

Politechnika Śląska
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Instytut Automatyki

Uczestnik zaocznego czteroletniego studium doktoranckiego

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**Analiza właściwości metrologicznych przepływomierzy
próbujących z czujnikami powierzchniowymi**

mgr inż. Witold Krieser

Promotor: dr hab inż. Stanisław Waluś, prof. nzw. w Politechnice Śląskiej

Gliwice 2010

Spis treści:

1. Wstęp	3
2. Zakres i cel pracy	4
3. Teza pracy	6
4. Przegląd zawartości rozprawy	6
5. Przepływomierz próbkujący	7
6. Analiza metrologiczna przepływomierzy próbkujących	10
7. Weryfikacja doświadczalna	18
8. Podsumowanie i wnioski	19
9. Publikacje autora rozprawy	21
10. Literatura cytowana w rozprawie doktorskiej	22

1. Wstęp

Strumień objętości lub strumień masy jest jedną z najważniejszych wielkości mierzonych w przemyśle. Pomiar strumienia masy lub strumienia objętości należy do najtrudniejszych w metrologii przemysłowej [Mille1989, Turko1987 s.7]. Obecny postęp techniczny narzuca konieczność jak najdokładniejszego pomiaru strumienia płynu. Informacje uzyskiwane na podstawie tego typu pomiarów są wykorzystywane zarówno w systemach sterowania procesami technologicznymi jak i do rozliczeń ilości substancji. Wymagania coraz to większej dokładności pomiaru oraz obniżenia kosztów przepływomierza powodują, że szukane są sposoby bardziej efektywnych metod zastosowania dotychczasowych rozwiązań konstrukcyjnych przepływomierzy.

W ciągu wielu lat powstało mnóstwo różnych rozwiązań urządzeń pierwotnych przepływomierzy charakteryzujących się określonymi cechami i możliwościami. Istnieje wiele zasad pomiaru strumienia płynu opartych na różnych zjawiskach fizycznych, co pociąga za sobą istnienie wielu typów przepływomierzy [Medlo1982, Tinha1988]. Dla użytkownika przepływomierza mniej istotna jest jego zasada działania, natomiast najważniejsze są jego właściwości metrologiczne.

W przepływomierzu próbkującym oblicza się strumień objętości na podstawie wartości prędkości uzyskanej w czujniku prędkości, pola powierzchni przekroju przepływowego oraz współczynnika wzorcowania, który jest wyznaczany teoretycznie lub doświadczalnie. Do teoretycznego wyznaczenia współczynnika wzorcowania przepływomierza próbkującego wymagana jest znajomość modelu matematycznego rozkładu prędkości w przewodzie zamkniętym.

2. Zakres i cel pracy

Praca ma na celu wstępną analizę metrologiczną przepływomierzy próbkujących z czujnikami powierzchniowymi. W specjalistycznej literaturze poświęconej pomiarom przepływu [Flow1991, Spitz1993] zamieszczono po jednym rozdziale dotyczącym przepływomierzy próbkujących. W [Flow1991 s.465-502] jest rozdział zatytułowany „Insertion (Sampling) Flow Measurement”, natomiast w [Spitz1993 s.349-366] zatytułowany „Insertion flometers”. W tych rozdziałach są przedstawione czujniki stosowane w przepływomierzach próbkujących, sposoby umiejscowienia czujnika punktowego i wyznaczania współczynnika wzorcowania dla tego czujnika. Nie ma natomiast żadnych treści poświęconych czujnikom powierzchniowym.

W bardzo obszernym poradniku [Mille1989 s.6-30] przepływomierzom próbkującym (insertion-type meters) poświęcono pół strony zwracając uwagę na potrzebę zdefiniowania profilu prędkości. W poradniku [Instr2003 s.350–352] w punkcie „Insertion – type flowmeters” przedstawiono tylko konstrukcje sond turbinowych zwracając uwagę, że mierzą one prędkość w określonym punkcie, co wymaga pomiaru profilu prędkości lub umiejscowienia czujnika w punkcie zapewniającym odpowiedni kompromis. Przedstawiony jest też czujnik z kołem łopatkowym. Chociaż jest to czujnik powierzchniowy, w poradniku napisano o pomiarze w pojedynczym punkcie. Jest to praktycznie uzasadnione, gdy stosunek średnicy czujnika do średnicy przewodu jest mały np. rzędu 1:100. Do teoretycznego wyznaczenia współczynnika wzorcowania przepływomierza próbkującego wymagana jest znajomości modelu matematycznego rozkładu prędkości w przewodzie zamkniętym. W literaturze podanych jest wiele modeli matematycznych rozkładu prędkości różniących się znacznie postacią funkcji.

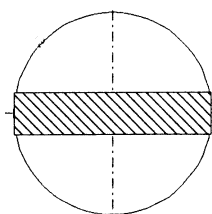
Od dokładności przyjętego modelu matematycznego rozkładu prędkości zależy dokładność wyznaczenia modelu matematycznego urządzenia pierwotnego przepływomierza próbkującego. Przedmiotem niniejszej pracy jest wyznaczenie współczynnika wzorcowania k . Analiza metrologiczna została przeprowadzona poprzez obliczanie współczynników wzorcowania dla różnych rozkładów prędkości i różnych konfiguracji urządzenia pierwotnego przepływomierza.

Obliczenia te pozwoliły na najlepszy dobór położenia czujnika przepływomierza w przekroju pomiarowym.

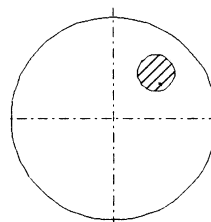
W literaturze można spotkać współczynniki wzorcowania dla wybranych konkretnych czujników i sytuacji pomiarowych, natomiast zagadnienie nie jest wyczerpane na tyle, aby podane wyniki analizy teoretycznej mogły być zastosowane w prawie każdym przypadku.

W pracy zostało dokonane zestawienie współczynników wzorcowania dla różnych rozkładów prędkości uwzględniając dwa rodzaje konfiguracji urządzeń pierwotnych jednopowierzchniowych: z czujnikiem o powierzchni czynnej prostokątnej oraz o powierzchni czynnej kołowej, co przedstawiono na rys. 2.1.

a)



b)



Rys. 2.1. Schematy urządzeń pierwotnych przepływomierzy próbkujących z czujnikami powierzchniowymi: a) czujnik powierzchniowy o powierzchni czynnej prostokątnej umieszczony na średnicy rurociągu, b) czujnik powierzchniowy o powierzchni czynnej kołowej.

Zakres pracy jest ograniczony do analizy przepływomierzy próbkujących z pojedynczymi czujnikami powierzchniowymi stosownymi do pomiaru strumienia objętości w rurociągach o przekroju kołowym. Modelowanie matematyczne czujnika zostanie potraktowane skrótowo, gdyż zakłada się, że z czujnika pomiarowego opartego o dowolną zasadę działania uzyskuje się sygnał proporcjonalny do prędkości średniej płynu w powierzchni czynnej czujnika.

W pracy zostało przeanalizowane działanie przepływomierzy próbkujących dla przepływów w warunkach normalnych oraz dla warunków odbiegających od normalnych (zniekształcony rozkład prędkości).

3. Teza pracy

Analiza modeli matematycznych urządzeń pierwotnych przepływomierzy próbkujących z czujnikami jednopowierzchniowymi umożliwia wyznaczenie wzorów na współczynnik wzorcowania, pozwalających na wzorcowanie pośrednie (na podstawie modelu matematycznego) przepływomierza oraz na określenie położenia i rozmiaru czujnika, przy których współczynnik ten zmienia się w jak najmniejszym zakresie.

4. Przegląd zawartości rozprawy.

Praca podzielona została na rozdziały, w których przedstawione zostały najważniejsze aspekty związane z przepływomierzami próbkującymi jednopowierzchniowymi z czujnikami w kształcie prostokąta oraz w kształcie koła.

Rozdział drugi pracy zawiera najważniejsze informacje związane z przepływomierzem próbkującym, związane z budową oraz z zasadą działania. W rozdziale tym opisane są zjawiska związane z pomiarem strumienia objętości płynu za pomocą przepływomierzy próbkujących, właściwości metrologiczne oraz metodyka obliczania strumienia objętości płynu.

Kolejny rozdział to przegląd literatury związany z wzorami matematycznymi opisującymi rozkład prędkości w rurociągu. Opisano i wybrano wzory powszechnie stosowane. Ze względu na duże zróżnicowanie urządzeń pierwotnych przepływomierzy próbkujących opisano i wyodrębniono normalne warunki przepływu i normalne warunki stosowania przepływomierzy.

W rozdziale czwartym i piątym dokonano analizy właściwości metrologicznych przepływomierzy próbkujących z czujnikami o powierzchni czynnej kołowej oraz prostokątnej umieszczonymi odpowiednio w średnicy rurociągu oraz na cięciwie rurociągu. Współczynniki wzorcowania zostały obliczone dla przepływu laminarnego, turbulentnego oraz dla osiowosymetrycznego rozkładu prędkości opisującego przepływ w warunkach odbiegających od normalnych.

W rozdziale szóstym przedstawiono autorskie rozwiązanie opracowania metodyki doboru przepływomierza próbkującego z czujnikami powierzchniowymi dla konkretnej aplikacji.

W katalogach producentów najczęściej podawane są podziały przepływomierzy ze względu na zasadę działania, natomiast użytkownika bardziej interesuje, czy może zastosować dany przepływomierz do konkretnego medium oraz jaki wynik uzyska się w warunkach zastosowania tego przepływomierza. Przyszły użytkownik przepływomierza wie, jakie medium chce mierzyć i jaka jest żądana dokładność wyniku pomiaru, by był on adekwatny do dalszego przetwarzania. W [Kucyb2002] przedstawiono niektóre zagadnienia związane z doбором przepływomierza. Bardziej kompleksowo problem doboru zawarty jest w [Waluś2004]. Autor tej pracy zaproponował etapowe podejście doboru przepływomierza próbkującego z czujnikami jednopowierzchniowymi [JeziK2007].

W rozdziale siódmym dokonano weryfikacji doświadczalnej, której celem było sprawdzenie, czy wyznaczone współczynniki wzorcowania są wyznaczone prawidłowo oraz na ile różnią się od rzeczywistych współczynników wzorcowania. Etapem wstępnym do weryfikacji doświadczalnej jest w miarę możliwości sprawdzenie wyprowadzonych wzorów pod względem poprawności ich wyprowadzenia. Weryfikację doświadczalną dokonano na stanowisku pomiarowym znajdującym się w laboratorium Instytutu Mechaniki Ciepłej i Mechaniki Płynów na Politechnice Wrocławskiej.. Rozdział ósmy zawiera podsumowanie i wnioski. W rozdziale dziewiątym przedstawiono spis literatury cytowanej w rozprawie doktorskiej, który zawiera również publikacje autora.

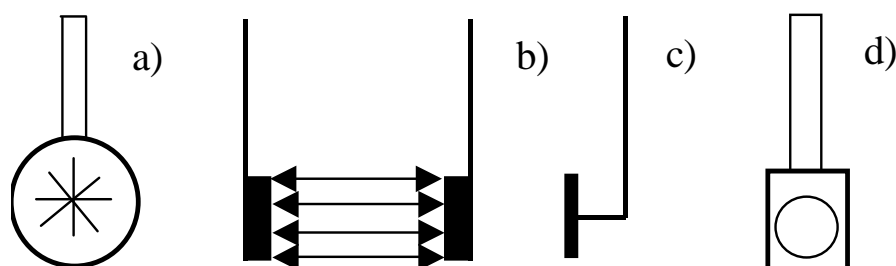
5. Przepływomierz próbkujący

a) Podział przepływomierzy próbkujących

Przepływomierze próbkujące umożliwiają obliczanie strumienia objętości płynu na podstawie wartości prędkości zmierzonej w pewnym punkcie, w odcinku, lub w powierzchni [Spitz1993]. Mogą być też mierzone prędkości w wielu punktach [Gonde1999, KabzK1995], w wielu odcinkach [Instr2003, Waluś1997] w przekroju przepływowym lub w wielu wyodrębnionych powierzchniach. Sens stosowania przepływomierzy próbkujących przedstawiono w [Flow2004]. Przepływomierze próbkujące są również nazywane zanurzeniowymi (wprowadzanymi) [Kegel1991, Kopp1993, Mille1989, Spitz1993].

b) Czujniki stosowane w przepływomierzach próbkujących

Jako powierzchniowe są stosowane często czujniki turbinowe [Besto1980, Inzer1998, Pospo2004], ultradźwiękowe [Erb1999], dynamometryczne (z tarczą naporową) [Spitz1993] i ostatnio elektromagnetyczne [Multi1997]. Schematy tych czujników przedstawiono na rys. 5.1. Czujniki te mają kołową powierzchnię czynną [Kries2008], przy czym w czujnikach a), b), d) sygnał wyjściowy jest proporcjonalny do prędkości średniej, natomiast w czujniku c) do wartości średniej z kwadratu prędkości miejscowych, co zostało opisane w [Waluś2001].

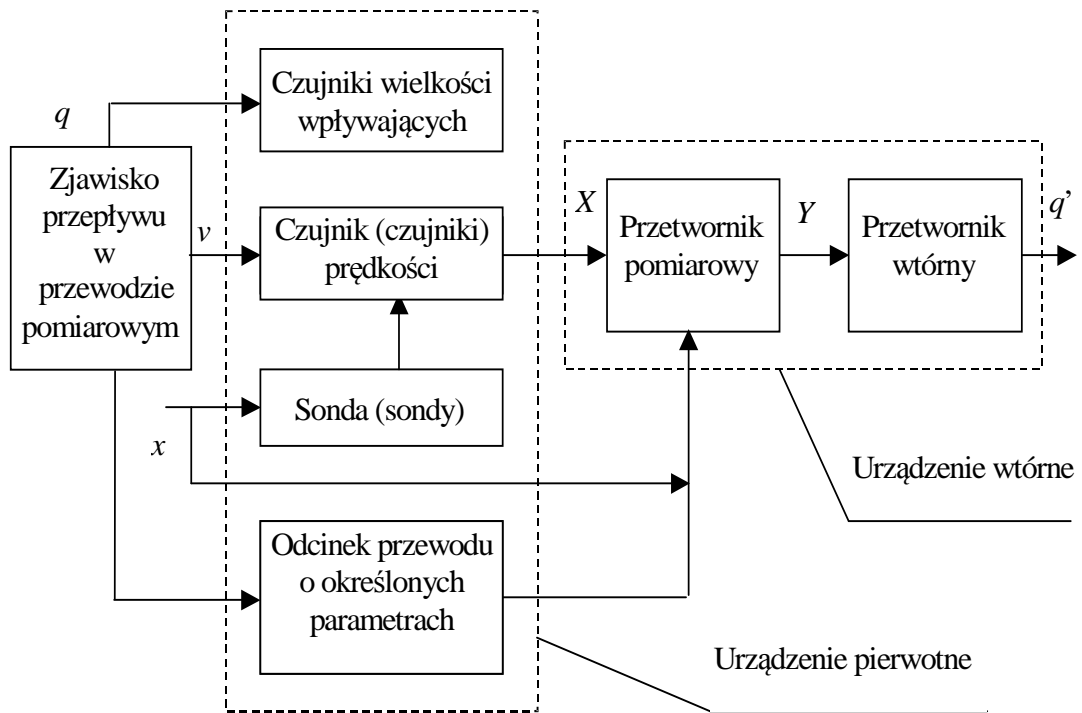


Rys. 5.1. Schematy budowy czujników powierzchniowych: a) turbinowy, b) ultradźwiękowy, c) dynamometryczny, d) elektromagnetyczny.

c) Schemat pomiaru przepływomierzem próbkującym

Przepływomierz próbkujący składa się z urządzenia pierwotnego i urządzenia wtórnego [PN-EN24006, Waluś1998]. W skład urządzenia pierwotnego wchodzi czujnik do pomiaru prędkości lokalnej, sonda do ustalenia położenia czujnika oraz odcinek rurociągu, w którym zabudowany jest czujnik [VDI/1994]. Urządzenie pierwotne może być wyposażone w jeden czujnik lub wiele czujników. Stosowanie większej liczby czujników jest wymagane gdy chcemy uzyskać większą dokładność pomiaru strumienia objętości oraz w przypadku zniekształconych rozkładów prędkości. Oprócz czujnika do pomiaru prędkości przepływomierz może być wyposażony w czujniki do pomiaru wielkości wpływających, które charakteryzują stan medium (temperatura, ciśnienie, lepkość, gęstość). Urządzenie wtórne może się składać z przetwornika pomiarowego, generującego na wyjściu określony sygnał niosący informację o wartości wielkości mierzonej oraz przetwornika wtórnego zdolnego do rejestracji i wizualizacji wyników pomiaru.

Schemat blokowy pomiaru przepływomierzem próbującym przedstawiony jest na rys. 5.2. [Waluś2003 s.31].



Rys. 5.2. Schemat pomiaru przepływomierzem próbującym: q – wielkość mierzona (strumień płynu), q' – odtworzona wartość wielkości mierzonej, v – prędkość, x – położenie czujnika ustalane za pomocą sondy, X – wielkość wejściowa przetwornika pomiarowego, Y – wielkość wejściowa przetwornika wtórnego.

Jak widać na rys. 5.2 sygnał wyjściowy z urządzenia pierwotnego nie zależy bezpośrednio od strumienia objętości płynu, lecz od prędkości w określonej powierzchni przekroju przepływowego (to znaczy w powierzchni czynnej czujnika).

6. Analiza metrologiczna przepływomierzy próbkujących z czujnikami jednopowierzchniowymi

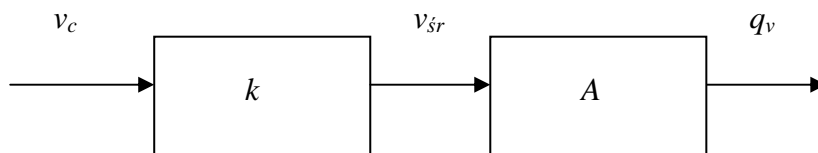
a) Obliczanie strumienia objętości

Charakterystyczną cechą przepływomierzy próbkujących jest przekazywanie przez czujnik (lub czujniki), umieszczony w wybranym miejscu (rozmszczone w określonych miejscach przekroju przepływowego) informacji o wartości prędkości miejscowej (lokalnej) płynu. Na podstawie tych danych jak również na podstawie znajomości powierzchni przekroju przepływowego, położenia czujników oraz tzw. współczynnika wzorcowania wyznaczany jest strumień objętości przepływającego medium. Współczynnik wzorcowania jest zdefiniowany następująco:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_c} \quad (6.1)$$

gdzie: $v_{\dot{s}r}$ - średnia prędkość płynu po przekroju przepływowym, v_c - średnia prędkość płynu w powierzchni czynnej czujnika.

Do wyznaczania strumienia objętości można się posłużyć schematem przedstawionym na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Schemat wyznaczania strumienia objętości płynu metodą próbkującą.

Sygnal wyjściowy z urządzenia pierwotnego nie zależy bezpośrednio od strumienia objętości płynu, lecz od prędkości w określonej powierzchni przekroju przepływowego, a więc pomiar strumienia płynu za pomocą przepływomierza próbkującego jest pomiarem pośrednim. Strumień objętości w przepływomierzu próbkującym z jednym czujnikiem prędkości miejscowej jest obliczany zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 6.1 według wzoru:

$$q_v = v_c \cdot k \cdot A. \quad (6.2)$$

b) Modele matematyczne rozkładu prędkości w przewodach zamkniętych o kołowym przekroju poprzecznym

W literaturze można znaleźć wiele wzorów stanowiących modele matematyczne rozkładów prędkości, ale nie wszystkie są one na tyle kompletne, aby mogły być stosowane do modelowania urządzeń pierwotnych przepływomierzy próbkujących.

Przepływ laminarny

Wyprowadzenie teoretyczne wzoru opisującego rozkład prędkości dla przepływu laminarnego można znaleźć w wielu podręcznikach, np. w [Buko1975]. Postać jego jest następująca:

$$v = v_m \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (6.3)$$

gdzie: v_m - prędkość w osi rurociągu, która jest prędkością maksymalną, r - odległość punktu od osi rurociągu w przekroju przepływowym, R - promień wewnętrzny rurociągu.

Przepływ turbulentny

W przypadku przepływu turbulentnego nie da się wyznaczyć ścisłego modelu matematycznego rozkładu prędkości na drodze teoretycznej, w związku z czym nie ma jednego określonego wzoru opisującego rozkład prędkości [Grybo1989], a według [ChmiD2001] przepływ turbulentny jest skomplikowanym procesem przemysłowym. Powstało wiele przybliżonych, empirycznych wzorów zaproponowanych przez różnych autorów, które są zawarte np. w publikacjach [Lechn1983, Gonde2007, Opie1988, Waluś2003]. Poniżej zostaną przedstawione wzory opisujące rozkład prędkości dla przepływu turbulentnego wykorzystane w rozprawie doktorskiej.

Przepływ turbulentny - Wzór uniwersalny

W [Gätke1986, Waluś1986] został podany prosty wzór opisujący w przybliżeniu rozkład prędkości od przepływu laminarnego po tłokowy:

$$v = v_m \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^m \right] \quad (6.4)$$

gdzie: v_m - prędkość w osi rurowości, która jest prędkością maksymalną, r - odległość punktu od osi rurowości w przekroju przepływowym, R - promień wewnętrzny rurowości, m - wykładnik potęgowy

Przepływ turbulentny - Wzór potęgowy trójskładnikowy

W [Waluś2003] autor przedstawił wzór pozwalający na lepsze dopasowanie profilu obliczonego do wyznaczonego doświadczalnie, niż to można zrobić dla wzoru (6.4). Został on nazwany trójskładnikowym:

$$v = v_m \left[1 - b \left(\frac{r}{R} \right)^2 - (1 - b) \left(\frac{r}{R} \right)^m \right] \quad (6.5)$$

gdzie: b , m - parametry, które wyznacza się dla konkretnego profilu prędkości.

Przepływ turbulentny - wzór potęgowy Prandtla

Wzór Prandtla jest podawany przez wielu autorów w różnych publikacjach i ma następującą postać:

$$v = v_m \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6.6)$$

gdzie: $1/n$ - wykładnik potęgowy zależny od liczby Reynoldsa i chropowatości rurowości.

c) Modele matematyczne rozkładów prędkości w warunkach odbiegających od normalnych

Rozkład prędkości zostaje zniekształcony wskutek występowania przeszkód na drodze przepływu płynu (czujniki wprowadzane do rurowości, klapy, zawory) oraz przy zmianie kierunku rurowości (kolana) lub jego średnicy (dyfuzor) [PN-81/M-42367]. Przez zniekształcony rozkład prędkości rozumie się zazwyczaj rozkład, który nie jest osiowosymetryczny. Istnieje wiele modeli matematycznych zniekształconych rozkładów prędkości, które w różny sposób odzwierciedlają stopień zniekształcenia [Salam1972, Waluś1997].

Model zniekształconego rozkładu prędkości można przedstawić jako sumę dwóch składowych: składowej niezniekształconej oraz składowej zniekształconej [Waluś2003]:

$$v(r) = v_1(r) + v_2(r, \vartheta) \quad (6.7)$$

gdzie: $v_1(r)$ - składowa niezniekształcona, $v_2(r, \vartheta)$ - składowa zniekształcona,

ϑ - współrzędna kątowa.

Do analizy właściwości metrologicznych w tej pracy użyty zostanie wzór:

$$v(r, \vartheta) = v_m \left[\left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} + h \frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \quad (6.8)$$

gdzie: h, k – parametry mające wpływ na zniekształcenie.

d) Analiza metrologiczna przepływomierzy próbkujących z czujnikami powierzchniowymi o powierzchni prostokątnej oraz o powierzchni czynnej kołowej

W rozprawie doktorskiej wyprowadzone zostały wzory pozwalające na obliczanie współczynnika wzorcowania dla wzorów modelujących rozkłady prędkości opisane w punkcie 4 autoreferatu dla przepływomierzy próbkujących z czujnikami powierzchniowymi o powierzchni czynnej modelowanej prostokątem oraz kołem i umieszczonych w średnicy oraz cięciwie rurociągu. Wyznaczanie współczynnika wzorcowania dla osiowosymetrycznych rozkładów prędkości w warunkach normalnych.

Prędkość średnią płynu występującą we wzorze, który definiuje współczynnik wzorcowania oblicza się następujący sposób:

$$v_{sr} = \frac{1}{A} \int_A v dA \quad (6.9)$$

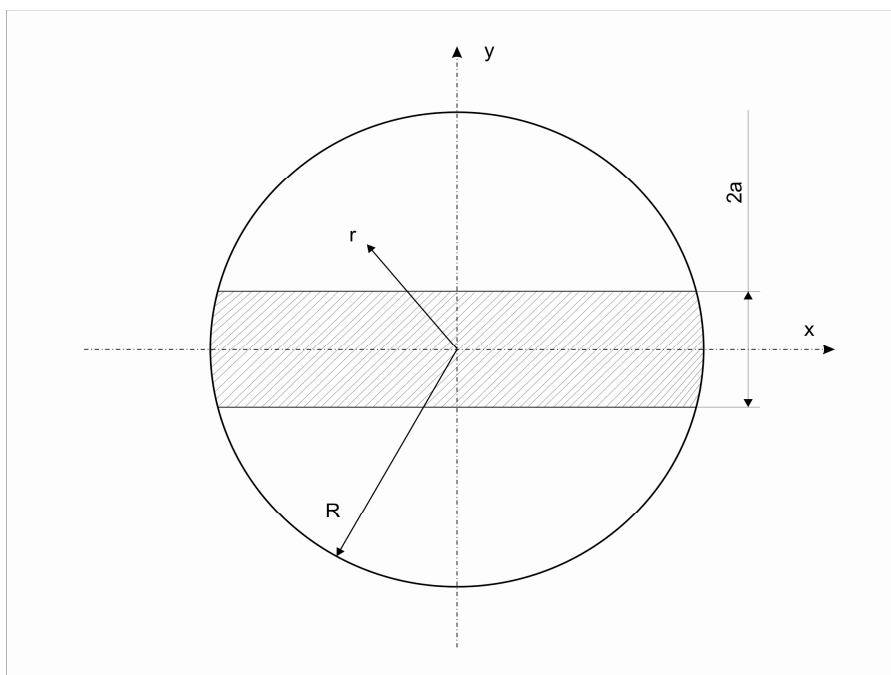
gdzie: v – model rozkładu prędkości w przekroju przepływowym, dA - element powierzchni przekroju.

Prędkość średnia płynu w powierzchni czynnej czujnika „ A_c ” zdefiniowana jest następująco:

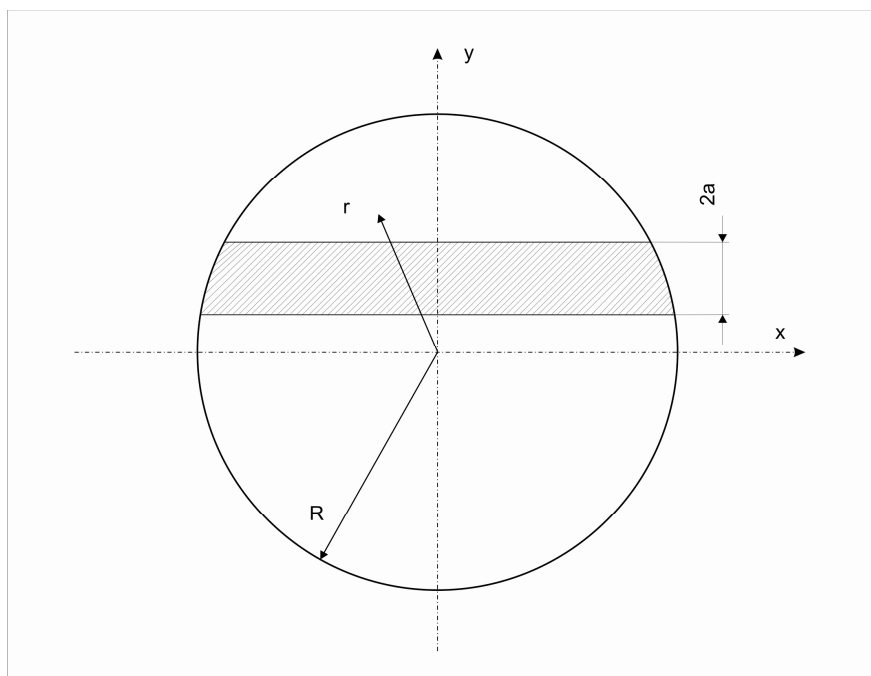
$$v_c = \frac{1}{A_c} \iint_{A_c} v dx dy \quad (6.10)$$

gdzie: x oraz y to współrzędne w czujniku.

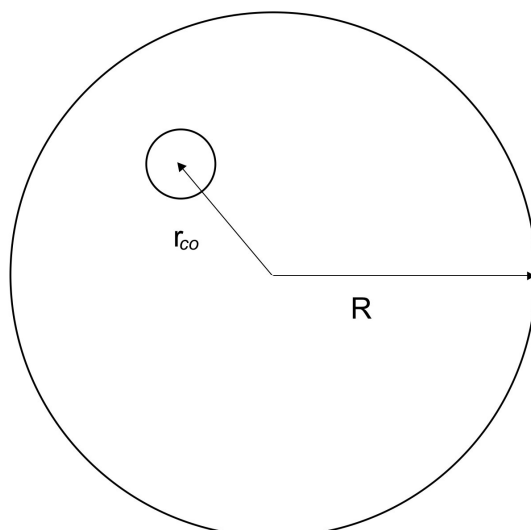
Schematy urządzenia pierwotnego jednowierzchniowego z czujnikiem przedstawiono na rys. 6.2, 6.3, 6.4.



Rys. 6.2. Urządzenie pierwotne jednowierzchniowe z czujnikiem o prostokątnej powierzchni czynnej o szerokości $2a$ i długości $2R$, gdzie: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ - promień bieżący, R - promień rurociągu.



Rys. 6.3. Urządzenie pierwotne jednowierzchniowe z czujnikiem o prostokątnej powierzchni czynnej o szerokości $2a$ i długości $\sqrt{R^2 - r_0^2}$ gdzie: R - promień rurociągu, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ - promień bieżący.



Rys.6.4. Urządzenie pierwotne jednopowierzchniowe z czujnikiem o powierzchni czynnej kołowej:
 R – promień wewnętrzny rurociągu, r_{co} - odległość środka czujnika od osi rurociągu.

Dla powyższych schematów czujników obliczono, przeanalizowano oraz dokonano zestawienia współczynników wzorcowania dla różnych modeli matematycznych opisujących rozkłady prędkości, uwzględniając również różne parametry we wzorach.

Przykładowe wzory na współczynnik wzorcowania wyprowadzone w pracy

- a) Współczynnik wzorcowania dla przepływu laminarnego opisanego wzorem (6.3) wyznaczony dla przepływomierza próbkującego z czujnikiem jednopowierzchniowym prostokątnym umieszczonym w średnicy rurociągu,

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{\frac{v_m}{2}}{v_m \left[\frac{2}{3} - \frac{a^2}{3R^2} \right]} = \frac{1}{\frac{4}{3} - \frac{2}{3} \left(\frac{a}{R} \right)^2} \quad (6.11)$$

- b) Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (6.4) dla $m = 12$ wyznaczony dla przepływomierza próbkującego z czujnikiem jednopowierzchniowym prostokątnym umieszczonym w średnicy rurociągu,

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{6}{7 \left[\frac{12}{13} - \frac{2}{11} \left(\frac{a}{R} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{a}{R} \right)^4 - \frac{20}{49} \left(\frac{a}{R} \right)^6 - \frac{1}{3} \left(\frac{a}{R} \right)^8 - \frac{2}{11} \left(\frac{a}{R} \right)^{10} - \frac{1}{13} \left(\frac{a}{R} \right)^{12} \right]} \quad (6.12)$$

- c) Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (6.5) dla $m = 12$ wyznaczony dla przepływomierza próbującego z czujnikiem jednopowierzchniowym prostokątnym umieszczonym w średnicy rurociągu

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{2(12+b) - 12b}{28 \left[\frac{12}{13} - \frac{10}{39}b - \frac{(5b+6)}{33} \left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{(1-b)}{3} \left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{20(1-b)}{49} \left(\frac{a}{R}\right)^6 - \frac{(1-b)}{3} \left(\frac{a}{R}\right)^8 - \frac{2(1-b)}{11} \left(\frac{a}{R}\right)^{10} - \frac{(1-b)}{13} \left(\frac{a}{R}\right)^{12} \right]} \quad (6.13)$$

- d) Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (6.4) dla $m = 12$ wyznaczony dla przepływomierza próbującego z czujnikiem jednopowierzchniowym prostokątnym umieszczonym w cięciwie rurociągu,

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{6}{7 \left[\frac{12}{13} - \frac{12}{143} \left(\frac{r_0}{R}\right)^2 - \frac{40}{429} \left(\frac{r_0}{R}\right)^4 - \frac{2240}{21021} \left(\frac{r_0}{R}\right)^6 - \frac{896}{7007} \left(\frac{r_0}{R}\right)^8 - \frac{3584}{21021} \left(\frac{r_0}{R}\right)^{10} - \frac{7168}{21021} \left(\frac{r_0}{R}\right)^{12} - \frac{2}{11} \left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{20}{49} \left(\frac{a}{R}\right)^6 - \frac{1}{3} \left(\frac{a}{R}\right)^8 - \frac{2}{11} \left(\frac{a}{R}\right)^{10} - \frac{1}{13} \left(\frac{a}{R}\right)^{12} - \frac{80}{33} \left(\frac{r_0^2 a^2}{R^4}\right) - \frac{4480}{1617} \left(\frac{r_0^4 a^2}{R^6}\right) - \frac{1792}{539} \left(\frac{r_0^6 a^2}{R^8}\right) - \frac{5943}{1617} \left(\frac{r_0^8 a^2}{R^{10}}\right) - \frac{14336}{1617} \left(\frac{r_0^{10} a^2}{R^{12}}\right) - \frac{1064}{147} \left(\frac{r_0^2 a^4}{R^6}\right) - \frac{3584}{147} \left(\frac{r_0^6 a^4}{R^{10}}\right) - \frac{7168}{147} \left(\frac{r_0^8 a^4}{R^{12}}\right) - \frac{798}{49} \left(\frac{r_0^4 a^4}{R^8}\right) - \frac{528}{49} \left(\frac{r_0^2 a^6}{R^8}\right) - \frac{1824}{49} \left(\frac{r_0^4 a^6}{R^{10}}\right) - \frac{28}{3} \left(\frac{r_0^2 a^8}{R^{10}}\right) - \frac{4096}{49} \left(\frac{r_0^6 a^6}{R^{12}}\right) - \frac{136}{3} \left(\frac{r_0^4 a^8}{R^{12}}\right) - \frac{64}{11} \left(\frac{r_0^2 a^{10}}{R^{12}}\right) \right]} \quad (6.14)$$

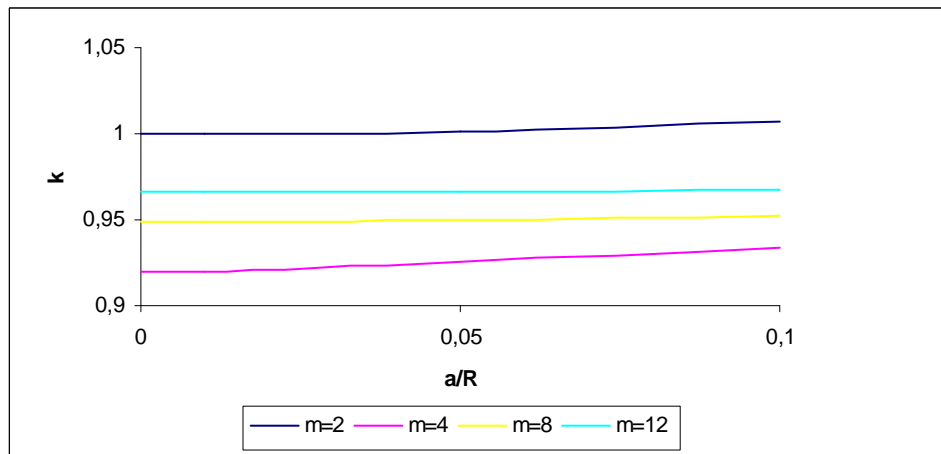
- e) Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (6.4) dla $m = 8$ wyznaczony dla przepływomierza próbującego z czujnikiem jednopowierzchniowym kołowym ,

$$v_c = v_m \left[1 - \left(\frac{r_{co}}{R}\right)^8 - \frac{8r_{co}^6 R_c^2}{R^8} - \frac{12r_{co}^4 R_c^4}{R^8} - \frac{4r_{co}^2 R_c^6}{R^8} - \frac{1}{5} \left(\frac{R_c}{R}\right)^8 \right] \quad (6.15)$$

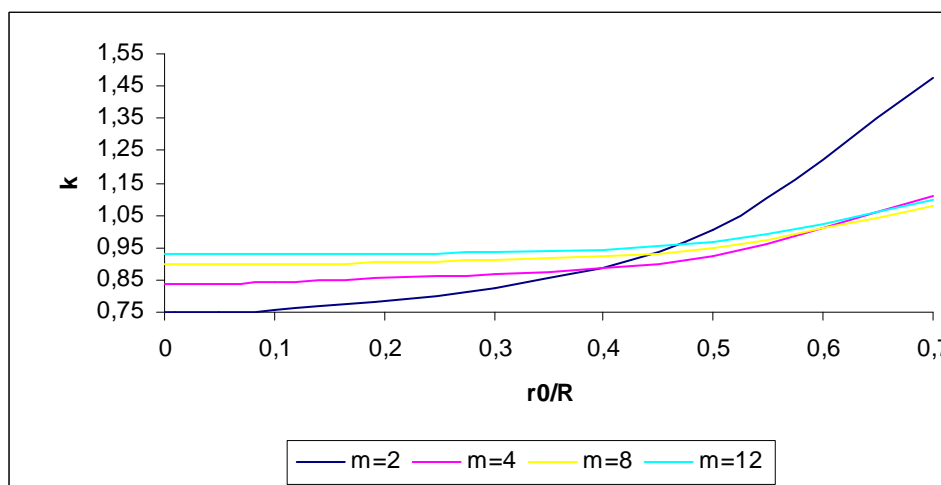
- f) Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (6.5) dla $m = 12$ wyznaczony dla przepływomierza próbującego z czujnikiem jednopowierzchniowym kołowym ,

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{2(12+b) - 12b}{28 \left[1 - b \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^2 - \frac{b}{2} \left(\frac{R_c}{R} \right) - (1-b) \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^{12} - \frac{(1-b)(18r_{co}^{10}R_c^2)}{R^{12}} - \frac{(1-b)(75r_{co}^8R_c^4)}{R^{12}} - \frac{(1-b)(100r_{co}^6R_c^6)}{R^{12}} - \frac{(1-b)(45r_{co}^4R_c^8)}{R^{12}} - \frac{(1-b)(6r_{co}^2R_c^{10})}{R^{12}} - \frac{(1-b)}{7} \left(\frac{R_c}{R} \right)^{12} \right]} \quad (6.16)$$

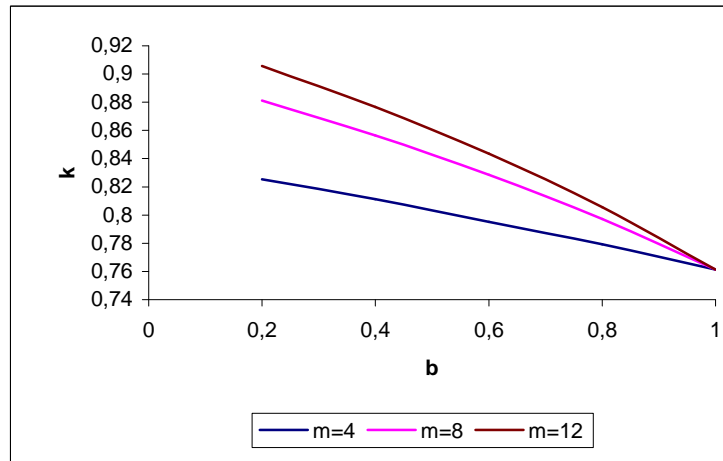
Przedstawiono bardzo obszerne zestawienia wyprowadzonych wzorów na współczynnik wzorcowania uwzględniających różne konfiguracje urządzeń pierwotnych przepływomierzy oraz różne parametry i charaktery przepływu. Tak obszerne zestawienie wzorów do tej pory w literaturze polskiej ani zagranicznej nie zostało zrobione i może być przyczynkiem do powstania normy dotyczącej przepływomierzy próbujących. Analizę rozmieszczenia czujnika w rurociągu zobrazowano tabelarycznie i na wykresach np.:



Rys. 6.5. Zależność współczynnika wzorcowania od powierzchni czynnej czujnika dla przepływu modelowanego wzorem (6.3) przy $r_0/R = 0,05$ (czujnik położony w cięciwie rurociągu)



Rys. 6.6. Zależność współczynnika wzorcowania od umiejscowienia czujnika dla przepływu modelowanego wzorem (6.3) przy $a/R = 0,05$.



Rys. 6.7. Zależność współczynnika wzorcowania od parametru b dla przepływu modelowanego wzorem (6.4) przy $a/R = 0,1$, $r_0/R = 0,1$.

7. Weryfikacja doświadczalna

Celem weryfikacji doświadczalnej jest sprawdzenie, czy wyznaczone współczynniki wzorcowania są wyznaczone prawidłowo oraz na ile różnią się od rzeczywistych współczynników wzorcowania. Etapem wstępnym do weryfikacji doświadczalnej jest w miarę możliwości sprawdzenie wyprowadzonych wzorów pod względem poprawności ich wyprowadzenia. Aby sprawdzić, czy wyznaczone na drodze teoretycznej współczynniki wzorcowania różnią się i o jaką wartość od rzeczywistych współczynników, potrzebna jest wiedza jaki model matematyczny wybrać do opisu rozkładu prędkości w rurociągu. W tym celu na stanowisku pomiarowym znajdującym się w laboratorium Instytutu Mechaniki Ciepłej i Mechaniki Płynów na Politechnice Wrocławskiej wykonano serię pomiarów anemometrem uwzględniając różne umieszczenia czujnika w stosunku do osi rurociągu. W ramach pracy doktorskiej dokonano porównano wyniki teoretycznych obliczeń w danymi doświadczalnymi dla 9 różnych wartości strumienia płynu.

W wzorze na współczynnik wzorcowania $k = \frac{v_{sr}}{v_c}$ średnią prędkość płynu po

przekroju przepływowym v_{sr} określono :

- a) Na podstawie pomiaru prędkości punktowych,
- b) Na podstawie pomiaru kryzą,

natomiast v_c jest średnią prędkością płynu w powierzchni czynnej czujnika.

W celu dogłębnej weryfikacji doświadczalnej dokonano pomiaru prędkości przepływomierzem próbującym z czujnikiem typu rurka Pitota. Pomiar rurką Pitota jest traktowany jako dodatkowe źródło sprawdzenia poprawności wyprowadzonych wzorów na współczynnik wzorcowania, dlatego pomiary są wykonane tylko dla 5 różnych strumieni objętości.

8. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono podstawowe wiadomości na temat przepływomierzy próbujących charakteryzujących się tym, że wielkość mierzona jest wyznaczana na podstawie prędkości miejscowych zmierzonych w przekroju przepływowym. Prędkość miejscowa w zależności od konstrukcji czujnika i stosunku jego wymiarów do wymiarów przewodu zamkniętego może być prędkością średnią w powierzchni czynnej czujnika, prędkością średnią w pewnym odcinku lub prędkością punktową. W pracy dokonano analizy właściwości metrologicznych przepływomierzy próbujących z czujnikami powierzchniowymi. Podczas analizy skupiono się na przepływomierzach z czujnikami jednopowierzchniowych o powierzchniach czynnych modelowanych prostokątem oraz kołem. Wielkość mierzona czyli strumień objętości jest wyznaczony jako iloczyn zmierzonej prędkości, współczynnika wzorcowania i pola powierzchni przekroju przepływowego. Współczynnik wzorcowania zależy od konstrukcji urządzenia pierwotnego przepływomierza próbującego. Wyprowadzenie wzorów na prędkość średnią w przekroju rurociągu oraz na prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika pozwoliło na dokładne określenie współczynnika wzorcowania. W pracy zostało wybranych kilka modeli matematycznych opisujących różne rozkłady prędkości. W wyniku przeprowadzonej analizy można wywnioskować iż kształt rozkładu prędkości ma duży wpływ na współczynnik wzorcowania. Również odległość czujnika od osi rurociągu, oraz rozmiary czujnika miały wpływ na współczynnik wzorcowania dla różnych rozkładów prędkości. Wyprowadzone wzory pozwalają na analizę wpływu zarówno rozmiarów czujnika, jego odległości od osi rurociągu oraz zmian wielkości mierzonej na błąd pomiaru strumienia objętości. Podczas analizy określono dla różnych rozkładów prędkości umiejscowienia czujników, przy których zmiany współczynnika wzorcowania są minimalne.

W rozdziale czwartym na podstawie analiz współczynników wzorcowania przeprowadzonych dla czujnika powierzchniowego modelowanego prostokątem wskazano takie położenie oraz rozmiar czujnika, dla którego współczynnik wzorcowania zmienia się w niewielkim zakresie.

Zmiany współczynnika wzorcowania są mniejsze wraz ze wzrostem stosunku powierzchni czynnej czujnika do powierzchni przekroju poprzecznego. Im większa odległość czujnika od średnicy rurociągu, tym zmiany współczynnika wzorcowania są większe. Na podstawie analiz teoretycznych można określić położenie czujnika wynoszące $r_0/R = 0,4$ dla, którego wartość współczynnika wzorcowania praktycznie nie zależy od rozmiarów czujnika.

W rozdziale piątym na podstawie analiz współczynników wzorcowania przeprowadzonych dla czujnika powierzchniowego modelowanego kołem wskazano takie położenie oraz rozmiar czujnika, dla którego współczynnik wzorcowania zmienia się w niewielkim zakresie. Przy R_c/R mniejszym od 0,4 wartość współczynnika wzorcowania nie zależy od średnicy czujnika dla przepływu turbulentnego. Zmiany stosunku promienia czujnika do promienia rurociągu oraz zmiany położenia czujnika w pobliżu osi rurociągu mają mały wpływ na zmiany współczynnika wzorcowania.

Oprócz właściwości metrologicznych przy doborze przepływomierza należy brać pod uwagę właściwości eksploatacyjne i koszty. W rzeczywistych aplikacjach ważnym aspektem jest odpowiedni dobór przepływomierza. Dlatego autor pracy podjął się próby opracowania metodyki doboru przepływomierzy próbkujących, dzieląc całą procedurę doboru na 5 zasadniczych etapów. Jest to metodyka, w której czasami trzeba iteracyjnie powrócić do poprzednich etapów. Metodyka ta może być stosowana do wszystkich przepływomierzy, jednak autor pracy zaproponował tę metodykę w szczególności dla przepływomierzy próbkujących z jednym czujnikiem powierzchniowym. Poprzez wyprowadzenie wzorów i dokonane w pracy analizy projektanci aplikacji z użyciem przepływomierza próbkującego będą w stanie znacznie ograniczyć błędy związane z konfiguracją urządzenia pierwotnego przepływomierza.

Z przeprowadzonej szerokiej weryfikacji doświadczalnej opisanej w rozdziale 7 można wskazać miejsce ($0,4 R - 0,7 R$), w którym najlepiej umiejscowić czujnik w rurociągu. Uzyskane wyniki badań teoretycznych potwierdzają się z doświadczalnymi. Dokonując takiego zestawienia i takiej analizy autor pracy

udowodnił postawioną tezę wykazując, że poprzez analizę modeli matematycznych urządzeń pierwotnych przepływomierzy próbkujących z czujnikami powierzchniowymi (jednopowierzchniowymi) istnieje możliwość opracowania zestawienia wzorów na współczynnik wzorcowania, które pozwala na określenie położenia czujnika, przy którym zmiany współczynnika wzorcowania są najmniejsze oraz możliwe jest określenie rozmiarów czujnika i odległości czujnika od osi rurociągu. Autorowi pracy udało się udowodnić postawioną tezę.

9. Publikacje autora pracy

[Kries2001] Krieser W.: Role of the sensors in the flowmeters, EuroXchange no.5, ISA, 2001.

[Kries2002] Krieser W.: Mathematical model of ultrasonic flowmeter, EuroXchange no.6, ISA, 2002.

[Kries2005] Krieser W.: Wyznaczanie współczynnika wzorcowania przepływomierzy próbkujących z czujnikami o prostokątnej powierzchni czynnej, Control Engineering nr 10, TMJ, 2005.

[Kries2005a] Krieser W.: Algorytmy wyznaczania strumienia objętości w przepływomierzach próbkujących. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Studia Informatica, nr 4(54), Volume 26, Gliwice 2005.

[Kries2006] Krieser W.: Wyznaczania współczynnika wzorcowania przepływomierzy próbkujących z czujnikami o powierzchni czynnej kołowej. Zeszyty Naukowe Politechnik Śląskiej, Automatyka z.146, Nr kol.1739, Gliwice 2006.

[JeleK2010] Jeleń P., Krieser W., Waluś S.: Badania laboratoryjne termoanemometru z czujnikiem powierzchniowym, Prace Komisji Naukowych, PAN, Oddział w Katowicach, Zeszyt nr 34, Katowice 2010 (zeszyt w przygotowaniu).

[JeziK2007] Jezierska A., Krieser W., Waluś S.: Dobór przepływomierza – zasady ruchu, Control Engineering Polska, maj 2007, str. 54-61.

[Kries2007] Krieser W.: Wyznaczania współczynnika wzorcowania przepływomierzy próbkujących z czujnikiem prostokątnym umieszczonym na cięciwie rurociągu. PAR 5/2007.

[Kries2008] Krieser W.: Positioning the sensor in sampling flowmeters. Metrology and Measurement Systems, Vol. XV, 1/2008, str. 85-90.

10. Literatura cytowana w rozprawie doktorskiej

- [**Ander1998**] Anderson N.A.: Instrumentation for Process measurement and Control. CRC Press, Boca Raton – Boston – London-New York – Waschingon, D.C., 1998.
- [**BajkM1993**] Bajkiewicz – Grabowska E., Magnuszewski A., Mikulski Z.,: Hydrometria, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [**Besto1980**] Bestobell Meterflow Limited - katalog firmowy, Baldok, England, 1980.
- [**BirdS1962**] Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N.: Transport phenomena, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, John Wiley & Sons, Inc., New York · London, 1962.
- [**Bloom2000**] Bloomer J.J.: Practical fluid mechanics for engineering application, Marcel Dekker, Inc., New York, Basel 2000.
- [**Brons1959**] Bronsztejn I., Siemiendajew K.: Matematyka. Poradnik encyklopedyczny, PWN, Warszawa 1959.
- [**Bukow1975**] Bukowski J.: Mechanika płynów, PWN, Warszawa 1975.
- [**Carlo1984**] De Carlo J.P.: Fundamentals of flow measurement, Instrument Society of America, Research Triangle Park, 1984.
- [**ChmiD2001**] Chmielniak T. J., Drobnik S.: Modelowanie przepływów turbulentnych, XL Sympozjum „Modelowanie w mechanice”, 19-23.02.2001, PTMTiS Oddział Gliwice, Komitet Mechaniki PAN, Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska w Gliwicach, Wiśła 2001, s. 49-51.
- [**Czesz2001**] Czeszyk G., : Badanie doświadczalne i modelowe uśredniających rurek spiętrzających, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2001.
- [**DaugF1977**] Daugherty R.L., Franzini J.B.: Fluid Mechanics With Engineering Applications, Mc Graw-Hill Book Company, New York 1977.
- [**Dąbro2007**] Dąbrowski T.: Weryfikacja doświadczalna modeli matematycznych obiektu pomiaru dla potrzeb pomiaru strumienia objętości w rurociągu, Instytut Automatyki, Praca dyplomowa magisterska, Gliwice 2007.
- [**Dobro1990**] Dobrowolski B.: Studium możliwości zastosowania zwęzek do pomiaru strumienia masy mieszanin gaz-ciecz, Polska Akademia Nauk, Oddział w Katowicach, Komisja Metrologii, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław 1990.

- [Erb1999]** Erb H. G.: Technika pomiarów przepływu wody i ścieków, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Szczecin 1999.
- [Fisch1959]** Fischbacher R.E.: The ultrasonic flowmeter, Transaction of the Society of Instrumentation Technology, 1959, vol.11, nr 2, s.114-119.
- [Flow1991]** Flow Measurement: practical guides for measurement and control, D.W. Spitzer; editor, ISA, Research Triangle Park, 1991.
- [Flow2004]** Flow Handbook. A Practical Guide: Measurement Technologies – Applications – Solutions, Endress+Hauser Flowtec AG, CH-4153 Reinach/BL, 2004.
- [FortM1993]** Fortuna Z., Macukow Z., Wąsowski J.,: Metody numeryczne, Wydanie trzecie, WNT, Warszawa 1993.
- [Graba1997]** Grabarczyk C.: Przepływy cieczy w przewodach. Metody obliczeniowe, Envirotech, Poznań 1997.
- [Gätke1986]** Gätke J.: Volumenstrommessung in geraden zylindrischen Rohren mit Hilfe akustischer Stromungsgeschwindigkeitsmesser, msr, Berlin, vol. 29, nr 4, 1986, s. 161-168.
- [Gilmo1996]** Gilmont R.: Velocity Profile of Turbulent Flow in Smooth Circular Pipes, Measurement & Control, June 1996, Issue 177, s.96-103.
- [Gonde1999]** Gondek A.: Analiza teoretyczno – doświadczalna pomiaru strumienia objętości płynu przy zastosowaniu sondy uśredniającej w przewodzie o przekroju prostokątnym, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Monografia 260, Kraków 1999.
- [Gonde2007]** Gondek A.: Wykorzystanie modeli rozkładu prędkości w przewodzie kołowym w pomiarach strumienia objętości, Pomiary Automatyka Robotyka, 7-8/2007.
- [Grybo1989]** Gryboś R.: Podstawy mechaniki płynów, PWN, Warszawa 1989.
- [HoopM1997]** Hooper J.D., Musgrove A. R.: Reynolds Stress, Mean Velocity, and Dynamic Static Pressure Measurement by a Four-Hole Pressure Probe, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 15, No. 4, November 1997, s. 375-383.
- [Inser1998]** Insertion flow meters, Models F-1110 and F-1210, Onicon INC., USA, 1998.
- [Instr2003]** Instrument Engineers' Handbook, Process Measurement and Analysis, Vol. I, Lipták B. G. Editor-in-chief, ISA - The Instrumentation, Systems, and

Automation Society, CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C. 2003.

[ISO4006] ISO 4006-1977, Measurement of fluid flow in closed conduits - Vocabulary and symbols.

[Janic1993] Janiczek R.: Pośrednie pomiary wielkości fizycznych, PAN, Oddział w Katowicach, Katowice 1993, ISBN 83-04-04191-X.

[JeziK2007] Jezińska A., Krieser W., Waluś S.: Dobór przepływomierza – zasady ruchu, Control Engineering Polska, maj 2007, str. 54-61.

[JeleK2010] Jeleń P., Krieser W., Waluś S.: Badania laboratoryjne termoanemometru z czujnikiem powierzchniowym, Prace Komisji Naukowych, PAN, Oddział w Katowicach, Zeszyt nr 34, Katowice 2010 (zeszyt w przygotowaniu).

[Jeleń2008] Jeleń P., Stanowisko laboratoryjne do pomiaru strumienia gazu za pomocą termoanemometru, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice 2008.

[Jędrasik 2001] Jędrasik P. : Badania modelowe wpływu zniekształconych rozkładów prędkości na błędy wybranych przepływomierzy próbkujących. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Gliwice 2001.

[Kabza1996] Kabza Z.: Pomiary strumieni płynów (Przewodnik), Studia i monografie z. 90, Politechnika Opolska, Opole 1996.

[KabzK1995] Kabza Z., Kostyrko K.: Metrologia przepływów, gęstości i lepkości, Studia i Monografie, z.87, Politechnika Opolska, Opole 1995.

[Kegel1991] Kegel T.M.: Insertion (Sampling) Flow Measurement, w: Flow Measurment. Editor: Spitzer D.W., Instrument Society of America, Research Triangle Park 1991.

[Klamk1998] Klamka J.: Metody numeryczne, Skrypt 2068, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.

[Kries2005] Krieser W.: Wyznaczanie współczynnika wzorcowania przepływomierzy próbkujących z czujnikami o prostokątnej powierzchni czynnej, Control Engineering nr 10, TMJ, 2005.

[Kries2005a] Krieser W.: Algorytmy wyznaczania strumienia objętości w przepływomierzach próbkujących. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Studia Informatica, nr 4(54), Volume 26, Gliwice 2005.

- [**Kries2006**] Krieser W.: Wyznaczania współczynnika wzorcowania przepływomierzy próbujących z czujnikami o powierzchni czynnej kołowej. Zeszyty Naukowe Politechnik Śląskiej, Automatyka z.146, Nr kol.1739, Gliwice 2006.
- [**Kries2007**] Krieser W.: Wyznaczania współczynnika wzorcowania przepływomierzy próbujących z czujnikiem prostokątnym umieszczonym na cięciwie rurociągu. Pomiary Automatyka Robotyka 5/2007.
- [**Kries2008**] Krieser W.: Positioning the sensor in sampling flowmeters. Metrology and Measurement Systems, 2008.
- [**Kopp1993**] Kopp J.G., Lomas D.J., Liptak B.G.: Turbine and the rotary element flowmeters, w: Flow Measurement, Editor – in – chief: Liptak B.G., Chilton Book Company, Rodner Pennsylvania, 1993, s.337 – 352.
- [**Kucyb2002**] Kucybała A.: Wybrać właściwy przepływomierz, Pomiary Automatyka Robotyka, 4/2002, s. 16- 18.
- [**Lechn1983**] Lechner H.: Ultrasonic flow metering based on transit time differentials which are insensitive to flow profiles, J. Acoust. Soc. Am., 74(3), September 1983, s. 955-959.
- [**Mała1989**] Mała Encyklopedia Metrologii, WNT, Warszawa 1989.
- [**Medlo1982**] Medlock R.S.: The techniques of flow measurement (Part 1), Measurement and Control, vol. 16, Jan. 1983, s. 9-13.
- [**Medlo1983**] Medlock R.S.: The techniques of flow measurement (Part 2), Measurement and Control, vol. 16, Jan. 1983, s. 9-13.
- [**Micha2004**] Michalski A.: Pomiary przepływu wody w kanałach otwartych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [**Międz1993**] Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii, Główny Urząd Miar, Warszawa 1993.
- [**Mill1989**] Miller R.W.: Flow measurement engineering handbook. McGraw-Hill, Inc. Second Edition, New York – St. Louis...1989.
- [**Miłek2006**] Miłek M.: Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2006.
- [**Multi1997**] Multi-MagTM Model 284 Insertable Electromagnetic Averaging Flowmeter, materiał firmy Marsh-McBirney, Inc., USA 1997.
- [**Obraz1983**] Obraz J.: Ultradźwięki w technice pomiarowej, WNT, Warszawa 1983.

- [Opie1988]** Opie R.: Looking back at flow theory, Control and Instrumentations, Feb. 1988, s. 39.
- [PistS2006]** Pistun E., Stańda J.: Pomiary ilości oraz strumienia masy i objętości przepływających płynów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
- [Podrę1990]** Podręcznik metrologii, Tom II. Podstawy praktyczne, Redaktor wydania polskiego J. Dudziewicz, WKiŁ, Warszawa 1990.
- [Poles2002]** Poleszczyk E.: Termometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości przepływu gazu, Rozprawy, Monografie 1, Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk, Kraków 2002.
- [Pomia1993]** Pomiary cieplne, cz. I. Podstawowe pomiary cieplne, Praca zbiorowa, WNT, Warszawa 1993.
- [Pomia1995]** Pomiar i rozliczanie ciepła, Przedsiębiorstwo Naukowo-Techniczne – CIBET Sp. z o.o. Warszawa i Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H. – VWEW, Frankfurt nad Menem, Zakład Poligraficzny „Graf”, Pruszków 1995.
- [Pospo2004]** Pospolita J.: Pomiar strumieni płynów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2004.
- [PN-81/M-42367]** PN-81/M-42367: Pomiary przepływu płynu. Pomiary strumienia objętości metodami całkowania bryły prędkości.
- [PN-EN24006]** PN-EN 24006: 1997 PN- ISO 4006 Pomiar strumienia płynu i objętości przepływającego płynu w przewodach. Terminologia i symbole.
- [PN-EN ISO 5167-1]** PN-EN ISO 5167-1 Pomiar strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych.
- [PN-M-42370]** PN-M-42370: 1998 Pomiar strumienia objętości płynu w przewodach. Przepływomierze ultradźwiękowe, Opracowali: J. Hruban, F. Strzelczyk, S. Waluś.
- [PN-ISO 11631]** PN-ISO 11631: 2001 Pomiar strumienia płynów. Metody określania właściwości przepływomierzy.
- [Romer1978]** Romer E.: Miernictwo przemysłowe, PWN, Warszawa 1978.
- [RothA1957]** Rothfus R.R., Archer D.H., Klimas I.C., Sikchi K.G.: Simplified Flow Calculations for Tubes and Parallel Plates, A.I.Ch.E. Journal, June 1957, Vol. 3, No 2, s. 208-212.

- [**Rózdź1998**] Rózdzyński K.: Miernictwo hydrologiczne, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 1998.
- [**Salam1972**] Salami L. A.: Errors in the velocity-area method of measuring asymmetric flow in circular pipes. Modern developments in flow measurement, P. Peregrinus, Harwell 1972, s. 381-400.
- [**Skibi1975**] Skibiński J.: Hydraulika, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1975.
- [**Spitz1993**] Spitzer D.W.: Industrial Flow Measurement, ISA, Research Triangle Park 1993.
- [**Stola1997**] Stolarski E: Czujniki elektroniczne, Polskie Towarzystwo Techniki Sensorowej, Warszawa 1997.
- [**Strze1993**] Strzelczyk F.: Metody i przyrządy w pomiarach ciepłno-energetycznych, Politechnika Łódzka, Łódź, 1993.
- [**SzebP1989**] Szebeszczyk J., Pietraszek S., Waluś S.: Model użytkowy przepływomierza ultradźwiękowego do bezzakłócenowego pomiaru przepływu cieczy jednorodnych w rurociągach, Metrologia i Systemy Pomiarowe, 4/1989, s. 85-102.
- [**SzebP1991**] Szebeszczyk J., Pietraszek S.: Clamp-on Ultrasonic Flowmeter for Homogeneous Liquids, msr, Berlin 34 (1991) 5, s. 208-211.
- [**SzebW1986**] Szebeszczyk J., Waluś S.: The Possibility of using of microprocessor in the ultrasonic flowmeters, 4 Fachtagung, Anwendung von Mikrorechnern in der Mess- und Automatisierungstechnik, 11 und 12 September 1986, Magdeburg, s. 84-87.
- [**Stroh1986**] Strohrmann G.: atp-Marktanalyse Durchflussmesstechnik, Automatisierungstechnische Praxis, 28 Jahr., Heft4, 1986.
- [**Stroh1994**] Strohrmann G., atp-Marktanalyse Durchfluss- und Mengenmesstechnik (Teil 2), Automatisierungstechnische Praxis 36, 8/1994, s. 38-55.
- [**Teori1981**] Teoria pomiarów, Praca zbiorowa pod redakcją H. Szydłowskiego, PWN, Warszawa 1981.
- [**Taler2006**] Taler D.: Pomiar ciśnienia, prędkości i strumienia przepływu płynu, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Kraków 2006.
- [**Tinha1988**] Tinham B.: Is flow technology still its infancy? Control and Instrumentations, Feb. 1988, s. 45-52.

- [**Tasch1982**] Taschenbuch Betriebsmesstechnik, 2. stark bearbeitete Auflage, VEB Verlag Technik Berlin 1982.
- [**Trosk1955**] Troskoleński A.T.: Hydraulika. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1955.
- [**Trosk1967**] Troskoleński A.T. : Hydromechanika. WNT, Warszawa 1967.
- [**Turko1987**] Turkowski M.: Pomiary przepływów, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1987.
- [**Turko2003**] Turkowski M.: Optymalizacja właściwości metrologicznych oraz rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych przepływomierzy z oscylatorem mechanicznym, Prace Naukowe, Mechanika, z. 199, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [**VDI/1994**] VDI/VDE 2642, Ultraschall – Durchflussmessung von Fluiden in voll durchströmten Rohrleitungen, Dezember 1994.
- [**Waluś1980**] Waluś S.: Wyznaczanie własności metrologicznych przepływomierzy ultradźwiękowych na podstawie modelu matematycznego. Praca doktorska (promotor: J. Piotrowski), Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej, Gliwice 1980.
- [**Waluś1986**] Waluś S.: Pomiar strumienia objętości w rurociągu niepełnym przepływomierzem ultradźwiękowym z równoczesnym pomiarem poziomym. VII Krajowa Konferencja Metrologii i Budowy Aparatury Pomiarowej, Wrocław, 9-11 X 1986, Prace Naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, seria: Konferencje 12, s. 92-95.
- [**Waluś1990**] Waluś S.: Ultradźwiękowe pomiary strumienia objętości wody w rurociągach i w kanałach otwartych, Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe Nr 1075, Automatyka z. 99, Gliwice 1990.
- [**Waluś1996a**] Waluś S.: The Mathematical Modelling of the Velocity Distribution in Closed Conduits, Proceedings of FLOMEKO'96, 1996, Beijing, China, Edited by Zhang Bayou, Han Lide, Zhao Xiaona, Beijing 1996, s. 474-479.
- [**Waluś1996b**] Waluś S.: Pomiary wielkości nieelektrycznych, w: Poradnik Inżyniera Elektryka, T. 1. Rozdz. 9.10, WNT, Warszawa 1996, s. 492-501.
- [**Waluś1997**] Waluś S. : Przepływomierze ultradźwiękowe. Metodyka stosowania,

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.

[Waluś1998] Waluś S. : Błędy metody przepływomierzy próbkujących, Podstawowe problemy Metrologii, Ustroń, 6-8 maja 1998, PAN, Oddział w Katowicach, Prace Komisji Metrologii PAN, Seria: Konferencje Nr 1, Gliwice- Ustroń 1998, s. 129-138.

[Waluś1999a] Waluś S.: Optymalizacja pomiaru strumienia objętości płynu przepływomierzami próbkującymi. XXXI Międzynarodowa konferencja Metrologów, Białystok, 7-10 września 1999, Patronat Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN, Politechnika Białostocka, Białystok 1999.

[Waluś1999b] Waluś S.: Pośredni pomiar strumienia płynu metodą próbkującą. Metrologia i Probiernictwo, 1999 nr 4.

[Waluś2000] Waluś S.: Mathematical Modelling of Sampling Flowmeters, XVI IMEKO World Congress, Sept. 25-29, 2000, Vienna, Austria, Proceedings, Volume VI, pp. 115-120. Editors: M.N. Durkbasu, P.H. Osana, A. Afjehi-Sadat, Austrian Society of Measurement and Automation, 2000.

[Waluś2001] Waluś S.: Błędy metody powierzchniowego pomiaru prędkości miejscowej w przepływomierzach próbkujących, Krajowy Kongres Metrologii 2001, Metrologia u progu Trzeciego Millenium, Warszawa 24-27 VI 2001, Materiały Kongresu Tom II, s. 657-660.

[Waluś2002] Waluś S.: Poprawa właściwości metrologicznych przepływomierza próbkującego z czujnikiem turbinowym, Joint IMEKO TC-1 & XXXIV MKM Conference 2002, Kształcenie w zakresie metrologii w obliczu wyzwań nowych technologii, Wrocław, 8-12 września 2002, Vol. II. Materiały MKM, Politechnika Wroclawska, str. 301-308.

[Waluś2003] Waluś S. : Optymalizacja metrologiczna pomiaru strumienia płynu za pomocą przepływomierz próbkujących, Monografia 43, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.

[Waluś2004] Waluś S.: Dobór przepływomierza, Rynek Chemiczny, 5/2004, s. 20-21.

[Waluś1994] Waluś S., Żeleźnik J.: Błąd systematyczny pomiaru przepływu związany z wyznaczeniem bryły prędkości, XXVI MKM, Opole 1994, Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu, Nr 203, Elektryka z. 40, Metrologia Tom 1, str.229-236.

[**Waluż1999**] Waluś S., Żelezik J.: Volume Flow-rate Measurement with Help of Sampling Flowmeter with Surface Sensor, Molecular & Quantum Acoustics, vol. 20, Oddział Górnośląski PTA, Instytut Fizyki Politechniki Śląskiej, Sekcja Akustyki Molekularnej i Kwantowej PTA, Sekcja Akustyki Fizycznej Komitetu Akustyki PAN, Gliwice 1999, s. 291-300.

[**Waluż2000**] Waluś S., Żelezik J.: Błędy metody uśredniających rurek spiętrzających związane z powierzchniowym odbiorem ciśnienia dynamicznego, XXXII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów, Rzeszów-Jawor, 11-15 IX 2000, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2000, s. 583-588.

[**Wyraż1999**] Wyrażenie niepewności pomiaru. Przewodnik, Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.

[**Zator1997**] Zator S.: Korelacyjny pomiar strumieni objętości płynów, PAN Oddział w Katowicach, Komisja Metrologii, Wydawnictwo Szumacher, Kielce 1997.