

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Synowca pt. „Wpływ zaburzeń przepływu na charakterystyki przepływomierzy ultradźwiękowych z głowicami nakładanymi na rurociąg „

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest analiza wpływu zaburzenia przepływu wywołanego przez łuk hamburski na dokładność pomiaru strumienia objętości płynu za pomocą przepływomierza ultradźwiękowego z głowicami nakładanymi na rurociąg. Przeprowadzona zostały badania eksperymentalne i symulacje CFD pokazujące wpływ odległości przepływomierza ultradźwiękowego od źródła zaburzenia przepływu na błąd pomiaru strumienia przepływu. Autor pokazał również, że istnieje optymalne położenie głowic miernika ultradźwiękowego, dla którego błędy pomiaru strumienia przepływu w warunkach niestandardowych są najmniejsze. Wykorzystując modelowanie CFD oraz anemometrię laserową wskazane zostały miejsca na obwodzie rurociągu, w których błędy pomiaru strumienia przepływu w zadanej odległości od kolana hamburskiego są najmniejsze.

Mgr inż. Piotr Synowiec pokazał, że można rozszerzyć zakres pomiaru przepływu metodą ultradźwiękową z głowicami nakładanymi na rurociąg na zaburzony obszar przepływu przez wybranie odpowiedniego miejsca pomiaru na obwodzie rurociągu, tak aby błąd pomiaru strumienia przepływu był najmniejszy.

Tematyka pracy jest aktualna i może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej.

1. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Synowca o objętości 175 stron składa się z dziewięciu rozdziałów, spisu ważniejszych oznaczeń oraz spisu literatury cytowanej zawierającego 113 pozycji literaturowych.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi krótki wstęp, w którym Kandydat opisuje metody pomiaru strumienia objętości płynu zaznaczając, że profil prędkości w przekroju poprzecznym przewodu zależy od charakteru przepływu, tj. czy przepływ jest laminarny, czy też turbulentny. Rozkład prędkości w przekroju kanału dla przepływu turbulentnego zależy również od liczby Reynoldsa oraz chropowatości ścianek kanału. Autor podkreśla, że istnieje na rynku wiele przyrządów służących do pomiaru strumienia objętości płynu, między innymi rurki spiętrzające, kryzy miernicze, przepływomierze turbinowe, przepływomierze kolanowe, przepływomierze wirowe, przepływomierze Coriolisa, przepływomierze elektromagnetyczne oraz przepływomierze ultradźwiękowe. Wzorcowanie przepływomierzy cieczy wykonuje się zwykle metodą objętościową lub wagową. Wzorcowanie przepływomierzy gazu polega

zwykle na wyznaczeniu charakterystyki pomiarowej danego przepływomierza przy użyciu przepływomierza referencyjnego. Autor podkreśla, że przyrządy do pomiaru strumienia objętości płynów bazują na najróżniejszych zjawiskach fizycznych. Do najbardziej popularnych przyrządów należą przepływomierze zwężkowe oraz rurki spiętrzające, które są bardzo dobrze przebadane i znormalizowane. W przypadku metod ultradźwiękowych nie ma odpowiednich norm dotyczących zasad przeprowadzania pomiarów i oceny ich dokładności. Przepływomierze ultradźwiękowe bazują na ultradźwiękowej dopplerowskiej metodzie echa, w której określany jest czas przejścia fali ultradźwiękowej odbijanej od cząstki przepływającej w rurze lub na metodzie polegającej na zmierzeniu czasu przejścia fali ultradźwiękowej od nadajnika do odbiornika zgodnie z kierunkiem ruchu płynu oraz w kierunku przeciwnym. Niezależnie od zasady działania i konstrukcji przyrządu pomiarowego są one kalibrowane na prostych odcinkach rur, gdy profil prędkości jest rozwinięty i nie zmienia się w kierunku przepływu płynu.

Zasadę działania przepływomierza ultradźwiękowego przedstawiono w rozdziale drugim. W rozdziale tym przedstawione zostały matematyczne podstawy działania przepływomierzy ultradźwiękowych zarówno nakładanych na rurociąg jak i mierników inline, w których głowice ultradźwiękowe mają bezpośredni kontakt z płynem, którego strumień objętości jest mierzony. Ultradźwiękowy pomiar prędkości, zarówno przy laminarnym jak i burzliwym reżimie przepływu, wymaga wprowadzenia współczynnika profilu prędkości K . Na końcu rozdziału podane zostały długości prostych odcinków rurociągu przed przepływomierzem ultradźwiękowym zalecane przez producenta.

Wymagana długość prostego odcinka za zaworem lub pompą powinna wynosić co najmniej 20 średnic wewnętrznych rurociągu, a w przypadku kolan co najmniej 15 średnic.

Jeżeli długość odcinka prostego przed przepływomierzem jest krótsza, to należy stosować współczynnik korekcyjny, który może być wyznaczony eksperymentalnie lub za pomocą modelowania CFD.

W krótkim rozdziale trzecim przedstawiony jest cel i zakres pracy. Celem rozprawy jest analiza wpływu zaburzenia przepływu wywołanego przez łuk hamburski na wskazania przepływomierza ultradźwiękowego z głowicami nakładanymi na rurociąg. Innym ważnym celem pracy jest sprawdzenie czy model CFD przepływu wody w układzie z kolanem hamburskim, w którym turbulencja przepływu symulowana jest za pomocą modelu $k-\epsilon$, dobrze odtwarza profil prędkości wyznaczony eksperymentalnie metodą LDA. Modelowanie CFD umożliwia wybór miejsca pomiaru na obwodzie rurociągu, w którym błędy pomiaru strumienia przepływu w zadanej odległości za zaburzeniem osiągają najmniejsze wartości.

W rozdziale czwartym sformułowane zostały cztery tezy pracy, z których pierwsza jest najważniejsza. Brzmi ona następująco: „można rozszerzyć zakres pomiaru przepływu metodą ultradźwiękową z głowicami nakładanymi na rurociąg do obszaru przepływu zaburzonego przez wybranie odpowiedniego miejsca pomiaru na obwodzie rurociągu, dla którego błędy pomiaru strumienia przepływu są najmniejsze,,.

W krótkim rozdziale piątym przedstawiony został zakres pracy obejmujący między innymi budowę stanowiska pomiarowego oraz wykonanie i opracowanie pomiarów strumieni przepływów za kolanem hamburskim z krokiem równym średnicy nominalnej rury prostej przy zastosowaniu anemometru laserowego i przepływomierza ultradźwiękowego. Pomiar

przeprowadzono dla rury prostej w obszarze o długości równej $12D$, gdzie D jest średnicą nominalną rury.

W rozdziale szóstym przedstawiono budowę stanowiska i sposób realizacji pomiarów. Szczegółowo omówione zostały przyrządy pomiarowe wykorzystywane na stanowisku badawczym takie jak: wodomierz sprzężony MWN/JS, przepływomierz elektromagnetyczny Promag 53W, kryza ISA z przytarczowym odbiorem ciśnienia wraz z przetwornikiem ciśnienia różnicowego PNEFAL Rosemount 1151 i programowalnym rejestratorem ekranowym LUMEL KD7, przepływomierz ultradźwiękowy PortaFlow 330, przepływomierz ultradźwiękowy Prosonic Flow 93T oraz anemometr laserowy (LDA) Dantec Flow Lite.

Wyniki modelowania CFD za pomocą programu ANSYS oraz wyniki uzyskane anemometrem laserowym LDA przedstawione są w rozdziale 7. Jest to najdłuższy rozdział w całej rozprawie, zawierający wyniki modelowania CFD i pomiarów LDA uzyskane przez mgr inż. Piotra Synowca. Za pomocą symulacji CFD i pomiarów LDA wyznaczone zostały profile prędkości w trzynastu przekrojach poprzecznych rury usytuowanych za kolanem hamburskim dla dwóch wartości liczb Reynoldsa: 70000 i 100000. Odległość między dwoma sąsiednimi przekrojami była równa średnicy nominalnej rury. Z przeprowadzonych symulacji CFD i pomiarów LDA wynika, że na obwodzie rurociągu można znaleźć takie miejsce, w którym błąd pomiaru strumienia przepływu zaburzonego w odniesieniu do przepływu niezaburzonego będzie najmniejszy.

W rozdziale ósmym przedstawione zostały wyniki badań ultradźwiękowych. Zostały one stabelaryzowane dla każdej płaszczyzny pomiarowej dla dwóch wymienionych wyżej wartości liczby Reynoldsa. Średnie prędkości przepływu płynu przedstawione zostały w funkcji kąta montażu głowic ultradźwiękowych. Wyznaczone zostały także wartości współczynnika poprawkowego K^* dla każdego kąta pomiarowego (kąta montażu głowic ultradźwiękowych) w danej płaszczyźnie pomiarowej.

Wnioski końcowe stanowią przedmiot rozdziału dziewiątego.

2. Główne osiągnięcia naukowo-badawcze przedstawione w rozprawie

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Synowca ma charakter obliczeniowo-eksperymentalny i wymagała przeprowadzenia pracochłonnych badań eksperymentalnych, oraz symulacji CFD.

Do oryginalnych osiągnięć mgr inż. Piotra Synowca zaliczyłbym:

- Budowę stanowiska badawczego do pomiaru strumienia przepływu cieczy dla liczb Reynoldsa mniejszych od około 100000. Na stanowisku zainstalowanych jest kilka różnych przepływomierzy, które służą do sprawdzenia wskazań dwóch przepływomierzy ultradźwiękowych: E+H Prosonic Flow 93T oraz Micronics Porta Flow 330, za pomocą których odbywa się ciągły pomiar strumienia przepływu.
- Wyznaczenie przestrzennych rozkładów prędkości w trzynastu przekrojach poprzecznych oddalonych od siebie o jedną średnicę nominalną. Analizowane przekroje usytuowane były za kolanem hamburskim. Rozkłady prędkości wyznaczone zostały za pomocą dopplerowskiego anemometru laserowego (LDA) oraz za pomocą symulacji CFD przy użyciu programu ANSYS i zastosowaniu modelu turbulencji $k-\epsilon$. Przeprowadzone pomiary i obliczenia potwierdziły dobrą dokładność modelowania

CFD i jego przydatność do wyznaczania miejsc pomiaru strumienia objętości (za elementem zaburzającym przepływ) za pomocą przepływomierza ultradźwiękowego, tak aby błąd pomiaru prędkości płynu był najmniejszy.

- Badania przeprowadzone przez mgr inż. Piotra Synowca pokazały, że już w odległości równej ośmiu średnicom rurociągu od kolana hamburskiego możliwy jest pomiar z błędem mniejszym od 2% mierzonego strumienia przepływu.

3. Uwagi krytyczne

- Wszystkie symbole na stronie 7 napisane są niepotrzebnie tłustym drukiem,; zwykle tłustym drukiem oznaczane są wektory i macierze.
- W rozdziale 5 pt. „Zakres pracy”, Kandydat przedstawia czwarty cel pracy: ”wykonanie pomiarów strumieni przepływów w obszarze niezaburzonym przepływomierzem ultradźwiękowym dla strumieni odpowiadającym pomiarom wykonanym za pomocą anemometrii laserowej oraz porównanie ze wskazaniami przepływomierza ultradźwiękowego w obszarze niezaburzonym”.

W pracy nie znalazłem jednak porównania strumieni przepływów wyznaczonych metodą ultradźwiękową i metodą LDA w obszarze przepływu niezaburzonego, np. w odległości większej od 15 średnic od kolana hamburskiego.

- Symulację przepływu przed kolanem hamburskim, w kolanie hamburskim oraz za kolanem hamburskim przeprowadzono przy użyciu programu ANSYS. Turbulencja przepływu modelowana była za pomocą programu $k-\epsilon$. W siatce elementów skończonych przedstawionej na rysunku 7.15 nie zagęszczono niestety siatki przy ścianie w kierunku promieniowym. Jest to ważne z uwagi na bardzo dużą zmianę prędkości w pobliżu powierzchni rury. Szkoda, że Autor nie przeprowadził obliczeń przy różnych gęstościach siatki elementów skończonych oraz przy wykorzystaniu różnych modeli turbulencji.
- W rozdziale 7.3 wyznaczone zostały profile prędkości w przekroju poprzecznym przewodu kołowego w pewnej odległości za kanałem hamburskim. Szkoda, że Kandydat nie porównał wyznaczanych profili prędkości otrzymanych za pomocą symulacji CFD z pomiarami otrzymanymi metodą LDA dla rozwiniętego przepływu turbulentnego w prostej rurze kołowej. Ponadto rozkład prędkości w rozwiniętym przepływie turbulentnym można wyznaczyć za pomocą wzoru eksperymentalnego H. Reichhardta (4.144) podanego w książce: D. Taler, Obliczenia i badania eksperymentalne wymienników ciepła, Politechnika Krakowska, Kraków 2016. Rozkłady prędkości dla liczb Reynoldsa równych 10000, 30000, 50000 oraz 100000 otrzymane poprzez scałkowanie równania zachowania pędu i obliczone ze wzoru H. Reichardta porównane zostały w rozdziale (6.2.2) tej samej książki. Wyznaczanie rozwiniętych profili prędkości i temperatury przy turbulentnym przepływie płynu w rurze kołowej przedstawione jest w książce: D. Taler, Numerical Modelling and Experimental Testing of Heat Exchangers, Springer, Berlin 2019 oraz w artykule: D. Taler, Determining velocity and friction factor for turbulent flow in smooth tubes, *International Journal of Thermal Sciences* 105 (2016), 109-122.

Porównanie profili prędkości w rurze prostej pozwoliłoby uwiarygodnić wyniki otrzymane za pomocą symulacji CFD z wykorzystaniem modelu turbulencji $k-\varepsilon$ oraz wyniki pomiarów przy użyciu metody LDA.

Wymienione wyżej uwagi krytyczne nie zmniejszają merytorycznej wartości rozprawy. Powinny być jednak uwzględnione w przyszłych publikacjach Kandydata.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Synowca spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim. Rozprawa doktorska ma duże znaczenie praktyczne. Wyniki uzyskane w pracy mogą być wykorzystane do podwyższenia dokładności pomiarów strumienia objętości za pomocą przepływomierzy ultradźwiękowych usytuowanych w niewielkiej odległości za kolanem. Przypadki, gdy miernika przepływu nie można usytuować w dużej odległości za przeszkodą zgodnie z zaleceniami normy lub producenta miernika występują bardzo często w pomiarach przemysłowych. Z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Piotra Synowca do publicznej obrony swojej pracy. Proponuję również wyróżnienie rozprawy doktorskiej za kompleksową analizę dokładności pomiaru strumienia przepływu przy użyciu przepływomierzy ultradźwiękowych obejmującą badania eksperymentalne, w tym wyznaczenie profili prędkości metodą LDA, oraz symulacje przepływu za pomocą programu ANSYS.

J. Taler