

Mirosław KABACIŃSKI, Sławomir POCHWAŁAPOLITECHNIKA OPOLSKA, KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I APARATURY PRZEMYSŁOWEJ
ul. Stanisława Mikołajczyka 5, 45-271 Opole**Wpływ deformacji profilu prędkości na wartość współczynnika przepływu przepływomierza z rurką uśredniającą ciśnienie dynamiczne**

Dr inż. Mirosław KABACIŃSKI

Od 2004 r. zatrudniony w Katedrze Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej Politechniki Opolskiej. Zajmuje się problematyką pomiarów przepływu płynów przy pomocy przepływomierzy z rurkami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne – badania eksperymentalne i symulacje numeryczne przy użyciu pakietu Fluent. Autor nowej konstrukcji przepływomierza dwuprofilowego z sondą uśredniającą ciśnienie dynamiczne wraz z oprogramowaniem i stanowiskiem umożliwiającym wzorcowanie tego typu czujników.



e-mail: m.kabacinski@po.opole.pl

Mgr inż. Sławomir POCHWAŁA

Od 2008 roku doktorant w Katedrze Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej Politechniki Opolskiej. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z pomiarami przepływów w zaburzonym polu prędkości przy pomocy przepływomierzy z rurkami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne – badania eksperymentalne oraz symulacje numeryczne przy użyciu pakietu Fluent.

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono zasadę działania rurek uśredniających oraz stanowisko do ich wzorcowania. Zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych pomiaru strumienia powietrza przepływomierzami spiętrzającymi w strefie zaburzonego przepływu za pojedynczym kolaniem. Określono profile prędkości w wybranych miejscach instalacji. Wyznaczono charakterystyki współczynnika przepływu K dla rurki o kształcie opływowym. Podano wartości współczynnika korekcyjnego umożliwiającego zmniejszenie niepewności pomiaru przepływu rurką uśredniającą. Wykazano, że lokalizacja przepływomierza poniżej $5D$ za kolaniem powoduje istotny wzrost niepewności pomiaru.

Słowa kluczowe: profil prędkości, pomiary przepływów, rurki uśredniające ciśnienie dynamiczne, niepewność pomiaru.

Influence of velocity profile deformation on flow averaging tube flow coefficient**Abstract**

This paper presents experimental results of the air flow across an obstacle formed by a 90 degree segmented elbow. The internal diameter of the pipeline was $D=152$ mm, while the range of the mean velocities $w = 10\div 30$ m/s. The velocity profiles were determined (using Prandtl tube) both in the vertical and horizontal plane [12] in the relative distances L/D of the pipeline from $3D$ to $20D$ (Figs. 5 and 6). In the places of the established velocity profiles a streamlined flow averaging tube [7] was placed to determine the characteristics of the flow coefficient K (Figs. 8 and 9) as a function of the mean velocity (and Re number). The scope of this paper is also to present an automated test stand (equipped with a dedicated computer program - data acquisition) for calibrating flowmeters. The results of the experiments are given in the form of charts and compared. Analysis of the effect of changing the position of the averaging probe (vertical, horizontal) was conducted together with examination of the influence of the distance behind the obstacle (elbow) on the K -factor value. The realized experiment allowed shortening the distance between the obstacle and flowmeter installation place and informing about the correction factor value which can be used to minimise the uncertainty of the air flow rate measurement (Fig. 10). It was assumed that the horizontal plane is better for probe installation because of almost axi-symmetrical velocity profile and better repeatability of measurement points (K -factor changes by about 1%).

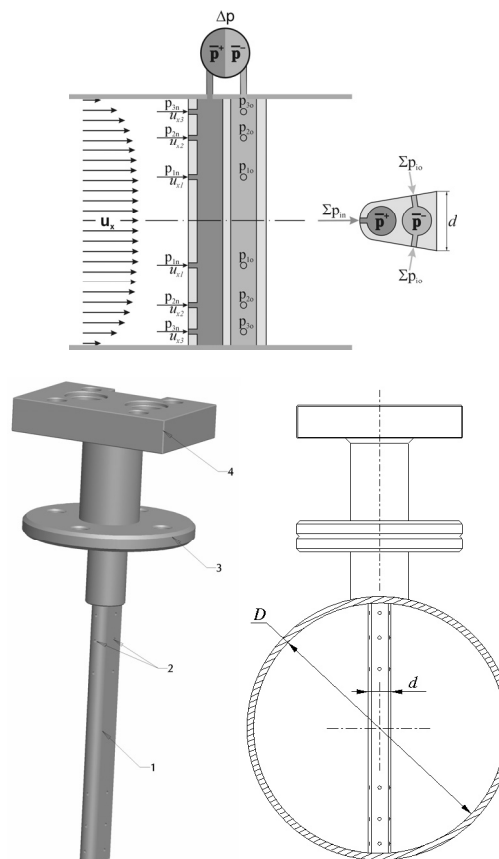
Keywords: velocity profile, flow measurements, flow averaging tubes, measurement uncertainty.

1. Wstęp

Pomiary przepływów gazów i cieczy w warunkach przemysłowych w zależności od wielu czynników mogą być realizowane za pomocą różnych przepływomierzy [1, 2]. W szczególnych warunkach, takich jak wysokie ciśnienie i temperatura mierzonego medium ograniczone, lub wręcz niemożliwe jest stosowanie większości dostępnych na rynku przepływomierzy [3]. Warunki takie

skłaniają do zastosowania przepływomierzy spiętrzających przepływ – zwężek lub rurek uśredniających ciśnienie dynamiczne [4, 5]. Zwężkowa metoda pomiaru niesie za sobą wysokie trwałe straty ciśnienia i istotne modernizacje instalacji przepływowej związane z gabarytami przepływomierza (zwłaszcza zwężki Venturiego). Takich wad nie posiadają sondy uśredniające ciśnienie dynamiczne [6]. Niższy koszt instalacji i prostota montażu takiego przepływomierza, zdecydowanie mniejsze trwałe straty ciśnienia wywołane ich obecnością, jak i możliwość montażu i demontażu na pracującej instalacji (system WET-TAP[®]) przemawia na ich korzyść [7, 8].

Zasadę działania przepływomierza z rurką uśredniającą oraz podstawowe elementy przepływomierza przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przepływomierz z czujnikiem uśredniającym ciśnienie dynamiczne (mocowanie kołnierzowe): 1 - sonda, 2 - otwory impulsowe, 3 - kołnierz, 4 - głowica, d – szerokość sondy, D – średnica rurociągu
Fig. 1. Flowmeter with flow averaging tube (flange fittings): 1 - probe, 2 - impulse holes, 3 - flange, 4 - head, d - probe width, D - pipeline diameter

Strugi płynu trafiając na przeszkodę w postaci sondy omywają ją wywołując lokalne spiętrzenie – nadciśnienie p^+ po stronie napływowej, natomiast p^- na ściankach bocznych. Zmierzona różnica ciśnień $\Delta p = p^+ - p^-$ przy znanej gęstości płynu ρ , polu przekroju A rurociągu i wartości współczynnika przepływu K umożliwia wyznaczenie np. strumienia masy q_m przepływającego płynu

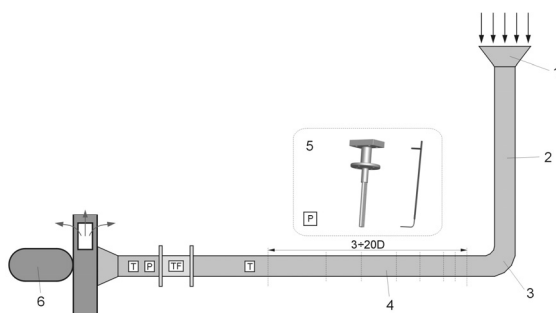
$$q_m = A \cdot K \sqrt{2\Delta p \cdot \rho} \quad (1)$$

Powyższa zależność obowiązuje dla osiowosymetrycznych rozkładów prędkości. W przypadku zaburzeń lokalnych w postaci kolan, zaworów, zasuw, czy też gwałtownych zmian przekroju następuje zaburzenie profilu prędkości [9]. Wówczas utrudnione jest określenie prędkości średniej w rurociągu w oparciu o podział przekroju przepływowego na pierścienie równoważne, których położenie determinuje miejsca odbioru ciśnień za pomocą otworków impulsowych. Istotna jest wiedza na temat miejsc przywracania osiowosymetrycznego profilu prędkości, lub też wpływu jego zaburzonej postaci na wartość współczynnika przepływu K sondy [10].

Zalecana długość odcinków prostych rurociągu przed i za przepływomierzem określana jest przez producentów przepływomierzy i umieszczana w dokumentacji technicznej urządzenia [7]. W zależności od konfiguracji rurociągu producent na podstawie przeprowadzonych pomiarów określa jaka jest minimalna długość odcinków prostych, po których profil prędkości przepływającego płynu jest dostatecznie symetryczny względem osi. Umożliwia to prawidłową eksploatację konkretnego typu przepływomierza z rurką uśredniającą ciśnienie dynamiczne przy zachowaniu wymaganej maksymalnej niepewności pomiaru strumienia płynu [11]. Możliwe jest skrócenie odcinków prostych przed przepływomierzem bez zastosowania prostownicy strumienia, lecz nieznanie są niepewności pomiaru w takich warunkach pomiarowych. Niezbędne jest więc określenie profili prędkości, zwłaszcza w bliskim sąsiedztwie przeszkody lokalnej, a następnie dokonanie pomiarów współczynnika przepływu K badanego przepływomierza z rurką uśredniającą w miejscach zaburzonego profilu prędkości w płaszczyźnie pionowej i poziomej.

2. Stanowisko pomiarowe

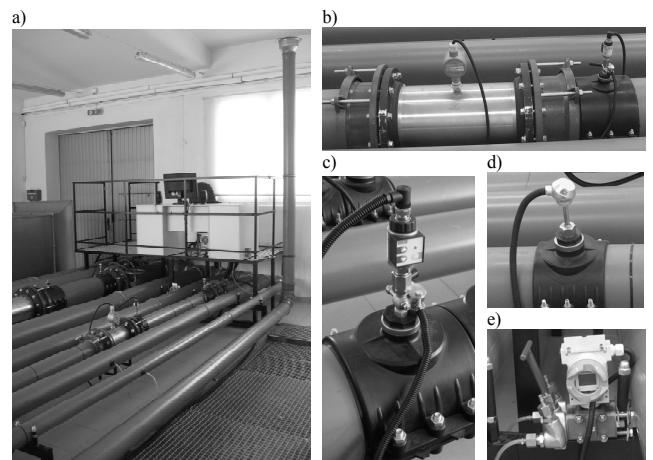
Pomiary zostały zrealizowane na stanowisku pomiarowym wyposażonym w układ zaburzający w postaci trzech kolan segmentowych ($3 \times 30^\circ$) o średnicy wewnętrznej 152 mm usytuowanych w jednej płaszczyźnie. Badanym czynnikiem było powietrze o temperaturze od 10 do 25°C , przy ciśnieniu zbliżonym do ciśnienia atmosferycznego. Budowę stanowiska pomiarowego przedstawiono schematycznie na rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego: 1 – wlot powietrza, 2 – odcinek stabilizujący profil prędkości, 3 – kolano segmentowe $3 \times 30^\circ$, 4 – odcinek pomiarowy, 5 – przepływomierz z rurką uśredniającą ciśnienie dynamiczne i rurką Prandtla odpowiednio do wyznaczania strumienia powietrza i profilu prędkości, 6 – silnik elektryczny wraz z dmuchawą, T – termometr, P – przetwornik ciśnienia absolutnego, TF – przepływomierz turbinowy

Fig. 2. Measurement system scheme: 1 – air inflow, 2 – velocity profile stabilizing section, 3 – segmented elbow $3 \times 30^\circ$, 4 – test section, 5 – flowmeter with flow averaging tube and Prandtl tube to flow rate and velocity profile measurement respectively, 6 – electric engine with blower, T – thermometer, P – absolute pressure transducer, TF – turbine flowmeter

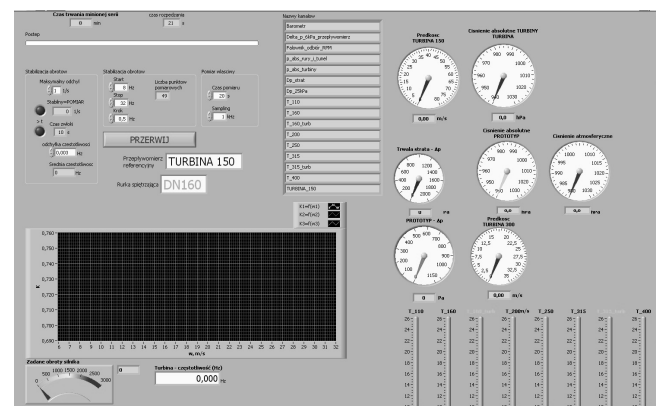
Widok ogólny stanowiska pomiarowego wraz z istotnymi elementami instalacji przedstawiono na rys. 3a. Przepływ powietrza wywołany jest przez dmuchawę napędzaną silnikiem elektrycznym, podłączonym do przetwornicy częstotliwości umożliwiającej w sposób płynny zmianę przepływu do wymaganych wielkości. Prędkość średnia przepływającego powietrza wyznaczana jest metodą referencyjną za pomocą wysokiej klasy przepływomierza turbinowego (rys. 3b) z dokładnością poniżej 0,5% wartości mierzonej. W celu określenia prędkości w miejscu instalacji przepływomierza wykorzystano do kompensacji układ dwóch przetworników ciśnienia absolutnego (rys. 3c) oraz dwóch termometrów Pt-100 (rys. 3d). Umożliwiło to pomiar zmiany gęstości powietrza (powstałej wskutek trwałych strat ciśnienia) na drodze od przepływomierza piętrzącego do przepływomierza turbinowego. Różnica ciśnień na rurce Prandtla i opływowej rurce uśredniającej mierzona była za pośrednictwem przewodów impulsowych przy pomocy przetwornika różnicy ciśnień zintegrowanego z trójdrogowym blokiem zaworów (rys. 3e).



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe: a) widok ogólny, b) przepływomierz turbinowy, c) przetwornik różnicy ciśnień, d) termometr Pt-100, e) przetwornik ciśnienia absolutnego

Fig. 3. Test stand: a) general view, b) turbine flowmeter, c) differential pressure transducer, d) thermometer Pt-100, e) absolute pressure transducer

Akwizycją danych pomiarowych zarządzały programy autorskie pracujące w środowisku LabView. Pierwszy z programów wspomagał określanie profilu prędkości w rurociągu wraz z jego graficzną interpretacją w czasie rzeczywistym dla zadanej prędkości średniej. Drugi program umożliwiał wyznaczenie charakterystyki współczynnika przepływu K w funkcji prędkości średniej w dla rurki uśredniającej o kształcie opływowym (rys. 4a).



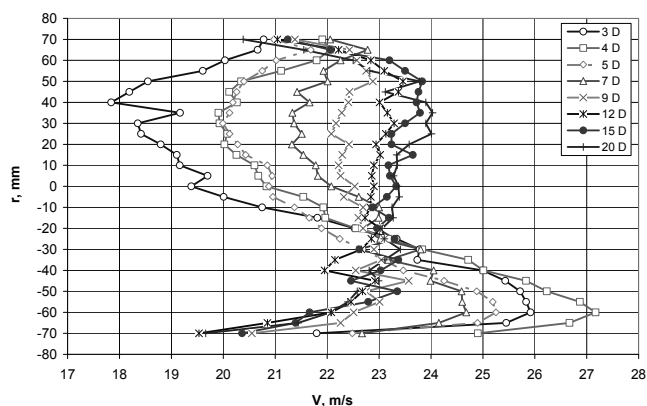
Rys. 4. Panel programu komputerowego do akwizycji danych
Fig. 4. Panel of acquisition data computer program

Wyniki pomiarów w wszystkich czujnikach archiwizowane były w postaci plików dla każdej sesji pomiarowej. Sygnały pomiarowe z czujników przekazywane były do komputera za pośrednictwem kart pomiarowych zintegrowanych w systemie CompactDAQ (rys. 4b). Komunikacja obustronna z przetwornicą częstotliwości (rys. 4c) realizowana była za pomocą wspomnianego programu komputerowego i miała na celu uzyskanie określonych prędkości przepływającego powietrza niezbędnych do utworzenia stosownych charakterystyk.

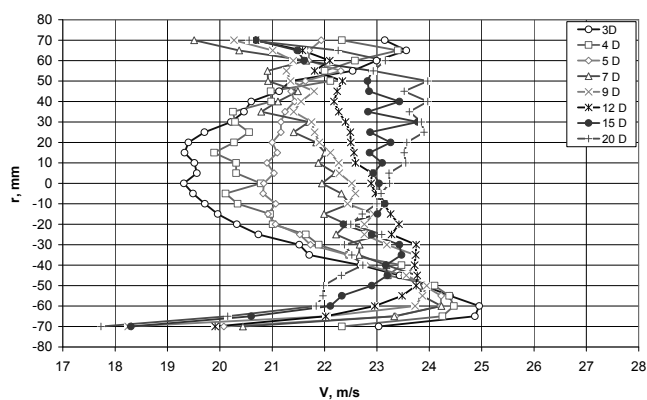
3. Wyniki pomiarów

3.1. Profile prędkości w wybranych miejscach instalacji

Badania eksperymentalne rozpoczęto od określenia profili prędkości w wybranych przekrojach za kolaniem (3 D, 4 D, 5 D, 7 D, 9 D, 12 D, 15 D i 20 D) dla pięciu prędkości z zakresu 10÷30 m/s. Pomiar realizowano przy pomocy rurki Prandtla [12] w płaszczyźnie pionowej i poziomej w 29 równoodległych punktach (co 5 mm). Na podstawie otrzymanych wyników sporządzono charakterystyki profili prędkości w funkcji odległości za kolaniem dla płaszczyzny pionowej i poziomej. Wykresy przygotowano niezależnie dla każdej prędkości średniej. Ostatecznie uzyskano 80 profili prędkości. Na rys. 5 i 6 przedstawiono przykładowe charakterystyki profili prędkości odpowiednio dla płaszczyzny pionowej i poziomej (zgodnie z rys. 2) dla prędkości średniej 20 m/s.



Rys. 5. Profile prędkości w wybranych miejscach za kolaniem (płaszczyzna pionowa) dla prędkości średniej $w = 20$ m/s
Fig. 5. Velocity profiles in selected places behind the elbow (vertical plane) for mean velocity $w = 20$ m/s

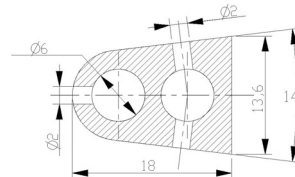


Rys. 6. Profile prędkości w wybranych miejscach za kolaniem (płaszczyzna pozioma) dla prędkości średniej $w = 20$ m/s
Fig. 6. Velocity profiles in selected places behind the elbow (horizontal plane) for mean velocity $w = 20$ m/s

Pojawiająca się w opisie osi rzędnych wielkość r określa odległość punktu pomiarowego od osi rurociągu (znak „-” oznacza położenie punktu po przeciwnej stronie osi). Z wykresów jednoznacznie wynika, że strugi powietrza stabilizują się w odległości 9 do 12 średnic za kolaniem. Widoczne na wykresach dalsze asymetryczne formowanie profili prędkości ($12 \pm 20 D$) może być wywołane przez zauważoną w miejscach pomiaru zmienną geometrię przekrojów rurociągu na poziomie 1 do 2 mm.

3.2. Wartości współczynnika przepływu sondy opływowej przy skróceniu odcinków prostych przed przepływomierzem

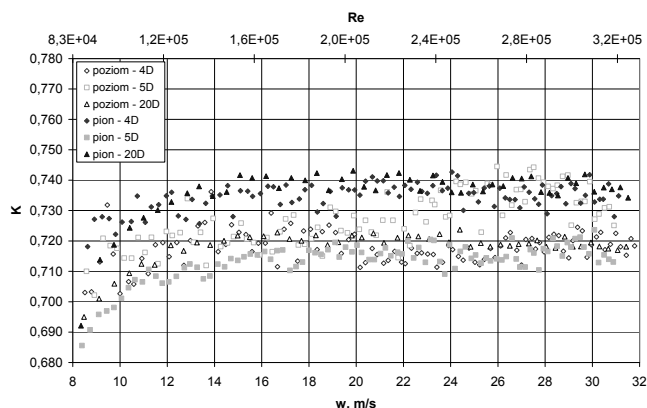
Kolejnym etapem prowadzonych badań było wyznaczenie charakterystyk współczynnika przepływu dla rurki uśredniającej o przekroju opływowym (rys. 1 i 7) w miejscach określonego uprzednio profilu prędkości. Na rys. 7 przedstawiono wymiary przekroju poprzecznego czujnika w płaszczyźnie otworków impulsowych.



Rys. 7. Przekrój poprzeczny i charakterystyczne wymiary opływowej sondy uśredniającej
Fig. 7. Cross-section and characteristic dimensions of the streamline averaging probe

Ostatecznie otrzymano 16 charakterystyk (realizowanych w trzech seriach dla każdego położenia sondy) w zakresie prędkości średnich od 9 m/s do 31 m/s.

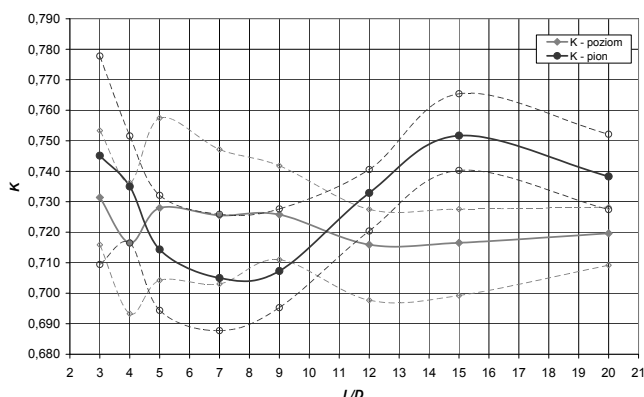
Przykładowe wartości współczynnika przepływu K dla charakterystycznych miejsc instalacji (płaszczyzny pionowej i poziomej oraz 3 odległości za kolaniem) przedstawiono na rys. 8. Z charakterystyk wynika, że wartości współczynnika K powyżej prędkości 14 m/s ($Re = 1,46 \cdot 10^5$) zmieniają się w stosunkowo niewielkim stopniu. W praktyce metrologicznej charakterystykę o niewielkiej zmienności często zastępuje się uśrednioną w jednym punkcie wartością współczynnika K .



Rys. 8. Wartości współczynnika przepływu K dla płaszczyzny pionowej i poziomej w funkcji prędkości średniej powietrza (liczby Re)
Fig. 8. Flow coefficient K values for both vertical and horizontal plane as a function of air mean velocity (Re number)

W celach porównawczych sporządzono charakterystyki współczynnika przepływu w funkcji odległości za kolaniem (rys. 9) zarówno dla płaszczyzny pionowej, jak i poziomej (linie ciągłe reprezentują wartości średnie pochodzące z 3 pomiarów) wraz z zaznaczeniem zakresów dla wartości minimalnych i maksymalnych (linie przerywane).

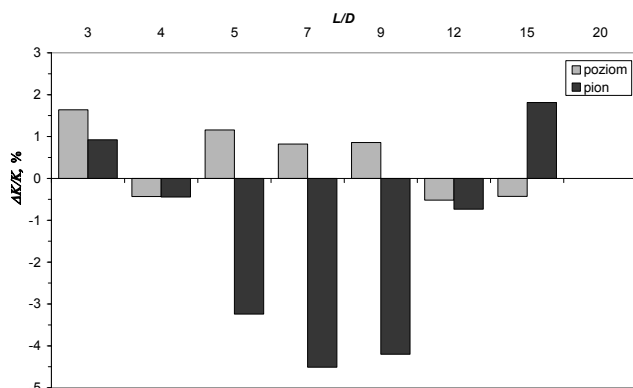
Na podstawie wykresu można dojść do wniosku, że mniejsza odległość za kolaniem wpływa na większy rozrzut wartości K , przy czym zmienność wartości średnich podczas oddalania się od elementu zaburzającego (kolana) zauważalna jest bardziej w przypadku płaszczyzny krzywizny kolana (pionowej). W odległości $4 D$ za kolaniem w płaszczyźnie pionowej zaobserwować można znaczne obniżenie wartości współczynnika K w odniesieniu do sąsiednich położzeń ($3 D$ i $5 D$). Wynika to z rozkładu prędkości (rys. 5), który poniżej osi symetrii przyjmuje wartości największe w odniesieniu do pozostałych zaprezentowanych profili.



Rys. 9. Charakterystyki wartości średniej współczynnika przepływu K dla płaszczyzny pionowej i poziomej w funkcji odległości od kolana L/D
Fig. 9. Flow coefficient K characteristics (mean values) for both vertical and horizontal plane as a function of distance behind the elbow L/D

4. Wpływ profilu prędkości na wartość współczynnika przepływu sondy

Dysponując wartością współczynnika przepływu K , zakłada się że jego wartość utrzymuje się na podobnym poziomie w zakresie określonym przez producenta przepływomierza w dokumentacji technicznej. W przypadku sondy przepływowej określono odległość minimalną na poziomie $5 D$ za kolaniem pojedynczym [7]. Wyniki badań eksperymentalnych wykazały jednak zróżnicowanie wartości współczynnika K w zakresie odległości od $5 D$ do $20 D$ za kolaniem. Przedstawione na wykresie słupkowym (rys. 8) wartości umożliwiają wprowadzenie korekty wartości współczynnika przepływu K w zależności od położenia sondy przepływomierza (pionowe, czy poziome) i odległości od kolana L . Zaprezentowane dane jednoznacznie przemawiają na korzyść sposobu montażu w płaszczyźnie prostopadłej do krzywizny kolana (poziom).



Rys. 10. Zmiana wartości współczynnika przepływu $\Delta K/K$ (w odniesieniu do K w odległości $20 D$) w funkcji lokalizacji L przepływomierza za kolaniem
Fig. 10. Flow coefficient value change $\Delta K/K$ (referred to K in $20 D$ location) as a function of flowmeter location L behind the elbow

W płaszczyźnie poziomej wartości współczynnika K zmieniają się nieznacznie nie przekraczając 1% dla odległości przekraczających $5 D$ za kolaniem. Wynika to z profili prędkości, które (odbiegając od kształtu parabolicznego) zachowują zbliżoną symetrię osiową, szczególnie w bliskim sąsiedztwie kolana (rys. 6).

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone na zaprezentowanym stanowisku wzorcowniczym badania eksperymentalne umożliwiły wyznaczenie rozkładów prędkości przepływającego powietrza za kolaniem segmentowym w zakresie prędkości średnich $9 \div 31$ m/s ($Re = 9,36 \cdot 10^4 \div 3,22 \cdot 10^5$) w rurociągu o przekroju kołowym o średnicy 152 mm. Uzyskano profile zarówno dla płaszczyzny pionowej (płaszczyzna krzywizny kolana) i poziomej (płaszczyzna prostopadła do krzywizny kolana). Wyniki pomiarów dowiodły celowości montażu przepływomierza spiętrzającego przepływ (rurki uśredniającej o przekroju opływowym) w płaszczyźnie występowania osiowej symetrii rozkładów prędkości (płaszczyzna pozioma). Pomimo deformacji rozkładu prędkości w tej płaszczyźnie, zachowana jest stosunkowo niewielka zmienność mierzonych wartości współczynnika w zakresie odległości L od $5 D$ do $20 D$. Natomiast w płaszczyźnie pionowej zależność pomiędzy wartością K a odległością od kolana jest zdecydowanie nieliniowa (rys. 9 i 10) i sięga nawet 4,5% odnosząc do odległości $20 D$. Zauważono także dla tej płaszczyzny większy rozrzut wyników pomiarów, co przekłada się bezpośrednio na zwiększenie niepewności pomiaru strumienia płynu.

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

6. Literatura

- [1] Pospolita J.: Pomiary strumieni płynów, Studia i monografie, Politechnika Opolska, z. 154, Opole, 2004, s. 282.
- [2] Kabza Z.: Pomiary strumieni płynów, Studia i monografie, z. 90, WSI, Opole 1996.
- [3] Kucybała A.: Wybrać właściwy przepływomierz, PAR, 4/2002, s. 16-18.
- [4] ISO/TR 15377:2007, Measurement of fluid flow by means of pressure-differential devices - Guidelines for the specification of orifice plates, nozzles and Venturi tubes beyond the scope of ISO 5167.
- [5] PN-EN ISO 5167:2005, Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym.
- [6] Kabaciński M.: Numeryczna i eksperymentalna ocena własności metrologicznych nowych rozwiązań piętrzących czujników przepływu, praca doktorska, Politechnika Opolska, Opole, 2004.
- [7] Introbar – przepływomierze z rurkami uśredniającymi ciśnienie dynamiczne, dokumentacja techniczna, Introl Opole 2000.
- [8] Pospolita J.: Przepływomierz z czujnikiem uśredniającym ciśnienie dynamiczne, Projekt Badawczy Rozwojowy PBR 0504/R/2/T02/07/02, Politechnika Opolska, 2009.
- [9] Dobrowolski B., Kabza Z.: Teoretyczna analiza wpływu osiowosymetrycznej deformacji pola prędkości i zawirowania strugi na właściwości metrologiczne zwężek pomiarowych, Studia i Monografie, Opole 1992.
- [10] Węcel D., Chmielniak T., Kotowicz J.: Experimental and numerical investigations of the averaging Pitot tube and analysis of installation effects on the flow coefficient, Flow Measurement and Instrumentation, vol. 19, pp. 301-306, 2008.
- [11] Bechtold Z.: O przyczynach niedokładności wyników pomiarów rozkładu prędkości i natężenia przepływu rurkami piętrzącymi, Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej Nr 15, Studia i Materiały Nr 11, Wrocław 1978, s. 25-34.
- [12] PN-ISO 5221:1994, Rozprowadzanie i rozdział powietrza. Metody pomiaru przepływu strumienia powietrza w przewodzie.