

Dr hab. inż. Stanisław Waluś
Ul. Andromedy 2 m 9
44-117 Gliwice
s.walus@data.pl
32 238 17 97
519 619 918

Gliwice, 15 kwietnia 2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: **Analiza metrologiczna zastosowania przepływomierza ultradźwiękowego w rurociągu w miejscu za zasuwą**

Autor rozprawy: mgr inż. Piotr Piechota

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Artur Andruszkiewicz, profesor uczelni

Promotor pomocniczy; dr inż. Wiesław Wędrychowicz

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została wydana drukiem na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej w 2022 r. Rozprawa składa się ze spisu treści, spisu najważniejszych użytych symboli, 8 rozdziałów i bibliografii. Rozprawa liczy 184 strony.

1. Wprowadzenie

Mgr inż. Piotr Piechota podjął się ważnego z punktu praktycznego zagadnienia poznania wpływu elementu dławiącego zabudowanego przed miejscem pomiaru strumienia objętości i zaburzającego rozkład prędkości na wynik pomiaru strumienia objętości uzyskany za pomocą przepływomierza ultradźwiękowego. Przepływomierz badany przez doktoranta może być stosowany jako stacjonarny lub przenośny. Instalacje energetyczne ze względu na ograniczone miejsce i koszty nie zawsze zawierają odpowiednio długie proste odcinki rurociągów, co jest wymagane przez producenta przepływomierza, aby błąd pomiaru zawierał się w granicach błędu dopuszczalnego.

Mgr inż. Piotr Piechota postawił sobie trzy cele badawcze: 1) zbadanie jak odległość za elementem zaburzającym przepływ wpływa na rozkład prędkości, co pozwoli na znalezienie takiego miejsca zainstalowania przepływomierza, aby błędy pomiaru mieściły się w dopuszczalnych ze względów technologicznych granicach, 2) w przypadku zniekształconego rozkładu prędkości, który nie jest osiowo-symetryczny znalezienie takiego kąta zainstalowania głowic, aby uzyskać minimalną niepewność pomiaru, 3) weryfikację analitycznych, znanych w literaturze modeli zniekształconych rozkładów prędkości za pomocą pomiarów prędkości miejscowych z wykorzystaniem anemometrii laserowej.

Potrzeby pomiarów strumienia objętości z wykorzystaniem przepływomierza nieinwazyjnego występują zarówno w inżynierii środowiska, w górnictwie, jak i w energetyce czyli w zakresie zastosowań odpowiadających dyscyplinie obrony. Z tego względu wybrany przedmiot rozprawy uważam za ważny praktycznie i istotny z naukowego punktu widzenia. Autor zaadaptował istniejące stanowisko badawcze do celu swoich badań naukowych i prze-

przewodził badania, z których wyników mogą korzystać również osoby zajmujące się czysto teoretycznymi zagadnieniami – w ramach mechaniki płynów.

2. Zawartość rozprawy doktorskiej z uwagami recenzenta

W pierwszym rozdziale (Wstęp) Autor na trzech stronach przedstawił wagę pomiaru strumienia objętości w instalacjach produkcyjnych, klimatyzacyjnych czy grzewczych. Zwrócił uwagę na to, że błędy pomiaru strumienia objętości lub strumienia masy będą wpływały na wyznaczanie takich parametrów jak entalpia, entropia czy bilans objętości czy masy istotny w zagadnieniach rozliczeniowych. Błędy pomiaru mające charakter przypadkowy się uśredniają, natomiast błędy systematyczne będą skutkowały w nieprawidłowym bilansie materiału jak i w jakości produktu w układzie automatycznej regulacji, gdzie mimo zerowej wartości różnicy między wartością zadaną a wynikiem pomiaru otrzymywana cecha produktu będzie się różniła od zadanej przez technologa. Autor zwrócił uwagę na różnorodność przepływomierzy i ich właściwości wyróżniając przepływomierze ultradźwiękowe, które są przepływomierzami próbkującymi, a więc wskazanie ich zależy od miejsca, w którym przechodzi fala ultradźwiękowa. Dzięki możliwości wykonania przepływomierza jako nieinwazyjnego (z głowicami nakładanymi na rurociąg) pozwalają na sprawdzanie i wzorcowanie innych przepływomierzy lub wykonywanie pomiarów sporadycznych w wielu miejscach jednym przepływomierzem. Przepływomierze ultradźwiękowe jednodrogowe nie zapewniają dużej dokładności pomiaru, ale mogą być stosowane zarówno dla cieczy jednorodnych, jak i zanieczyszczonych lub zawierających pęcherzyki gazu. Autor zwrócił uwagę na to, że złożoność przepływu turbulentnego, który najczęściej w praktyce przemysłowej występuje, nie pozwala na wystarczająco dokładne modelowanie matematyczne, które pozwoliłoby na wyznaczenie współczynnika korekcyjnego z wymaganą dokładnością. Jeszcze trudniejsza sytuacja występuje w przypadku zniekształconych rozkładów prędkości i taki przypadek podjął Autor rozprawy, jako przedmiot swoich badań naukowych.

W drugim rozdziale doktorant zwrócił uwagę na ciągle aktualną tematykę naukową związaną z stosowaniem przepływomierzy ultradźwiękowych i sformułował dwie tezy. Pierwsza dotyczy możliwości kompensacji błędów pomiaru w niestandardowych warunkach pomiaru strumienia objętości, druga identyfikacji optymalnego położenia głowic przepływomierza. Zasadniczym celem pracy było studium możliwości stosowania jednodrogowego przepływomierza ultradźwiękowego (z nakładanymi głowicami na rurociąg) w warunkach odbiegających od normalnych warunków stosowania. Autor postawił sobie cel badawczy – wyznaczenie doświadczalnego kształtu rozkładu prędkości – co pozwoliło na zweryfikowanie modeli analitycznych zawartych w literaturze. Zakres doświadczalny pracy wynikał z istniejącego i zaadaptowanego przez Autora stanowiska pomiarowego do realizacji badań w celu weryfikacji doświadczalnej postawionych tez. Zakres pracy w części doświadczalnej wynikał z możliwości stanowiska i badania przeprowadzono dla położenia przepływomierza w odległościach od 3 do 15 średnic rurociągu, co okazało się wystarczające ze względu na stabilizację kształtu rozkładu prędkości.

Trzeci rozdział (Pomiar strumienia przepływu) obejmuje strony 12 – 23 i zawiera podstawowe informacje dotyczące metod pomiaru przepływu, rodzajów przepływomierzy ze szczególnym zwróceniem uwagi na przepływomierze ultradźwiękowe. Rozdział ten ma charakter przeglądu literaturowego, ale też jest wprowadzeniem teoretycznym czytelnika pracy w zagadnienia, które dalej są przedstawione jako przedmiot badań Autora.

Ponieważ doktorant nie przedstawił dokładnie wyprowadzenia wzoru wiążącego wielkość mierzoną w urządzeniu pomiarowym (różnica czasów przebiegu fali ultradźwiękowej w kierunku pod prąd cieczy i z prądem cieczy) z wielkością mierzoną za pomocą przepływomierza ultradźwiękowego, to znaczy ze strumieniem objętości, poproszę o wyprowadzenie wzoru dla przypadku uproszczonego – gdy rozkład prędkości jest tłokowy (wszystkie prędkości w przekroju rurociągu są jednakowe). Proszę o wyprowadzenia zarówno dla układu Z, jaki i V oraz W. W rozdziale 3.3 są przedstawione zastosowania przepływomierzy ultradźwiękowych ze zwróceniem uwagi na warunki pomiarowe i zalecenia producentów odnośnie stosowania w różnych warunkach. Autor pisze na str. 22, że wpływ temperatury na prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej można skompensować przez ciągły pomiar temperatury medium. Wymaga to zastosowanie dodatkowego czujnika – termometru i znajomości zależności prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej od temperatury. Aby tego uniknąć, można w urządzeniu wtórnym przepływomierza obliczyć różnicę czasów podzieloną przez ich iloczyn – wtedy z modelu przetwarzania zostanie wyeliminowana prędkość ultradźwięków c . Poproszę doktoranta o wyprowadzenie równania przetwarzania przepływomierza dla $K = 1$ i przy dzieleniu różnicy czasów przelotu przez ich iloczyn.

Rozdział czwarty został poświęcony opisowi matematycznemu zjawiska przepływu płynu i nie zawiera powszechnie podawanych równań w mechanice płynu równań, ale modele rozkładu prędkości, które mogą być przydatne do wyznaczania współczynnika kształtu rozkładu prędkości, który wiąże prędkość mierzoną po drodze fali ultradźwiękowej z wielkością, którą zainteresowany jest użytkownik przepływomierza – strumieniem objętości w rurociągu. Na początku zostały opisane normalne warunki przepływu i normalne warunki stosowania przepływomierza, które zależą od typu zastosowanego przepływomierza ultradźwiękowego co jest istotne przy wyznaczaniu modeli odtwarzania wielkości mierzonej (strumień objętości w rurociągu). Autor zebrał warunki, jakie powinny być spełnione przy wyborze funkcji modelującej rozkład prędkości w danych warunkach. Następnie opisał przepływ laminarny, przejściowy i turbulentny. Za literaturę podał wzór uniwersalny i trójskładnikowy. Na str. 28 i 29 przedstawił wykresy profili prędkości dla trzech różnych wartości m i nie różnią się one między sobą. Powinny być widoczne różnice, ponieważ np. dla $r/R = 0,8$ i $m = 5$ prędkość względna wynosi około 0,58, a dla $m = 12$ wynosi około 0,76. Na str. 29 – 31 Autor wykreślił profile prędkości dla różnych liczb Re i różnych wzorów na parametr n we wzorze Prandtla. Różnice w profilach są widoczne, i stąd modelując rozkład prędkości wzorem Prandtla należałoby porównać profil rzeczywisty z modelowym, aby przyjąć wzór na parametr n dający najlepsze odwzorowanie rzeczywistości. Nie jest tu uwzględniana chropowatość wewnętrznej strony ścianki rurociągu, a w rzeczywistości chropowatości rurociągów mogą być znaczne. Na stanowisku laboratoryjnym doktoranta chropowatości były znikome. Za literaturę na str. 33 – 35 podanych jest 14 modeli. Niektóre z nich różnią się tylko parametrami (np. 4.20, 4.21, 4.22 i 4.28). Czyli można wyróżnić 9 modeli, ale doktorant chciał również pokazać jaki wpływ na kształt rozkładu prędkości ma zmiana parametrów, co pozwala lepiej dobrać model do wyniku badań doświadczalnych, aby już na modelu prowadzić badania symulacyjne. W tabeli 4.3 na str. 37 przedstawiono zestawienie wartości współczynnika K^* dla różnych modeli. Jak wyjaśnić, że dla niektórych modeli K^* dla kąta $\vartheta = 0^\circ$ i $\vartheta = 180^\circ$ ma taką samą wartość, a dla innych – różną? W tabelach 4.4 – 4.17 Autor przedstawił graficznie wyniki obliczeń, co łatwo pozwala zorientować się o kształcie rozkładu prędkości modelowanego określonym

wzorem. W tabeli 4.18 (str. 53 i 54) są przedstawione zależności K^* jako funkcje kąta θ dla poszczególnych modeli, a na rys. 4.9 – zestawienie dla wszystkich modeli.

W rozdziale 5 na str. 56 – 63 opisano sposób prowadzenia badań. Autor opisał stanowisko badawcze z rurą o średnicy wewnętrznej 50 mm i grubości ścianki 5 mm, zastosowane przepływomierze oraz metodykę przeprowadzania badań.

Rozdział 6 (str. 64 – 145) stanowi zasadniczą część rozprawy, w której przedstawiono wyniki badań wartości współczynnika K^* w funkcji kąta ustawienia głowic α , odległości głowicy bliższej zasuwie od zasuw nD (od $n = 3$ do $n = 15$), układu urządzenia pierwotnego (czujnika) przepływomierza ultradźwiękowego (układ Z z jedną drogą pomiarową i układ V z odbiciem wiązki od ścianki wewnętrznej rurociągu) i liczby Reynoldsa (około 35 000 i 70 000). Pod koniec tego rozdziału (str. 142 – 145) przedstawiono analizę niepewności pomiaru. Z zależności prędkości mierzonej przepływomierzem ultradźwiękowym, gdy głowica bliższa zasuwie jest w odległości $3D$ od zasuw, przedstawionej na str. 103 w tabeli 6.50 widać, że prędkość maksymalna jest dla kąta ustawienia głowic 180° a minimalna dla kąta 0° . Podobny charakter przebiegu tej zależności jest przedstawiony na str. 65 w tabeli 6.1 oraz na str. 82 w tabeli 6.25. Jak można fizycznie wyjaśnić ten fakt?

W rozdziale 7 (str. 146 – 173) przedstawiono wyniki pomiarów prędkości miejscowych za pomocą anemometru laserowego i przedstawiono je w tabelach, w postaci brył prędkości i rozkładów prędkości w przekrojach prostopadłych do osi rurociągu z zastosowaniem wizualizacji wartości prędkości za pomocą kolorów. Nie wykreślano izotach, co jest drugim sposobem przedstawiania rozkładu prędkości. W przypadku rozkładów osiowo-symetrycznych lub przedstawiania modeli analitycznych wykreśla się izotachy, natomiast w przypadku rozkładów zniekształconych i dosyć dużych niepewności przypadkowych wyników z metody anemometrii laserowej dobór krzywej aproksymującej wyniki pomiarów byłby bardzo trudny. W pozycji [108] w bibliografii są zamieszczone wykresy izotach dla modeli analitycznych i widać z nich, że występują niekiedy nieciągłości prędkości, co nie miejsca w warunkach rzeczywistych. Przedstawione na str. 165 – 172 rozkłady prędkości dla różnych kątów wyboru średnicy rurociągu i odległości od zasuw nożowej pozwalają dobrze zorientować się w kształcie profili prędkości w zależności od liczby Reynoldsa i ustawienia zasuw.

W rozdziale 8 (str. 174 – 177) Autor posumował wyniki swoich badań i przedstawił wnioski końcowe.

W rozdziale 9 jest przedstawiona bibliografia licząca 142 pozycje. Obejmuje ona zarówno publikacje naukowe, podręczniki, materiały firmowe i normy, co świadczy o dobrym zaznajomieniu się Autora z materiałem, związanym z przygotowaniem rozprawy. Pozytywnie oceniam fakt, że 31 pozycji jest z lat 2015-2022, i 58 pozycji z lat 2000-2014, co świadczy o śledzeniu rozwoju problematyki na bieżąco. Wśród 8 cytowanych publikacji współautorskich są publikacje w języku polskim, jak i angielskim.

3. Uwagi krytyczne, dyskusyjne i szczegółowe

1) Istotą działania przepływomierzy ultradźwiękowych jest zmiana prędkości fali ultradźwiękowej w płynie będącym w ruchu w stosunku do prędkości w płynie pozostającym w spoczynku (str. 13, w 13 d).

2) Str. 18 – wzór nie jest potrzebny – wymiar po lewej stronie znaku równości m/s, po prawej m^2/s .

3) Str. 18 – we wzorach (3.14) i (3.15) powinno być v_s – jak we wzorach definicyjnych (3.16) i (3.17).

4) Str. 19 i 20 – wzory na obliczanie strumienia objętości – patrz uwaga w pierwszym akapicie na str. 3.

5) Autor słusznie wprowadził i zdefiniował współczynnik K^* wzorem (4.13) odróżniając go od współczynnika K zdefiniowanego wzorem (3.16). Będą one jednakowe dla takiego samego kształtu rozkładu prędkości (który może być osiowo-symetryczny lub zniekształcony) na odcinku rurociągu między miejscem zainstalowania głowic. Wartości K^* przedstawione dla modeli od 1 do 14 dotyczą przypadku jednakowego kształtu rozkładu prędkości wzdłuż odcinka między głowicami. Wtedy K^* równa się K i mimo, że w tabeli na str. 37 wprowadzono oznaczenie K^* , a na rys. 4.9 K , to nie jest to błędne.

Uwagi szczegółowe

w i d – oznacza i-ty wiersz liczony od dołu strony, w i g – oznacza i-ty wiersz liczony od góry strony

	jest	powinno być
str. 5 w 10 g	K^* , natomiast we wzorze definicyjnym (3.16) na str. 18 jest K^* przyjmując tę konwencję, K w tekście powinno zawsze być pisane czcionką prostą, a we wzorach pochyłą.	
str. 5 w 7 d	kat	kąt
str. 5 w 1 d	s	s
str. 7 w 1 g	wartosci	wartości
str. 7 w 10 g	miedzy	między
str. 9 w 1 g	prac	pracy
str. 10 w 14 d	K	K
str. 10 w 3 d	pracy	prace
str. 11 w 5 10 11 g,	K	K
str. 15 w 14 g	róznych	różnych
str. 17 w 4 g i 5 g	dx (w sumie)	
str. 17 w 7 d	$\cos^2\alpha$	$\cos^2\alpha$
str. 18 w 5 d	K	K
str. 18 w 2 d	średnia	średnią
str. 21 w 9 g	dokładność	dokładności
str. 26 w 14 g	prądu	prądu.
str. 36 w 3 1 d	K^*	K^*
str. 37 w 1 g	K^*	K^*
str. 38 w 2 g	rozkładu prędkości	współczynnika K
str. 39 w 3 g	płaskich	płaskich
str. 39 do 52	we wzorze na K^* powinno być v_s a nie v_d . W tabeli 4.18 na str. 53 i 54 jest w główce K^* , a w opisie wykresów K . Nie jest to błędem, ale lepiej byłoby używać jednego oznaczenia – K .	
str. 44 w 6 d	$m = m =$	$m =$
str. 47 w 3 g	θ	ϑ
str. 55 w 4 g	K^*	K^*

str. 57 w 20 d	5mm	5 mm
str. 61 w 5 g	różnych	różnych
str. 64 w 11 g	1/3	1/2
str. 64 w 11 d	$v_z(\alpha)$	$v_z(\alpha)$
str. 126 w 14 g	K^*_{rz}	K^*_{rz}
str. 133 w 9 d	Z	V
str. 146 w 15 g	prowadzona	prowadzone
str. 153 w 7 d	3D	2D
str. 161 w 4 d	Stworzono	sporządzono
str. 164 w 4 d	miedzy	między
str. 167 w 4 d	miedzy	między
str. 176 w 9 g	K^*_{rz}	K^*_{rz}
str. 177 w 14 g	mniejsza	mniejszej
str. 178 w 5 g	w postaci nożowej	w postaci zasuwki nożowej
str. 178 w 3 d	katów	kąków

4. Ocena pracy

Mgr inż. Piotr Piechota podjął się ważnego zagadnienia zwiększenia dokładności pomiaru strumienia objętości wody w sytuacji konieczności pomiaru w bliskiej odległości za elementem zaburzającym przepływ (rozkład prędkości), na przykładzie, gdzie elementem zaburzającym jest zasuwka nożowa. Autor zrealizował postawione sobie cele naukowe, a mianowicie rozbudował istniejące stanowisko badawcze, dokonał badań zależności prędkości mierzonej po średnicy rurociągu w funkcji kąta ustawienia głowic i odległości od zasuwki dla dwóch przepływów turbulentnych ($Re = 35\ 000$ i $70\ 000$) i dwóch stopni zamknięcia zasuwki nożowej: 1/3 i 1/2. Wyznaczył na podstawie analitycznych modeli zniekształconych rozkładów prędkości, jakie są znane z literatury, wartości współczynnika kształtu rozkładu prędkości i wyniki obliczeń przedstawił w tabeli 4.3 na stronie 37 w zależności od kąta położenia średnicy oraz w postaci wykresów na rys. 4.9 na str. 38. Wartościową częścią rozprawy są graficzne prezentacje brył prędkości i rozkładów prędkości w przekroju rurociągu dla modeli, dla których Autor wyznaczył wzory na zależność współczynnika kształtu od kąta położenia średnicy. Korzystając z anemometrii laserowej zbadał rozkłady prędkości dla przekrojów pomiarowych umiejscowionych w zakresie odległości od czterech do piętnastu średnic od zasuwki. Wyniki te pozwalają na wybranie najlepszego modelu do badań nad przepływomierzem nie tylko jednodrogowym, ale i wielodrogowym, które są stosowane w celu zwiększenia dokładności pomiaru zarówno dla osiowo-symetrycznych, jak i zniekształconych rozkładów prędkości.

5. Wniosek o dopuszczenie rozprawy mgr. inż. Piotra Piechoty do publicznej obrony

Przedstawione w rozprawie wyniki badań zarówno teoretycznych, jak i doświadczalnych stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego mającego znaczenie praktyczne zarówno dla inżynierii środowiska, górnictwa, jak i dla energetyki. Ze względu na koszt instalacji projektowane są one jako możliwie zwarte, co wiąże się często z krótkimi odcinkami prostymi rurociągów i skutkuje zniekształconymi rozkładami prędkości. W tej sytuacji powinien być zastosowany przepływomierz całoprzewodowy np. elektromagnetyczny, Coriolisa

czy inny, w którym sygnał wyjściowy jest proporcjonalny do prędkości średniej w przekroju. Jednak koszty przepływomierza, warunki eksploatacji często skłaniają do stosowania przepływomierza ultradźwiękowego. W przypadku awarii przepływomierza elektromagnetycznego w celu jego wymiany należy zatrzymać przepływ i opróżnić rurociąg z cieczy. Natomiast nie ma tego problemu w przypadku przepływomierza ultradźwiękowego z głowicami nakładanymi na rurociąg i nawet, gdy głowice mają bezpośredni kontakt z cieczą, można je wysunąć bez przerywania przepływu dzięki zabudowanym na stałe zaworom.

Uważam, że doktorant wykazał się umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej zarówno w zakresie prac teoretycznych, jak i prowadzenia badań doświadczalnych i umiejętności podsumowania wyników. Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgra inż. Piotra Piechoty odpowiada warunkom określonym w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

6. Wniosek o wyróżnienie rozprawy

Praca doktorska mgra inż. Piotra Piechoty jest podsumowaniem całościowego, samodzielnego rozwiązania problemu naukowego w zakresie pomiaru strumienia objętości cieczy w rurociągu w miejscu, gdzie występuje zniekształcony rozkład prędkości. Oryginalnym osiągnięciem autora jest wprowadzenie rzeczywistej miary zniekształcenia rozkładu prędkości definiowanej jako stosunku prędkości średniej po średnicy w warunkach przed miejscem zabudowy przeszkody (K_{rz}^*), gdzie występuje osiowo-symetryczny rozkład prędkości do prędkości średniej za zasuwą. Przeprowadzone badania prędkości miejscowych anemometrem laserowym i wyznaczenie brył prędkości, rozkładów prędkości i profili prędkości dla różnych odległości od zaburzenia pozwalają zarówno na weryfikacje modeli analitycznych przedstawionych wzorami (4.17) do (4.31) jak i na wyznaczenie rzeczywistych wartości współczynnika kształtu rozkładu prędkości K definiowanego jako stosunek prędkości średniej po przekroju poprzecznym rurociągu do prędkości średniej po średnicy, która stanowi drogę fali ultradźwiękowej – wzór (3.16). Autor umiejętnie wybrał metodykę badań ograniczając się do tego współczynnika i zostawiając problematykę wyznaczania strumienia objętości na podstawie zmierzonej przepływomierzem prędkości średniej po drodze fali ultradźwiękowej i współczynnika kształtu rozkładu prędkości K , który może być określony np. na podstawie Polskiej normy – poz. [18] w bibliografii. Rozprawa ma charakter implementacyjny, a częściowe osiągnięcia Autora są opublikowane zarówno w języku polskim (szerokie udostępnienie wyników dla czytelnika polskiego) jak i angielskim (upowszechnienie w świecie). Podsumowując wnoszę o wyróżnienie recenzowanej rozprawy.

Stanisław Waluś

Stanisław Waluś