

Zastosowanie konwekcji cieplnej do określania kierunku przepływu dwuwymiarowego

PAWEŁ JAMRÓZ

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania nad możliwością wykorzystania zjawiska konwekcji cieplnej do określania kierunku przepływów. Rozwiązanie takie mogłoby znaleźć zastosowanie w warunkach pomiarów przepływów cechujących się niskimi wartościami prędkości i fluktuacjami kierunku. W oparciu o przedstawioną ideę pomiaru opracowano prototypowy czujnik wyposażony w cienkie włókna termorezystancyjne pozwalające na określenie chwilowych wartości temperatury i wykonano badania laboratoryjne na stanowisku do pomiarów charakterystyk kątowych czujników termoanemometrycznych.

Słowa kluczowe: kierunek przepływu, konwekcja cieplna, pomiar temperatury

1. Wstęp

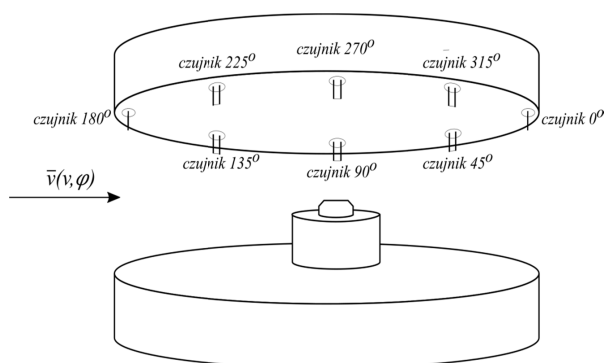
Detekcja kierunku przepływu w najszerszym zakresie wykorzystywana jest w monitorowaniu zjawisk meteorologicznych. W pomiarach takich wykorzystuje się wiatromierze ultradźwiękowe oraz wiatrowskazy. Pomiar kierunku przepływu realizowany przez wiatromierze ultradźwiękowe, związany jest z wykorzystaniem układu nadajników i odbiorników impulsów akustycznych. Automatyczne wiatrowskazy wykorzystują do tego suwak potencjometryczny, którego położenie zależne jest od wychylenia elementu ruchomego wiatrowskazu zgodnie z kierunkiem wiatru. Działanie takich przyrządów ograniczone jest do określania kierunku przemieszczających się mas powietrza względem ziemi. Z uwagi na ograniczoną czułość oraz bezwładność ruchomych elementów wiatromierzy, stosowane urządzenia wykorzystywane są w ograniczonym zakresie, nie pozwalając na analizowanie kierunków przepływów cechujących się małymi prędkościami. Pewne ograniczenia aplikacyjne w pomiarze kierunku przepływu takimi metodami związane są również z dużymi wymiarami takich sensorów. Dlatego też prowadzone są prace mające na celu miniaturyzację detektorów kierunku przepływu opracowywanych w technologii MEMS wykorzystującą zjawiska unoszenia ciepła wraz z przepływem w kierunku od nadajnika do detektorów w postaci termometrów termoelektrycznych umieszczonych w jednej płaszczyźnie wraz z nadajnikiem [1].

Wykonując pomiary wentylacyjne w różnego typu obiektach [2], często stykamy się z problemami wyznaczenia kierunków migracji medium w warunkach przepływów cechujących się niskimi prędkościami (poniżej 0,1 m/s), dla których występują fluktuacje zarówno prędkości jak i kierunku przepływu. Analizując takie potrzeby pomiarowe związane z określaniem kierunków migracji gazów, zdecydowano się na podjęcie próby opracowania nowego czujnika kierunku przepływu wykorzystującego zjawisko konwekcji cieplnej i szerokopasmowe czujniki termorezystancyjne w postaci cienkich włókien. Aby taki pomiar był możliwy konieczne było przeprowadzenie badań związanych z wykorzystaniem zjawiska konwekcji cieplnej w określaniu kierunku przepływu.

2. Prototypowy czujnik do pomiaru kierunku przepływu wraz z systemem pozycjonowania

Weryfikacja postawionej hipotezy dotyczącej wykorzystania konwekcji cieplnej jako czynnika pozwalającego ustalić kierunek przepływu wymagała skonstruowania prototypowej sondy pomiarowej zgodnie z przedstawionym schematem na rysunku 1. Z uwagi, że sonda wyposażona miała być w czujniki włóknowe termorezystancyjne, wykorzystano dostępne w Pracowni Metrologii Przepływów gotowe czujniki, które doposażone zostały w obsadki łączące je z systemem pomiarowym. Aby możliwe było wykorzystanie istniejących elementów pomiarowych konieczne było opracowanie odpowiedniej konstrukcji sondy kierunku przepływu stabilizującej położenie poszczególnych czujników termometrycznych.

W oparciu o przedstawiony schemat wykonana została prototypowa sonda pomiarowa. Z uwagi, że sonda wyposażona miała być w czujniki włóknowe termorezystancyjne, wykorzystano dostępne w Pracowni Metrologii Przepływów gotowe czujniki, które doposażone zostały w obsadki łączące je z systemem pomiarowym. Cała konstrukcja sondy przedstawiona została na rysunku 2. Jej podstawy wykonane zostały z Tarflenu, cechującego się odpornością na temperatury do 260° i stosunkowo niskim współczynnikiem przewodności cieplnej. W dolnej podstawie umieszczone zostało źródło ciepła, w postaci grzałki sterowanej za pomocą autotransformatora.



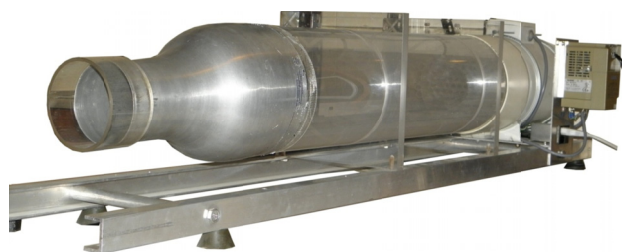
Rys. 1. Konstrukcja sondy – schemat



Rys. 2. Konstrukcja sondy – prototyp

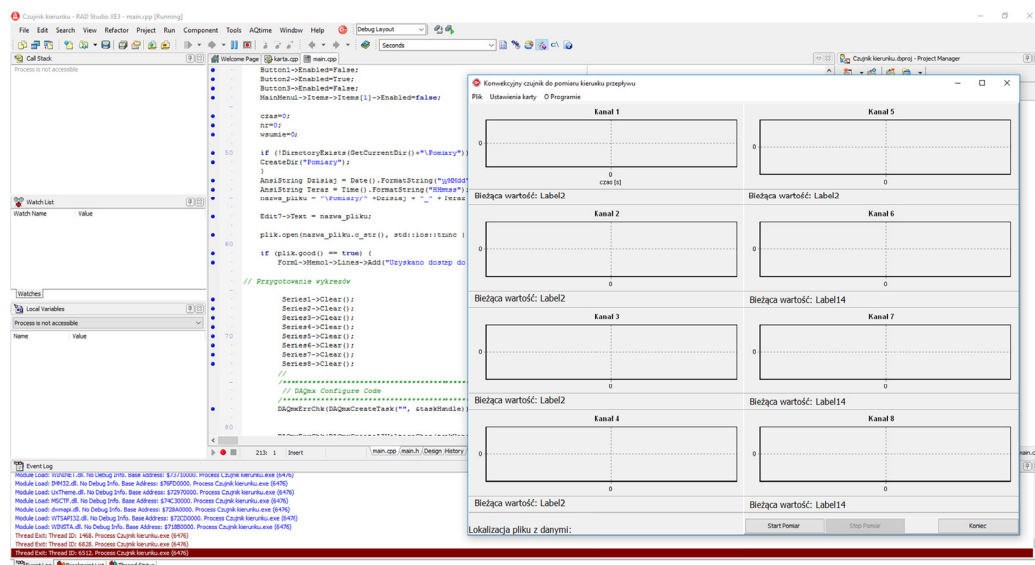
3. Stanowisko pomiarowe

Przedstawiona sonda pozwoliła na przeprowadzenie badań związanych z wykorzystaniem konwekcji cieplnej w określaniu kierunku przepływu. Badania te wymagały dodatkowo modernizacji istniejącego stanowiska pomiarowego do badania charakterystyk czujników termoanemometrycznych [3]. W skład stanowiska wchodzi otwarty tunel aerodynamiczny z wentylatorem, napędzany silnikiem trójfazowym zasilany prądem zmiennym o częstotliwości w zakresie 0,5 do 50 Hz z rozdzielczością 0,1 Hz za pośrednictwem falownika HITACHI SJ200. Na wylocie wentylatora, w celu wyrównania przepływu, skonstruowano ulownicę wykonaną z cienkich rurek.



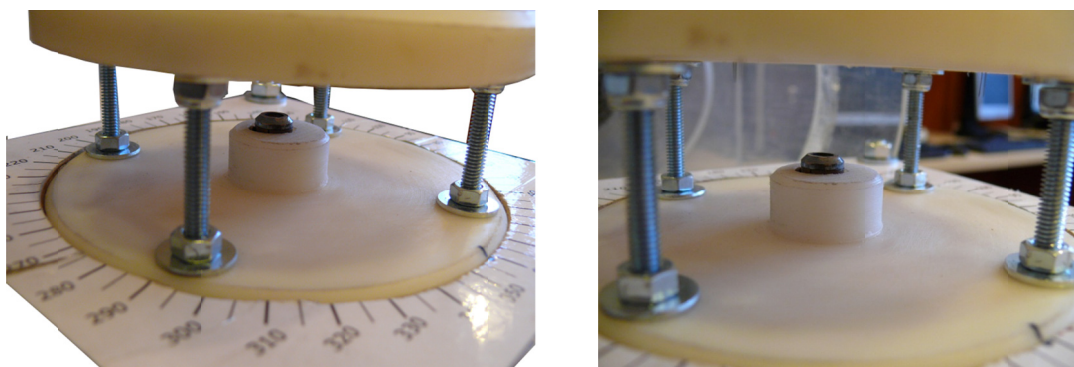
Rys. 3. Tunel aerodynamiczny z termoanemometrycznym układem zasilania sond

W przedstawionym stanowisku pomiarowym zostały wykorzystane dwa czterokanałowe, sterowane cyfrowo układy zasilania czujników termooanemometrycznych CCC 2002. Umożliwiają one pracę zarówno w układzie stałotemperaturowym (pomiar prędkości), jak i stałoprądowym (pomiar temperatury) [4]. Układy te współpracują z kartą pomiarową National Instruments NI USB-6009 umożliwiającą ośmiokanałowy pomiar napięcia z rozdzielczością 13 bitów i częstotliwością maksymalną 6 kHz na kanał (dla pomiaru z wykorzystaniem ośmiu kanałów w trybie single-ended). Opisane stanowisko pomiarowe wymagało modernizacji pozwalającej na przeprowadzenie zaplanowanych badań eksperymentalnych związanych z badaniem charakterystyki opracowanego czujnika kierunku przepływu. Modernizacja ta polegała na napisaniu oprogramowania pozwalającego na jednoczesną akwizycję danych pomiarowych z ośmiu kanałów termometrycznych oraz ich wizualizację w trybie on-line. Oprogramowanie współpracuje z kartami pomiarowymi firmy National Instruments. Program został wykonany w środowisku programistycznym C++ Builder pakietu RAD Studio XE3. Okno środowiska programistycznego oraz główny panel programu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Program do akwizycji danych

Dodatkowo system pomiarowy wyposażony został w układ pozycjonowania czujnika, pozwalający na obrót sondy względem własnej osi z rozdzielczością 5° . Sonda pomiarowa wraz z układem pozycjonowania przedstawiona została na rysunku 5.



Rys. 5. Sonda – Część pomiarowa

Dane pomiarowe rejestrowano z częstotliwością próbkowania wynoszącą 1 kHz w każdym z ośmiu kanałów pomiarowych. Z uwagi na to, że nie wykonywano wcześniejszego wzorcowania termometrycznych sond pomiarowych, na początku każdego cyklu eksperymentów dokonywano pomiaru w tej samej temperaturze T_0 przez każdą z sond pomiarowych w celu określania poziomu napięcia na poszczególnych sondach $U(T_0)$.

Na podstawie zmierzonych chwilowych wartości napięcia $U(T)$ w torze stałoprądowym termoanemometru wyznaczana jest wartość temperatury medium T zgodnie z zależnością:

$$T = \frac{U(T) - U(T_0)}{\alpha \cdot U(T_0)} + T_0$$

gdzie: α – temperaturowy współczynnik rezystancji dla materiału elementu czynnego termometru w temperaturze wzorcowania T_0 ($\alpha = 0,0036$ [5]).

Wraz z wynikami pomiarów związanymi z określaniem kątów przepływu podawana jest prędkość średnia przepływu. Prędkość tą mierzono w obszarze wlotowym do czujnika za pomocą termoanemometru Velocicalc 9565 wyposażonego w sondę typ 960 o błędzie granicznym 0,015 m/s. Temperatura odniesienia mierzona była z wykorzystaniem miernika termoparowego TENMARS TM-742D wyposażonego w termoparę typu K.

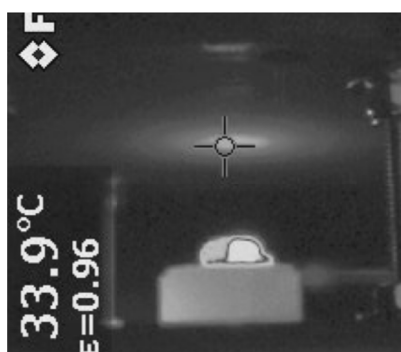
W trakcie prowadzenia eksperymentów wymuszane były przepływy w określonych kierunkach związanych z układem odniesienia sondy pomiarowej. Analizie podlegały chwilowe i średnie wartości sygnałów odpowiedzi temperaturowych tych czujników.

4. Badania laboratoryjne

Laboratoryjne badania rozkładu ciepła nad źródłem umieszczonym w przepływach cechujących się małymi prędkościami wykonywane były z wykorzystaniem kamery termowizyjnej oraz termoanemometrycznego, wielopunktowego systemu pomiarowego CCC2002 pracującego jako termometr stałoprądowy i rejestrującego sygnały pomiarowe z ośmiu czujników termorezystancyjnych. Badania wykonano dla przypadku konwekcji cieplnej nad źródłem ciepła w warunkach bez przepływu wymuszonego, z przepływem o wartości 0,05 m/s oraz w przypadku przepływu 0,15 i 0,25 m/s.

4.1. Brak przepływu

Dla prędkości przepływu zbliżonej do 0 m/s nagrzanie górnej podstawy sondy rozłożone jest równomiernie wraz z odległością od jej środka (Rys. 6).

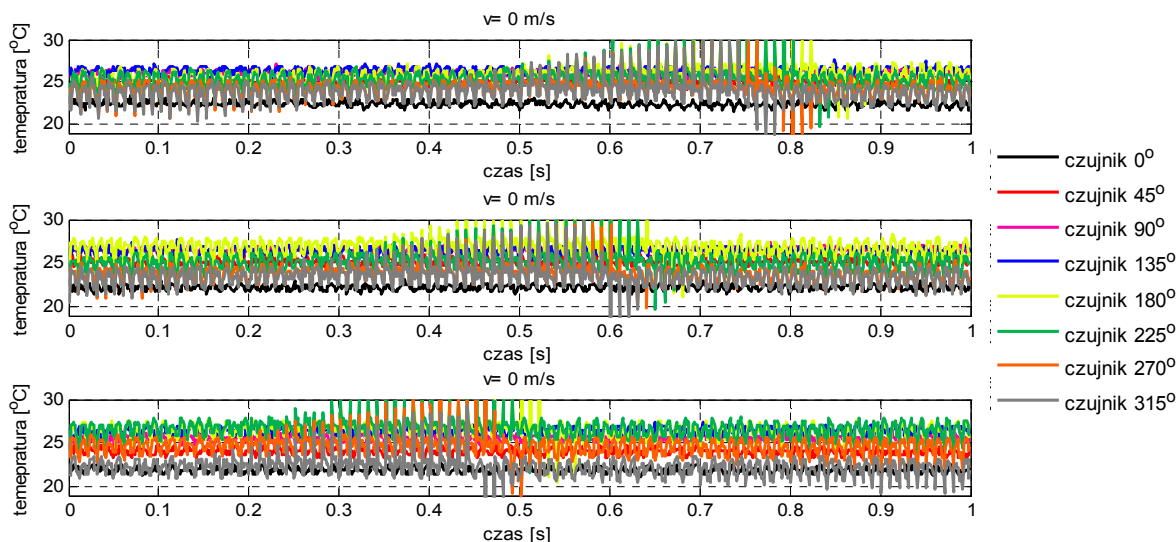
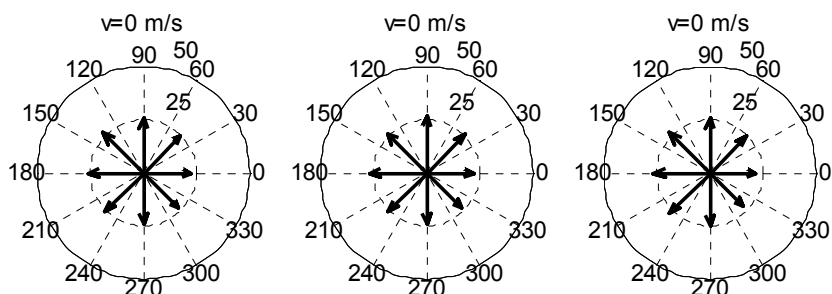


Rys. 6. Termowizja $v \approx 0$ m/s

Temperatura rejestrowana przez wszystkie czujniki jest na podobnym poziomie i mieści się w przedziale między 22, a 27°C (Rys. 7 – trzy kolejne przypadki pomiarowe). Różnice te mogą świadczyć o wystąpieniu niemierzalnego ruchu powietrza w kierunku czujników rejestrujących najwyższe wartości temperatury.

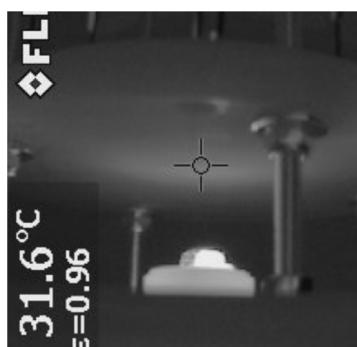
Rozkłady temperatur średnich z okresu 1 s zostały umieszczone na wykresach w układzie współrzędnych biegunowych (Rys. 8 – trzy kolejne przypadki pomiarowe). Długość każdego z promieni wodzących wskazuje wartość temperatury czujnika. Kąt skierowania promienia odpowiada położeniu poszczególnego czujnika tak jak to przedstawiono na rysunku 1.

W każdym z trzech przypadków pomiarowych najniższa wartość temperatury rejestrowana była przez czujnik 0°. Temperatury o najwyższych wartościach rejestrowane są natomiast przez czujniki 135°, 180° oraz 225°.

Rys. 7. Zarejestrowane temperatury dla $v \approx 0$ m/sRys. 8. Zarejestrowane średnie temperatury dla $v \approx 0$ m/s w biegunowym układzie współrzędnych

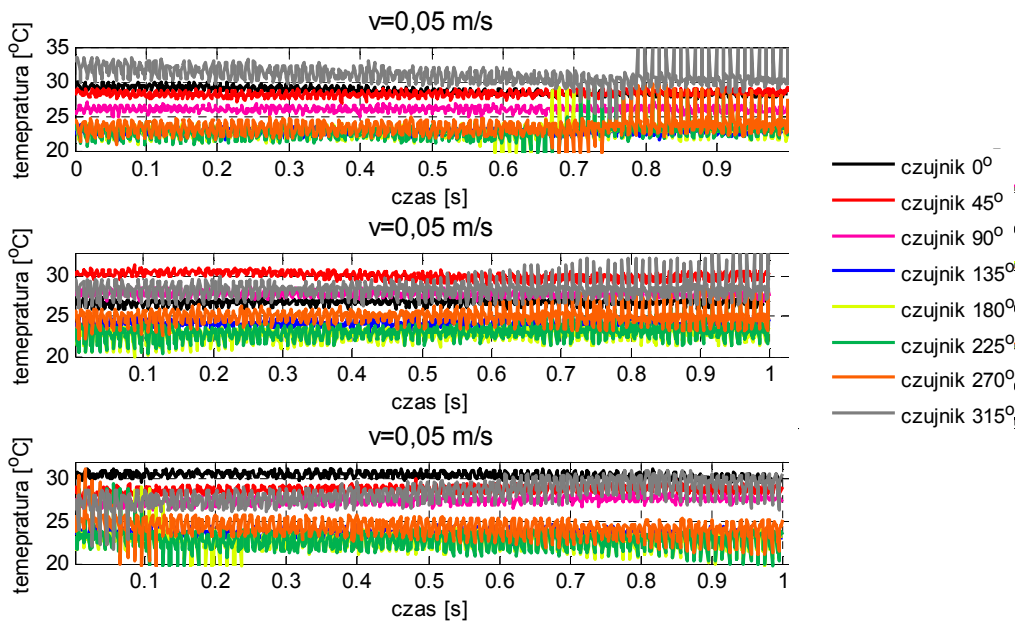
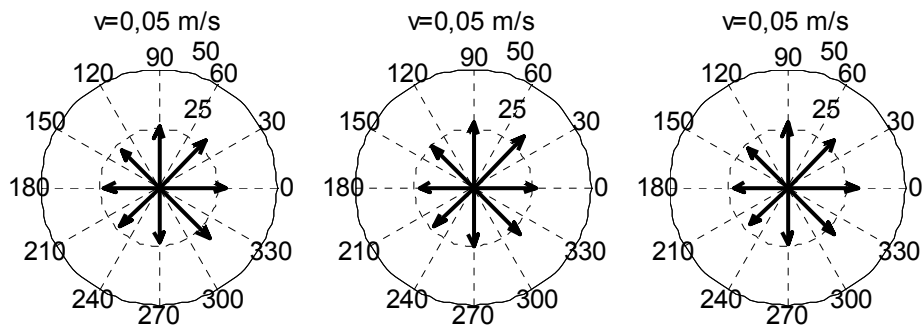
4.2. Prędkość przepływu $v = 0,05$ m/s

Prędkość 0,05 m/s jest prędkością graniczną możliwą do zrealizowania na prezentowanym stanowisku pomiarowym. Eksperyment realizowany był w taki sposób aby linie prądu przepływu pokrywały się z kierunkiem 180°-0°, związanym z sondą pomiarową. Zdjęcie termowizyjne nagrzanej górnej podstawy sondy (Rys. 9) pokazuje stożek ciepły, utworzony po długim czasie nagrzewania. Jego cechą charakterystyczną jest szeroki zakres oddziaływania obejmujący w tym przypadku czujniki 0, 45 i 315°.

Rys. 9. Termowizja $v = 0,06$ m/s

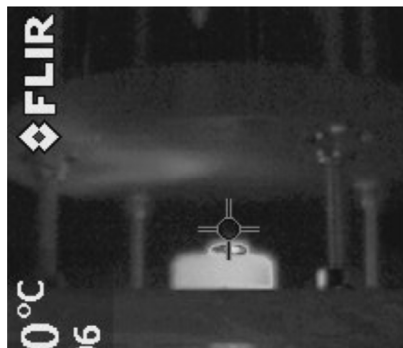
Wpływ oddziaływania strugi konwekcyjnej da się również zauważyć na czujniku 90° (Rys. 10 i 11).

Efekt ten występuje jedynie dla najniższych prędkości (poniżej 0,1 m/s) i spowodowany jest wielkością i kształtem elementu grzejnego. W celu wyeliminowania tego zjawiska konieczne są dalsze badania nad optymalizacją źródła ciepła oraz kształtu obudowy czujnika z symulacji w środowiskach obliczeniowych wspierających modelowanie zjawisk przepływowych (CFD).

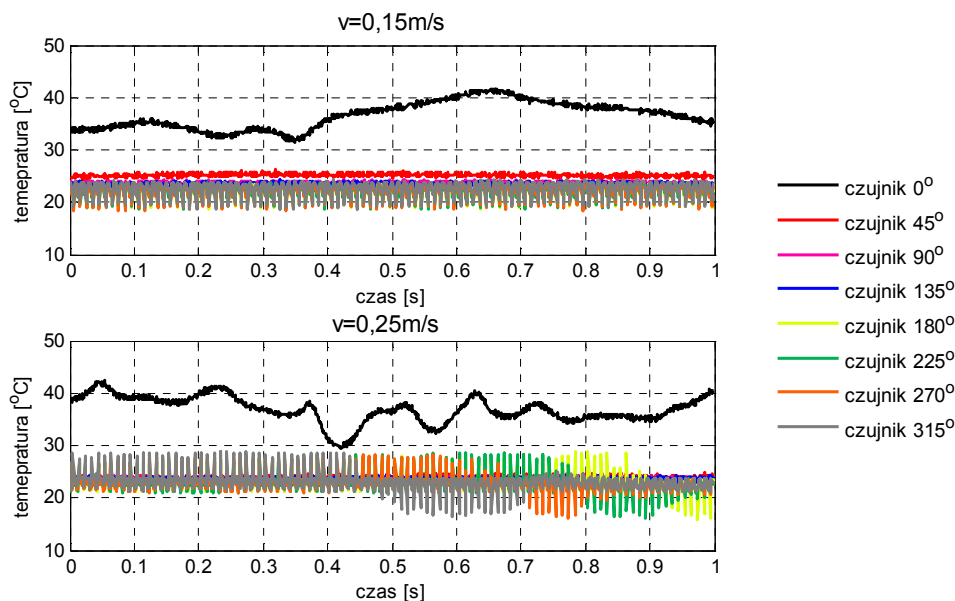
Rys. 10. Zarejestrowane temperatury dla $v = 0,05$ m/sRys. 11. Zarejestrowane średnie temperatury dla $v = 0,05$ m/s biegunowy układ współrzędnych

4.2. Prędkość przepływu $v > 0,1$ m/s

W zakresie prędkości powyżej 0,1 m/s następuje zawężenie śladu cieplnego (Rys. 12). Struga konwekcyjna kierowana jest w kierunku czujnika, w kierunku którego następuje napływ powietrza.

Rys. 12. Termowizja $v = 0,15$ m/s

Potwierdzają to wyniki pomiarów temperatury poszczególnych termometrów. Na rysunku 13 przedstawiono chwilowe wartości temperatur rejestrowane przez kolejne czujniki dla przepływów o prędkości 0,15 i 0,25 m/s. W obu przypadkach najwyższe wartości temperatur wskazywane są przez termometr, w kierunku którego następuje przepływ (czujnik 0°).

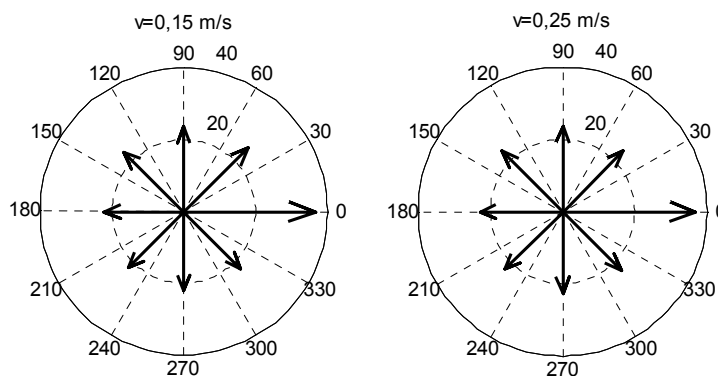
Rys. 13. Zarejestrowane temperatury dla $v = 0,15$ i $0,25$ m/s

Analizując wartości temperatur w kolejnych chwilach czasowych widać duże zmiany temperatury czujnika, w kierunku którego następuje napływ. Związane jest to z niejednorodnym rozkładem pola temperatury strugi konwekcyjnej unoszonej przez przepływ. W każdym punkcie rejestrowanych temperatur, wartość temperatury wskazywanej przez czujnik, na który struga konwekcyjna oddziałuje wskazuje wyraźnie większe wartości. Wskazywane różnice temperatur między czujnikiem 0° , a resztą mieszczą się w granicy między 8 a 20°C .

W tabeli 1 i na rysunku 14 przedstawiono średnie wartości temperatury zebrane z 1000 próbek zarejestrowanych z częstotliwością 1 kHz przez każdy z czujników.

Tab. 1. Średnie wartości temperatur $v = 0,15$ m/s i $v = 0,25$ m/s

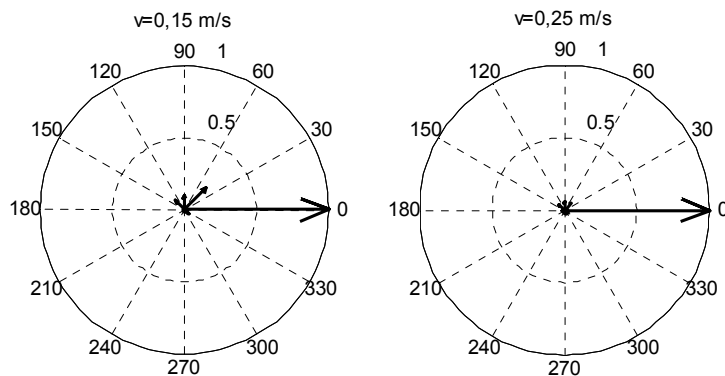
	Czujnik 0°	Czujnik 45°	Czujnik 90°	Czujnik 135°	Czujnik 180°	Czujnik 225°	Czujnik 270°	Czujnik 315°
$v = 0,15$ m/s	36,6	25,2	23,6	23,4	22,1	22,1	22,2	22,7
$v = 0,25$ m/s	36,9	23,8	23,6	23,6	22,9	22,8	22,8	23,0

Rys. 14. Zarejestrowane średnie temperatury dla $v = 0,15$ i $0,25$ m/s – biegunowy układ współrzędnych

Analizując poszczególne wartości można zauważyć, że wszystkie czujniki oprócz czujnika 0° wskazują temperaturę zbliżoną do temperatury przepływającego medium ($22,3^\circ\text{C}$). Nieznacznie podwyższoną wartość temperatury wskazuje czujnik 45° (różnica między 1 , a 2°C) w stosunku do czujników pozostających poza strefą oddziaływania głównego nurtu strugi konwekcyjnej związanego z unoszeniem jej przez przepływ.

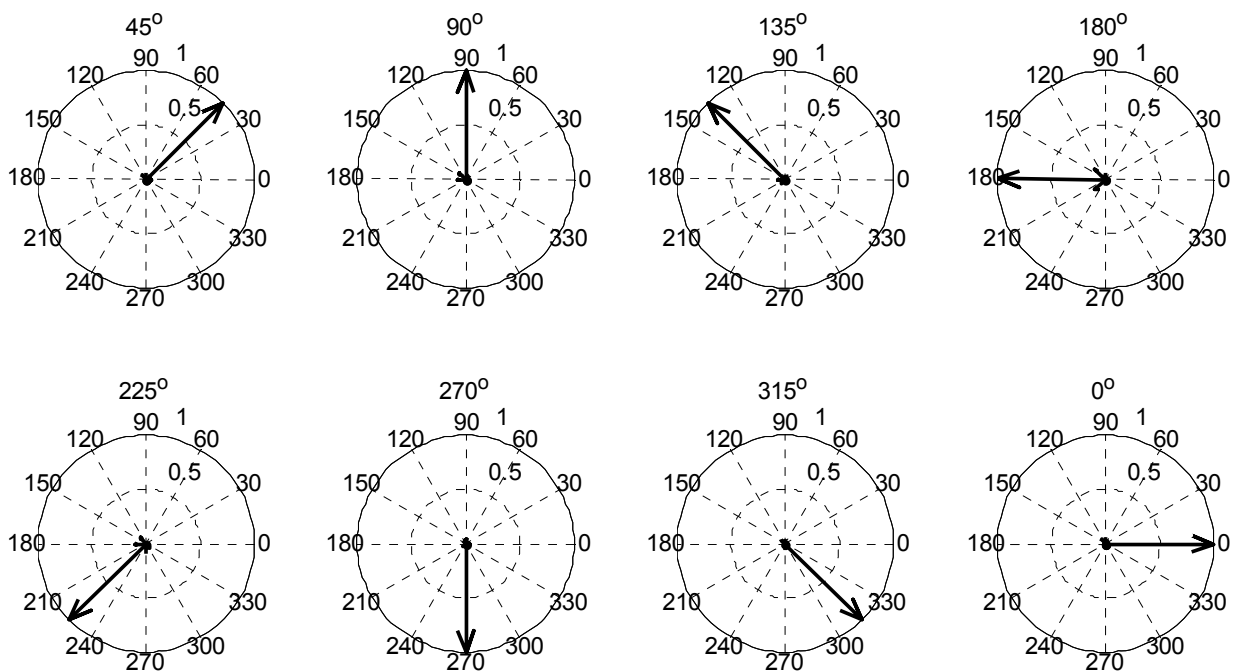
W celu zobrazowania istotności wskazań poszczególnych czujników w procesie wyznaczania kierunku przepływu, od wszystkich wyznaczonych wartości średnich temperatur odjęto wartość minimalnej średniej

temperatury. Dla przypadku $v = 0,15$ m/s było to $22,1^{\circ}\text{C}$ natomiast dla przypadku $v = 0,25$ m/s, $22,8^{\circ}\text{C}$. Następnie wszystkie nowo wyliczone wartości temperatur zostały podzielone przez wartość największą, tak aby uzyskać wykresy w jednostkach bezwymiarowych w zakresie 0 do 1 – rysunek 15.



Rys. 15. Względne składowe kierunku przepływu dla $v = 0,17$ i $0,27$ m/s

W przypadku $v = 0,15$ m/s oprócz dominującej składowej widać nieznaczne oddziaływanie strugi konwekcyjnej na czujnik 45° . Dla prędkości $0,25$ m/s takie oddziaływanie jest niezauważalne. Analogiczne badania wykonane zostały dla napływu o wartości prędkości $0,25$ m/s w kierunku każdego z czujników tj. 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° i 315° . Ich wyniki zaprezentowano na rysunku 16.



Rys. 16. Względne składowe kierunku przepływu w przypadku napływu w kierunku kolejnych czujników dla $v = 0,25$ m/s

Uzyskane w ten sposób wyniki pokrywają się z wynikami pomiarów i analiz przedstawionymi dla przypadku napływu w kierunku czujnika 0° . Wykazują, że możliwe jest takie ustawienie sondy, w którym struga konwekcyjna oddziałuje jedynie na czujnik, w kierunku którego następuje przepływ. Pozwala to na sformułowanie wniosku o możliwości skonstruowania uproszczonej wersji sondy do detekcji kierunku przepływu, która posiada tylko 1 czujnik termometryczny. Pomiar kierunku i zwrotu przepływu polegałby wtedy na takim ustawieniu sondy względem przepływu, w którym sonda termometryczna wskazywałaby maksymalne wartości temperatury.

5. Podsumowanie

W trakcie prowadzenia badań nad proponowaną metodą pomiaru kierunku przepływu wykazano, że istnieje możliwość detekcji kierunku przepływu z zastosowaniem konwekcji cieplnej dla prędkości przepływu powyżej 0,1 m/s. Dla przepływów o prędkościach poniżej 0,1 m/s weryfikacja metody wymaga przebudowy stanowiska pomiarowego i dodatkowych badań. Konieczne są też dalsze prace w celu optymalizacji kształtów czujnika.

Uzyskane wyniki posłużą do wykonania docelowego urządzenia pomiarowego pozwalającego określać chwilowe kierunki dwuwymiarowych przepływów fluktuujących oraz kierunki przepływów cechujących się niskimi prędkościami.

Literatura

- [1] Chen B., Zhu Y.-Q., Yi Z., Qin M., Huang Q.-A.: *Temperature Effects on the Wind Direction Measurement of 2D Solid Thermal Wind Sensors*. Mariani S., ed. Sensors (Basel, Switzerland). 2015;15(12):29871-29881. doi:10.3390/s151229771.
- [2] Alexandrowicz Z. (red.): *Grotty Kryształowe w Kopalni Soli Wieliczka*. „Studia Naturae”. 46, 2000. ISSN 0081-6760
- [3] Jamróz P. Ligęza P.: *Stanowisko do badań charakterystyk kierunkowych czujników przepływu w zakresie małych prędkości*. Materiały IX Konferencji Naukowej Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE 2006
- [4] Ligęza P.: *Four-point non-bridge constant-temperature anemometer circuit*. Exp. Fluids 29, 505 (2000)
- [5] Cierniak W.: *Termoanemometers*. Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Kraków, 2009.

Application of the convective heat transfer for determination of direction of 2D air flow

Abstract

The article presents studies on the use convective heat for determination the air flow direction. This solution could be applied in case of two-dimensional flows measurements, characterized by low velocity range and flow direction fluctuations. Based on described idea of measurement, a prototype sensor was developed. The sensor was equipped with eight temperature probes made of the very thin (5 μm diameter) wires. The laboratory tests were performed using the modernised measurement stand dedicated to determine of anemometers sensors characteristic.

Keywords: flow direction, heat convection, temperature measurement