wartości ciśnienia parcyjnego pary wodnej w funkcji temperatury.
 E1 – równanie (7), E2 – równanie (8)

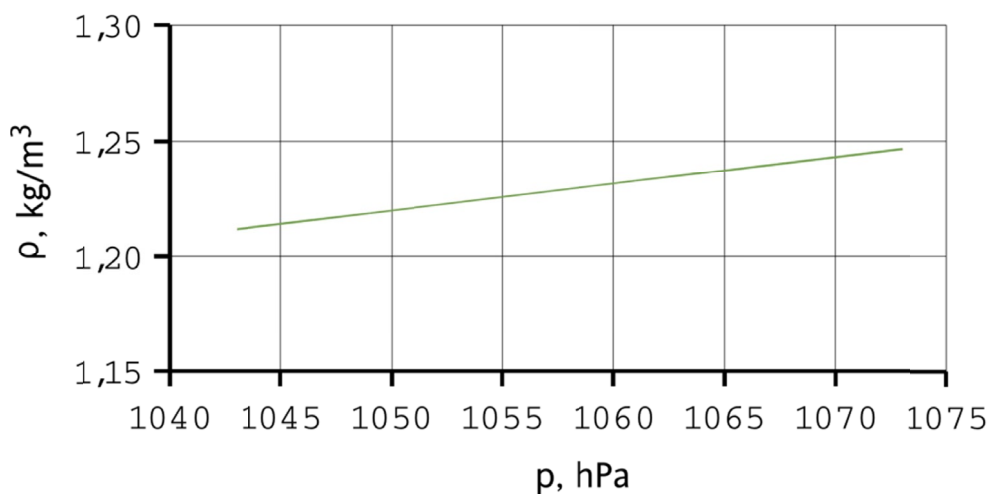
Analizując przebieg wartości gęstości w funkcji temperatury (Rys. 9) oraz ciśnienia (Rys. 10) można zauważyć, że zmiany lokalnych wartości temperatur mają większy wpływ na wartość gęstości niż zmiany ciśnienia barometrycznego.

Przykładowo, wzrost temperatury o 8 $^{\circ}\text{C}$, z $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$ do $t_1 = 28^{\circ}\text{C}$ powoduje zmniejszenie wartości gęstości powietrza o około 4%, co w przypadku zmiany ciśnienia, w warunkach izotermicznych ma miejsce przy spadku ciśnienia $\Delta p = 30$ Pa.

W praktyce, tak duży spadek ciśnienia barometrycznego ma miejsce w ciągu kilku, kilkunastu godzin, a więc ma potencjalnie mniejszy wpływ na lokalne zmiany wartości gęstości powietrza.

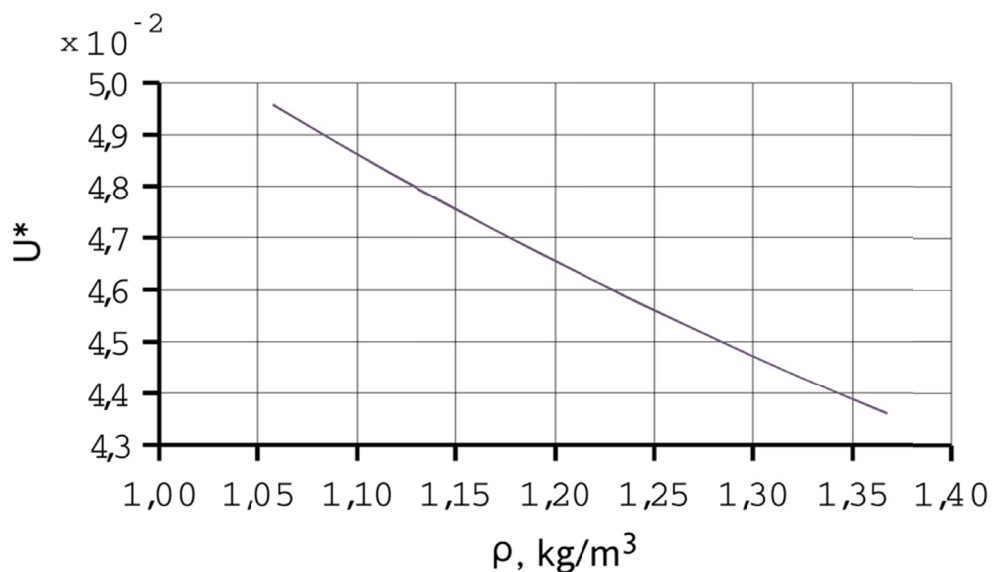


Rys. 9. Zmiana wartości gęstości w funkcji temperatury, dla warunków izobarycznych



Rys. 10. Zmiana wartości gęstości w funkcji ciśnienia barometrycznego, dla warunków izotermicznych

Zakładając, że na wartość gęstości powietrza wilgotnego ma przede wszystkim wpływ zmiana temperatury, przebieg zmienności wartości U^* przy założeniu pomijalnie małych zmian naprężeń stycznych na ścianach wyrobiska przedstawia krzywa zamieszczona na Rys. 11.

Rys. 11. Zmiana wartości U^* w funkcji zmiany gęstości powietrza

Jak wynika z analizy przebiegu krzywej zamieszczonej na Rys. 11, wartość prędkości dynamicznej maleje wraz ze wzrostem gęstości powietrza. W związku z powyższym, dla stałej wartości prędkości U_2 wartość bezwymiarowej prędkości U^+ , zgodnie z równaniem (3) rośnie. Z uwagi na to, że pomiary opisywane w pracy [29] były przeprowadzane przy niższych temperaturach powietrza, różnice w wartości gęstości powietrza, a co za tym idzie wartości U^* , mogły dodatkowo przyczynić się do zwiększenia różnicy pomiędzy przebiegami bezwymiarowej prędkości U^+ .

5. Konkluzje

Przedstawione wyniki pomiarów warstwy przyściennej w wyrobisku górniczym wnoszą nowe elementy do metrologii przepływów górniczych. Korzystając z zaawansowanych metod pomiarowych można wykazać wpływ warunków przepływowych na kształt profilu prędkości powstającym podczas przepływu powietrza w wyrobisku górniczym, oraz związanej z tym wartości objętościowego strumienia masy q_v . Prowadząc szeroko zakrojone badania eksperymentalne w różnych konfiguracjach przestrzennych wyrobisk górniczych można podjąć próbę uproszczenia procedury pomiarowej oraz wydzielić stałe miejsca kontrolne służące do bieżącej metrologii procesów wentylacyjnych w kopalniach głębinowych. Dodatkowo cenną informacją w aspekcie eksperymentów prowadzonych w wyrobiskach górniczych jest możliwość stosowania do obliczeń prężności pary wodnej zawartej w powietrzu wilgotnym przy użyciu wzoru w postaci wielomianu drugiego stopnia (8), który dla interesujących zakresów temperatur z dobrym przybliżeniem zastępuje bardziej skomplikowaną postać (7). Pomimo obiecujących wniosków płynących z analizy danych pomiarowych, autorzy są świadomi konieczności dalszych eksperymentalnych oraz numerycznych weryfikacji zawartych tutaj spostrzeżeń.

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

Literatura

- [1] Roszczynialski W., Trutwin W., Waclawik J., *Kopalniane pomiary wentylacyjne*. wyd. „Śląsk”, Katowice 1992.
- [2] Kruczkowski J., *Wpływ własności dynamicznych czujnika anemometru skrzydełkowego na dokładność pomiaru prędkości przepływu powietrza w wyrobisku kopalnianym*. Praca doktorska IMG PAN Kraków, 1999.
- [3] Ligęza P., *Układy termooanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, Rozprawy, Monografie nr 98, Kraków 2001.
- [4] Ligęza P., Poleszczyk E., *Badanie właściwości cylindrycznych sensorów platynowo-ceramicznych w aspekcie konstrukcji sondy do wyznaczania wektora prędkości przepływu w warunkach kopalnianych*. Prace Instytutu Mechaniki 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 anemometrze stalotemperaturowym*. Metrologia i Systemy Pomiarowe nr 9, 1991.
- [13] Ligęza P., *Thermoanemometric method for measuring velocity and temperature in non-isothermal flows*. Archives of Mining Sciences nr 3, 1994.
- [14] Ligęza P., *Sposób kompensacji temperaturowej mostkowego termooanemometru stalotemperaturowego oraz mostkowy termooanemometr stalotemperaturowy skompensowany temperaturowo*. Patent PL 175092 B1, Warszawa, 1994.

- [15] Ligęza P., *High – precision CTA*. MST News, 4, 1997.
- [16] Ligęza P., *A modified temperature-compensation circuit for CTA*. Measurement Science and Technology, 9, 1998.
- [17] Ligęza P., *A four-point constant-current/temperature controlled circuit for anemometric applications*. Review of Scientific Instruments, 1, 2000.
- [18] Ligęza P., Poleszczyk E., *Termoanemometryczne metody pomiaru prędkości – aparatura pomiarowa w kopalni*. Archives of Mining Sciences, Vol. 49, Special Issue, 2004.
- [19] Ligęza P., Poleszczyk E., *Charakterystyki metrologiczne cienkowarstwowych sensorów platynowych w zastosowaniu do wielopunktowych pomiarów pola prędkości przepływu*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, nr 3-4, 2004.
- [20] Ligęza P., Poleszczyk E., *Koncepcja i badania modelowe sondy do wielopunktowych pomiarów pola prędkości*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, nr 3-4, 2004.
- [21] Ligęza P., Poleszczyk E., *Sonda termoanemometryczna do wielopunktowych pomiarów pola prędkości*. Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, nr 8, 2005.
- [22] Ligęza P., Poleszczyk E., *Multipoint measurements of flow velocity fields*. Archives of Mining Sciences, Vol. 50, 2005.
- [23] Dziurzyński W., Trutwin W., Cierniak W., *Stany nieustalone w kopalnianych sieciach wentylacyjnych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Kraków, 1996.
- [24] Lomas C.G., *Fundamentals of hot wire anemometry*. Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- [25] Sakao F., *Constant temperature hot wires for determining velocity fluctuations in an air flow accompanied by temperature fluctuations*; J. Phys. E: Sci. Instrum. 913-916, 1973.
- [26] Skotniczny P., *Rozwój strugi powietrza w dyfuzorze prostokątnym*. Transactions of the Strata Mechanics Research Institute, Seria: Monografie Rozprawy, Monografia nr 8, 2005.
- [27] Skotniczny P., *Symulacja przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych*. Przegląd Górniczy, 2004.
- [28] Elsner J.W., *Turbulencja przepływów*. PWN Warszawa 1985.
- [29] Ligęza P., Poleszczyk E., Skotniczny P., *Measurements of Velocity Profile in Heading with the Use of Integrated Hot-Wire Anemometric System*. Archives of Mining Sciences, Vol. 53, 2008.
- [30] Szymkat M., *Komputerowe wspomaganie w projektowaniu układów regulacji*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; Warszawa, 1993.
- [31] Waluś St., *Optymalizacja metrologiczna pomiaru strumienia płynu za pomocą przepływomierzy próbkujących*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia, Gliwice, 2003.
- [32] Wala M.A., Jacob J.D. 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 5 – Analysis of the air velocity distribution in the boundary layer under flow conditions in a mine working

Abstract

Analysis and measurements of ventilation networks are an important element in examining the condition and course of mine ventilation. The efficiency and reliability of the ventilation network system influences the mining process and work safety in the mine. This article presents the concept and prototype of a thermal anemometric measurement system for multi-point velocity field measurements. The system is based on sensors integrated with a signal processing system. An array of such sensors, distributed throughout the examined excavation cross-section, cooperates with a portable, computer-based data acquisition system. This enables simultaneous, multi-point measurement of flow velocity within the examined cross-section. The sensors utilize a unique measurement system based on a modification of a constant-temperature bridge system with temperature compensation. This system is the subject of the authors' patent. The developed measurement system was used to verify computer simulations of air flows in selected areas of mining excavations. This part of the publication series presents analysis of the air velocity distribution in the boundary layer under flow conditions in a mine working.

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