

Dopplerowska anemometria laserowa jako metoda pomiaru przepływu za łukiem 90°

Streszczenie. Artykuł opisuje zagadnienie wizualizacji zaburzenia przepływu, występującego za łukiem hamburskim jako elementem zaburzającym przepływ w instalacji hydraulicznej. Jakościowe opisanie profilu prędkości pozwala określić formę zaburzenia, a ilościowa analiza pozwala określić średni strumień objętości w instalacji hydraulicznej.

Abstract. The article describes the problem of visualization of flow disturbances occurring behind the Hamburg bend as an element disturbing flow in the hydraulic system. The qualitative description of the velocity profile allows to determine the form of the disturbance, and the quantitative analysis allows to determine the average volume flow in the hydraulic system. (Laser Doppler Anemometry as flow measurement method behind 90° bend)

Słowa kluczowe: dopplerowska anemometria laserowa, pomiar przepływu, wizualizacja profilu prędkości.

Keywords: Laser Doppler Anemometry, flow measurement, visualization of velocity profile.

Wstęp

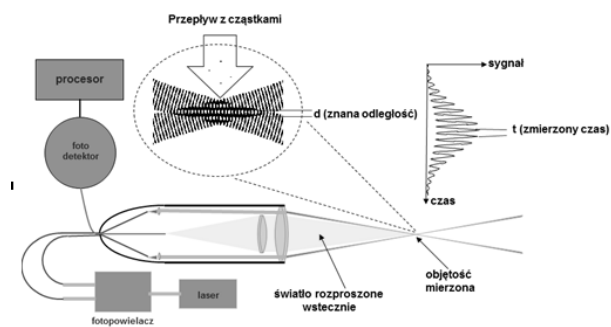
W badaniach bilansowych gospodarki wodnej wszelkiego rodzaju obiektów energetyki komunalnej lub zawodowej wykorzystuje się przepływomierze oparte na różnych zasadach działania. Każdy przepływomierz umieszczony w instalacji hydraulicznej wymaga zastosowania odpowiednich odcinków prostych za elementem zaburzającym. Jest to związane z koniecznością ustabilizowania profilu prędkości za zaburzeniem. Takie zabiegi są wymogiem producenta, który tylko i wyłącznie przy zachowaniu warunków montażowych deklaruje, że wyniki pomiarowe będą znajdować się w przedziale błędów granicznych.

Dopplerowska anemometria laserowa

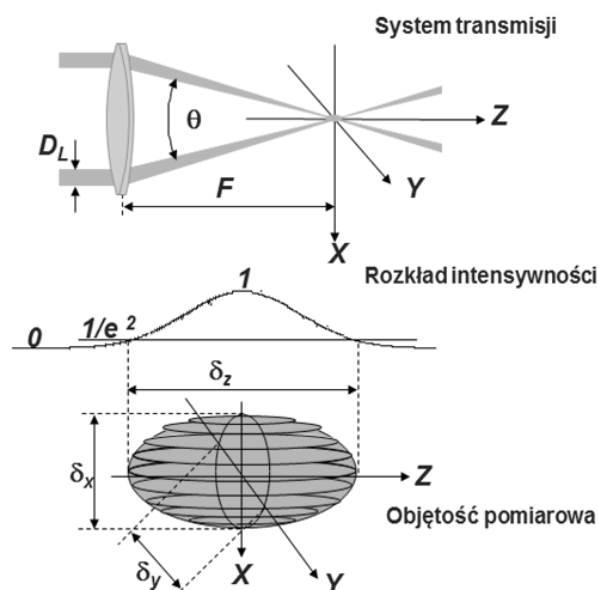
Dopplerowska anemometria laserowa (LDA) jest jedną z kilku optycznych bezkontaktowych metod pomiaru prędkości w konkretnym punkcie, w którym przecinają się dwie stałe wiązki lasera tworząc tzw. objętość pomiarową. Metoda ta opiera się na efekcie Dopplera, która polega na przesunięciu częstotliwości promieniowania świetlnego. Anemometria laserowa w szerszej formie została opisana w literaturze dotyczącej laserowego pomiaru prędkości [1] [2] [3]. Wzmiankowane promieniowanie świetlne rozpraszane jest przez cząstki zawieszone w medium mierzonym. W przypadku pomiarów wykonywanych na stanowisku do pomiarów zaburzeń przepływów jako posiewu użyto mielonego srebra organicznego, które ma dobre właściwości rozpraszania światła lasera, co pozwoliło z dużą dokładnością wykonać pomiar. Anemometria laserowa cechuje się wieloma zaletami, najważniejszą z nich jest fakt że pomiar nie ingeruje w przepływ, przez co nie zmieniamy struktury przepływu. Kolejnymi ważnymi aspektami przemawiającymi za zaletami tej metody jest brak zależności pomiaru prędkości w punkcie od zmian ciśnienia, temperatury, a co za tym idzie gęstości płynu. Dzięki tej metodzie można wykonywać pomiary prędkości chwilowej w przepływach turbulentnych czy pulsacyjnych [5] [6] [7].

Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony schemat pomiaru przy pomocy anemometru laserowego. W praktyce jest to bardzo skomplikowany układ, w którym promień wygenerowany przez laser trafia do fotopowielacza, gdzie dochodzi do rozdziału wiązki lasera na dwie składowe. Następnie za pomocą światłowodów są one prowadzone do układu optycznego, gdzie promienie są skupiane do obszaru pomiarowego, znajdującego się w ognisku soczewki skupiającej. W przestrzeni pomiarowej promienie

przecinają się pod kątem θ tworząc objętość pomiarową przypominającą kształtem elipsoidę. W przestrzeni pomiarowej tworzą się prążki interferencyjne w postaci zmiennego natężenia promieniowania świetlnego. Powstanie elipsoidy wynika z geometrii wiązki laserowej, którą w ogólnym uproszczeniu można uznać za walec. Elipsoida powstaje w wyniku przenikania się dwóch walców [9].



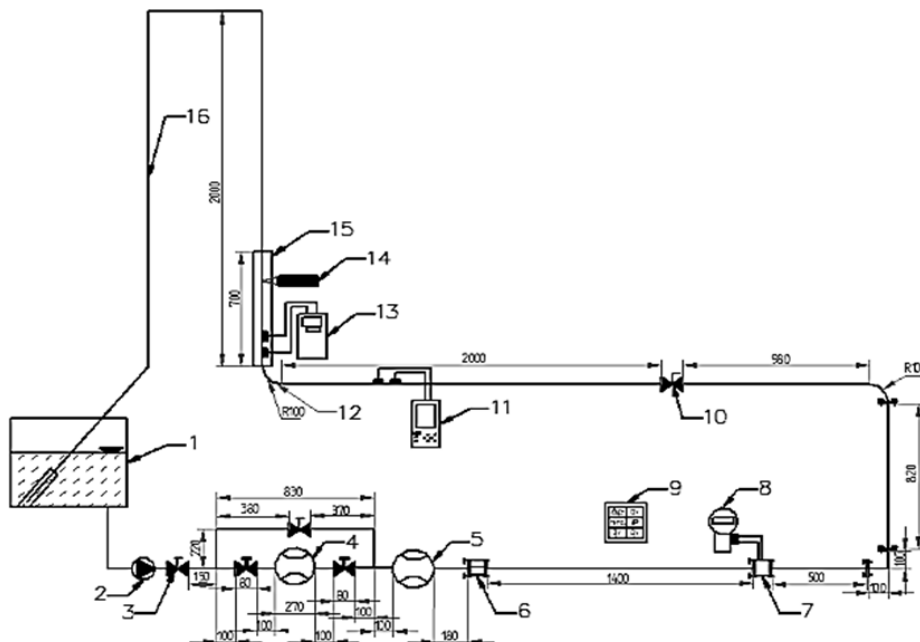
Rys. 1. Schemat działania anemometru laserowego [4]



Rys. 2. Schemat przedstawiający prążki interferencyjne w objętości pomiarowej [8]

Rysunek 2 pokazuje ideę powstawania objętości pomiarowej w miejscu przenikania się wiązek lasera. Laser wykorzystany do wykonania pomiaru prędkości w objętości pomiarowej został sprzężony z układem trawersującym, który po oprogramowaniu przestrzennej geometrii ruchu automatycznie zmieniał pozycję punktu pomiarowego [10]. Warunkiem wykonania tej czynności było uzyskanie odpowiedniej liczby próbek pomiarowych, która została

ustalona na 500. Jest to związane z możliwością wyeliminowania błędnych pomiarów jak również pozwala w odpowiedni sposób przeprowadzić obliczenia statystyczne. Jak wiadomo im więcej próbek, tym dokładniej można wyznaczyć wartość prawdziwą. Przy założeniu, że liczba próbek dąży do nieskończoności, to wartość średnia z nieskończonej serii pomiarowej dąży do wartości prawdziwej [11] [12].



Rys. 3. Stanowisko do badań przepływu za elementami armatury hydraulicznej, zaburzającymi przepływ

Stanowisko pomiarowe

Ze względu na specyfikę badań prowadzonych nad określeniem wpływu zaburzenia przepływu wywołanego przez łuk hamburski o kącie 90° i promieniu gięcia równym dwóm średnicom nominalnym rurociągu, konieczne było wykonanie doświadczenia pozwalającego określić charakter przepływu w sposób jakościowy, jak i ilościowy. W związku ze specyfiką badań wykonywanych metodą optyczną została zaprojektowana i wykonana instalacja doświadczalna. Główną cechą odcinka doświadczalnego jest transparentność, dlatego też został wykonany ze szkła organicznego. Zastosowanie tego materiału pozwoliło uzyskać parametry optyczne zbliżone do medium mierzonego jakim jest woda. Na rysunku 3 przedstawiono schemat stanowiska badawczego wyposażonego w różnego rodzaju przepływomierze, których zadaniem jest walidacja strumienia objętości przepływającego medium mierzonego względem przyrządu badanego.

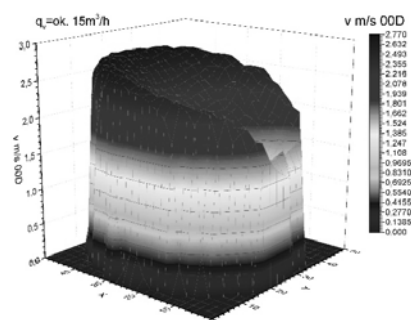
Stanowisko wyposażono w następujące elementy, które zostaną kolejno omówione: 1 – zbiornik z wodą - element służący do retencji medium pomiarowego oraz umieszczenia w nim posiewu ułatwiającego pomiar przy pomocy dopplerowskiego anemometru laserowego (LDA). W zbiorniku był także wykonywany pomiar temperatury wody oraz dochodziło w nim do odgazowania wody powracającej z instalacji pomiarowej; 2 – pompa cyrkulacyjna. Zadaniem pompy było wymuszenie obiegu w instalacji pomiarowej względem zadanej wydajności i charakterystyki pracy urządzenia; 3 – zawór regulacyjny. Dzięki niemu możliwe było regulowanie strumienia objętości medium mierzonego; 4 – wodomierz sprzężony - przyrząd skonstruowany z dwóch wodomierzy o konstrukcji

turbinowej do pomiaru objętości przepływającego medium. W połączeniu z przetwornikiem impulsów czujnika kontaktronowego można uzyskać strumień objętości medium mierzonego; 5 – przepływomierz elektromagnetyczny - urządzenie wykorzystujące do pomiaru strumienia przepływu pomiar napięcia indukowanego w polu elektromagnetycznym wymuszonym przepływem prądu; 6 – prostownica strugi zamontowana zgodnie z normatywnymi zaleceniami związanymi z pomiarem strumienia przepływu przy pomocy kryzy; 7 – kryza ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia. Przy pomocy kryzy wykonywany jest pomiar ciśnienia różnicowego pomiędzy obszarem napływowym i wypływowym; 8 – przetwornik ciśnienia różnicowego. Przetwornik umożliwił przekazanie analogowego sygnału prądowego do rejestratora; 9 – programowalny rejestrator ekranowy - przyrząd służący do rejestracji i akwizycji danych pomiarowych zbieranych w trybie online z przyrządów pomiarowych. Rejestrator wyposażony jest również w funkcje matematyczne, dzięki którym w trybie online dokonywano przeliczenia np. gęstości wody w funkcji temperatury; 10 – przepustnica - element instalacji hydraulicznej do szybkiego odcięcia przepływu medium mierzonego; 11 – przepływomierz referencyjny - ultradźwiękowy przepływomierz z głowicami nakładanymi na rurociąg, wykonujący pomiar czasu przejścia fali ultradźwiękowej tzw. transit-time; 12 – łuk 90° badany pod względem wprowadzanych zaburzeń przepływu element instalacji hydraulicznej; 13 – ultradźwiękowy przepływomierz z głowicami nakładanymi na rurociąg, wykonujący pomiar czasu przejścia fali ultradźwiękowej w obszarze przepływu zaburzonego; 14 – dopplerowski anemometr laserowy (LDA) - urządzenie przy pomocy

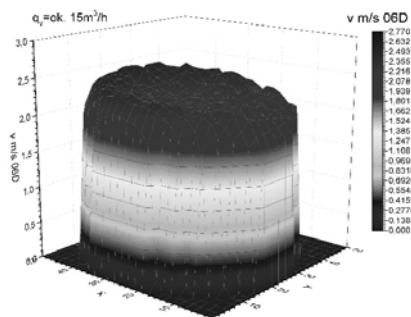
którego wykonano pomiary bryły prędkości w różnych odległościach od elementu zaburzającego przepływ w instalacji hydraulicznej; 15 – naczynie korekcyjne - element optyczny umożliwiający zniwelowanie załamania promienia świetlnego na krzywiznie transparentnego rurociągu pomiarowego; 16 – rura opadowa - fragment instalacji, którym medium mierzone powraca do zbiornika wodnego.

Wyniki

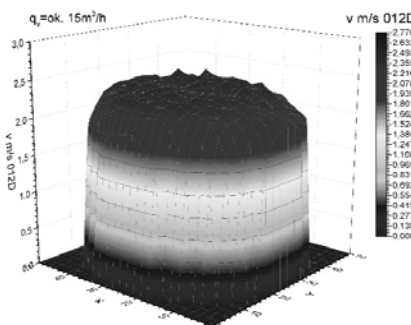
W rezultacie przeprowadzonych badań uzyskano bryły prędkości, które w jakościowy sposób przedstawiają charakter przepływu. Bryły prędkości przedstawione na rysunkach 4–6 ukazują kształt bryły w różnych odległościach za łukiem hamburskim. Na rysunku 4 przedstawiona została bryła prędkości bezpośrednio za łukiem. Można zauważyć, że występują odbicia i prędkość jest w znaczący sposób obniżona w obszarze wewnętrznej strony łuku. Ekstrema prędkości występują w obszarze przysięnnym po zewnętrznej stronie łuku.



Rys. 4. Profil prędkości 3D w odległości 0D od zaburzenia uzyskany za pomocą pomiarów LDA dla Re ok.100000



Rys. 5. Profil prędkości 3D w odległości 6D od zaburzenia uzyskany za pomocą pomiarów LDA dla Re ok.100000



Rys. 6. Profil prędkości 3D w odległości 12D od zaburzenia uzyskany za pomocą pomiarów LDA dla Re ok.100000

Rysunek 5 przedstawia ustabilizowaną bryłę prędkości w odległości sześciu średnic nominalnych od elementu zaburzającego. Uzyskany wynik o braku konieczności stosowania za łukiem długich odcinków prostych w celu stabilizacji profilu prędkości.

Rysunek 6 przedstawia bryłę prędkości ustabilizowanego przepływu. Bryła w odległości 12D jakościowo w niewielkim stopniu odbiega kształtem od bryły w odległości 6D od elementu zaburzającego.

Wnioski

Z wyników uzyskanych przy pomocy dopplerowskiego anemometru laserowego można wywnioskować, że stabilizacja profilu prędkości za elementem zaburzającym występuje o wiele bliżej, niż wskazywałyby na to zalecenia producentów różnego rodzaju urządzeń pomiarowych. W przypadku dokonania jakościowego porównania z symulacją numeryczną wykorzystującą model turbulencji $k-\epsilon$ również można zauważyć podobieństwo, na podstawie czego można wnioskować, że doświadczenie pokrywa się z czysto matematycznymi rozważaniami. Takie porównanie pozwala stwierdzić, że anemometria laserowa jest bardzo dobrą metodą potwierdzającą lub zaprzeczającą teoretyczne rozważania zagadnień przepływowych.

Autorzy: mgr inż. Piotr Synowiec, E-mail: piotr.synowiec@pwr.edu.pl; dr inż. Wiesław Wędrychowicz E-mail: wieslaw.wedrychowicz@pwr.edu.pl; mgr inż. Piotr Piechota, E-mail: piotr.piechota@pwr.edu.pl; dr hab inż. Artur Andruszkiewicz prof. PWR, E-mail: artur.andruszkiewicz@pwr.edu.pl; Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Katedra Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

LITERATURA

- [1] Abbiss J. B., Chubb T. W. i Pike E. R., Laser Doppler anemometry. *Optics & Laser Technology*, Vol. 6, (1974), Issue 6, 249-261.
- [2] Frank S., Heilmann C. i Siekmann H. E., Point-velocity methods for flow-rate measurements in asymmetric pipe flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 7, (1997), No. 3/4, 201–209
- [3] Bopp S. et al., A laser—Doppler sensor for flow rate measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.1,(1989), No. 1
- [4] Dantec Measurement Technology A/S. BSA/FVA Flow Software Installation & User's guide, vol.2, Skovlunde (2000)
- [5] Fodemski Tadeusz R., [red.]. Pomiary cieplne, część I podstawowe pomiary cieplne, wydanie trzecie zmienione. WNT, Warszawa (2001)
- [6] Zator Sławomir, Laserowe przepływomierze dopplerowskie - badania własne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole (2007)
- [7] Hellström Leo H. O., Sinha Aman i Smits Alexander J., Visualizing the very-large-scale motions in turbulent pipe flow. *Physics of Fluids*, (2011), No. 23
- [8] Zator Sławomir. Korelacyjny pomiar strumieni objętości. Wydawnictwo Szumacher, Kielce (1997)
- [9] Turkowski Mateusz. Metrologia przepływów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa (2018)
- [10] Dantec Measurement Technology A/S. BSA/FVA Flow Software Installation & User's guide vol.1. Skovlunde (2000)
- [11] Poprawski Ryszard i Salejda Włodzimierz. Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki część I. VI. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (2009)
- [12] Taylor John R. Wstęp do analizy błęd pomiarowego [red.] Wyd. II, PWN Warszawa (1999)