Politechnika Śląska Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki Instytut Automatyki

ROZPRAWA DOKTORSKA

Analiza właściwości metrologicznych przepływomierzy próbkujących z czujnikami powierzchniowymi

mgr inż. Witold Krieser

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

Gliwice 2010

<u>Spis treści</u>:

Symbole	4
1.Wprowadzenie	6
2. Analiza zagadnienia oraz teza pracy	8
2.1. Zjawisko przepływu płynu w przewodach zamkniętych	8
2.2. Pomiar strumienia płynu za pomocą przepływomierzy próbkujących	10
2.2.1. Podział metod pomiaru strumienia płynu	10
2.2.2. Czujniki stosowane w przepływomierzach próbkujących	12
2.2.3. Schemat pomiaru przepływomierzem próbkującym	13
2.2.4. Obliczanie strumienia objętości	14
2.3. Właściwości metrologiczne	16
2.4. Zakres pracy	18
2.5. Teza pracy	20
3. Modele matematyczne rozkładu prędkości w przewodach zamkniętych o	
kołowym przekroju poprzecznym	21
3.1. Normalne warunki przepływu i normalne warunki stosowania	
przepływomierzy próbkujących	21
3.2. Modele matematyczne rozkładów prędkości w warunkach	
normalnych	21
3.2.1. Przepływ laminarny	22
3.2.2. Przepływ turbulentny	23
3.2.2.1. Wzór uniwersalny	23
3.2.2.2. Wzór trójskładnikowy	24
3.2.2.3. Wzór potęgowy Prandtla	26
3.2.3. Przepływ przejściowy	28
3.3. Modele matematyczne rozkładów prędkości w warunkach	
odbiegających od normalnych	29
4. Analiza metrologiczna przepływomierzy próbkujących z czujnikami	
powierzchniowymi o powierzchni prostokątnej	31
4.1. Wyznaczenie współczynnika wzorcowania dla osiowosymetrycznyc	h
rozkładów prędkości w warunkach normalnych	31
4.1.1. Czujnik powierzchniowy umieszczony w średnicy rurociągu	32
4.1.1.1. Współczynnik wzorcowania dla przepływu laminarnego)
opisanego wzorem (3.1)	33
4.1.1.2. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentneg	30
opisanego wzorem (3.2)	34
4.1.1.3. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentne	go
opisanego wzorem (3.3)	38
4.1.2. Czujnik powierzchniowy umieszczony w cięciwie rurociągu	44
4.1.2.1. Współczynnik wzorcowania dla przepływu laminarnego)
opisanego wzorem (3.1)	45
4.1.2.2. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentneg	30
opisanego wzorem (3.2)	46
4.1.2.3. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentneg	gO
opisanego wzorem (3.3)	51
-	

4.1.3. Podsumowanie	57
4.2. Wyznaczanie współczynnika wzorcowania dla osiowosymetryczny	/ch
rozkładów prędkości w warunkach odbiegających od normalnych	61
4.2.1. Czujnik powierzchniowy umieszczony w średnicy rurociągu	61
4.2.2. Czujnik powierzchniowy umieszczony w cięciwie rurociagu	64
5. Analiza metrologiczna przepływomierzy próbkujących z czujnikami	
powierzchniowymi o powierzchni kołowej	69
5.1. Współczynnik wzorcowania dla przepływu laminarnego	0,7
opisanego wzorem (3.1)	70
5.2. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego	, 0
onisanego wzorem (3.2)	72
5.3 Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego	12
onisanego wzorem (3.3)	75
5 A Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego	15
5.4. w spore zymmk wzoreowalna dra przeprywu turbulentnego opisanego wzorem (3.4)	80
5 5 Podeumowanie	80
5.6 Wyznaczanie współczynnika wzorcowania dla osiowosymetryczny	o_{2}
5.0. Wyznaczanie wsporczynnika wzorcowania dla osłowosynieli yczny rozlitadów prodkości w wspunkach odbiogojących od pormalnych	ν 07
6 A snakt prektuezny metodyke dohory przepływomierze próblyjegogo	07
 O. Aspekt praktyczny – metodyka doboru przeprywonnerza probkującego 7. Wawfikacja doświadazalna 	92
7. 1. Sprawdzenie poprawneści wwprowedzenych wzerów korzystejec	95
7.1. Sprawuzeme poprawności wyprowadzonych wzorów korzystając	05
z sytuacji granicznych	95
7.2. Metodyka weryfikacji doświadczalnej	96
7.3. Stanowisko pomiarowe z czujnikiem powierzchniowym	9/
7.4. Wyniki pomiarow przy zastosowaniu anemometru	100
7.5. Analiza wynikow uzyskanych przy pomiarze anemometrem	109
7.6. Wyniki pomiarów przy zastosowaniu rurki Pitota	116
7.7. Analiza wyników uzyskanych przy pomiarze rurką Pitota	122
7.8. Budżet niepewności	127
7.8.1. Obliczanie niepewności prędkości metodą pierścieni dla	
anemometru	127
7.8.2. Obliczanie niepewności prędkości dla zwężki	130
8. Podsumowanie i wnioski końcowe	135
9. Literatura	138
Załącznik 1	147
Załącznik 2	150

Symbole

а	Połowa szerokości czujnika o przekroju modelowanym
	prostokątem [m] (rys 4.1)
A	Pole powierzchni przekroju przepływowego [m ²] (wzór 2.1)
$A_{ m c}$	Powierzchnia czynna czujnika [m ²] (wzór 4.2)
d	Średnica otworu zwężki [m] (wzór z.2.1)
С	Współczynnik przepływu (wzór 7.18)
D	Średnica wewnętrzna rurociągu [m] (wzór 2.3)
h	Stała (wzór 3.10)
k	Współczynnik wzorcowania (wzór 2.4)
k _d	Wartość doświadczalna współczynnika wzorcowania (pkt. 7.2)
<i>k</i> _o	Obliczona wartość współczynnika wzorcowania (pkt. 7.2)
k_{α}	Współczynnik rozszerzenia (wzór. 7.1)
k_n	Wartość nominalna współczynnika wzorcowania (wzór 4.32)
т	Wykładnik potęgowy (wzór 3.2)
Ν	Nadajnik (rys. 2.5)
1/ <i>n</i>	Wykładnik potęgowy zależny od liczby Reynoldsa i chropowatości
	rurociągu (wzór 3.4)
0	Odbiornik (rys. 2.5)
P_1	Ciśnienie bezwzględne [Pa] (wzór z.2.4)
r	Odległość punktu w przekroju przepływowym od osi rurociągu [m]
	(wzór 3.1)
r _{co}	Odległość środka czujnika od osi rurociągu [m] (rys. 5.1)
r_o	Odległość osi czujnika prostokątnego od średnicy rurociągu [m]
	(rys. 4.5)
r_c	Odległość punktu w czujniku od osi czujnika [m] (rys. 5.1)
R	Promień wewnętrzny rurociągu [m] (rys. 2.1)
R_c	Promień czujnika o przekroju kołowy [m] (rys. 5.2)
Re	Liczba Reynoldsa (wzór 2.3)

$q_{_{v}}$	Strumień objętości [m ³ /s] (wzór 2.1)
q	Wielkość mierzona (strumień płynu) [m ³ /s] lub [kg/s] (rys. 2.6)
q_v	Strumień objętości [m ³ /s] (wzór 2.1)
<i>q</i> '	Odtworzona wartość wielkości mierzonej [m ³ /s] (rys. 2.6)
q_{vn}	Wartość nominalna strumienia objętości [m ³ /s] (wzór 4.33)
q_{vrz}	Wartość rzeczywista strumienia objętości [m ³ /s] (wzór 4.35)
v	Prędkość płynu [m/s] (rys. 2.6)
V _c	Średnia prędkość płynu w powierzchni czynnej czujnika [m/s]
	(wzór 2.4)
V śr	Prędkość średnia po przekroju przepływowym [m/s] (wzór 2.1)
v_m	Prędkość w osi rurociągu [m/s] (wzór 3.1)
$v_1(r)$	Składowa niezniekształcona [m/s] (wzór 3.9)
$v_2(r, \vartheta)$	Składowa zniekształcona [m/s] (wzór 3.9)
x	Położenie czujnika ustalane za pomocą sondy [m] (rys. 2.6)
X	Wielkość wejściowa przetwornika pomiarowego (rys. 2.6)
Y	Wielkość wejściowa przetwornika wtórnego (rys. 2.6)
U	Niepewność standardowa rozszerzona (wzór 7.1)
\mathcal{U}_{x_i}	Niepewność standardowa danej zmiennej (wzór 7.2)
U_{A}	Niepewność standardowa rozszerzona (wzór 7.5)
u _c	Niepewność standardowa złożona (wzór 7.1)
<i>u</i> _d	Niepewność standardowa średnicy otworu kryzy (wzór 7.20)
$u_{\Delta h_{zw}}$	Niepewność różnicy wysokości słupków wody (wzór 7.20)
$ ho_{_{H_2O}}$	Gęstość wody (wzór 7.18)
$ ho_{_{p}}$	Gęstość powierza (wzór 7.18)
ε	Liczba ekspansji (wzór 7.18)
Δp	Różnica ciśnień na kryzie (wzór 7.19)

1. Wprowadzenie

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 jaki 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 poradniku [Flow1991 s.3] autorzy zwrócili uwagę na to, że strumień płynu powinien być mierzony jak najdokładniej i podają nie tylko powody technologiczne i ekonomiczne, ale i względy ochrony środowiska oraz uczciwości. Biorąc pod uwagę książki poświęcone pomiarom (podręczniki, poradniki) zawsze kilka - kilkanaście procent treści jest poświęconej pomiarom parametrów charakteryzujących przepływ [Ander1998, Instr2003, Miłek2006, Podrę1990, Pomia1993, Romer1978, Stola1997, Strze1993, Tasch1982]. Obecnie są wydawane książki poświęcone tylko przepływomierzom [Carlo1984, Erb1999, Flow1991, Kabza1996, Mille1989, PistS 2006, Pospo2004, Spitz1993, Taler2006, Turko1987] lub określonej dziedzinie zastosowań przepływomierzy [BajkM1993, Różdź1998, Micha2004].

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. Ważnym elementem przy projektowaniu systemu pomiarowego z użyciem przepływomierzy jest znajomość zjawisk zachodzących podczas przepływu medium.

Ponieważ pomiary strumienia płynu dotyczą przeważnie stanu ustalonego, w pracy nie będą brane pod uwagę zagadnienia związane z dynamiką płynu. Praca ma na celu wstępną analizę właściwości metrologicznych przepływomierzy próbkujących z czujnikami powierzchniowymi.

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 znajomości modelu matematycznego rozkładu prędkości w przewodzie zamkniętym. Istnieje wiele modeli matematycznych rozkładu prędkości różniących się znacznie postacią funkcji. W literaturze zwrócono uwagę na potrzebę dalszych badań w zakresie tego zagadnienia [Stroh1994]. Od dokładności przyjętego modelu matematycznego rozkładu prędkości zależy dokładność wyznaczenia modelu matematycznego urzadzenia pierwotnego przepływomierza próbkującego. Stąd istotnym zagadnieniem jest weryfikacja modeli matematycznych rozkładów prędkości.

Analiza metrologiczna zostanie przeprowadzona poprzez obliczanie współczynników wzorcowania dla różnych rozkładów prędkości oraz różnych konfiguracji urządzenia pierwotnego przepływomierza próbkującego. Obliczenia te pozwalają na najlepszy dobór położenia czujnika przepływomierza w przekroju pomiarowym oraz na przeprowadzenie analizy błędów w różnorodnych warunkach pomiaru. W literaturze można spotkać współczynniki wzorcowania dla wybranych konkretnych czujników i sytuacji pomiarowych, natomiast zagadnienie nie zostało wyczerpane na tyle, aby podane wyniki analizy teoretycznej mogły być zastosowane w prawie każdym przypadku praktycznym [Carlo1984, Flow1991, Flow2004, Różdż1998, Spitz1993].

W pracy zostanie dokonane zestawienie współczynników wzorcowania dla różnych rozkładów prędkości. W literaturze zarówno polskiej jak i zagranicznej nie pojawiło się tak obszerne i szerokie zestawienie związane z tą grupą przepływomierzy.

2. Analiza zagadnienia oraz teza pracy

2.1. Zjawisko przepływu płynu w przewodach zamkniętych

Zjawisko przepływu medium w przewodzie jest złożonym procesem zmiany położenia cząstek w czasie. Przewód, w którym przepływa medium może być otwarty (np. rzeki, kanały), jak i zamknięty (np. rurociąg). W rozprawie doktorskiej właściwości metrologiczne zostały przeanalizowane dla przepływomierzy pracujących w przewodach zamkniętych. W przypadku teoretycznego, idealnego płynu o zerowej lepkości jego cząstki w obrębie całego przekroju przepływowego poruszają się ze stałą prędkością [Kegel1991]. Przepływ taki jest zwany przepływem tłokowym i na rysunku 2.1. przedstawiono profil prędkości.



Rys. 2.1. Profil prędkości dla płynu idealnego: *v* – prędkość, *R* - promień wewnętrzny rurociągu.

Prędkość w każdym punkcie przekroju przepływowego jest taka sama (równa prędkości średniej). Aby wyznaczyć strumień objętości wystarczy zmierzyć prędkość płynu w dowolnym punkcie przekroju przepływowego przy równoczesnej znajomości powierzchni pola przepływowego. Strumień objętości wyznacza się korzystając z wzoru:

$$q_v = A \cdot v_{sr} \tag{2.1}$$

gdzie: A - pole powierzchni przekroju przepływowego, v_{sr} - prędkość średnia po przekroju przepływowym.

W rzeczywistości płyny charakteryzują się pewną lepkością, która powoduje powstanie zjawiska tarcia pomiędzy ściankami rurociągu (siły adhezyjne) a przepływającym płynem oraz między samymi jego cząstkami (siły kohezyjne) [Trosk1967]. Powoduje to, iż rozkład prędkości przyjmuje wówczas kształt rzeczywisty znacznie odbiegający od idealnego, co zostało przedstawione na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Profil prędkości dla płynu rzeczywistego: *v* – prędkość, *R* - promień wewnętrzny rurociągu.

Ogólnie strumień objętości w przekroju przepływowym jest równy [Spitz1993]:

$$q_{v} = \int_{A} v dA \tag{2.2}$$

gdzie: v – funkcja opisująca rozkład prędkości.

W zależności od stosunku sił tarcia do sił bezwładności wyróżnia się trzy rodzaje przepływów [Erb1999, PN-EN24006, Waluś1997]: laminarny (uwarstwiony), turbulentny (burzliwy), przejściowy (krytyczny). Stosunek ten wyrażony jest liczbą Reynoldsa:

$$Re = \frac{v_{\dot{s}r} \cdot D}{v} \tag{2.3}$$

gdzie: v - współczynnik lepkości kinematycznej, D - średnica wewnętrzna rurociągu.

Przepływ o liczbie Reynoldsa mniejszej niż 2320 jest uważany za przepływ laminarny [Graba1997 s.32, Skibi1975 s.66]. Inni autorzy podają wartość 2000 [BirdS 1962, Flow1991 s.57, Trosk1955]. Przepływ o liczbie Reynoldsa większej niż 3000 do 10000 uważany jest za turbulentny, przy czym w literaturze można spotkać różne wartości dla tej granicy [Bloom2000 s.146, Flow1991 s. 425, ISO4006, Spitz1993 s. 331, Kegel1991]. Gdy liczba Reynoldsa jest większa od wartości, dla której występuje jeszcze przepływ uwarstwiony, a mniejsza od wartości, dla której przepływ nie jest jeszcze w pełni rozwiniętym przepływem burzliwym to taki przepływ nazywamy przepływem przejściowym [Graba1997 s.34].

2.2. Pomiar strumienia objętości za pomocą 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] lub w wielu odcinkach [Instr2003, Waluś1997] w przekroju przepływowym. Sens stosowania przepływomierzy próbkujących przedstawiono w [Flow2004]. Główne przyczyny ich stosowania to: mniejszy koszty niż całoprzewodowych przy zapewnieniu wystarczającej dokładności pomiaru, niewielka ingerencja w strugę płynu, możliwość instalowania na rurociągu będącym pod ciśnieniem, możliwość pomiaru w wielu punktach poprzez przenoszenie czujnika prędkości. Problematykę optymalizacji przepływomierzy próbkujących przedstawiono w [Waluś1999a, Waluś2003]. Przepływomierze próbkujące są również nazywane zanurzeniowymi (wprowadzanymi) [Kegel1991, Kopp1993, Mille1989, Spitz1993]. Nazwa zanurzeniowy (ang. insertion) odnosi się do sposobu wprowadzania czujnika predkości do przekroju przepływowego, natomiast w przepływomierzu próbkującym czujnik lub czujniki mogą być zanurzone w płynie, ale również mogą być umieszczone na zewnątrz przewodu, jak to ma miejsce w przepływomierzu ultradźwiękowym [Waluś1997].

2.2.1. Podział metod pomiaru strumienia płynu

Istnieje wiele różnych typów przepływomierzy działających na różnych zasadach pomiaru opartych na różnorodnych zjawiskach fizycznych [Romer1978]. W literaturze dotyczącej pomiarów dzieli się je najczęściej według zasad działania [Mała1989, Strze1993, Turko1987, Waluś1996b]. Dla użytkownika przepływomierza mniej ważna jest zasada pomiaru, a bardziej istotny jest sposób instalowania, metoda uzyskania wyniku pomiaru oraz właściwości eksploatacyjne. Dlatego na rysunku 2.3 przedstawiono podział metod pomiaru strumienia płynu ze względu na sposób pomiaru [Waluś 2003]. Pomiar przepływu płynu przepływomierzem próbkującym jest pomiarem pośrednim [Janic1993].



Rys. 2.3. Podział metod pomiaru strumienia płynu za pomocą przepływomierzy próbkujących.

Metoda wprowadzana polega na tym, iż czujnik do pomiaru prędkości lokalnej umieszczony jest wewnątrz przewodu (rurociągu) i może być wprowadzany za pomocą odpowiedniej sondy. Przykładem czujnika takiego typu może być np. uśredniająca rurka spiętrzająca [Gonde1999, Pospo2004] lub sonda turbinowa [Besto1980, Inser1998, Waluś2002].

W bezkontaktowej metodzie pomiaru prędkości czujnik mierzący prędkość miejscową umieszczony jest na zewnątrz przewodu np. w przepływomierzu ultradźwiękowym z nakładanymi głowicami [SzebP1989, SzebP1991, SzebW1986].

Przedmiotem zainteresowania autora tej pracy jest pomiar metodą próbkującą z czujnikami powierzchniowymi. Ze względu na czujniki powierzchniowe można dokonać jeszcze bardziej precyzyjnego podziału, ponieważ pomiar prędkości średniej może się odbywać w wyodrębnionej powierzchni pola przepływowego jak również w wielu wyodrębnionych powierzchniach [Waluś1999b, WaluŻ2000].

2.2.2. Czujniki stosowane w przepływomierzach próbkujących

Jako powierzchniowe są stosowane często czujniki turbinowe [Besto1980, Inser1998, Pospo2004], ultradźwiękowe [Erb1999], dynamometryczne (z tarczą naporową) [Spitz1993] i ostatnio elektromagnetyczne [Multi1997]. Schematy tych czujników przedstawiono na rys. 2.4. 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. 2.4. Schematy budowy czujników powierzchniowych: a) turbinowy, b) ultradźwiękowy, c) dynamometryczny, d) elektromagnetyczny.

Czujniki powierzchniowe mogą mieć również powierzchnię czynną przybliżoną do prostokąta. Czujnik o przekroju czynnym prostokątnym jest modelem czujnika ultradźwiękowego z drogą umieszczoną w średnicy. Zwykle wiązkę traktuje się jako wąską i takie założenie było przyjęte w [Waluś1990]. Gdy stosunek szerokości (średnicy w przypadku przetwornika piezoelektrycznego kołowego) wiązki do średnicy rurociągu jest znaczący to wiązkę należy traktować jako szeroką. Taka sytuacja występuje w przepływomierzu ultradźwiękowym z wiązką unoszoną [Fisch1959, Medlo1983, Waluś1990 s.17]. Przepływomierz do pomiaru strumienia objętości gazu metodą unoszenia strugi pomocniczej został opisany w [Spitz1993 s.356] i krótko w [Waluś2003 s.199], a czujnik przedstawiono na rys. 2.5d).



Rys. 2.5. Schematy budowy czujników powierzchniowych o powierzchni czynnej prostokątnej: a) ultradźwiękowy ze zmianą prędkości fali ultradźwiękowej, b) ultradźwiękowy z unoszeniem fali ultradźwiękowej, c) ultradźwiękowy z skorelowaniem szumów, d) z unoszeniem strugi pomocniczej.

2.2.3. 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. W [Mała1989] przedstawiono ogólny schemat pomiaru strumienia płynu. Schemat blokowy pomiaru przepływomierzem próbkującym przedstawiony jest na rys. 2.6 [Waluś2003 s.31].



Rys. 2.6. Schemat pomiaru przepływomierzem próbkującym: 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. 2.6 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).

2.2.4. Obliczanie strumienia objętości

Charakterystyczną cechą przepływomierzy próbkujących jest przekazywanie przez czujnik (lub czujniki), umieszczony w wybranym miejscu (rozmieszczone 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:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_c} \tag{2.4}$$

gdzie: v_{sr} - 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. 2.7.



Rys. 2.7. Schemat wyznaczania strumienia objętości płynu metodą próbkującą.

Na podstawie wyznaczonej prędkości średniej płynu w powierzchni czynnej czujnika (powierzchniowy pomiar prędkości) v_c oblicza się (mnożąc przez wartość współczynnika wzorcowania) średnią prędkość płynu po przekroju przepływowym [Kries2005a]. Następnie mnożąc tą prędkość przez wartość pola powierzchni przekroju przepływowego otrzymuje się strumień objętości przepływającego medium. Sygnał 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.

Do odtwarzania wielkości mierzonej, to znaczy strumienia objętości istotna jest znajomość pola powierzchni przekroju przepływowego i modelu matematycznego urządzenia pierwotnego. Model matematyczny pozwala ustalić zależność pomiędzy mierzoną prędkością a strumieniem płynu. Model matematyczny urządzenia pierwotnego zależy od modelu matematycznego rozkładu prędkości i stanowi podstawę wyznaczania wartości współczynnika wzorcowania. Strumień objętości w przepływomierzu próbkującym z jednym czujnikiem prędkości miejscowej jest obliczany zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2.7 według wzoru:

$$q_{v} = v_{c} \cdot k \cdot A. \tag{2.5}$$

2.3. Właściwości metrologiczne

Podczas korzystania z przepływomierza istotną rzeczą jest znajomość jego właściwości metrologicznych. W literaturze można spotkać wiele różnych, choć podobnych zestawów czynników, jakie należy brać pod uwagę przy projektowaniu punktu pomiarowego i doborze czujników prędkości przepływomierzy próbkujących. W normie [PN-IS011631] zestawiono i zdefiniowano różne właściwości przepływomierzy. Najważniejsze z nich wymieniono w [Waluś1997 s.73] i można je podzielić na następujące grupy:

- obiekt pomiaru: mierzony parametr, właściwości medium przepływowego, graniczna wartości temperatury, ciśnienia, zanieczyszczenia, uwarunkowania instalacyjne,

- zasada działania i parametry czujnika: rodzaj czujnika (powierzchniowy, odcinkowy, punktowy), zakres pomiarowy, wymiary czujnika, masa,

 instalowanie: możliwość instalowania w miejscu zapewniającym pobranie reprezentatywnej próbki prędkości, konieczność zatrzymania przepływu i opróżniania rurociągu, zniekształcenie rozkładu prędkości przez czujnik, wpływ efektu blokowania, błąd metody,

 - układ pomiarowy: rodzaj wyjściowego sygnału pomiarowego, sposób prezentacji wyniku pomiaru, niepewność pomiaru,

 eksploatacja: warunki otoczenia, podatność na zakłócenia, niezawodność pracy, błąd niestałości.

Szczegółowo parametry związane z przepływomierzami próbkującymi przedstawiono w [Waluś2003 s.16-18]. Tam też opisano błędy przepływomierzy próbkujących [Waluś2003 s.18-21].

Wyodrębniono trzy grupy błędów metody pomiaru strumienia objętości przepływomierzem próbkującym:

- a) związane z obiektem pomiaru,
- b) związane z konfiguracją urządzenia pierwotnego,
- c) związane z czujnikiem.

Ad a) Obiektem pomiaru jest przepływająca struga płynu (cieczy lub gazu) a wielkością mierzoną jest strumień objętości (lub masy). Błędy związane z obiektem pomiaru dotyczą niedokładnego wyznaczenia kształtu rozkładu prędkości i pola powierzchni przekroju przepływowego. Zmiana kształtu rozkładu prędkości w stosunku do nominalnego na skutek zmiany prędkości średniej płynu oraz zmiany chropowatości ścianek rurociągu powoduje zmianę współczynnika wzorcowania (błąd metody). Często jednak przepływ zmienia się w określonym zakresie liczb Reynoldsa, albo oscyluje wokół pewnej wartości, więc błąd metody będzie niewielki, pod warunkiem znajomości kształtu rozkładu prędkości.

Ad b) Błędy związane z konfiguracją urządzenia pierwotnego występują wskutek niewłaściwego umiejscowienia czujnika w stosunku do położenia nominalnego. Przyczyną może być źle zaprojektowany punkt pomiarowy, nieprawidłowy montaż czujników oraz brak możliwości zainstalowania czujników w określonych pożądanych miejscach. Ta grupa błędów będzie zawsze występowała i powinna być oszacowana przy projektowaniu urządzenia pierwotnego przepływomierza próbkującego.

Ad c) Błędy związane z czujnikiem powstają na wskutek nieprawidłowego stosowania czujników bądź wynikają z samej ich konstrukcji. Jeżeli czujnik powierzchniowy o przekroju czynnym kołowym ma być stosowany do wyznaczania rozkładu prędkości i nie można przyjąć, że w przekroju czynnym czujnika prędkość jest stała, to należy uwzględnić współczynnik umożliwiający przeliczenie zmierzonej prędkości średniej na prędkość w środku geometrycznym czujnika [WaluŻ1999]. W [HoopM1997] przedstawiono wyniki pomiaru prędkości miejscowej za pomocą czujnika powierzchniowego o przekroju czynnym kołowym i średnicy 0,5 i 1,0 mm i okazało się, że wyniki pomiaru prędkości różnią się istotnie, chociaż różnice nie są zbyt duże.

2.4. Zakres 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 Measurment", natomiast w [Spitz1993 s.349-366] zatytułowany "Insertion flowmeters". 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 znajomość modelu matematycznego rozkładu prędkości w przewodzie zamkniętym. W literaturze podanych jest wiele modeli matematycznych rozkładu prędkości róźniących się znacznie postacią funkcji.

Od dokładności przyjętego modelu matematycznego rozkładu prędkości zależy dokładność wyznaczenia modelu matematycznego urządzenia pierwotnego przepływomierza próbkującego. Stąd istotnym zagadnieniem jest weryfikacja modeli matematycznych rozkładów prędkości. Próby takiej weryfikacji dokonano w [Dąbro2007]. Przedmiotem niniejszej pracy jest wyznaczenie współczynnika wzorcowania *k*, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2.7.

Analiza metrologiczna zostanie przeprowadzona poprzez obliczanie współczynników wzorcowania dla różnych rozkładów prędkości i różnych konfiguracji urządzenia pierwotnego przepływomierza. Obliczenia te pozwolą na najlepszy dobór położenia czujnika przepływomierza w przekroju pomiarowym oraz na przeprowadzenie analizy błędów w różnorodnych warunkach pomiaru.

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 zostanie 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. 2.8.

a)





Rys. 2.8. 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 stosowanymi do pomiaru strumienia objętości w rurociągach o przekroju kołowym. Modelowanie matematyczne czujnika zostanie potraktowane skrótowo, gdyż zakłada się, że z czujnika pomiarowego zbudowanego z wykorzystaniem dowolnej zasady działania uzyskuje się sygnał proporcjonalny do prędkości średniej płynu w powierzchni czynnej czujnika. Dotyczy to przede wszystkim czujników elektromagnetycznych, turbinowych i ultradźwiękowych (dla których można przyjąć, że wiązka fali ultradźwiękowej jest równoległa). Przykładowy kształt wiązki fali ultradźwiękowej został przedstawiony np. w [Obraz1983].

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

2.5. 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.

3. Modele matematyczne rozkładu prędkości w przewodach zamkniętych o kołowym przekroju poprzecznym

Ponieważ istnieje duże zróżnicowanie urządzeń pierwotnych przepływomierzy próbkujących korzystnie jest wyodrębnić normalne warunki przepływu i normalne warunki stosowania przepływomierzy. Normalne warunki przepływu nie zależą od rodzaju przepływomierza, natomiast normalne warunki stosowania są to warunki jakie muszą być spełnione ze względu na dany przepływomierz, a dokładnie, ze względu na jego urządzenie pierwotne [Waluś2003 s.39].

3.1. Normalne warunki przepływu i normalne warunki stosowania przepływomierzy próbkujących

Normalne warunki przepływu są następujące:

- rurociąg ma przekrój poprzeczny kołowy, chropowatość powierzchni wewnętrznej strony ścianki jest znana,

- rozkład prędkości wzdłuż osi rurociągu w odcinku pomiarowym jest osiowosymetryczny i niezmienny.

Normalne warunki stosowania przepływomierzy próbkujących są następujące:

- czujniki są zainstalowane w miejscach odpowiednich do przyjmowanego modelu matematycznego,

- płyn wypełnia cały przekrój poprzeczny urządzenia pierwotnego przepływomierza, a strumień płynu jest stały w czasie odpowiadającym pojedynczemu pomiarowi.

3.2. Modele matematyczne rozkładów prędkości w warunkach normalnych

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.

Wzory modelujące rozkład prędkości w rurociągu powinny spełniać odpowiednie warunki [Waluś2003 s.50]:

funkcja v(r) powinna jak najlepiej odpowiadać rzeczywistej zależności prędkości od promienia,

- funkcja v(r) powinna być funkcją ciągłą, ściśle malejącą dla r należącego do przedziału [0; R], gdzie R jest promieniem wewnętrznym rurociągu,

- funkcja v(r) powinna być osiowosymetryczna dla przepływu w warunkach normalnych,

- dla r = R funkcja v(r) powinna przyjmować wartość 0,
- wartość pochodnej v(r) względem r powinna dążyć do zera, gdy r dąży do zera,
- pochodna dv(r)/dr dla $r \rightarrow R$ powinna być skończona,

- wartości prędkości odniesione do prędkości w osi rurociągu (która jest równa prędkości maksymalnej dla osiowo symetrycznego rozkładu prędkości) dla tej samej wartości *r* dla przepływu turbulentnego powinny być większe niż dla przepływu laminarnego:

 $(v/v_m)_t = (v/v_m)_l$ dla r = 0 $(v/v_m)_t > (v/v_m)_l$ dla $r \in = (0; R).$

3.2.1. Przepływ laminarny

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

$$v = v_m \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right]$$
(3.1)

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



Rys. 3.1. Wykres przedstawiający profil prędkości dla przepływu laminarnego opisanego wzorem (3.1).

3.2.2. 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 wybrane wzory opisujące rozkład prędkości dla przepływu turbulentnego.

3.2.2.1. Wzór uniwersalny

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

$$v = v_m \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^m \right]$$
(3.2)

Gdy wykładnik potęgowy m = 2 wówczas mamy do czynienia z przepływem laminarnym (wzór 3.1), natomiast gdy m wynosi kilkanaście to wzór powyższy opisuje rozkład prędkości dla przepływu turbulentnego. Jeżeli wartość m dąży do nieskończoności, to model (3.2) opisuje przepływ tłokowy, o profilu prędkości przedstawionym na rys. 2.1.



Rys. 3.2. Wykres przedstawiający profil prędkości dla przepływu turbulentnego modelowanego wzorem uniwersalnym.

3.2.2.2. Wzór potęgowy trójskładnikowy

W [Waluś2003] autor przedstawił wzór pozwalający na lepsze dopasowanie profilu obliczonego do wyznaczonego doświadczalnie, niż to można zrobić dla wzoru (3.2). Został on nazwany trójskładnikowym:

$$v = v_m \left[1 - b \left(\frac{r}{R} \right)^2 - \left(1 - b \right) \left(\frac{r}{R} \right)^m \right]$$
(3.3)

gdzie: b, m – parametry, które wyznacza się dla konkretnego profilu prędkości. Dla wartości b = 0 otrzymuje się wzór (3.2), natomiast dla b = 1 wzór (3.1).

Na rys. 3.3. przedstawiono przykładowe wykresy profili prędkości dla różnych wartości parametrów b i m.

a)



Rys. 3.3. Wykresy przedstawiające profile prędkości dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3): a) m = 4, b) m = 12

3.2.2.3. Wzór potęgowy Prandtla

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

$$v = v_m \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}}$$
(3.4)

gdzie: 1/n – wykładnik potęgowy zależny od liczby Reynoldsa i chropowatości rurociągu.

Zależności odwrotności wykładnika potęgowego w powyższym wzorze od liczby Reynoldsa podawane przez różnych autorów różnią się między sobą. Przykładowe zestawienie wartości *n* w zależności od liczby *Re* dla różnych wzorów przedstawiono w tabeli 3.1. W [Trosk1967] autor podaje graficzną zależność n = f(Re) przy czym dla $Re = 10^4$ do $2*10^4$ n = 7 a dla przedziału $5*10^5$ do 10^7 oraz rur hydraulicznie gładkich:

$$n = 2,1 \log Re - 1,9 \tag{3.5}$$

W [Mille1989] podano następującą zależność n = f(Re):

$$n = 1,66 \log Re \tag{3.6}$$

W [Flow2004 s.192] podano dwie zależności nie zaznaczając, czy obowiązują one dla rury hydraulicznie gładkiej czy też dla rury chropowatej:

$$n = 3,299 + 0,326 \ln Re \qquad \text{dla } Re < 400000 \tag{3.7}$$

$$n = 5,537 + 5,498 * 10^{-6} (\ln Re)^5 dla Re > 400000$$
(3.8)

Re	4000	10000	40000	100000	400000	1000000	4000000
dla wzoru (3.5)	5,66	6,50	7,76	8,60	9,86	10,70	11,96
dla wzoru (3.6)	5,98	6,64	7,64	8,30	9,30	9,96	10,96
dla wzoru (3.7)	6,00	6,30	6,75	7,05	7,50		\ge
dla wzoru (3.8)	$\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{$	\searrow	\searrow	\searrow	7,50	8,30	10,00

Tab. 3.1. Zależność n od liczby Re dla różnych wzorów opisujących współczynnik n.

Różnice między wartościami *n* zawartymi w tabeli 3.1 są rzędu kilku procent. Na rys. 3.4 i 3.5 przedstawiono profile prędkości obliczone ze wzoru 3.4 i przyjęciu wartości *n* obliczonych według wzoru (3.5) i (3.6). Kształty profili są podobne. Zachodzi zatem pytanie, ile będą się różniły współczynniki wzorcowania. Przykładowo dla Re = 4000000 i założenia, że wzór (3.6) daje poprawną wartość *n* obliczono korzystając ze wzoru na współczynnik wzorcowania podany w [PN-M-42370] błąd wyznaczania współczynnika wzorcowania dla *n* wyrażonego wzorem (3.5), i będzie wynosił – 0,04%. Jeżeli weźmie się przypadek porównania współczynnika wzorcowania dla rury gładkiej i chropowatej o stosunku wysokości chropowatości do średnicy rurociągu wynoszącym 0,01 (przyjmując jako odniesienie rurę gładką) to na podstawie wykresu [PN-M-42370 s.16] otrzymuje się błąd wynoszący 4,1%.



Rys. 3.4. Wykres przedstawiający profil prędkości dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.4), gdzie wartość *n* obliczona jest za pomocą wzoru (3.5).



Rys. 3.5. Wykres przedstawiający profil prędkości dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.4), gdzie wartość *n* obliczona jest za pomocą wzoru (3.6).

3.2.3. Przepływ przejściowy

Przepływ przejściowy [DaugF1977 s.192, Flow1991 s.57, Waluś1990 s.34], zwany również krytycznym, zachodzi gdy liczba Reynoldsa jest większa od wartości, dla której występuje przepływ laminarny, a mniejsza od wartości, dla której przepływ jest turbulentny. Za dolną granicę liczby Reynoldsa, przy której występuje przepływ przejściowy, przyjmuje się 2320, natomiast za górną liczbę Reynoldsa wartość zawierającą przedziale 3000 do 10000 [Spitz1993 s.331]. się W od W [Miłek2006 s.336] podano wartość 2800 z zaznaczeniem, że w pracach różnych autorów graniczna liczba Reynoldsa ma inną wartość. W [Bloom2000, Gilmo1996] podano wartości 3000, 3080, 4000. Wzory opisujące rozkład prędkości dla przepływu turbulentnego, które pozwalają jednocześnie na opis rozkładu prędkości także dla przepływu laminarnego (np. (3.2), (3.3)) mogą być stosowane także dla przepływu przejściowego. Poszukiwanie odpowiedniego modelu matematycznego rozkładu prędkości nie jest łatwe, gdyż trudno opisać dokładnie cały przekrój jednym wzorem.

W [Gilmo1996] wyodrębniono 4 obszary charakteryzujące przepływ w rurociągu (od ścianki rurociągu do osi): lepki, buforowy, zachodzący na siebie, rdzeniowy.

Przykładowo dla wzoru (3.2) dla m = 2 wzór opisuje model rozkładu prędkości dla przepływu laminarnego, natomiast dla m większego od 2 i wynoszącego do około 4 będzie dobrze oddawał kształt rozkładu prędkości dla przepływu przejściowego.

3.3. Modele matematyczne rozkładów prędkości w warunkach odbiegających od normalnych

Rozkład prędkości zostaje zniekształcony wskutek występowania przeszkód na drodze przepływu płynu (czujniki wprowadzane do rurociągu, klapy, zawory) oraz przy zmianie kierunku rurociągu (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]:

$$v(r) = v_1(r) + v_2(r, \vartheta)$$
 (3.9)

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 [Waluś1997]:

$$v(r,\vartheta) = v_m \left[\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + h \frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \right]$$
(3.10)

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

Przykładowy wykres przedstawiający profile prędkości przedstawiono na rys. 3.6.



Rys. 3.6. Wykres przedstawiający profile prędkości dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.10) dla przykładowych parametrów k = 9, $Re = 10^5$, n = 8,6 obliczone według wzoru (3.5), a) h = 0.5, b) h = 2.

4. Analiza metrologiczna przepływomierzy próbkujących z czujnikami powierzchniowymi o powierzchni prostokątnej

Prostokątem modeluje się powierzchnię czynną niektórych czujników ultradźwiękowych oraz czujniki z unoszeniem strugi pomocniczej, których schematy przedstawiono na rys. 2.5. Czujniki ultradźwiękowe montowane są przeważnie w średnicy. Niekiedy montuje się je w cięciwie, w takim miejscu, aby zmierzona prędkość średnia po cięciwie była równa prędkości średniej po przekroju rurociągu. W przypadku przepływomierza ultradźwiękowego z urządzeniem pierwotnym dwudrogowym czujniki są montowane w cięciwach położonych równolegle do siebie.

4.1. Wyznaczanie współczynnika wzorcowania dla osiowosymetrycznych rozkładów prędkości w warunkach normalnych

Prędkość średnią płynu występującą we wzorze (2.4.), który definiuje współczynnik wzorcowania oblicza się następujący sposób:

$$v_{sr} = \frac{1}{A} \int_{A} v dA \tag{4.1}$$

gdzie: *v* – model rozkładu prędkości w przekroju przepływowym, d*A* - element powierzchni przekroju.

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

$$v_c = \frac{1}{A_c} \iint_{A_c} v dx dy \tag{4.2}$$

gdzie: x oraz y to współrzędne w czujniku.

4.1.1. Czujnik powierzchniowy umieszczony w średnicy rurociągu

Schemat urządzenia pierwotnego jednopowierzchniowego z czujnikiem umieszczonym w średnicy rurociągu o powierzchni aproksymowanej prostokątem przedstawiono na rysunku 4.1 [Kries2005]. W pracy podjęto próbę dokładnego modelowania powierzchni czynnej czujnika. Porównując dokładne modelowanie powierzchni czynnej czujnika o powierzchni aproksymowanej prostokątem z modelowaniem przybliżonym stwierdzono, że współczynniki wzorcowania różnią się nieznacznie. Im większa powierzchnia czynna czujnika tym różnice te są większe. Jednak w praktyce czujniki te są wąskie i dlatego w dalszej części pracy powierzchnia czynna czujnika modelowana jest prostokątem.



Rys. 4.1. Urządzenie pierwotne jednopowierzchniowe z czujnikiem o prostokątnej powierzchni czynnej o szerokości 2*a* i długości 2*R*, gdzie: $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ - promień bieżący, *R* - promień rurociągu.

4.1.1.1. Współczynnik wzorcowania dla przepływu laminarnego opisanego wzorem (3.1)

Prędkość średnią po przekroju przepływowym oblicza się ze wzoru:

$$v_{sr} = \frac{1}{\pi R^2} \int_{0}^{R} v_m \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] 2\pi r dr = \frac{2v_m}{R^2} \int_{0}^{R} \left(r - \frac{r^3}{R^2}\right) dr = \frac{2v_m}{R^2} \left[\frac{R^2}{2} - \frac{R^4}{4R^2}\right] = \frac{v_m}{2}$$
(4.3)

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{aR} \int_{0}^{aR} v_{m} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{2} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{aR} \int_{0}^{aR} \left[1 - \frac{\left(\sqrt{x^{2} + y^{2}}\right)^{2}}{R^{2}} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{aR} \left[\int_{0}^{a} \left[\int_{0}^{R} \left(1 - \frac{x^{2} + y^{2}}{R^{2}} \right) \right] dx \right] dy = v_{m} \left[\frac{2}{3} - \frac{a^{2}}{3R^{2}} \right]$$
(4.4)

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4), wynosi:

$$k = \frac{v_{\hat{s}r}}{v_c} = \frac{\frac{v_m}{2}}{v_m \left[\frac{2}{3} - \frac{a^2}{3R^2}\right]} = \frac{1}{\frac{4}{3} - \frac{2}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^2}$$
(4.5)

Dokonując analizy wzoru (4.5) można zauważyć, iż rozmiar czujnika w przypadku przepływu laminarnego ma dosyć duży wpływ na współczynnik wzorcowania, co przedstawiono w tablicy 4.1.

Tab. 4.1. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem umieszczonego w średnicy rurociągu dla przepływu laminarnego.

<i>a/R</i> =0 <i>a/R</i> =0,01		<i>a/R</i> =0,05	<i>a/R</i> =0,1
0,7500 0,7501		0,7509	0,7538

Na rys. 4.2 przedstawiono wykres zależności współczynnika wzorcowania od szerokości czujnika. W przypadku rurociągów o dużych średnicach stosunek szerokości czujnika do średnicy rurociągu jest rzędu 0,01 do 0,05 i współczynnik wzorcowania nieznacznie różni się od wartości współczynnika wzorcowania dla czujnika odcinkowego. W przypadku rurociągu o małych średnicach wartość *a/R* może być nawet rzędu 0,2, jak to ma miejsce w przypadku przepływomierza firmy Sonix z Warszawy zainstalowanego w laboratorium pomiaru przepływu w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej.



Rys. 4.2. Wykres przedstawiający zależność współczynnika wzorcowania od powierzchni czynnej czujnika dla rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.1).

4.1.1.2. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2)

Przy odpowiednio dużym wykładniku potęgowym m wzór ten opisuje przepływ turbulentny, natomiast dla m = 4 można przyjąć, że opisuje przepływ przejściowy.

Prędkość średnią w przekroju poprzecznym rurociągu oblicza się z wzoru:

$$v_{sr} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R v_m \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^m \right] 2\pi r dr = \frac{v_m}{\pi R^2} \left[\int_0^R \left(r - \frac{r^{m+1}}{R^m}\right) dr \right] = v_m \frac{m}{m+2}$$
(4.6)

Dla m = 4 prędkość średnia wynosi:

$$v_{\dot{s}r} = \frac{2}{3} v_m \tag{4.7}$$

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{4} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} \left[1 - \left(\frac{\left(x^{2} + y^{2}\right)^{0.5}}{R}\right)^{4} \right] dx dy = v_{m} \left[\frac{4}{5} - \frac{2}{9} \left(\frac{a}{R}\right)^{2} - \frac{1}{5} \left(\frac{a}{R}\right)^{4} \right]$$
(4.8)

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4), wynosi:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_c} = \frac{2}{3\left[\frac{4}{5} - \frac{2}{9}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{1}{5}\left(\frac{a}{R}\right)^4\right]}$$
(4.9)

Dla m = 8 prędkość średnia wynosi:

$$v_{sr} = \frac{4}{5} v_m \tag{4.10}$$

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{aR} \int_{0}^{aR} v_{m} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{aR} \int_{0}^{aR} \left[1 - \left(\frac{\left(x^{2} + y^{2}\right)^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = v_{m} \left[\frac{8}{9} - \frac{4}{21} \left(\frac{a}{R}\right)^{2} - \frac{6}{25} \left(\frac{a}{R}\right)^{4} - \frac{4}{21} \left(\frac{a}{R}\right)^{6} - \frac{1}{9} \left(\frac{a}{R}\right)^{8} \right]$$
(4.11)

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4), wynosi:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_c} = \frac{4}{5\left[\frac{8}{9} - \frac{4}{21}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{6}{25}\left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{4}{21}\left(\frac{a}{R}\right)^6 - \frac{1}{9}\left(\frac{a}{R}\right)^8\right]}$$
(4.12)

Dla m = 12 prędkość średnia wynosi:

$$v_{sr} = \frac{6}{7} v_m$$
 (4.13)

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{12} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} \left[1 - \left(\frac{\left(x^{2} + y^{2}\right)^{0.5}}{R}\right)^{12} \right] dx dy =$$
$$= v_{m} \left[\frac{12}{13} - \frac{2}{11} \left(\frac{a}{R}\right)^{2} - \frac{1}{3} \left(\frac{a}{R}\right)^{4} - \frac{20}{49} \left(\frac{a}{R}\right)^{6} - \frac{1}{3} \left(\frac{a}{R}\right)^{8} - \frac{2}{11} \left(\frac{a}{R}\right)^{10} - \frac{1}{13} \left(\frac{a}{R}\right)^{12} \right]$$
(4.14)

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4), wynosi:

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{6}{7\left[\frac{12}{13} - \frac{2}{11}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{1}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{20}{49}\left(\frac{a}{R}\right)^6 - \frac{1}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^8 - \frac{2}{11}\left(\frac{a}{R}\right)^{10} - \frac{1}{13}\left(\frac{a}{R}\right)^{12}\right]}$$
(4.15)

Dla m = 16 prędkość średnia wynosi:

$$v_{\dot{s}r} = \frac{8}{9} v_m$$
 (4.16)

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{16} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} \left[1 - \left(\frac{\left(x^{2} + y^{2}\right)^{0.5}}{R}\right)^{16} \right] dx dy =$$
$$= v_{m} \left[\frac{16}{17} - \frac{8}{45} \left(\frac{a}{R}\right)^{2} - \frac{28}{65} \left(\frac{a}{R}\right)^{4} - \frac{56}{77} \left(\frac{a}{R}\right)^{6} - \frac{70}{81} \left(\frac{a}{R}\right)^{8} - \frac{56}{77} \left(\frac{a}{R}\right)^{10} - \frac{28}{65} \left(\frac{a}{R}\right)^{12} - \frac{8}{45} \left(\frac{a}{R}\right)^{14} - \frac{1}{17} \left(\frac{a}{R}\right)^{16} \right]$$
$$(4.17)$$

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4), wynosi:

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{8}{9\left[\frac{16}{17} - \frac{8}{45}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{28}{65}\left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{56}{77}\left(\frac{a}{R}\right)^6 - \frac{70}{81}\left(\frac{a}{R}\right)^8 - \frac{56}{77}\left(\frac{a}{R}\right)^{10} - \frac{28}{65}\left(\frac{a}{R}\right)^{12} - \frac{8}{45}\left(\frac{a}{R}\right)^{14} - \frac{1}{17}\left(\frac{a}{R}\right)^{16}\right]}$$
(4.18)

Dokonując analizy powyższych wzorów można zauważyć, iż kształt czujnika w przypadku przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2) ma niewielki wpływ na współczynnik wzorcowania co przedstawiono w tablicy 4.2.

Tab. 4.2. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem umieszczonego w średnicy rurociągu dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2).

	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
<i>m</i> = 4	0,8333	0,8334	0,8339	0,8357
<i>m</i> = 8	0,9000	0,9000	0,9005	0,9020
<i>m</i> = 12	0,9285	0,9286	0,9290	0,9304
<i>m</i> = 16	0,9444	0,9444	0,9448	0,9462

Na rys. 4.3 przedstawiono wykresy zależności wartości współczynnika wzorcowania k od wykładnika m oraz względnej szerokości czujnika a/R dla przepływu przejściowego oraz turbulentnego.


Rys. 4.3. Wykres przedstawiający zależność współczynnika wzorcowania od powierzchni czynnej czujnika dla rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.2).

Jak widać z rys. 4.3 w przypadku dużych zmian liczby Reynoldsa $(2000 - 10^5)$ współczynnik wzorcowania zmienia na tyle swoją wartość, że musi ona być uwzględniona w czasie pomiaru. Obliczenia, których wyniki przedstawiono w tablicy 4.2 pozwalają na oszacowanie zmian współczynnika wzorcowania wraz z szerokością czujnika powierzchniowego o przekroju prostokątnym. Dla a/R=0 (czujnik odcinkowy) zmiana k przy zmianie m od 16 do 4 wynosi 0,1111, natomiast dla czujnika powierzchniowego (a/R=0,1) wynosi 0,1105. Różnice są niewielkie i wobec tego prawdziwe jest stwierdzenie, że w przepływomierzu ultradźwiękowym można rozpatrywać tylko promień centralny wiązki, co na podstawie literatury zostało napisane w [Waluś1980]. Wpływ szerokości czynnej czujnika jest tym mniejszy, im większa jest liczba Reynoldsa. Rozkład prędkości jest wtedy bardziej płaski, co skutkuje większą stałością współczynnika wzorcowania.

4.1.1.3. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3)

Prędkość średnią dla rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.3) oblicza się następująco:

$$v_{sr} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R v_m \left[1 - b \left(\frac{r}{R} \right)^2 - \left(1 - b \right) \left(\frac{r}{R} \right)^m \right] 2 \pi r dr = v_m \left[\frac{2(m+b) - bm}{2(m+2)} \right]$$
(4.19)

Do wyznaczania współczynnika wzorcowania zastosowano podobną metodykę, jak w punkcie 4.1.1.2. Dla m = 4 prędkość średnia wynosi:

$$v_{\dot{s}r} = \frac{2(4+b) - 4b}{12} v_m \tag{4.20}$$

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{r}{R} \right)^{2} - \left(1 - b \right) \left(\frac{r}{R} \right)^{m} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{\left(x^{2} + y^{2} \right)^{0.5}}{R} \right)^{2} - \left(1 - b \right) \left(\frac{\left(x^{2} + y^{2} \right)^{0.5}}{R} \right)^{4} \right] dx dy =$$

$$= v_{m} \left[\frac{4}{5} - \frac{2}{15} b - \frac{\left(b + 2 \right)}{9} \left(\frac{a}{R} \right)^{2} - \frac{\left(1 - b \right)}{5} \left(\frac{a}{R} \right)^{4} \right]$$

$$(4.21)$$

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4), wynosi:

$$k = \frac{v_{\dot{sr}}}{v_c} = \frac{2(4+b)-4b}{12\left[\frac{4}{5}-\frac{2}{15}b-\frac{(b+2)}{9}\left(\frac{a}{R}\right)^2-\frac{(1-b)}{5}\left(\frac{a}{R}\right)^4\right]}$$
(4.22)

Dla m = 8 prędkość średnia wynosi:

$$v_{sr} = \frac{2(8+b)-8b}{20}v_m$$
(4.23)

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{r}{R} \right)^{2} - \left(1 - b \right) \left(\frac{r}{R} \right)^{m} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{\left(x^{2} + y^{2} \right)^{0.5}}{R} \right)^{2} - \left(1 - b \right) \left(\frac{\left(x^{2} + y^{2} \right)^{0.5}}{R} \right)^{8} \right] dx dy = v_{m} \left[\frac{8}{9} - \frac{2}{9} b - \frac{(3b+4)}{21} \left(\frac{a}{R} \right)^{2} - \frac{6(1-b)}{25} \left(\frac{a}{R} \right)^{4} - \frac{4(1-b)}{21} \left(\frac{a}{R} \right)^{6} - \frac{(1-b)}{9} \left(\frac{a}{R} \right)^{8} \right]$$

$$(4.24)$$

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4), wynosi:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_c} = \frac{2(8+b)-8b}{20\left[\frac{8}{9}-\frac{2}{9}b-\frac{(3b+4)}{21}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{6(1-b)}{25}\left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{4(1-b)}{21}\left(\frac{a}{R}\right)^6 - \frac{(1-b)}{9}\left(\frac{a}{R}\right)^8\right]}$$
(4.25)

Dla m = 12 prędkość średnia wynosi:

$$v_{sr} = \frac{2(12 + b) - 12 b}{28} v_m \tag{4.26}$$

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{r}{R} \right)^{2} - \left(1 - b \right) \left(\frac{r}{R} \right)^{m} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{\left(x^{2} + y^{2} \right)^{0.5}}{R} \right)^{2} - \left(1 - b \right) \left(\frac{\left(x^{2} + y^{2} \right)^{0.5}}{R} \right)^{12} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[\frac{12}{13} - \frac{10}{39} b - \frac{(5b+6)}{33} \left(\frac{a}{R} \right)^{2} - \frac{(1-b)}{3} \left(\frac{a}{R} \right)^{4} - \frac{20(1-b)}{49} \left(\frac{a}{R} \right)^{6} - \frac{(1-b)}{3} \left(\frac{a}{R} \right)^{8} - \frac{2(1-b)}{11} \left(\frac{a}{R} \right)^{10} - \frac{(1-b)}{13} \left(\frac{a}{R} \right)^{12} \right]$$

$$(4.27)$$

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4), wynosi:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_c} = \frac{2(12+b)-12b}{28\left[\frac{12}{13}-\frac{10}{39}b-\frac{(5b+6)}{33}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{(1-b)}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{20(1-b)}{49}\left(\frac{a}{R}\right)^6 - \frac{(1-b)}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^8 - \frac{2(1-b)}{11}\left(\frac{a}{R}\right)^{10} - \frac{(1-b)}{13}\left(\frac{a}{R}\right)^{12}}{\left[\frac{2(1-b)}{11}\left(\frac{a}{R}\right)^{10} - \frac{(1-b)}{13}\left(\frac{a}{R}\right)^{12}}\right]}$$
(4.28)

Dla m = 16 prędkość średnia wynosi:

$$v_{sr} = \frac{2(16 + b) - 16b}{36}v_m \tag{4.29}$$

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{r}{R} \right)^{2} - (1 - b) \left(\frac{r}{R} \right)^{m} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{2} - (1 - b) \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{16} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{2} - (1 - b) \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{16} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{2} - (1 - b) \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{16} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{2} - (1 - b) \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{16} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{2} - (1 - b) \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{16} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{2} - (1 - b) \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{16} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{16} - \frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{16} - \frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} v_{m} \left[1 - b \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{16} - \frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{R} \frac{(x^{2} + y^{2})^{16}}{R} \int_{0}^{a} \frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \left[\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \int_{0}^{a} \frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \int_{0}^{a} \frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \left[\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right] dx dy = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \int_{0}^{a} \frac{(x^{2} +$$

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4), wynosi:

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{2(16+b)-16b}{36\left[\frac{16}{17}-\frac{14}{51}b-\frac{(7b+8)}{45}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{28(1-b)}{65}\left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{56(1-b)}{77}\left(\frac{a}{R}\right)^6 - \frac{70(1-b)}{81}\left(\frac{a}{R}\right)^8 - \left[\frac{56(1-b)}{77}\left(\frac{a}{R}\right)^{10} - \frac{28(1-b)}{65}\left(\frac{a}{R}\right)^{12} - \frac{8(1-b)}{45}\left(\frac{a}{R}\right)^{14} - \frac{(1-b)}{17}\left(\frac{a}{R}\right)^{16} - \frac{1}{17}\left(\frac{a}{R}\right)^{16} - \frac{1}{17}\left(\frac{a}{R}\right)^{16} - \frac{1}{17}\left(\frac{a}{R}\right)^{16} - \frac{1}{17}\left(\frac{a}{R}\right)^{16} - \frac{1}{17}\left(\frac{a}{R}\right)^{16} - \frac{1}{17}\left(\frac{a}{R}\right)^{10} - \frac{1}{$$

Na podstawie wzorów (4.22), (4.25), (4.28), (4.31) obliczono wartości współczynników wzorcowania dla różnych wartości stosunku szerokości czujnika do jego długości i parametru *b*. Wyniki obliczeń przedstawiono w tablicach 4.3, 4.4, 4.5, 4.6.

m = 4

Tab. 4.3. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w średnicy rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3).

	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R=0,1
<i>b</i> = 0,2	0,8189	0,8189	0,8196	0,8215
<i>b</i> = 0,4	0,8035	0,8036	0,8042	0,8064
<i>b</i> = 0,6	0,7870	0,7870	0,7878	0,7902
<i>b</i> = 0,8	0,7692	0,7691	0,7700	0,7727
<i>b</i> = 1	0,7500	0,7500	0,7509	0,7537

m = 8

Tab. 4.4. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w średnicy rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3).

	a/R=0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
<i>b</i> = 0,2	0,8763	0,8763	0,8768	0,8786
<i>b</i> = 0,4	0,8500	0,8500	0,8506	0,8526
<i>b</i> = 0,6	0,8205	0,8205	0,8213	0,8236
<i>b</i> = 0,8	0,7875	0,7875	0,7883	0,7908
<i>b</i> = 1	0,7500	0,7500	0,7509	0,7537

m = 12

Tab. 4.5. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w średnicy rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3).

	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
<i>b</i> = 0,2	0,9012	0,9012	0,9018	0,9034
<i>b</i> = 0,4	0,8705	0,8705	0,8711	0,8731
<i>b</i> = 0,6	0,8357	0,8357	0,8364	0,8387
<i>b</i> = 0,8	0,7959	0,7959	0,7967	0,7993
<i>b</i> = 1	0,7500	0,7500	0,7509	0,7537

m = 16

Tab. 4.6. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w średnicy rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3).

	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
<i>b</i> = 0,2	0,9151	0,9152	0,9157	0,9173
<i>b</i> = 0,4	0,8820	0,8821	0,8827	0,8846
<i>b</i> = 0,6	0,8442	0.8443	0,8450	0,8472
<i>b</i> = 0,8	0,8007	0,8007	0,8015	0,8041
b=1	0,7500	0,7500	0,7509	0,7537

Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresów na rysunku 4.4. Dokonując analizy powyższych wzorów można zauważyć, iż kształt czujnika w przypadku przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3) ma niewielki wpływ na współczynnik wzorcowania co przedstawiono w tablicach 4.3, 4.4, 4.5, 4.6. Z danych zamieszczonych w tablicach można wywnioskować, iż w miarę wzrostu wykładnika potęgowego m oraz wzrostu parametru b współczynnik wzorcowania zmienia się w coraz to mniejszym zakresie, co przedstawiono na rysunku 4.4.

Dla b = 1 rozkład prędkości jest rozkładem dla przepływu laminarnego, dla którego następują dosyć znaczne zmiany współczynnika wzorcowania w zależności od kształtu czujnika.

Zmniejszenie wpływu kształtu czujnika na współczynnik wzorcowania można zauważyć przy mniejszych wartościach parametru *b*. Zmniejszenie parametru *b* powoduje wzrost współczynnika wzorcowania. W miarę wzrostu stałej *b* kształt czujnika ma większy wpływ na współczynnik wzorcowania. Wraz ze wzrostem wykładnika potęgowego *m* współczynnik wzorcowania wzrasta dość znacznie, a wpływ kształtu czujnika na współczynnik wzorcowania się znacznie zmniejsza. Wybrane wyniki spośród zawartych w powyższych tablicach przedstawiono na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Zależność współczynnika wzorcowania od zmiany kształtu rozkładu prędkości; a/R = 0,1.

Celem obliczeń jest pokazanie wpływu a/R na zmienność współczynnika wzorcowania, gdy zmienia się *m* oraz gdy zmienia się *b*. Obliczono, na ile zmienia się współczynnik wzorcowania przy zmianach strumienia objętości (i tym samym zmianach kształtu rozkładu prędkości) w dwóch przypadkach: 1) dla a/R = 0 (czujnik odcinkowy) i 2) a/R = 0,1 (czujnik powierzchniowy szeroki). W pierwszym przypadku zmiana *k* wynosi około 10,5%, a w drugim 9,4%.

Wobec tego można stwierdzić, że polepszenie stałości współczynnika wzorcowania jest niewielkie i wobec dużych zmian jego wartości w funkcji wykładnika *m* oraz kosztów związanych z czujnikiem powierzchniowym o dużej szerokości stosowanie czujnika powierzchniowego jest niecelowe. W przypadku czujnika modelowanego prostokątem wzięto pod uwagę 2 modele matematyczne rozkładu prędkości płynu w rurociągu (wzory (3.2), (3.3)).

Żaden z nich idealnie nie odpowiada rozkładowi rzeczywistemu. Zachodzi pytanie, który z modeli pozwoli na obliczenie najbardziej dokładnego współczynnika wzorcowania. Jeśli nawet udałoby się w konkretnej sytuacji taki współczynnik wyznaczyć, to w miarę upływu czasu warunki przepływu się zmieniają (chropowatość ścianki rurociągu, zmiana lepkości z temperaturą lub zmiana właściwości cieczy) i inny model rozkładu prędkości byłby najlepszy do wyznaczania współczynnika wzorcowania. Użytkownik chciałby wiedzieć, z jakimi zmianami współczynnika wzorcowania może się liczyć, bo one będą decydowały o systematycznym, ale nie znanym błędzie pomiaru. Strumień objętości jest wyznaczany zgodnie z wzorem (2.5) i gdy dla danych warunków wyznaczona zostanie wartość nominalna współczynnika wzorcowania k_n , to gdy warunki się nie zmienią otrzymamy wynik pomiaru bez błędu metody:

$$k_{n} = \frac{v_{sr}}{v_{cn}} \tag{4.32}$$

$$q_{vn} = v_{cn} \cdot k_n \cdot A \tag{4.33}$$

Gdy warunki pomiaru się zmienią, to otrzymamy wynik pomiaru strumienia objętości:

$$q_{v} = v_{c} \cdot k_{n} \cdot A \tag{4.34}$$

Wartość ta będzie obarczona błędem metody wynikającym z tego, że przyjęliśmy nieprawidłową wartość współczynnika wzorcowania. W zmienionych warunkach wartość tego współczynnika wynosi k, a nie k_n , wobec tego rzeczywistą wartość strumienia objętości oblicza się następująco:

$$q_{vrz} = v_c \, k \, A \tag{4.35}$$

Względny błąd pomiaru można wyznaczyć ze wzoru:

$$\delta = \frac{q_v - q_{vrz}}{q_{vrz}} \tag{4.36}$$

Podstawiając (4.34) i (4.35) do (4.36) otrzymuje się:

$$\delta = \frac{k_n - k}{k} \tag{4.37}$$

Posługując się wzorem (4.37) można obliczyć jakiego błędu należy się spodziewać, gdy np. założono, że rozkład prędkości dobrze opisuje wzór trójskładnikowy, a rzeczywisty rozkład prędkości w danych warunkach powinien być opisany wzorem uniwersalnym z daną wartością wykładnika *m*.

4.1.2. Czujnik powierzchniowy umieszczony w cięciwie rurociągu

Schemat urządzenia pierwotnego jednopowierzchniowego z czujnikiem umieszczonym w cięciwie rurociągu o powierzchni aproksymowanej prostokątem [Kries2007] można zilustrować jak na rysunku 4.5:



Rys. 4.5. Urządzenie pierwotne jednopowierzchniowe 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, r_0 - odległość osi czujnika od średnicy rurociągu.

4.1.2.1. Współczynnik wzorcowania dla przepływu laminarnego opisanego wzorem (3.1)

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} v_{m} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{2} \right] dxdy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{\left(x^{2} + y^{2}\right)^{0.5}}{R}\right)^{2} \right] dxdy = v_{m} \left[\frac{2}{3} - \frac{2}{3} \left(\frac{r_{0}}{R}\right)^{2} - \frac{1}{3} \left(\frac{a}{R}\right)^{2} \right] = v_{m} \left[\frac{2}{3} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{a}{R}\right)^{2} - \left(\frac{r_{0}}{R}\right)^{2} \right] \right]$$

(4.38)

Uwzględniając wzór (4.3) współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4) oblicza się następująco :

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_{c}} = \frac{3}{4\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{a}{R}\right)^{2} - \left(\frac{r_{0}}{R}\right)^{2}\right]}$$
(4.39)

W tablicy 4.7 oraz na rys. 4.6 przedstawiono zależności wartości współczynnika wzorcowania od położenia i wymiarów czujnika.

Tab. 4.7. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w cięciwie rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu laminarnego opisanego wzorem (3.1).

	a/R=0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
$r_0/R=0$	0,7500	0,7500	0,7509	0,7537
$r_0/R = 0,01$	0,7500	0,7501	0,7510	0,7538
$r_0/R = 0,05$	0,7518	0,7519	0,7528	0,7556
$r_0/R=0,1$	0,7575	0,7576	0,7585	0,7614
$r_0/R=0,3$	0,8241	0,8243	0,8253	0,8287
$r_0/R=0,5$	1,0000	1,0000	1,0016	1,0067
$r_0/R = 0,7$	1,4705	1,4707	1,4742	1,4851

Wraz ze wzrostem odległości czujnika od osi rurociągu współczynnik wzorcowania rośnie co przedstawiono na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. Zależność współczynnika wzorcowania od kształtu czujnika w różnych odległościach od osi rurociągu dla przepływu laminarnego opisanego wzorem (3.1).

Dokonując analizy wzoru (4.39) i danych w tablicy 4.7 można zauważyć, że odległość czujnika od środka rurociągu w przypadku przepływu laminarnego ma dosyć duży wpływ na współczynnik wzorcowania. Wraz ze wzrostem odległości czujnika od osi rurociągu współczynnik wzorcowania rośnie i dla $r_0/R = 0,5$ przyjmuje wartość 1. Położenie to można nazwać przełomowym [Waluś2003 s.76].

4.1.2.2. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2)

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika dla wartości m = 4 oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} v_{m} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{m} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{4} \right] dx dy = v_{m} \left[\frac{4}{5} - \frac{4}{15} \left(\frac{r_{0}}{R}\right)^{2} - \frac{2}{9} \left(\frac{a}{R}\right)^{2} - \frac{8}{15} \left(\frac{r_{0}}{R}\right)^{4} - \frac{1}{5} \left(\frac{a}{R}\right)^{4} - \frac{16}{9} \left(\frac{r_{0}^{2} a^{2}}{R^{4}}\right) \right]$$

$$(4.40)$$

Uwzględniając wzór (4.7) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_c} = \frac{2}{3\left[\frac{4}{5} - \frac{4}{15}\left(\frac{r_0}{R}\right)^2 - \frac{2}{9}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{8}{15}\left(\frac{r_0}{R}\right)^4 - \frac{1}{5}\left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{16}{9}\left(\frac{r_0^2 a^2}{R^4}\right)\right]}$$
(4.41)

Dla wartości m = 8 prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} v_{m} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{m} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{8} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{a} \int_{0}^{\sqrt{R^{2} - r_{$$

Uwzględniając wzór (4.10) obliczany jest współczynnik wzorcowania :

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{4}{5 \left[\frac{8}{9} - \frac{8}{63} \left(\frac{r_0}{R} \right)^2 - \frac{16}{105} \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 - \frac{192}{945} \left(\frac{r_0}{R} \right)^6 - \frac{384}{945} \left(\frac{r_0}{R} \right)^8 - \frac{4}{21} \left(\frac{a}{R} \right)^2 - \frac{6}{25} \left(\frac{a}{R} \right)^4 - \frac{4}{21} \left(\frac{a}{R} \right)^6 - \frac{1}{9} \left(\frac{a}{R} \right)^8 - \frac{64}{35} \left(\frac{r_0^2 a^2}{R^4} \right) - \frac{1792}{735} \left(\frac{r_0^4 a^2}{R^6} \right) - \frac{4608}{945} \left(\frac{r_0^2 a^2}{R^8} \right) - \frac{88}{25} \left(\frac{r_0^2 a^4}{R^6} \right) - \frac{256}{25} \left(\frac{r_0^4 a^4}{R^8} \right) - \frac{80}{21} \left(\frac{r_0^2 a^6}{R^8} \right) \right]$$

$$(4.43)$$

Dla wartości m = 12 prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$\begin{aligned} v_{c} &= \frac{1}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{R^{2} - r_{0}^{2}} v_{m} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{m} \right] dxdy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{R^{2} - r_{0}^{2}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{12} \right] dxdy = \\ & \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}{111} \left(\frac{r_{0}^{2} a^{10}}{R^{12}}\right) - \frac{4444}{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}{111} \left(\frac{r_{0}^{2} a^{10}}{R^{12}}\right) - \frac{4444}{144} \left(\frac{r_{0}^{4} a^{8}}{R^{12}}\right) - \frac{4444}{144} \left(\frac{r_{0}^{4} a^{8}}{R^{12}}\right) - \frac{4448}{147} \left(\frac{r_{0}^{4} a^{8}}{R^{10}}\right) - \frac{146}{147} \left(\frac{r_{0}^{6} a^{8}}{R^{12}}\right) - \frac{146}{13} \left(\frac{r_{0}^{6} a^{8}}{R^{12}}\right) - \frac{146}{14} \left(\frac{r_{0}^{6} a^{8}}{R^{12}}\right) - \frac{146}{14} \left(\frac{r_{0}^{6} a^{8}}{R^{12}}\right) - \frac{146}{14} \left(\frac{r_{0}^{4} a^{8}}{R^{10}}\right) - \frac{146}{14} \left(\frac{r_{0}^{4} a^{8}}{R^{10}}\right) - \frac{146}{14} \left(\frac{r_{0}^{6} a^{8}}{R^{10}}\right) - \frac{146}{14} \left(\frac$$

$k - \frac{V_{\acute{s}r}}{V_{\acute{s}r}} - \dots$	6
$\kappa - \frac{v_c}{v_c}$	$\left[\frac{12}{13} - \frac{12}{143}\left(\frac{r_0}{R}\right)^2 - \frac{40}{429}\left(\frac{r_0}{R}\right)^4 - \frac{2240}{21021}\left(\frac{r_0}{R}\right)^6 - \frac{896}{7007}\left(\frac{r_0}{R}\right)^8 - \frac{3584}{21021}\left(\frac{r_0}{R}\right)^{10} - \frac{7168}{21021}\left(\frac{r_0}{R}\right)^{12} - \frac{2}{11}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{1}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac$
-	$ = \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{1}{13} \left(r_0^8 a^$
1	$-\frac{14336}{1617}\left(\frac{r_{0}^{10}a^{2}}{R^{12}}\right)\frac{1064}{147}\left(\frac{r_{0}^{2}a^{4}}{R^{6}}\right)\frac{3584}{147}\left(\frac{r_{0}^{6}a^{4}}{R^{10}}\right) - \frac{7168}{147}\left(\frac{r_{0}^{8}a^{4}}{R^{12}}\right) - \frac{798}{49}\left(\frac{r_{0}^{4}a^{4}}{R^{8}}\right) - \frac{528}{49}\left(\frac{r_{0}^{2}a^{6}}{R^{8}}\right) - \frac{1824}{49}\left(\frac{r_{0}^{4}a^{6}}{R^{10}}\right) - \frac{28}{3}\left(\frac{r_{0}^{2}a^{8}}{R^{10}}\right) - \frac{7168}{147}\left(\frac{r_{0}^{4}a^{4}}{R^{12}}\right) - \frac{798}{49}\left(\frac{r_{0}^{4}a^{4}}{R^{8}}\right) - \frac{528}{49}\left(\frac{r_{0}^{2}a^{6}}{R^{8}}\right) - \frac{1824}{49}\left(\frac{r_{0}^{4}a^{6}}{R^{10}}\right) - \frac{28}{3}\left(\frac{r_{0}^{2}a^{8}}{R^{10}}\right) - \frac{166}{147}\left(\frac{r_{0}^{2}a^{8}}{R^{10}}\right) - \frac{166}{147}\left(\frac{r_{0}^{2}a^{8}}{$
	$\left[-\frac{4096}{49}\left(\frac{r_0^6 a^6}{R^{12}}\right) - \frac{136}{3}\left(\frac{r_0^4 a^8}{R^{12}}\right) - \frac{64}{11}\left(\frac{r_0^2 a^{10}}{R^{12}}\right)\right]$
	(4.45)

Uwzględniając wzór (4.13) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

W tablicach 4.8, 4.9, 4.10 oraz na rys. 4.7, 4.8, 4.9 przedstawiono zależności współczynnika wzorcowania od położenia i wymiarów czujnika.

Tab. 4.8. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w cięciwie rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2) i wartości m = 4.

	a/R=0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
$r_0/R=0$	0,8333	0,8334	0,8385	0,8547
$r_0/R = 0,01$	0,8333	0,8333	0,8386	0,8548
$r_0/R = 0,05$	0,8340	0,8342	0,8392	0,8554
$r_0/R = 0,1$	0,8361	0,8363	0,8413	0,8576
$r_0/R = 0,3$	0,8594	0,8597	0,8651	0,8823
$r_0/R = 0,5$	0,9195	0,9197	0,9259	0,9456
$r_0/R = 0,7$	1,0990	1,0994	1,1081	1,1365



Rys. 4.7. Zależność współczynnika wzorcowania od współczynnika kształtu czujnika w różnych odległościach od osi rurociągu dla przepływu laminarnego opisanego wzorem (3.2) i wartości m = 8.

Tab. 4.9. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w cięciwie rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2) i wartości m = 8.

	a/R=0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
$r_0/R = 0$	0,9000	0,9000	0,9004	0,9019
$r_0/R = 0,01$	0,9000	0,9000	0,9005	0,9020
$r_0/R = 0,05$	0,9003	0,9003	0,9008	0,9023
$r_0/R=0,1$	0,9013	0,9013	0,9018	0,9035
$r_0/R=0,3$	0,9131	0,9132	0,9140	0,9167
$r_0/R=0,5$	0,9491	0,9491	0,9500	0,9529
$r_0/R=0,7$	1,0770	1,0771	1,0782	1,0819



Rys. 4.8. Zależność współczynnika wzorcowania od współczynnika kształtu czujnika w różnych odległościach od osi rurociągu dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2) i wartości m = 8.

Tab. 4.10. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w cięciwie rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2) i wartości m = 12.

	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R=0,1
$r_0/R = 0$	0,9285	0,9285	0,9290	0,9304
$r_0/R = 0,01$	0,9285	0,9285	0,9290	0,9304
$r_0/R = 0,05$	0,9287	0,9288	0,9292	0,9307
$r_0/R=0,1$	0,9294	0,9294	0,9299	0,9315
$r_0/R=0,3$	0,9373	0,9374	0,9378	0,9393
$r_0/R=0,5$	0,9658	0,9658	0,9663	0,9678
$r_0/R = 0,7$	1,0959	1,0959	1,0965	1,0985



Rys. 4.9. Zależność współczynnika wzorcowania od współczynnika kształtu czujnika w różnych odległościach od osi rurociągu dla przepływu laminarnego opisanego wzorem (3.2) i wartości m = 12.

Dokonując analizy wzorów (4.41), (4.43), (4.45) można zauważyć, iż rozmiar czujnika oraz odległość od osi rurociągu w przypadku przepływu turbulentnego, którego rozkład prędkości opisany jest wzorem (3.2) mają niewielki wpływ na współczynnik wzorcowania co przedstawiono w tablicach 4.8, 4.9, 4.10 oraz na rysunkach 4.7, 4.8, 4.9. Gdy odległość od osi rurociągu wzrasta to wpływ kształtu czujnika na współczynnik wzorcowania również staje się większy. Wraz ze wzrostem wykładnika potęgowego m oraz odległości czujnika od osi rurociągu współczynnik wzorcowania się w coraz to mniejszym zakresie.

4.1.2.3. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3)

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika dla m = 4 oblicza się ze

wzoru:

Uwzględniając wzór (4.20) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{2(4+b)-4b}{12\left[\frac{4}{5}-\frac{2b}{15}-\frac{2b}{3}\left(\frac{r_0}{R}\right)^2 - \frac{b}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{4(1-b)}{15}\left(\frac{r_0}{R}\right)^2 - \frac{2(1-b)}{9}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{8(1-b)}{15}\left(\frac{r_0}{R}\right)^4 - \frac{(1-b)}{5}\left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{16(1-b)}{9}\left(\frac{r_0^2a^2}{R^4}\right)\right]}$$
(4.47)

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika dla m = 8 oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{R^{2} - r_{0}^{2}} v_{m} \left[1 - b\left(\frac{r}{R}\right)^{2} - (1 - b)\left(\frac{r}{R}\right)^{2} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{R^{2} - r_{0}^{2}} \left[1 - b\left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{2} - (1 - b)\left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{2} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{R^{2} - r_{0}^{2}} \left[1 - b\left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{2} - (1 - b)\left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{2} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{R^{2} - r_{0}^{2}} \left[1 - b\left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{2} - (1 - b)\left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{2} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \int_{0}^{R^{2} - r_{0}^{2}} \left[1 - b\left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{2} - (1 - b)\left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R}\right)^{2} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} - a} \int_{0}^{R^{2} - \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} - \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{0}^{r_{0} - \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})$$

Uwzględniając wzór (4.23) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{2(8+b)-8b}{\left[\frac{8}{9}-\frac{2b}{9}-\frac{2b}{3}\left(\frac{r_0}{R}\right)^2 - \frac{b}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{8(1-b)}{63}\left(\frac{r_0}{R}\right)^2 - \frac{16(1-b)}{105}\left(\frac{r_0}{R}\right)^4 - \frac{192(1-b)}{945}\left(\frac{r_0}{R}\right)^6 - \frac{384(1-b)}{945}\left(\frac{r_0}{R}\right)^8 - \frac{20}{945}\left(\frac{4(1-b)}{21}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{6(1-b)}{25}\left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{4(1-b)}{21}\left(\frac{a}{R}\right)^6 - \frac{(1-b)}{9}\left(\frac{a}{R}\right)^8 - \frac{64(1-b)}{35}\left(\frac{r_0^2a^2}{R^4}\right) - \frac{1792(1-b)}{735}\left(\frac{r_0^4a^2}{R^6}\right) - \frac{4608(1-b)}{945}\left(\frac{r_0^6a^2}{R^8}\right) - \frac{88(1-b)}{25}\left(\frac{r_0^2a^4}{R^6}\right) - \frac{256(1-b)}{25}\left(\frac{r_0^4a^4}{R^8}\right) - \frac{80(1-b)}{21}\left(\frac{r_0^2a^6}{R^8}\right) - \frac{80(1-b)}{21}\left(\frac{r_0^2a^6}{R^8}\right) - \frac{84(1-b)}{21}\left(\frac{r_0^4a^4}{R^8}\right) - \frac{80(1-b)}{21}\left(\frac{r_0^2a^6}{R^8}\right) - \frac{1792(1-b)}{21}\left(\frac{r_0^4a^6}{R^8}\right) - \frac{1792(1-b)}{21}\left($$

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika dla m = 12 oblicza się ze wzoru:

$$\begin{aligned} v_{c} &= \frac{1}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} v_{m} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{m} \right] dxdy = \frac{v_{m}}{2a(R^{2} - r_{0}^{2})^{0.5}} \int_{r_{0} - a}^{r_{0} + a} \sqrt{R^{2} - r_{0}^{2}}} \left[1 - \left(\frac{(x^{2} + y^{2})^{0.5}}{R} \right)^{12} \right] dxdy = \left[\frac{12}{13} - \frac{10b}{39} - \frac{2b}{3} \left(\frac{r_{0}}{R} \right)^{2} - \frac{12(1 - b)}{143} \left(\frac{r_{0}}{R} \right)^{2} - \frac{40(1 - b)}{429} \left(\frac{r_{0}}{R} \right)^{4} - \frac{2240(1 - b)}{21021} \left(\frac{r_{0}}{R} \right)^{6} - \left[-\frac{896(1 - b)}{7007} \left(\frac{r_{0}}{R} \right)^{8} - \frac{3584(1 - b)}{21021} \left(\frac{r_{0}}{R} \right)^{10} - \frac{7168(1 - b)}{21021} \left(\frac{r_{0}}{R} \right)^{12} - \frac{2(1 - b)}{11} \left(\frac{a}{R} \right)^{2} - \frac{b}{3} \left(\frac{a}{R} \right)^{2} -$$

Uwzględniając wzór (4.26) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{2(12+b)-12b}{\left[\frac{12}{13}-\frac{10b}{39}-\frac{2b}{3}\left(\frac{r_0}{R}\right)^2 - \frac{12(1-b)}{143}\left(\frac{r_0}{R}\right)^2 - \frac{40(1-b)}{429}\left(\frac{r_0}{R}\right)^4 - \frac{2240(1-b)}{21021}\left(\frac{r_0}{R}\right)^6 - \frac{896(1-b)}{7007}\left(\frac{r_0}{R}\right)^8 - \frac{3584(1-b)}{21021}\left(\frac{r_0}{R}\right)^{10} - \frac{7168(1-b)}{21021}\left(\frac{r_0}{R}\right)^{12} - \frac{2(1-b)}{11}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{-b}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{3584(1-b)}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^4 - \frac{20(1-b)}{49}\left(\frac{a}{R}\right)^6 - \frac{(1-b)}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^8 - \frac{2(1-b)}{11}\left(\frac{a}{R}\right)^{10} - \frac{(1-b)}{13}\left(\frac{a}{R}\right)^{12} - \frac{-b}{3}\left(\frac{a}{R}\right)^2 - \frac{1064(1-b)}{1617}\left(\frac{r_0^4a^2}{R^6}\right) - \frac{1792(1-b)}{539}\left(\frac{r_0^6a^2}{R^8}\right) - \frac{5943(1-b)}{1617}\left(\frac{r_0^8a^2}{R^{10}}\right) - \frac{-14336(1-b)}{1617}\left(\frac{r_0^{10}a^2}{R^{12}}\right) - \frac{1064(1-b)}{147}\left(\frac{r_0^2a^4}{R^6}\right) - \frac{3584(1-b)}{147}\left(\frac{r_0^6a^4}{R^{10}}\right) - \frac{7168(1-b)}{147}\left(\frac{r_0^8a^4}{R^{12}}\right) - \frac{798(1-b)}{49}\left(\frac{r_0^4a^4}{R^8}\right) - \frac{528(1-b)}{49}\left(\frac{r_0^2a^6}{R^8}\right) - \frac{1824(1-b)}{49}\left(\frac{r_0^4a^6}{R^{10}}\right) - \frac{4096(1-b)}{49}\left(\frac{r_0^6a^6}{R^{12}}\right) - \frac{28(1-b)}{3}\left(\frac{r_0^2a^8}{R^{10}}\right) - \frac{136(1-b)}{11}\left(\frac{r_0^2a^8}{R^{12}}\right) - \frac{64(1-b)}{11}\left(\frac{r_0^2a^{10}}{R^{12}}\right) - \frac{136(1-b)}{11}\left(\frac{r_0^4a^8}{R^{12}}\right) - \frac{64(1-b)}{11}\left(\frac{r_0^2a^{10}}{R^{12}}\right) - \frac{136(1-b)}{11}\left(\frac{r_0^2a^{10}}{R^{12}}\right) - \frac{136(1-b)}{11}\left(\frac{r_0^2a^{10}}{R^$$

W tablicach 4.11, 4.12, 4.13 podano zależności współczynnika wzorcowania od położenia i wymiarów czujnika.

Tab. 4.11. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w cięciwie rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.5) i wartości m = 4.

	b	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R=0,1
$r_0/R = 0$	0,2	0,8189	0,8189	0,8196	0,8215
	0,4	0,8035	0,8036	0,8042	0,8064
	0,6	0,7870	0,7870	0,7878	0,7902
	0,8	0,7692	0,7692	0,7700	0,7727
	1	0,7500	0,7500	0,7509	0,7537
$r_0/R = 0,01$	0,2	0,8190	0,8190	0,8196	0,8216
	0,4	0,8036	0,8036	0,8043	0,8065
	0,6	0,7870	0,7871	0,7878	0,7902
	0,8	0,7692	0,7693	0,7701	0,7727
	1	0,7500	0,7501	0,7510	0,7538
$r_0/R = 0.05$	0,2	0,8198	0,8199	0,8205	0,8225
	0,4	0,8047	0,8047	0,8054	0,8076
	0,6	0,7884	0,7884	0,7892	0,7916
	0,8	0,7708	0,7708	0,7717	0,7743
	1	0,7518	0,7519	0,7528	0,7556
$r_0/R = 0,1$	0,2	0,8226	0,8227	0,8233	0,8254
	0,4	0,8082	0,8082	0,8089	0,8112
	0,6	0,8284	0,8285	0,8295	0,8326
	0,8	0,7758	0,7758	0,7766	0,7793
	1	0,7575	0,7576	0,7585	0,7614

Tab. 4.12. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w cięciwie rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.5) i wartości m = 8.

	b	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
$r_0/R = 0$	0,2	0,8763	0,8763	0,8768	0,8786
	0,4	0,8500	0,8500	0,8506	0,8526
	0,6	0,8205	0,8206	0,8213	0,8236
	0,8	0,7875	0,7875	0,7883	0,7908
	1	0,7500	0,7500	0,7509	0,7537
$r_0/R = 0,01$	0,2	0,8763	0,8763	0,8769	0,8786
	0,4	0,8500	0,8500	0,8506	0,8526
	0,6	0,8206	0,8206	0,8213	0,8236
	0,8	0,7875	0,7875	0,7884	0,7909
	1	0,7500	0,7501	0,7510	0,7538
$r_0/R = 0.05$	0,2	0,8769	0,8769	0,8775	0,8792
	0,4	0,8509	0,8509	0,8514	0,8536
	0,6	0,8218	0,8218	0,8225	0,8248
	0,8	0,7890	0,7890	0,7899	0,7924
	1	0,7518	0,7519	0,7528	0,7556
$r_0/R=0,1$	0,2	0,8787	0,8787	0,8793	0,8812S
	0,4	0,8536	0,8536	0,8543	0,8564
	0,6	0,8255	0,8255	0,8263	0,8286
	0,8	0,7937	0,7937	0,7946	0,7972
	1	0,7575	0,7576	0,7585	0,7614

Tab. 4.13. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w cięciwie rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.5) i wartości m = 12.

	b	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R=0,1
$r_0/R = 0$	0,2	0,9012	0,9012	0,9018	0,9034
	0,4	0,8705	0,8705	0,8711	0,8731
	0,6	0,8357	0,8357	0,8364	0,8387
	0,8	0,7959	0,7959	0,7967	0,7993
	1	0,7500	0,7500	0,7509	0,7537
$r_0/R = 0,01$	0,2	0,9012	0,9013	0,9018	0,9035
	0,4	0,8705	0,8705	0,8712	0,8731
	0,6	0,8357	0,8357	0,8365	0,8387
	0,8	0,7959	0,7960	0,7968	0,7993
	1	0,7500	0,7501	0,7510	0,7538
$r_0/R = 0.05$	0,2	0,9017	0,9018	0,9023	0,9040
	0,4	0,8713	0,8714	0,8720	0,8740
	0,6	0,8368	0,8369	0,8376	0,8399
	0,8	0,7974	0,7974	0,7982	0,8008
	1	0,7518	0,7519	0,7528	0,7556
$r_0/R=0,1$	0,2	0,9033	0,9033	0,9039	0,9057
	0,4	0,8739	0,8740	0,8746	0,8767
	0,6	0,8404	0,8404	0,8412	0,8435
	0,8	0,8020	0,8021	0,8029	0,8055
	1	0,7575	0,7576	0,7585	0,7614

Dokonując analizy wzorów (4.47), (4.49), (4.51) można zauważyć, że rozmiar czujnika oraz odległość czujnika od osi rurociągu w przypadku przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3) mają niewielki wpływ na współczynnik wzorcowania. W miarę wzrostu stałej *b* kształt czujnika oraz odległość czujnika od osi rurociągu mają większy wpływ na współczynnik wzorcowania. Wraz z wzrostem wykładnika potęgowego *m* współczynnik wzorcowania wzrasta dość znacznie.

Analizując wyniki można zauważyć, że zmniejszenie parametru *b* powoduje wzrost współczynnika wzorcowania. Zwiększenie odległości czujnika od osi rurociągu powoduje nieznaczny wzrost współczynnika wzorcowania.

4.1.3. Podsumowanie

W 4.1.2 rozdziałach 4.1.1 oraz dokonano analizy metrologicznej przepływomierzy próbkujących z czujnikiem jednopowierzchniowym modelowanym prostokątem i umieszczonym w średnicy oraz w cięciwie rurociągu. Na podstawie powyższych analiz zostanie podjęta próba wskazania takiego położenia oraz rozmiaru czujnika, dla którego współczynnik wzorcowania k będzie się zmieniał w jak najmniejszym zakresie. Gdy rozkład prędkości modelowany jest wzorem (3.2) można zauważyć, że w miarę wzrostu parametru m zmiany współczynnika wzorcowania k są mniejsze. Zmiany te są również mniejsze wraz ze wzrostem stosunku powierzchni czujnika do powierzchni przekroju poprzecznego rurociągu. Im większa jest odległość czujnika od średnicy rurociągu, tym zmiany współczynnika wzorcowania są zdecydowanie większe.



Rys. 4.10. Zależność współczynnika wzorcowania od powierzchni czynnej czujnika dla przepływu modelowanego wzorem (3.2) przy $r_0/R = 0$ (czujnik położony w średnicy rurociągu).



Rys. 4.11. Zależność współczynnika wzorcowania od powierzchni czynnej czujnika dla przepływu modelowanego wzorem (3.2) przy $r_0/R = 0.05$ (czujnik położony w cięciwie rurociągu).



Rys. 4.12. Zależność współczynnika wzorcowania od powierzchni czynnej czujnika dla przepływu modelowanego wzorem (3.2) przy $r_0/R = 0.5$.

Analizując wpływ rozmiaru powierzchni czynnej czujnika przepływomierza próbkującego i umieszczenia go w rurociągu dla przepływu modelowanego wzorem (3.2) można zauważyć, że istnieje takie położenie czujnika (w przybliżeniu $r_0/R = 0,4$), dla którego wartość współczynnika wzorcowania praktycznie nie zależy od rozmiarów czujnika, co pokazano na rysunkach 4.13 do 4.15.



Rys. 4.13. Zależność współczynnika wzorcowania od umiejscowienia czujnika dla przepływu modelowanego wzorem (3.2) przy a/R = 0.



Rys. 4.14. Zależność współczynnika wzorcowania od umiejscowienia czujnika dla przepływu modelowanego wzorem (3.2) przy a/R = 0.05.



Rys. 4.15. Zależność współczynnika wzorcowania od umiejscowienia czujnika dla przepływu modelowanego wzorem (3.2) przy a/R = 0,1.

Gdy przepływ modelowany jest wzorem (3.3) można zauważyć, że w miarę wzrostu parametru *m* zmiany współczynnika wzorcowania *k* są mniejsze. Zmiany te są również mniejsze wraz ze wzrostem powierzchni czujnika a/R. Im większa jest odległość czujnika od średnicy rurociągu, tym zmiany współczynnika wzorcowania są praktycznie mniej zauważalne. Wraz ze wzrostem wartości parametru *b* (uwzględniając zmiany rozmiarów czujnika oraz odległości czujnika od średnicy rurociągu) wartości współczynnika wzorcowania różnią się coraz mniej między sobą (przy zmianach *m*, co odpowiada zmianom wartości wielkości mierzonej). Przy b = 1wartość współczynnika wzorcowania się praktycznie nie zmienia. Odpowiednie zależności przedstawiono na rysunku 4.16 oraz 4.17.



Rys. 4.16. Zależność współczynnika wzorcowania od parametru *b* dla przepływu modelowanego wzorem (3.3) przy a/R = 0,01, $r_0/R = 0,01$.



Rys. 4.17. Zależność współczynnika wzorcowania od parametru *b* dla przepływu modelowanego wzorem (3.3) przy a/R = 0,1, $r_0/R = 0,1$.

4.2. Wyznaczanie współczynnika wzorcowania dla osiowosymetrycznych rozkładów prędkości w warunkach odbiegających od normalnych

4.2.1. Czujnik powierzchniowy umieszczony w średnicy rurociągu

Zniekształcony rozkład prędkości jest modelowany wzorem (3.10). Prędkość średnią po przekroju przepływowym oblicza się ze wzoru:

$$v_{sr} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R v_m \left[\left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} + h \frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{k}} \right] 2\pi r dr = 2v_m \left[\frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} + \frac{hk^3}{(k+1)(k+2)(k+3)} \right]$$
(4.52)

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{v_{m}}{36} \begin{bmatrix} 1+4(0,5)^{\frac{1}{n}}+4\left(1-\frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{n}}+\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{n}}+16\left(1-\frac{1}{2}\sqrt{1+\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}}+4\left(1-\sqrt{\frac{1}{4}+\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}}+4\left(1-\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}}+16\left(1-\frac{1}{2}\sqrt{1+\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}}+4\left(1-\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}}+4\left(1-\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}}+2h(0,5)^{\frac{1}{k}}+2h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{k}}+h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}}+8h\sqrt{1+\left(\frac{a}{R}\right)}\left(1-\frac{1}{2}\sqrt{1+\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}}+16\left(1-\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}}+4h\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)}\left(1-\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}}+h\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}}+2h(0,5)^{\frac{1}{k}}+2h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{k}}+h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}}+8h\sqrt{1+\frac{a}{R}\left(1-\frac{1}{2}\sqrt{1+\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}}+2h(0,5)^{\frac{1}{k}}+2h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{k}}+h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}}+8h\sqrt{1+\frac{a}{R}\left(1-\frac{1}{2}\sqrt{1+\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}}+16\left(1-\sqrt{1+\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}}+2h(0,5)^{\frac{1}{k}}+2h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{k}}+h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}}+8h\sqrt{1+\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}}}\right)^{\frac{1}{k}}+2h(0,5)^{\frac{1}{k}}+2h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{k}}+h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}}+8h\sqrt{1+\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}}}\right)^{\frac{1}{k}}+2h(0,5)^{\frac{1}{k}}+2h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{k}}+h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}}+8h\sqrt{1+\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}}}\right)^{\frac{1}{k}}$$

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4), wynosi:

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{\frac{72[n^2(k+1)(k+2)(k+3) + hk^3(n+1)(2n+1)]}{(n+1)(2n+1)(k+1)(2k+1)(3k+1)}}{\left[1+4(0,5)^{\frac{1}{n}}+4\left(1-\frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{n}}+\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{n}}+16\left(1-\frac{1}{2}\sqrt{1+\left(\frac{a}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}}+4\left(1-\sqrt{\frac{1}{4}+\left(\frac{a}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}}+4\left(1-\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}}+\frac{1}{4}\left(1-\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}}+4\left(1-\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}}+\frac{1}{4}\left(1-\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}}+2h(0,5)^{\frac{1}{k}}+2h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{k}}+h\frac{a}{R}\left(1-\frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}}+8h\sqrt{1+\left(\frac{a}{R}\right)}\left(1-\frac{1}{2}\sqrt{1+\left(\frac{a}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}}+\frac{1}{4}h\sqrt{\frac{1}{4}+\left(\frac{a}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{k}}+4h\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)}\left(1-\sqrt{1+\frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{k}}+h\sqrt{1+\left(\frac{a}{R}\right)}\left(1-\sqrt{1+\left(\frac{a}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{k}}\right)^{\frac{1}{k}}$$

$$(4.54)$$

Dokonując analizy wzoru (4.54) można zauważyć, iż kształt czujnika w przypadku zniekształconego rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.10) ma duży wpływ na współczynnik wzorcowania, co przedstawiono w tablicach 4.14, 4.15, 4.16, 4.17. Najmniejszy wpływ rozmiarów czujnika na współczynnik wzorcowania można zauważyć przy h = 0,5. W przypadku tego wzoru występują duże zmiany współczynnika wzorcowania dla czujnika odcinkowego (a/R = 0) w stosunku do powierzchniowego. Wzrost liczby Reynoldsa oraz parametru k powoduje wzrost współczynnika wzorcowania. Wzrost parametru h powoduje większy wpływ zmiany kształtu czujnika na współczynnik wzorcowania.

Tab. 4.14. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w średnicy rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla zniekształconego rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.10), dla k = 7, n = 6,5, $Re = 10^4$.

	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
h = 0,5	1,3973	1,3968	1,3950	1,3927
h = 1	1,6459	1,6448	1,6401	1,6336
<i>h</i> = 1,5	1,8329	1,8312	1,8238	1,8135
<i>h</i> = 2	1,9787	1,9764	1,9667	1,9530

Tab. 4.15. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w średnicy rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla zniekształconego rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.10), dla k = 9, n = 8,6, $Re = 10^5$.

	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
h = 0,5	1,4945	1,4939	1,4918	1,4888
<i>h</i> = 1	1,7895	1,7882	1,7829	1,7754
<i>h</i> = 1,5	2,0113	2,0094	2,0010	1,9895
<i>h</i> = 2	2,1842	2,1817	2,1709	2,1554

zkładu prędkości opisanego wzorem (3.10), dla $k = 11$, $n = 10,7$, $Re = 10^6$.						
	a/R=0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1		
<i>h</i> = 0,5	1,5644	1,5639	1,5614	1,5580		
h = 1	1,8945	1,8932	1,8875	1,8793		
<i>h</i> = 1,5	2,3435	2,2413	2,2320	2,2185		
h = 2	2,4528	2,4500	2,4377	2,4199		

Tab. 4.16. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w średnicy rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla zniekształconego rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.10), dla k = 11, n = 10,7, $Re = 10^6$.

Tab. 4.17. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w średnicy rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla zniekształconego rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.10), dla k = 13, n = 12,8, $Re = 10^7$.

	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
<i>h</i> = 0,5	1,6183	1,6167	1,6141	1,6104
<i>h</i> = 1	1,9748	1,9734	1,9637	1,9586
<i>h</i> = 1,5	2,3435	2,2413	2,2320	2,2185
<i>h</i> = 2	2,4528	2,4500	2,4377	2,4199

Najmniejszy wpływ rozmiarów czujnika na współczynnik wzorcowania można zauważyć przy h = 0,5. W tym przypadku występują duże zmiany współczynnika wzorcowania dla czujnika odcinkowego (a/R=0) w stosunku do powierzchniowego. Wzrost liczby Reynoldsa oraz parametru k powoduje wzrost współczynnika wzorcowania. Wzrost parametru h powoduje większy wpływ zmiany rozmiarów czujnika na współczynnik wzorcowania.

4.2.2. Czujnik powierzchniowy umieszczony w cięciwie rurociągu

Umiejscowienie czujnika pokazano na rysunku 4.5. Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika dla rozkładu prędkości modelowanego wzorem (3.10) oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{a} v_{m} \left[\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + h\frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{aR} \int_{0}^{a} \int_{0}^{a} \left[\left(1 - \frac{\sqrt{(x^{2} + y^{2})}}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + h\frac{\sqrt{(x^{2} + y^{2})}}{R} \left(1 - \frac{\sqrt{(x^{2} + y^{2})}}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \right] dx dy = \frac{v_{m}}{R} \int_{0}^{a} \int_{0}^{a} \left[\left(1 - \frac{1}{2\sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{2}}} + \frac{1}{4\left(1 - \frac{1}{2\sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{2}}}\right)^{\frac{1}{n}}} + 4\left(1 - \frac{1}{2\sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{2}}}\right)^{\frac{1}{n}} + 16\left(1 - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{4\left(\frac{r}{R}\right)^{2}}} + \frac{1}{4\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}} + 4\left(1 - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1$$

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4) wynosi:

$$k = \frac{\frac{2[n^{2}(k+1)(k+2)(k+3) + hk^{3}(n+1)(2n+1)]}{(n+1)(2n+1)(k+1)(2k+1)((3k+1))}}{\left[1 + 4\left(1 - \frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + 4\left(1 - \frac{1}{2}\sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}} + 16\left(1 - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{4}\left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}} + \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}} + 4\left(1 - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{4}\left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}} + \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}} + 4\left(1 - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{4}\left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}} + \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}} + 4h\frac{a}{2R}\left(1 - \frac{a}{2R}\right)^{\frac{1}{k}} + h\frac{a}{R}\left(1 - \frac{a}{R}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}} + 16h\sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{4}\left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 16h\sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{4}\left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\left(1 - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{4}\left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{4}\left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{4}\left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{a}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + 4h\sqrt{1 - \left(\frac{r_{o}}{R}\right)^{2} + \frac{$$

Dokonując analizy wzoru (4.56) można zauważyć, iż kształt czujnika oraz odległość czujnika od osi rurociągu w przypadku przepływu zniekształconego opisanego wzorem (3.10) mają duży wpływ na współczynnik wzorcowania co przedstawiono w tablicach numer 4.18, 4.19, 4.20, 4.21.

Tab. 4.18. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w cięciwie rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.10), dla k = 7, n = 6,5, $Re = 10^4$.

	h	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
$r_0/R = 0$	0,5	1,3973	1,3968	1,3950	1,3927
	1	1,6459	1,6448	1,6402	1,6336
	1,5	1,8329	1,8312	1,8238	1,8135
	2	1,9787	1,9764	1,9667	1,9530
$r_0/R = 0,01$	0,5	1,3166	1,3312	1,3814	1,3790
	1	1,5364	1,5557	1,6218	1,6154
	1,5	1,6991	1,7223	1,8013	1,7916
	2	1,8243	1,8507	1,9412	1,9278
$r_0/R = 0,05$	0,5	1,2709	1,2707	1,2918	1,3705
	1	1,4762	1,4757	1,5018	1,6040
	1,5	1,6270	1,6261	1,6562	1,7787
	2	1,7425	1,7411	1,7745	1,9127
$r_0/R = 0,1$	0,5	1,2450	1,2447	1,2450	1,2683
	1	1,4432	1,4432	1,4410	1,4681
	1,5	1,5880	1,5868	1,5840	1,6155
	2	1,6986	1,6971	1,6929	1,7272

Tab. 4.19. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w cięciwie rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.10), dla k = 9, n = 8,6, $Re = 10^5$.

	h	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R=0,1	
$r_0/R = 0$	0,5	1,4945	1,4993	1,4918	1,4888	
	1	1,7895	1,7882	1,7829	1,7754	
	1,5	2,0113	2,0094	2,0012	1,9895	
	2	2,1842	2,1817	2,1709	2,1554	
$r_0/R = 0,01$	0,5	1,3765	1,3296	1,4711	1,4682	
	1	1,6267	1,3969	1,7548	1,7475	
	1,5	1,8143	1,8469	1,9667	1,9554	
	2	1,9567	1,9939	2,1310	2,1161	
$r_0/R = 0.05$	0,5	1,3299	1,3296	1,3558	1,4592	
	1	1,5662	1,5659	1,5991	1,7355	
	1,5	1,7390	1,7386	1,7773	1,9409	
	2	1,8717	1,8703	1,9134	1,8715	
$r_0/R=0,1$	0,5	1,3054	1,3051	1,3050	1,3328	
	1	1,5351	1,5343	1,5325	1,5566	
	1,5	1,7024	1,7012	1,6978	1,7368	
	2	1,8298	1,8282	18234	1,8662	

Tab. 4.20. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w cięciwie rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.10), dla k = 11, n = 10,7, $Re = 10^6$.

	h	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
$r_0/R=0$	0,5	1,5644	1,5639	1,5614	1,5580
	1	1,8945	1,8932	1,8875	1,8793
	1,5	2,1427	2,1407	2,1318	2,1191
	2	2,3361	2,334	2,3218	2,2050
$r_0/R = 0,01$	0,5	1,4155	1,4403	1,5348	1,5315
	1	1,6902	1,7235	1,8507	1,8429
	1,5	1,8918	2,0950	2,0865	2,0744
	2	2,0461	2,0919	2,2693	2,2533
$r_0/R = 0.05$	0,5	1,3703	1,3700	1,3999	1,5224
	1	1,6299	1,6292	1,6675	1,8309
	1,5	1,8190	1,8179	1,8629	2,0598
	2	1,930	1,9615	2,0119	2,2366
$r_0/R = 0,1$	0,5	1,3479	1,3475	1,3472	1,3782
	1	1,6008	1,5999	1,5977	1,6365
	1,5	1,7845	1,7832	1,7794	1,8240
	2	1,9241	1,9224	1,9117	1,9665

Tab. 4.21. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego umieszczonego w cięciwie rurociągu o powierzchni czynnej aproksymowanej prostokątem dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.10), dla k = 13, n = 12,8, $Re = 10^7$

	h	a/R = 0	a/R = 0,01	a/R = 0,05	a/R = 0,1
$r_0/R=0$	0,5	1,6183	1,6167	1,6141	1,6104
	1	1,9748	19734	1,9637	1,9586
	1,5	2,2435	2,2413	2,2320	2,2188
	2	2,4528	2,4500	2,4377	2,4199
$r_0/R = 0,01$	0,5	1,4427	1,4711	1,5824	1,5788
	1	1,7343	1,7724	1,9233	1,9149
	1,5	1,9475	1,9936	2,1775	2,1646
	2	2,1102	2,1630	2,3743	2,3547
$r_0/R = 0,05$	0,5	1,400	1,3997	1,4324	1,5702
	1	1,6768	1,6761	1,7184	1,9033
	1,5	1,8781	1,8769	1,9268	2,1505
	2	2,0310	2,0294	2,0855	2,3412
$r_0/R=0,1$	0,5	1,3795	1,3791	1,3786	1,4121
	1	1,6501	1,6492	1,6468	1,6890
	1,5	1,8464	1,8450	1,8408	1,8898
	2	1,9952	1,9935	1,9877	2,0421

Najmniejszy wpływ szerokości czujnika na współczynnik wzorcowania można zauważyć przy h = 0,5. W przypadku tego wzoru występują duże zmiany współczynnika wzorcowania czujnika odcinkowego (a/R = 0) w stosunku do powierzchniowego. Wzrost odległości czujnika od osi rurociągu, wzrost liczby Reynoldsa oraz parametru k powoduje wzrost współczynnika wzorcowania. Wzrost parametru h powoduje większy wpływ zmiany kształtu czujnika oraz odległości czujnika od osi rurociągu na współczynnik wzorcowania.

Parametry wpływające na zniekształcenie rozkładu (k, h) wpływają znacznie na współczynnik wzorcowania powodując duże zróżnicowanie wyników. Gdy wzrasta powierzchnia czujnika współczynnik wzorcowania maleje.

5. Analiza metrologiczna przepływomierzy próbkujących z czujnikami powierzchniowymi o powierzchni kołowej

Czujnik o kołowej powierzchni czynnej jest czujnikiem częściej występującym niż czujniki o powierzchni czynnej prostokątnej. Schemat umiejscowienia czujnika o powierzchni czynnej kołowej przedstawiony jest na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Schemat czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej:

R – promień wewnętrzny rurociągu, r_{co} - odległość środka czujnika od osi rurociągu.

W celu obliczenia prędkości średniej w powierzchni czynnej czujnika należy rozpatrzyć sytuację przedstawioną na rysunku 5.2 [Kries2006].



Rys. 5.2. Schemat sytuacji w powierzchni czynnej czujnika: R_c – promień czujnika, r_c – promień bieżący w czujniku, r – promień bieżący w rurociągu, φ – współrzędna kątowa.

Z twierdzenia kosinusów można wyznaczyć promień bieżący w rurociągu:

$$r^{2} = r_{co}^{2} + r_{c}^{2} + 2r_{co}r_{c}\cos(90^{\circ} - \varphi)$$
(5.1)

Z tego równania:

$$r = \left(r_{co}^2 + r_c^2 + 2r_{co}r_c\sin\varphi\right)^{0.5}$$
(5.2)

Średnią prędkość w powierzchni czynnej czujnika można wyliczyć z następującej całki:

$$v_{c} = \frac{1}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}} \int_{0}^{2\pi} v(r) r_{c} dr_{c} d\varphi$$
(5.3)

gdzie: v(r) - rozkład prędkość w przekroju poprzecznym rurociągu opisany wzorami (3.1), (3.2), (3.3), (3.4). Poniżej zostaną policzone współczynniki wzorcowania dla rozkładów prędkości opisanych wzorami (3.1), (3.2), (3.3), (3.4).

5.1. Współczynnik wzorcowania dla przepływu laminarnego opisanego wzorem (3.1)

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{v_{m}}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c} 2\pi} \left[1 - \left(\frac{\left(r_{co}^{2} + r_{c}^{2} + 2r_{co}r_{c}\sin\varphi \right)^{0.5}}{R} \right)^{2} \right] r_{c} dr_{c} d\varphi = v_{m} \left[1 - \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{R_{c}}{R} \right)^{2} \right]$$
(5.4)

Uwzględniając wzór (4.3) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

$$k = \frac{v_{\dot{sr}}}{v_{c}} = \frac{1}{2\left[1 - \left(\frac{r_{co}}{R}\right)^{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{R_{c}}{R}\right)^{2}\right]}$$
(5.5)

Dokonując analizy wzoru (5.5) można zauważyć, że wielkość czujnika w przypadku przepływu laminarnego ma dosyć duży wpływ na współczynnik wzorcowania, co przedstawiono w tablicy 5.1. Wraz ze wzrostem odległości czujnika od osi rurociągu współczynnik wzorcowania rośnie co przedstawiono na rysunku 5.3.

Tab. 5.1. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej dla przepływu laminarnego opisanego wzorem (3.1).

	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R=0,01$	$R_{\rm c}/R=0,05$	$R_{\rm c}/R=0,1$	$R_{\rm c}/R=0,3$	$R_{\rm c}/R=0,5$
$r_{\rm co}/R=0$	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025	0,5235	0,5714
$r_{\rm co}/R = 0,01$	0,5000	0,5001	0,5006	0,5025	0,5236	0,5714
$r_{\rm co}/R = 0.05$	0,5012	0,5013	0,5018	0,5037	0,5249	0,5730
$r_{\rm co}/R=0,1$	0,5050	0,5050	0,5056	0,5076	0,5291	0,5780
$r_{\rm co}/R=0,3$	0,5493	0,5494	0,5502	0,5524	0,5780	0,6369
$r_{\rm co}/R=0,5$	0,6666	0,6667	0,6677	0,6711	0,7092	0,8000



Rys. 5.3. Zależność współczynnika wzorcowania od kształtu czujnika położonego w różnych odległościach od osi rurociągu dla przepływu laminarnego opisanego wzorem (3.1).

5.2. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2)

Dla m = 4 prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{v_{m}}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c} 2\pi} \left[1 - \left(\frac{\left(r_{co}^{2} + r_{c}^{2} + 2r_{co}r_{c}\sin\varphi \right)^{0.5}}{R} \right)^{4} \right] r_{c} dr_{c} d\varphi = v_{m} \left[1 - \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^{4} - \frac{2r_{co}^{2}R_{c}^{2}}{R^{4}} - \frac{1}{3} \left(\frac{R_{c}}{R} \right)^{4} \right]$$
(5.6)

Uwzględniając wzór (4.7) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_{c}} = \frac{2}{3\left[1 - \left(\frac{r_{co}}{R}\right)^{4} - \frac{2r_{co}^{2}R_{c}^{2}}{R^{4}} - \frac{1}{3}\left(\frac{R_{c}}{R}\right)^{4}\right]}$$
(5.7)

Dla m = 8 prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = v_{m} \left[1 - \left(\frac{r_{co}}{R}\right)^{8} - \frac{8r_{co}^{6}R_{c}^{2}}{R^{8}} - \frac{12r_{co}^{4}R_{c}^{4}}{R^{8}} - \frac{4r_{co}^{2}R_{c}^{6}}{R^{8}} - \frac{1}{5} \left(\frac{R_{c}}{R}\right)^{8} \right]$$
(5.8)

Uwzględniając wzór (4.10) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_c} = \frac{4}{5\left[1 - \left(\frac{r_{co}}{R}\right)^8 - \frac{8r_{co}^6R_c^2}{R^8} - \frac{12r_{co}^4R_c^4}{R^8} - \frac{4r_{co}^2R_c^6}{R^8} - \frac{1}{5}\left(\frac{R_c}{R}\right)^8\right]}$$
(5.9)

Dla m = 12 prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = v_{m} \left[1 - \left(\frac{r_{co}}{R}\right)^{12} - \frac{18r_{co}^{10}R_{c}^{2}}{R^{12}} - \frac{75r_{co}^{8}R_{c}^{4}}{R^{12}} - \frac{100r_{co}^{6}R_{c}^{6}}{R^{12}} - \frac{45r_{co}^{4}R_{c}^{8}}{R^{12}} - \frac{6r_{co}^{2}R_{c}^{10}}{R^{12}} - \frac{1}{7}\left(\frac{R_{c}}{R}\right)^{12} \right]$$
(5.10)

Uwzględniając wzór (4.10) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_c} = \frac{6}{7 \left[1 - \left(\frac{r_{co}}{R}\right)^{12} - \frac{18r_{co}^{10}R_c^2}{R^{12}} - \frac{75r_{co}^8R_c^4}{R^{12}} - \frac{100r_{co}^6R_c^6}{R^{12}} - \frac{45r_{co}^8R_c^8}{R^{12}} - \frac{6r_{co}^2R_c^{10}}{R^{12}} - \frac{1}{7}\left(\frac{R_c}{R}\right)^{12} \right]}$$
(5.11)

Dokonując analizy wzorów (5.7), (5.9), (5.11) można zauważyć, że wielkość powierzchni czynnej oraz odległość czujnika od środka rurociągu mają bardzo mały wpływ na współczynnik wzorcowania w przypadku przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2).
Dla dużej odległości czujnika od osi rurociągu oraz dla dużej powierzchni czynnej czujnika przy większych wartościach współczynnika *m* można zauważyć znaczący wpływ tych wymiarów na współczynnik wzorcowania co przedstawiono na rysunkach 5.4, 5.5, 5.6.

5 5 5		U	1 0	~ /		
	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R = 0,01$	$R_{\rm c}/R = 0.05$	$R_{\rm c}/R = 0,1$	$R_{\rm c}/R = 0,3$	$R_{\rm c}/R = 0,5$
$r_{\rm co}/R=0$	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6685	0,6809
$r_{\rm co}/R = 0,01$	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6685	0,6809
$r_{\rm co}/R=0,05$	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	0,6688	0,6817
$r_{\rm co}/R=0,1$	0,6667	0,6667	0,6668	0,6669	0,6697	0,6844
$r_{\rm co}/R=0,3$	0,6721	0,6721	0,6724	0,6734	0,6852	0,7199
$r_{\rm co}/R=0,5$	0,7111	0,7111	0,7121	0,7149	0,7492	0,8421

Tab. 5.2. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2) i wartości m = 4.

Tab. 5.3. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2) i wartości m = 8.

	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R = 0,01$	$R_{\rm c}/R = 0,05$	$R_{\rm c}/R = 0,1$	$R_{\rm c}/R=0,3$	$R_{\rm c}/R = 0,5$
$r_{\rm co}/R=0$	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8006
$r_{\rm co}/R = 0,01$	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8006
$r_{\rm co}/R = 0.05$	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8000	0,8007
$r_{\rm co}/R = 0,1$	0,8000	0,8000	0,8000	0,8001	0,8001	0,8011
$r_{\rm co}/R=0,3$	0,8001	0,8001	0,8001	0,8001	0,8013	0,8113
$r_{\rm co}/R=0,5$	0,8031	0,8031	0,8033	0,8042	0,8179	0,8873

	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R = 0,01$	$R_{\rm c}/R = 0,05$	$R_{\rm c}/R = 0,1$	$R_{\rm c}/R=0,3$	$R_{\rm c}/R=0,5$
$r_{\rm co}/R=0$	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571
$r_{\rm co}/R = 0,01$	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571
$r_{\rm co}/R=0,05$	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571
$r_{\rm co}/R=0,1$	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571	0,8571	0,8572
$r_{\rm co}/R=0,3$	0,8571	0,8571	0,8572	0,8572	0,8572	0,8601
$r_{\rm co}/R=0,5$	0,8573	0,8573	0,8573	0,8575	0,8619	0,9117

Tab. 5.4. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2) i wartości m = 12.



Rys. 5.4. Zależność współczynnika wzorcowania od średnicy czujnika położonego w różnych odległościach od osi rurociągu dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2) dla m = 4.



Rys. 5.5. Zależność współczynnika wzorcowania od średnicy czujnika położonego w różnych odległościach od osi rurociągu dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2) dla m = 8.



Rys. 5.6. Zależność współczynnika wzorcowania od średnicy czujnika położonego w różnych odległościach od osi rurociągu dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.2) dla m = 12.

5.3. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3)

Dla m = 4 prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{v_{m}}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}^{2} \pi} \int_{0}^{R_{c}^{2} \pi} \left[1 - b \left(\frac{\left(r_{C0}^{2} + r_{C}^{2} + 2r_{C0}r_{C}\sin\varphi\right)^{0,5}}{R} \right)^{2} - \left(1 - b \right) \left(\frac{\left(r_{C0}^{2} + r_{C}^{2} + 2r_{C0}r_{C}\sin\varphi\right)^{0,5}}{R} \right)^{4} \right] r_{c} dr_{c} d\varphi = v_{m} \left[1 - b \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^{2} - \frac{b}{2} \left(\frac{R_{c}}{R} \right) - (1 - b) \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^{4} - \frac{(1 - b)(2r_{co}^{2}R_{c}^{2})}{R^{4}} - \frac{(1 - b)}{3} \left(\frac{R_{c}}{R} \right)^{4} \right]$$

$$(5.12)$$

Uwzględniając wzór (4.20) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_c} = \frac{2(4+b) - 4b}{12\left[1 - b\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 - \frac{b}{2}\left(\frac{R_c}{R}\right) - (1-b)\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^4 - \frac{(1-b)(2r_{co}^2R_c^2)}{R^4} - \frac{(1-b)}{3}\left(\frac{R_c}{R}\right)^4\right]}$$
(5.13)

Dla m = 8 prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{v_{m}}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}2\pi} \int_{0}^{1-b} \left[1-b \left(\frac{\left(r_{c0}^{2}+r_{c}^{2}+2r_{c0}r_{c}\sin\varphi\right)^{0.5}}{R} \right)^{2} - \left(1-b \left(\frac{\left(r_{c0}^{2}+r_{c}^{2}+2r_{c0}r_{c}\sin\varphi\right)^{0.5}}{R} \right)^{4} \right] r_{c}dr_{c}d\varphi = v_{m} \left[1-b \left(\frac{r_{c0}}{R} \right)^{2} - \frac{b}{2} \left(\frac{R_{c}}{R} \right) - (1-b) \left(\frac{r_{c0}}{R} \right)^{8} - \frac{(1-b)(8r_{c0}^{6}R_{c}^{2})}{R^{8}} - \frac{(1-b)(12r_{c0}^{4}R_{c}^{4})}{R^{8}} - \frac{(1-b)(4r_{c0}^{2}R_{c}^{6})}{R^{8}} - \frac{(1-b)}{5} \left(\frac{R_{c}}{R} \right) \right]$$

$$(5.14)$$

Uwzględniając wzór (4.23) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

$$k = \frac{v_{\dot{s}r}}{v_c} = \frac{2(8+b)-8b}{20\left[1-b\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 - \frac{b}{2}\left(\frac{R_c}{R}\right) - (1-b)\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^8 - \frac{(1-b)(8r_{co}^6R_c^2)}{R^8} - \frac{(1-b)(12r_{co}^4R_c^4)}{R^8} - \frac{(1-b)(4r_{co}^2R_c^6)}{R^8} - \frac{(1-b)}{5}\left(\frac{R_c}{R}\right)^8\right]}$$
(5.15)

Dla m = 12 prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{v_{m}}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}^{2} \pi} \left[1 - b \left(\frac{\left(r_{C0}^{2} + r_{C}^{2} + 2r_{C0}r_{C}\sin\varphi\right)^{0.5}}{R} \right)^{2} - \left(1 - b \right) \left(\frac{\left(r_{C0}^{2} + r_{C}^{2} + 2r_{C0}r_{C}\sin\varphi\right)^{0.5}}{R} \right)^{12} \right] r_{c} dr_{c} d\varphi = \\ = v_{m} \left[1 - b \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^{2} - \frac{b}{2} \left(\frac{R_{c}}{R} \right) - \left(1 - b \right) \left(\frac{r_{co}}{R} \right)^{12} - \frac{(1 - b)(18r_{co}^{10}R_{c}^{2})}{R^{12}} - \frac{(1 - b)(75r_{co}^{8}R_{c}^{4})}{R^{12}} - \frac{(1 - b)(100r_{co}^{6}R_{c}^{6})}{R^{12}} - \frac{(1 - b)(45r_{co}^{4}R_{c}^{8})}{R^{12}} - \frac{1}{R^{12}} \right]^{12} - \frac{(1 - b)(6r_{co}^{2}R_{c}^{10})}{R^{12}} - \frac{(1 - b)(6r_{co}^{2}R_{c}^{10})}{R} - \frac{(1 - b)(6r_{co}^{2}R_{c}^{10})}{R} - \frac{(1 - b)}{R} \left(\frac{R_{c}}{R} \right) \right]^{12} - \frac{(1 - b)(6r_{co}^{2}R_{c}^{10})}{R^{12}} - \frac{(1 - b)(6r_{co}^{2}R_{c}^{10})}{R} - \frac{(1 - b)(6r_$$

Uwzględniając wzór (4.26) obliczany jest współczynnik wzorcowania:

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

Dokonując analizy wzorów (5.13), (5.15), (5.17) można zauważyć, iż średnica czujnika oraz odległość czujnika od osi rurociągu w przypadku przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3) mają niewielki wpływ na współczynnik wzorcowania co przedstawiono w tablicach 5.5, 5.6, 5,7.

	b	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R = 0,01$	$R_{\rm c}/R = 0,05$	$R_{\rm c}/R = 0,1$
$r_{\rm co}/R=0$	0,2	0,6333	0,6333	0,6334	0,6339
	0,4	0,6000	0,6000	0,6003	0,6012
	0,6	0,5666	0,5666	0,5670	0,5683
	0,8	0,5333	0,5333	0,5338	0,5354
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{\rm co}/R = 0,01$	0,2	0,6333	0,6333	0,6335	0,6339
	0,4	0,6000	0,6000	0,6003	0,6012
	0,6	0,5667	0,5667	0,5671	0,5684
	0,8	0,5333	0,5333	0,5339	0,5355
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{\rm co}/R = 0.05$	0,2	0,6336	0,6336	0,6338	0,6343
	0,4	0,6006	0,6006	0,6009	0,6018
	0,6	0,5675	0,5675	0,5679	0,5692
	0,8	0,5344	0,5344	0,5349	0,5365
	1	0,5012	0,5012	0,5018	0,5037
$r_{\rm co}/R=0,1$	0,2	0,6346	0,6346	0,6348	0,6365
	0,4	0,6024	0,6024	0,6027	0,6037
	0,6	0,5701	0,5701	0,5705	0,5718
	0,8	0,5376	0,5376	0,5381	0,5388
	1	0,5050	0,5050	0,5056	0,5057

Tab. 5.5. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchniczynnej kołowej dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3) i wartości m = 4.

	b	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R = 0,01$	$R_{\rm c}/R = 0,05$	$R_{\rm c}/R=0,1$
$r_{\rm co}/R=0$	0,2	0,7400	0,7400	0,7401	0,7407
	0,4	0,6800	0,6800	0,6803	0,6813
	0,6	0,6200	0,6200	0,6204	0,6218
	0,8	0,5600	0,56000	0,5605	0,5622
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{\rm co}/R = 0,01$	0,2	0,7400	0,7400	0,7402	0,7407
	0,4	0,6800	0,6800	0,6803	0,6813
	0,6	0,6200	0,6200	0,6204	0,6219
	0,8	0,5600	0,5600	0,5605	0,56222
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{\rm co}/R = 0,05$	0,2	0,7403	0,7403	0,7405	0,7411
	0,4	0,6806	0,6866	0,6810	0,6820
	0,6	0,6209	0,6209	0,6213	0,6228
	0,8	0,5611	0,5611	0,5616	0,5633
	1	0,5012	0,5012	0,5018	0,5037
$r_{\rm co}/R=0,1$	0,2	0,7414	0,7414	0,7416	0,7422
	0,4	0,6827	0,6827	0,6830	0,6841
	0,6	0,6237	0,6237	0,6242	0,6256
	0,8	0,5645	0,5645	0,5650	0,5665
	1	0,5050	0,5050	0,5056	0,5076

Tab. 5.6. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchniczynnej kołowej dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3) i wartości m = 8.

	b	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R = 0,01$	$R_{\rm c}/R = 0,05$	$R_{\rm c}/R=0,1$
$r_{\rm co}/R=0$	0,2	0,7857	0,7857	0,7859	0,7865
	0,4	0,7142	0,7143	0,7146	0,7157
	0,6	0,6428	0,6428	0,6433	0,6447
	0,8	0,5714	05714	0,5720	0,5737
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{\rm co}/R = 0,01$	0,2	0,7857	0,7857	0,7859	0,7865
	0,4	0,7143	0,7143	0,7146	0,7157
	0,6	0,6428	0,6428	0,6434	0,6448
	0,8	0,5714	0,5714	0,5720	0,5737
	1	0,5000	0,5000	0,5006	0,5025
$r_{\rm co}/R = 0,05$	0,2	0,7861	0,7861	0,7863	0,7868
	0,4	0,7150	0,7150	0,7153	0,7164
	0,6	0,6438	0,6438	0,6443	0,6457
	0,8	0,5725	0,5725	0,5731	0,5748
	1	0,5012	0,5012	0,5018	0,5037
$r_{\rm co}/R=0,1$	0,2	0,7872	0,7872	0,7874	0,7880
	0,4	0,7171	0,7171	0,7175	0,7185
	0,6	0,6467	0,6467	0,6472	0,6486
	0,8	0,5760	0,5760	0,5766	0,5783
	1	0,5050	0,5050	0,5056	0,5076

Tab. 5.7. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.3) i wartości m = 12.

Wraz ze wzrostem wykładnika potęgowego *m* współczynnik wzorcowania wzrasta i średnica czujnika oraz odległość czujnika od osi rurociągu zmniejszają swój wpływ na niego. Zmniejszenie współczynnika *b* powoduje wzrost współczynnika wzorcowania. Zwiększenie odległości czujnika od osi rurociągu powoduje nieznaczny wzrost współczynnika wzorcowania. W miarę wzrostu współczynnika *b* średnica czujnika oraz odległość czujnika od osi rurociągu mają większy wpływ na współczynnika wzorcowania.

5.4. Współczynnik wzorcowania dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.4)

Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}^{2}\pi} v_{m} \left[\left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \right] r_{c} dr_{c} d\varphi = \frac{v_{m}}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}^{2}\pi} \int_{0}^{R_{c}^{2}\pi} \left[\left(1 - \frac{\left(r_{c0}^{2} + r_{c}^{2} + 2r_{c0}r_{c}\sin\varphi\right)^{0.5}}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \right] r_{c} dr_{c} d\varphi = \frac{v_{m}}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}^{2}\pi} \int_{0}^{R_{c}^{2}\pi} \left[2 \left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{c0}}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{R_{c}}{R}\right)^{2}} \right)^{\frac{1}{n}} + \left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{c0}}{R}\right)^{2} + \left(\frac{R_{c}}{R}\right)^{2}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

$$(5.18)$$

Uwzględniając wzór (4.32) obliczamy współczynnik wzorcowania:

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{6n^2}{(n+1)(2n+1)\left[2\left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{c\,0}}{R}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{c\,0}}{R}\right)^2 + \left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}}\right]$$
(5.19)

Dokonując analizy wzoru (5.19) można zauważyć, iż średnica czujnika oraz odległość czujnika od osi rurociągu w przypadku przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.4) mają niewielki wpływ na współczynnik wzorcowania co przedstawiono w tablicy 5.8. Wartość *n* obliczona ze wzoru (3.5) dla liczby $Re = 10^4$, 10^5 , 10^6 , 10^7 .

Wraz ze wzrostem odległości czujnika od osi rurociągu oraz przy zwiększeniu powierzchni czynnej czujnika współczynnik wzorcowania wzrasta. Wraz z wzrostem liczby Reynoldsa współczynnik wzorcowania wzrasta, co przedstawiono na rysunku 5.7. Gdy wzrasta odległość czujnika od osi rurociągu to przy rosnącej liczbie Reynoldsa zauważyć można małe zmiany współczynnika wzorcowania.

W przypadku tego wzoru występują największe zmiany współczynnika wzorcowania czujnika punktowego ($R_c/R = 0$) w stosunku do powierzchniowego.

	n	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R = 0,01$	$R_{\rm c}/R = 0,05$	$R_{\rm c}/R=0,1$
$r_{\rm co}/R=0$	6,5	0,8047	0,8055	0,8089	0,8133
	8,6	0,8466	0,8472	0,8499	0,8534
	10,7	0,8737	0,8742	0,8764	0,8793
	12,8	0,8926	0,8931	0,8950	0,8975
$r_{\rm co}/R = 0,01$	6,5	0,8060	0,8062	0,8091	0,8134
	8,6	0,8476	0,8478	0,8501	0,8535
	10,7	0,8745	0,8747	0,8766	0,8794
	12,8	0,8933	0,8935	0,8951	0,8975
$r_{\rm co}/R = 0,05$	6,5	0,8111	0,8112	0,8125	0,8157
	8,6	0,8516	0,8517	0,8528	0,8553`
	10,7	0,8779	0,8779	0,8788	0,8809
	12,8	0,8962	0,8962	0,8970	0,8988
$r_{\rm co}/R=0,1$	6,5	0,8179	0,8179	0,8187	0,8210
	8,6	0,8570	0,8570	0,8577	0,8594
	10,7	0,8823	0,8823	0,8829	0,8843
	12,8	0,9000	0,9000	0,9005	0,9017

Tab. 5.8. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej dla przepływu turbulentnego opisanego wzorem (3.4).



Rys. 5.7. Zależność k(n) dla rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.4) dla **a**) $r_{co}/R = 0$ **b**) $r_{co}/R = 0,01$ **c**) $r_{co}/R = 0,05$ **d**) $r_{co}/R = 0,1$.

5.5. Podsumowanie

W rozdziałach 5.1 do 5.4 dokonano analiz metrologicznych przepływomierzy próbkujących z czujnikiem jednopowierzchniowym o powierzchni czynnej modelowanej kołem dla czterech modeli rozkładu prędkości. Na podstawie powyższych analiz zostanie podjęta próba wskazania takiego położenia oraz rozmiaru czujnika, dla którego współczynnik wzorcowania k będzie się zmieniał w jak najmniejszym zakresie.



Rys. 5.8. Zależność współczynnika wzorcowania od stosunku promienia czujnika do promienia rurociągu dla rozkładu prędkości modelowanego wzorem (3.2) przy $r_{co}/R = 0$.

Gdy przepływ modelowany jest wzorem (3.2) można zauważyć, że wraz ze wzrostem odległości od średnicy rurociągu dla danego parametru *m* zmiany współczynnika wzorcowania są minimalne. Zauważalne niewielkie zmiany są przy dużych powierzchniach czynnych czujnika. Można wyciągnąć wnioski, że przy R_c/R mniejszym od 0,4 wartość współczynnika wzorcowania nie zależy od średnicy czujnika dla przepływu turbulentnego, dla którego wartości *m* we wzorze (3.2) jest większa niż 4.



Rys. 5.9. Zależność współczynnika wzorcowania od stosunku promienia czujnika do promienia rurociągu dla rozkładu prędkości modelowanego wzorem (3.2) przy $r_{co}/R = 0,01$.

Gdy rozkład prędkości modelowany jest wzorem (3.3) można zauważyć większe zmiany współczynnika wzorcowania wraz ze wzrostem odległości czujnika

od osi rurociągu niż to miało miejsce dla modelu (3.2). Im ta odległość oraz wartość współczynnika *b* jest większa tym zmiany te są również większe. Na rys. 5.10 oraz 5.11 przedstawiono zależności współczynnika wzorcowania od stosunku promienia czujnika do promienia rurociągu dla rozkładu prędkości modelowanego wzorem (3.3).



Rys. 5.10. Zależność współczynnika wzorcowania od stosunku promienia czujnika do promienia rurociągu dla rozkładu prędkości modelowanego wzorem (3.3) dla m = 4, b = 0,2.



Rys. 5.11. Zależność współczynnika wzorcowania od stosunku promienia czujnika do promienia rurociągu dla rozkładu prędkości modelowanego wzorem (3.3) dla m = 4, b = 0,6.

Jak widać z rys. 5.10 oraz 5.11 zmiany stosunku promienia czujnika do promienia rurociągu oraz zmiany położenia czujnika w pobliżu osi rurociągu mają mały wpływ na zmiany współczynnika wzorcowania. Na rys. 5.12 i 5.13

przedstawiono wartości obliczonego współczynnika wzorcowania dla rozkładu prędkości modelowanego wzorem (3.3) dla m = 8 (tablica 5.6).



Rys. 5.12. Zależność współczynnika wzorcowania od stosunku promienia czujnika do promienia rurociągu dla rozkładu prędkości modelowanego wzorem (3.3) dla m = 8, b = 0,2.



Rys. 5.13. Zależność współczynnika wzorcowania od stosunku promienia czujnika do promienia rurociągu dla rozkładu prędkości modelowanego wzorem (3.3) dla m = 8, b = 0,6.

Jak widać z rys. 5.12 oraz 5.13 wpływ położenia czujnika oraz stosunek jego promienia do promienia rurociągu mają mały wpływ na wartość współczynnika wzorcowania. Wartość k zwiększa się wraz ze wzrostem m.

Natomiast gdy przepływ modelowany jest wzorem (3.4), współczynnik wzorcowania zmienia się w coraz to mniejszym zakresie przy większych odległościach od środka rurociągu.



Rys. 5.14. Zależność współczynnika wzorcowania od stosunku promienia czujnika do promienia rurociągu dla rozkładu prędkości modelowanego wzorem (3.4) dla $r_{co}/R = 0$.



Rys. 5.15. Zależność współczynnika wzorcowania od stosunku promienia czujnika do promienia rurociągu dla rozkładu prędkości modelowanego wzorem (3.4) dla $r_{co}/R = 0$.

5.6. Wyznaczanie współczynnika wzorcowania dla osiowosymetrycznych rozkładów prędkości w warunkach odbiegających od normalnych

Rozkład prędkości jest modelowany wzorem (3.10). Prędkość średnią w powierzchni czynnej czujnika oblicza się ze wzoru:

$$v_{c} = \frac{1}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}2\pi} v_{m} \left[\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + h\frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} \right] r_{c} dr_{c} d\varphi = \frac{v_{m}}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}2\pi} \left[\left(1 - \frac{\left(r_{c0}^{2} + r_{c}^{2} + 2r_{c0}r_{c}\sin\varphi\right)^{0.5}}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{h\frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}}}{r^{2}} \right] r_{c} dr_{c} d\varphi = \frac{v_{m}}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}2\pi} \left[\left(1 - \frac{\left(r_{c0}^{2} + r_{c}^{2} + 2r_{c0}r_{c}\sin\varphi\right)^{0.5}}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{h\frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}}}{r^{2}} \right] r_{c} dr_{c} d\varphi = \frac{v_{m}}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}2\pi} \left[\left(1 - \frac{\left(r_{c0}^{2} + r_{c}^{2} + 2r_{c0}r_{c}\sin\varphi\right)^{0.5}}{R}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{h\frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}}}{r^{2}} \right] r_{c} dr_{c} d\varphi = \frac{v_{m}}{\pi R_{c}^{2}} \int_{0}^{R_{c}2\pi} \left[\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}} + \frac{h\frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{k}}}{r^{2}}\right)^{\frac{1}{n}} + \left(1 - \sqrt{\left(\frac{r}{R}\right)^{2} + \left(\frac{R}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{n}} + 2h\sqrt{\left(\frac{r}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{R}{R}\right)^{2}} \left(1 - \sqrt{\left(\frac{r}{R}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{R}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}} + \frac{1}{h\sqrt{\left(\frac{r}{R}\right)^{2} + \left(\frac{R}{R}\right)^{2}}} \left(1 - \sqrt{\left(\frac{r}{R}\right)^{2} + \left(\frac{R}{R}\right)^{2}}\right)^{\frac{1}{k}}} \right]$$

$$(5.20)$$

Współczynnik wzorcowania definiowany wzorem (2.4), wynosi:

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{2\left[n^2(k+1)(k+2)(k+3) + hk^3(n+1)(2n+1)\right]}{(n+1)(2n+1)(k+1)(2k+1)((3k+1))}$$

$$k = \frac{v_{sr}}{v_c} = \frac{2\left[1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}}{\left[2\left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{3}\left[1 + 2h\sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}} + \left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{3}\left[1 + 2h\sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}} + \left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{3}\left[1 + 2h\sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{3}\left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \frac{1}{4}\left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{3}\left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \left(\frac{R_c}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{3}\left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{3}\left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2}\right)^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{3}\left(1 - \sqrt{\left(\frac{r_{co}}{R}\right)^2}\right$$

Dokonując analizy wzoru (5.21) można zauważyć, iż średnica czujnika oraz odległość czujnika od osi rurociągu w przypadku przepływu zniekształconego opisanego wzorem (3.1) mają duży wpływ na współczynnik wzorcowania co przedstawiono w tablicach numer 5.9, 5.10, 5.11, 5.12. Najmniejszy wpływ średnicy czujnika na współczynnik wzorcowania można zauważyć przy współczynniku h = 0,5.

W przypadku tego wzoru występują duże zmiany współczynnika wzorcowania czujnika punktowego ($R_c/R = 0$) w stosunku do powierzchniowego.

Tab. 5.9. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej dla zniekształconego rozkładu prędkości opisanego wzorem 3.10, dla k = 7, n = 6,5 ($Re = 10^{4}$).

	h	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R = 0,01$	$R_{\rm c}/R=0,05$	$R_{\rm c}/R = 0,1$
$r_{\rm co}/R=0$	0,5	1,2335	1,2306	1,2196	1,2065
	1	1,6622	1,6529	1,6170	1,5751
	1,5	2,0910	2,0724	2,001	1,9213
	2	2,5197	2,4891	2,3746	2,2472
$r_{\rm co}/R = 0,01$	0,5	1,2292	1,2283	1,2189	1,2062
	1	1,6483	1,6453	1,6149	1,5741
	1,5	2,0632	2,0574	1,9972	1,9194
	2	2,4741	2,4645	2,3681	2,2442
$r_{\rm co}/R = 0.05$	0,5	1,2129	1,2127	1,2086	1,1197
	1	1,5956	1,5949	1,5820	1,5538
	1,5	1,9664	1,9592	1,9346	1,8813
	2	2,3087	2,3068	2,2680	2,1852
$r_{\rm co}/R=0,1$	0,5	1,1939	1,1938	1,1917	1,1861
	1	1,5356	1,5352	1,5289	1,5116
	1,5	1.8477	1.8471	1,8352	1,8036
	2	2,1337	2,1329	2,1147	2,0670

Tab. 5.10. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej dla zniekształconego rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.10), dla k = 9, n = 8,6 ($Re = 10^5$).

	h	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R = 0,01$	$R_{\rm c}/R=0,05$	$R_{\rm c}/R = 0,1$
$r_{\rm co}/R = 0$	0,5	1,3528	1,3494	1,3359	1,3198
	1	1,8591	1,8482	1,8062	1,7570
	1,5	2,3653	2,3437	2,2616	2,1678
	2	2,8716	2,8360	2,7028	2,5544
$r_{\rm co}/R = 0,01$	0,5	1,3477	1,3465	1,3351	1,3194
	1	1,8428	1,8393	1,8038	1,7559
	1,5	2,3331	2,3262	2,2569	2,1656
	2	2,8185	2,8073	2,6952	2,5509
$r_{\rm co}/R = 0,05$	0,5	1,3277	1,3275	1,3225	1,3114
	1	1,7811	1,7804	1,7653	1,7321
	1,5	2,2134	2,2120	2,1833	2,1212
	2	2,6261	2,6239	2,5788	2,4822
$r_{\rm co}/R=0,1$	0,5	1,3042	1,3041	1,3015	1,2946
	1	1,7108	1,7105	1,7029	1,6925
	1,5	2,0820	2,0814	2,0675	2,0305
	2	2,4222	2,4213	2,4002	2,3444

Tab. 5.11. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej dla zniekształconego rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.10), dla k = 11, n = 10,7 ($Re = 10^6$).

	h	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R=0,01$	$R_{\rm c}/R=0,05$	$R_{\rm c}/R = 0,1$
$r_{\rm co}/R=0$	0,5	1,4396	1,4357	1,4205	1,4022
	1	2,0055	1,9934	1,9470	1,8924
	1,5	2,5714	2,5474	2,4567	2,3529
	2	3,3173	3,0979	2,9506	2,7864
$r_{\rm co}/R = 0,01$	0,5	1,4337	1,4325	1,4196	1,4017
	1	1,9875	1,9836	1,9442	1,8911
	1,5	2,5357	2,5287	2,4519	2,3508
	2	3,0786	3,0662	2,9421	2,7825
$r_{\rm co}/R = 0.05$	0,5	1,4112	1,4109	1,4053	1,3927
	1	1,9191	1,9183	1,9016	1,8647
	1,5	2,4034	2,4019	2,3702	2,3014
	2	2,8657	2,8633	2,8134	2,7065
$r_{\rm co}/R=0,1$	0,5	1,3846	1,3844	1,3815	1,3736
	1	1,8411	1,8408	1,8323	1,8097
	1,5	2,2580	2,2573	2,2419	2,2010
	2	2,6401	2,6391	2,6157	2,5539

Tab.5.12. Wartość współczynnika wzorcowania dla czujnika powierzchniowego o powierzchni czynnej kołowej dla zniekształconego rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.10), dla k = 13, $n = 12.8 (Re = 10^7)/$

	h	$R_{\rm c}/R=0$	$R_{\rm c}/R=0,01$	$R_{\rm c}/R=0,05$	$R_{\rm c}/R = 0,1$
$r_{\rm co}/R=0$	0,5	1,5056	1,5014	1,4849	1,4650
	1	2,1186	2,1057	2,0557	1,9971
	1,5	2,7316	2,7060	2,6085	2,4969
	2	3,3446	2,3023	3,1440	2,9674
$r_{\rm co}/R = 0,01$	0,5	1,4993	1,4979	1,4839	1,4645
	1	2,0993	2,0952	2,0528	1,9957
	1,5	2,6934	2,6852	2,6028	2,4943
	2	3,2816	3,2683	3,1349	2,9632
$r_{\rm co}/R = 0.05$	0,5	1,4748	1,4745	1,4684	1,4547
	1	2,0258	2,0250	2,0069	1,9673
	1,5	2,5512	2,5496	2,5155	2,4415
	2	2,528	2,0501	2,9965	2,8815
$r_{\rm co}/R = 0,1$	0,5	1,4458	1,4456	1,4424	1,4337
	1	1,9419	1,9415	1,9324	1,9081
	1,5	2,3949	2,3942	2,3776	2,3336
	2	2,102	2,8091	2,7839	2,7174

Wzrost liczby Reynoldsa oraz parametru k powoduje wzrost współczynnika wzorcowania. Wzrost parametru h powoduje większy wpływ zmiany średnicy czujnika oraz odległości czujnika od osi rurociągu na współczynnik wzorcowania. Zmiana parametrów wpływających na zniekształcenie (h, k) powoduje duże zróżnicowanie współczynników wzorcowania z czego można wnioskować, że w przypadku, gdy rozkład prędkości jest zniekształcony, i jego model nie jest wystarczająco dokładnie znany to błędy pomiaru strumienia płynu mogą być znaczne.

6. Aspekt praktyczny – metodyka doboru przepływomierza próbkującego

Analizę przeprowadzoną w tej pracy mogą wykorzystać projektanci aplikacji z użyciem przepływomierza. Autor pracy zwrócił uwagę, że można zastosować etapową metodykę doboru przepływomierzy próbkujących z czujnikami powierzchniowymi dla konkretnych zastosowań.

W katalogach producentów najczęściej podawane są podziały przepływomierzy ze względu na zasadę działania, natomiast użytkownika bardziej interesuje, czy może go zastosować do konkretnego medium oraz jaki wynik uzyska się w konkretnych warunkach zastosowania. Przyszły użytkownik przepływomierza wie, jakie medium chce mierzyć i jaka jest żądana dokładność pomiaru, by był on adekwatny do dalszego przetwarzania. W [Kucyb2002] przedstawiono niektóre zagadnienia związane z doborem przepływomierza. Bardziej kompleksowo problem doboru zawarty jest w [Waluś2004]. Analizy wyników z poprzednich rozdziałów, znajomość rynku przepływomierzy, i doświadczenia w stosowaniu przepływomierzy próbkujących (głównie ultradźwiękowych i uśredniających rurek spiętrzających) pozwoliły na napisanie publikacji [JezikK2007]. Wobec tego autor proponuje następującą metodykę doboru przepływomierza próbkującego z czujnikami jednopowierzchniowymi.

Proponuje się etapowe podejście do doboru przepływomierzy próbkujących:

Etap 1:

Analiza prowadząca do eliminacji tych przepływomierzy próbkujących, które ze względu na zasadę działania nie nadają się do pomiaru danego medium.

Etap 2:

Wybór tych przepływomierzy próbkujących, które zapewniają odpowiednie właściwości metrologiczne czyli przede wszystkim określenie odpowiedniej metody pomiaru (czujnik powierzchniowy w kształcie prostokąta lub czujnik powierzchniowy w kształcie koła).

Etap 3

Rozważenie kwestii instalacyjnych co łączy się z odpowiednim ukształtowaniem urządzenia pierwotnego przepływomierza (dobór odległości czujnika od osi rurociągu oraz powierzchni czynnej czujnika).

Łączy się to z odpowiednim doborem modelu matematycznego dla danego charakter przepływu. W warunkach rzeczywistych kształt rozkładu prędkości nie jest wcześniej znany. Nie wiadomo również, który z modeli zaproponowanych w tej pracy odpowiada najlepiej rzeczywistemu rozkładowi prędkości. W związku z tym można zaproponować wyznaczenie kształtu profilu prędkości w oparciu o dokonane pomiary prędkości w rurociągu dla różnych odległości od ścianki rurociągu. Dla poszczególnych pomiarów na tej podstawie obliczane są metodą najmniejszych kwadratów parametry modeli. Miarą dokładności jest wariancja resztkowa [WaluŻ1994]. Do dalszego stosowania wybiera się model, którego wariancja resztkowa jest najmniejsza. Model ten powinien być na tyle dokładny, aby można było z wystarczającą niepewnością odtworzyć strumień objętości. Gdy rozkład prędkości można opisać wzorem (3.2) lub (3.4) i znana jest wartość n lub m to wystarczy zmierzyć prędkość w jednym punkcie i wyznaczyć wartość strumienia objętości według obliczonych współczynników wzorcowania w niniejszej rozprawie doktorskiej. Gdyby rozkładu prędkości nie można było modelować żadnym z przedstawionych w pracy wzorów, do modelowania moga być zastosowane różne funkcje. W takiej sytuacji pole przepływowe dzielone jest na dwa lub więcej pierścieni i mierzone są prędkości na granicach tych pierścieni. Na podstawie tych czynników dobiera się model rozkładu prędkości dla każdego z pierścieni.

Etap 4

Analiza kosztów zakupu i eksploatacji przepływomierza. Należy tu brać pod uwagę sumę kosztów: zakupu przepływomierza, instalacji przepływomierza, konieczności okresowego sprawdzania i wzorcowania, strat energii spowodowanych trwałym spadkiem ciśnienia na przepływomierzu, strat związanych z błędami wskazań przepływomierza oraz strat związanych z ewentualną awarią przepływomierza.

Etap 5

Na tym etapie zostaną już 2, 3 przepływomierze i wtedy już dokonujemy analizy porównawczej według wskaźnika zaproponowanego w [JezikK2007].

93

Etapowa metodyka doboru przepływomierza próbkującego może być przedstawiona za pomocą schematu jak na rys. 6.1.



Rys. 6.1. Schemat etapowej metodyki doboru przepływomierza próbkującego.

W powyższym schemacie metodyki doboru przepływomierza próbkującego z czujnikiem jednopowierzchniowum "N" oznacza sytuację, w której jeśli nie ma możliwości oceny odpowiedniego modelu matematycznego oraz określenia odpowiednich warunków instalacyjnych musimy wrócić do etapu poprzedniego. Do etapu 3 niezbędna jest analiza zawarta w tej pracy. Na podstawie wzorów obliczonych w tej pracy projektant jest w stanie na podstawie obliczeń symulacyjnych wskazać takie położenie czujnika w rurociągu oraz określić rozmiary czujnika, dla których zmiany współczynnika wzorcowania będą jak najmniejsze. Projektant powinien przy projektowaniu aplikacji uzyskać od użytkowników przepływomierzy informacje o kwestiach instalacyjnych przepływomierza – wtedy jest w stanie określić czy stosować czujnik powierzchniowy o powierzchni prostokątnej lub kołowej.

Poza tym użytkownik przepływomierza powinien przekazać informacje o charakterze przepływu (przynajmniej orientacyjnie), to znaczy spodziewanym zakresie liczby Reynoldsa, oraz o możliwościach wystąpienia zniekształconego rozkładu prędkości.

94

7. Weryfikacja doświadczalna

Celem weryfikacji doświadczalnej jest sprawdzenie, czy obliczone współczynniki wzorcowania są wyznaczone prawidłowo oraz na ile różnią się od rzeczywistych współczynników wzorcowania. Etapem wstępnym do weryfikacji doświadczalnej jest w miarę możności sprawdzenie wyprowadzonych wzorów pod względem poprawności ich wyprowadzenia.

7.1. Sprawdzenie poprawności wyprowadzonych wzorów korzystając z sytuacji granicznych

Sprawdzenie poprawności wyprowadzonych wzorów na współczynniki wzorcowania może być dokonane przez przyjęcie wartości granicznych, dla których otrzymuje się oczywiste wartości współczynnika wzorcowania. Jeśli dla tych wartości wzory dają wartości poprawne, to z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć, że postać wzoru jest poprawna. Przykładowo dla przepływu laminarnego i czujnika o prostokątnej powierzchni czynnej umieszczonego w średnicy rurociągu współczynnik wzorcowania jest wyrażony wzorem (4.5). Dla szerokości czujnika a = 0 czujnik jest staje się czujnikiem odcinkowym i ze wzoru (4.5) otrzymuje się k = 0.75.

W [PN-M-42370 s.17] podano wartość współczynnika wzorcowania nazywanego tam współczynnikiem kształtu rozkładu prędkości i wynosi ona też 0,75, a więc poprawność wzoru (4.5) jest częściowo sprawdzona. W przypadku przepływu turbulentnego współczynnik wzorcowania oblicza się ze wzoru: (4.9), (4.12), (4.15), (4.18) dla wartości m = 4, 8, 12, 16. Dla szerokości czujnika a = 0 wartości współczynnika wzorcowania wynoszą odpowiednio 5/6, 9/10, 13/14, 17/18.

Dla wartości *m* dążącej do nieskończoności przepływ będzie miał rozkład równomierny [Kegel1991 s.466, JeżoS2001 s.34] i wtedy wartość współczynnika wzorcowania (k = (m+1)/(m+2)) wynosi 1.

95

7.2. Metodyka weryfikacji doświadczalnej

Najlepszym sposobem weryfikacji jest porównanie wyników modelowania matematycznego z wynikami przeprowadzonych doświadczeń. Weryfikacja doświadczalna polega na wyznaczeniu współczynnika wzorcowania, jak to zrobiono w rozdziale 4 oraz 5 dla czujnika rzeczywistego i porównaniu jego wartości z wartością wyznaczoną doświadczalnie.

Doświadczalne wyznaczenie współczynnika wzorcowania polega na pomiarze prędkości czujnikiem powierzchniowym oraz prędkości średniej w całym przekroju przewodu zamkniętego i współczynnik wzorcowania jest równy stosunkowi wyznaczonej doświadczalnie prędkości średniej w przekroju przewodu do prędkości uzyskanej z czujnika.

Gdy różnica między obliczoną wartością k_0 i zmierzoną wartością k_d odniesiona do średniej wartości k będzie bardzo mała to można przyjąć z dużym prawdopodobieństwem, że wyznaczona obliczeniowo wartość współczynnika wzorcowania jest poprawna.

7.3. Stanowisko pomiarowe z czujnikiem powierzchniowym

Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rys. 7.1. Znajduje się ono w laboratorium Instytutu Mechaniki Cieplnej i Mechaniki Płynów na Politechnice Wrocławskiej.



Rys. 7.1. Schemat instalacji pomiarowej: 1 - klapa regulacyjna do zmian strumienia płynu,

2 - prostownica strumienia, 3 – termoelement typu K do kontroli temperatur w rurociągu, 4 - otwór dla termoanemometru i rurki Pitota, 4a – otwór do pomiaru podciśnienia przed rurką Pitota, 5 - kryza (C = 0,5947, średnica kryzy d_k = 224,8 mm, ε_{sr} = 0,993), 6 – wentylator promieniowy typu Fkb 315II o sprężu 2300 Pa i wydajności znamionowej 400 m³/h napędzany silnikiem prądu stałego typu PZMb54a, 7 - silnik, 8 - szafka sterownicza, 9 – termoanemometr, rurka Pitota. dhzw – różnica ciśnień na kryzie, h1 – podciśnienie przed kryzą.

Pomiary zostały wykonane dla 9 liczb Reynoldsa czyli 9 różnych strumieni płynu. Ustalono maksymalne różnice ciśnienia na zwężce dh_{max} czyli dokonano pomiaru dla największego strumienia objętości. Dla następnych pomiarów został ustawiony na zwężce spadek ciśnienia dh w taki sposób, aby było: dh8 = $(0,8)^2$ dh_{max}, dh7 = $(0,7)^2$ dh_{max}, dh6 = $(0,6)^2$ dh_{max}, dh5 = $(0,5)^2$ dh_{max}, dh4 = $(0,4)^2$ dh_{max},

 $dh3 = (0,3)^2 dh_{max} dh2 = (0,2)^2 dh_{max} dh1 = (0,1)^2 dh_{max}$. W ten sposób udało się pokryć równomiernie zakres liczb Reynoldsa. Prędkość średnia mierzona była anemometrem w dwóch płaszczyznach – poziomej i pionowej, sondując przekrój rurociągu co 10 mm, a następnie zostało policzona z rozkładu prędkości metodą pierścieni równoważnych.

Pomiary wykonano przy użyciu anemometru. Dodatkowo prędkość średnią zmierzono kryzą oraz zweryfikowano prawidłowość wykonanych pomiarów anemometrem przy użyciu rurki Pitota. Na rysunku 7.2 przedstawiono widok stanowiska pomiarowego.



Rys. 7.2. Widok stanowiska pomiarowego.

7.4. Wyniki pomiarów przy zastosowaniu anemometru

W ramach niniejszej pracy doktorskiej dokonano weryfikacji wyprowadzonych wzorów oraz porównano wyniki w danymi doświadczalnymi dla 9 różnych wartości strumieni płynu. Wyniki uzyskane na podstawie pomiarów oraz obliczenia prędkości w rurociągu przedstawiono w załączniku nr 2.

Dokonano porównania współczynników wzorcowania obliczonych na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz obliczonych teoretycznie na podstawie wzoru 5.19. 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.

Dla wszystkich 9 strumieni objętości dokonano porównania wartości współczynników wzorcowania obliczonych na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych (uwzględniając we wzorze na współczynnik wzorcowania średnią prędkość obliczoną na podstawie pomiaru prędkości punktowych oraz na podstawie pomiaru kryzą) oraz obliczonych teoretycznie na podstawie wzoru 5.19.

Tab.7.1. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $q_v = 0.31 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 84700. Niepewność wyznaczenia strumienia objętości $U(q_v) = 12.0$ % dla kryzy, $U(q_v) = 2.3$ % dla termoanemometru.

		Błąd Błąd		Błąd	Błąd	
	Współczynnik	współczynnika	współczynnika	współczynnika	współczynnika	
	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	
Odległość od	wyznaczony	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	
przedniej ścianki	na podstawie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	
rurociągu	wzoru 5.19	poziomej, [%]	pionowej, [%]	poziomej, [%]	pionowej, [%	
		V _{śr} obliczona	na podstawie	u chliczono	no nodetovio	
		poiniaru	prędkości	V _{śr} ODIICZONA		
mr	<u>ו</u>		Jwych	pomar	u kryzą	
		$v_{\text{sr}} = 4,3 \text{ m/s}$ $v_{\text{sr}} = 4,3 \text{ m/s}$		$v_{\rm sr} \equiv 4$	$v_{\rm sr} = 4.3 \mathrm{m/s}$	
292	1,16	12,07	20,69	12,07	12,07	
282	1,07	6,54	15,89	6,54	6,54	
272	1,02	5,88	13,73	5,88	5,88	
262	0,98	7,14	10,20	7,14	7,14	
252	0,96	8,33	8,33	8,33	8,33	
242	0,94	10,64	4,26	10,64	10,64	
232	0,92	6,52	4,35	6,52	6,52	
222	0,91	5,49	1,10	5,49	5,49	
212	0,89	3,37	-3,37	3,37	3,37	
202	0,88	0,00	-4,55	0,00	0,00	
192	0,87	-1,15	-5,75	-1,15	-1,15	
182	0,86	-5,81	-6,98	-5,81	-5,81	
172	0,85	-9,41	-10,59	-9,41	-9,41	
162	0,85	-7,06	-10,59	-7,06	-7,06	
152	0,84	-8,33	-11,90	-8,33	-8,33	
142	0,85	-7,06	-10,59	-7,06	-7,06	
132	0,85	-5,88	-10,59	-5,88	-5,88	
122	0,86	-5,81	-11,63	-5,81	-5,81	
112	0,87	-6,90	-12,64	-6,90	-6,90	
102	0,88	-3,41	-13,64	-3,41	-3,41	
92	0,89	-1,12	-7,87	-1,12	-1,12	
82	0,91	1,10	-5,49	1,10	1,10	
72	0,92	1,09	-8,70	1,09	1,09	
62	0,94	4,26	-8,51	4,26	4,26	
52	0,96	6,25	-11,46	6,25	6,25	
42	0,98	10,20	-12,24	10,20	10,20	
32	1,02	11,76	-7,84	11,76	11,76	
22	1,07	14,95	0,00	14,95	14,95	
12	1,16	5,17	-1,72	5,17	5,17	

Tab.7.2. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $\underline{q}_v = 0,48 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 131200. Niepewność wyznaczenia strumienia objętości $U(q_v) = 5,1$ % dla kryzy, $U(q_v) = 1,5$ % dla termoanemometru.

		Błąd	Błąd	Błąd	Błąd
	Współczynnik	współczynnika	współczynnika	współczynnika	współczynnika
Odlagkaćć od	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania
nrzedniej ścianki	na podstawie	wyznaczony w płaszczyźnie	wyznaczony w płaszczyźnie	wyznaczony w płaszczyźnie	wyznaczony w płaszczyźnie
rurociagu	wzoru 5.19	poziomej, [%]	pionowej, [%]	poziomej, [%]	pionowej, [%
		$v_{\rm sr}$ obliczona	na podstawie		
		pomiaru	prędkości	v _{śr} obliczona na podstawie	
mr	ı	punktowych		pomiaru kryzą	
		$v_{\rm sr} = 6,7 {\rm m/s}$	$v_{\rm sr} = 6,7 {\rm m/s}$	$v_{ m \acute{sr}}=6$,7 m/s
292	1,15	8,70	20,87	8,70	20,87
282	1,07	6,54	15,89	6,54	15,89
272	1,02	8,82	17,65	8,82	17,65
262	0,99	8,08	14,14	8,08	14,14
252	0,96	6,25	12,50	6,25	12,50
242	0,94	5,32	9,57	5,32	9,57
232	0,92	3,26	5,43	3,26	5,43
222	0,91	3,30	5,49	3,30	5,49
212	0,90	3,33	3,33	3,33	3,33
202	0,89	2,25	3,37	2,25	3,37
192	0,88	1,14	-1,14	1,14	-1,14
182	0,87	-1,15	-8,05	-1,15	-8,05
172	0,86	-4,65	-3,49	-4,65	-3,49
162	0,85	-10,59	-5,88	-10,59	-5,88
152	0,85	-9,41	-9,41	-9,41	-9,41
142	0,85	-4,71	-4,71	-4,71	-4,71
132	0,86	-8,14	-5,81	-8,14	-5,81
122	0,87	-4,60	-3,45	-4,60	-3,45
112	0,88	1,14	-7,95	1,14	-7,95
102	0,89	3,37	-12,36	3,37	-12,36
92	0,90	2,22	-11,11	2,22	-11,11
82	0,91	1,10	-7,69	1,10	-7,69
72	0,92	1,09	-3,26	1,09	-3,26
62	0,94	1,06	-4,26	1,06	-4,26
52	0,96	3,12	-4,17	3,12	-4,17
42	0,99	3,03	3,03	3,03	3,03
32	1,02	6,86	2,94	6,86	2,94
22	1,07	10,28	4,67	10,28	4,67
12	1,15	14,78	6,09	14,78	6,09

Tab. 7.3. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $\underline{q_v} = 0,63 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 172000. Niepewność wyznaczenia strumienia objętości $U(q_v) = 3,4$ % dla kryzy, $U(q_v) = 1,1$ % dla termoanemometru.

	/	Błąd	Błąd	Błąd	Błąd
	Współczynnik	współczynnika	współczynnika	współczynnika	współczynnika
Odlagłość od	wyznaczony	wyznaczony w	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania
przedniej ścianki	na podstawie	płaszczyźnie	wyznaczony w płaszczyźnie	wyznaczony w płaszczyźnie	wyznaczony w płaszczyźnie
rurociągu	wzoru 5.19	poziomej, [%]	pionowej, [%]	poziomej, [%]	pionowej, [%
		v _{śr} obliczona	na podstawie		
		pomiaru	prędkości	v _{śr} obliczona na podstawie	
mm	<u>1</u>	punktowych		pomiaru kryzą	
		$v_{\rm sr} = 8,6 {\rm m/s}$	$v_{\rm sr} = 9,0 {\rm m/s}$	$v_{\rm sr} = 8$,8 m/s
292	1,15	17,39	22,61	15,65	24,35
282	1,06	8,49	18,87	6,60	20,75
272	1,02	7,84	16,67	5,88	17,65
262	0,99	6,06	12,12	4,04	14,14
252	0,96	3,12	8,33	1,04	10,42
242	0,94	3,19	5,32	1,06	7,45
232	0,93	4,30	5,38	2,15	7,53
222	0,91	3,30	4,40	1,10	6,59
212	0,90	5,56	4,44	3,33	6,67
202	0,89	5,62	1,12	3,37	3,37
192	0,88	3,41	-1,14	1,14	1,14
182	0,87	0,00	-5,75	-2,30	-3,45
172	0,86	0,00	-6,98	-2,33	-4,65
162	0,85	0,00	-10,59	-2,35	-8,24
152	0,85	2,35	-10,59	0,00	-8,24
142	0,85	1,18	-11,76	-1,18	-9,41
132	0,86	1,16	-8,14	-1,16	-5,81
122	0,87	-2,30	-5,75	-5,75	-3,45
112	0,88	-4,55	-5,68	-6,82	-3,41
102	0,89	0,00	-7,87	-3,37	-5,62
92	0,90	-2,22	-14,44	-4,44	-12,22
82	0,91	-3,30	-12,09	-5,49	-9,89
72	0,93	-5,38	-1,08	-7,53	1,08
62	0,94	-3,19	0,00	-5,32	2,13
52	0,96	0,00	-1,04	-2,08	1,04
42	0,99	6,06	4,04	4,04	6,06
32	1,02	9,80	2,94	7,84	4,90
22	1,06	9,43	2,83	7,55	4,72
12	1,15	15,65	1,74	13,91	4.35

Tab. 7.4. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $\underline{q}_v = 0,77 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 212500. Niepewność wyznaczenia strumienia objętości $U(q_v) = 2,6$ % dla kryzy, $U(q_v) = 0,8$ % dla termoanemometru,

		Błąd	Błąd	Błąd	Błąd	
	Współczynnik	Współczynnika	Współczynnika	Współczynnika	Współczynnika	
	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	
Odległość od	wyznaczony	wyznaczony	wyznaczony	wyznaczony	wyznaczony	
przedniej ścianki	na podstawie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	
rurociągu	wzoru 5.19	poziomej, [%]	pionowej, [%]	poziomej, [%]	pionowej, [%]	
		$v_{\rm sr}$ obliczona na podstawie				
		politiaru prędkości				
mm	1	$\frac{10.7 \text{ m/s}}{10.7 \text{ m/s}} = \frac{111 \text{ m/s}}{10.8 \text{ m/s}}$		u kryzą		
		$v_{\rm sr} = 10, 7 \text{ m/s}$	$v_{\rm sr} = 11,1 {\rm Im/s}$	$v_{\rm sr} = 10$	0,8 m/s	
292	1,14	9,65	20,18	8,77	21,93	
282	1,06	3,77	16,98	2,83	19,81	
272	1,02	1,96	16,67	0,98	19,61	
262	0,99	7,07	13,13	6,06	15,15	
252	0,96	3,12	10,42	2,08	12,50	
242	0,94	1,06	7,45	0,00	10,64	
232	0,93	-3,23	7,53	-4,30	9,68	
222	0,91	-4,40	5,49	-5,49	7,69	
212	0,90	-1,11	4,44	-2,22	6,67	
202	0,89	0,00	3,37	-1,12	5,62	
192	0,88	-2,27	1,14	-3,41	3,41	
182	0,87	-1,15	-3,45	-2,30	0,00	
172	0,86	1,16	-5,81	0,00	-3,49	
162	0,86	0,00	-3,49	-1,16	-1,16	
152	0,85	-3,53	-3,53	-4,71	-1,18	
142	0,86	-1,16	-4,65	-1,16	-1,16	
132	0,86	-1,16	-2,33	-2,33	0,00	
122	0,87	-1,15	-3,45	-2,30	0,00	
112	0,88	-1,14	-2,27	-2,27	0,00	
102	0,89	0,00	2,25	-1,12	4,49	
92	0,90	-1,11	4,44	-2,22	6,67	
82	0,91	-1,10	-1,10	-2,20	1,10	
72	0,93	0,00	-6,45	-1,08	-3,23	
62	0,94	3,19	-8,51	2,13	-5,32	
52	0,96	6,25	-10,42	5,21	-7,29	
42	0,99	10,10	-8,08	9,09	-5,05	
32	1,02	12,75	-7,84	11,76	-4,90	
22	1,06	13,21	1,89	12,26	3,77	
12	1.14	18.42	7.89	17.54	9.65	

Tab. 7.5. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $q_v = 0.95 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 260500. Niepewność wyznaczenia strumienia objętości $U(q_v) = 2.2$ % dla kryzy, $U(q_v) = 0.8$ % dla termoanemometru.

		Błąd	Błąd	Błąd	Błąd
	Współczynnik	współczynnika	współczynnika	współczynnika	współczynnika
	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania
Odległosc od	wyznaczony na podstawio	wyznaczony w	wyznaczony w płoszozyźnio	wyznaczony w płaszozyźnio	wyznaczony w płaszozyźnio
rurociagu	wzoru 5.19	noziomei. [%]	nionowei. [%]	praszczyznie poziomej. [%]	piaszczyznie nionowei, [%
Turochigu	w2010 CH1	vér obliczona	na podstawie	pozioiiiej, [/ 0]	piono (, ej, [/ t
		pomiaru predkości		v _{śr} obliczona na podstawie	
mm	ı	punkte	owych	pomiaru kryzą	
		$v_{\rm sr} = 13,1 {\rm m/s}$	$v_{\rm sr} = 13,5 {\rm m/s}$	$v_{\rm sr} = 13$	3,2 m/s
292	1,14	15,79	18,42	14,04	20,18
282	1,06	10,38	12,26	8,49	14,15
272	1,02	10,78	15,69	6,86	17,65
262	0,99	12,12	13,13	7,07	15,15
252	0,96	10,42	9,38	8,33	11,46
242	0,94	8,51	9,57	8,51	11,70
232	0,93	6,45	8,60	6,45	10,75
222	0,91	4,40	5,49	4,40	7,69
212	0,90	3,33	4,44	2,22	6,67
202	0,89	4,49	2,25	2,25	4,49
192	0,88	4,55	-2,27	3,41	0,00
182	0,87	1,15	-1,15	2,30	1,15
172	0,87	2,30	0,00	1,15	2,30
162	0,86	2,33	-2,33	0,00	0,00
152	0,85	-2,35	-4,71	0,00	-2,35
142	0,86	-2,33	-2,33	-1,16	0,00
132	0,87	-4,60	-2,30	-2,30	0,00
122	0,87	-2,30	-6,90	-5,75	-4,60
112	0,88	-1,14	-4,55	-1,14	-2,27
102	0,89	-1,12	-3,37	0,00	0,00
92	0,90	1,11	-3,33	-1,11	-1,11
82	0,91	5,49	-2,20	1,10	0,00
72	0,93	2,15	-1,08	6,45	1,08
62	0,94	2,13	-4,26	2,13	-1,06
52	0,96	1,04	-4,17	3,12	-1,04
42	0,99	-7,07	1,01	3,03	4,04
32	1,02	-5,88	0,00	-4,90	1,96
22	1,06	0,94	3,77	-1,89	5,66
12	1,14	15,79	8,77	7,02	11,40

Tab. 7.6. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $\underline{q_v} = 1,09 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 295000. Niepewność wyznaczenia strumienia objętości $U(q_v) = 2,1$ % dla kryzy, $U(q_v) = 0,7$ % dla termoanemometru.

		Błąd	Błąd	Błąd	Błąd	
	Współczynnik	współczynnika	współczynnika	współczynnika	współczynnika	
	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	
Odległość od	wyznaczony	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	
przedniej ścianki	na podstawie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	
rurociągu	wzoru 5.19	poziomej, [%]	pionowej, [%]	poziomej, [%]	pionowej, [%	
		$v_{\rm sr}$ obliczona na podstawie		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
		pomiaru prędkości				
mm	1	punktowych pomiaru kry		u Kryzą		
		$v_{\rm sr} = 14,9$ III/s	$v_{\rm sr} = 13,3 {\rm m/s}$	$V_{\rm sr} = 1$.	$v_{\rm sr} = 15,1 \text{III/S}$	
292	1,14	14,04	19,30	12,28	20,18	
282	1,06	9,43	16,04	8,49	16,98	
272	1,02	8,82	14,71	6,86	15,69	
262	0,99	3,03	13,13	2,02	14,14	
252	0,96	1,04	9,38	0,00	11,46	
242	0,94	-1,06	7,45	-2,13	8,51	
232	0,93	3,23	5,38	1,08	6,45	
222	0,91	4,40	4,40	2,20	6,59	
212	0,90	2,22	4,44	1,11	5,56	
202	0,89	0,00	4,49	-2,25	5,62	
192	0,88	0,00	2,27	-2,27	3,41	
182	0,87	0,00	0,00	-2,30	1,15	
172	0,87	0,00	0,00	-1,15	1,15	
162	0,86	0,00	-1,16	-2,33	0,00	
152	0,86	1,16	-2,33	0,00	-1,16	
142	0,86	0,00	-1,16	-2,33	0,00	
132	0,87	0,00	-1,15	-1,15	0,00	
122	0,87	0,00	-4,60	-2,30	-3,45	
112	0,88	-2,27	-3,41	-3,41	-2,27	
102	0,89	-3,37	2,25	-4,49	3,37	
92	0,90	-1,11	2,22	-2,22	3,33	
82	0,91	3,30	2,20	1,10	3,30	
72	0,93	6,45	2,15	4,30	3,23	
62	0,94	5,32	-4,26	4,26	-2,13	
52	0,96	5,21	-6,25	3,12	-5,21	
42	0,99	7,07	-4,04	5,05	-3,03	
32	1,02	2,94	-1,96	1,96	0,00	
22	1,06	4,72	0,94	3,77	1,89	
12	1.14	10.53	6.14	8.77	7.02	

Tab. 7.7. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $q_v = 1,23 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 337800. Niepewność wyznaczenia strumienia objętości $U(q_v) = 2,0$ % dla kryzy, $U(q_v) = 0,6$ % dla termoanemometru.

		Błąd	Błąd	Błąd	Błąd
	Współczynnik	współczynnika	współczynnika	współczynnika	współczynnika
	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania
Odległość od	wyznaczony	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w
rurociagu	wzoru 5 19	praszczyznie noziomej [%]	piaszczyznie nionowej [%]	praszczyznie poziomej [%]	piaszczyznie pionowei [%
Turociągu	W2010 3.17	vér obliczona	na podstawie	pozioinej, [/ 0]	plonowej, [70
		pomiaru	predkości	vér obliczona na podstawie	
mr	ı	punktowych		pomiaru kryza	
		$v_{\rm sr} = 17,3 {\rm m/s}$	$v_{\rm sr} = 17,3 {\rm m/s}$	$v_{\text{sr}} = 1$	7,1 m/s
292	1,06	5,66	16,98	5,66	17,92
282	1,02	-4,90	16,67	-3,92	17,65
272	0,99	0,00	10,10	1,01	11,11
262	0,96	2,08	6,25	3,12	7,29
252	0,94	3,19	9,57	4,26	10,64
242	0,93	2,15	8,60	3,23	9,68
232	0,92	2,17	7,61	3,26	8,70
222	0,90	3,33	4,44	4,44	5,56
212	0,89	1,12	-3,37	2,25	-2,25
202	0,88	-1,14	-4,55	0,00	-3,41
192	0,88	0,00	-3,41	1,14	-2,27
182	0,87	0,00	-3,45	1,15	-2,30
172	0,86	0,00	-1,16	1,16	0,00
162	0,86	-1,16	-8,14	0,00	-5,81
152	0,86	0,00	-3,49	1,16	-2,33
142	0,87	2,30	-5,75	3,45	-4,60
132	0,88	4,55	-6,82	5,68	-5,68
122	0,88	3,41	-4,55	4,55	-3,41
112	0,89	2,25	1,12	3,37	2,25
102	0,90	4,44	3,33	5,56	4,44
92	0,92	6,52	0,00	7,61	1,09
82	0,93	5,38	-5,38	6,45	-4,30
72	0,94	6,38	-4,26	7,45	-3,19
62	0,96	7,29	0,00	8,33	1,04
52	0,99	9,09	2,02	10,10	3,03
42	1,02	10,78	3,92	11,76	4,90
32	1,06	13,21	2,83	14,15	4,72
22	1,14	16,67	4,39	17,54	5,26
12	1,06	3,77	-3,77	5,66	-2,83

Tab. 7.8. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $q_v = 1,41 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 383000. Niepewność wyznaczenia strumienia objętości $U(q_v) = 1,9$ % dla kryzy, $U(q_v) = 0,5$ % dla termoanemometru.

		Błąd	Błąd	Błąd	Błąd	
	Współczynnik	współczynnika	współczynnika	współczynnika	współczynnika	
	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	
Odległość od	wyznaczony	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	
przedniej ścianki	na podstawie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	
rurociągu	wzoru 5.19	poziomej, [%]	pionowej, [%]	poziomej, [%]	pionowej, [%	
		V_{sr} obliczona na podstawie V_{sr} obl		na podstawie		
mm	<u>ו</u>	pomiaru prędko	20.0 ms/s	pomiar	u kryzą	
		$v_{\rm sr} = 19,2$ m/s	$v_{\rm sr} = 20,0 {\rm m/s}$	$v_{\rm sr} = 19$	$v_{\rm sr} = 19,6 {\rm m/s}$	
292	1,14	12,28	23,68	12,28	24,56	
282	1,06	7,55	18,87	5,66	19,81	
272	1,02	3,92	10,78	1,96	12,75	
262	0,99	5,05	12,12	3,03	14,14	
252	0,96	7,29	9,38	5,21	11,46	
242	0,94	3,19	13,83	1,06	14,89	
232	0,93	1,08	9,68	-1,08	11,83	
222	0,92	1,09	5,43	-1,09	7,61	
212	0,90	4,44	4,44	2,22	5,56	
202	0,89	2,25	2,25	1,12	4,49	
192	0,89	3,37	-5,62	1,12	-3,37	
182	0,88	1,14	0,00	-1,14	2,27	
172	0,87	3,45	-1,15	1,15	1,15	
162	0,86	2,33	-3,49	0,00	-1,16	
152	0,86	1,16	-2,33	-1,16	0,00	
142	0,86	-5,81	-2,33	-8,14	0,00	
132	0,87	2,30	-1,15	0,00	1,15	
122	0,88	1,14	-2,27	-1,14	0,00	
112	0,89	-1,12	0,00	-2,25	2,25	
102	0,89	-1,12	-1,12	-3,37	1,12	
92	0.90	3.33	-1.11	1.11	1.11	
82	0.92	3.26	-6.52	1.09	-4.35	
72	0.93	1.08	2.15	-1.08	4.30	
62	0.94	3.19	0.00	1.06	2.13	
52	0.96	3.12	-7.29	1.04	-5.21	
42	0.99	6.06	-5.05	4.04	-3.03	
32	1 02	7 84	1 96	5.88	3.92	
22	1.06	7.55	0.00	5,66	1 89	
12	1,14	11,40	0,88	9,65	2,63	

Tab. 7.9. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $q_v = 1,61 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 44000. Niepewność wyznaczenia strumienia objętości $U(q_v) = 1,9$ % dla kryzy, $U(q_v) = 0,4$ % dla termoanemometru.

		Błąd	Błąd	Błąd	Błąd
	Współczynnik	współczynnika	współczynnika	współczynnika	współczynnika
	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania
Odległość od	wyznaczony	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w
przedniej ścianki	na podstawie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie
rurociągu	wzoru 5.19	poziomej, [%]	pionowej, [%]	poziomej, [%]	pionowej, [%
		V _{śr} ODIICZONA	na poustawie	$v_{\rm sr}$ obliczona na podstawie	
mn	ו	politiaru prędkości pulktowych $y = 22.4 \text{ m/s}$		politiatu ki yzą	
		$v_{\rm sr} = 22,4$ III/s	$v_{\rm sr} = 22,7$ m/s	$V_{\rm Sr} = 22$	2,5 111/8
292	1,13	11,50	12,39	11,50	14,16
282	1,06	-8,49	7,55	-7,55	9,43
272	1,02	-11,76	-0,98	-11,76	0,98
262	0,99	-11,11	0,00	-11,11	2,02
252	0,96	-8,33	-2,08	-8,33	-1,04
242	0,94	-12,77	2,13	-11,70	3,19
232	0,93	-15,05	-2,15	-15,05	0,00
222	0,92	-15,22	-6,52	-14,13	-5,43
212	0,91	-10,99	-7,69	-9,89	-5,49
202	0,90	-12,22	-10,00	-12,22	-7,78
192	0,89	-12,36	-19,10	-12,36	-16,85
182	0,88	-14,77	-12,50	-14,77	-11,36
172	0,87	-12,64	-14,94	-12,64	-12,64
162	0,86	-15,12	-17,44	-13,95	-15,12
152	0,86	-15,12	-15,12	-15,12	-13,95
142	0,86	-23,26	-15,12	-22,09	-13,95
132	0,87	-13,79	-14,94	-13,79	-12,64
122	0,88	-14,77	-15,91	-14,77	-13,64
112	0,89	-16,85	-13,48	-16,85	-11,24
102	0,90	-16,67	-13,33	-15,56	-11,11
92	0.91	-10.99	-13,19	-10.99	-10.99
82	0.92	-13.04	-21.74	-11.96	-19.57
72	0.93	-16.13	-10.75	-15.05	-8.60
62	0.94	-12.77	-12.77	-12.77	-10.64
52	0.96	-12.50	-21.88	-12.50	-19.79
42	0.99	-9.09	-19 19	-9.09	-17 17
32	1 02	-7 84	-11 76	-7 84	-9.80
22	1.06	-8 49	-13 21	-7 55	-11 32
12	1,13	-4,42	-13,27	-4,42	-11,50
7.5. Analiza wyników uzyskanych przy pomiarze anemometrem

W tablicach 7.10 oraz 7.11 przedstawiono dla każdego z dziewięciu strumieni objętości analizę porównawczą współczynników wzorcowania wyznaczoną na podstawie wzoru wyznaczonego przez autora w stosunku do współczynnika wzorcowania wyznaczonego doświadczalnie na podstawie pomiarów.

A) v_{sr} wyznaczona na podstawie pomiaru prędkości punktowych.

Tab. 7.10. Wykresy przedstawiające analizę porównawczą współczynników wzorcowania wyznaczonych na podstawie wzoru 5.19 oraz współczynników wzorcowania wyznaczonych w płaszczyźnie poziomej oraz pionowej (prędkość średnia wyznaczona na podstawie pomiaru prędkości punktowych) dla wszystkich 9 strumieni objętości.

Strumień		wzorcowania wyzr	naczony na podsta	awie wzoru 5.19			
objętości/ Liczba		wzorcowania wwzr	aczony w płaszcz	winie notiomei (predkość		
Reynoldsa	średnia wyznaczona z pomiaru prędkości punktowych)						
		wzorcowania wyzr czona z pomiaru p	naczony w płaszcz rędkości punktow	ryźnie pionowej (/ych)	prędkość		
	1,4						
	1,2 🔺						
	1	The state					
$a = 0.21 \text{ m}^{3/a}$	0,8						
$q_v = 0.51 \text{ m/s}$	0,6						
Re = 84700	0,4						
	0,2						
	0						
	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	
			Ro	:/R			







B) *v*_{*sr*} wyznaczona na podstawie pomiaru kryzą

Tab. 7.11. Wykresy przedstawiające analizę porównawczą współczynników wzorcowania wyznaczonych na podstawie wzoru 5.19 oraz współczynników wzorcowania wyznaczonych w płaszczyźnie poziomej oraz pionowej (prędkość średnia wyznaczona na podstawie pomiaru kryzą) dla wszystkich 9 strumieni objętości.









Na podstawie analizy wykresów przedstawionych w tablicach 7.10 oraz 7.11 można stwierdzić, że w pobliżu ścianki rurociągu współczynniki wzorcowania wyznaczone na drodze teoretycznej różnią się od współczynników wzorcowania wyznaczonych doświadczalnie. Jednak im bliżej środka rurociągu różnice pomiędzy współczynnikami nie były już takie duże. Dla zakresu liczb Reynoldsa z przedziału 84000 – 440000 można zauważyć, że najmniejsze różnice współczynników wzorcowania zauważalne były dla czujnika umieszczonego w 0,5R – 0,7R.

Największe różnice współczynników wzorcowania można zauważyć przy pomiarze dziewiątym, ale może to być spowodowane niesymetrycznym rozkładem prędkości w rurociągu, a przedmiotem zainteresowania autora tej pracy są rozkłady symetryczne.

7.6. Wyniki pomiarów przy zastosowaniu rurki Pitota

W celu dogłębnej weryfikacji doświadczalnej dokonano pomiaru prędkości przepływomierzem próbkującym z czujnikiem typu rurka Pitota. Pomiar rurką Pitota jest traktowany jako dodatkowe źródło sprawdzenia poprawności wyprowadzonych wzorów na współczynnik wzorcowania, dlatego pomiary są wykonanie tylko dla 5 różnych strumieni objętości. Jako główny element weryfikacji doświadczalnej wykorzystano czujnik powierzchniowy typu anemometr, dlatego pomiar rurką Pitota traktowany jest jako sprawdzający i nie określano niepewności pomiaru tego typu czujnikiem.

Wyniki uzyskane na podstawie pomiarów oraz obliczenia prędkości w rurociągu przedstawiono w załączniku nr 3. Metodyka obliczania współczynników wzorcowania dla pomiaru rurką Pitota jest taka sama jak w punkcie 7.4.

		Błąd	Błąd	Błąd	Błąd
	Współczynnik	współczynnika	współczynnika	współczynnika	współczynnika
	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania
Udlegiose od	wyznaczony na podstawia	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w
rurociagu	wzoru 5 19	praszczyznie poziomej [%]	nionowei [%]	praszczyznie noziomej [%]	piaszczyznie pionowej [%
Turociągu	W2010 3.17	vér obliczona	na podstawie	vér obliczona	na podstawie
mm	ı	pomiaru prędko	sci punktowych	pomiar	u kryzą
		$v_{\rm sr} = 4.1 {\rm m/s}$	$v_{\rm sr} = 4,6 {\rm m/s}$	$v_{\rm \acute{sr}} = 4$.,3 m/s
292	1,16	13,79	12,93	13,79	18,10
282	1,07	-3,74	14,95	-8,41	20,56
272	1,02	7,84	13,73	2,94	19,61
262	0,98	8,16	10,20	3,06	16,33
252	0,96	-15,63	2,08	-20,83	8,33
242	0,94	-5,32	3,19	-10,64	9,57
232	0,92	-7,61	-2,17	-13,04	4,35
222	0,91	-3,30	-3,30	-8,79	3,30
212	0,89	-11,24	-8,99	-16,85	-2,25
202	0,88	-2,27	3,41	-7,95	9,09
192	0,87	-8,05	-8,05	-13,79	-1,15
182	0,86	-9,30	-2,33	-15,12	4,65
172	0,85	-10,59	-10,59	-16,47	-3,53
162	0,85	-5,88	-14,12	-11,76	-7,06
152	0,84	0,00	-15,48	-4,76	-8,33
142	0,85	1,18	-10,59	-3,53	-3,53
132	0,85	-2,35	0,00	-7,06	5,88
122	0,86	5,81	-2,33	1,16	4,65
112	0,87	3,45	-11,49	-1,15	-4,60
102	0,88	7,95	-6,82	3,41	0,00
92	0,89	8,99	-2,25	4,49	4,49
82	0,91	4,40	-6,59	0,00	0,00
72	0,92	8,70	4,35	4,35	10,87
62	0,94	7,45	6,38	3,19	12,77
52	0,96	6,25	5,21	1,04	11,46
42	0,98	14,29	13,27	10,20	18,37
32	1,02	17,65	7,84	13,73	13,73
22	1,07	21,50	12,15	17,76	17,76
12	1,16	4,31	16,38	0,00	21,55

Tab. 7.12. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $q_v = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 85200.

Tab. 7.13. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $q_v = 0.61 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 171000.

Odległość od	Współczynnik wzorcowania wyznaczony	Błąd współczynnika wzorcowania wyznaczony w	Błąd współczynnika wzorcowania wyznaczony w	Błąd współczynnika wzorcowania wyznaczony w	Błąd współczynnika wzorcowania wyznaczony w
przedniej ścianki	na podstawie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie
rurociągu	wzoru 5.19	poziomej, [%]	pionowej, [%]	poziomej, [%]	pionowej, [%
		V _{śr} obliczona	na podstawie	v _{śr} obliczona	na podstawie
mr	ו	pomaru prędko	sci punktowych	pomiar	u kryzą
		$v_{\rm sr} = 8,0$ m/s	$v_{\rm sr} = 9,4$ m/s	$v_{\rm sr} = 8$,0 III/S
292	1,15	13,04	17,39	13,04	24,35
282	1,06	5,66	16,04	-1,89	23,58
272	1,02	3,92	13,73	-2,94	21,57
262	0,99	-2,02	9,09	-10,10	16,16
252	0,96	-3,13	7,29	-10,42	15,63
242	0,94	-8,51	4,26	-15,96	11,70
232	0,92	1,09	2,17	-6,52	10,87
222	0,91	1,10	-2,20	-6,59	6,59
212	0,90	1,11	-4,44	-6,67	4,44
202	0,89	4,49	-4,49	-3,37	4,49
192	0,88	1,14	-10,23	-6,82	0,00
182	0,87	5,75	-12,64	-1,15	-3,45
172	0,86	0,00	-11,63	-8,14	-2,33
162	0,85	7,06	-9,41	0,00	0,00
152	0,85	4,71	-15,29	-2,35	-5,88
142	0,85	5,88	-15,29	-1,18	-4,71
132	0,86	4,65	-13,95	-2,33	-4,65
122	0,87	5,75	-6,90	-1,15	2,30
112	0,88	3,41	-5,68	-3,41	3,41
102	0,89	4,49	-6,74	-3,37	2,25
92	0,90	4,44	-1,11	-3,33	7,78
82	0,91	5,49	-4,40	-2,20	4,40
72	0,92	1,09	1,09	-6,52	9,78
62	0,94	-1,06	3,19	-8,51	11,70
52	0,96	0,00	6,25	-8,33	13,54
42	0,99	4,04	7,07	-3,03	15,15
32	1,02	14,71	3,92	7,84	12,75
22	1,06	10,38	9,43	3,77	16,98
12	1,15	19,13	12,17	13,04	19,13

Tab.7.14. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $\underline{q}_v = 0,76 \text{ m}^3/\text{s}, Re = 208400.$

		Błąd	Błąd	Błąd	Błąd
	Współczynnik	współczynnika	współczynnika	współczynnika	współczynnika
	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania
Odległość od	wyznaczony	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w
przedniej ścianki	na podstawie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie
rurociągu	wzoru 5.19	poziomej, [%]	pionowej, [%]	poziomej, [%]	pionowej, [%
		v _{śr} obliczolia	sci punktowych	V _{śr} ODIICZOIIa	na pousiawie
mm	1	$\frac{1}{2}$	-11.4 m/s	pointal	$u \operatorname{Kiyzq}$
		$V_{\rm Sr} = 9,0{\rm m/s}$	$V_{\rm Sr} = 11,4$ III/S	$V_{\rm Sr} = 10$),0 III/S
292	1,14	12,28	-39,47	12,28	-29,82
282	1,06	3,77	12,26	-3,77	17,92
272	1,02	2,94	8,82	-4,90	14,71
262	0,99	1,01	13,13	-7,07	19,19
252	0,96	0,00	9,38	-8,33	15,63
242	0,94	-1,06	6,38	-9,57	12,77
232	0,93	2,15	6,45	-5,38	12,90
222	0,91	3,30	1,10	-4,40	8,79
212	0,90	2,22	1,11	-5,56	7,78
202	0,89	3,37	0,00	-4,49	7,87
192	0,88	5,68	1,14	-2,27	7,95
182	0,87	1,15	-4,60	-6,90	2,30
172	0,86	4,65	-5,81	-2,33	2,33
162	0,86	2,33	-4,65	-4,65	3,49
152	0,85	4,71	-9,41	-3,53	-1,18
142	0,86	5,81	-5,81	-2,33	1,16
132	0,86	6,98	-3,49	0,00	3,49
122	0,87	5,75	-4,60	-2,30	3,45
112	0,88	2,27	-4,55	-5,68	2,27
102	0,89	3,37	-5,62	-4,49	2,25
92	0,90	7,78	0,00	0,00	6,67
82	0,91	0,00	2,20	-7,69	9,89
72	0,93	2,15	3,23	-6,45	10,75
62	0,94	4,26	4,26	-3,19	10.64
52	0,96	3,12	6,25	-4,17	12.50
42	0.99	6.06	10.10	-2.02	16.16
32	1.02	11.76	13.73	4,90	19,61
22	1.06	9.43	16.04	1.89	22.64
12	1,14	10,53	14,04	3,51	19,30

Tab. 7.15. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla $q_v = 0.94 \text{ m}^3/\text{s}$, Re = 254200.

	Współczynnik	Błąd współczynnika	Błąd współczynnika	Błąd współczynnika	Błąd współczynnika
	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania
Odległość od	wyznaczony	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w
przedniej ścianki	na podstawie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyżnie	płaszczyźnie
rurociągu	wzoru 5.19	poziomej, [%]	pionowej, [%]	poziomej, [%]	pionowej, [%
		nomiaru predko	sci punktowych	v _{sr} oonczona	na pousiawie u kryza
		$v_{\text{sr}} = 12.3 \text{ m/s}$	$v_{\text{sr}} = 13.6 \text{ m/s}$	$v_{\text{sr}} = 13$	3.0 m/s
292	1.14	12.28	-2.63	12.28	2.63
282	1.06	-9.43	14,15	-16.04	17.92
272	1.02	-1.96	11.76	-7.84	15.69
262	0.99	5.05	6.06	0.00	10.10
252	0,96	4.17	7.29	-1.04	11.46
242	0,94	5,32	6,38	0.00	10,64
232	0,93	2,15	4,30	-3,23	8,60
222	0,91	-3,30	3,30	-9,89	7,69
212	0,90	0,00	-1,11	-5,56	3,33
202	0,89	2,25	-1,12	-3,37	3,37
192	0,88	1,14	-4,55	-4,55	0,00
182	0,87	1,15	-8,05	-4,60	-3,45
172	0,87	2,30	-6,90	-3,45	-2,30
162	0,86	1,16	-8,14	-4,65	-3,49
152	0,85	3,53	-8,24	-2,35	-3,53
142	0,86	5,81	-9,30	0,00	-4,65
132	0,87	6,90	-6,90	2,30	-2,30
122	0,87	6,90	-5,75	1,15	-1,15
112	0,88	6,82	-1,14	1,14	3,41
102	0,89	5,62	-3,37	0,00	1,12
92	0,90	7,78	1,11	2,22	5,56
82	0,91	9,89	3,30	4,40	7,69
72	0,93	11,83	3,23	6,45	7,53
62	0,94	10,64	4,26	5,32	8,51
52	0,96	10,42	8,33	5,21	12,50
42	0,99	12,12	10,10	7,07	14,14
32	1,02	12,75	9,80	7,84	13,73
22	1,06	5,66	11,32	0,00	15,09
12	1,14	7,02	0,00	1,75	4,39

Tab. 7.16. Wartość współczynnika wzorcowania dla danych doświadczalnych i obliczonych teoretycznie z wzoru (5.19) dla q_{ν} = 1,07 m³/s, Re = 292000.

		Bład	Bład	Bład	Bład
	Współczynnik	współczynnika	współczynnika	współczynnika	współczynnika
	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania	wzorcowania
Odległość od	wyznaczony	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w	wyznaczony w
przedniej ścianki	na podstawie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie	płaszczyźnie
rurociągu	wzoru 5.19	poziomej, [%]	pionowej, [%]	poziomej, [%]	pionowej, [%
		obliczona n	a podstawie	obliczona n	a podstawie
mr	ו	pomiaru prędko	sci punktowych	pomiar	u kryzą
		$v_{\rm sr} = 13,8 {\rm m/s}$	$v_{\rm sr} = 15,4$ m/s	$v_{\rm sr} = 12$	1,9 m/s
292	1,14	12,28	-8,77	12,28	-5,26
282	1,06	0,00	11,32	-8,49	14,15
272	1,02	-2,94	12,75	-10,78	14,71
262	0,99	2,02	12,12	-6,06	14,14
252	0,96	5,21	7,29	-2,08	9,38
242	0,94	3,19	6,38	-4,26	8,51
232	0,93	3,23	4,30	-4,30	7,53
222	0,91	4,40	3,30	-3,30	5,49
212	0,90	-1,11	0,00	-8,89	3,33
202	0,89	4,49	-2,25	-3,37	1,12
192	0,88	5,68	-3,41	-1,14	0,00
182	0,87	6,90	-5,75	0,00	-2,30
172	0,87	6,90	-6,90	-1,15	-3,45
162	0,86	4,65	-12,79	-2,33	-9,30
152	0,86	6,98	-10,47	0,00	-6,98
142	0,86	5,81	-8,14	-1,16	-4,65
132	0,87	4,60	-11,49	-2,30	-8,05
122	0,87	2,30	-8,05	-5,75	-4,60
112	0,88	3,41	-4,55	-4,55	-1,14
102	0,89	0,00	-5,62	-7,87	-2,25
92	0,90	-2,22	-1,11	-10,00	2,22
82	0,91	1,10	0,00	-6,59	3,30
72	0,93	6,45	3,23	-1,08	6,45
62	0,94	7,45	3,19	0,00	6,38
52	0,96	7,29	4,17	0,00	7,29
42	0,99	10.10	6,06	3,03	9,09
32	1,02	9,80	8,82	2,94	11.76
22	1.06	13.21	13.21	5.66	16.04
12	1,14	7,89	12,28	0,00	15,79

7.7. Analiza wyników uzyskanych przy pomiarze rurką Pitota

W tablicach nr 7.18 oraz 7.19 przedstawiono dla każdego z pięciu strumieni przepływów analizę porównawczą współczynników wzorcowania wyznaczoną na podstawie wzoru wyznaczonego przez autora tej rozprawy doktorskiej w stosunku do współczynnika wzorcowania wyznaczonego doświadczalnie na podstawie pomiarów.

A) v_{sr} wyznaczona na podstawie pomiaru prędkości punktowych.

Tab. 7.18. Wykresy przedstawiające analizę porównawczą współczynników wzorcowania wyznaczonych na podstawie wzoru 5.19 oraz współczynników wzorcowania wyznaczonych w płaszczyźnie poziomej oraz pionowej (prędkość średnia wyznaczona na podstawie pomiaru prędkości punktowych) dla wszystkich 5 strumieni objętości.

Strumień	Współczynni	kwzorcowania wyzr	naczony na podst	awie wzoru 5.19		
objętości/ Liczba		k wzorcowania wyzr	naczony w płaszcz	vźnie poziomej (prędkość	
Keynoldsa	średnia wyzr 	aczona z pomiaru p k wzorcowania wyzr raczona z pomiaru p	rędkości punktow naczony w płaszcz rędkości punktow	vych) tyźnie pionowej (vych)	prędkość	
	1,4					
	1,2 🔺					-
	1] 👗	No. And				
$a = 0.30 \text{ m}^{3/s}$	0,8					
$q_v = 0,50 \text{ m/s}$	0,6					
Re = 85200	0,4					
	0,2					
	o 📖					
	0,00	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
			Ro	:/R		





B) v_{sr} wyznaczona na podstawie pomiaru kryzą

Tab. 7.19. Wykresy przedstawiające analizę porównawczą współczynników wzorcowania wyznaczonych na podstawie wzoru 5.19 oraz współczynników wzorcowania wyznaczonych w płaszczyźnie poziomej oraz pionowej (prędkość średnia wyznaczona na podstawie pomiaru kryzą) dla wszystkich 5 strumieni objętości







Na podstawie analizy wykresów przedstawionych w tablicach 7.18 oraz 7.19 można stwierdzić, że w pobliżu ścianki rurociągu współczynniki wzorcowania wyznaczone na drodze teoretycznej różnią się od współczynników wzorcowania wyznaczonych doświadczalnie. Jednak im bliżej środka rurociągu różnice pomiędzy współczynnikami nie były już takie duże. Dla zakresu liczb Reynoldsa z przedziału 885200 – 292000 można zauważyć, że najmniejsze różnice współczynników wzorcowania zauważalne były dla czujnika umieszczonego w 0,4R – 0, 7R.

Badania doświadczalne były również przeprowadzone w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej, jednak ze względu na mały zakres zmian strumienia powietrza nie było możliwości pełnej weryfikacji wyprowadzonych wzorów na współczynnik wzorcowania - wyniki tego doświadczenia przedstawiono w [JeleK2010].

7.8. Budżet niepewności

7.8.1. Obliczanie niepewności prędkości metodą pierścieni dla anemometru.

Wykonany pomiar jest pomiarem pośrednim w związku z tym równanie na niepewność jest następujące [Wyraż1999]:

$$U = k_{\alpha} u_{c} \tag{7.1}$$

gdzie: U - niepewność standardowa rozszerzona, k_{α} - współczynnik rozszerzenia,

 u_c - niepewność standardowa złożona.

Ponieważ $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ dla pomiarów pośrednich to :

$$u_{c} = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_{1}}\right)^{2} u_{x_{1}}^{2} + \left(\frac{\partial y}{\partial 2_{1}}\right)^{2} u_{x_{2}}^{2} + \left(\frac{\partial y}{\partial x_{i}}\right)^{2} u_{x_{i}}^{2}}$$
(7.2)

gdzie: $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ - różniczka zupełna po danej zmiennej, $u_{x_i}^2$ - niepewność standardowa

danej zmiennej.

W przypadku pomiaru anemometrem :

$$v = \frac{v_{\text{poziom}} + v_{\text{pion}}}{2} = \frac{1}{32} \left(\sum_{i=1}^{16} v_{\text{poziom}_i} + \sum_{i=1}^{16} v_{\text{pion}_i} \right)$$
(7.3)

gdzie: $v_{poziom} = \frac{\sum_{i=1}^{16} v_{poziom_i}}{16}$ - średnia prędkość w płaszczyźnie poziomej,

 $v_{pion} = \frac{\sum_{i=1}^{16} v_{pion_i}}{16}$ - średnia prędkość w płaszczyźnie pionowej.

Na podstawie powyższych wzorów niepewność złożona u_c wynosi:

$$u_{c} = \frac{1}{32} \sqrt{\sum_{i=1}^{16} u_{poziome_{i}}^{2} + \sum_{i=1}^{16} u_{pion_{i}}^{2}}$$
(7.4)

Aby obliczyć poszczególne niepewności $u_{poziome_i}^2$ (dla i = 1 do 16) oraz $u_{pion_i}^2$ (dla i = 1 do 16) korzystamy z krzywej kalibracji anemometru, która została przedstawiona na świadectwie wzorcowania nr AP 118 wydanem przez laboratorium akredytowane. W ostatniej rubryce świadectwa wzorcowania anemometru wyznaczona jest niepewność pomiaru przyrządu dla poszczególnych prędkości, która jest obliczona na poziomie ufności 95% oraz dla $k_{\alpha} = 2$.

W związku z powyższym niepewność standardowa rozszerzona anemometru wynosi:

$$U_{\rm A} = 2u_{\rm v} \tag{7.5}$$

Stąd niepewność standardowa prędkości wynosi:

$$u_{v} = \frac{U_{A}}{2} \tag{7.6}$$

i dla poszczególnych prędkości niepewności wynoszą:

 Tab. 7.20. Niepewność pomiaru prędkości anemometrem (ze świadectwa wzorcowania)

Prędkość	Niepewność pomiaru dla	Niepewność standardowa
	$k_{\alpha} = 2$	
m/s	m/s	m/s
0,5	0,05	0,0250
2,19	0,227	0,114
5,02	0,137	0,0685
8,98	0,119	0,0595
13,01	0,159	0,0705
17,00	0,227	0,114
21,03	0,311	0,156
26,00	0,429	0,214

Wartości te należy podstawić do równania 7.4

Przykład obliczeniowy dla pomiaru anemometrem wybranego strumienia objętości:

Prędkość		Prędkość	
pozioma	$u_{vpoziome_i}$	pionowa	u_{vpion_i}
m/s		m/s	
10,6	0,080	11,8	0,080
22,6	0,175	25,1	0,204
23,6	0,187	25,7	0,211
24,0	0,192	25,9	0,214
26,2	0,215	25,9	0,214
26,4	0,218	25,9	0,214
26,4	0,218	25,8	0,213
25,6	0,210	26,1	0,214
25,1	0,204	25,1	0,204
25,0	0,203	23,4	0,184
24,2	0,193	23,2	0,182
23,5	0,185	23,1	0,181
22,9	0,179	23,1	0,181
22,6	0,175	22,8	0,178
21,2	0,169	21,2	0,169
8,3	0,069	8,3	0,069

 Tab. 7.21. Niepewność pomiaru prędkości poziomej oraz pionowej

 – pomiar anemometrem

Na podstawie równania 7.4 oraz tabeli 7.21 otrzymujemy:

$$u_c = 0.035 \text{ m/s}$$
 (7.7)

$$U = k_{\alpha}u_{c} = 2 * 0.035 = 0.0714 \approx 0.1 \text{ m/s}$$
(7.8)

W związku z powyższym: $v_{poziom} = 23,4$ m/s, $v_{pion} = 22,4$ m/s, a prędkość średnia: wynosi $v_{srednia} = 22,9 \pm 0,1$ m/s

Dla każdego z pozostałych strumieni objętości niepewność rozszerzona wynosi nie więcej niż 0,1 m/s.

Wyniki pomiarów prędkości anemometrem dla poszczególnych strumieni objętości mają następujące niepewności:

Pierwszy pomiar strumienia objętości: $v_{sr} = 4,4 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s} = 4,4 \text{ m/s} + 2,3\%$ Drugi pomiar strumienia objętości: $v_{sr} = 6,7 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s} = 6,8 \text{ m/s} + 1,5\%$ Trzeci pomiar strumienia objętości: $v_{sr} = 8,8 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s} = 8,8 \text{ m/s} + 1,1\%$ Czwarty pomiar strumienia objętości: $v_{sr} = 10,9 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s} = 10,9 \text{ m/s} + 0,8\%$ Piąty pomiar strumienia objętości: $v_{sr} = 13,3 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s} = 13,3 \text{ m/s} + 0,8\%$ Szósty pomiar strumienia objętości: $v_{sr} = 15,1 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s} = 15,1 \text{ m/s} + 0,7\%$ Siódmy pomiar strumienia objętości: $v_{sr} = 17,3 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s} = 17,3 \text{ m/s} + 0,6\%$ Ósmy pomiar strumienia objętości: $v_{sr} = 19,6 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s} = 19,6 \text{ m/s} + 0,5\%$

7.8.2. Obliczanie niepewności prędkości dla zwężki

Równanie określające prędkość medium w rurociągu:

$$v = \frac{q_v}{A} = \frac{q_v}{\frac{\pi D^2}{4}}$$
(7.10)

gdzie: q_v - strumień objętości wyznaczony za pomocą kryzy, A – pole powierzchni przekroju rurociągu.

Równanie na niepewność standardową złożoną zgodnie z [Wyraz 1999 s.26]:

$$_{u_{c}} = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial q_{v}}\right)^{2} u_{q_{v}}^{2} + \left(\frac{\partial v}{\partial D}\right)^{2} u_{D}^{2}}$$
(7.11)

Obliczamy:

$$\frac{\partial v}{\partial q_v} = \frac{4}{\pi D^2} = \frac{v}{q_v}$$
(7.12)

$$\frac{\partial v}{\partial D} = (-2)\frac{v}{D}$$
(7.13)

Na podstawie (7.11) – (7.13) otrzymuje się:

$$u_{c} = \sqrt{\left(\frac{v}{q_{v}}\right)^{2} u_{q_{v}}^{2} + 4\left(\frac{v}{D}\right)^{2} u_{D}^{2}} = v \sqrt{\left(\frac{u_{q_{v}}}{q_{v}}\right)^{2} + 4\left(\frac{u_{D}}{D}\right)^{2}} (7.14)$$

Po przekształceniach:

$$\frac{\mathbf{u}_{c}}{v} = \sqrt{\left(\frac{u_{q_{v}}}{q_{v}}\right)^{2} + 4\left(\frac{u_{D}}{D}\right)^{2}}$$
(7.15)

Należy obliczyć $\frac{u_{q_v}}{q_v}$ oraz $\frac{u_D}{D}$ gdzie, D – średnica rurociągu = 302 mm.

Obliczenia
$$\frac{u_D}{D}$$
:

Przy obliczaniu $\frac{u_D}{D}$ można przyjąć zgodnie z normą PN – EN ISO 5167-1, że:

$$\left(\frac{u_D}{D}\right)_{\text{max}} = 0,4\% \text{ czyli oznacza to, } \dot{z}e\left(\frac{u_D}{D}\right) = \frac{\left(\frac{u_D}{D}\right)_{\text{max}}}{\sqrt{3}} = 0,231\%$$
(7.16)

Obliczenia $\frac{u_{q_v}}{q_v}$:

Zgodnie z normą PN – EN ISO 5167-1:

$$\frac{u_{q_{\nu}}}{q_{\nu}} = \sqrt{\left[\left(\frac{u_{c}}{C}\right)^{2} + \left(\frac{u_{\varepsilon}}{\varepsilon}\right)^{2} + \left(\frac{2\beta^{4}}{1-\beta^{4}}\right)^{2}\left(\frac{u_{D}}{D}\right)^{2} + \left(\frac{2}{1-\beta^{4}}\right)^{2}\left(\frac{u_{d}}{d}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{U_{\Delta \rho}}{\Delta \rho}\right)^{2} + \frac{1}{4}\left(\frac{u_{\rho}}{\rho}\right)^{2}\right]}$$
(7.17)

Równanie 7.17 wynika z tego, że

$$q_{\nu} = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon \, \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot}{\rho}}$$
(7.18)

1

gdzie: Δp - różnica ciśnień na kryzie, ρ - gęstość gazu, ε - liczba ekspansji, β – przewężenie zwężki (d/D), d - średnica otworu kryzy , D – średnica rurociągu , *C* – współczynnik przepływu.

Obliczenie składowych niepewności wykonano przy założeniu, że nie ma rozrzutu ciśnienia na kryzie i w związku z tym wszystkie niepewności oblicza się metodą typu B:

Niepewność C •

Dla 0,6 <
$$\beta \le 0,75$$
 $\frac{u_c}{C} = (1,667\beta - 0,5)\%$
Ponieważ $\beta = \frac{d}{D} = \frac{0,2248\text{m}}{0,302\text{m}} = 0,744$
 $\frac{u_c}{C} = (1,667 * 0,744 - 0,5)\% = 0,74\%$

• Niepewność *D* – średnicy rurociągu

$$\left(\frac{u_D}{D}\right)_{\text{max}} = 0,4\%$$
 czyli oznacza to , że $\left(\frac{u_D}{D}\right) = \frac{\left(\frac{u_D}{D}\right)_{\text{max}}}{\sqrt{3}} = 0,23\%$

• Niepewność *d* – średnicy otworu kryzy

$$\left(\frac{u_d}{d}\right)_{\text{max}} = 0,07\%$$
 czyli oznacza to , że $\left(\frac{u_d}{d}\right) = \frac{\left(\frac{u_d}{d}\right)_{\text{max}}}{\sqrt{3}} = 0,041\%$

• Niepewność współczynnika ekspansji

Przyjmuje się, zgodnie z normą PN – EN ISO 5167-1:

$$\frac{u_{\varepsilon}}{\varepsilon} = 4 \frac{\Delta p}{p_1} \%$$
(7.19)

gdzie Δp to różnica ciśnień na kryzie, p_1 - ciśnienie bezwzględne przed kryzą

Niepewność gęstości powietrza

Należy zauważyć, że średnia gęstość powierza wynosi:

$$\rho \approx 1,150 \text{ kg/m}^3 \text{ do } \rho \approx 1,160 \text{ kg/m}^3$$

Błąd graniczny wyznaczenia gęstości

$$\rho \approx 1,160 \text{kg/m}^3 \text{ czyli } \frac{u_{\rho}}{\rho} = \frac{\frac{\Delta \rho}{\sqrt{3}}}{1,15} = 0,5\%$$

• Niepewność różnicy ciśnień Δp

Ponieważ:

$$\Delta p = \left(\rho_{H_{2O}} - \rho_p\right) g \Delta h_{zw} \tag{7.20}$$

gdzie $\rho_{{}_{H_2O}}$ - gęstość wody, $\rho_{{}_p}$ - gęstość powierza, g – przyśpieszenie ziemskie,

 Δh_{zw} - różnica wysokości słupków cieczy manometrycznej ($\Delta h_{zw} = \Delta h_1 + \Delta h_2$ gdzie Δh_1 -lewe ramię, Δh_2 - prawe ramię).

$$\frac{U_{\Delta p}}{\Delta p} = \sqrt{\left(\frac{u_{\rho_{H_2O}}}{\rho_{H_2O}}\right)^2 + \left(\frac{u_g}{g}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta h_{zw}}}{\Delta h_{zw}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\rho_p}}{\rho_p}\right)^2}$$
(7.21)

Przyjęto, że $\rho_{H_2O} \approx 1000 \text{ kg/m}^3$ i niepewność graniczna $\Delta \rho_{H_2O} = \pm 1 \text{ kg/m}^3$.

Na tej podstawie $\frac{u_{\rho_{H_2O}}}{\rho_{H_2O}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}}{100} 100\% = 0,06\%$

Przyśpieszenie ziemskie $g = 9,81 \ m/s^2$, więc przyjmuje się niepewność graniczną $\Delta g = 0,01m/s^2$

Czyli
$$u_g = \frac{\Delta g}{\sqrt{3}} = 0,006 \,\mathrm{m/s^2}$$
 stąd $\frac{u_g}{g} = \frac{0,006 \,\mathrm{m/s^2}}{9,81 \,\mathrm{m/s^2}} 100\% = 0,06\%$

• Niepewność różnicy wysokości słupków wody

$$u_{\Delta h_{zw}} = \sqrt{u_{\Delta h_1}^2 + u_{\Delta h_2}^2}$$
(7.20)

Przyjmuje się, że dla Δh_1 i Δh_2 błąd graniczny wynosi $1 mmH_2O$ czyli

$$u_{\Delta h_1} = u_{\Delta h_2} = \frac{1 \,\mathrm{mm}}{\sqrt{3}} = 0,578 \,\mathrm{mm}$$

Na tej podstawie $u_{\Delta h_{zw}} = \sqrt{2 * (0.578)^2} = 0.82 \text{ mm}$

Wyniki pomiarów dla poszczególnych strumieni objętości mają następujące niepewności:

Strumień objętości	Prędkość średnia	Niepewność
	m/s	%
Pierwszy pomiar strumienia objętości	4,3	12,0
Drugi pomiar strumienia objętości	6,7	5,1
Trzeci pomiar strumienia objętości	8,8	3,4
Czwarty pomiar strumienia objętości	10,8	2,6
Piąty pomiar strumienia objętości	13,2	2,2
Szósty pomiar strumienia objętości	15,1	2,1
Siódmy pomiar strumienia objętości	17,1	2.0
Ósmy pomiar strumienia objętości	19,6	1,9
Dziewiąty pomiar strumienia objętości	22,3	1,9

Tab. 7.68. Niepewność pomiaru prędkości mierzonej kryzą pomiarową.

8. Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy przedstawiono podstawowe wiadomości na temat przepływomierzy próbkujących 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. pracy dokonano analizy właściwości metrologicznych przepływomierzy W próbkujących 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 próbkującego. 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.

135

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 określono 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 tą 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 rurociągu. Uzyskane wyniki badań teoretycznych potwierdzaja się W z doświadczalnymi. Dokonując takiego zestawienia i takiej analizy autor pracy udowodnił postawioną tezę wykazując, że poprzez analizę modeli matematycznych urzadzeń pierwotnych przepływomierzy próbkujących czujnikami Z 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. Literatura

[Ander1998] Anderson N.A.: Instrumentation for Process measurement and Control. CRC Press, Boca Raton – Boston – London-New York – Waschington, 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., Siemiendiajew 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., Drobniak 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, Wisła 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 zwężek 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 Measurenment: 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 Measurment 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] Jezierska 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 Measurement. 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 próbkujących 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 próbkujących 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 Wirtschafsgesellschaft 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. Terminologa i symbole.

[PN-EN ISO 5167-1] PN-EN ISO 5167-1Pomiar 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.

[**Różdż1998**] Różdżyński 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 cieplno-energetycznych, Politechnika Łódzka, Łódź, 1993.

[SzebP1989] Szebeszczyk J., Pietraszek S., Waluś S.: Model użytkowy przepływomierza ultradźwiękowego do bezzakłóceniowego 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 Messund 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-Marktananalyse 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**] Troskolański A.T.: Hydraulika. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1955.

[Trosk1967] Troskolański 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 poziomu. 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. Durkbasa, 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 Wrocławska, 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.

[WaluŽ1994] Waluś S., Żelezik 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.

Załączniki nr 1 Wyniki pomiarów prędkości płynu za pomocą anemometru

Pomiarów dokonano w płaszczyźnie poziomej oraz w płaszczyźnie pionowej. Obliczając prędkość średnią w tych płaszczyznach zastosowano metodę podziału przekroju pomiarowej na powierzchnie równoważne. W tym celu podzielono przekrój pomiarowy na koncentryczne powierzchnie o równych polach (powierzchniach równoważnych). Punkty pomiarowe wyznaczona na podstawie przecięcia dwóch prostopadłych do siebie średnic z okręgami dzielącymi każdą powierzchnię na dwie części o równych polach.

	$q_v = 0.31 \text{m}^3/\text{s}, Re = 84700$		$q_v = 0.48 \text{ m}^3/\text{s}, Re = 172000$	
Odległość od	Prędkość mierzona	Prędkość mierzona	Prędkość mierzona	Prędkość mierzona
przedniej ścianki	w płaszczyźnie	w płaszczyźnie	w płaszczyźnie	w płaszczyźnie
rurociągu	poziomej	poziomej	pionowej	pionowej
mm	m/s	m/s	m/s	m/s
302	0,0	0,0	0,0	0,0
292	4,2	4,2	6,4	7,3
282	4,3	4,3	6,7	7,4
272	4,5	4,5	7,2	8,0
262	4,7	4,7	7,3	7,9
252	4,9	4,9	7,4	8,0
242	5,1	5,1	7,5	7,9
232	5,0	5,0	7,5	7,7
222	5,0	5,0	7,6	7,8
212	5,0	5,0	7,7	7,7
202	4,9	4,9	7,7	7,8
192	4,9	4,9	7,7	7,5
182	4,7	4,7	7,6	7,1
172	4,6	4,6	7,4	7,5
162	4,7	4,7	7,1	7,4
152	4,7	4,7	7,2	7,2
142	4,7	4,7	7,5	7,5
132	4,8	4,8	7,2	7,3
122	4,7	4,7	7,3	7,4
112	4,6	4,6	7,7	7,1
102	4,7	4,7	7,8	6,7
92	4,8	4,8	7,6	6,7
82	4,8	4,8	7,4	6,9
72	4,7	4,7	7,3	7,1
62	4,8	4,8	7,2	6,9

Tab. z.1.1 Wyniki pomiarów prędkości dla poszczególnych strumienia objętości.

52	4,8	4,8	7,2	6,7
42	4,9	4,9	7,0	7,0
32	4,8	4,8	7,1	6,8
22	4,7	4,7	7,0	6,6
12	3,9	3,9	6,9	6,2
0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$q_v = 0,77 \text{m}^3/\text{s}, 1$	Re = 212500	$q_{\nu} = 0.95 \text{m}^3/\text{s}, Re = 260500$	
302	0,0	0,0	m/s	m/s
292	10,4	12,2	0,0	0,0
282	10,5	12,6	13,5	14,5
272	10,7	13,1	13,7	14,6
262	11,6	12,9	13,8	15,7
252	11,5	12,9	14,4	15,8
242	11,5	12,8	15,0	15,5
232	11,2	12,9	15,3	15,9
222	11,3	12,9	15,2	15,9
212	11,7	12,9	15,1	15,7
202	12,0	12,9	15,0	15,8
192	11,9	12,7	15,1	15,6
182	12,1	12,4	15,5	15,0
172	12,6	12,2	15,6	15,4
162	12,5	12,5	15,3	15,6
152	12,2	12,6	15,4	15,3
142	12,4	12,4	15,6	15,2
132	12,3	12,6	15,1	15,3
122	12,1	12,4	14,8	15,2
112	12,0	12,3	14,4	14,6
102	12,0	12,7	14,8	14,7
92	11,7	12,9	14,8	14,8
82	11,6	12,0	14,5	14,6
72	11,5	11,3	14,7	14,6
62	11,7	10,9	15,2	14,3
52	11,9	10,4	14,4	13,8
42	12,0	10,4	14,2	13,6
32	12,0	10,1	13,7	13,8
22	11,6	10,6	12,4	13,2
12	11,5	10,5	12,2	13,2
0	0,0	0,0	12,5	13,0
	$q_v = 1,09 \text{m}^3/\text{s}, h$	Re = 295000	$q_{\nu}=1,23\mathrm{m}^{3}/\mathrm{s}, Re=337800$	
302	0,0	0,0	0,1	0,1
292	15,2	16,6	16,0	19,7
282	15,6	17,1	16,1	20,3
272	15,9	17,5	17,4	19,5
262	15,6	17,8	18,3	19,2
252	15,8	17,7	19,0	20,3
242	15,7	17,6	19,1	20,4
232	16,5	17,4	19,2	20,3

222	17,0	17,7	19,9	20,2
212	17,0	17,9	19,6	18,8
202	16,7	18,0	19,5	18,9
192	16,9	17,8	19,7	19,0
182	17,0	17,6	20,0	19,2
172	17,1	17,6	20,1	19,8
162	17,2	17,5	19,9	18,7
152	17,6	17,4	20,2	19,4
142	17,2	17,6	20,3	18,8
132	17,1	17,4	20,5	18,3
122	17,0	16,9	20,3	18,9
112	16,6	16,8	20,0	19,6
102	16,2	17,5	20,2	19,8
92	16,4	17,3	20,1	18,9
82	16,9	17,2	19,7	17,7
72	17,0	16,9	19,6	17,7
62	16,8	15,7	19,3	18,0
52	16,3	14,9	19,2	17,9
42	16,1	14,8	19,0	17,7
32	15,1	14,8	18,8	16,9
22	14,8	14,6	18,1	15,9
12	14,6	14,3	17,0	15,7
0	0.0	0.0	0.1	0.1

Załączniki nr 2 Wyniki pomiarów prędkości płynu za pomocą rurki Pitota

Pomiarów dokonano w płaszczyźnie poziomej oraz w płaszczyźnie pionowej. Obliczając prędkość średnią w tych płaszczyznach zastosowano metodę podziału przekroju pomiarowej na powierzchnie równoważne. W tym celu podzielono przekrój pomiarowy na koncentryczne powierzchnie o równych polach (powierzchniach równoważnych). Punkty pomiarowe wyznaczona na podstawie przecięcia dwóch prostopadłych do siebie średnic z okręgami dzielącymi każdą powierzchnię na dwie części o równych polach.

	$q_v = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}, Re = 85200$		$q_v = 0.61 \text{ m}^3/\text{s}, Re = 171000$	
Odległość od	Prędkość mierzona	Prędkość mierzona	Prędkość mierzona	Prędkość mierzona
przedniej ścianki	w płaszczyźnie	w płaszczyźnie	w płaszczyźnie	w płaszczyźnie
rurociągu	poziomej	poziomej	pionowej	pionowej
mm	m/s	m/s	m/s	m/s
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7,9	9,9	4,5	7,9	9,9
8,0	10,6	5,1	8,0	10,6
8,2	10,7	5,2	8,2	10,7
7,9	10,4	5,2	7,9	10,4
8,1	10,6	4,9	8,1	10,6
7,9	10,4	5,1	7,9	10,4
8,8	10,5	4,9	8,8	10,5
8,9	10,2	4,9	8,9	10,2
9,0	10,0	4,7	9,0	10,0
9,4	10,2	5,4	9,4	10,2
9,2	9,7	4,9	9,2	9,7
9,7	9,5	5,2	9,7	9,5
9,3	9,8	4,9	9,3	9,8
10,1	10,2	4,7	10,1	10,2
9,9	9,5	4,7	9,9	9,5
10,0	9,6	4,9	10,0	9,6
9,8	9,5	5,4	9,8	9,5
9,7	10,2	5,2	9,7	10,2
9,5	10,1	4,7	9,5	10,1
9,4	9,9	4,9	9,4	9,9
9,3	10,3	5,1	9,3	10,3

Tab. z.2.1 Wyniki pomiarów prędkości dla poszczególnych strumienia objętości.

9,3	9,9	4,7	9,3	9,9
8,8	10,3	5,2	8,8	10,3
8,4	10,3	5,2	8,4	10,3
8,3	10,4	5,1	8,3	10,4
8,4	10,2	5,4	8,4	10,2
9,2	9,6	4,9	9,2	9,6
8,4	9,8	4,9	8,4	9,8
8,6	9,3	4,7	8,6	9,3
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$q_v = 0.76 \text{ m}^3/\text{s}, Re = 208400$		$q_v = 0.94 \text{ m}^3/\text{s}, Re = 254200$	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7,9	9,4	7,2	10,2	11,7
8,0	9,6	12,2	10,6	15,0
8,2	9,9	12,2	11,8	15,2
7,9	10,0	13,2	13,1	14,6
8,1	10,2	13,1	13,4	15,3
7,9	10,3	13,0	13,8	15,5
8,8	10,8	13,1	13,6	15,2
8,9	11,1	12,7	13,1	15,5
9,0	11,1	12,8	13,6	15,0
9,4	11,4	12,8	14,1	15,1
9,2	11,8	13,1	14,1	14,8
9,7	11,4	12,5	14,2	14,4
9,3	12,0	12,6	14,4	14,7
10,1	11,7	12,7	14,5	14,7
9,9	12,1	12,3	15,0	14,8
10,0	12,1	12,5	15,1	14,5
9,8	12,3	12,8	15,2	14,5
9,7	11,9	12,6	15,1	14,8
9,5	11,4	12,4	15,0	15,4
9,4	11,4	12,2	14,7	14,7
9,3	11,8	12,6	14,8	15,2
9,3	10,8	12,8	15,0	15,4
8,8	10,7	12,7	15,0	15,2
8,4	10,9	12,6	14,6	15,1
8,3	10,6	12,6	14,2	15,5
8,4	10,5	12,8	14,2	15,4
9,2	10,9	13,0	13,8	14,8
8,4	10,2	12,8	12,3	14,4
8,6	9,6	11,6	11,6	11,9
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0