

EKSPERYMENTALNE WYZNACZANIE PROFILU PRĘDKOŚCI W KANALE PROSTOKĄTNYM

Sławomir POCHWAŁA¹, Mariusz RZĄSA², Paweł PAWŁOWSKI³

1. Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej
tel.: 77-449-84-56 e-mail: s.pochwala@po.opole.pl
2. Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej
tel.: 77-449-80-71 e-mail: m.rzasa@po.opole.pl
3. Kelvion Central Europe Sp. z o.o.
tel.: 500-701-844 e-mail: pa.pawlowski@o2.pl

Streszczenie: Badania zrealizowane na potrzeby niniejszego artykułu miały na celu eksperymentalną ocenę wpływu typowego elementu armatury instalacyjnej oraz wartości turbulencji przepływu na wyznaczenie długości odcinka prostego pozwalającego na stabilizację strugi przepływającego płynu.

Słowa kluczowe: turbulencja przepływu. prędkość przepływu. instalacje wentylacyjne. stabilizacja strugi.

1. BADANIA EKSPERYMENTALNE

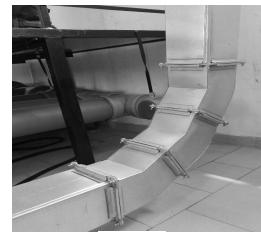
1.1. Opis stanowiska pomiarowego

W celu przeprowadzenia badań eksperymentalnej oceny długości drogi, na której następuje stabilizacja strugi zaburzonej typowymi elementami instalacji przygotowano stanowisko pomiarowe przedstawione na rysunku 1.



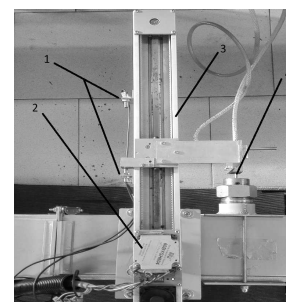
Rys. 1. Stanowisko pomiarowe

Głównym jego elementem jest stalowy kanał, przez który zasysane jest powietrze z otoczenia. Kanał, dla którego realizowano badania miał przekrój poprzeczny kwadratowy i długość ścianki równą 160 mm. Na kanale tym zamontowano układ trzech kolan 30° połączonych razem tworząc jedno kolano segmentowe 90°, co przedstawiono na rysunku 2. Zaburzenia przepływającej strugi powietrza spowodowane obecnością takiego układu elementów stanowiły przedmiot przeprowadzonych badań.



Rys. 2. Układ kolan 3x30°

Powietrze opuszczające kanał przepływało przez sieć rur PVC o średnicy nominalnej $\varnothing 160$ mm kierując się w stronę dmuchawy promieniowej, napędzanej silnikiem trójfazowym. Silnik połączony jest z przetwornicą częstotliwości umożliwiającą płynną regulację obrotów. Takie rozwiązanie umożliwiło pośrednią kontrolę i regulację prędkości przepływu powietrza w instalacji. W celu przeprowadzenia oceny wielkości zaburzenia strugi w określonych odległościach za elementem zaburzającym, należało wyznaczyć profil prędkości przepływającego płynu w kanale. Zastosowano układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 3, składający się z rurki Prandtla (4) połączonej z modułem liniowym (3) wyposażonym w silnik krokowy (2), pozwalającym na pomiar prędkości wzdłuż całej szerokości kanału przy zachowaniu określonego kroku przesuwu rurki (2,0 mm). Głównymi elementami modułu są dwa czujniki krańcowe (1), które umożliwiają dostosowanie do rozmiarów kanału, co zabezpiecza przed zniszczeniem rurkę Prandtla.



Rys. 3. Układ pomiarowy: moduł liniowy i rurka Prandtla

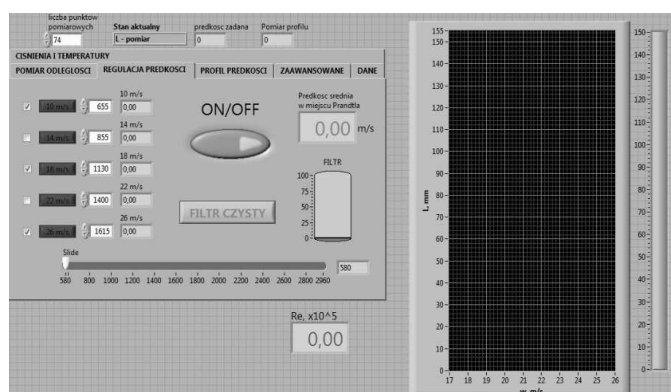
Rurkę Prandtla podłączono dwoma przewodami impulsowymi p^+ oraz p^- z przetwornikiem różnicy ciśnień firmy Siemens Sistrans DS III o niepewności pomiarowej 0,075%. Mierzona przez niego różnica ciśnień statycznego i dynamicznego w kanale była przetwarzana w systemie akwizycji danych na prędkości przepływu. Do pomiaru ciśnienia całkowitego zastosowano przetwornik firmy WIKA, typ P-10, natomiast temperaturę mierzono termometrem oporowym Pt-100. Prędkość średnią powietrza w instalacji mierzono przy pomocy przepływomierza turbinowego Sponsler SP6-CB-PH7-C-4X.

1.2. Akwizycja danych pomiarowych

Opisane stanowisko badawcze wyposażone jest w zespół elementów mających na celu odczyt, regulację i zapis mierzonych danych. Należą do nich karty pomiarowe firmy National Instruments zamocowane w obudowie CompactDAQ NI cDAQ-9172. Podczas prowadzenia opisywanych badań wykorzystano następujące karty pomiarowe:

- NI 9203, obsługującej przetworniki różnicy ciśnień oraz ciśnienia absolutnego,
- NI 9403, obsługującej silnik krokowy modułu liniowego oraz wyłączniki krańcowe,
- NI 9265, obsługującej przetwornicę częstotliwości silnika dmuchawy,
- NI 9217, obsługującej termometr oporowy.

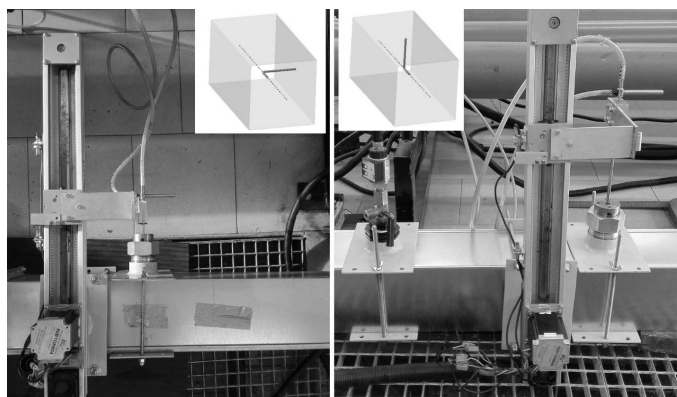
Sygnal z kart przekazywany był przez złącze USB do komputera stacjonarnego znajdującego się w tym samym pomieszczeniu. Zainstalowane na nim oprogramowanie służące do sterowania pomiarami zostało stworzone w języku LabVIEW, który obejmuje szeroki zestaw funkcji. Po pierwsze, przetwarza w czasie rzeczywistym dane odbierane z kart pomiarowych, które zapisywane są w pliku Microsoft Excel. Z poziomu programu operator wybrać może interesującą go prędkość przepływu powietrza, którą program przetwarza w odpowiednią wartość obrotów silnika dmuchawy. W oknach dialogowych wyświetlane są: aktualne lokalne prędkości przepływu przetwarzane przez rurkę Prandtla, prędkość średnia mierzona przez przepływomierz turbinowy oraz wartość liczby Reynoldsa odzwierciedlająca poziom burzliwości przepływającego powietrza. Dodatkowo obrazowane jest na wykresie aktualne położenie rurki Prandtla w kanale. Operator posiada możliwość dobrania kroku przesuwu rurki wzdłuż osi wpływając w ten sposób na dokładność badanego profilu prędkości.



Rys. 4. Interfejs programu do obsługi pomiarów LabVIEW

1.3. Metodyka prowadzenia badań

Pierwszą operacją, jaką należało wykonać przystępując do pomiarów, było dopasowanie rozstawu wyłączników krańcowych modułu liniowego. Pomiar realizowano na kanale o długości boku 160 mm. Po odpowiednim ustawieniu krańcówek oraz sprawdzeniu szerokości rzeczywistej kanału z poziomu programu można było przystąpić do doboru kroku przesuwu rurki Prandtla. Aby w jak najdokładniejszy sposób odzwierciedlić profil prędkości powietrza w kanale, zdecydowano się na dokonywanie pomiaru co 2 mm. Pozwoliło to na otrzymanie 74 punktów pomiarowych w jednej płaszczyźnie przesuwu. Mając na uwadze niesymetryczny charakter kształtowania się profilu prędkości strugi w kanale kwadratowym pomiary prowadzono dla pionowego oraz poziomego położenia układu pomiarowego.



Rys. 5. Badania w poziomym i pionowym położeniu układu pomiarowego

W celu dokonania oceny długości odcinka stabilizacji strugi zaburzonej układem kolan, co jest głównym zadaniem niniejszej pracy, należało przeprowadzić analogiczne pomiary w różnych odległościach rurki Prandtla od układu zaburzającego. W ujęciu praktycznym przyjęło się odnosić taką odległość do średnicy danej rury lub, jak w tym przypadku, do średnicy ekwiwalentnej kanału kwadratowego, którą stanowi długość jego boku a .

Tab. 1. Położenie punktów pomiarowych względem układu kolan.

Odległość [L/D]	3D	4D	5D	7D	8D	12D	15D	22D	25D
Odległość rzeczywista [m]	0,48	0,64	0,80	1,12	1,28	1,90	2,40	3,50	4,00

Poza rodzajem układu zaburzającego na długość stabilizacji strugi wpływ ma również intensywność turbulencji przepływu opisywana bezwymiarową liczbą Reynoldsa zgodnie z zależnością:

$$Re = (w \cdot d_e \cdot \rho) / \eta, \quad (1)$$

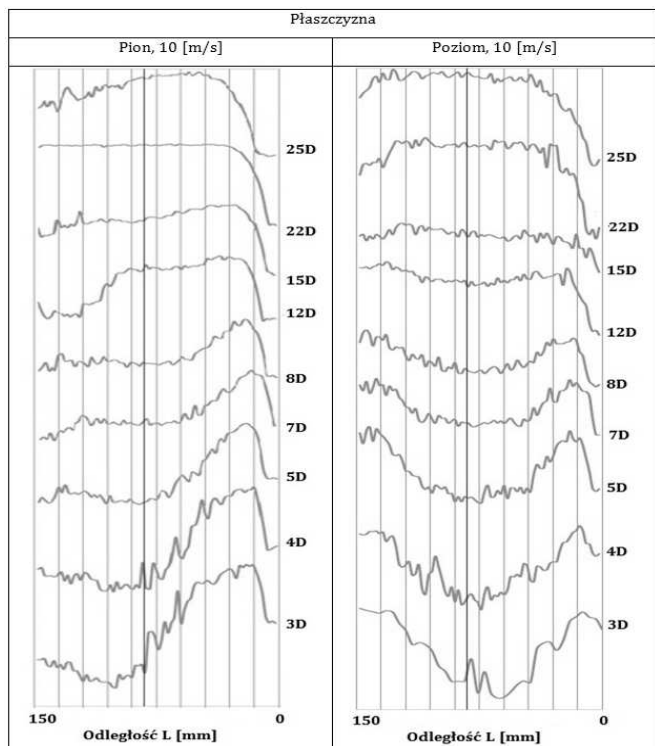
gdzie: w – prędkość średnia, d_e – średnica ekwiwalentna kanału, ρ – gęstość, η – dynamiczny współczynnik lepkości.

Jako że obecne we wzorze (1) wartości średnicy ekwiwalentnej, gęstości i lepkości powietrza są stałe, lub nie ulegają znacznym zmianom w tych badaniach, jedyną zmienną wielkością wpływającą bezpośrednio na wartość turbulencji jest prędkość. Z tego powodu pomiary wykonane zostały dla trzech wartości prędkości średniej powietrza: 10, 18 oraz 26 m/s. Wartości prędkości lokalnej odbieranej przez rurkę Prandtla w każdym punkcie pomiarowym uśredniane były przez program komputerowy z niepewnością do

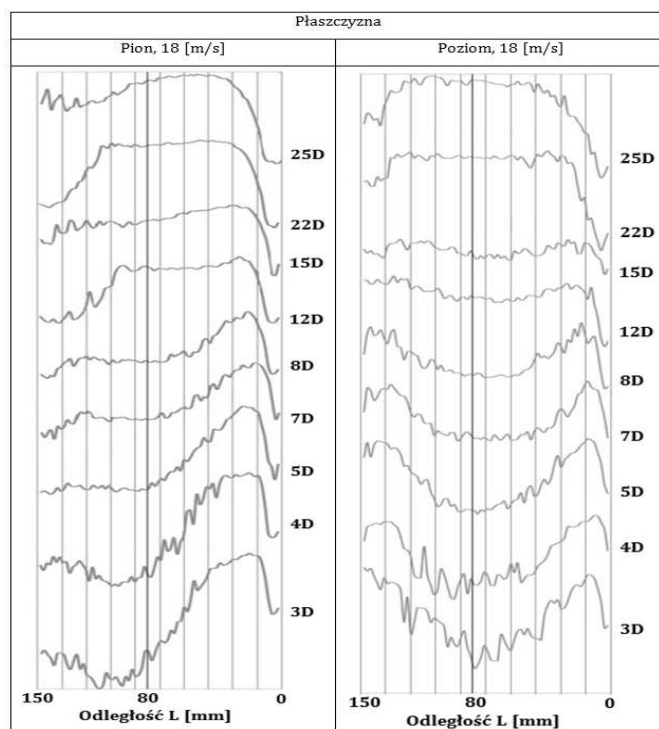
$\pm 0,1$ m/s i wyświetlane na wykresie w funkcji odległości od ścianki kanału.

2. ANALIZA WYNIKÓW

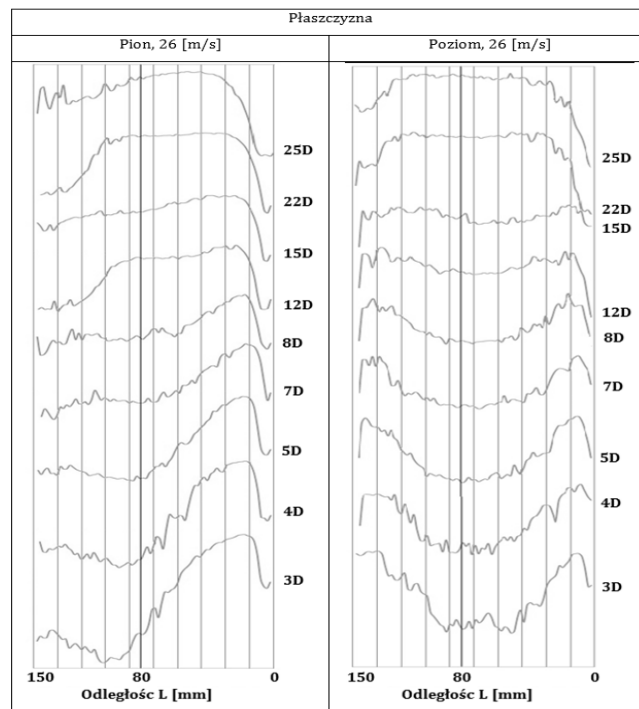
Wyniki przeprowadzonych badań opracowano w postaci wykresów usystematyzowanych wg. płaszczyzny przesuwu rurki Prandtla oraz średnich prędkości przepływu.



Rys. 6. Porównanie profili prędkości w płaszczyźnie pionowej i poziomej przy prędkości średniej w = 10 m/s



Rys. 7. Porównanie profili prędkości w płaszczyźnie pionowej i poziomej przy prędkości średniej w = 18 m/s



Rys. 8. Porównanie profili prędkości w płaszczyźnie pionowej i poziomej przy prędkości średniej w = 26 m/s

Analizując powyższe wykresy można zauważyć pewną prawidłowość formowania się strugi powietrza przepływającej przez badany układ zaburzający. Z wykresów przedstawiających ułożenie pionowe rurki Prandtla wynika, że w początkowych odcinkach powietrze kieruje się na spód kanału, gdyż funkcja rozkładu prędkości osiąga swoje maksimum znacznie poniżej osi symetrii przewodu. Dla wykresów położenia poziomego również zaobserwować można pewien schematyczny przebieg linii rozkładu prędkości. W początkowych odległościach profil funkcji przyjmuje kształt litery „M”, co świadczy o tym, że powietrze kierowane jest nie tylko na spód kanału, lecz również w jego boki.

Przy prędkości średniej 10 m/s liczba Reynoldsa odnotowywana w programie utrzymywała się na poziomie $0,8 \cdot 10^5$, dla 18 m/s wynosiła około $1,5 \cdot 10^5$, a przy 27 m/s równa była około $2,3 \cdot 10^5$. W każdym z tych przypadków występował zatem przepływ turbulentny o czym świadczy wyznaczona wielkość liczby kryterialnej Reynolds-a, dla którego literaturowy profil prędkości powinien przyjmować kształt spłaszczonej paraboli. Jak widać to na przedstawionych wykresach, wartość prędkości w poszczególnych miejscach rurociągu na jego przekroju sukcesywnie dąży do osiągnięcia takiej postaci, jednak odległość a/D po jakiej go osiąga różni się w zależności od średniej prędkości przepływu. Stabilizacja strugi najszybciej następuje w przypadku prędkości 10 m/s. Funkcja przyjmuje sugerowany przez literaturę kształt, zarówno w pionie jak i poziomie, w obszarze odległości od 15 do 22 średnic, czyli około 2,4 do 3,5 metra za układem zaburzającym.

W kolejnym przypadku, gdy prędkość powietrza osiąga 18 m/s, stabilizacja w płaszczyźnie poziomej następuje w obszarze 22-25D, jednak w pionie nadal zaobserwować można pewne odstępstwo od oczekiwań, gdyż profil nie jest całkiem symetryczny względem osi kanału.

Podobną sytuację zaobserwować można dla ostatniego z badanych przypadków, czyli prędkości przepływu 27 m/s. Wykresy w płaszczyźnie poziomej wskazują na stabilizację

strugi w odległości 22-25D za układem kolan, jednak w pionie nadal występuje śladowa asymetria. Wynika to stąd, że przy takich wartościach prędkości potrzeba jeszcze dłuższego odcinka prostego przewodu na montaż ewentualnych urządzeń pomiarowych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych, szczególnie w przypadku przepływomierzy uśredniających.

3. WNIOSKI

W praktyce przemysłowej i laboratoryjnej pomiary takich wielkości jak: ciśnienie, temperatura, prędkość i strumień przepływu należą do podstawowych pomiarów zapewniających prawidłowy przebieg prowadzonych procesów takich jak proces spalania w kotłach dużej mocy [1]. Dokładność ich przeprowadzania i odczytywania wpływa nie tylko na jakość produkowanego wyrobu lub świadczoną usługę, lecz w skrajnych przypadkach również na zdrowie lub życie pracowników obsługujących konkretną instalację [2,3]. Niedziałający prawidłowo manometr lub anemometr może doprowadzić do uszkodzenia, rozszczelnienia lub nawet eksplozji elementów instalacji, gdyż podawana przez niego wartość mierzonej wielkości może znacznie odbiegać od rzeczywistości. Jednym ze sposobów zmniejszenia takiego prawdopodobieństwa jest montaż urządzeń pomiarowych w odpowiednich miejscach na danej instalacji [4,5,6].

Aby pomiar odwzorowywał rzeczywiste warunki, struga przepływającego przez określony przyrząd czynnika powinna znajdować się w stanie stabilizacji, to znaczy nie powinny występować w niej zaburzenia takie jak wiry lub pulsacje. Niektóre z oferowanych dziś na rynku urządzeń pomiarowych wyposażone są w specjalne elementy zapewniające stabilizację płynu docierającego do głównego modułu pomiarowego, jednak taka konstrukcja powoduje powstawanie dodatkowych strat ciśnienia, które w rezultacie skutkują większymi kosztami eksploatacyjnymi instalacji. Kolejnym sposobem wyegzekwowania stabilizacji strugi płynu jest zapewnienie na rurociągu odpowiednio długich odcinków prostych, nie wyposażonych w żadne elementy zaburzające jak np. kolana czy zawory. Konstruktorzy instalacji często lekceważą ten fakt, gdyż nadplanowe długości odcinków prostych niosą za sobą dodatkowe koszty inwestycyjne lub problemy z odpowiednim ułożeniem instalacji w warunkach ograniczonej przestrzeni.

Przedstawione w artykule wyniki badań długości stabilizacji strugi zaburzonej układem kolan dokonanych rurką Prandtla pozwoliły autorom na sformułowanie następujących wniosków:

- obszar w bliskiej odległości za badanym układem kolan cechuje się wysokim stopniem zaburzenia przepływu, we wszystkich przypadkach potrzeba przynajmniej odległości $20+ [x/D]$ na stabilizację strugi, aby dokonywany pomiar odzwierciedlał rzeczywiste warunki panujące w rurociągu,
- zaburzenie przepływu generowane przez układ kolan w instalacji o kwadratowym przekroju poprzecznym jest mocno asymetryczne zarówno w płaszczyźnie pionowej jak i poziomej,
- wzrost prędkości przepływu wpływa wprost proporcjonalnie na wysokość powstających turbulencji,
- im większa turbulencja przepływu tym dłuższy odcinek prosty potrzebny na stabilizację strugi,
- zaletą stosowania rurki Prandtla do pomiaru prędkości przepływu jest większa dokładność niż sond uśredniających wyniki, co wynika z możliwości doboru kroku pomiarowego,
- wadą stosowania rurki Prandtla do mierzenia prędkości przepływu jest dość długi czas trwania jednego pomiaru, co może dyskwalifikować jej użyteczność w wielu praktycznych przypadkach przemysłowych.

4. BIBLIOGRAFIA

1. Baker R. C.: Flow Measurement Handbook. University of Cambridge, 2000.
2. Spitzer D. W.: Flow Measurement. Practical Guides for Measurement and Control, Instrument Society of America, United States of America, 1996.
3. ISO 3966, 2008: Measurement of fluid flow in closed conduits- Velocity area method using Pitot static tubes.
4. Pochwała, S., Kabaciński, M., Pospolita, J.: Influence of typical flow disturbing elements on the flow rate in selected averaging Pitot tubes. Task Quarterly, 3-4, 2012, s. 219-228.
5. Chmielniak, T., Kotowicz, J., Węcel, D.: Experimental and numerical investigations of the averaging Pitot tube and analysis of installation effects on the flow coefficient. Flow Measurement and Instrumentation, 19 2008, s. 301-306.
6. Pochwała S., Wydrych J., Borsuk G.: The effect of velocity profile deformation of an averaging Pitot tube. 23rd International Conference on Engineering Mechanics Svratka- Czech Republic. Engineering Mechanics 2017, s. 790-793.
7. Daev Z. A., Kairakbaev A. K.: Measurement of the Flow Rate of Liquids and Gases by Means of Variable Pressure Drop Flow Meters with Flow Straighteners. Measurement Techniques, 59(11), 2017, s.1170-1174.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF VELOCITY PROFILE IN A RECTANGULAR CHANNEL

The research reported in this article was concerned with experimental evaluation of the effect of installation of a typical element of armature and the level of flow turbulence on the length of the straight tube section needed for the development of fluid flow. In order to carry out the tests, an experimental setup was built, which main element consists of a steel channel through which ambient air is delivered inside the installation. The channel has a square cross-section and length of 160 mm. Along this channel, a system of three 30° elbows was installed and combined to form a single 90° segmented bend. With the purpose of assessing the flow disturbance at specified distances from the flow obstruction, it was necessary to determine the velocity profile of the fluid flow in the channel. This goal applied a measuring system comprising a Pitot tube connected to a linear module. This setup provided the measurements of the velocity along the entire section of the channel with the measurement space traversed with a step equal to 2mm.

Keywords: flow turbulence, flow velocity, ventilation installation, flow development.