

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

STANISŁAW WALUŚ

**ULTRADZWIĘKOWE POMIARY STRUMIENIA
OBJĘTOŚCI WODY W RUROCIĄGACH
I W KANAŁACH OTWARTYCH**



P. 5342 / 90

AUTOMATYKA

**Z. 99
GLIWICE
1990**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 1075



P. 3342

90

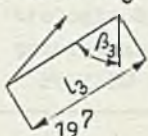

STANISŁAW WALUS

**ULTRADŹWIĘKOWE POMIARY STRUMIENIA
OBJĘTOŚCI WODY W RUROCIĄGACH
I W KANAŁACH OTWARTYCH**

GLIWICE

1990

do Nr 99 2R PSL,
Automatycznie

Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
4	19 d	eze	rze
4	1 d 69
8	18 d	3.5.3.4.	3.5.3.4. Conclusions
8	1 d 69
15	9 g	Od	0
19	3 d	crossesed	crossed
20	13 g	a diameter	a diameter, c) in the pipe axis
20	2 d	lamp-on	clamp-on
20	2 d	, c) in	
20	1 d	the pipe axis	
21	11 g	o	w
22	15 d	k 1	k ⁻¹
23	wz.(2.7)	$\frac{2\pi^2}{\epsilon c^3} \left[\frac{4}{3}\eta + \lambda_T \left(\frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_P} \right) \right] r^2$	$\frac{2\pi^2}{\epsilon c^3} \left[\frac{4}{3}\eta + \lambda_T \left(\frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_P} \right) \right] r^2$
23	9 g	n	
23	11 g	$2,5 \cdot 10^{-4} \text{ dB mm}^{-1} \text{ MHz}^{-1} [121].$	$2,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1} [17, \text{s.16}].$
24	9 g	Odbicie -	Odbicie i
28	wz.(3.5)	$\ln(1 - r/B)$	$\ln(1 - r/R)$
29	4 g	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$
29	5 g	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$
29	8 g	poandano	podano
30	wz.(3.18)	$k_2 = k v_d / \gamma$	$k_2 = k v_d / \gamma$
31	7 g	1,64	164
37	8 d	kładu	kład
42	wz.(3,55)	$8 k \cos \angle$	$8 l \cos \angle$
46	wz.(3.69)	$48 r^4 r_o^2$	$48 r^4 r_o^4$
48	rys.3.13		
55	tabl.3.2 kol. 6	-5,5	-5,9
55	tabl.3.2 kol. 4	$\text{arc cos}(1-G/R)$	$\text{arc cos}(1-G/R)$
60	wz.(4.17)	$A(r/Re)^m$	$A(r/Re)^m$
61	wz.(4.21)	(a - A)	(1 - A)
62	wz.(4.23)	m = 0	m = 2
63	5 g	$v/v_m = 0; 2$	$v/v_m = 0,2$
63	6 g		

Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
63	9 g	$v/v_m = 0, 2$	$v/v_m = 0, 2$
69	wz.(4.41)	$e^{-a(\vartheta + \pi)}$	$e^{-a(\vartheta + \pi)}$
72	wz.(5.3)	$[1 - (2b)/(B(h)$	$[1 - (2(b - B_0(h))/B(h)$
76	10 d	bottom	bottom
79	17 d	$K_{ln}(h_0/H = 0 =$	$K_{ln}(h_0/H = 0)$
87	14 g	znanej wartości	znanej zależności pola przepływowego od poziomu $S_p(H)$ i przyjęcia stałej wartości
91	wz.(6.2)	$3 \delta_{ot}^2 3 \delta_n^2$	$+ \delta_{ot}^2 + \delta_n^2$
93	2 g	rurociągi	rurociągu
95	7 g	v_{li}	v_{li}
95	12 g	v	\dot{v}
103	wz.(7.25)	$(tg^2 \beta_2 3 1)$	$(tg^2 \beta_2 + 1)$
111	7 g	pole przekroju	powierzchnia przekroju
111	8 g	pole przekroju	powierzchnia przekroju
111	9 g	pole przekroju	powierzchnia przekroju
113	16 g	Izmeritel'naja	Izmeritel'naja
113	5 d	1974	
114	14 g	954-856	954-956
114	23 d	Teoreticeskij	Teoretičeskij
117	13 g	Industrial	Industrial
118	21 g	Matuschek	Mataushek
119	12 g	Katzenstein H.S.	Katzenstein H.S.,
120	2 d	Feingeratetech-	Feingerätetech-
122	20 d	trologia 83	trologia 83
123	13 d	przetwarzania	Przetwarzania
125	1 g	POMIARU	POMIARY

SPIS TREŚCI

	Str.
1. WPROWADZENIE	15
2. SPOSOBY WYKORZYSTANIA ULTRADŹWIĘKÓW DO POMIARU PRĘDKOŚCI I STRUMIENIA OBJĘTOŚCI	17
2.1. Zasady działania przepływomierzy ultradźwiękowych	17
2.2. Podział przepływomierzy ultradźwiękowych dla rurociągów	18
2.3. Podział przepływomierzy ultradźwiękowych dla kanałów otwartych	21
2.4. Przebieg fali ultradźwiękowej w wodzie nieruchomej i ruchomej	21
2.4.1. Pochłanianie fali ultradźwiękowej	22
2.4.2. Rozpraszanie fali ultradźwiękowej	23
2.4.3. Odbicie i załamanie fali ultradźwiękowej	24
2.4.4. Znos drogi fali ultradźwiękowej w wodzie ruchomej	25
3. POMIAR STRUMIENIA OBJĘTOŚCI WODY W RUROCIĄGU W WARUNKACH NORMALNYCH	27
3.1. Wzory opisujące rozkład prędkości	27
3.1.1. Przepływ uwarstwiony	27
3.1.2. Przepływ burzliwy	28
3.1.2.1. Zestawienie wzorów opisujących rozkład prędkości w rurze o przekroju kołowym	28
3.1.2.2. Warunki, jakie winny spełniać wzory opisujące rozkład prędkości dla przepływu burzliwego ..	31
3.1.2.3. Analiza warunków na przykładzie wzoru potęgowego Prandtla	32
3.1.2.4. Analiza warunków dla innych wzorów	33
3.1.2.5. Wzór potęgowy trójskładnikowy	33
3.1.3. Przepływ krytyczny	34
3.1.4. Modele graniczne rozkładu prędkości	35
3.2. Warunki normalne	37
3.3. Modele matematyczne organów pomiarowych przepływomierzy ultradźwiękowych jednodrogowych z głowicami wbudowanymi w ściankę rurociągu	37
3.3.1. Punktowy pomiar prędkości	41
3.3.2. Pomiar prędkości średniej po średnicy rurociągu	41
3.3.2.1. Równanie przetwarzania	43
3.3.2.2. Korekcja wpływu prędkości fali ultradźwiękowej na czułość przepływomierza	43

	Str.
3.3.2.3. Wyznaczenie wartości liczby kształtu K	43
3.3.3. Pomiar prędkości średniej po cięciwie nie będącej średnicą	45
3.3.3.1. Opis rozkładu prędkości	45
3.3.3.2. Wyznaczenie współczynnika czułości K_1	45
3.3.3.3. Wybór optymalnej odległości cięciwy od osi rurociągu	46
3.4. Model matematyczny organu pomiarowego przepływomierza ultradźwiękowego jednodrogowego z głowicami nakładanymi na ściankę	49
3.4.1. Przebieg fali ultradźwiękowej	49
3.4.2. Dobór parametrów konstrukcyjnych	49
3.4.3. Model matematyczny organu pomiarowego	51
3.5. Modele matematyczne organów pomiarowych przepływomierzy ultradźwiękowych wielodrogowych z głowicami zainstalowanymi w ściance rurociągu	51
3.5.1. Wstęp	51
3.5.2. Model matematyczny organu pomiarowego	52
3.5.3. Dobór liczby dróg i ich rozmieszczenie	53
3.5.3.1. Zasady ogólne	53
3.5.3.2. Przepływomierz dwudrogowy	54
3.5.3.3. Przepływomierz trójdrogowy oraz przepływomierze więcej drogowe	54
3.5.3.4. Podsumowanie	55
4. MODELE MATEMATYCZNE ORGANÓW POMIAROWYCH PRZEPLÝWOMIERZY ULTRADZWIĘKOWYCH JEDNODROGOWYCH Z GŁOWICAMI WBUDOWANYMI W ŚCIANKĘ RUROCIĄGU DLA WARUNKÓW ODBIEGAJĄCYCH OD NORMALNYCH	57
4.1. Rurociąg częściowo wypełniony osadami	57
4.1.1. Wzory modelujące rozkład prędkości	57
4.1.2. Błędy względne spowodowane istnieniem osadów	58
4.2. Rurociągi o przekrojach odbiegających od kołowego	61
4.2.1. Wprowadzenie	61
4.2.2. Opisy rozkładów prędkości	61
4.2.3. Modele matematyczne organu pomiarowego	64
4.2.4. Zniekształcenie rurociągu o przekroju kołowym	65
4.3. Zniekształcony rozkład prędkości	66
4.3.1. Wprowadzenie	66
4.3.2. Modele matematyczne zniekształconych rozkładów prędkości	66
4.3.3. Modele matematyczne organu pomiarowego	68
4.3.4. Podsumowanie	68

	Str.
5. PRZEPIYWIOMIERZE ULTRADZWIĘKOWE DLA KANAŁÓW OTWARTYCH	71
5.1. Wprowadzenie	71
5.2. Modele rozkładów prędkości w kanałach otwartych	71
5.3. Przepływomierze jednodrogowe	73
5.3.1. Wprowadzenie	73
5.3.2. Model matematyczny organu pomiarowego przepływomierza z nieruchomą drogą równoległą do powierzchni wody	74
5.3.3. Model matematyczny organu pomiarowego przepływomierza z nieruchomą drogą nierównoległą do powierzchni wody .	76
5.3.3.1. Opis rozkładu prędkości	76
5.3.3.2. Model matematyczny organu pomiarowego	77
5.3.3.3. Wpływ zmian kształtu rozkładu prędkości na współczynnik czułości	77
5.4. Pomiar strumienia objętości wody w kanale o przekroju kołowym	79
5.4.1. Wzory modelujące rozkład prędkości	80
5.4.2. Zależność współczynnika czułości K_1 od wysokości poziomu wody w kanale	82
5.4.3. Model organu pomiarowego przepływomierza z uwzględnieniem wyniku pomiaru poziomu	85
5.4.3.1. Model matematyczny dla przepływu uwarstwionego	85
5.4.3.2. Model matematyczny dla przepływu burzliwego .	86
5.4.3.3. Błędy wskazań przepływomierza	87
5.5. Przepływomierze wielodrogowe	88
6. EKSPLOATACJA PRZEPIYWIOMIERZY ULTRADZWIĘKOWYCH	90
6.1. Właściwości metrologiczne	90
6.2. Oszacowanie błędu w normalnych warunkach stosowania	91
6.3. Błędy przepływomierza w warunkach rzeczywistych	92
6.4. Normy z zakresu przepływomierzy ultradźwiękowych	93
7. ALGORYTMY PRZETWARZANIA INFORMACJI W PRZEPIYWIOMIERZACH ULTRADZWIĘKOWYCH	94
7.1. Przetwarzanie informacji w przepływomierzu ultradźwiękowym ..	94
7.2. Estymacja wzoru opisującego kształt rozkładu prędkości	95
7.3. Algorytm wyznaczania liczby kształtu rozkładu prędkości K w rurociągu	96
7.4. Algorytmy korekcji wpływu temperatury	99
7.5. Algorytmy wyznaczania czasów przebiegu fali ultradźwiękowej w wodzie w ruchu na podstawie wartości zmierzonych	102
7.5.1. Wpływ położenia przetworników piezoelektrycznych względem strugi	102
7.5.2. Korekcja czasów dla czujnika z głowicami nakładanymi na ściankę rurociągu	103
7.5.3. Opóźnienia sygnałów elektrycznych	103

	Str.
7.6. Algorytmy przetwarzania informacji dla pomiaru w kanale o przekroju kołowym	104
7.7. Algorytmy przetwarzania informacji dla warunków odbiegających od normalnych	106
7.7.1. Rurociąg częściowo wypełniony osadami	106
7.7.2. Zniekształcony rozkład prędkości	106
7.7.3. Rurociąg zniekształcony	107
8. PODSUMOWANIE	108
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	110
LITERATURA	113
STRESZCZENIA	125

CONTENTS

	Page
1. INTRODUCTION	15
2. APPLICATIONS OF ULTRASONIC WAVES TO VELOCITY AND VOLUME FLOW MEASUREMENTS	17
2.1. Principles of Operation of Ultrasonic Flowmeters	17
2.2. Classification of Ultrasonic Flowmeters for Measurements in Pipes	18
2.3. Classification of Ultrasonic Flowmeters for Measurements in Open Channels	21
2.4. Ultrasonic Beam Path in Moving and Stationary Water	21
2.4.1. Ultrasonic Wave Absorption	22
2.4.2. Ultrasonic Wave Dispersion	23
2.4.3. Ultrasonic Wave Reflection and Refraction	24
2.4.4. Ultrasonic Beam Path Deflection in Moving Water	25
3. WATER VOLUME FLOW MEASUREMENT IN PIPE UNDER NORMAL CONDITIONS	27
3.1. Formulae for Velocity Distribution	27
3.1.1. Laminar Flow	27
3.1.2. Turbulent Flow	28
3.1.2.1. Comparison of Formulae Describing Velocity Distribution in Circular Pipe	28
3.1.2.2. Requirements for the Formulae Describing Velocity Distribution for Turbulent Flow Case ..	31
3.1.2.3. Analysis of the Requirements on the Example of Prandtl Power Series	32
3.1.2.4. Analysis of the Requirements for Other Formulae	33
3.1.2.5. Three-factor Power Formula	33
3.1.3. Critical Flow	34
3.1.4. Limiting Models of Velocity Distributions	35
3.2. Normal Conditions	37
3.3. Mathematical Models of Measuring Organs of Single-Channel Ultrasonic Flowmeters with Transducers Mounted in Pipe Walls.	37
3.3.1. In-Point Velocity Measurement	37
3.3.2. Mean Velocity Measurement Along Pipe Diameter	41
3.3.2.1. Conversion Equation	41
3.3.2.2. Correction of the Influence of Ultrasonic Beam Velocity on the Flowmeter Sensitivity ..	43

	Page
3.3.2.3. Determination of the Shape Factor K	43
3.3.3. Mean Velocity Measurement Along a Chord Other Than Diameter	45
3.3.3.1. Velocity Distribution Description	45
3.3.3.2. Determination of the Sensitivity Coefficient K_1	45
3.3.3.3. Selection of Optimum Distance of the Chord from Pipe Axis	46
3.4. A Mathematical Model of the Measuring Organ of Single-Channel Ultrasonic Flowmeter with Clamp-on Transducers	49
3.4.1. Ultrasonic Beam Path	49
3.4.2. Selection of Construction Parameters	49
3.4.3. A Mathematical Model of Measuring Organ	51
3.5. Mathematical Models of the Measuring Organs of Multi-Path Ultrasonic Flowmeters with Transducers Mounted in Pipe Walls.	51
3.5.1. Introduction	51
3.5.2. A Mathematical Model of the Measuring Organ	52
3.5.3. Selection of the Number and Distribution of Paths	53
3.5.3.1. General Rules	53
3.5.3.2. Two-path Flowmeter	54
3.5.3.3. Three- and more-path Flowmeters	54
3.5.3.4.	55
4. MATHEMATICAL MODELS OF MEASURING ORGANS OF SINGLE-PATH ULTRASONIC FLOWMETERS WITH TRANSDUCERS MOUNTED IN PIPE WALLS UNDER CONDITIONS DIFFERENT THAN NORMAL	57
4.1. A Pipe Partially Filled with Sediments	57
4.1.1. Formulae for Velocity Distribution	57
4.1.2. Relative Errors Due to Sediments	58
4.2. Pipes with Cross-sections Different than Circular	
4.2.1. Introduction	61
4.2.2. Velocity Distribution Descriptions	61
4.2.3. Mathematical Models of Measuring Organ	64
4.2.4. Distorted Circular Pipe	65
4.3. Distorted Velocity Distribution	66
4.3.1. Introduction	66
4.3.2. Mathematical Models of Distorted Velocity Distribu- tions	66
4.3.3. Mathematical Models of Measuring Organs	68
4.3.4. Resume	

	Page
5. ULTRASONIC FLOWMETERS FOR OPEN CHANNELS	71
5.1. Introduction	71
5.2. Models of Velocity Distributions in Open Channels	71
5.3. Single-Channel Flowmeters	73
5.3.1. Introduction	73
5.3.2. A Mathematical Model of a Measuring Organ of Flowmeter with Fixed Path Parallel to Water Surface	74
5.3.3. A Mathematical Model of a Measuring Organ of a Flowme- ter with a Fixed Path Non-parallel to water Surface ..	76
5.3.3.1. Description of the Velocity Distribution	76
5.3.3.2. A Mathematical Model of the Measuring Organ .	77
5.3.3.3. Influence of the Shape of Velocity Distribu- tion on the Sensitivity Coefficient	77
5.4. Measurement of Volume Flow of Water in a Circular Channel ...	79
5.4.1. Models of Velocity Distribution	80
5.4.2. Relationship of the Sensitivity Coefficient K_1 and the Water Level in a Channel	82
5.4.3. A Mathematical Model of the Measuring Organ of a Flow- meter with Level Measurement Result Considered	85
5.4.3.1. Model for the Laminar Flow Case	86
5.4.3.2. Model for the Turbulent Flow Case	86
5.4.3.3. Flowmeter Errors	87
5.5. Multi-path Flowmeters	88
6. OPERATION OF ULTRASONIC FLOWMETERS	90
6.1. Metrological properties	90
6.2. Estimation of Errors Under Normal Operating Conditions	91
6.3. Flowmeters Errors Under Actual Conditions	92
6.4. Standards Concerning Ultrasonic Flowmeters	93
7. ALGORITHMS OF INFORMATION PROCESSING IN ULTRASONIC FLOWMETERS	94
7.1. Information processing in an Ultrasonic Flowmeter	94
7.2. Estimation of the Formula Describing Velocity Distribution ..	95
7.3. Algorithm of determining the Shape Factor K of the Velocity in a Pipe	96
7.4. Temperature Correction Algorithms	99
7.5. Algorithms of determining the Ultrasonic Beam Transit Times in Flowing Water Basing on Measured Values	102
7.5.1. Influence of Piezoelektric Transducer Location Relative to Water Stream	102
7.5.2. Correction of Time Values for Clamp-on Transducer Case	103
7.5.3. Electric Signals Delay	103
7.6. Algorithms of Information Processing for the Case of Measure- ments in Circular Channel	104

	Page
7.7. Algorithms of Information Processing for Operating Condi- tions Different than Normal	106
7.7.1. A Pipe Partially Filled with Sediments	106
7.7.2. Distorted Velocity Distribution	106
7.7.3. Distorted Pipe	107
8. CONCLUSIONS	108
LIST OF MAJOR SYMBOLS	110
REFERENCES	113
SUMMARIES	125

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. ВВЕДЕНИЕ	15
2. СПОСОБЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И СТРУИ ОБЪЕМА	17
2.1. Принципы действия ультразвуковых расходомеров	17
2.2. Классификация ультразвуковых расходомеров для трубопроводов ..	18
2.3. Классификация ультразвуковых расходомеров для открытых кана- лов	21
2.4. Распространение ультразвуковой волны в неподвижной и подвиж- ной воде	21
2.4.1. Поглощение ультразвуковой волны	22
2.4.2. Рассеяние ультразвуковой волны	23
2.4.3. Отражение и преломление ультразвуковой волны	24
2.4.4. Снос дорожки ультразвуковой волны в подвижной воде	25
3. ИЗМЕРЕНИЕ СТРУИ ОБЪЕМА ВОДЫ В ТРУБОПРОВОДЕ В НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ..	27
3.1. Формулы, описывающие распределение скорости	27
3.1.1. Ламинарное течение	27
3.1.2. Турбулентное течение	28
3.1.2.1. Составление формул, описывающих распределение скорости в трубопроводе круглого сечения	28
3.1.2.2. Условия, какие должны выполнять формулы, опи- сывающие распределение скорости для турбо- лентного течения	31
3.1.2.3. Анализ условий на примере степенной формулы Прандтля	32
3.1.2.4. Анализ условий для других формул	33
3.1.2.5. Степенная формула с тремя слагаемыми	33
3.1.3. Критическое течение	34
3.1.4. Граничные модели распределения скорости	35
3.2. Нормальные условия	37
3.3. Математические модели измерительных органов ультразвуковых одноканальных расходомеров с головками монтированными в теле стенки трубопровода	37
3.3.1. Точечное измерение скорости	37
3.3.2. Измерение средней скорости по диаметру трубопровода ..	41
3.3.2.1. Уравнение преобразования	41
3.3.2.2. Корректировка влияния скорости ультразвуковой волны на чувствительность расходомера	43
3.3.2.3. Определение значения числа формы К	43

	Стр
3.3.3. Измерение средней скорости по хорде, не являющейся диаметром	45
3.3.3.1. Описание распределения скорости	45
3.3.3.2. Определение коэффициента чувствительности K_n	45
3.3.3.3. Выбор оптимального расстояния хорды от оси трубопровода	46
3.4. Математическая модель измерительного органа ультразвукового одноканального расходомера с головками накладываемыми на стенку	49
3.4.1. Распространение ультразвуковой волны	49
3.4.2. Подбор конструкционных параметров	49
3.4.3. Математическая модель измерительного органа	51
3.5. Математические модели измерительных органов ультразвуковых многоканальных расходомеров с головками монтированными в теле стенки трубопровода	51
3.5.1. Введение	51
3.5.2. Математическая модель измерительного органа	52
3.5.3. Определение количества каналов и их размещение	53
3.5.3.1. Общие правила	53
3.5.3.2. Двухканальный расходомер	54
3.5.3.3. Трехканальный расходомер, а также расходомер с большим количеством каналов	54
3.5.3.4. Подведение итогов	55
4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ОДНОКАНАЛЬНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ С ГОЛОВКАМИ МОНТИРОВАННЫМИ В ТЕЛЕ СТЕНКИ ТРУБОПРОВОДА ДЛЯ УСЛОВИЙ ОТЛИЧАЮЩИХСЯ ОТ НОРМАЛЬНЫХ	57
4.1. Трубопровод частично наполнен осадком	57
4.4.1. Формулы, моделирующие распределение скорости	57
4.4.2. Статистические ошибки, вызванные наличием осадка	58
4.2. Трубопровода с некруглыми сечениями	61
4.2.1. Введение	61
4.2.2. Описание распределений скоростей	61
4.2.3. Математические модели измерительного органа	64
4.2.4. Деформация трубопровода круглого сечения	65
4.3. Деформировано распределение скорости	66
4.3.1. Введение	66
4.3.2. Математические модели деформированных распределений скоростей	66
4.3.3. Математические модели измерительного органа	68
4.3.4. Подведение итогов	69

	Стр.
5. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ ДЛЯ ОТКРЫТЫХ КАНАЛОВ	71
5.1. Введение	71
5.2. Модели распределений скоростей для открытых каналов	71
5.3. Одноканальные расходомеры	73
5.3.1. Введение	73
5.3.2. Математическая модель измерительного органа расходомера с неподвижной дорогой параллельной относительно поверхности воды	74
5.3.3. Математическая модель измерительного органа расходомера с неподвижной непараллельной относительно поверхности воды	76
5.3.3.1. Описание распределения скорости	76
5.3.3.2. Математическая модель измерительного органа	77
5.3.3.3. Влияние изменения формы распределения скорости на коэффициент чувствительности	77
5.4. Измерение струи объема воды в канале круглого сечения	79
5.4.1. Формулы, моделирующие распределение скорости	80
5.4.2. Зависимость коэффициента чувствительности K_d от величины уровня воды в канале	82
5.4.3. Модель измерительного органа расходомера, учитывающая результаты измерения уровня	85
5.4.3.1. Математическая модель для ламинарного течения	86
5.4.3.2. Математическая модель для турбулентного течения	86
5.4.3.3. Ошибки показаний расходомера	87
5.5. Многоканальные расходомеры	88
6. ЭКСПЛУАТАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ	90
6.1. Метрологические свойства	90
6.2. Сценка ошибки для нормальных условий применения	91
6.3. Ошибки расходомера в натуральных условиях	92
6.4. Нормы, относящиеся к ультразвуковым расходомерам	93
7. АЛГОРИТМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРАХ	94
7.1. Преобразование информации в ультразвуковом расходомере	94
7.2. Сценка формулы, описывающей форму распределения скорости	95
7.3. Алгоритм определения числа форм K распределения скорости в трубопроводе	96
7.4. Алгоритм коррекции влияния температуры	99
7.5. Алгоритм определения времени протекания ультразвуковой волны в воде в движении на основе измеренных величин	102
7.5.1. Влияние положения пьезоэлектрических преобразователей по отношению к струе	102
7.5.2. Корректировка времени для датчика с головками накладываемыми на стенку трубопровода	103

	Стр.
7.5.3. Запаздывание электрических сигналов	103
7.6. Алгоритмы преобразования информации для измерения в канале круглого сечения	104
7.7. Алгоритмы преобразования информации для условий, отличающихся от нормальных	106
7.7.1. Трубопровод частично наполнен осадком	106
7.7.2. Деформировано распределение скорости	106
7.7.3. Деформирован трубопровод	107
8. ПОДВЕДЕНИЕ ИТОГОВ	108
СПИСОК ВАЖНЕЙШИХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	113
РЕЗЮМЕ	125

1. WPROWADZENIE

Jedno z pierwszych zastosowań ultradźwięków do pomiaru prędkości wody w rurociągu zostało opatentowane w 1928 roku [34 s. 163].

Obecnie istnieje w świecie kilkadziesiąt firm (np. [38, 69, 86, 94, 114, 124, 148, 161, 163]) produkujących przepływomierze ultradźwiękowe do różnych celów (od pomiaru strumienia objętości wody w rzekach o szerokości kilkuset metrów [68, 165] do pomiaru strumienia objętości krwi w naczyniach krwionośnych [29, 119, 138] czy gazu w rurociągach [98, 118, 128, 134, 136, 166]). Od dokładności pomiaru przed 20 laty i wcześniej decydował rodzaj elementów elektronicznych, z jakich budowano podzespoły przepływomierza, obecnie decyduje głównie znajomość modelu matematycznego, według którego następuje obliczenie wielkości mierzonej.

W przepływomierzu ultradźwiękowym uzyskuje się informacje o prędkości płynu w miejscu, przez które przechodzą ultradźwięki. Na podstawie tej prędkości szacuje się strumień objętości jako iloczyn prędkości średniej i powierzchni pola przepływowego. Niepewność oszacowania zależności między zmierzoną prędkością a prędkością średnią jest głównym źródłem błędów przepływomierza ultradźwiękowego. W warunkach normalnych można tę zależność oszacować na podstawie parametrów charakteryzujących przepływ oraz stan rurociągu [147, 225].

W publikacjach naukowych, w materiałach konferencyjnych oraz w zaleceniach firmowych podawane są różne zależności między zmierzoną prędkością a prędkością średnią po przekroju. Brak jest odpowiedniego uzasadnienia niektórych danych i powiązania ich ze zjawiskami zachodzącymi w rurociągu lub kanale otwartym.

Do stosowania przepływomierzy ultradźwiękowych niezbędna jest większa dokładność modelowania zjawisk przepływu niż do projektowania i budowy urządzeń hydraulicznych. Ze względu na duże koszty nie zawsze jest możliwe wzorcowanie przepływomierza ultradźwiękowego przez porównanie ze wzorcem pierwotnym. Dlatego stosuje się wzorcowanie pośrednie poprzez wyznaczenie modelu matematycznego z odpowiednią dokładnością. O dokładności modelu matematycznego przepływomierza decyduje znajomość kształtu rozkładu prędkości [5]. Jeszcze większe braki w literaturze występują w przypadku zabudowy przepływomierza w warunkach odbiegających od normalnych, to znaczy w przypadku zniekształconego rozkładu prędkości, rurociągu o przekroju odbiegającym od kołowego lub w przypadku, gdy na dnie rurociągu występują osady.

Celem pracy jest ustalenie modeli matematycznych organu pomiarowego różnorodnych typów przepływomierzy stosowanych w rurociągach i kanałach otwar-

tych, oszacowanie błędów oraz podanie zaleceń eksploatacyjnych wraz z algorytmami pomiarów w różnych warunkach.

Zakres pracy jest ograniczony do pomiaru strumienia objętości wody w rurociągach oraz w kanałach otwartych.

Niniejsza praca stanowi zebranie prac własnych autora, prac naukowo-badawczych wykonywanych przez autora w ramach Programu Rządowego PR-7.05 w latach 1981-1986 i została opracowana w trakcie realizacji Centralnego Programu Badań Podstawowych 02-20, temat nr III.20: "Przepływomierz ultradźwiękowy z nakładanymi głowicami do pomiaru natężenia przepływu cieczy w rurociągach".

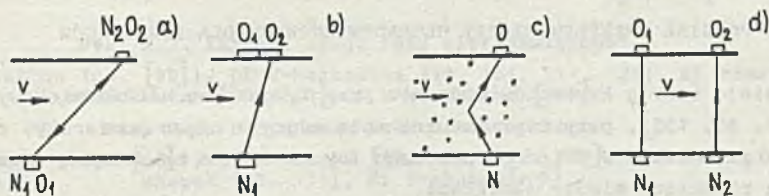
2. SPOSOBY WYKORZYSTANIA ULTRADŹWIĘKÓW DO POMIARU PRĘDKOŚCI I STRUMIENIA OBJĘTOŚCI

2.1. ZASADY DZIAŁANIA PRZEPIŁYWOMIERZY ULTRADŹWIĘKOWYCH

W przepływomierzach ultradźwiękowych mogą być wykorzystane następujące zjawiska:

- 1) zjawisko zmiany prędkości fali ultradźwiękowej rozchodzącej się w wodzie będącej w ruchu w stosunku do prędkości fali w wodzie pozostającej w spoczynku,
- 2) zjawisko unoszenia fali ultradźwiękowej,
- 3) zjawisko Dopplera,
- 4) zjawisko skorelowania szumów w dwóch odległych od siebie miejscach.

Usytuowanie dróg fali ultradźwiękowej w przypadku wykorzystania wymienionych zjawisk przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Schematy zasad działania przepływomierzy ultradźwiękowych

a) zmiana prędkości fali ultradźwiękowej, b) unoszenie fali ultradźwiękowej, c) zjawisko Dopplera, d) skorelowanie szumów, N - nadajnik fali ultradźwiękowej, O - odbiornik fali ultradźwiękowej, v - prędkość wody

Fig. 2.1. Principles of operation of the ultrasonic flowmeters

a) change of the ultrasonic wave velocity, b) drift of the ultrasonic wave, c) Doppler effect, d) noise correlation, N - ultrasonic wave transmitter, O - ultrasonic wave receiver, v - water velocity

Pierwsze zjawisko jest najczęściej wykorzystywane (np. [44, 91, 100, 115, 116, 134, 196]) i polega na zwiększeniu się prędkości fali ultradźwiękowej emitowanej przez nadajnik w kierunku z prądem wody, to znaczy od nadajnika N_1 do odbiornika O_2 oraz na zmniejszeniu się prędkości fali ultradźwiękowej emitowanej przez nadajnik N_2 w kierunku pod prąd (rys. 2.1a). Zjawisko to stosuje się do pomiarów wody czystej. Informacja o prędkości wody może być zawarta w: różnicy czasów przebiegu fali ultradźwiękowej pod prąd i z prądem wody [7, 44, 93, 115, 126, 134, 135, 206], różnicy faz odbiera-

nych sygnałów [21, 28, 45, 81, 135, 227] lub różnicy częstotliwości powtórzenia impulsów (metoda krążącego impulsu - sing around) [136, 157, 168, 176, 189].

Zjawisko unoszenia fali ultradźwiękowej [21, 42, 48, 113, 116, 130, 174] polega na przesunięciu się punktu padania fali ultradźwiękowej wzdłuż rurociągu lub koryta proporcjonalnie do prędkości wody (rys. 2.1b). W miarę zwiększania się prędkości wody sygnał odbierany w odbiorniku O_1 maleje, natomiast sygnał odbierany w odbiorniku O_2 rośnie, a różnica sygnałów niesie informację o prędkości wody.

Zjawisko Dopplera [37, 55, 69, 93, 109, 112, 125, 205] stosuje się w przepływomierzach ultradźwiękowych do pomiaru strumienia objętości wody zawierającej zawieszinę ciał stałych lub pęcherzyków gazu rozpraszającą fale ultradźwiękową. Miarą prędkości wody w danym miejscu jest różnica częstotliwości sygnału emitowanego i odbieranego (rys. 2.1.c).

Schemat przepływomierza, w którym stosuje się zjawisko skorelowania szumów [36, 83, 86, 88, 133, 162, 172, 228], pokazano na rys. 2.1d. Miarą prędkości średniej wody jest przesunięcie czasowe odbieranych sygnałów, dla którego występuje maksimum funkcji korelacji wzajemnej. Przepływomierz tego typu nazywany jest korelacyjnym (z czujnikami ultradźwiękowymi). Czujnik ultradźwiękowy może również służyć do detekcji częstotliwości wirów [22, 88].

2.2. PODZIAŁ PRZEPŁYWOMIERZY ULTRADŹWIĘKOWYCH DLA RUROCIĄGÓW

Istnieje szereg kryteriów podziału przepływomierzy ultradźwiękowych [25, 49, 85, 102], przy czym istotną rolę odgrywa organ pomiarowy, czyli głowice zabudowane w ściance rurociągu lub nakładane na ściankę wraz z częścią rurociągu między głowicami.

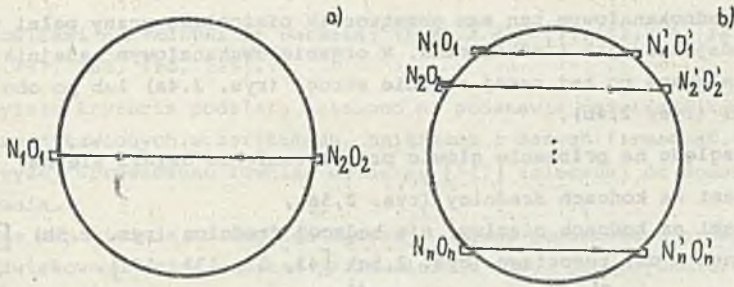
1) Ze względu na liczbę dróg fali ultradźwiękowej przepływomierze dzieli się na:

- jednodrogowe (rys. 2.2a),
- wielodrogowe (rys. 2.2b), wśród których wyróżnia się dwudrogowe [15, 47, 117], trójdrogowe [56], czterodrogowe [14, 47, 96, 132] i pięciodrogowe [3, 4].

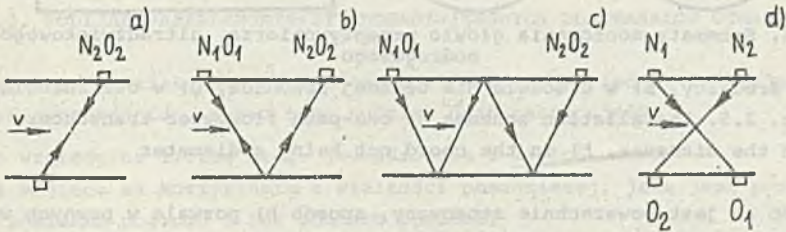
2) Ze względu na kształt drogi fali ultradźwiękowej można wyróżnić cztery zasadnicze kształty, co pokazano na rys. 2.3. W przypadku a) i d) przetworniki znajdują się po obu stronach rurociągu natomiast w przypadku b) i c) po jednej stronie, co wiąże się z odbiciem fali ultradźwiękowej od wewnętrznej strony ścianki rurociągu.

3) Ze względu na liczbę kanałów dla każdej drogi przepływomierze dzieli się na:

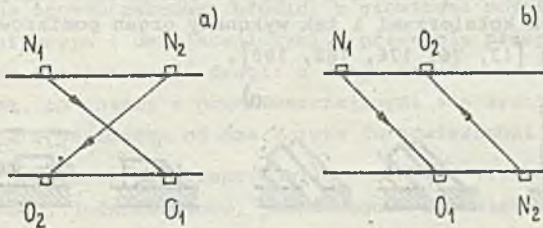
- jednokanałowe, powszechnie obecnie budowane,
- dwukanałowe [18, 28, 54, 89, 120, 127, 170].



Rys. 2.2. Schematy organów pomiarowych przepływomierzy ultradźwiękowych
 a) jednodrogowy, b) wielodrogowy
 Fig. 2.2. Diagram of primary devices of ultrasonic flowmeters
 a) one-path, b) multi-path



Rys. 2.3. Kształt drogi fali ultradźwiękowej
 a) Z-kształtna (np. [90]), b) V-kształtna [49, 101, 117, 129], c) V-kształtna-wielokrotna [95, 131], d) X-kształtna [169]
 Fig. 2.3. Ultrasonic path configurations
 a) Z-shaped, (e.g. [90]), b) V-shaped [49, 101, 117, 129], c) multiple V-shaped [95, 131], d) X-shaped [169]



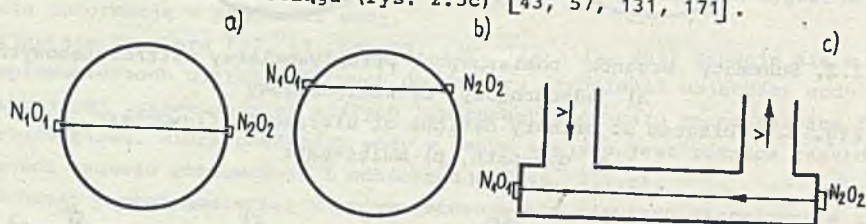
Rys. 2.4. Schematy organów pomiarowych dwukanałowych
 a) z kanałami skrzyżowanymi, b) z kanałami równoległymi
 Fig. 2.4. Schemes of two-channel primary devices
 a) with crossed channels, b) with parallel channels

Schemat organu pomiarowego jednokanałowego pokazano na rys. 2.2, natomiast możliwe konfiguracje organu pomiarowego dwukanałowego na rys. 2.4.

W organie jednokanałowym ten sam przetwornik piezoelektryczny pełni rolę zarówno nadajnika, jak i odbiornika. W organie dwukanałowym nadajniki mogą być zainstalowane po tej samej stronie strugi (rys. 2.4a) lub po obu stronach strugi (rys. 2.4b).

4) Ze względu na położenie głowic przepływomierze dzieli się na:

- z głowicami na końcach średnicy (rys. 2.5a),
- z głowicami na końcach cięciwy, nie będącej średnicą (rys. 2.5b) [103, 194],
- z głowicami w osi rurociągu (rys. 2.5c) [43, 57, 131, 171].



Rys. 2.5. Schematy montowania głowic przepływomierza ultradźwiękowego jednodrogowego

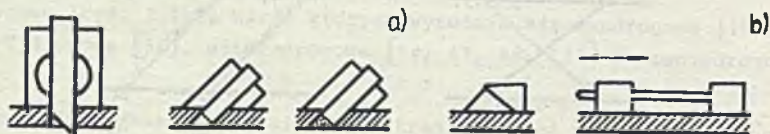
a) w średnicy, b) w cięciwie nie będącej średnicą, c) w osi rurociągu

Fig. 2.5. Installation schemes of one-path flowmeter transducers
a) in the diameter, b) in the chord not being a diameter

Sposób a) jest powszechnie stosowany, sposób b) pozwala w pewnych warunkach na uzyskanie wartości wyniku pomiaru prędkości równej prędkości średniej po przekroju, sposób c) stosuje się w przypadku małych średnic rurociągu:

5) Ze względu na sposób montowania głowic przepływomierze dzieli się na:

- z głowicami wbudowanymi w ściankę rurociągu (rys. 2.6a), przy czym głowica może być wyposażona w zawór zasurowy [58, 90, 186, 203, 237] lub kieszeń [16, 18, 131, 176]. Głowice mogą być zabudowane fabrycznie w odcinku rury zakończonym kołnierzami i tak wykonany organ pomiarowy jest wstawiany do rurociągu [43, 76, 176, 182, 195],



Rys. 2.6. Schematy montowania głowic

a) w ściance rurociągu; z zaworem zasurowym, z kieszenią wypełniona wodą, z kieszenią wypełnioną tworzywem sztucznym; b) nakładane na rurociąg dla drogi Z-kształtnej i dla drogi V-kształtnej

Fig. 2.6. Installation schemes for the transducers

a) in the pipe wall; with gate valve, water-filled cavity, plastic-filled cavity, b) lamp-on transducers for Z-shaped path and V-shaped path, c) in the pipe axis

- z głowicami nakładnymi na rurociąg (rys. 2.6b) [11, 12, 13, 26 31, 59, 108, 137, 159, 196, 235].

Powyższe kryteria podziału ustalono na podstawie rozwiązań konstrukcyjnych przedstawionych w artykułach, książkach i danych firmowych. Podział jak powyżej wprowadzono również do normy [147] zalecaniej do doświadczalnego stosowania.

Przez odpowiednie zmiany konfiguracji organu pomiarowego przepływomierza ultradźwiękowego można uzyskać kilkadziesiąt typów przepływomierzy, przy czym nie wszystkie są stosowane. Najczęściej spotyka się przepływomierze jednodrogowe, o drodze Z-kształtnej, jednokanałowe, montowane średnicowo z głowicami o ścianie rurociągu. Wśród przepływomierzy wielodrogowych przeważają czterodrogowe.

2.3. PODZIAŁ PRZEPŁYWOMIERZY ULTRADŹWIĘKOWYCH DLA KANAŁÓW OTWARTYCH

Kryteria podziału są podobne jak dla rurociągów, jednak istnieją pewne specyficzne różnice. Wobec tego podział jest następujący:

- 1) ze względu na liczbę dróg: jednodrogowe i wielodrogowe,
- 2) ze względu na korzystanie z wielkości pomocniczej, jaką jest poziom: z pomiarem poziomym i bez pomiaru poziomym,
- 3) ze względu na kształt drogi: z drogą Z-kształtną, z drogą V-kształtną, z drogą V-kształtną wielokrotną.

W tym przypadku istotną sprawą jest montowanie głowic (po jednej lub po dwóch stronach koryta),

- 4) ze względu na liczbę kanałów: na jednokanałowe i dwukanałowe,
- 5) ze względu na położenie dróg: z drogą (drogami) równoległą do poziomu wody i z drogą (drogami) skośną w stosunku do poziomu wody,
- 6) ze względu na sposób zabudowy głowic: z głowicami położonymi poza przekrojem przepływowym i umiejscowionymi w przekroju przepływowym,
- 7) ze względu na stacjonarność drogi: z drogą zabudowaną na stałe lub z drogą ruchomą, to znaczy z przemieszczającymi się synchronicznie głowicami nadawczą i odbiorczą od dna koryta do powierzchni wody i z powrotem.

Najczęściej spotykane są przepływomierze z drogą (lub drogami) równoległą do poziomu wody, jednokanałowe, jednodrogowe z pomiarem poziomym lub wielodrogowe z drogami Z-kształtnymi.

2.4. PRZEBIEG FALI ULTRADŹWIĘKOWEJ W WODZIE NIERUCHOMEJ I RUCHOMEJ

Spośród kilu rodzajów fal ultradźwiękowych w praktyce stosowania ultradźwięków w przepływomierzach ultradźwiękowych znaczenie mają tylko fale podłużne i poprzeczne. Fale podłużne mogą rozchodzić się w ośrodkach stałych, ciekłych i gazowych, natomiast fale poprzeczne tylko w ośrodkach stałych.

Prędkość fali podłużnej w nieograniczonym ośrodku stałym wynosi [121, s. 24]

$$c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad [\text{ms}^{-1}], \quad (2.1)$$

gdzie: E - moduł sprężystości wzdłużnej [Pa] (moduł Younga), ρ - gęstość [kg m⁻³], ν - liczba Poissona.

Prędkość rozchodzenia się fali poprzecznej wynosi:

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \nu)}} \quad [\text{ms}^{-1}]. \quad (2.2)$$

W cieczech prędkość fali ultradźwiękowej można obliczyć ze wzoru [121, s. 26].

$$c = \sqrt{\kappa/\rho}, \quad (2.3)$$

gdzie: κ - adiabatyczny moduł sprężystości objętościowej [Pa].

Prędkość fali ultradźwiękowej [63, 64, 105, 202, 232, 236] zależy od temperatury i dla wody w zakresie temperatur od 15°C do 25°C wynosi w przybliżeniu:

$$c(T) = c_0 + b(T - T_0). \quad (2.4)$$

gdzie: $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $c_0 = 1482,3 \text{ ms}^{-1}$, $b = +3,1 \text{ ms}^{-1}\text{K}^{-1}$.

2.4.1. Pochłanianie fali ultradźwiękowej

Wskutek pochłaniania fali ultradźwiękowej energia fali zostaje zamieniana na energię cieplną lub na nieodwracalne zmiany strukturalne materii. Strumień energii fali płaskiej maleje wraz z odległością od źródła [121, s. 34]:

$$E_x = E_0 e^{-2\alpha_t x}, \quad (2.5)$$

gdzie: E_0 - strumień energii emitowany przez źródło, x - odległość od źródła, α_t - współczynnik tłumienia.

W ciałach stałych współczynnik tłumienia jest sumą dwóch składników [121, s. 34]:

$$\alpha_t = \alpha_p + \alpha_r, \quad (2.6)$$

gdzie: α_p - współczynnik pochłaniania, α_r - współczynnik rozpraszania. Dla większości ciał stałych tłumienie wywołane pochłanianiem jest proporcjonalne do częstotliwości fal ultradźwiękowych.

W cieczech współczynnik tłumienia zależy od strat spowodowanych lepkością oraz strat wynikających z przewodności cieplnej cieczy [121, s. 38]:

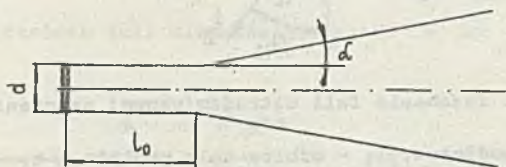
$$\alpha_t = \alpha_\eta + \alpha_T = \frac{2\pi^2}{\rho c^3} \left[\frac{4}{3} \eta + \lambda_T \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) \right] f^2, \quad (2.7)$$

gdzie: α_η - składowa współczynnika tłumienia zależna od lepkości cieczy, α_T - składowa współczynnika tłumienia wynikająca z przewodności cieplnej cieczy, η - lepkość dynamiczna [Pa s], λ_T - współczynnik przewodności cieplnej [W m⁻¹ K⁻¹], c_p - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu [J kg⁻¹ K⁻¹], c_v - ciepło właściwe przy stałej objętości.

W cieczech główny udział w tłumieniu ma lepkość, to znaczy $\alpha_\eta \gg \alpha_T$. Wartość α_t dla wody w temperaturze 20°C i częstotliwości $f = 1$ MHz wynosi $2,5 \cdot 10^{-4}$ dB mm⁻¹ MHz⁻¹ [121].

2.4.2. Rozpraszanie fali ultradźwiękowej

W miarę oddalania się od źródła płaska fala ultradźwiękowa ulega rozproszeniu. Przybliżony kształt wiązki pokazano na rys. 2.7.



Rys. 2.7. Przybliżony przekrój wiązki ultradźwiękowej dla średnicy przetwornika $d > \lambda$

gdzie: λ - długość fali ultradźwiękowej, l_0 - długość pola bliskiego, α - kąt między tworzącą stożka pola dalekiego a prostą prostopadłą do powierzchni promieniującej

Fig. 2.7. Approximate diagram of the ultrasonic beam section for transducer diameter $d > \lambda$

where λ - the length of ultrasonic wave, l_0 - the length of near field, α - the angle between the far field cone generatrix and perpendicular to the emitting surface

Wartość l_0 oblicza się ze wzoru [121, s. 56]:

$$l_0 = \frac{d^2 - \lambda^2}{4\lambda}. \quad (2.8)$$

Dla kołowej powierzchni promieniującej [121, s. 66]:

$$\alpha = \arcsin(1,22 \lambda/d), \quad (2.9)$$

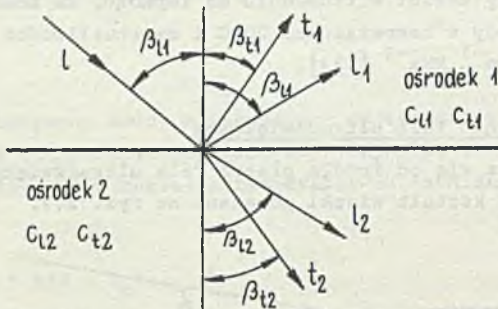
natomiast dla kwadratowej powierzchni promieniującej [111, s. 39]:

$$\alpha = \arcsin(\lambda/a), \quad (2.10)$$

gdzie: a - długość boku kwadratu.

2.4.3. Odbicie i załamanie fali ultradźwiękowej

Gdy płaska fala ultradźwiękowa pada na granicę między dwoma ośrodkami, które różnią się akustycznymi opornościami falowymi, to część energii przechodzi do drugiego ośrodka, natomiast pozostała część zostaje w pierwszym ośrodku, co pokazano schematycznie na rys. 2.8.



Rys. 2.8. Odbicie i załamanie fali ultradźwiękowej na granicy dwóch ośrodków

l - padająca fala podłużna, l_1 - odbita fala podłużna, t_1 - odbita fala poprzeczna, l_2 - załamana fala podłużna, t_2 - załamana fala poprzeczna, β_{11} - kąt padania i odbicia fali podłużnej, β_{t1} - kąt odbicia fali poprzecznej, β_{t2} - kąt załamania fali poprzecznej, β_{12} - kąt załamania fali podłużnej, c_{l1}, c_{l2} - prędkości fali podłużnej w ośrodkach 1 i 2, c_{t1}, c_{t2} - prędkości fali poprzecznej w ośrodkach 1 i 2

Fig. 2.8. Ultrasonic wave reflection and refraction at the boundary of two media

l - longitudinal incident wave, l_1 - longitudinal reflected wave, t_1 - transversal reflected wave, l_2 - longitudinal refracted wave, t_2 - transversal refracted wave, β_{11} - incidence and reflection angle of the longitudinal wave, β_{t1} - reflection angle of the transversal wave, β_{t2} - refraction angle of the transversal wave, β_{12} - refraction angle of the longitudinal wave, c_{l1}, c_{l2} - longitudinal wave velocity in the media 1 and 2, respectively, c_{t1}, c_{t2} - transversal wave velocity in the media 1 and 2

Zależność między odpowiednimi kątami i prędkościami określa prawo Snelliusa [121, s. 47]:

$$\frac{\sin \beta_{11}}{c_{l1}} = \frac{\sin \beta_{t1}}{c_{t1}} = \frac{\sin \beta_{t2}}{c_{t2}} = \frac{\sin \beta_{12}}{c_{l2}}. \quad (2.11)$$

Gdy kąt padania β_{11} zwiększa się, to kąt β_{12} też się zwiększa. O ile $c_{l2} > c_{l1}$, to $\beta_{12} > \beta_{11}$ i dla pewnej wartości β_{11k1} kąt β_{12} osiąga

wartość krytyczną 90° . Kąt β_{11k1} , przy którym β_{12} wynosi 90° , nazywa się pierwszym kątem krytycznym [121, s. 48] i wyznacza się go ze wzoru:

$$\beta_{11k1} = \arcsin(c_{11}/c_{12}). \quad (2.12)$$

Drugi kąt krytyczny odpowiada sytuacji, gdy znika fala poprzeczna, tzn. gdy $\beta_{t2} = 90^\circ$:

$$\beta_{11k2} = \arcsin(c_{11}/c_{t2}), \quad (2.13)$$

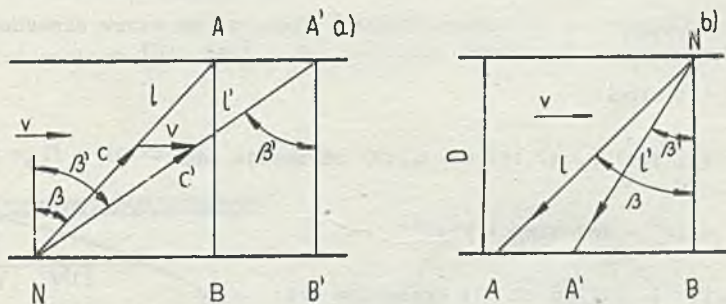
przy czym musi zachodzić $c_{12} > c_{11}$.

2.4.4. Znos drogi fali ultradźwiękowej w wodzie ruchomej

Gdy prędkość wody wzrośnie od wartości 0 do wartości v , to w przypadku wiązki ultradźwiękowej wysyłanej zgodnie z prądem wody punkt padania A fali ultradźwiękowej przesunie się do punktu A' , co pokazano na rys. 2.9a. Długość drogi l dla $v = 0$ wynosi:

$$l = t \cdot c, \quad (2.14)$$

gdzie t - czas przelotu fali ultradźwiękowej od N do A w wodzie stojącej.



Rys. 2.9. Unoszenie fali ultradźwiękowej

a) wiązka wysyłana zgodnie z prądem, b) wiązka wysyłana pod prąd

l - odległość między nadajnikiem fali ultradźwiękowej N a punktem padania fali ultradźwiękowej A na ściankę rurociągu lub kanału dla wody stojącej, l' - odległość w wodzie w ruchu, D - średnica wewnętrzna rurociągu lub szerokość kanału

Fig. 2.9. Drift of the ultrasonic wave

a) downstream emitted beam, b) upstream emitted beam

l - the distance between the ultrasonic emitter N and the incidence point of the ultrasonic wave at the pipe or channel wall in stagnant water, l' - the distance in the case of flowing water, D - internal pipe diameter or channel width

Długość drogi fali ultradźwiękowej dla $v > 0$ oblicza się ze wzoru:

$$l' = t c', \quad (2.15)$$

gdzie: c' - wypadkowa prędkość fali ultradźwiękowej w wodzie płynącej.

Znos AA' wyraża się wzorem:

$$AA' = t v. \quad (2.16)$$

Na podstawie rys. 2.9:

$$\cos \beta = D/l, \quad (2.17)$$

$$\cos \beta' = D/l', \quad (2.18)$$

Podstawiając wzory (2.14), (2.15) i (2.17) do (2.18) otrzymuje się:

$$\cos \beta' = \frac{c}{c'} \cos \beta. \quad (2.19)$$

Z twierdzenia Pitagorasa:

$$l'^2 = D^2 + (NB + BB')^2. \quad (2.20)$$

Po podstawieniu

$$NB = l \sin \beta \quad (2.21)$$

oraz (2.14), (2.15), (2.16) do (2.18) otrzymuje się:

$$c' = (c^2 + 2cv \sin \beta + v^2)^{1/2}. \quad (2.22)$$

Podstawiając (2.22) do (2.19) otrzymuje się:

$$\beta' = \arccos \frac{\cos \beta}{[1 + (v/c)^2 + (2v \sin \beta/c)]^{1/2}}. \quad (2.23)$$

Na podstawie wzorów (2.14), (2.17) i (2.16) otrzymuje się:

$$AA' = \frac{v}{c} \cdot \frac{D}{\cos \beta}. \quad (2.24)$$

Sytuację, gdy wiązka ultradźwiękowa wysyłana jest pod prąd wody, przedstawiono na rys. 2.9b. Podobne wyprowadzenie jak wyżej prowadzi do wzoru na znos identycznego z (2.24).

3. POMIAR STRUMIENIA OBJĘTOŚCI WODY W RUROCIĄGU W WARUNKACH NORMALNYCH

Własności metrologiczne i eksploatacyjne przepływomierza ultradźwiękowego zależą w dużym stopniu od organu pomiarowego przepływomierza. Model matematyczny organu pomiarowego, decydujący o modelu całego przepływomierza zależy od równania opisującego rozkład prędkości [82, 92].

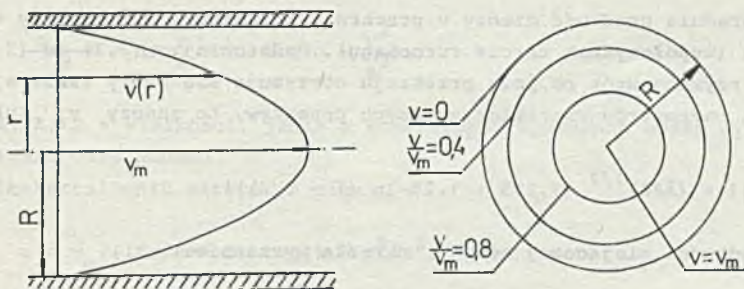
3.1. WZORY OPISUJĄCE ROZKŁAD PRĘDKOŚCI

W zależności od stosunku sił tarcia do sił bezwładności wyróżnia się przepływy: uwarstwiony (laminarny), burzliwy (turbulentny) i krytyczny [50, 61, 231]. Za górną granicę przepływu uwarstwowionego przyjmuje się liczbę Reynoldsa równą 2320 [153], natomiast za dolną, praktyczną granicę przepływu burzliwego liczbę Reynoldsa równą 10 000 [108], przy czym inni autorzy podają odmienne wartości [65, 77, 198].

3.1.1. Przepływ uwarstwiony

Wyprowadzenie wzoru opisującego rozkład prędkości v znajduje się w wielu podręcznikach [33, 198] i dla oznaczeń jak na rys. 3.1 otrzymuje się wzór:

$$v = v_m (1 - (r/R)^2). \quad \text{a)} \quad \text{b)} \quad (3.1)$$



Rys. 3.1. Przepływ uwarstwiony

a) profil prędkości, b) izotachy

v_m - prędkość maksymalna, która występuje w osi rurociągu, R - promień wewnętrzny rurociągu, r - promień bieżący

Fig. 3.1. Laminar flow

a) velocity profile, b) lines of equal velocity

v_m - maximum velocity in the pipe axis, R - internal pipe radius, r - actual radius

3.1.2. Przepływ burzliwy

W przeciwieństwie do przepływu uwarstwionego (Poiseuille'a) dla opisu rozkładu prędkości w ruchu burzliwym nie ma określonego wzoru, jaki byłby wyprowadzony na drodze teoretycznej i zgadzał się z wynikami doświadczeń z dokładnością wystarczającą do pomiarów oraz badań modelowych przepływomierzy ultradźwiękowych. R. Gryboś w poz. [65, s. 178] pisze: "Niestety profilu prędkości w przepływie turbulentnym nie można określić czysto teoretycznie, jak to uczyniliśmy w p. 5 dla przepływu laminarnego. Dlatego zagadnienie to, podobnie jak i inne problemy przepływów turbulentnych, rozwiązuje się przede wszystkim doświadczalnie".

Wobec powyższego autor pracy podjął analizę zalecanych wzorów, sformułował kryteria, jakim powinien odpowiadać wzór opisujący rozkład prędkości oraz zaproponował prosty wzór dobrze odpowiadający rzeczywistym kształtom rozkładów prędkości.

3.1.2.1. Zestawienie wzorów opisujących rozkład prędkości w rurze o przekroju kołowym

Poniższe zestawienie jest tylko ilustracją stanu wiedzy w tej dziedzinie [19, 27, 51, 52, 74, 87, 100, 103, 104, 122, 123, 150, 153, 180, 199, 229].

A) W przypadku przepływów występujących w przemyśle autorzy pozycji [17, s. 33] podają:

$$v = v_m + v_r \ln(1 - r/R). \quad (3.2)$$

Prędkość v_r można opisać następująco [17, s. 34]:

$$v_r = 1,25 (\lambda/2)^{1/2} v_s, \quad (3.3)$$

gdzie: v_s - średnia prędkość cieczy w przekroju rurociągu, λ - liniowy współczynnik oporu (współczynnik tarcia rurociągu). Podstawiając (3.3) do (3.2) i całkując otrzymany wzór po polu przekroju otrzymuje się wzory zawierające jeden z dwóch parametrów charakteryzujących przepływ, to znaczy v_s lub v_m :

$$v = v_s (1 + (\lambda/2)^{1/2} (1,875 + 1,25 \ln(1 - r/R))), \quad (3.4)$$

zależność prędkości miejscowej od v_m określa wyrażenie:

$$v = v_m \left[1 + \frac{1,25 (\lambda/2)^{0,5}}{1 + 1,875 (\lambda/2)^{0,5}} \ln(1 - r/R) \right]. \quad (3.5)$$

B) Powszechnie stosowany jest wzór potęgowy Prandtla:

$$v = v_m (1 - r/R)^{1/n}, \quad (3.6)$$

gdzie: $1/n$ - wykładnik potęgowy zależny od liczby Reynoldsa (np. [70]) i chropowatości ścianki rurociągu. Chropowatość można wyznaczyć na podstawie informacji zawartych w [142, 144, 193, 233]. A.T. Troskoleński w [198, s. 357] podaje graficzną zależność $n = f(Re)$, przy czym dla $Re = 10^4 - 2 \cdot 10^4$ jest $n = 7$, natomiast dla $5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$:

$$n = 2,1 \log Re - 1,9, \quad (3.7)$$

i z rysunku wynika, że wzór ten odnosi się do rury hydraulicznie gładkiej. W pozycji [197] poandano, że wykładnik $1/7$ obowiązuje dla przepływów burzliwych dla $Re \leq 80\,000$. Dla rur szorstkich $n=6$ [33] lub $4-5$ [204]. Wobec braku danych dla strefy przejściowej w [211] wyznaczono zależność n od liczby Reynoldsa dla wszystkich rodzajów przepływu burzliwego.

C) Wzór podany w [33, s. 212] bez bliższej analizy (i w postaci wykazującej niezgodność występujących w nim wymiarów wielkości) stanowi ilustrację różnorodności postaci funkcji, za pomocą której opisywany jest rozkład prędkości:

$$v = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} (\ln y + C), \quad (3.8)$$

gdzie: τ_0 - naprężenie styczne na ściance rury, ρ - gęstość płynu, y - odległość od ścianki, K - stała doświadczalna ($0,36 - 0,42$), C - stała, zależna od prędkości maksymalnej w osi rurociągu ($y = R$):

$$C = v_m - \frac{1}{K} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \ln R \quad (3.9)$$

D) Empirycznym wzorem jest równanie M. Broszki podane w [198, s. 356]:

$$\frac{v_m - v}{v} = (A \frac{r}{R} - B) \log(1 - \frac{r^2}{R^2}), \quad (3.10)$$

gdzie: A, B - wielkości, jakie w konkretnych wypadkach można wyznaczyć na podstawie doświadczeń.

Po przekształceniu otrzymuje się:

$$v = v_m / ((Ar/R - B) \log(1 - r^2/R^2) + 1). \quad (3.11)$$

E) Wzór Th. v. Karmana podany w [149, s. 209] ma postać następującą:

$$v = \frac{m+1}{m} (1 - r^2/R^2)^{1/m} \cdot v_s, \quad (3.12)$$

gdzie: m - parametr zależny od liczby Reynoldsa o wartościach podanych w postaci wykresu [149, s. 204].

Wzór ten nie uwzględnia szorstkości rurociągu - podany jest dla rurociągów gładkich i może być przekształcony do następującej postaci:

$$v = v_m (1 - r^2/R^2)^{1/m}. \quad (3.13)$$

F) Parabola zaproponowana w [217] ma postać:

$$v = v_m (1 - (r/R)^m), \quad (3.14)$$

przy czym wykładnik $m=2$ dla przepływu uwarstwionego i kilkanaście dla przepływu burzliwego.

G) Parabola opisująca profile od uwarstwionego do tłokowego [100, s. 956] wyrażona jest wzorem:

$$v = (2 v_s / (\tau + 1)) (1 + (\tau - 1) (r^2/R^2)), \quad (3.15)$$

gdzie: τ - stopień turbulencji, $\tau = 0$ - przepływ uwarstwiony, $\tau = 1$ - przepływ tłokowy.

H) H. Schlichting podaje wzór [164, s. 485]:

$$v = v_d (2,5 \ln \frac{R-r}{k} + C), \quad (3.16)$$

gdzie: v_d - prędkość dynamiczna, k - chropowatość bezwzględna, C - stała. Prędkość dynamiczna wyraża się wzorem [164, s. 476]:

$$v_d = (\lambda/8)^{1/2} \cdot v_s. \quad (3.17)$$

Rozróżnia się trzy strefy przepływu burzliwego [60, 61, 185] i dla każdej z nich obowiązuje inna wartość stałej C , natomiast granice stref wyznacza współczynnik k_2 [164, s. 484]:

$$k_2 \ 0 \ k \ v_d/\nu. \quad (3.18)$$

Autorzy [20, 62, 99, 105, 153, 164, 198] podają różne wzory na wyrażenie współczynnika λ , przy czym Cz. Grabarczyk i E. Szymanek [61] uważają, że wzory podane w [99] są najbardziej dokładne:

a) rura hydraulicznie gładka: $0 \leq k_2 \leq 5$;

$$1/(\lambda)^{1/2} = 2,0 \log (\text{Re } \lambda^{1/2}/2,51), \quad (3.19)$$

b) strefa przejściowa, $5 \leq k_2 \leq 70$;

$$1/(\lambda)^{1/2} = -2,0 \log (2,51/(\text{Re } \lambda^{1/2}) + k/(1,855 R)) \quad (3.20)$$

c) rura całkowicie szorstka, $k_2 > 70$,

$$1/(\lambda)^{1/2} = 2,0 \log (1,855 R/k). \quad (3.21)$$

Wartość C dla rury hydraulicznie gładkiej wynosi [164, s. 487]:

$$C = 2,5 \ln(k v_d/\nu) + 5,5, \quad (3.22)$$

dla strefy przejściowej skorzystano z wykresu podanego w [164, s. 487]:

$$C = -3,44 (\log(kv_d/\nu))^2 + 7,44 \log (kv_d/\nu) + 5,68, \quad (3.23)$$

dla rury całkowicie szorstkiej [1,64, s. 487]:

$$C = 8,5. \quad (3.24)$$

3.1.2.2. Warunki, jakie winny spełniać wzory opisujące rozkład prędkości dla przepływu burzliwego

Analiza wzorów przedstawionych w punkcie 3.1.2.1 przeprowadzona przez autora, badania doświadczalne autora oraz wyniki pomiarów przedstawione w literaturze pozwoliły na sformułowanie następujących warunków, jakim powinny odpowiadać wzory opisujące rozkład prędkości dla przepływu burzliwego:

- 1) Funkcja $v(r)$ powinna jak najlepiej odpowiadać rzeczywistej zależności prędkości od promienia $v_{rz}(r)$, tzn. $v(r) - v_{rz}(r) \rightarrow \min$ dla $r \in [0; R]$.
- 2) Funkcja $v(r)$ powinna być funkcją ciągłą, ściśle malejącą dla $r \in [0; R]$.
- 3) Funkcja $v(r)$ winna być osiowo-symetryczna.
- 4) Dla $r = R$ funkcja $v(r)$ przyjmuje wartość 0.
- 5) Wartość pochodnej v względem r powinna dążyć do zera, gdy r dąży do zera:

$$\lim dv/dr = 0.$$

$$r \rightarrow 0.$$

- 6) Pochodna dv/dr dla $r \rightarrow R$ powinna być skończona, co fizycznie oznacza skończone naprężenia styczne przy ścianie.
- 7) Wartości prędkości odniesione do prędkości maksymalnej dla tej samej wartości r dla przepływu burzliwego powinny być większe niż dla przepływu uwarstwionego:

$$(v/v_m)_b = (v/v_m)_u \quad \text{dla } r = 0,$$

$$(v/v_m)_b > (v/v_m)_u \quad \text{dla } r \in (0; R).$$

Poszukiwania analitycznego wzoru funkcji opisującej rozkład prędkości można prowadzić w całym zbiorze funkcji spełniających powyższe warunki. Jednym z kryteriów wyboru może być więc prostota wzoru, gdyż - jak pisze Lechner [100] - wybór uproszczonego wzoru opisującego profil prędkości jest bardziej lub mniej arbitralny.

3.1.2.3. Analiza warunków na przykładzie wzoru potęgowego Prandtla

Wzór ten jest najbardziej rozpowszechniony, stąd będzie szczegółowo przeanalizowany.

ad 1) Jak wynika z porównania danych doświadczalnych [217], wzór Prandtla dobrze aproksymuje profil przy ścianie rurociągu, natomiast różnica $v - v_{rz}$ w pobliżu osi jest wyraźna (dla v_m równego v_{rzm}).

ad 2) Funkcja określona wzorem (3.6) jest funkcją ciągłą ściśle monotoniczną, malejącą, a więc spełniającą warunek 2.

ad 3) Warunek ten jest spełniony.

ad 4) Warunek ten jest spełniony.

ad 5) Pochodna dv/dr dla $r = 0$ wynosi:

$$dv/dr = -v_m/nR, \quad (3.25)$$

a więc warunek ten nie jest spełniony.

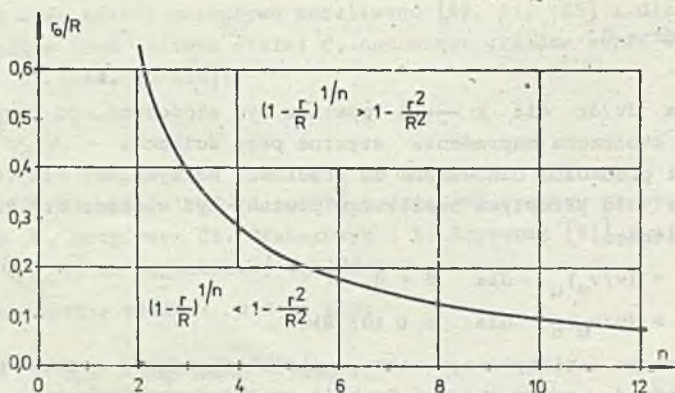
ad 6) Pochodna dv/dr dla $r \rightarrow R$ wynosi nieskończoność, a więc warunek ten nie jest spełniony.

ad 7) Z warunku tego wynika, że dla $r > 0$ i $r \neq R$ powinna zachodzić nierówność:

$$(1 - r/R)^{1/n} > 1 - r^2/R^2. \quad (3.26)$$

Jak przykładowo pokazano w 214, warunek ten nie jest spełniony. Na rys. 3.2 pokazano zależność $r_0/R = f(n)$, gdzie r_0 oznacza promień, dla którego wyrażenie (3.26) staje się równością.

Dla $r > r_0$ jest spełniona nierówność (3.26).



Rys. 3.2. Zależność r_0/R od n

Fig. 3.2. Dependence of r_0/R on n

Jak widać z rys. 3.2, dla dużych wartości n , a więc tylko dla dużych liczb Reynoldsa można w przybliżeniu przyjąć, że wzór Prandtla odpowiada warunkowi 7.

Reasumując powyższą analizę, stwierdza się, że wzór potęgowy Prandtla nie spełnia trzech spośród siedmiu przyjętych warunków. Warunek 6 może być nie spełniony, o ile weźmie się pod uwagę istnienie warstwy przyściennej, gdyż wtedy wzór nie obowiązuje dla wartości r bliskich R , to znaczy w tej warstwie.

3.1.2.4. Analiza warunków dla innych wzorów

Dla wzoru A), tzn. (3.5), nie są spełnione warunki 4, 5 i 6.

Dla wzoru D), tzn. (3.11), nie są spełnione warunki 5 i 6.

Dla wzoru E), tzn. (3.13), nie są spełnione warunki 5 i 6.

Dla wzoru F), tzn. (3.14), są spełnione warunki od 2 do 7.

Wzór (3.14) jest lepszy niż (3.6) dla małych wartości r , natomiast dla wartości r bliskich R wzór (3.6) lepiej aproksymuje rzeczywiste profile prędkości. Podsumowując widać, że żaden ze wzorów nie spełnia wszystkich warunków.

3.1.2.5. Wzór potęgowy trójskładnikowy

Autor pracy proponuje wzór w postaci:

$$v = v_m (1 - a(r/R)^2 - (1 - a)(r/R)^m), \quad (3.27)$$

gdzie: m i a stałe, które należy wyznaczyć dla konkretnego profilu prędkości.

Warunek 1 jest spełniony lepiej niż w przypadku innych wzorów i np. dla małych wartości r wzór (3.27) jest lepszy niż (3.6), natomiast dla wartości r bliższych R lepszy niż (3.14). Warunki 2 do 7 są spełnione, przy czym wzór (3.14) jest prostszy niż (3.27), jednak dodanie składnika $a(r/R)^2$ nie komplikuje istotnie postaci wzoru, a tylko pozwala na lepsze dopasowanie profilu obliczonego ze wzoru do profilu rzeczywistego.

Dla danych eksperymentalnych pomiaru profilu prędkości podanych w [198, s. 266] autor wyznaczył parametry a i m , otrzymując zależność:

$$v = v_m (1 - 0,34 (r/R)^2 - 0,66 (r/R)^{56}). \quad (3.28)$$

Odchylenia między danymi doświadczalnymi i wartościami wyznaczonymi ze wzoru (3.28) nie są większe niż $\pm 0,7\%$, natomiast w przypadku wzoru Prandtla odchylenia dochodzą do 4% (dla $r < 0,95 R$).

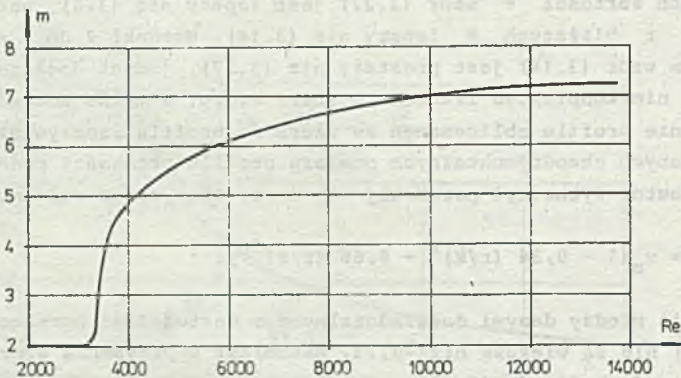
3.1.3. Przepływ krytyczny

Przepływ krytyczny ma miejsce w rurociągu, gdy liczba Reynoldsa jest większa od wartości, dla której jeszcze występuje przepływ uwarstwiony, a mniejsza od wartości, dla której przepływ nie jest jeszcze w pełni rozwiniętym przepływem burzliwym [122]. Za dolną liczbę Reynoldsa dla przepływu krytycznego przyjmuje się wartość 2320 [153] lub 10000 [198], natomiast górna wartość zależy od miejscowych warunków (chropowatość ścianki, szybkość zwiększania przepływu). Można przyjąć, że w warunkach technicznych górna wartość liczby Re wynosi od 4000 do 10 000. W [198] przedstawiono wyniki badań doświadczalnych wykonanych przez Stanton i Pannella oraz Nikuradsego. Krzywe: $v_s/v_m = f(\log Re)$ pokrywają się w zakresie od przepływu uwarstwowionego do $\log Re = 4,5$. Zakres liczb Re dla przepływu krytycznego w świetle tych badań wynosi w przybliżeniu od 2800 do 6000.

Wzory (3.13), (3.14), (3.15) i (3.27) mogą być stosowane do opisu rozkładu prędkości dla przepływu krytycznego, ponieważ pozwalają na opis rozkładu prędkości zarówno dla przepływu uwarstwowionego, jak i burzliwego. W [149] podano wykres zależności $m = f(Re)$ dla wzoru (3.13) dla zakresu liczb Re od 0, a więc i dla przepływu krytycznego, jednak ze względu na liniową skalę na osi odciętych odczytanie jakiegokolwiek wartości dla przepływu krytycznego jest niemożliwe.

Wzór (3.15) nie spełnia warunku 4, wzór (3.27) jest zbyt skomplikowany, wobec tego zostanie zastosowany do opisu wzór (3.14). Na podstawie danych wartości stosunków v_s/v_m w [198] autor obliczył wartości m we wzorze (3.14) i wynik obliczeń przedstawił na rys. 3.3. Całkując wzór (3.14) po polu przekroju otrzymuje się:

$$v_s = v_m / (m+2). \quad (3.29)$$



Rys. 3.3. Zależność $m = f(Re)$ według [198]

Fig. 3.3. The relationship $m = f(Re)$, according to [198]

3.1.4. Modele graniczne rozkładu prędkości

W wielu przypadkach istnieją trudności w doborze funkcji opisującej rozkład prędkości dla warunków odbiegających od normalnych. Jeżeli rzeczywisty rozkład prędkości w rurociągu można zapisać ogólnie jako $v_{rz}(r)$, to rozkłady graniczne v_1 i v_2 będą spełniać warunki:

$$v_1(r) \leq v_{rz}(r) \leq v_2(r), \quad (3.30)$$

dla $r \in [0; R]$, przy czym często będą zachodzić związki:

$$v_1(0) = v_{rz}(0) = v_2(0),$$

$$v_1(R) = v_{rz}(R) = v_2(R),$$

natomiast dla $r \in (0 \text{ i } R)$ będzie obowiązywała nierówność:

$$v_1(r) < v_{rz}(r) < v_2(r). \quad (3.31)$$

Jeżeli w trakcie badań modelowych okaże się, że np. przepływomierz trójdrogowy ma mniejszy błąd liniowości niż przepływomierz jednodrogowy zarówno dla rozkładu $v_1(r)$, jak i $v_2(r)$, to można sądzić, że te właściwości zachowa w przypadku rzeczywistego rozkładu prędkości.

Przykładem rozkładów granicznych dla rozkładu wyrażonego wzorem (3.14) będą:

$$v_1(r) = v_m(1 - r/R), \quad (3.32)$$

$$v_2(r) = v_m. \quad (3.33)$$

Rozkładami granicznymi będą również rozkłady:

$$v_1(r) = v_m(1 - (r/R)^8), \quad (3.34)$$

$$v_2(r) = v_m(1 - (r/R)^{10}), \quad (3.35)$$

o ile wiadomo, że rzeczywisty rozkład można aproksymować wzorem (3.14) z wykładnikiem około 9.

W przypadku kanału otwartego rozkładami granicznymi prędkości będą rozkłady tłokowy i liniowy wyrażone wzorami [67]:

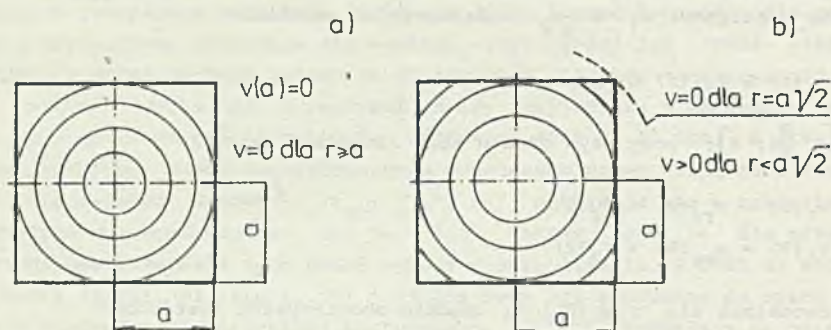
$$v = v_m, \quad (3.36)$$

$$v = w v_m/H, \quad (3.37)$$

gdzie: w jest współrzędną liczoną od dna kanału, H jest odległością poziomu wody od dna kanału.

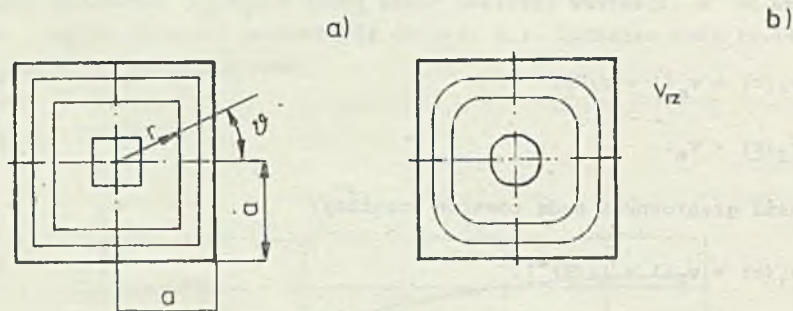
W tym przypadku rozkłady graniczne (wyrażone wzorami (3.36) i (3.37)) można zastosować do oceny błędów granicznych pomiarów, jak to zrobiono w [67].

Trzeci przykład rozkładów granicznych pokazano na rys. 3.4.



Rys. 3.4. Graniczne rozkłady prędkości dla rurociągu o przekroju kwadratowym

a) rozkład osiowo-symetryczny z polami martwymi, b) rozkład bez półmartwych
Fig. 3.4. Limiting velocity distributions of a square crosssection pipeline
a) a distribution with dead fields, symmetrical by an axis, b) the distribution with no dead field



Rys. 3.5. Porównanie granicznego rozkładu prędkości z rozkładem zbliżonym do rzeczywistego

a) rozkład z izotachami będącymi odcinkami prostych równoległych do odpowiednich boków kanału, b) rozkład zbliżony do rzeczywistego, ψ - współrzędna kątowa

Fig. 3.5. Comparison of the limiting velocity distribution with the close-to-real distribution

a) a distribution with equal velocity curves being line segments parallel to respective channel sides, b) a close-to-real distribution, ψ - angular coordinate

Rozkład prędkości przedstawiony na rys. 3.4 może być opisany wzorem:

$$v = v_m (1 - (r/a)^m). \quad (3.38)$$

W przypadku rozkładu przedstawionego na rys. 3.5a dla $\psi \in [-45^\circ, +45^\circ]$ prędkość będzie wynosiła:

$$v = v_m (1 - (r \cos \psi / a)^m). \quad (3.39)$$

Na rys. 3.5b przedstawiono izotachy zbliżone do rzeczywistych.

3.2. WARUNKI NORMALNE

W pewnych warunkach przepływomierz ultradźwiękowy może być wzorcowany na podstawie modelu matematycznego [207, 213, 221]. Wzorcowanie to może być nazwane wzorcowaniem pośrednim przez analogię do pomiaru pośredniego. Taki sposób wzorcowania jest możliwy w normalnych warunkach zabudowy, które są następujące:

- 1) rurociąg ma przekrój kołowy, a chropowatość powierzchni wewnętrznej ścianki jest znana,
- 2) rozkład prędkości jest osiowo-symetryczny i niezmienny w organie pomiarowym,
- 3) woda nie zawiera ciał stałych ani pęcherzy gazu,
- 4) głowice są zainstalowane w miejscach odpowiednich do przyjmowanego modelu matematycznego,
- 5) woda wypełnia cały przekrój poprzeczny organu pomiarowego.

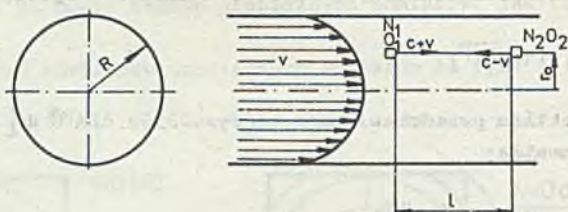
Wzorcowanie pośrednie w warunkach odbiegających od normalnych bywa niekiedy możliwe, ale wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań, zwykle doświadczalnych.

Zasadniczymi wymaganiami dla spełnienia warunku 2) są odpowiednio długie, proste odcinki rurociągu i kanału przed i za przepływomierzem oraz całkowite wypełnienie rurociągu wodą. W [33] podano, że dla przepływu burzliwego rozkładu prędkości ustala się w odległości 25 do 30 średnic rurociągu od przekroju wejściowego.

3.3. MODELE MATEMATYCZNE ORGANÓW POMIAROWYCH PRZEPŁYWOMIERZY ULTRADŹWIĘKOWYCH JEDNODROGOWYCH Z GŁOWICAMI WBUDOWANYMI W ŚCIANKĘ RUROCIĄGU

3.3.1. Punktowy pomiar prędkości

Na rys. 3.6. przedstawiono schemat organu pomiarowego z punktowym pomiarem prędkości.



Rys. 3.6. Schemat organu pomiarowego przepływomierza ultradźwiękowego z punktowym pomiarem prędkości

1 - odległość między przetwornikami piezoelektrycznymi N_1O_1 i N_2O_2 , r - promień, na którym umiejscowione są przetworniki

Fig. 3.6. A diagram of the primary device of an ultrasonic flowmeter with pointwise velocity measurement

1 - the distance of piezoelectric transducers N_1O_1 and N_2O_2 , r_0 - a radius in which the transducers are located

Czas przebiegu fali ultradźwiękowej wysyłanej z prądem wody wynosi:

$$t_1 = 1/(c + v_1), \quad (3.40)$$

natomiast dla fali wysyłanej pod prąd:

$$t_2 = 1/(c - v_1). \quad (3.41)$$

Różnica czasów $t_2 - t_1$ wynosi:

$$\Delta t = 2 l v_1 / (c^2 - v_1^2) \quad (3.42)$$

Wielkość mierzona, tzn. strumień objętości \dot{V} , jest iloczynem prędkości średniej wody po przekroju rurociągu v_s oraz pola przekroju $S = \pi D^2/4$:

$$\dot{V} = \pi D^2 v_s / 4, \quad (3.43)$$

gdzie: $D = 2R$ - średnica wewnętrzna rurociągu.

Stosunek v_s/v_1 określa się jako współczynnik czułości K_1 :

$$K_1 = v_s/v_1. \quad (3.44)$$

Wstawiając (3.43) i (3.44) do (3.42) i biorąc pod uwagę, że $v_1^2 \ll c^2$, otrzymuje się:

$$\Delta t = \frac{8l}{\pi D^2 c^2 K_1} \dot{V}. \quad (3.45)$$

Wartość współczynnika czułości K_1 zależy zarówno od liczby Reynoldsa, jak i od miejsca, w którym będą się znajdowały przetworniki piezoelektryczne. Przykładowo, dla rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.14) obliczono zależność K_1 od m i r_0 :

$$K_1 = \frac{m}{(m+2)(1 - (r_0/R)^m)} \quad (3.46)$$

W przypadku rozkładu prędkości wyrażonego wzorem Prandtla (3.6) otrzymano następujący wzór:

$$K_1 = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)(1 - r_0/R)^{1/n}} \quad (3.47)$$

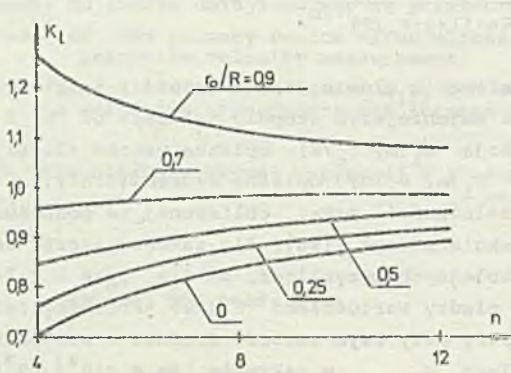
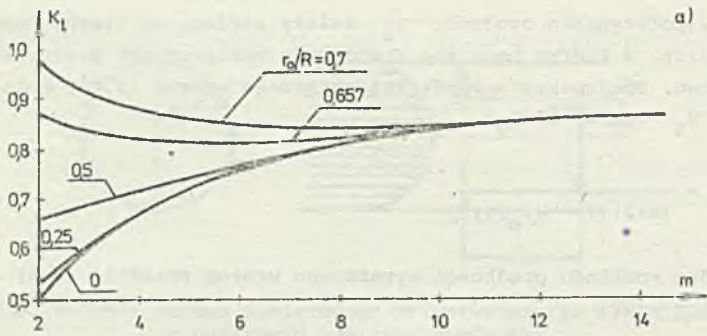
Miejsce zainstalowania głowic (tzn. wartość r_0) należy wybrać tak, aby wartość K_1 w jak najmniejszym stopniu zależała od m i n . Na rys. 3.7a przedstawiono funkcję $K_1(m, r_0/R)$ opisaną wzorem (3.46), natomiast na rys. 3.7b funkcję $K_1(n, r_0/R)$ opisaną wzorem (3.47).

Korzystając z zależności $m(Re)$ obliczonej na podstawie wykresu podanego przez A.T. Troskoleńskiego [198], dla zakresu liczb $Re \in (10^4; 10^7)$ obliczono metodą kolejnych przybliżeń, że dla $r_0/R = 0,744$ uzyskuje się minimalne różnice między wartościami $K_1(Re)$. Przebieg zależności $K_1(Re)$ pokazano na rys. 3.8, przy czym wartość średnia z wartości minimalnej $K_1 \min$ i maksymalnej $K_1 \max$ w zakresie $Re \in (10^4; 10^7)$ wynosi 0,885.

W przypadku zastosowania do opisu rozkładu prędkości wzoru potęgowego Prandtla (3.6) i przyjęciu, że rura jest hydraulicznie gładka, obliczono metodą kolejnych przybliżeń dla $Re \in (10^4; 10^7)$, że w zakresie zmian $r_0/R \in (0,74; 0,75)$ różnice względne $\Delta K_1/K_1$ nie są większe niż $\pm 0,08\%$ w stosunku do wartości będącej średnią wartości minimalnej i maksymalnej dla danej wartości r_0/R .

Zainstalowanie głowic w miejscach, gdzie $r_0/R = 0,744$ (co daje minimalny błąd dla przepływu burzliwego) i przyjęcie wartości $K_1 = 0,885$ powoduje powstanie błędu -21% dla przepływu uwarstwionego.

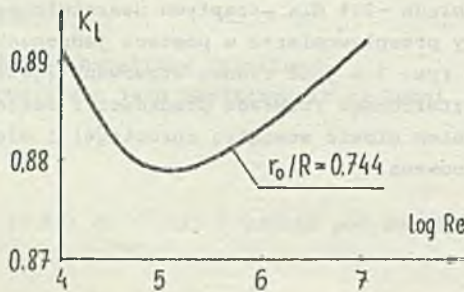
Organ pomiarowy przepływomierza w postaci jednopunktowej i konfiguracji przedstawionej na rys. 3.6 jest rzadko stosowany (głównie ze względu na duży wpływ zniekształconego rozkładu prędkości i zakłócenie przepływu spowodowane umieszczeniem głowic wewnątrz rurociągu) i dlatego dalsza analiza nie będzie kontynuowana.



Rys. 3.7. Zależność współczynnika czułości od miejsca pomiaru prędkości v_1
 a) $K_1(m)$ dla rozkładu wyrażonego wzorem (3.1), b) $K_1(n)$ dla rozkładu wyrażonego wzorem (3.6)

Fig. 3.7. Relationship of the sensitivity coefficient on the point of v_1 velocity measurement

a) $K_1(m)$ - for the distribution described by the formula (3.1); b) $K_1(n)$ - for the distribution described by formula (3.6)

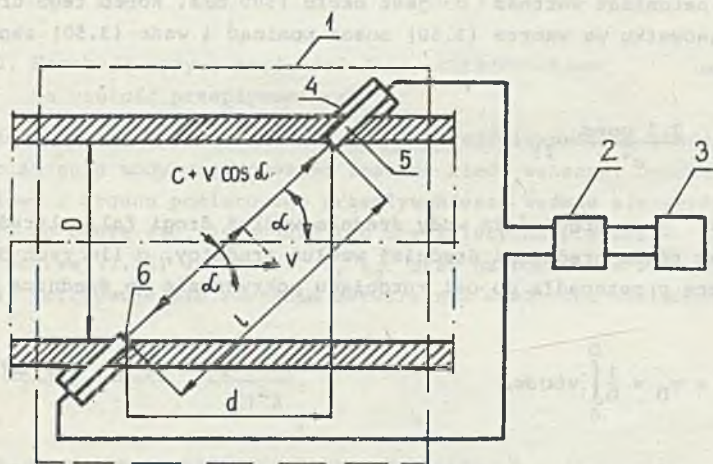


Rys. 3.8. Zależność $K_1(Re)$ dla $r_0/R = 0,744$
 Fig. 3.8. Relationship $K_1(Re)$ for $r_0/R = 0,744$

3.3.2. Pomiar prędkości średniej po średnicy rurociągu

3.3.2.1. Równanie przetwarzania

Na rys. 3.9 przedstawiono szkic przepływomierza ultradźwiękowego z głowicami instalowanymi w ścianie tak, że rzut drogi fali ultradźwiękowej na płaszczyznę prostopadłą do osi rurociągu leży w jego średnicy, a więc droga fali przebiega diametralnie.



Rys. 3.9. Szkic przepływomierza ultradźwiękowego

1 - organ pomiarowy, 2 - przetwornik pomiarowy, 3 - przetwornik wtórny, 4 - głowica, 5 - sonda, 6 - przetwornik piezoelektryczny, D - średnica wewnętrzna rurociągu, l - odległość między środkami powierzchni emitujących fale ultradźwiękową, d - rzut odległości l na oś rurociągu, α - kąt między drogą fali ultradźwiękowej l a osią rurociągu

Fig. 3.9. A simplified diagram of ultrasonic flowmeter

1 - primary device, 2 - secondary device, 3 - data output unit, 4 - head, 5 - probe, 6 - piezoelectric transducer, D - internal pipe diameter, l - distance between the centres of the ultrasonic wave emitting surface, d - projection of l on the pipe axis, α - angle between the ultrasonic beam direction l and the pipe axis

Czasy przelotu fali ultradźwiękowej biegnącej z prądem wody (t_1) i pod prąd wody (t_2) wynoszą odpowiednio:

$$t_1 = \int_0^l \frac{dx}{c + v(x) \cos \alpha'} \quad (3.48)$$

$$t_2 = \int_0^l \frac{dx}{c - v(x) \cos \alpha'} \quad (3.49)$$

gdzie: x - współrzędna bieżąca.

Na podstawie wzorów (3.48) i (3.49) oblicza się różnicę czasów:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \int_0^l \frac{2 v(x) \cos \alpha}{c^2 - (v(x))^2 \cos^2 \alpha} dx. \quad (3.50)$$

W praktyce prędkość wody nie jest większa niż 5 m/s, kąt α zwykle równa się 45° , natomiast wartość c jest około 1500 m/s. Wobec tego drugi składnik w mianowniku we wzorze (3.50) można pominąć i wzór (3.50) zapisać następująco:

$$\Delta t = \frac{2 l \cos \alpha}{c^2} v_1, \quad (3.51)$$

gdzie: v_1 jest prędkością wody średnią wzdłuż drogi fali ultradźwiękowej, która jest równa prędkości średniej wzdłuż średnicy, o ile rzut drogi na płaszczyznę prostopadłą do osi rurociągu pokrywa się ze średnicą D :

$$v_1 = v_D = \frac{1}{D} \int_0^D v(x) dx. \quad (3.52)$$

Prędkość wody średnią po przekroju rurociągu S oblicza się następująco:

$$v_s = \frac{1}{S} \int_S v dS. \quad (3.53)$$

Stosunek v_s do v_D stanowi współczynnik kształtu rozkładu prędkości (liczba kształtu):

$$K = v_s / v_D. \quad (3.54)$$

W przypadku pomiaru prędkości średniej po średnicy rurociągu współczynnik czułości równy jest współczynnikowi kształtu rozkładu prędkości.

Podstawiając wzory (3.43), (3.54), (3.52), (3.53) do (3.51) otrzymuje się:

$$\Delta t = \frac{8 k \cos \alpha}{\pi c^2 D^2 K} \cdot \dot{V}. \quad (3.55)$$

W przepływomierzu z pomiarem różnicy faz ciągłych sygnałów ultradźwiękowych odbieranych przez dwa niezależne odbiorniki model matematyczny będzie się wyrażał wzorem [121, s. 391]:

$$\Delta \varphi = \frac{16 f d}{c^2 D^2} \dot{v}. \quad (3.56)$$

Sygnałem wyjściowym może być również różnica częstotliwości krążących impulsów (metoda znana w literaturze pod nazwą *ring around*) [188]:

$$\Delta f = \frac{4 \sin 2\alpha}{\pi D^3} \dot{v}. \quad (3.57)$$

3.3.2.2. Korekcja wpływu prędkości fali ultradźwiękowej na czułość przepływomierza

Ze względu na zależność prędkości fali ultradźwiękowej od temperatury, składu i ciśnienia wody mogą powstać znaczne błędy wskazań. Jeżeli za sygnał wyjściowy z organu pomiarowego przepływomierza weźmie się wyrażenie $\Delta t / (t_1, t_2)$, to okaże się, że sygnał ten nie zależy od prędkości c . Uwzględniając we wzorze (3.55) zależność t_1, t_2 oraz na podstawie rys. 3.9, że $\cos \alpha = d/l$, otrzymuje się równanie odtwarzania wielkości mierzonej:

$$\dot{v} = \frac{\pi D^2 (d^2 + D^2) K}{8d} \frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2}. \quad (3.58)$$

3.3.2.3. Wyznaczenie wartości liczby kształtu K

Wstawiając wzór (3.1) opisujący rozkład prędkości dla przepływu uwarstwowanego do wzorów (3.52) oraz do (3.53) i następnie obliczone wartości v_D i v_s do wzoru (3.54), otrzymuje się: $K = 0,75$.

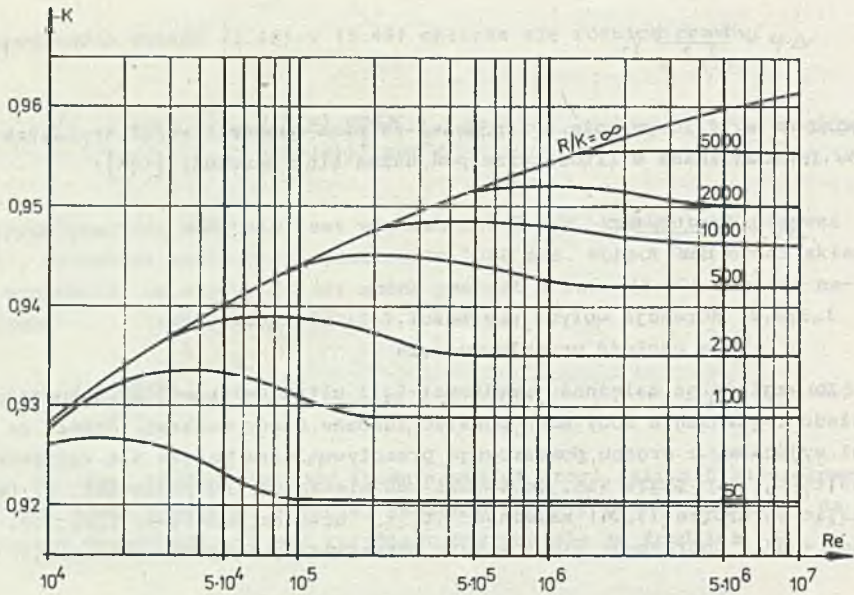
W przypadku przepływu burzliwego wartość liczby kształtu (lub postać wzoru) będzie zależała od przyjętego opisu rozkładu prędkości. Np. dla wzoru potęgowego Prandtla (3.6), dokonując obliczeń jak dla przepływu uwarstwowanego, otrzymuje się:

$$K = \frac{2n}{2n+1}. \quad (3.59)$$

Dla wzoru potęgowego trójskładnikowego (3.27):

$$K = \frac{1,5 (m+1) (2m-am+2a)}{(m+2) (3m-am+2a)}. \quad (3.60)$$

Podstawiając we wzorze (3.60) $a = 1$, otrzymuje się $K = 0,75$, a więc wartość dla przepływu uwarstwowanego. Wychodząc ze wzoru (3.16) oraz wzorów (3.17), (3.19), (3.20), (3.21), (3.22), (3.23), (3.24) oblicza się wartość K . Wykres $K(\text{Re}, R/k)$ autor podał w [221] i przedstawiony on jest na rys. 3.10.



Rys. 3.10. Wartość liczby kształtu K w funkcji liczby Re oraz odwrotność chropowatości względnej ścianki rurociągu R/k

Fig. 3.10. The relationship of form factor K and Reynolds number Re and the inverse of the relative roughness of pipe wall R/k

Ponieważ wzór (3.27) obejmuje opis dla wszystkich trzech stref przepływu burzliwego, wartość liczby kształtu można obliczyć ze wzoru (3.60). Przyjmując, że rozkład prędkości jest opisany wzorem (3.14), wyprowadzono na podstawie wzorów (3.52), (3.53) i (3.54) wzór na K :

$$K = (m+1)/(m+2). \quad (3.61)$$

Przepływ krytyczny występuje dla różnych zakresów liczby Re . Fronek [121] podaje, że w zakresie liczb Re 1500-4000, natomiast w badaniach własnych autor [225] uzyskał wartości 5500-8000. Badania te zostały wykonane w Stacji Wzorcowania Wodomierzy w Chorzowie dla przepływu w rurociągu o średnicy 0,39 m.

Korzystając z wyników badań doświadczalnych podanych w [121], które są pełniejsze niż badania autora, autor pracy uważa, że wartość K dla przepływu krytycznego można obliczyć ze wzoru:

$$K = K_u + \frac{K_b - K_u}{Re_b - Re_u} (Re - Re_u), \quad (3.62)$$

gdzie: Re_u - wartość liczby Reynoldsa, dla której występuje jeszcze przepływ uwarstwiony, Re_b - wartość liczby Reynoldsa, dla której występuje już

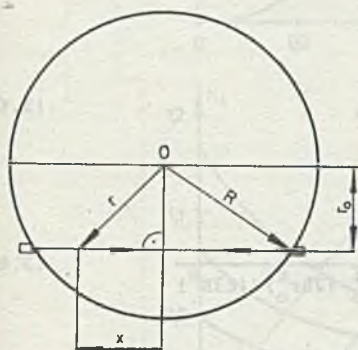
przepływ burzliwy, $K_u = 0,75$, K_b - wartość K dla przepływu burzliwego i liczby Reynoldsa równej Re_b . Przykładowo, dla $K_b = 0,928$:

$$K = 0,75 + 0,178 (Re - Re_u) / (Re_b - Re_u) \quad (3.63)$$

3.3.3. Pomiar prędkości średniej po cięciwie nie będącej średnicą

3.3.3.1. Opis rozkładu prędkości

Na rys. 3.11. przedstawiono szkic położenia drogi fali ultradźwiękowej. Położenie takie jest bardzo rzadko stosowane; jedynie w [194] jest rozważany taki sposób instalacji głowic. Wobec tego analiza zostanie dokonana skrótowo, korzystając z prostego, obejmującego wszystkie trzy strefy przepływu wzoru na rozkład prędkości, tzn. wzoru (3.14).



Rys. 3.11. Szkic położenia drogi fali ultradźwiękowej

r_0 - odległość drogi fali ultradźwiękowej od osi rurociągu, x - współrzędna bieżąca
Fig. 3.11. Schematic of the location of ultrasonic wave path

r_0 - distance of the ultrasonic path from the pipe axis, x - current coordinate

3.3.3.2. Wyznaczenie współczynnika czułości K_1

Podstawiając wzór (3.14) do (3.53), otrzymuje się:

$$v_s = v_m \frac{m}{m+2}. \quad (3.64)$$

Wartość średnią prędkości po cięciwie oblicza się ze wzoru:

$$v_1 = \frac{v_m}{(R^2 - r_0^2)^{0,5}} \int_0^{(R^2 - r_0^2)^{0,5}} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{x^2 + r_0^2}}{R} \right)^m \right] dx. \quad (3.65)$$

Dla powyższej całki dla dowolnego m wzór rekurencyjny jest nieformułowany, natomiast możliwa jest rekurencyjna kwadratura tej całki krokiem podwójnym dla konkretnych, nieparzystych wartości m . Dla konkretnych parzystych wartości m funkcja podcałkowa jest wielomianem. Współczynnik czułości będzie wyrażał się wzorem:

$$K_1 = \frac{m/(m+2)}{(R^2 - r_0^2)^{0,5}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{R^{-m}}{(R^2 - r_0^2)^{0,5}} \int_0^{r_0} (x^2 - r_0^2)^{m/2} dx} \quad (3.66)$$

3.3.3.3. Wybór optymalnej odległości cieciewy od osi rurociągu

Za optymalne będzie uważane takie położenie drogi (w cieciewie), dla którego zależność K_1 od zmian liczby Reynoldsa byłaby najmniejsza. Dla wartości $m=2$ (przepływ uwarstwiony) wartość K_1 będzie wyrażała się wzorem:

$$K_{1\ m=2} = \frac{0,5}{1 - (R^2 + 2r_0^2)/(3R^2)}, \quad (3.67)$$

Dla wartości $m = 4$:

$$K_{1\ m=4} = \frac{2}{3 - (3R^4 + 4R^2r_0^2 + 8r_0^4)/(5R^4)}, \quad (3.68)$$

natomiast dla $m = 8$:

$$K_{1\ m=8} = \frac{4}{5 - (35R^8 + 40R^6r_0^2 + 48r_0^4r_0^2 + 64R^2r_0^6 + 128r_0^8)/(63R^8)} \quad (3.69)$$

Praktycznie maksymalnym przepływom w rurociągach odpowiada liczba Re rzędu 10^6 , więc korzystając z wykresu w [198], obliczono wartość m , która wynosi 12,3. Wyznaczono więc zależność $K_1(r_0/R)$ dla $m = 12$:

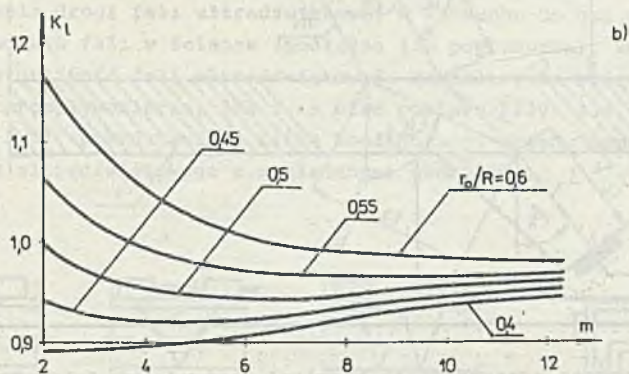
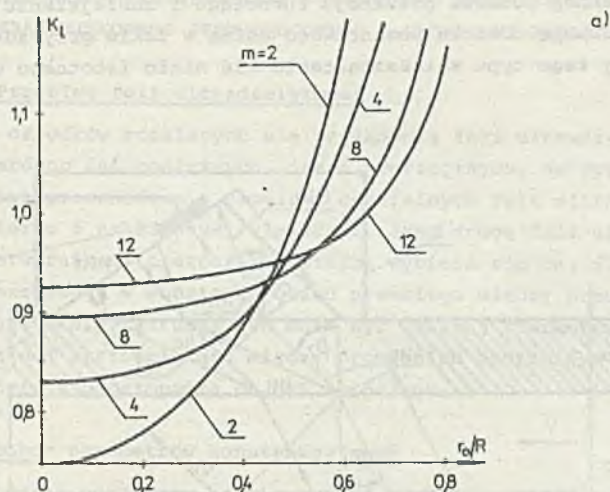
$$K_{1\ m=12} = \frac{12}{14 - F(r_0/R)/214,5}, \quad (3.70)$$

gdzie:

$$F(r_0/R) = 1024 (r_0/R)^{12} + 512 (r_0/R)^{10} + 384 (r_0/R)^8 + 320 (r_0/R)^6 + 280 (r_0/R)^4 + 252 (r_0/R)^2 + 231.$$

Na rys. 3.12a przedstawiono zależność $K_1(r_0/R)$ dla wartości $m = 2, 4, 8, 12$.

Z rys. 3.12a widać, że w przypadku umiejscowienia drogi w odległości $r_0/R = 0,4-0,6$ od środka rurociągu uzyskuje się znaczne zmniejszenie wpływu zmian wartości wielkości mierzonej na K_1 w porównaniu z drogą umiejscowioną w średnicy rurociągu. Wobec tego na rys. 3.12b przedstawiono zależność $K_1(m)$ dla różnych wartości parametrów r_0/R .



Rys. 3.12. Przebiegi zależności współczynnika czułości K_1 od położenia drogi i kształtu rozkładu prędkości

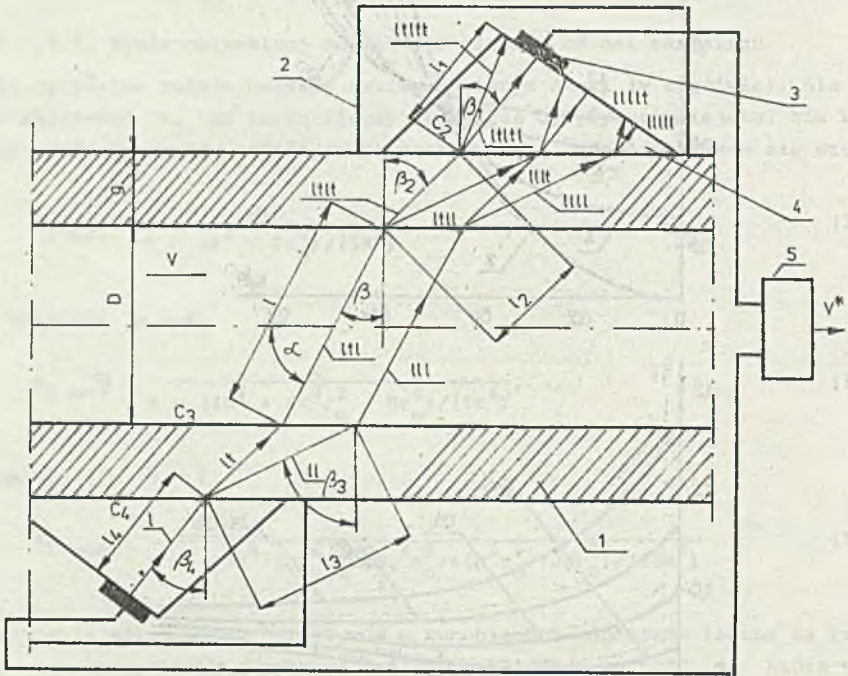
a) zależność $K_1(r_0/R)$ dla $m = 2, 4, 8, 12$; b) zależność $K_1(m)$ dla $r_0/R = 0, 4; 0, 45; 0, 5; 0, 55; 0, 6$

Fig. 3.12. Dependence of sensitivity coefficient K_1 on path location and shape of velocity distribution

a) relationship $K_1(r_0/R)$ for $m = 2, 4, 8, 12$; b) relationship $K_1(m)$ for $r_0/R = 0, 4; 0, 45; 0, 5; 0, 55; 0, 6$

W zależności od spodziewanego zakresu zmian liczby Re należałoby wybrać położenie drogi pozwalające na minimalizację błędu pomiaru strumienia objętości. Np. dla $r_0/R = 0, 5$ dla zakresu liczb $Re \in (3500-10^6)$ maksymalna zmiana wartości ΔK_1 wynosi 1,5%. W przypadku drogi w średnicy rurociągu i rury hydraulicznie gładkiej $\Delta K = 2, 5\%$ oraz chropowatej ($R/k = 100$) $\Delta K = 1\%$ (rys. 3.10). Niekorzystną konsekwencją umieszczenia drogi w cięciwie nie będącej średnicą jest duży wpływ zniekształconego rozkładu prędkości przy często występujących zniekształceniach polegających na zwiększeniu się

prędkości w jednej połowie przekroju rurociągu i zmniejszeniu w drugiej. Znajac konfigurację odcinka pomiarowego można w takim przypadku tak umiejscowić drogę, aby tego typu zniekształcenie nie miało istotnego wpływu na wartość K_1 .



Rys. 3.13. Schemat przechodzenia promieni centralnych fali ultradźwiękowej w przepływomierzu ultradźwiękowym z głowicami nakładanymi na ściankę

1 - ścianka rurociągu, 2 - głowica, 3 - przetwornik piezoelektryczny, 4 - klin pośredniczący, 5 - przetwornik pomiarowy, g - grubość ścianki, β - kąt między drogą fali ultradźwiękowej a prostopadłą do powierzchni wewnętrznej rurociągu, β_1, β_4 - kąty załamania i padania fali ultradźwiękowej w klinach, β_2, β_3 - kąty załamania i padania fali ultradźwiękowej w ściance, l_1, l_4 - długość dróg fali ultradźwiękowej w klinach, l_2, l_3 - długość dróg fali ultradźwiękowej w ściance, c_1, c_4 - prędkości fali ultradźwiękowej w klinach, c_2, c_3 - prędkości fali ultradźwiękowej w ściance rurociągu

Fig. 3.13. Path diagram of central ray of ultrasonic wave in clamp-on ultrasonic flowmeter

1 - pipe wall, 2 - head, 3 - piezoelectric transducer, 4 - intermediating wedge, 5 - secondary device, g - wall thickness, β - angle between the ultrasonic wave path and perpendicular to internal pipe surface, β_1, β_4 - refraction and incidence angles, respectively, of the ultrasonic wave in the wall, β_2, β_3 - refraction and incidence angles, respectively, of the ultrasonic wave in the wall, l_1, l_4 - length of the ultrasonic wave paths in the wedges, l_2, l_3 - length of the ultrasonic wave path in the wall, c_1, c_4 - ultrasonic wave velocities in the wedges, c_2, c_3 - ultrasonic wave velocities in the pipe wall

3.4. MODEL MATEMATYCZNY ORGANU POMIAROWEGO PRZEPIŹYWIOMIERZA ULTRADŹWIĘKOWEGO JEDNODROGOWEGO Z GŁOWICAMI NAKŁADANymi NA ŚCIANKĘ

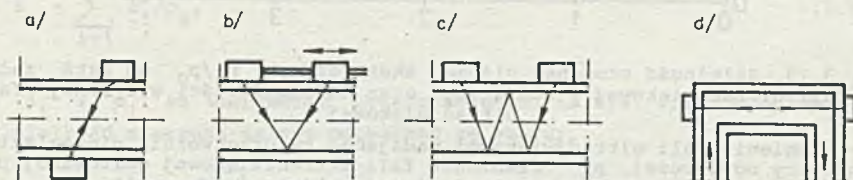
3.4.1. Przebieg fali ultradźwiękowej

Granice ośrodków różniących się prędkością fali ultradźwiękowej mogą być źródłami zarówno fal podłużnych, jak i poprzecznych. Na rys. 3.13 przedstawiono schemat przechodzenia promieni centralnych fali ultradźwiękowej w przepływomierzu z nakładanymi głowicami. Jako drogę fali ultradźwiękowej między przetwornikami piezoelektrycznymi wybiera się tę, dla której stosunek czasu przebiegu w wodzie do czasu przebiegu między przetwornikami będzie jak największy. Warunek ten może być inaczej sformułowany jako wymaganie maksymalnej wartości kąta między promieniem centralnym fali ultradźwiękowej w wodzie a prostopadłą do osi rurociągu.

3.4.2. Dobór parametrów konstrukcyjnych

Najważniejsze parametry konstrukcyjne to konfiguracja organu pomiarowego, kąt nachylenia drogi fali ultradźwiękowej w stosunku do osi rurociągu zależny od rodzaju fali w ścianie (podłużna lub poprzeczna), konstrukcja głowicy i częstotliwość fali ultradźwiękowej. Parametry te mają zarówno wpływ na czułość przepływomierza, jak i na błąd pomiaru [220, 239, 242].

Na rys. 3.14. przedstawiono kilka konfiguracji organu pomiarowego przepływomierza ultradźwiękowego z nakładanymi głowicami.



Rys. 3.14. Konfiguracje organu pomiarowego przepływomierza

a) z jedną drogą w średnicy rurociągu, b) z jedną drogą w średnicy rurociągu i jednym odbiciem od wewnętrznej powierzchni ścianki, c) z jedną drogą w średnicy rurociągu i wielokrotnym wewnętrznym odbiciem, d) z drogą w osi rurociągu

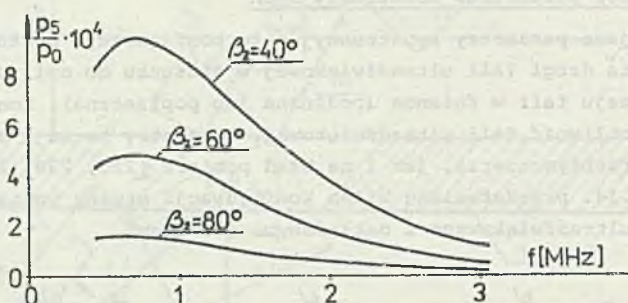
Fig. 3.14. Configurations of the primary devices of ultrasonic flowmeters
a) with a single path in pipe diameter, b) with a single path in pipe diameter and single reflection from internal wall surface, c) with a single path in pipe diameter and multiple internal reflection, d) with a path in the pipe axis

Rozwiązanie przedstawione na rys. 3.14a jest najczęściej spotykane, jednak dla małej średnicy rurociągu różnica czasów jest mała. W rozwiązaniach przedstawionych na rys. 3.14b i 3.14c dzięki odbiciu fali ultradźwiękowej uzyskuje się wydłużenie drogi, jednak maleje energia sygnału odbieranego w porównaniu z rozwiązaniem przedstawionym na rys. 3.14a. Rozwiązanie przed-

stawione na rys. 3.14d bywa stosowane w przypadku małej średnicy rurociągu (do kilkudziesięciu milimetrów) i małej prędkości przepływu wody. Wadami tego rozwiązania jest uzyskiwanie informacji o prędkości v_s na podstawie pomiaru prędkości w osi rurociągu oraz bardzo zniekształcony rozkład prędkości na początku i na końcu organu pomiarowego.

Wprowadzenie fali ultradźwiękowej do ścianki rurociągu stalowego pod takim kątem, aby w niej rozchodziła się tylko fala poprzeczna, daje kąt β około dwa razy większy niż w przypadku, gdy falą biegnącą w ścianie rurociągu byłaby fala podłużna. Zwiększenie kąta β korzystne ze względu na uzyskiwanie jak największej różnicy czasów Δt powoduje zmniejszenie energii fali dochodzącej do odbiornika piezoelektrycznego.

Wymiary przetwornika piezoelektrycznego decydują zarówno o częstotliwości emitowanej fali ultradźwiękowej, jak i o kształcie wiązki (długość pola bliskiego, kąt rozchylenia w polu dalekim).



Rys. 3.15. Zależność stosunku ciśnień akustycznych p_5/p_0 od kąta załamania fali ultradźwiękowej w stali β_2 oraz częstotliwości wysyłanej fali ultradźwiękowej

p_5 - ciśnienie fali ultradźwiękowej padającej na przetwornik piezoelektryczny głowicy odbiorczej, p_0 - ciśnienie fali ultradźwiękowej emitowanej przez przetwornik piezoelektryczny w głowicy nadawczej

Fig. 3.15. Dependence of the acoustic pressure ratio p_5/p_0 on the refraction angle of the ultrasonic wave in steel β_2 and the frequency of the emitted ultrasonic wave

p_5 - ultrasonic wave pressure at the piezoelectric transducer in receiving head, p_0 - ultrasonic wave pressure at the piezoelectric transducer in the emitting head

Na rys. 3.15 przedstawiono wyniki obliczeń stosunku ciśnień akustycznych w zależności od kąta załamania fali poprzecznej w stali oraz częstotliwości przetworników piezoelektrycznych. Obliczenia wykonano dla rurociągu stalowego o średnicy wewnętrznej 0,15 m, grubości ścianki $g = 5$ mm, klinów wykonanych z polimetakrylanu metylu o długości dróg $l_1 = l_4 = 25$ mm.

Z rys. 3.15 wynika, że jeżeli pozwoli na to detekcja w układzie elektronicznym, należy stosować możliwie małe częstotliwości fali ultradźwiękowej, natomiast kąt β_2 należy wybierać w granicach 40° - 60° , aby uzyskać możliwie dużą amplitudę odbieranego sygnału. W przypadku mniejszych średnic ru-

rociągu zmniejszenie energii sygnału jest mniejsze i można stosować większe kąty β_2 w celu uzyskania większej różnicy czasów Δt .

3.4.3. Model matematyczny organu pomiarowego

Różnica czasów przebiegu fali ultradźwiękowej między przetwornikami piezoelektrycznymi w kierunku pod prąd wody t_2 i z prądem wody t_1 będzie wynosiła:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 2 D \operatorname{tg} \beta c^{-2} v_1. \quad (3.71)$$

Dzielenie różnicy czasów Δt przez ich iloczyn nie daje pełnej korekcji wpływu prędkości fali ultradźwiękowej w wodzie c na czułość przepływomierza:

$$\frac{t_2 - t_1}{t_1 \cdot t_2} = \frac{2 l \sin \beta}{(1 + t_r c)^2 - (t_r v_1 \sin \beta)^2} \cdot v_1, \quad (3.72)$$

gdyż w przypadku małych średnic rurociągów nie można pominąć wyrażenia $t_r c$ w porównaniu z 1. Czas t_r jest sumą czasów przebiegu fali ultradźwiękowej w ścianie rurociągu i głowicach:

$$t_r = \sum_{i=1}^4 l_i / c_i, \quad (3.73)$$

gdzie l_i i c_i są wielkościami przedstawionymi na rys. 3.13. Wobec powyższego wielkość mierzona należy odtwarzać ze wzoru:

$$\dot{V} = \frac{\pi D^3 K}{4 \sin 2\beta} \frac{t_2 - t_1}{(t_1 - t_r)(t_2 - t_r)}, \quad (3.74)$$

przy czym czas t_r jest wprowadzony jako stała wartość podczas wzorcowania przetwornika pomiarowego przepływomierza.

3.5. MODELE MATEMATYCZNE ORGANÓW POMIAROWYCH PRZEPŁYWOMIERZY ULTRADŹWIEKOWYCH WIELODROGOWYCH Z GŁOWICAMI ZAINSTALOWANYMI W ŚCIANCE RUROCIĄGU

3.5.1. Wstęp

Szczegółowa analiza błędów przepływomierza ultradźwiękowego jednodrogowego pokazała, że względne błędy liniowości mogą osiągać wartość do 4% dla przepływów burzliwych i do 20% dla przepływów uwarstwionych [225]. Najwięk-

sze błędy nieliniowości występują dla rury hydraulicznie gładkiej i są tym mniejsze, im większa jest chropowatość rurociągu. W praktyce stosowania przepływomierzy ultradźwiękowych nie zawsze chropowatość wewnętrznej strony ścianki rurociągu jest znana. Może się też zmienić w czasie eksploatacji. Znacznie większe błędy mogą być spowodowane deformacją rozkładu prędkości w stosunku do rozkładu osiowo-symetrycznego.

W celu zmniejszenia tych błędów stosuje się umiejscowienie dróg przesunięte względem osi rurociągu [48, 103, 194]; bardziej częste jest stosowanie kilku dróg równoległych [1, 6, 230]. Firmy produkujące przepływomierze podają geometrię położenia dróg bez uzasadnienia, natomiast zalecane odległości między drogami podane w literaturze [1, 6] nie pokrywają się ze sobą. Istnieje więc potrzeba całościowego ujęcia zagadnienia doboru liczby dróg oraz ich rozmieszczenia.

3.5.2. Model matematyczny organu pomiarowego

Drogi w przekroju rurociągu rozmieszcza się tak, aby były równoległe do siebie, co przedstawiono na rys. 3.16. Strumień objętości wyznacza się ze wzoru:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^N S_i K_{1i} v_{1i}, \quad (3.75)$$

przy czym wielkości K_{1i} są współczynnikami czułości definiowanymi następująco:

$$K_{1i} = v_{si}/v_{1i}, \quad (3.76)$$

gdzie: v_{si} - prędkość średnia w i -tym pasie, v_{1i} - prędkość średnia w i -tej drodze.

Wielkością wyjściową organu pomiarowego są czasy przelotu fali ultradźwiękowej t_{1i} , t_{2i} zależne od prędkości średnich v_{1i} . Alternatywnymi równaniami odtwarzania wielkości mierzonej w stosunku do wzoru (3.75) są:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^N w_i v_{1i}, \quad (3.77)$$

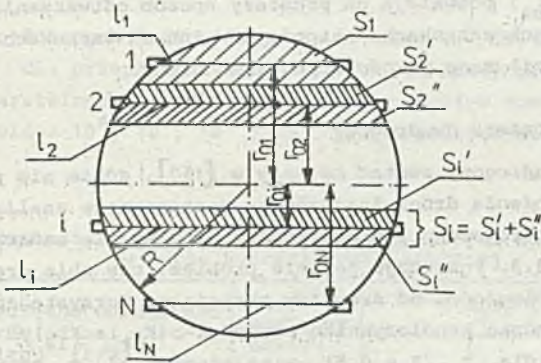
gdzie: w_i - współczynnik wagi,

$$\dot{V} = \sqrt{L}^2 K_p v_p, \quad (3.78)$$

gdzie: v_p wyznacza się ze wzoru:

$$v_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{l_i} \int_0^{l_i} v_i(x_i) dx_i, \quad (3.79)$$

natomiast K_p jest współczynnikiem czułości i $K_p = v_s/v_p$.



Rys. 3.16. Schemat organu pomiarowego przepływomierza N-drogowego

S_i - pole powierzchni i-tego pasa, w którym znajduje się i-ta droga, S'_i, S''_i - pola powierzchni części i-tego pasa leżących po obu stronach i-tej drogi, r_{0i} - odległość i-tej drogi od średnicy rurociągu, l_i - długość i-tej drogi

Fig. 3.16. Diagram of the primary device in an N-path flowmeter

S_i - surface area of the i-th strip containing i-th path, S'_i, S''_i - surface areas of the parts of i-th strip at both sides of i-th path, r_{0i} - distance of i-th path from pipe diameter, l_i - length of i-th path

3.5.3. Dobór liczby dróg i ich rozmieszczenie

3.5.3.1. Zasady ogólne

Im większa liczba dróg, tym wskazanie przepływomierza będzie lepiej odpowiadało wartości wielkości mierzonej zarówno dla warunków normalnych (osiowo-symetrycznego rozkładu prędkości), jak i w przypadku zniekształconych profili prędkości. Zwiększenie liczby dróg wiąże się ze wzrostem kosztów przepływomierza i stosowanie liczby dróg większej niż pięć jest niecelowe.

Wobec braku zaleceń dotyczących wyboru położenia dróg można kierować się wskazaniem, jakie są podawane dla wyboru miejsc pomiaru prędkości miejscowej w celu obliczenia całkowitego strumienia objętości w rurociągach. Zalecenia podane w [146, 234] w niewielkim stopniu różnią się między sobą, natomiast w normie ISO [80] podano zakresy możliwych zmian promieni, dla których dokonuje się pomiarów miejscowych zaznaczając, że wybór miejsc pomiaru zależy od metody całkowania.

Przeprowadzona analiza działania przepływomierza w różnych warunkach pozwala na dobór położenia dróg. Drogi należy tak wybierać, aby dzieliły na połowy jednakowe pola powierzchni ($S_1 = S_2$), na które dzieli się całą powierzchnię rurociągu, to znaczy $S_1' = S_1''$ (rys. 3.16). Inne sposoby umiejscowienia dróg (takie, aby $v_{1i} = v_{si}$ lub aby prędkości średnie po drodze dla przepływu uwarstwionego v_{lu1} były równe prędkościom średnim dla przepływu burzliwego v_{lbi}) pozwalają na prostszy sposób odtwarzania wielkości mierzonej \dot{V} w pewnych warunkach, natomiast w innych warunkach (zniekształcony rozkład prędkości) mogą powodować większe błędy.

3.5.3.2. Przepływomierz dwudrogowy

Przepływomierz dwudrogowy został opisany w [117], gdzie nie podano jednak uzasadnienia położenia dróg. Znajduje tu zastosowanie analiza dotycząca przepływomierza jednodrogowego z drogą wzdłuż cieciny nie będącą średnicą zawarta w punkcie 3.3.3. Pozostaje jedynie problem, czy obie drogi winny być w takiej samej odległości od średnicy rurociągu. Korzystając z rys. 3.12, obliczono wartość średnią współczynnika czułości $(K_{11} + K_{12})/2$ (K_{11} dla $r_{01}/R = 0,4$ i K_{12} dla $r_{02}/R = 0,5$) w zależności od m od wartości $m=2$ (przepływ uwarstwiony) do wartości $m=12$ i okazało się, że maksymalna różnica między wartościami wynosi 0,03, natomiast dla symetrycznego rozmieszczenia dróg ($r_{01}/R = r_{02}/R = 0,45$) różnica ta wynosi 0,035. Dla zniekształconego rozkładu prędkości wyrażonego wzorem:

$$v = v_m \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^m\right) - k \frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right) \sin \psi, \quad (3.80)$$

rozmieszczenie symetryczne dróg zapewnia kompensację wpływu zniekształcenia, natomiast rozmieszczenie niesymetryczne, to znaczy dla $r_{01}/R = 0,4$ i $r_{02}/R = 0,5$, powoduje błąd tym większy, im większa będzie wartość współczynnika k we wzorze (3.80).

3.5.3.3. Przepływomierz trójdrogowy oraz przepływomierze więcej drogowo

W przypadku stosowania trzech dróg jedną drogę należy umiejscowić w średnicy rurociągu, natomiast dwie pozostałe symetrycznie względem średnicy i równoległe do drogi środkowej, przy czym $S_1' = S_1''$ oraz $S_2' = S_2''$.

Dla organów cztero- i więcej drogowych drogi rozmieszcza się równoległe do siebie tak, aby $S_1 = S_2$ oraz $S_1' = S_1''$. W tabelicy 3.1 przedstawiono odległości dróg dla przepływomierzy wielodrogowych oraz błędy dla rury hydraulicznie gładkiej, to znaczy dla przypadku, gdy wartość K zmienia się wraz ze zmianą liczby Re bardziej niż dla rury o powierzchni chropowatej. Maksymalny błąd względny dla przepływu burzliwego wyznacza się ze wzoru:

$$\delta_m = (K_{p1} - K_{p2})/K_{p2}, \quad (3.81)$$

przy czym wartość K_{p1} wyznaczana jest ze wzoru (3.78) i K_{p1} oznacza wartość K_p dla $Re = 10^7$, natomiast K_{p2} wartość K_p dla $Re = 10^4$. Błąd $\delta_{50\%}$ określono jako błąd spowodowany zmniejszeniem się strumienia objętości o 50% w stosunku do wartości przyjętej jako nominalna. Za nominalne strumienie objętości przyjęto takie, dla których liczba Re wynosi $10^4, 10^5, 10^5, 10^7$. Przyjęto, że rozkład prędkości opisywany jest wzorem (3.6).

Dla dróg położonych według danych w tabelicy 3.1 obliczono wartość współczynnika K_p dla przepływu uwarstwionego oraz błędy przepływomierza dla przepływu uwarstwionego przy założeniu, że przepływ nominalny odpowiada liczbom Reynoldsa $10^4, 10^5, 10^6$ i 10^7 , a K_p wyznacza się ze wzoru (3.78).

Tabela 3.1

Rozmieszczenie dróg i błędy dla przepływu burzliwego w rurze hydraulicznie gładkiej

Liczba dróg	Względne odległości dróg od osi rurociągu $[r/R]$	Błąd względny maksymalny δ_m [%]	$\delta_{50\%}$ [%] dla $Re =$			
			10^4	10^5	10^6	10^7
1	0	3,63	0,64	0,47	0,30	0,20
2	- 0,4040	2,17	0,47	0,27	0,18	0,11
3	0 0,5533	1,30	0,36	0,15	0,11	0,05
4	- 0,1977 0,6347	1,20	0,21	0,15	0,10	0,07
5	0 0,3197 0,6871	1,01	0,16	0,12	0,08	0,06

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelicy 3.2

Tabela 3.2

Błędy dla przepływu uwarstwionego w zależności od liczby dróg

Liczba dróg	Wartość K_p	Błędy względne w [%] przy wzorcowaniu dla liczby Re			
		10^4	10^5	10^6	10^7
1	0,75	23,7	25,9	27,3	28,2
2	0,8530	16,5	17,7	18,5	19,1
3	1,0675	-7,3	-6,8	-6,4	-6,1
4	1,0688	-6,4	-5,5	-5,5	-5,3
5	1,0038	-0,4	0,1	0,4	0,6

3.5.3.4. Podsumowanie

- 1) Jak wynika z danych przedstawionych w tabelicy 3.1, błędy przepływomierza maleją wraz z liczbą dróg i dla przepływomierza czterodrogowego osiągają wartości zadowalające w praktycznych zastosowaniach (to znaczy w przypadku przepływu burzliwego).

- 2) Jak wynika z danych zawartych w tabelicy 3.2, w przypadku przepływomierza pięciodrogowego błąd wynikający ze zmiany współczynnika kształtu rozkładu prędkości jest znikomy, a więc przepływomierz tego typu może być stosowany do pomiaru strumienia objętości dla każdej strefy przepływu.
- 3) Optymalizacja położenia dróg (symetrycznie położonych względem średnicy) już dla przepływomierza dwudrogowego i przepływu burzliwego pozwala zmniejszyć błędy do wartości pomijalnie małych [210]. Stosunek odległości drogi r od średnicy do promienia R winien wynosić około 0,56 i wtedy różnica między wartościami K_1 dla $Re = 10^7$ i dla $Re = 10^4$ wyniesie zero.

Re	r/R	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
10 ⁴	0,56	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
10 ⁵	0,56	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
10 ⁶	0,56	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
10 ⁷	0,56	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999

Re	r/R	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
10 ⁴	0,56	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
10 ⁵	0,56	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
10 ⁶	0,56	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
10 ⁷	0,56	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999

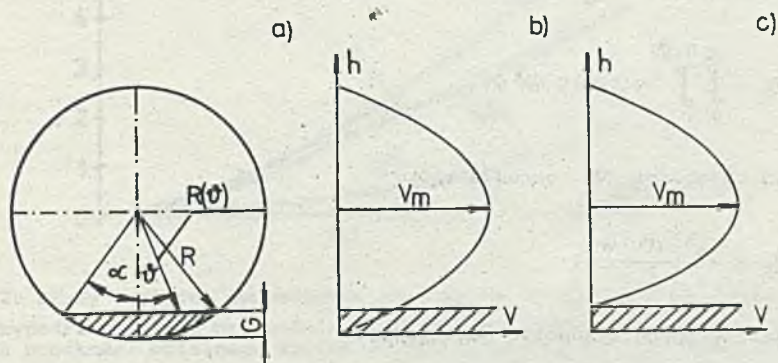
4. MODELE MATEMATYCZNE ORGANÓW POMIAROWYCH PRZEPŁYWIEMIERZY
ULTRADŹWIĘKOWYCH JEDNODROGOWYCH Z GŁOWICAMI WBUDOWANYMI
W ŚCIANKĘ RUROCIĄGU DLA WARUNKÓW ODBIEGAJĄCYCH OD NORMALNYCH

Będą tu przedstawione następujące przypadki: rurociąg częściowo wypełniony osadami, rurociąg o przekroju eliptycznym oraz występowanie zniekształconego rozkładu prędkości.

4.1. RUROCIĄG CZĘŚCIOWO WYPEŁNIONY OSADAMI

4.1.1. Wzory modelujące rozkład prędkości

W celu oszacowania błędów spowodowanych istnieniem osadów na dnie rurociągu autor pracy proponuje wzięcie pod uwagę dwóch skrajnych przypadków: przepływu uwarstwionego oraz przepływu tłokowego. Rozkład prędkości dla przepływu tłokowego $v(r) = \text{const}$ jest rozkładem granicznym. Na rys. 4.1 przedstawiono przekrój rurociągu prostopadły do jego osi oraz pionowy profil prędkości w średnicy rurociągu.



Rys. 4.1. Przekrój poprzeczny rurociągu z osadem i profile prędkości dla przepływu uwarstwionego

G - grubość warstwy osadu, α - kąt wynikający z wysokości warstwy osadu, φ - współrzędna katowa, $R(\varphi)$ - promień wycinka przekroju, w którym są osady

Fig. 4.1. Cross-section of the pipe with the sediment and velocity profiles for laminar flow

G - thickness of layer of the sediment, α - angle resulting from the height of layer of the sediment, φ - angular coordinate, $R(\varphi)$ - radius of cross-section sector, in which are sediments

Profile prędkości przedstawione na rys. 4.1b i 4.1c są profilami granicznymi. Rozkład prędkości dla przypadku przedstawionego na rys. 4.1b wyraża się wzorem:

$$v = v_m (1 - (r/R)^2). \quad (4.1)$$

dla $\vartheta \in \langle \alpha; 2\pi - \alpha \rangle$ oraz $0 \leq r \leq R$

dla $\vartheta \in \langle 0; \alpha \rangle$ lub $\vartheta \in \langle 2\pi - \alpha; 2\pi \rangle$ oraz $0 \leq r \leq (R-G)/\cos\vartheta$.

Dla profilu przedstawionego na rys. 4.1c rozkład prędkości opisuje wzór:

$$v = v_m (1 - (r/R(\vartheta))^2), \quad (4.2)$$

gdzie: $R(\vartheta)$ wyznacza się ze wzoru:

$$R(\vartheta) = (R - G)/\cos\vartheta. \quad (4.3)$$

4.1.2. Błędy względne spowodowane istnieniem osadów

Strumień objętości można wyrazić jako sumę:

$$\dot{V} = \dot{V}_G + \dot{V}_K, \quad (4.4)$$

gdzie: \dot{V}_G - strumień objętości przez trójkąt o podstawie opartej o powierzchnię osadów, \dot{V}_K - strumień objętości w wycinku kołowym.

Strumień objętości \dot{V}_G wyznacza się ze wzoru:

$$\dot{V}_G = \int_0^\alpha \int_0^{R(\vartheta)} v(r, \vartheta) r \, d\vartheta \, dr. \quad (4.5)$$

Strumień objętości \dot{V}_K określa wzór:

$$\dot{V}_K = \frac{v_m R^2 (\pi - \alpha)}{2}, \quad (4.6)$$

gdzie kąt α można wyznaczyć następująco:

$$\alpha = \arccos(1 - G/R). \quad (4.7)$$

Dla rozkładu prędkości opisanego wzorem (4.1), korzystając ze wzorów (4.3), (4.4), (4.5), (4.6) i (4.7), otrzymuje się:

$$\dot{V}_b = \frac{v_m R^2}{2} \left(\pi - \arccos(1 - G/R) + \frac{1 - G/R}{3} \left(1 - \left(1 - \frac{G}{R} \right)^{0,5} \right) \left(3 + \frac{4G}{R} - \frac{2G^2}{R^2} \right) \right). \quad (4.8)$$

Błąd względny będzie wynosił:

$$\delta_b = (\hat{v} - \hat{v}_b) / \hat{v}_b, \quad (4.9)$$

gdzie \hat{v} - odtworzona wartość strumienia objętości na podstawie zmierzonej wartości v_1 .

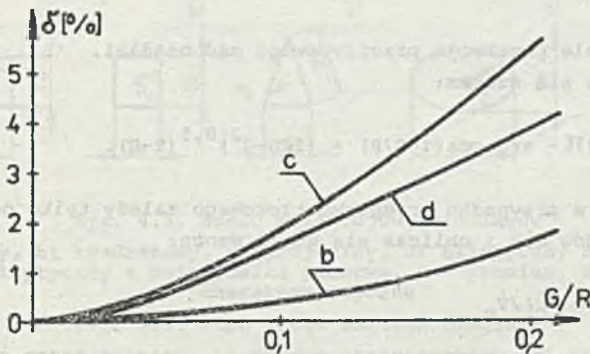
Dla przepływu uwarstwionego w rurociągu bez osadów strumień objętości wynosi:

$$\hat{v} = \frac{v_m \pi R^2}{2}. \quad (4.10)$$

Wstawiając wzory (4.8) i (4.10) do (4.9), otrzymuje się:

$$\delta_b = \frac{\arccos(1-G/R) - \frac{1-G/R}{3} (1-(1-\frac{G}{R})^{2,0,5}) (3 + \frac{4G}{R} - \frac{2G^2}{R^2})}{\pi - \arccos(1-G/R) + \frac{1-G/R}{3} (1-(1-\frac{G}{R})^{2,0,5}) (3 + \frac{4G}{R} - \frac{2G^2}{R^2})} \quad (4.11)$$

Na rys. 4.2 przedstawiono zależności błędu δ_b od względnej wysokości osadów G/R dla praktycznie występującej ich grubości.



Rys. 4.2. Błędy względne spowodowane istnieniem osadów na dnie rurociągu b) w przypadku rozkładu prędkości opisanego wzorem (4.1), c) w przypadku rozkładu prędkości opisanego wzorem (4.2), d) błąd wyrażony wzorem (4.20)

Fig. 4.2. Relative errors caused by the sediment on the pipe bottom b) in the case of velocity distribution described by formula (4.1), c) in the case of velocity distribution described by formula (4.2), d) the error described by formula (4.20)

Dla rozkładu prędkości opisanego wzorem (4.2), korzystając ze wzorów (4.3), (4.4), (4.5), (4.6) i (4.7), otrzymuje się:

$$\dot{V}_C = \frac{v_m R^2}{2} (\pi - \arccos(1-G/R) + (1 - \frac{G}{R}) (1 - (1 - \frac{G}{R})^2)^{0,5}). \quad (4.12)$$

Błąd względny będzie wynosił:

$$\delta_C = (\dot{V} - \dot{V}_C) / \dot{V}_C. \quad (4.13)$$

Wstawiając wzory (4.10) i (4.12) do (4.13), otrzymuje się:

$$\delta_C = \frac{\arccos(1-G/R) - (1-G/R) (1 - (1-G/R)^2)^{0,5}}{\pi - \arccos(1-G/R) + (1-G/R) (1 - (1-G/R)^2)^{0,5}}. \quad (4.14)$$

Wykres błędu δ_C przedstawiono na rys. 4.2.

W przypadku przepływu tłokowego obowiązuje zależność:

$$v(r, \theta) = v_m. \quad (4.15)$$

Strumień objętości będzie określony wzorem:

$$\dot{V}_G = v_m \cdot S_G, \quad (4.16)$$

gdzie: S_G - pole przekroju przepływowego nad osadami.

Pole S_G wyraża się wzorem:

$$S_G = R^2 (\pi - \arccos(1-G/R) + (2RG - G^2)^{0,5} (R-G)). \quad (4.17)$$

Błąd względny w przypadku przepływu tłokowego zależy tylko od wysokości względnej osadów G/R i oblicza się go ze wzoru:

$$\delta_G = (\dot{V} - \dot{V}_G) / \dot{V}_G. \quad (4.18)$$

Podstawiając wzór (4.17) i (4.16) do (4.18), otrzymuje się wzór (4.14), a więc w przypadku przepływu tłokowego błąd względny będzie taki sam jak dla rozkładu prędkości wyrażonego wzorem (4.2). Znając kształt rozkładu prędkości oraz grubość osadów na podstawie pomiaru odległości $2R-G$ np. metodą przedstawioną w [203] (polegającą na pomiarze średnicy wewnętrznej za pomocą ultradźwięków) można skorygować błąd spowodowany istnieniem osadów.

W przypadku gdy dla przepływu uwarstwionego rozkład prędkości nie jest znany i np. założony zostanie jego kształt jak na rys. 4.1c, a rozkład rzeczywisty będzie rozkładem granicznym przedstawionym na rys. 4.1b, to błąd względny będzie wynosił:

$$\delta_d = (\dot{V}_b - \dot{V}_c) / \dot{V}_c. \quad (4.19)$$

Po podstawieniu do wzoru (4.19) wzorów (4.8) i (4.12) otrzymuje się:

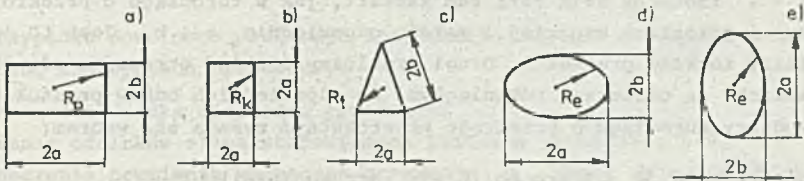
$$\delta_d = \frac{\frac{2}{3} \frac{G}{R} (1 - \frac{G}{R}) (1 - (1 - \frac{G}{R})^2)^{0,5} (2 - \frac{G}{R})}{\pi - \arccos(1 - \frac{G}{R}) + (1 - \frac{G}{R}) (1 - (1 - \frac{G}{R})^2)^{0,5}} \quad (4.20)$$

Wykres błędu δ_d przedstawiono na rys. 4.2.

4.2. RUROCIĄGI O PRZEKROJACH ODBIEGAJĄCYCH OD KOŁOWEGO

4.2.1. Wprowadzenie

Rurociągi o przekrojach odbiegających od kołowego stanowią niewielki ułamek procentu wszystkich rurociągów występujących w praktyce. W literaturze można spotkać takie przypadki, jednak autorzy nie podają wzorów opisujących rozkład prędkości. Proponowane niżej wzory pozwolą na sformułowanie modeli matematycznych organów pomiarowych w poszczególnych przypadkach. Na rys. 4.3 przedstawiono szkice różnych przekrojów rurociągów z zaznaczeniem wymiarów charakterystycznych.



Rys. 4.3. Szkic przekrojów rurociągów

a) prostokątny, b) kwadratowy, c) trójkątny, d) eliptyczny z osią wielką poziomą, e) eliptyczny z osią wielką pionową, R - promień, a, b - wymiary charakterystyczne

Fig. 4.3. Pipe cross section diagrams

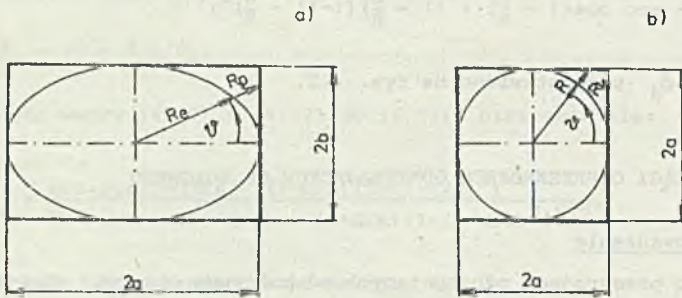
a) rectangular cross-section, b) square cross-section, c) triangular cross-section, d) elliptic with horizontal major axis, e) elliptic with vertical major axis, r - radius, a, b, - characteristic dimensions

4.2.2. Opisy rozkładów prędkości

W literaturze są przedstawione przebiegi izotach dla różnych kształtów przekrojów poprzecznych rurociągów. Z przebiegu tych izotach widać, że leżą one między izotachami dla rozkładów granicznych, określonych w pkt. 3.1.4. Dla rurociągu o przekroju prostokątnym, którego szkic przekroju przedstawiono na rys. 4.4a, autor proponuje następujący wzór opisujący rozkład prędkości:

$$v = v_m (1 - A(r/R_e)^m - (1 - A)(r/R_p)^m), \quad (4.21)$$

gdzie: v_m - prędkość maksymalna w osi rurociągu prostokątnego, R_e - promień wodzący elipsy wpisanej w prostokąt, R_p - promień wodzący protokąta, A - współczynnik decydujący o kształcie izotach.



Rys. 4.4. Szkic przekroju rurociągu

a) przekrój prostokątny, b) przekrój kwadratowy, ϑ - współrzędna kątowa

Fig. 4.4. Pipe cross-section diagrams

a) rectangular cross-section, b) square cross-section, ϑ - angular coordinate

Dla $A = 1$ izotachy mają taki sam kształt, jak w rurociągu o przekroju eliptycznym i półosiach wielkiej i małej, odpowiednio a i b . Jest to jeden graniczny rozkład prędkości. Drugi graniczny rozkład otrzymuje się dla $A = 0$, izotachy są odcinkami równoległymi do odpowiednich boków prostokąta. Promień wodzący rurociągu o przekroju prostokątnym wyraża się wzorem:

$$R_p = a / |\cos \vartheta| \quad \text{dla } \vartheta \in (-\arctan(b/a); +\arctan(b/a)) \text{ i } \vartheta \in (\pi - \arctan(b/a); \pi + \arctan(b/a)),$$

$$R_p = b / |\sin \vartheta| \quad \text{dla } \vartheta \in (\arctan(b/a); \pi - \arctan(b/a)) \text{ i } \vartheta \in (\pi + \arctan(b/a); -\arctan(b/a)). \quad (4.22)$$

O ile prostokąt jest kwadratem, to:

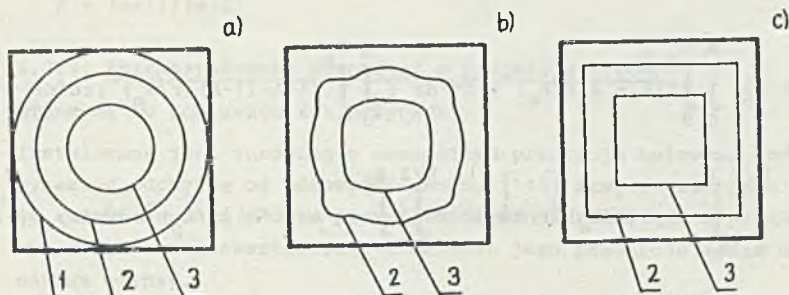
$$v = v_m (1 - A(r/a)^m - (a - A)(r/R_k)^m), \quad (4.23)$$

gdzie:

$$R_k = a / |\cos \vartheta| \quad \text{dla } \vartheta \in (-\pi/4; +\pi/4) \text{ i } \vartheta \in (3\pi/4; +5\pi/4),$$

$$R_k = a / |\sin \vartheta| \quad \text{dla } \vartheta \in (\pi/4; +3\pi/4) \text{ i } \vartheta \in (5\pi/4; +7\pi/4). \quad (4.24)$$

Na rys. 4.5 przedstawiono wyniki obliczeń izotach dla $m=2$ (przepływ uwarstwiony) i $A = 0,5$ oraz rozkłady graniczne w rurociągu o przekroju kwadratowym.



Rys. 4.5. Izotachy w przekroju kwadratowym

a) i c) - dla rozkładów granicznych, b) dla $m = 0$ i $A = 0,5$ według wzoru (4.23): 1 - $v/v_m = 0$; 2 - $v/v_m = 0,4$; 3 - $v/v_m = 0,8$

Fig. 4.5. Equal velocity lines in square profile

a) and c) for limiting distributions, b) for $m = 0$ and $A = 0,5$ according to formula (4.23): 1 - $v/v_m = 0$, 2 - $v/v_m = 0,4$, 3 - $v/v_m = 0,8$

W przypadku dowolnego przekroju trójkątnego rozkład prędkości modeluje się według następującej procedury:

- 1) wyznaczenie środka ciężkości przekroju,
- 2) wpisanie odcinków elips stanowiących izotachę graniczną, $v=0$,
- 3) wyznaczenie promienia wodzącego przekroju R_t , czyli odległości punktów na obwodzie trójkąta od środka ciężkości trójkąta.
- 4) opis wzorem o postaci jak wzór (4.21), przy czym zamiast R_p wprowadza się wartość R_t , natomiast wartość R_e będzie zależała od aproksymowanego odcinka elipsy.

Dla rurociągu o przekroju trójkąta równobocznego o długości boku $2a$ promień $R_t = a/3^{0,5}$.

Dla przekroju poprzecznego będącego elipsą rozkład prędkości będzie określony wzorem:

$$v = v_m (1 - (r/R_e)^m), \quad (4.25)$$

gdzie:

$$R_e = \frac{b}{(1 - (1 - b^2/a^2) \cos^2 \varphi)^{0,5}} \quad (4.26)$$

4.2.3. Modele matematyczne organu pomiarowego

Dla przekroju prostokątnego średnia po przekroju prostokąta prędkość v_s wyraża się wzorem:

$$v_s = \frac{v_m}{ab} \int_0^\alpha \int_0^{R_e} (A - A(r/R_e)^m) r d\vartheta dr + \int_0^\alpha \int_0^{R_p} (1-A - (1-A)(r/R_p)^m) r d\vartheta dr + \int_0^{\pi/2} \int_0^{R_e} (A - A(r/R_e)^m) r d\vartheta dr + \int_0^{\pi/2} \int_0^{R_p} (1-A - (1-A)(r/R_p)^m) r d\vartheta dr, \quad (4.27)$$

gdzie: $\alpha = \arctg(b/a)$.

Po wykonaniu całkowania otrzymuje się:

$$v_s = \frac{m v_m}{m+2} \left(1 - A + \frac{\pi A}{4} \right). \quad (4.28)$$

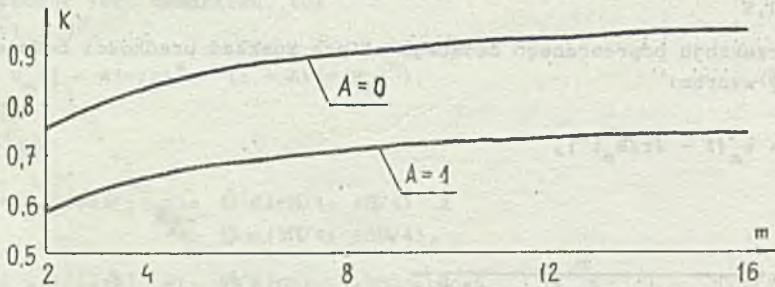
W przypadku horyzontalnego umiejscowienia drogi, to znaczy wzdłuż osi $2a$:

$$v_1 = v_m^{m/(m+1)}. \quad (4.29)$$

Podstawiając (4.28) i (4.29) do (3.54), otrzymuje się:

$$K = \frac{m+1}{m+2} \left(1 - A + \frac{\pi A}{4} \right). \quad (4.30)$$

Na rys. 4.6 przedstawiono zależność $K(m)$ dla granicznych kształtów rozkładu prędkości.



Rys. 4.6. Zależność $K(m)$ dla $A = 1$ i $A = 0$

Fig. 4.6. Relationship $K(m)$ for $A = 1$ and $A = 0$

Dla rurociągu o przekroju eliptycznym niezależnie od kąta między drogą fali ultradźwiękowej a osią wielką 2a współczynnik kształtu rozkładu prędkości wyznacza się ze wzoru:

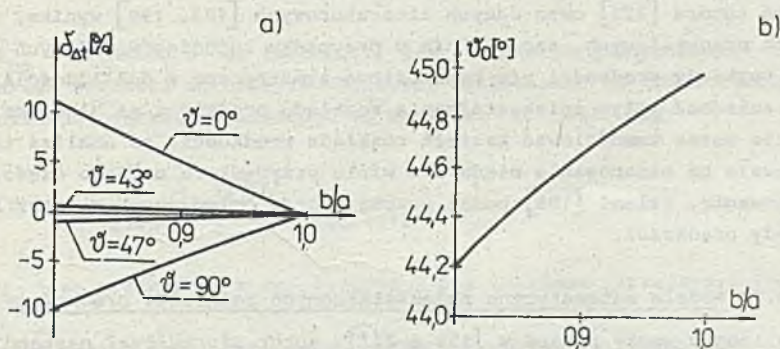
$$K = (m+1)/(m+2) \quad (4.31)$$

4.2.4. Zniekształcenie rurociągu o przekroju kołowym

Brane są tu pod uwagę dwa przypadki:

- 1) instalowany jest rurociąg o nominalnym przekroju kołowym, który jednak wykazuje odchyłkę od kołowości (norma [145] zawiera wartości tolerancji);
- 2) po zainstalowaniu głowic przepływomierza na rurociągu o przekroju kołowym ulega on zniekształceniu i kształt jego przekroju można opisać równaniem elipsy.

W publikacjach [209, 222] podano wzory opisujące promień rurociągu odkształconego, rozkłady prędkości dla przepływu uwarstwionego i burzliwego oraz błąd związany ze zniekształceniem przekroju. Z rysunku podanego w [222] widać, że przebieg błędu w funkcji kąta instalowania głowic jest funkcją okresową i dla $b/a = 0,95$ błąd osiąga maksymalną wartość wynoszącą 2,5% dla kątów $\psi = 0, \pi/2$ i π . Na rys. 4.7 przedstawiono zależność błędu względnego różnicy czasów Δt oraz kąta instalowania głowic ψ_0 od wartości stosunku b/a . Kąt ψ_0 jest kątem, dla którego błąd wynosi zero. Dla maksymalnej odchyłki od kołowości dopuszczonej normą [145] i zainstalowaniu głowic tak, że kąt $\psi = 0^\circ$, składowa błędu przepływomierza spowodowana



Rys. 4.7. Wpływ stosunku długości półosi małej b do wielkiej a na a) błąd względny przepływomierza w przypadku różnych kątów zainstalowania głowic, b) kąt ψ_0 zainstalowania głowic, dla którego błąd względny spowodowany odkształceniem rurociągu wynosi 0

Fig. 4.7. Influence of the ratio of minor semi-axis b to major semi-axis a on

a) relative error of the flowmeter in case of different mounting angles of the heads, b) angle ψ_0 of head mounting for which the relative error due to pipe deformation is 0

zniekształceniem będzie wynosiła +0,84%. Dysponując narzędziem pomiarowym pozwalającym wyznaczyć promień krzywizny rurociągu w funkcji kąta ψ , można instalując głowice w odpowiednim miejscu błąd ten zmniejszyć do około 0,1%. Jeżeli instalacja jest utrudniona, można rzeczywistą odległość między głowicami wprowadzić do równania odtwarzania wielkości mierzonej, co również zapewni wystarczające zmniejszenie błędu. Dla niewielkich zniekształceń ($b/a > 0,95$) kąt ψ_0 powinien wynosić od $44,8^\circ$ do 45° (rys. 4.7b). Podczas instalowania głowic należy liczyć się z błędem rzędu $\pm 2^\circ$, co daje błąd nie większy niż 0,2%, a więc nie mający istotnego wpływu na błąd całkowity.

4.3. ZNIEKSZTAŁCONY ROZKŁAD PRĘDKOŚCI

4.3.1. Wprowadzenie

Przez zniekształcony rozkład prędkości rozumie się:

- rozkład, który nie jest osiowo-symetryczny,
- rozkład osiowo-symetryczny, ale o zmiennych parametrach wzdłuż odcinka pomiarowego (to znaczy w odcinku rurociągu między miejscami zainstalowania głowic),
- rozkład osiowo-symetryczny o stałych parametrach wzdłuż odcinka pomiarowego, ale nie spełniający następującego warunku:

$$v(r_1) \geq v(r_2), \quad (4.32)$$

dla każdej pary promieni r_1 i r_2 , przy czym $r_1 < r_2$.

Z badań autora [225] oraz danych literaturowych [183, 199] wynika, że w warunkach przemysłowych, szczególnie w przypadku rurociągów o dużych średnicach, rozkłady prędkości nie będą osiowo-symetryczne z dokładnością pozwalającą zaniedbać wpływ zniekształcenia rozkładu prędkości na błąd pomiaru.

O ile można zamodelować kształt rozkładu prędkości, to analiza teoretyczna pozwala na oszacowanie błędu i w wielu przypadkach na jego częściowe skorygowanie. Salami [158] podał szereg wzorów opisujących zniekształcone rozkłady prędkości.

4.3.2. Modele matematyczne zniekształconych rozkładów prędkości

Analizując wzory podane w [158 i 222], autor sformułował następujące właściwości wzorów opisujących zniekształcone rozkłady prędkości:

- 1) Maksymalna prędkość nie musi być w osi rurociągu.
- 2) Prędkość jest sumą dwóch składowych:

$$v(r, \psi) = v_1(r) + v_2(r, \psi), \quad (4.33)$$

przy czym $v_1(r)$ opisuje osiowo-symetryczny nie zniekształcony rozkład prędkości, natomiast $v_2(r, \vartheta)$ składową zniekształcającą.

- 3) Składnik $v_2(r, \vartheta)$ we wzorze (4.33) zawiera zwykle czynniki r oraz $(1 - r/R)^k$. Pierwszy czynnik zapewnia zerową składową zniekształcenia w osi rurociągu, natomiast drugi zerową wartość składowej zniekształcenia przy ścianie.
- 4) Składowa $v_2(r, \vartheta)$ zawiera czynnik będący funkcją kąta ϑ , który najbardziej decyduje o zniekształceniu rozkładu prędkości. Funkcja $v_r(r, \vartheta)$ nie może mieć punktów nieciągłości dla żadnej wartości ϑ .

Przykładowo funkcja:

$$v_2(r, \vartheta) = m \left(\frac{r}{R}\right)^a \cdot e^{b\vartheta}, \quad (4.34)$$

gdzie: $\vartheta \in <0; 2\pi>$, nie zapewnia zerowania się prędkości v_2 przy ścianie oraz dla $\vartheta = 0$ występuje punkt nieciągłości pierwszego rodzaju funkcji $v_2(r, \vartheta)$. Przemnożenie funkcji $v_2(r, \vartheta)$ przez czynnik $(1 - r/R)^k$ oraz $\sin\vartheta$ zapewnia fizycznie możliwy kształt rozkładu prędkości.

Autor proponuje następujący wzór opisujący zniekształcony rozkład prędkości:

$$v = v_{om} \left[\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} + 2m \left(1 - \frac{r}{R}\right) \frac{r}{R} \sin\vartheta (\mathbf{1}(\vartheta) - \mathbf{1}(\vartheta - \pi)) + m \left(1 - \frac{r}{R}\right) \frac{r}{R} \sin\vartheta (\mathbf{1}(\vartheta - \pi) - \mathbf{1}(\vartheta - 2\pi)) \right], \quad (4.35)$$

gdzie: v_{om} - prędkość w osi rurociągu, $\mathbf{1}(\vartheta)$ - funkcja jednostkowa.

Warunkiem stałości strumienia objętości niezależnie od stopnia zniekształcenia rozkładu prędkości zależnego od wartości m jest, aby:

$$v_{om} = v_m \frac{12\pi n^2}{12\pi n^2 + m(2n + 1)(n + 1)}, \quad (4.36)$$

gdzie: v_m jest prędkością w osi rurociągu dla rozkładu niezniekształconego ($m = 0$).

Bardziej ogólny wzór, dotyczący zarówno przepływu uwarstwionego ($m=2$), jak i burzliwego, jest następujący:

$$v = v_o \left[\left(1 - \frac{r}{R}\right)^m + a_1 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{k_1} \frac{r}{R} \sin\vartheta (\mathbf{1}(\vartheta) - \mathbf{1}(\vartheta - \pi)) + a_2 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{k_2} \frac{r}{R} \sin\vartheta (\mathbf{1}(\vartheta - \pi) - \mathbf{1}(\vartheta - 2\pi)) \right], \quad (4.37)$$

gdzie: a_1 i a_2 są współczynnikami decydującymi o stopniu deformacji rozkładu, natomiast wykładniki k_1 i k_2 mają wpływ na kształt rozkładu.

Biorąc pod uwagę wymagania dotyczące formy wzoru opisującego zniekształcony rozkład prędkości oraz prostotę jego postaci, autor proponuje następujący model:

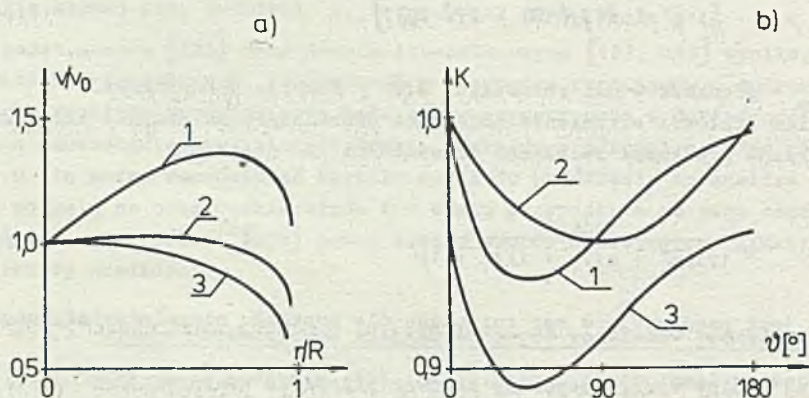
$$v = \left[v_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} + m \frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/k} e^{-a\psi} \sin\psi \right] \quad (4.38)$$

4.3.3. Modele matematyczne organu pomiarowego

Strumień objętości wyznacza się z równania (3.54), w którym współczynnik K decyduje o czułości przepływomierza. Na rys. 4.8a przedstawiono profile prędkości dla rozkładu wyrażonego wzorem (4.38) i wartości $\psi = 180^\circ$. Obliczając v_1 i v_s według wzorów (3.52) i (3.53) i podstawiając do (3.54), otrzymuje się:

$$K = \frac{\frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} + \frac{2k^3 m (1 - e^{-2\pi a})}{\pi(a^2+1)(k+1)(2k+1)(3k+1)}}{\frac{n}{n+1} + \frac{m k^2}{2(k+1)(2k+1)} \sin\psi \left[e^{-a\psi} - e^{-a(\psi+\pi)} \right]} \quad (4.39)$$

Na rys. 4.8b przedstawiono zależność K od kąta zabudowy głowic dla różnych wartości parametrów we wzorze (4.39).



Rys. 4.8. Wpływ zniekształcenia rozkładu prędkości wyrażonego wzorem (4.38) na liczbę kształtu K

a) profil dla $\psi = 90^\circ$, b) zależność $K(\psi)$ dla trzech przypadków: 1 - $n = 10$, $k = 5$, $a = 1$, $m = 1$; 2 - $n = 10$, $k = 5$, $a = 0,1$, $m = 1$; 3 - $n = 5$, $k = 5$, $a = 1$, $m = 1$

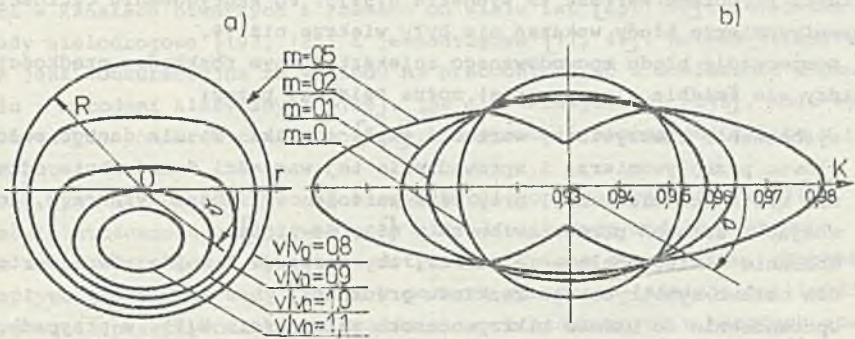
Fig. 4.8. Influence of the distortion of velocity distribution expressed by formula (4.38) on the form factor K

a) profile for $\psi = 90^\circ$, b) relationship $K(\psi)$ in three cases: 1 - $n = 10$, $k = 5$, $a = 1$, $m = 1$; 2 - $n = 10$, $k = 5$, $a = 0,1$, $m = 1$; 3 - $n = 5$, $k = 5$, $a = 1$, $m = 1$

Dla zniekształcenia opisanego wzorem (4.35) i (4.36) wartość K można obliczyć ze wzoru:

$$K = \frac{2(12\pi n^2 + m(n+1)(2n+1))}{\pi[12n + m \sin^2 \psi \cdot (n+1)](2n+1)} \quad (4.40)$$

Dla wartości $n = 10$ i $m = 0,5$ na rys. 4.9a przedstawiono izotachy odpowiadające równaniu (4.35), natomiast na rys. 4.9b wykresy K dla różnych wartości m zgodnie ze wzorem (4.40).



Rys. 4.9. Zniekształcony rozkład prędkości opisany wzorem (4.35)

a) izotachy dla $m = 0,5$; b) zależność liczby kształtu K od położenia głowic dla różnych zniekształceń rozkładu prędkości

Fig. 4.9. Distorted velocity distribution described by formula (4.35)

a) equal velocity lines for $m = 0,5$; b) dependence of the form factor K from the position of the heads: for different cases of distorted velocity distribution

4.3.4. Podsumowanie

Przedstawione powyżej modele zniekształconych rozkładów prędkości są przybliżeniem rozkładów rzeczywistych, których obrazy w formie izotach uzyskano podczas badań doświadczalnych. Zniekształcenie rozkładu prędkości jest przyczyną błędu metody przepływomierza, gdyż rzeczywista wartość współczynnika K jest inna niż założona w równaniu odtwarzania wielkości mierzonej. Np. dla rozkładu opisanego wzorem (4.38) błąd względny będzie wynosił:

$$\delta \dot{v} = \frac{n}{2n+1} \cdot \frac{\frac{n}{n+1} + \frac{mk^2 \sin^2 \psi [e^{-a^2} - e^{-a^2(n^2)}]}{2(k+1)(2k+1)}}{\frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} + \frac{k^3 m (1 - e^{-2\pi a})}{\pi(a^2+1)(k+1)(2k+1)(3k+1)}} - 1. \quad (4.41)$$

Błąd ten zależy zarówno od kąta usytuowania głowic względem średnicy leżącej w osi r układu biegunowego, w którym opisywany jest zniekształcony rozkład prędkości, jak i od parametrów m , a , k charakteryzujących zniekształcenie.

Jak wynika z wykresu przedstawionego w [222], zmiany K w funkcji kąta ψ mogą być rzędu kilkunastu procent i wobec tego można oczekiwać błędów wskazań przepływomierza tego samego rzędu. W trakcie badań przepływomierza UF-311 na rurociągu o średnicy 390 mm [225] stwierdzono niesymetrię osiową rozkładu prędkości. Wyznaczono doświadczalnie wartość współczynnika $K=0,975$, podczas gdy obliczona na podstawie liczby Re i chropowatości względnej ścianki rurociągu wartość ta wynosiła 0,9475. Po skorygowaniu czułości przepływomierza błędy wskazań nie były większe niż 1%.

Kompensację błędu spowodowanego zniekształconym rozkładem prędkości (który nie zmienia się w czasie) można osiągnąć przez:

- 1) wyznaczenie rzeczywistej wartości współczynnika K dla danego położenia głowic przepływomierza i wprowadzenie tej wartości do równania odtwarzania wielkości mierzonej, przy czym wartość v_s można wyznaczyć, korzystając z zaleceń przedstawionych w [53, 54 i 55],
- 2) dobranie takiego położenia głowic, aby wartość K była równa wartości dla osiowo-symetrycznego rozkładu prędkości,
- 3) wprowadzenie do układu mikroprocesora zależności $K(\psi)$ w przypadku zmian strumienia objętości mających istotny wpływ na wartość współczynnika K oraz uwzględnienie wpływu temperatury wody na lepkość, o ile temperatura zmienia się w znaczącym zakresie,
- 4) w przypadku istotnych zmian kształtu rozkładu prędkości w czasie należy stosować organ pomiarowy wielodrogowy.

5. PRZEPLYWOMIERZE ULTRADZWIĘKOWE DLA KANAŁÓW OTWARTYCH

5.1. WPROWADZENIE

Przepływomierze ultradźwiękowe są stosowane do pomiaru strumienia objętości w kanałach otwartych i rzekach od wielu lat [23, 107]. Stosowane są układy wielodrogowe [107, 120] i jednodrogowe [17, 46]. Metoda ultradźwiękowa jest konkurencyjna ze względu na pracochłonność i dokładność w porównaniu z metodami klasycznymi [156], jak i nieklasycznymi [216]. Może być stosowana do pomiarów ciągłych [108], co stanowi istotną jej zaletę w porównaniu z innymi.

Jak wynika z przedstawionej klasyfikacji konfiguracji cieków [214], nie wszędzie stosowanie przepływomierza ultradźwiękowego będzie efektywne. Dlatego autor sformułował wymagania dotyczące odcinka pomiarowego, charakteru przepływu i płynącej wody [214]. W pewnych warunkach istnieje możliwość wzorcowania przepływomierzy ultradźwiękowych stosowanych w kanałach otwartych metodą pośrednią [212].

Próby przeprowadzone w kanale otwartym pozwoliły na sformułowanie wniosków odnośnie do właściwości przepływomierza jednodrogowego [226]. Podjęto prace teoretyczne [219] nad modelem przepływomierza uwzględniającym rozkład prędkości w kanale, gdyż w literaturze brak jest takich modeli.

5.2. MODELE ROZKŁADÓW PRĘDKOŚCI W KANAŁACH OTWARTYCH

Na rys. 5.1 przedstawiono regularny szkic przekroju przepływowego w kształcie, który może być przybliżonym trapezem i zaznaczono charakterystyczne wielkości.

Profil prędkości w płaszczyźnie poziomej najczęściej jest opisywany równaniem Prandtla:

$$v = v_m(h) (1 - 2b/B(h))^{1/n}, \quad (5.1)$$

gdzie: $v_m(h)$ - prędkość maksymalna na danej głębokości h .

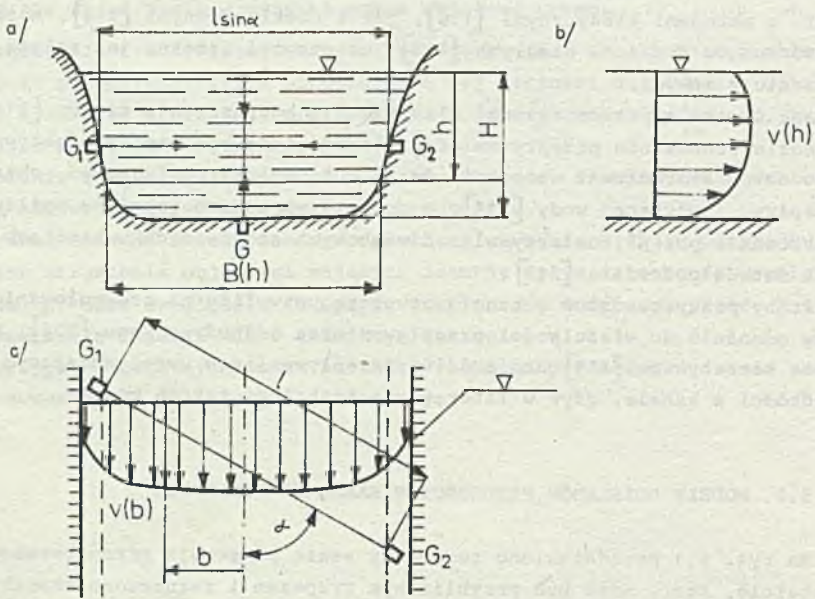
Wyniki pomiarów rozkładu prędkości w rzekach o szerokości przekraczającej kilkanaście i więcej razy głębokość rzeki [35, 167] oraz wyniki badań autora [226] dla kanału o przekroju prostokątnym o szerokości 1,7 m wskazują, że należy stosować wzór bardziej uniwersalny. Autor proponuje wzory o następującej postaci:

$$v = v_m(h) \left(1 - \mathbb{1}(b - B_0(h)) + v_m(h) \left[1 - 2(b - B_0(h)) / (B(h) - 2 B_0(h)) \right]^{1/n} \mathbb{1}(b - B_0(h)) \right), \quad (5.2)$$

gdzie: $B_0(h)$ - odległość od osi kanału stanowiąca granicę, dla której prędkość można uznać za stałą i wynoszącą $v_m(h)$,

$$v = v_m(h) \left(1 - \mathbb{1}(b - B_0(h)) + v_m(h) \left[1 - (2b / (B(h) - 2B_0(h)))^m \right] \mathbb{1}(b - B_0(h)) \right), \quad (5.3)$$

gdzie m jest wykładnikiem potęgowym równym 2 dla przepływu uwarstwionego i kilka lub więcej dla burzliwego.



Rys. 5.1. Szkic przekroju przepływowego w kanale otwartym

a) przekrój kanału, b) pionowy profil prędkości, c) poziomy profil prędkości. G_1, G_2 - głowice do pomiaru prędkości, G - głowica do pomiaru poziomu, l - odległość między środkami powierzchni przetworników piezoelektrycznych emitujących fale ultradźwiękową, α - kąt między drogą fali ultradźwiękowej a osią kanału (na poziomie dna), h - głębokość od poziomu wody, H - wysokość poziomu wody, $B(h)$ - szerokość kanału, b - odległość od osi kanału, $v(h)$ - profil prędkości w pionie, $v(b)$ - profil prędkości w poziomie

Fig. 5.1. Flow section diagram in open channel

a) channel cross-section, b) vertical velocity profile, c) horizontal velocity profile

G_1, G_2 - velocity measuring heads. G - level measuring head, l - distance of the centres of ultrasonic wave emitting surfaces of piezoelectric transducers, α - angle between the ultrasonic path and the channel axis (at the bottom level), h - depth from the water surface, H - water level, $B(h)$ - channel width, b - distance from channel axis, $v(h)$ vertical velocity profile, $v(b)$ - horizontal velocity profile

Istnieje wiele wzorów matematycznych opisujących profil prędkości w kanale w płaszczyźnie pionowej [24, 179, 198, 238]. Powszechnie używany jest wzór Bazina [179, s. 72, 198, s. 303]:

$$v_m(h) = v_m - mH^{-2} (h - h_0)^2 (JH)^{0,5}, \quad (5.4)$$

gdzie: v_m - prędkość maksymalna (na powierzchni wody, gdy $h_0 = 0$ lub pod powierzchnią na głębokości h_0), m - współczynnik eksperymentalny zależny od chropowatości kanału, J - spadek hydrauliczny.

Wzór Hagena [179, s. 72] modeluje rozkład prędkości parabolą o osi pionowej:

$$v_m(h) = v_d + (v_m - v_d)((H - h)/H)^{0,5}, \quad (5.5)$$

gdzie: v_d jest prędkością na dnie kanału.

Aproksymacja profilu prędkości elipsą prowadzi do wzoru:

$$v_m(h) = v_d + a(1 - h^2/b^2)^{0,5}, \quad (5.6)$$

gdzie: a , b - półosie elipsy, $a + v_d = v_m$, $b = H$.

Na podstawie jednego ze wzorów (5.4), (5.5) i (5.6) oraz wzoru (5.2) lub (5.3) otrzymuje się model matematyczny rozkładu prędkości. Profile pionowe uzyskane doświadczalnie [35, 96, 187] różnią się znacznie między sobą i stąd postać wzoru nie może być ustalona jednoznacznie [39, s. 13].

Maksymalna prędkość leży zwykle w odległości 0,05 H do 0,25 H od powierzchni wody, przy czym w kanale wąskim i głębokim maksimum to leży głębiej i jest bardziej wyraźne dla większej chropowatości dna kanału [35, s. 25] oraz dla większej prędkości średniej [39, 187].

Badania doświadczalne wykonane przez autora wskazują, że dobrą aproksymację profilu prędkości w pionie daje wzór Bazina dla h_0/H równego w przybliżeniu 0,1.

5.3. PRZEPŁYWOMIERZE JEDNODROGOWE

5.3.1. Wprowadzenie

Przepływomierze ultradźwiękowe są stosowane do pomiaru strumienia objętości wody w kanale turbiny wodnej [190, 191], w rzekach [68, 71, 73, 106, 167] oraz do pomiaru przepływu ścieków [175]. Opiswany jest również przepływomierz ultradźwiękowy stosowany w rurociągu o przekroju kołowym niecałkowicie wypełnionym wodą [200].

Najczęściej głowice są zainstalowane na stałe na jednym poziomie. Spotyka się też rozwiązania z ruchomymi głowicami [73], w których dzięki integracji rozkładu prędkości uzyskuje się dobrą dokładność [167].

5.3.2. Model matematyczny organu pomiarowego przepływomierza z nieruchomą drogą równoległą do powierzchni wody

W [219, s. 302] wyprowadzono model matematyczny przepływomierza z pomiarem różnicy czasów w przetworniku pomiarowym:

$$\dot{V} = \frac{K(h) \int_0^H B(h) dh}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_1 \cdot t_2}, \quad (5.7)$$

gdzie: całka w liczniku jest powierzchnią pola przepływowego kanału, natomiast czasy t_1 i t_2 są czasami przelotu fali ultradźwiękowej między głowicami w kierunku z prądem wody i pod prad wody.

Całkując równanie opisujące rozkład prędkości po drodze fali ultradźwiękowej, otrzymuje się prędkość v_1 , natomiast po scałkowaniu po przekroju prędkość v_s . Stosunek v_s/v_1 stanowi współczynnik czułości i zależy od położenia drogi fali ultradźwiękowej.

Dla rozkładu prędkości opisanego wzorami (5.1) lub (5.2) lub (5.3) i wzorem (5.4) otrzymuje się:

$$K_1 = \frac{v_m - mH^{-2} (JH)^{0,5} (H^2/3 - h_0 H + h_0^2)}{v_m - mH^{-2} (JH)^{0,5} (h - h_0)^2}, \quad (5.8)$$

a więc wartość K_1 zależy od położenia głowic i dla $K_1 = 1$ otrzymuje się wzór na obliczenie głębokości, na której zmierzona prędkość v_1 jest równa średniej v_s :

$$h_1 = h_0 + (H^2/3 - Hh_0 + h_0^2)^{0,5}. \quad (5.9)$$

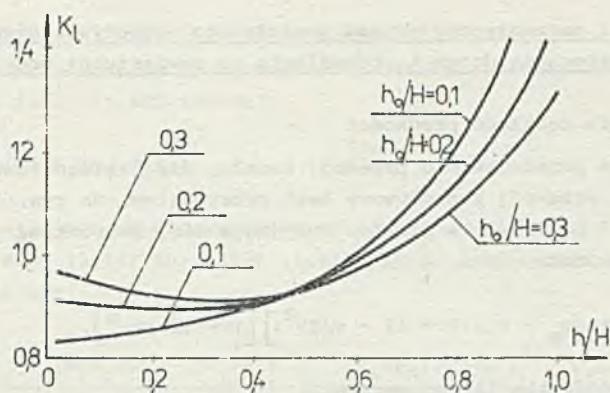
Na rys. 5.2 przedstawiono funkcję $K_1(h/H)$ dla $v_m = 1$ m/s, $m = 20$, $J = 0,001$, $H = 1$ m.

Dla rozkładu prędkości wyrażonego wzorami (5.1) lub (5.2) lub (5.3) i wzorem (5.5) otrzymuje się:

$$K_1 = \frac{2 v_m + v_d}{3(v_d + (v_m - v_d)(1 - h/H)^{0,5})}. \quad (5.10)$$

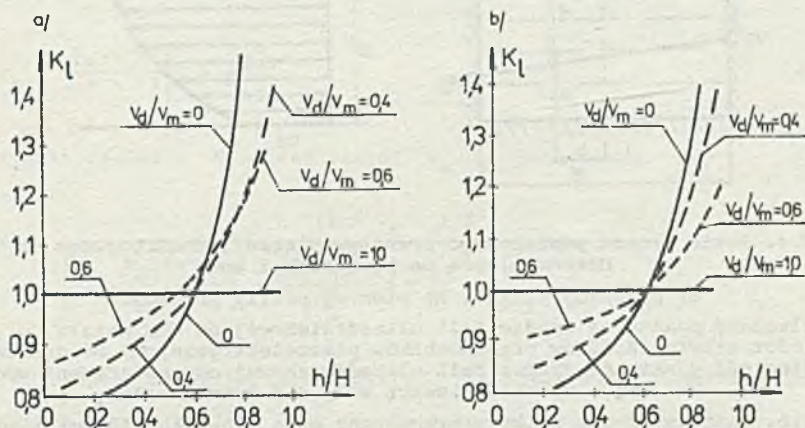
Wyniki obliczeń $K_1(v_d/v_m)$ przedstawiono na rys. 5.3a.

W przypadku rozkładu prędkości wyrażonego wzorami (5.1) lub (5.2) lub (5.3) i wzorem (5.6) otrzymuje się następującą postać $K_1(v_d/v_m)$ przedstawioną na rys. 5.3b:



Rys. 5.2. Zależność $K_1(h/H)$ według wzoru (5.8)

Fig. 5.2. Relationship $K_1(h/H)$ according to formula (5.8)



Rys. 5.3. Zależność $K_1(v_d/v_m)$ według wzoru

a) (5.10), b) (5.11)

Fig. 5.3. Relationship $K_1(v_d/v_m)$

a) according to formula (5.10), b) according to formula (5.11)

$$K_1 = \frac{4 v_d/v_m + \pi(1 - v_d/v_m)}{4(v_d/v_m + (1 - v_d/v_m)(1 - (h/H)^2)} \quad (5.11)$$

Wyniki obliczeń K_1 wskazują, że wartość K_1 wynosi około 1 dla różnych wzorów opisujących rozkład prędkości, o ile głowice są zainstalowane w odległości $0,4 H$ od dna kanału.

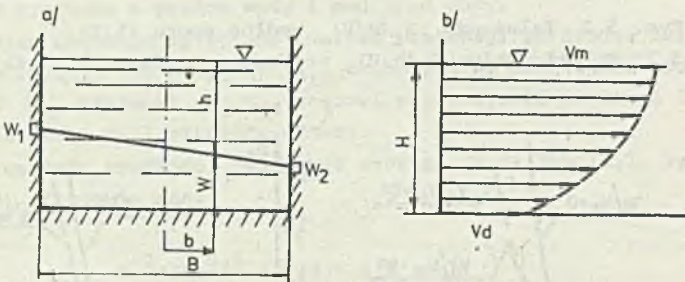
5.3.3. Model matematyczny organu pomiarowego przepływomierza z nieruchomą drogą nierównoległą do powierzchni wody

5.3.3.1. Opis rozkładu prędkości

Na rys. 5.4a przedstawiono przekrój kanału, dla którego zostanie wyrowadzony model. Przekrój przepływowy jest prostokątem. Na rys. 5.4b przedstawiono profil prędkości w pionie. Przyjmuje się, że rozkład prędkości można opisać wzorem:

$$v = [v_d + (v_m - v_d)(1 - (1 - w/H)^2)] [1 - (2b/B)^m], \quad (5.12)$$

gdzie: m jest dodatnią liczbą parzystą.



Rys. 5.4. Szkic organu pomiarowego przepływomierza jednodrogowego z drogą nierównoległą do powierzchni wody

a) przekrój kanału, b) pionowy profil prędkości

w - odległość punktu na drodze fali ultradźwiękowej od dna kanału, w_1, w_2 - odległości głowic (środków przetworników piezoelektrycznych) od dna kanału, h - odległość punktu na drodze fali ultradźwiękowej od powierzchni wody, $H = w+h$ - wysokość lustra wody nad dnem kanału

Fig. 5.4. Diagram of the primary transducer of a one-path flowmeter with the path non-parallel to water surface

a) channel cross-section, b) vertical velocity profile

w - distance of a point in the path of ultrasonic wave from the bottom of the channel, w_1, w_2 - distance of the heads (centres of piezoelectric transducers) from the channel bottom), h - distance of a point in the path of ultrasonic wave from water surface, $H = w+h$ - height of the water surface over the channel bottom

Wartość m należy oszacować dla danego przypadku. Według badań autora dla betonowego kanału o przekroju prostokątnym o szerokości 1700 mm wartość m wynosiła od 16 do 20. Odległość punktów na drodze fali ultradźwiękowej od dna kanału wyraża się wzorem:

$$w = \frac{w_2 - w_1}{B} \cdot b + \frac{w_1 + w_2}{2}. \quad (5.13)$$

5.3.3.2. Model matematyczny organu pomiarowego

Mierzona w przetworniku pomiarowym prędkość v_1 będzie zależała od położenia drogi fali ultradźwiękowej:

$$v_1 = \dot{V} / (BH K_1(w_1, w_2)), \quad (5.14)$$

gdzie: $K_1(w_1, w_2)$ jest współczynnikiem czułości.

Podstawiając wzór (5.13) do (5.12) i całkując po drodze fali ultradźwiękowej, otrzymuje się:

$$v_1 = \frac{(v_m - v_d)^m}{m+1} \left[\frac{w_1 + w_2}{H} - \frac{(w_1 + w_2)^2}{4H^2} \right] + \frac{(v_m - v_d)(w_2 - w_1)^2}{4H^2(m+3)} + \frac{v_d^m}{m+1}. \quad (5.15)$$

Prędkość średnią po przekroju przepływowym $S = BH$ oblicza się całkując wzór (5.12):

$$v_s = \frac{v_m \cdot m}{3(m+1)} \left[2 + \frac{v_d}{v_m} \right]. \quad (5.16)$$

Współczynnik czułości K_1 jako iloraz v_s/v_1 jest równy:

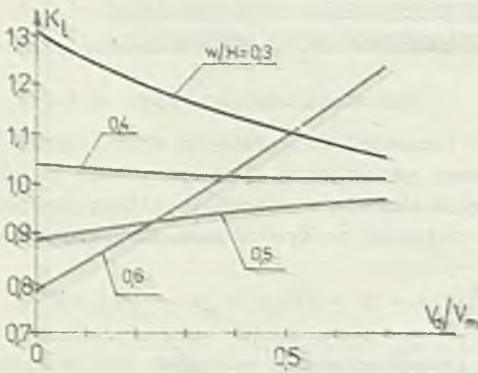
$$K_1 = \frac{(2 + v_d/v_m)/3}{\left[1 - \frac{v_d}{v_m} \right] \left[\frac{w_1 + w_2}{H} - \frac{(w_1 + w_2)^2}{4H^2} \right] + \left[1 - \frac{v_d}{v_m} \right] \frac{(w_2 - w_1)^2}{4H^2(m+3)} + \frac{v_d}{v_m}}. \quad (5.17)$$

5.3.3.3. Wpływ zmian kształtu rozkładu prędkości na współczynnik czułości

Pierwszym etapem analizy tego zagadnienia jest wyznaczenie optymalnego położenia drogi równoległej. Autor przyjął, że miarą zmiany kształtu jest stosunek v_d/v_m . Dla drogi równoległej do dna ($w_1 = w_2 = w$) obliczono zależność $K_1(v_d/v_m)$ przy różnych wysokościach względnym położenia drogi w/H . Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 5.5. Dla $w/H = 0,423$ przy zmianach v_d/v_m od 0 do 0,7 zmiana K_1 wynosi 0,05%, a więc wyznaczone położenie uważa się za optymalne.

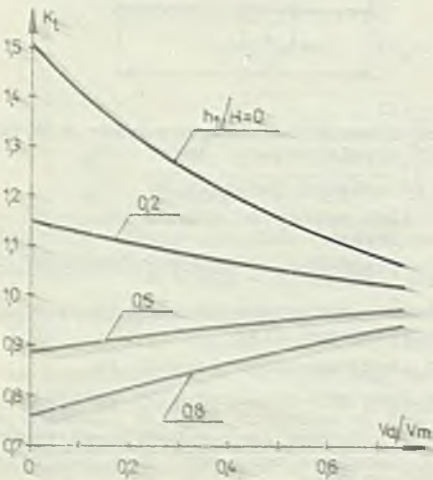
Optymalne położenie drogi nierównoległej wyznacza się przy założeniu podobnym jak w przypadku drogi równoległej, że miarą zmiany kształtu jest stosunek v_d/v_m . Dalej przyjmuje się, że maksymalna wysokość głowicy nie może być większa niż połowa nominalnej wysokości poziomu wody H_n . Oznacza to, że dla wysokości poziomu wody mniejszej od $H_n/2$ pomiar nie jest możliwy.

Na rys. 5.6 przedstawiono zależność współczynnika K_1 od położenia głowicy, której położenie jest dobierane oraz zmian stosunku v_d/v_m . Dla $w_1/H = 0,345$ ($w_2/H = 0,5$) przy zmianach v_d/v_m od 0 do 0,7 zmiana K_1 wynosi 0,02%, a więc położenie to uważa się za optymalne.



Rys. 5.5. Zależność współczynnika czułości K_1 od położenia drogi równoległej do poziomu wody

Fig. 5.5. Dependence of the sensitivity coefficient K_1 on the location of the path parallel to water surface



Rys. 5.6. Zależność współczynnika czułości K_1 od położenia drogi nierównoległej do poziomu wody

Fig. 5.6. Dependence of the sensitivity coefficient K_1 on the location of the path non-parallel to water surface

Badania symulacyjne układu z drogą równoległą oraz układu z drogą nierównoległą autor zrealizował dla rzeczywistych zmian profilu prędkości. Na podstawie zebranych przez autora wyników pomiaru rozkładu prędkości uzyskanych w kanale o przekroju trapezowym została wyznaczona zależność stosunku v_d/v_m od stosunku wysokości poziomu wody H do wartości nominalnej H_n :

$$v_d/v_m = 0,6 - 0,1 H/H_n \quad (5.18)$$

Obliczono wartość K_1 dla $H/H_n = 1$; 0,5 oraz 2 i uzyskano maksymalne różnice wartości K_1 dla $H/H_n = 2$. Dla drogi równoległej wartość tej różnicy odniesiona do wartości K_1 dla $H/H_n = 1$ wynosi +27,57%, natomiast dla drogi nierównoległej -27,64%. Na podstawie tych wyników można wysunąć wniosek, że obydwa sposoby instalowania drogi są jednakowo dobre, przy czym nieco lepszy jest układ z drogą równoległą.

W świetle wyników wyżej przedstawionych autor proponuje uproszczony opis rozkładu prędkości w pionie wzorem Bazina, do którego wprowadzono prędkość v_d :

$$v = v_m - (v_m - v_d) \frac{(h - h_0)^2}{(H - h_0)^2} \quad (5.19)$$

Mierzona prędkość średnia dla drogi równoległej ($w_1 = w_2$) lub nierównoległej ($w_1 \neq w_2$) będzie wówczas wynosić:

$$v_1 = v_m - \frac{v_m - v_d}{3(H - h_0)^2} \left[3h^2 - 3hw_2 - 3hw_1 - 6sh_0 + 3h_0w_2 + 3h_0w_1 + w_1w_2 + 3h_0^2 + w_1^2 + w_2^2 \right] \quad (5.20)$$

Prędkość średnia po przekroju przepływowym wynosi:

$$v_s = v_m - \frac{(v_m - v_a)(3h_o^2 - 3h_o H + H^2)}{3(H - h_o)^2} \quad (5.21)$$

Przyjmując prędkość $v_a = 0$, otrzymuje się na podstawie wzorów (5.20) i (5.21) dla rozkładu wyżej zdefiniowanego i drogi równoległej do powierzchni wody wyrażenie na współczynnik czułości K_{1r} :

$$K_{1r} = \frac{2 - 3h_o/H}{2,0012 - 2,538 h_o/H} \quad (5.22)$$

gdzie wskaźnik r oznacza równoległość drogi do powierzchni wody. Dla drogi nierównoległej otrzymuje się:

$$K_{1n} = \frac{2 - 3h_o/H}{1,9935 - 2,535 h_o/H} \quad (5.23)$$

Różnice wartości współczynnika K_1 wynoszą:

$$K_{1r}(h_o/H = 0) - K_{1r}(h_o/H = 0,5) = 0,3165,$$

$$K_{1n}(h_o/H = 0) - K_{1n}(h_o/H = 0,5) = 0,3145.$$

Jak widać z ostatniego zestawienia, zmiany współczynnika czułości są tego samego rzędu, przy czym układ z drogą równoległą daje błąd większy o 0,2%.

Wpływ zmian profilu prędkości w poziomie został zbadany na podstawie wzoru (5.17). Dla wartości $m = 20$ przyjętej jako wartość nominalna oraz wartości $\pi = 2, 5, 10, 30$ i 40 obliczono wartości K_1 według wzoru (5.17). W przypadku gdy $w_1/H = 0$, różnice względne K_1 są największe i dla $m = 2$ oraz $m = 40$ wynoszą odpowiednio: $-3,48\%$ i $+0,53\%$, natomiast dla w_1/H bliskich położeniu optymalnemu wyznaczonemu wyżej moduły różnic względnych K_1 są mniejsze od $0,5\%$.

Jak wynika z przeprowadzonej wyżej analizy, stosowanie drogi nierównoległej intuicyjnie pozwalającej na lepsze uśrednienie profilu jest niecelowe, gdyż nie poprawia dokładności pomiaru.

5.4. POMIAR STRUMIENIA OBJĘTOŚCI WODY W KANALE O PRZEKROJU KOŁOWYM

Istnieją przypadki, gdy woda w rurociągu ma powierzchnią swobodną i sytuacja taka będzie traktowana jako przykład kanału otwartego. W poz. [35, s. 25] jest zestawienie kształtów przekrojów kanałów otwartych i kanał

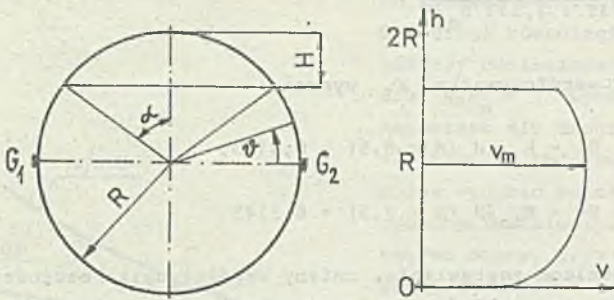
o przekroju kołowym jest nazwany rurą. Kanał o przekroju kołowym można też traktować jako rurociąg częściowo wypełniony wodą, to znaczy przypadek odbiegający od warunków normalnych zdefiniowanych w punkcie 3.2. Rury odprowadzające ścieki w oczyszczalni lub popłużyny ze stacji uzdatniania wody należy ze względu na swobodną powierzchnię wody uważać za kanały otwarte, choć w szczególnych warunkach rurociągi te mogą wypełnić się całkowicie. Terminy: kanał otwarty (o przekroju kołowym), rura i rurociąg będą w punkcie 5.4 używane zamiennie.

5.4.1. Wzory modelujące rozkład prędkości

Autor pracy proponuje trzy modele rozkładu prędkości w kanale o przekroju kołowym.

Model I wyprowadza się przy następujących założeniach:

- 1) prędkość wody na powierzchni swobodnej jest różna od zera,
- 2) prędkość maksymalna wody znajduje się w osi rury,
- 3) rozkład prędkości opisuje się zależnościami jak dla rurociągu całkowicie wypełnionego uwzględniając założenia 1 i 2.



Rys. 5.7. Przekrój poprzeczny rurociągu i profil prędkości w pionie dla modelu I rozkładu prędkości

H - odległość poziomu wody od najwyższej położonego punktu wewnętrznej powierzchni ścianki rurociągu, α - kąt wynikający z wypełnienia, ψ - współrzędna kątowa

Fig. 5.7. Pipe cross-section and vertical velocity profile for the first model of velocity distribution

H - distance of the water surface from the highest point of internal pipe wall, α - angle due to filling, ψ - angular coordinate, G_1, G_2 - heads

Na rys. 5.7 przedstawiono przekrój kanału prostopadły do jego osi oraz pionowy profil prędkości w średnicy prostopadłej do powierzchni wody. Rozkład prędkości będzie się wyrażał następującym wzorem:

$$v = f(r) \tag{5.24}$$

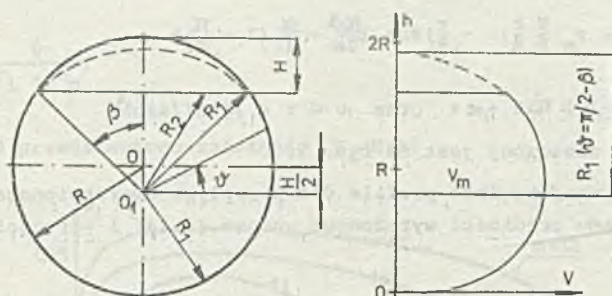
dla $\psi \in < 0; \pi/2 - \alpha >$ lub $\psi \in < \pi/2 + \alpha; 2\pi >$ oraz $0 \leq r \leq R$
 dla $\psi \in < \pi/2 - \alpha; \pi/2 + \alpha >$ oraz $0 \leq r \leq (R - H)/\sin\psi$,

gdzie $f(r)$ jest dowolną funkcją opisującą rozkład prędkości w rurociągu pełnym. Ze względu na złożoność obliczeń przyjmuje się, że rozkład prędkości opisany jest wzorem (3.14).

Model II wyprowadza się przy następujących założeniach:

- 1) prędkość wody na powierzchni swobodnej jest różna od zera,
- 2) maksymalna prędkość wody jest poniżej osi rurociągu w odległości $H/2$ od tej osi (rys. 5.8),
- 3) prędkość wody przy ścianie kanału wynosi zero.

Na rys. 5.8 przedstawiono przekrój rurociągu oraz pionowy profil prędkości w średnicy rurociągu.



Rys. 5.8. Przekrój poprzeczny rurociągu i profil prędkości w pionie dla modelu II rozkładu prędkości

O_1 - przesunięty punkt O o wartość $0,5 H$, dla którego prędkość jest maksymalna, R_1 - promień łączący punkt O_1 z dowolnym punktem części ścianki rurociągu, która jest pod zwierciadłem wody, R_2 - promień łączący O_1 z dowolnym punktem zwierciadła wody, β - kąt wynikający z wypełnienia rurociągu

Fig. 5.8. Pipe cross-section and vertical velocity profile for the second model of velocity distribution

O_1 - point O shifted by the value of $0,5 H$, for which the velocity has maximum value, R_1 - radius connecting point O_1 with any point of the pipe wall below water surface, R_2 - radius connecting point O_1 with any point of water surface, β - angle due to pipe filling

Korzystając ze wzoru Carnota, otrzymuje się:

$$R_1 = 0,5 (H \sin^2 \beta + (4R^2 - H^2 \cos^2 \beta)^{0,5}), \quad (5.25)$$

natomiast kąt β wynosi:

$$\beta = \arctg \frac{(2RH - H^2)^{0,5}}{R - 0,5 H} \quad (5.26)$$

Rozkład prędkości będzie wyrażał się wzorem:

$$v = f(r/R_1), \quad (5.27)$$

dla $\vartheta \in \langle \pi/2 + \beta ; 5\pi/2 - \beta \rangle$ oraz $0 \leq r \leq R_1$ (H, ϑ)

$$v = f(r/R_{1m}) \quad (5.28)$$

dla $\vartheta \in \langle \pi/2 - \beta ; \pi/2 + \beta \rangle$ oraz $0 \leq r \leq (R - H/2)/\sin\vartheta$,

gdzie R_{1m} jest maksymalną wartością promienia R_1 , natomiast $f(r/R_1)$ jest dowolną funkcją opisującą rozkład prędkości.

Model III definiuje się następująco:

1) $v = f(r)$ dla $\vartheta \in \langle \pi/2 + \alpha ; 5\pi/2 - \alpha \rangle$ oraz $0 \leq r \leq R$,

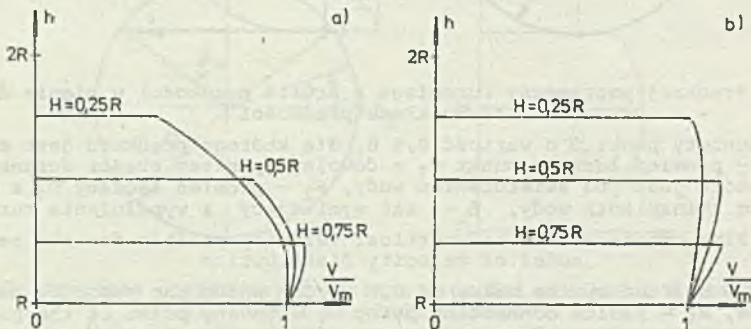
2) wzorem:

$$v = f(r) + v_m \frac{H}{R} \frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right) \sin \left(\frac{\pi\vartheta}{2\alpha} + \frac{\pi}{4} \left(2 - \frac{\pi}{\alpha}\right) \right) \quad (5.29)$$

dla $\vartheta \in \langle \pi/2 - \alpha ; \pi/2 + \alpha \rangle$ oraz $0 \leq r \leq (R-H)/\sin\vartheta$,

gdzie kąt α oznaczony jest na rys. 5.7.

Na rys. 5.9 przedstawiono profile dla przepływu uwarstwionego i burzliwego, dla rozkładu prędkości wyrażonego wzorem (3.14) i wartości $m = 12$.



Rys. 5.9. Profil prędkości w średnicy pionowej dla rozkładu opisanego wzorem (5.29) i dla $f(r)$ wyrażonego wzorem (3.14)

a) dla przepływu uwarstwionego, b) dla przepływu burzliwego przy $m = 12$

Fig. 5.9. Velocity profile in vertical diameter for the distribution described by formulae (5.29) and for $f(r)$ expressed by formula (3.14)

a) the case of laminar flow, b) the case of turbulent flow with $m = 12$

5.4.2. Zależność współczynnika czułości K_1 od wysokości poziomu wody w kanale

W przypadku modelu I pole przekroju przepływowego wynosi:

$$S_p = R^2 \left(\pi - \arccos \frac{R-H}{R} \right) + (2RH - H^2)^{1/2} (R-H). \quad (5.30)$$

Strumień objętości \dot{V} dla przepływu uwarstwionego wynosi:

$$\dot{V} = v_m \left(\frac{R^2}{2} (\pi - \alpha) + (R-H)^2 \operatorname{tg} \alpha - \frac{(R-H)^4}{6R^2} \frac{\sin \alpha}{\cos^3 \alpha} - \frac{(R-H)^4}{2R^2} \operatorname{tg} \alpha \right), \quad (5.31)$$

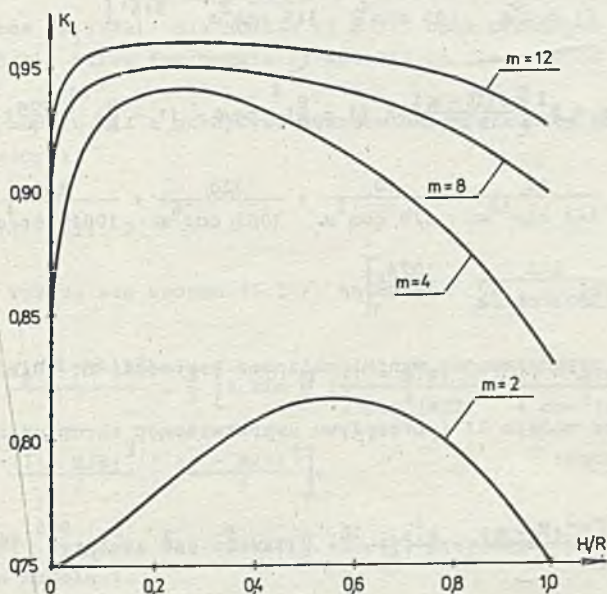
gdzie:

$$\alpha = \arccos \frac{R-H}{R}. \quad (5.32)$$

Prędkość średnia po poziomej średnicy wynosi $v_1 = 2v_m/3$ i współczynnik czułości wyznacza się ze wzoru:

$$K_1 = \frac{\dot{V}}{v_1 \cdot S_p}. \quad (5.33)$$

Na rys. 5.10 przedstawiono zależność $K_1(H/R)$.



Rys. 5.10. Zależność $K_1(H/R)$ dla przepływu uwarstwionego ($m = 2$) oraz burzliwego ($m = 4, 8, 12$)

Fig. 5.10. The relationship $K_1(H/R)$ for laminar ($m = 2$) and turbulent ($m = 4, 8, 12$) flows

Dla przepływu burzliwego i rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.14) strumień objętości będzie wyrażał się wzorem (dla modelu I):

$$\dot{V} = \frac{v_m R^2 (\pi - \alpha) m}{2 + m} + v_m (R-H)^2 \operatorname{tg} \alpha - \frac{v_m (R-H)^2}{m+2} \int_{\pi/2-\alpha}^{\pi/2+\alpha} \frac{d\psi}{(\sin \psi)^{m+2}}. \quad (5.34)$$

Całkę występującą we wzorze (5.34) obliczono dla $m=4, 8$ i 12 :

$$\begin{aligned} \dot{V}_{m=4} = v_m R^2 & \left[\frac{2(\pi - \alpha)}{3} + \left(1 - \frac{H}{R}\right)^2 \operatorname{tg} \alpha - \left(1 - \frac{H}{R}\right)^6 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{3} \right. \\ & \left. \cdot \left(\frac{1}{5 \cos^4 \alpha} + \frac{4}{15 \cos^2 \alpha} + \frac{8}{15} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.35)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{m=8} = v_m R^2 & \left[\frac{4(\pi - \alpha)}{5} + \left(1 - \frac{H}{R}\right)^2 \operatorname{tg} \alpha - \left(1 - \frac{H}{R}\right)^{10} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{5} \left(\frac{1}{9 \cos^8 \alpha} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{8}{63 \cos^6 \alpha} + \frac{16}{105 \cos^4 \alpha} + \frac{64}{315 \cos^2 \alpha} + \frac{128}{315} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.36)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{m=12} = v_m R^2 & \left[\frac{6(\pi - \alpha)}{7} + \left(1 - \frac{H}{R}\right)^2 \operatorname{tg} \alpha - \left(1 - \frac{H}{R}\right)^{14} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{7} \left(\frac{1}{13 \cos^{12} \alpha} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{12}{143 \cos^{10} \alpha} + \frac{10}{429 \cos^8 \alpha} + \frac{320}{3003 \cos^6 \alpha} + \frac{128}{1001 \cos^4 \alpha} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{512}{3003 \cos^2 \alpha} + \frac{1024}{3003} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5.37)$$

Na rys. 5.10 przedstawiono wyniki obliczeń wartości K_1 dla przepływu burzliwego.

W przypadku modelu II i przepływu uwarstwionego strumień objętości wyznacza się ze wzoru:

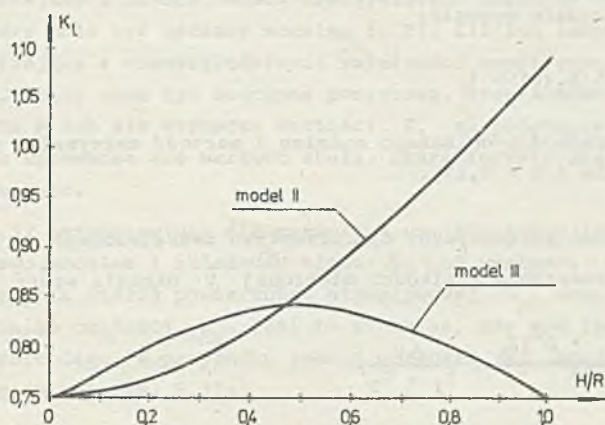
$$\begin{aligned} \dot{V} = v_m & \left[\frac{R^2 (\pi - \beta)}{2} - \frac{R^2 \sin 2\beta}{16} - \frac{H}{8} (4R^2 - H^2 \sin^2 \beta)^{0,5} \sin \beta - \right. \\ & \left. - \frac{R^2}{2} \operatorname{arc} \sin \left(\frac{H}{2R} \sin \beta \right) + \frac{(2R - H)^2 (3 + 2 \sin^2 \beta) \operatorname{tg} \beta}{24} \right], \end{aligned} \quad (5.38)$$

gdzie kąt β określa wzór (5.26).

Prędkość średnią po drodze fali ultradźwiękowej wyznacza się ze wzoru:

$$v_1 = v_m \frac{8R^2}{3(4R^2 + H^2)}. \quad (5.39)$$

Na rys. 5.11 przedstawiono wyniki obliczeń zależności $K_1(H/R)$ według wzoru (5.33) dla modelu II rozkładu prędkości oraz przepływu uwarstwionego.



Rys. 5.11. Wykres $K_1(H/R)$ dla modelu II i III oraz przepływu uwarstwionego
Fig. 5.11. $K_1(H/R)$ curve for models II and III in the case of laminar flow

W przypadku modelu III i przepływu uwarstwionego strumień objętości wyznacza się ze wzoru:

$$\dot{V} = \dot{V}_{III\ 1} + \dot{V}_{III\ 2}' \quad (5.40)$$

gdzie $\dot{V}_{III\ 1}$ wyraża się wzorem (5.31), natomiast $\dot{V}_{III\ 2}$ określa wzór:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{III\ 2} = & \frac{v_m (\pi - \alpha) R^2}{3} \cdot \frac{H}{R} \left[4 \sin \frac{\pi}{4} \left(\frac{(1 - H/R)^3}{3 \cos^3(\alpha/2)} - \frac{(1 - H/R)^4}{4 \cos^4(\alpha/2)} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{(1 - H/R)^3}{3} - \frac{(1 - H/R)^4}{4} \right] \end{aligned} \quad (5.41)$$

Współczynnik K_1 wyznacza się ze wzoru (5.33), przy czym v_1 ma taką samą wartość jak dla modelu I.

Na rys. 5.11 przedstawiono wyniki obliczeń $K_1(H/R)$ dla modelu III rozkładu prędkości:

5.4.3. Model organu pomiarowego przepływomierza z uwzględnieniem wyniku pomiaru poziomu

Błędy względne pomiaru strumienia objętości mogą wynosić kilkadziesiąt procent w zależności od rodzaju przepływu (uwarstwiony lub burzliwy) oraz przyjętego modelu rozkładu prędkości [84, 110, 184]. Uwzględnienie zmian poziomu wody pozwala na zmniejszenie błędu do kilku procent [217]. W przy-

padku uwzględnienia wyniku pomiaru poziomu błąd pomiaru strumienia objętości jest spowodowany różnicą między rzeczywistą wartością współczynnika K_1 i wartością przyjętą dla rurociągu pełnego. Np. dla przepływu uwarstwionego błąd względny będzie wynosił:

$$\delta_H = 0,75/K_1(H) - 1. \quad (5.42)$$

Dla rozkładu prędkości opisanego modelem I wartość maksymalna modułu błędu wynosi 8,1% (dla $H/R = 0,57$).

5.4.3.1. Model matematyczny dla przepływu uwarstwionego

Równanie odtwarzania wielkości mierzonej \dot{V} określa wzór:

$$\dot{V} = \frac{S_p (d^2 + D^2) K_1}{2d} \cdot \frac{\Delta t}{t_1 \cdot t_2}, \quad (5.43)$$

gdzie: S_p - przekrój przepływowy określony wzorem (5.30).

Wartość K_1 oblicza się ze wzoru definicyjnego (5.33), przy czym wartości \dot{V} i v_1 oblicza się ze wzorów o numerach podanych w tabelicy 5.1 oraz wzorów podanych w tej tabelicy. W tabelicy 5.1 podano również numery rysunków, na których przedstawiono wykresy $K_1(H/R)$.

Tabela 5.1

Numerы wzorów umożliwiające obliczenie współczynnika czułości dla przekroju przepływowego

Model	Wzory		K_1 , rys
	v_1	\dot{V}	
I	$2 v_m/3$ (5.39)	(5.31) (5.38)	5.10 5.11
III	$2 v_m/3$	(5.40)	5.11

5.4.3.2. Model matematyczny dla przepływu burzliwego

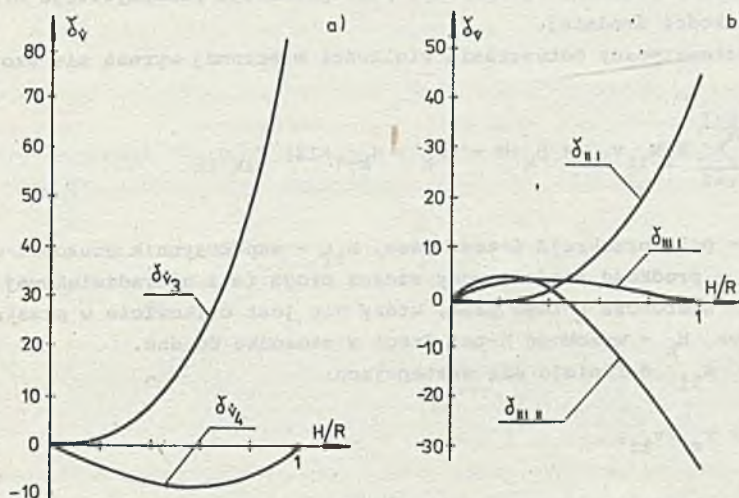
Równanie odtwarzania wielkości mierzonej \dot{V} określa wzór (5.43), przy czym K_1 wyznacza się ze wzoru (5.33). Wartość \dot{V} dla rozkładu prędkości opisanego wzorem (3.14) i modelu I oblicza się ze wzorów (5.35), (5.36) i (5.37) odpowiednio dla $m=4, 8, 12$, natomiast v_1 oblicza się całkując prędkość v daną wzorem (3.14) zgodnie ze wzorem (3.52). Zależność $K_1(H/R)$ jest przedstawiona na rys. 5.10.

5.4.3.3. Błędy wskazań przepływomierza

Błędy te dzieli się na dwie grupy:

- 1) błędy wynikające z nieznanomości rzeczywistego kształtu rozkładu prędkości (który może być opisany modelem I, II, III lub innym),
- 2) błędy wynikające z nieuwzględnienia zależności współczynników modelu od wielkości, jakie mogą być dostępne pomiarowo. Przykładowo, nie mierzy się poziomu H lub nie wyznacza wartości K_1 na podstawie wyniku pomiaru h , a tylko wprowadza się wartość stałą, charakterystyczną dla danego rodzaju przepływu.

Na rys. 5.12 przedstawiono dla przepływu uwarstwionego i rozkładu prędkości opisanego modelem I zależność błędów $\delta_{\dot{V}}$ od wartości H/R . Błąd $\delta_{\dot{V}3}$ wynika z przyjęcia stałej powierzchni przepływowej S_p oraz stałej wartości współczynnika czułości K_1 . Jest to sytuacja, gdy nie jest mierzony poziom wody w rurociągu. W przypadku znanej wartości K_1 błąd $\delta_{\dot{V}4}$ będzie miał przebieg jak na rys. 5.12a.



Rys. 5.12. Błędy względne przepływomierza

- a) wynikające z uproszczonego równania odtwarzania wielkości mierzonej,
- b) wynikające z przyjęcia modelu rozkładu prędkości w rurociągu niepełnym

Fig. 5.12. Relative errors of the flowmeter

- a) errors due to simplified equation of reproducing the measured quantity,
- b) errors due to accepted model of velocity distribution in partly-filled pipe

Na rys. 5.12b przedstawiono względne błędy dla trzech modeli rozkładu prędkości i przepływu uwarstwionego przy przyjęciu, że rzeczywisty rozkład opisuje inny model, np. $\delta_{III I}$ oznacza, że przyjęto model I za dokładny.

natomiast model III jest przybliżeniem rozkładu rzeczywistego. Z rys. 5.12b widać, że dla $H/R < 0,5$ błędy wynikające z postaci przyjętego modelu są nie większe niż 4%, co wskazuje na możliwość pomiaru \dot{V} , ale wymagany jest pomiar H i uwzględnienie zarówno zależności pola przekroju przepływowego S_p , jak i współczynnika czułości dla przekroju przepływowego od poziomu wody w rurociągu $K_1(H)$.

5.5. PRZEPLYWOMIERZE WIELODRGOWE

Ponieważ przepływomierze jednodrogowe nie zapewniają wystarczającej dokładności pomiaru strumienia objętości, stosowane są przepływomierze wielodrogowe, szczególnie w przypadku zmian poziomu oraz kształtu rozkładu prędkości. W [67] przedstawiono błędy przepływomierzy wielodrogowych dla granicznych profili prędkości w pionie (prędkość stała oraz zmieniająca się liniowo). Z przeprowadzonej analizy wynika, że konieczny jest pomiar poziomu do wyznaczenia aktualnej wartości pola przekroju przepływowego oraz korekcja prędkości średniej.

Model matematyczny odtwarzania wielkości mierzonej wyraża się wzorem:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^{k-1} S_i K_{1i} v_{1i} + B_k (H - (H_k + H_{k-1})/2) K_{1k} v_{1k} \quad (5.44)$$

gdzie: S_i - pole przekroju i -tego pasa, K_{1i} - współczynnik czułości w i -tym pasie, v_{1i} - prędkość średnia wody wzdłuż drogi fali ultradźwiękowej w i -tym pasie, B_k - szerokość k -tego pasa, który nie jest całkowicie w przekroju przepływowym, H_k - wysokość k -tej drogi w stosunku do dna.

Wartość K_{1i} definiuje się następująco:

$$K_{1i} = v_{si} / v_{1i} \quad (5.45)$$

gdzie: v_{si} - prędkość średnia w i -tym pasie.

Jak wynika z przeprowadzonych badań modelowych dla rzeczywistych wyników pomiarów prędkości punktowych, błąd wyznaczania strumienia objętości metodą całkowania krzywej aproksymującej zależy od wzoru przyjętego do aproksymacji wyników pomiarów. Różnice między strumieniem objętości wyznaczone metodą klasyczną (całkowania bryły prędkości na podstawie prędkości punktowych) i obliczone jako całki poszczególnych wzorów opisujących rozkład (Bazina dla $h_0 = 0$ i $h_0 \neq 0$ oraz Hagena) odniesione do wyników metody klasycznej wynosiły do 10% (średnio 3%), przy czym głównym źródłem błędów jest przyjęta wartość n we wzorze Prandtla opisującym rozkład prędkości w poziomie.

W celu minimalizacji błędów, szczególnie w przypadku dużych zmian poziomu, należy przeanalizować sposób rozmieszczenia dróg (w stałej odległości od

siebie lub rozmieszczone nierównomiernie) w zależności od parametrów charakteryzujących przepływ oraz wymaganej dokładności pomiaru w danej części zakresu pomiarowego. Jak wynika z przeprowadzonych badań symulacyjnych, błąd wynikający ze stosowania wzoru (5.44) jest nie większy niż 0,5%, o ile liczba dróg jest większa niż 7.

W przypadku dużych zmian poziomu wody należy drogi rozmieszczać nierównomiernie, zagęszczając je przy dnie w celu uzyskania zbliżonych do siebie wartości błędu względnego w całym zakresie pomiarowym.

W [214] sformułowano wymagania dotyczące przepływającej wody oraz przeanalizowano źródła błędów pomiaru strumienia objętości w kanale otwartym. Okazuje się, że każdy punkt pomiaru strumienia objętości w kanale otwartym należy projektować indywidualnie. Korzystnie byłoby w niektórych przypadkach sprawdzić doświadczalnie charakterystykę przepływomierza, korzystając z jednej z metod przedstawionych np. w [212].

6. EKSPLOATACJA PRZEPIŁYWIOMIERZY ULTRADŹWIĘKOWYCH

6.1. WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNE

W publikacjach oraz katalogach firmowych podaje się wiele właściwości przepływiomierzy ultradźwiękowych i dane te różnią się między sobą. Publikacja [175] zawiera aż 24 właściwości podzielone na dwie grupy: pierwszoplanowe (zakres, dokładność, wpływ zmian przepływu na dokładność, możliwość pracy w różnych warunkach, możliwość pomiaru przepływu o zmiennym kierunku, wpływ zanieczyszczeń stałych, przeszkody przepływu, strata ciśnienia, wymagania obsługi, wymagania odnośnie do zasilania), i drugoplanowe (wśród nich błędy dodatkowe i koszty). W zbiorze właściwości należy wziąć pod uwagę dostosowanie tych przyrządów do warunków otoczenia [155, 233, 243].

W [218, 222] zestawiono najważniejsze właściwości metrologiczne oraz zalety i wady przepływiomierzy ultradźwiękowych. Najbardziej istotne właściwości to: zakres pomiarowy, błąd podstawowy, stosunek granicy górnej zakresu pomiarowego do granicy dolnej zakresu pomiarowego [143] (dynamika zakresu [181] lub rozpiętość zakresu), błędy dodatkowe, błędy metody, właściwości dynamiczne.

Zakresy pomiarowe przepływiomierzy ultradźwiękowych są praktycznie nieograniczone i im jest większy zakres, tym na ogół większa jest dokładność pomiaru.

Błędy podstawowe przepływiomierzy ultradźwiękowych do pomiaru strumienia objętości w rurociągach zależą od zasady pomiaru, sposobu montażu głowic oraz liczby dróg. Najmniej dokładne są przepływiomierze z głowicami nakładanymi na ściankę rurociągu i błędy ich wynoszą od 1 do 5%.

Przepływiomierze ultradźwiękowe jednodrogowe z głowicami wbudowanymi w ściankę rurociągu mają najczęściej dokładność 1% [58, 114, 176, 208], podawana jest też dokładność 0,5% [160], 2% [88] oraz 1-3% [101]. W przypadku organu pomiarowego dwudrogowego błąd wynosi 0,5% [160], 2% [88] oraz 1-3% [101]. W przypadku organu pomiarowego dwudrogowego błąd wynosi 0,5% [16], natomiast dla organu pomiarowego czterodrogowego błąd może wynosić 0,3% [56] lub nawet 0,1% [230]. Jak wynika z badań symulacyjnych autora [210], tylko w bardzo dobrych warunkach charakteryzujących zabudowę oraz w niewielkim zakresie zmian strumienia objętości jest możliwe osiągnięcie błędu 0,1%. C. Scott podaje [160], że w praktycznie występujących warunkach błędy będą wynosiły: 1% dla przepływiomierza wielodrogowego, 3% dla jednodrogowego z głowicami wpuszczanymi i 5% dla przepływiomierza z głowicami nakładanymi. Błędy przepływiomierzy ultradźwiękowych dla kanałów otwartych szacuje się na 1 do 5%.

Dynamika zakresu może wynosić od 10:1 [101, 186], 100:1 [160], 1000:1 [166] do 20000:1 [13, 173]. Błędy dodatkowe będą większe w przepływomierzach z głowicami nakładanymi na ściankę rurociągu i głównym czynnikiem wpływającym jest temperatura. Błędy metody [209] wiążą się głównie z wpływem zniekształconego rozkładu prędkości.

Właściwości dynamiczne mogą być określane stałą czasową odpowiedzi na skok jednostkowy (dla wyjścia analogowego sygnału) lub czasem potrzebnym na uzyskanie pojedynczego wyniku pomiaru, gdy sygnał wyjściowy jest dyskretny. Minimalne czasy pomiaru są ograniczone czasem przelotu fali ultradźwiękowej w wodzie. Istnieje możliwość uzyskania informacji o średniej prędkości wody na drodze fali ultradźwiękowej już po jednym przelocie [30, 151].

Biorąc pod uwagę porównanie właściwości metrologicznych przepływomierzy ultradźwiękowych z właściwościami innych typów przepływomierzy [208, 214, 215], porównanie kosztów [140, 154], stan eksportu w USA [10] oraz wzrost liczby zastosowań w Danii [97], autor uważa, że w przyszłości nastąpi dalszy wzrost produkcji i różnorodnych zastosowań przepływomierzy ultradźwiękowych.

6.2. OSZACOWANIE BŁĘDU W NORMALNYCH WARUNKACH STOSOWANIA

Normalne warunki stosowania określono w punkcie 3.3.1 niniejszej pracy. Średni błąd względny pomiaru strumienia objętości oblicza się ze wzoru [9, 110, 220]:

$$\delta_{\psi} = (\delta_c^2 + \delta_{pp}^2 + \delta_{wy}^2)^{0,5}, \quad (6.1)$$

gdzie: δ_c - średni błąd względny organu pomiarowego, δ_{pp} - średni błąd względny przetwornika pomiarowego, δ_{wy} - średni błąd względny przyrządu wtórnego.

Średni błąd względny organu pomiarowego przepływomierza można wyznaczyć ze wzoru [147]:

$$\delta_c = (\delta_z^2 + \delta_m^2 + 3\delta_{ot}^2 + 3\delta_n^2 + \delta_u^2)^{0,5}, \quad (6.2)$$

gdzie błędy cząstkowe są średnimi błędami względnymi organu pomiarowego wynikającymi z: δ_z - warunków zabudowy głowic, δ_m - niedokładności wykonania głowic i niedokładności ich montażu, δ_{ot} - niedokładności warunków odniesienia, δ_n - zależności K od liczby Re (błąd liniowości), δ_u - unoszenia fali ultradźwiękowej.

Błędy związane z warunkami zabudowy głowic są błędami metody [209] i w przypadku pomiaru strumienia objętości w rurociągu średni błąd względny δ_z wyznacza się ze wzoru:

$$\delta_z = (\delta_e^2 + \delta_D^2 + \delta_k^2)^{0,5} \quad (6.3)$$

gdzie: δ_e - średni błąd względny wynikający z odchylenia kształtu przekroju rurociągu od kołowego, δ_D - średni błąd względny wynikający z odchylenia średnicy od wartości średniej przyjętej dla odcinka pomiarowego, δ_k - średni błąd względny wynikający z niepewności określenia chropowatości bezwzględnej rurociągu.

W przypadku pomiaru strumienia objętości w kanale otwartym błąd δ_e będzie związany z odchyleniem kształtu dna od nominalnego oraz z odchyleniem szerokości kanału w funkcji głębokości od zależności przyjętej w modelu matematycznym. Drugi składnik we wzorze (6.3) będzie związany ze zmianami pola przepływowego wzdłuż kanału w odcinku pomiarowym, natomiast trzeci składnik zależy od chropowatości dna i ścianek kanału oraz spadku hydraulicznego.

Błędy montażu opisane w [224] są związane zarówno z umiejscowieniem głowic, jak i ich parametrami konstrukcyjnymi, np. rozbieżnością osi fali ultradźwiękowej i osi głowicy. Dla głowic profilowanych nakładanych na rurociąg średni błąd względny δ_m wyznacza się ze wzoru:

$$\delta_m = (\delta_d^2 + \delta_L^2)^{0,5} \quad (6.4)$$

gdzie: δ_d - błąd wynikający z przesunięcia głowic względem siebie w stosunku do położenia nominalnego, δ_L - błąd wynikający z przesunięcia głowic po obwodzie rurociągu.

Błędy δ_{ot} i δ_u (wzór (6.2)) można często w praktyce pominąć, jeżeli zakres warunków odniesienia jest mały oraz prędkość wody jest nie większa niż kilka m/s. Błąd δ_k , występujący we wzorze (6.3), wyznacza się na podstawie wykresu przedstawionego na rys. 3.10. W [66] podano sposób liczenia błędu przetwornika pomiarowego.

6.3. BŁĘDY PRZEPŁYWOMIERZA W WARUNKACH RZECZYWISTYCH

Niekiedy warunki pracy przepływomierza odbiegają na tyle od normalnych, że błędy wyznaczone według wzoru (6.1) są duże (np. rzędu kilku czy kilkunastu procent). Zalecenia postępowania w takich przypadkach zawarte są w [147 i 222]. Niekiedy jest możliwa korekcja błędów systematycznych, jednak pozostaje niepewność ich oszacowania, a tym samym błąd całkowity będzie większy niż w normalnych warunkach stosowania.

Należy tu też uwzględnić błąd niestałości typu fluktuacji oraz typu płynięcia [139]. Fluktuacje są często spowodowane pulsacjami prędkości w punkcie [178] i mogą być zmniejszone przez uśrednienie sygnału wyjściowego i odrzucenie wyników charakteryzujących się dużym rozrzutem [8]. Największy

wpływ na zmianę błędu w miarę upływu czasu będą miały zmiany chropowatości wewnętrznej powierzchni rurociągi i zmiany przekroju przepływowego wskutek powstawania osadu. W przypadku kanałów otwartych oraz rzek duży wpływ na błąd niestałości typu płynięcia będą miały zmiany koryta związane z wymywaniem dna lub tworzeniem się osadów. Jak wynika z przeprowadzonej analizy, ostatnia przyczyna błędu praktycznie eliminuje pomiar ultradźwiękowy strumienia objętości w rzekach górskich.

Warunkiem istnienia osiowo-symetrycznego rozkładu prędkości jest odpowiednia długość prostych odcinków rurociągu przed i za miejscem zainstalowania głowic przepływomierza ultradźwiękowego. E. Hoene [75] podaje, że długość tych odcinków powinna być taka jak dla kryz i zwięzek Venturiego. W [47] podano, że długość odcinka prostego dla przepływomierza jednodrogowego winna wynosić 20 średnic, dla przepływomierzy dwudrogowych 10 średnic [15] lub 15 średnic [97], natomiast dla przepływomierza wielodrogowego 10-15 średnic [168].

Odpowiednio długich prostych odcinków wymaga się przy pomiarach strumienia objętości w kanałach otwartych, przy czym należy wziąć pod uwagę zmiany rozkładu związane np. z zarastaniem kanału lub istnieniem pokrywy lodowej [177]. Dochodzi tu warunek, aby droga fali ultradźwiękowej nie była zbyt blisko dna oraz powierzchni wody i w [72] podano wzór na minimalną odległość:

$$h_{\min} = (lc/(2f))^{0,5}. \quad (6.5)$$

Oprócz pomiarów prędkości w jednej lub w wielu drogach stosuje się pomiar poziomu [152, 200]. Pomiar wielodrogowy pozwala na uzyskanie większej dokładności pomiaru \dot{V} , szczególnie w okresie wezbrań, kiedy krzywa konsumpcyjna wykazuje histerezę [201].

6.4. NORMY Z ZAKRESU PRZEPLÝWOMIERZY ULTRADZWIĘKOWYCH

Pierwszą normą z zakresu pomiaru prędkości wody w kanałach otwartych metodą akustyczną była norma amerykańska z 1979 roku, znowelizowana w 1984 roku [40]. Dalsze normy dotyczyły pomiaru strumienia objętości cieczy w kanałach otwartych [32, 41, 78, 79].

W 1984 roku została opracowana przez autora norma [147] dotycząca pomiaru strumienia objętości cieczy w rurociągach przepływomierzem ultradźwiękowym i została wprowadzona do doświadczalnego stosowania od 1 stycznia 1986 roku.

Pomiarowi strumienia objętości cieczy w rurociągach poświęcona jest również norma amerykańska [2] z 1985 roku.

7. ALGORYTMY PRZETWARZANIA INFORMACJI W PRZEPIŁYWIOMIERZACH ULTRADŹWIĘKOWYCH

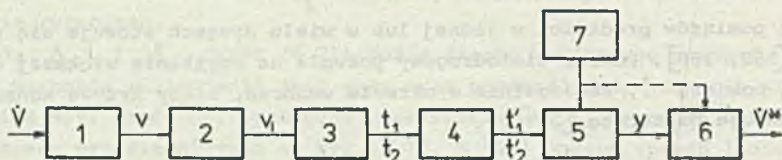
Niniejszy rozdział stanowi podsumowanie wcześniejszych prac autora oraz treści rozdziałów 3, 4 i 5 z punktu widzenia przetwarzania informacji pomiarowej w przepływomierzu ultradźwiękowym.

7.1. PRZETWARZANIE INFORMACJI W PRZEPIŁYWIOMIERZU ULTRADŹWIĘKOWYM

Przepływomierz ultradźwiękowy składa się z dwóch zasadniczych części: organu pomiarowego i przetwornika pomiarowego. Niekiedy do przepływomierza może być dołączony przyrząd wtórny, częściej stanowi on integralną część przetwornika pomiarowego.

Organ pomiarowy to odcinek rurociągu z zamontowanymi w nim lub na zewnątrz głowicami ultradźwiękowymi służący do odbierania informacji o prędkości przepływu.

Przetwornik pomiarowy to układ elektroniczny generujący sygnały pobudzające przetworniki piezoelektryczne do drgań oraz odbierający sygnały z głowic i przetwarzający je w sygnał wyjściowy.



Rys. 7.1. Schemat przetwarzania informacji w przepływomierzu ultradźwiękowym

1 - przetworzenie wielkości mierzonej \hat{V} w rozkład prędkości, 2 - uzyskanie prędkości średniej lub punktowej v_1 , 3 - przetworzenie v_1 na czasy t_1 i t_2 , 4 - dodanie się opóźnień w głowicach i układach elektronicznych daje na wyjściu czasy t'_1 , t'_2 , 5 - przetwarzanie w przetworniku pomiarowym, 6 - odtwarzanie wielkości mierzonej w przetworniku wtórnym 7 - zasilanie

Fig. 7.1. Information processing diagram for an ultrasonic flowmeter

1 - conversion of measured quantity \hat{V} into velocity profile, 2 - mean or point velocity v_1 calculation, 3 - conversion of v_1 into time values t_1 and t_2 , 4 - addition of the delay times in the heads and electronic circuitry gives the time values t'_1 , t'_2 , 5 - processing in a secondary device, 6 - reproduction of the measured quantity in the data output unit, 7 - power supply

Na rys. 7.1 przedstawiono schemat przetwarzania informacji w przepływomierzu ultradźwiękowym. Bloki 1 do 5 reprezentują równanie przetwarzania, natomiast w bloku 6 jest realizowana procedura odtwarzania wielkości mie-

rzonyj [141]. Niekiedy procedura ta może być realizowana w przetworniku pomiarowym (np. z wyjściem cyfrowym w jednostkach strumienia objętości), natomiast w bloku 6 następuje tylko utrwalenie wyniku pomiaru wielkości mierzonej, to znaczy strumienia objętości \dot{V} .

W przepływomierzu wielodrogowym sygnałem wyjściowym z drugiego bloku jest wektor prędkości średnich między poszczególnymi parami głowic i poszczególne prędkości v_{11} zależą od wyboru położenia dróg l_1 . Podobnie na wyjściu bloków 3 i 4 otrzymuje się w tym przypadku czasy t_{11} , t_{21} oraz t'_{11} , t'_{21} .

Przetwornik wtórny może stanowić część przetwornika pomiarowego. Na wyjściu przetwornika pomiarowego jest sygnał (np. prądowy lub napięciowy) proporcjonalny do strumienia objętości V , lub sygnał niosący bezpośrednią informację o strumieniu objętości. Przetwornikiem wtórnym może być miernik wskazujący, rejestrator lub integrator, którego zadaniem jest odtworzenie wielkości mierzonej (o ile nie zostanie to zrobione w przetworniku pomiarowym) oraz utrwalenie wyniku pomiaru.

O właściwościach metrologicznych przepływomierza decyduje przede wszystkim organ pomiarowy, przy czym do wyznaczenia modelu matematycznego z dostateczną dokładnością niezbędna jest znajomość rozkładu prędkości (czyli obiektu pomiaru) oraz geometrii organu pomiarowego, od której zależy sposób poboru próbek.

Lepsze poznanie zjawisk zachodzących w organie pomiarowym przepływomierza pozwala na ustalenie bardziej rozbudowanych równań odtwarzania wielkości mierzonej, co zapewnia zwiększenie dokładności pomiaru, zwłaszcza w warunkach odbiegających od normalnych [207, 221, 222, 223, 225, 240, 241, 243].

Możliwość zastosowania mikrokomputerów (najczęściej mikroprocesorów stanowiących integralną część przetwornika pomiarowego) pozwala na rozbudowę organu pomiarowego o czujniki do pomiaru wielkości pomocniczych, co w pewnych warunkach jest nieodzowne do uzyskania zadowalającej dokładności [192].

7.2. ESTYMACJA WZORU OPISUJĄCEGO KSZTAŁT ROZKŁADU PRĘDKOŚCI

Równanie przetwarzania [141] organu pomiarowego wiąże czasy przelotu (częstotliwości, fazy) fali ultradźwiękowej pod prąd i z prądem wody z wielkością mierzoną, czyli strumieniem objętości. Największy wpływ na postać równania przetwarzania ma przyjęty opis rozkładu prędkości. Zagadnienie to zostało szczegółowo przedstawione w punkcie 3.1 dla rurociągów, natomiast w przypadku kanałów otwartych mogą być stosowane modele wymienione w punkcie 5.2. Kryterium doboru modelu matematycznego opisującego rozkład prędkości formułuje się następująco: różnica między wartością strumienia objętości odtworzoną na podstawie przyjętego modelu matematycznego a rzeczywistą wartością strumienia objętości powinna być minimalna (lub mniejsza od wartości dopuszczalnej). Kryterium optymalności może być formułowane, jak to przedstawiono w [141]:

$$\int_{\dot{V}_1}^{\dot{V}_2} \Delta(\dot{V})^2 d\dot{V} = \min, \quad (7.1)$$

lub

$$\min [\max \Delta(\dot{V})] \left| \begin{array}{l} \dot{V}_2 \\ \dot{V}_1 \end{array} \right., \quad (7.2)$$

gdzie wartości \dot{V}_1 i \dot{V}_2 oznaczają początek i koniec zakresu pomiarowego. Inne kryteria autor formułuje następująco:

$$\int_{\dot{V}_1}^{\dot{V}_2} |\Delta(\dot{V})| d\dot{V} = \min, \quad (7.3)$$

$$\int_{\dot{V}_1}^{\dot{V}_2} \Delta(\dot{V}) d\dot{V} = 0, \quad (7.4)$$

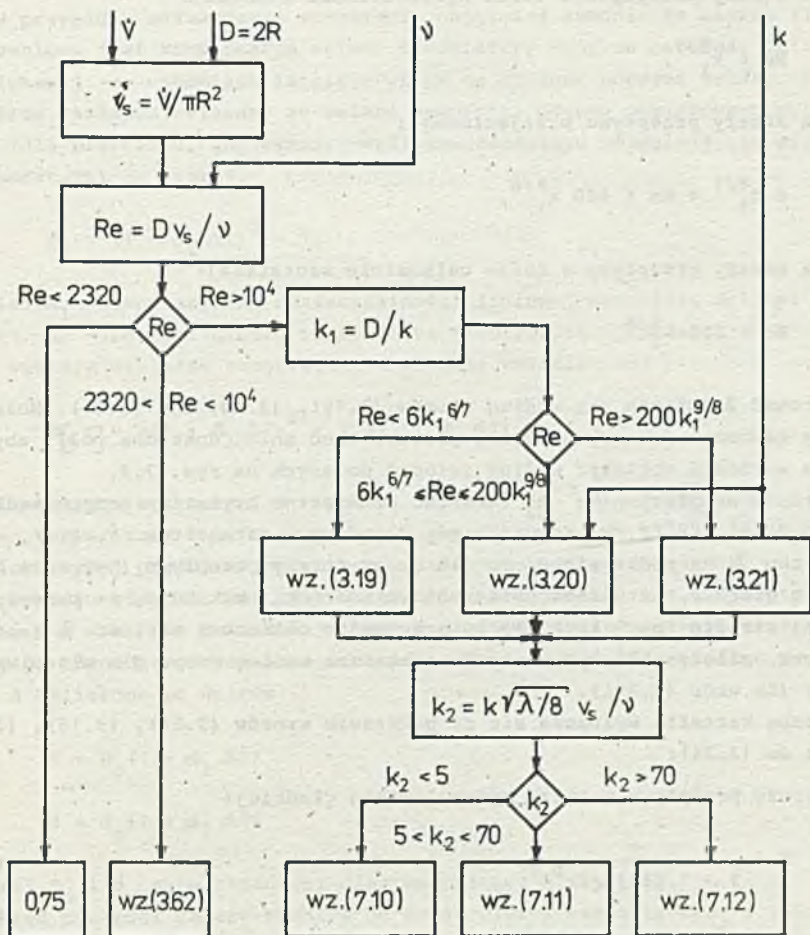
$$\int_{\dot{V}_1}^{\dot{V}_2} \Delta(\dot{V}) w(\dot{V}) d\dot{V} = 0 \quad (7.5)$$

gdzie wzory (7.4) i (7.5) stanowią kryteria dla liczników objętości, w których istotna jest dokładność pomiaru objętości wody. Wzór (7.4) obowiązuje dla równomiernego rozkładu prawdopodobieństwa strumienia objętości \dot{V} w zakresie pomiarowym, natomiast we wzorze (7.5) wprowadzono współczynnik $w(\dot{V})$ uwzględniający rozkład prawdopodobieństwa wielkości mierzonej w zakresie pomiarowym.

7.3. ALGORYTM WYZNACZANIA LICZBY KSZTAŁTU ROZKŁADU PRĘDKOŚCI K W RUROCIĄGU

Algorytm ten przedstawiono na rys. 7.2. Dla danych wejściowych D i k istnieje przybliżone kryterium [149, s. 203] wyznaczania jednej z trzech stref przepływu burzliwego na podstawie obliczenia stosunku:

$$k_1 = D/k. \quad (7.6)$$



Rys. 7.2. Algorytm wyznaczania liczby kształtu K

Fig. 7.2. Algorithm of determining the form factor K

W zakresie przepływu burzliwego obowiązują zależności

a) dla strefy przepływu w rurze hydraulicznie gładkiej:

$$Re < k_1^{8/7}, \quad (7.7)$$

b) dla strefy przepływu przejściowego:

$$6 k_1^{8/7} < Re < 200 k_1^{9/8}, \quad (7.8)$$

c) dla strefy przepływu w rurze całkowicie szorstkiej:

$$Re > 200 k_1^{9/8}. \quad (7.9)$$

Wartość λ oblicza się według wzorów (3.19), (3.20) lub (3.21). Można wpiery zastosować wzory bardziej proste, choć mniej dokładne [62], aby ostateczne wartości obliczyć według zaleceń podanych na rys. 7.2.

Wartość współczynnika k_2 stanowi ostateczne kryterium przyporządkowania do danej strefy. W przypadku gdy dla danych parametrów \dot{V} , D , ν , k obliczono λ na podstawie wzoru dla danej strefy przepływu (np. rura hydraulicznie gładka), natomiast obliczona wartość k_2 wskazuje, że przepływ jest w innej strefie (np. $k_2 > 5$), to przyjmując obliczoną wartość λ jako początkową, należy obliczyć wartość ostateczną według wzoru dla właściwej strefy (tu wzór (3.20)).

„ Liczbę kształtu wyznacza się na podstawie wzorów (3.54), (3.16), (3.17), (3.19) do (3.24):

dla strefy przepływu w rurze hydraulicznie gładkiej:

$$K = \frac{1}{1 + 1,25 (\lambda/8)^{0,5}}, \quad (7.10)$$

dla strefy przepływu przejściowego:

$$K = \frac{C_2 - 3,75 + 2,5 \ln(R/k)}{C_2 - 2,5 + 2,5 \ln(R/k)}, \quad (7.11)$$

gdzie C_2 wyraża się wzorem (3.23),

dla strefy przepływu w rurze całkowicie szorstkiej:

$$K = \frac{4,75 + 2,5 \ln(R/k)}{6 + 2,5 \ln(R/k)}. \quad (7.12)$$

7.4. ALGORYTMY KOREKCJI WPŁYWU TEMPERATURY

W przypadku odtwarzania strumienia objętości zgodnie ze wzorem (3.58) zapewniona jest kompensacja wpływu temperatury wody na prędkość fali ultradźwiękowej c , natomiast istnieje wpływ na czułość poprzez zmiany K , D i d .

Błąd czułości związany ze zmianą geometrii organu pomiarowego oblicza się (dla przypadku, gdy wymiary wzdłużne rurociągu zmieniają się wraz z temperaturą) ze wzoru:

$$\delta_C = (1 + \alpha_1 \Delta T)^3 - 1, \quad (7.13)$$

gdzie: α_1 - współczynnik rozszerzalności liniowej materiału ścianki rurociągu, ΔT - różnica między temperatura rzeczywistą i nominalną.

Gdy wymiary wzdłużne rurociągu nie ulegają zmianie, to:

$$\delta_C = 0,5(1 + \alpha_1 \Delta T)^2 + 0,5(1 + \alpha_1 \Delta T)^4 - 1. \quad (7.14)$$

Dla rurociągu stalowego α_1 wynosi $1,174 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [149] i dla zakresu zmian temperatury $0-50^\circ\text{C}$ przy temperaturze nominalnej 25°C błąd czułości dla obu wyżej przedstawionych przypadków nie będzie większy niż $\pm 0,1$.

W przypadku gdy pożądana jest duża dokładność pomiaru lub temperatura zmienia się w szerokim zakresie, należy w przetworniku przepływomierza wprowadzić do równania odtwarzania wielkości mierzonej (3.58) aktualne wartości D i d obliczone ze wzorów:

$$D = D_0 (1 + \alpha_1 \Delta T) \quad (7.15)$$

$$d = d_0 (1 + \alpha_1 \Delta T) \quad (7.16)$$

gdzie: D_0 i d_0 są wartościami dla temperatury nominalnej.

Błąd czułości zależy również od zmian liczby kształtu wraz z temperaturą. Temperatura wpływa na lepkość wody, a tym samym na liczbę Reynoldsa. Wobec tego, jak to wynika z rys. 3.10, dla przepływu burzliwego w rurze hydraulicznie gładkiej oraz w strefie przejściowej temperatura będzie wpływała na wartość liczby kształtu K . Temperatura wody może być mierzona termometrem lub obliczana na podstawie wyznaczonej prędkości fali ultradźwiękowej w wodzie. Prędkość fali ultradźwiękowej oblicza się ze wzoru:

$$c = \frac{l(t_1 + t_2)}{2t_1 \cdot t_2} \quad (7.17)$$

gdzie: l - długość drogi fali ultradźwiękowej w wodzie, t_1 , t_2 - czasy przeletu fali ultradźwiękowej po drodze l .

W przypadku gdy występują zmiany wymiarów wzdłużnych rurociągu, wartość l oblicza się następująco:

$$l = (1 + \alpha_1 (T - T_0)) (D_0^2 - d_0^2)^{0,5} \quad (7.18)$$

W przypadku gdy nie występują zmiany wymiarów wzdłużnych rurociągu wraz z temperaturą, długość drogi fali ultradźwiękowej wyznacza się ze wzoru:

$$l = (D_0^2 (1 + \alpha_1 (T - T_0))^2 + d_0^2)^{0,5} \quad (7.19)$$

Dla zakresu temperatur wody $0+70^\circ\text{C}$ aproksymowano zależność $T(c)$ na podstawie danych podanych w [121]:

$$T [^\circ\text{C}] = 2.49 \cdot 10^{-3} c^2 - 6,962 c + 4867,7, \quad (7.20)$$

gdzie: c - prędkość fali ultradźwiękowej [m/s].

Korzystając z ogólnej postaci wzoru wiążącego lepkość kinetyczną z temperaturą wody [198, s. 13] oraz z danych w [142, s. 68], ustalono funkcję aproksymującą dla zakresu temperatur $0-70^\circ\text{C}$:

$$\nu = \frac{1,785 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}{1 + 0,0359 T + 0,000164 T^2} \quad (7.21)$$

gdzie: $T [^\circ\text{C}]$ - temperatura wody.

Dla przepływu w rurze hydraulicznie gładkiej w zakresie liczb $Re = 10^4-10^6$ wyznaczono zależność:

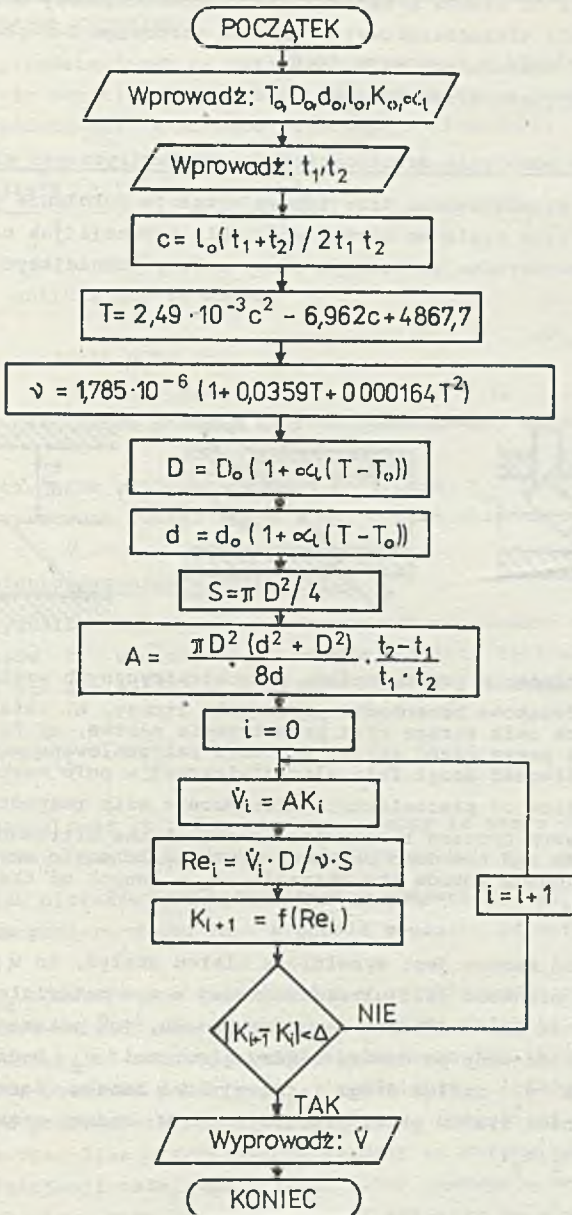
$$K = 0,0164 (\log Re - 4)^{0,698} + 0,928 \quad (7.22)$$

Na rys. 7.3 przedstawiono algorytm wyznaczania wartości K przy zmiennej temperaturze wody. Podobny algorytm został przedstawiony w [240, 241].

7.5. ALGORYTMY WYZNACZANIA CZASÓW PRZEBIEGU FALI ULTRADŹWIĘKOWEJ W WODZIE W RUCHU NA PODSTAWIE WARTOŚCI ZMIERZONYCH

Można wyróżnić trzy przyczyny różnic między czasami przebiegu zmierzonymi w przetworniku pomiarowym a czasami przebiegu fali ultradźwiękowej odpowiadającymi mierzonej prędkości średniej v_1 :

- 1) położenie przetworników elektroakustycznych w strudze lub poza nią,



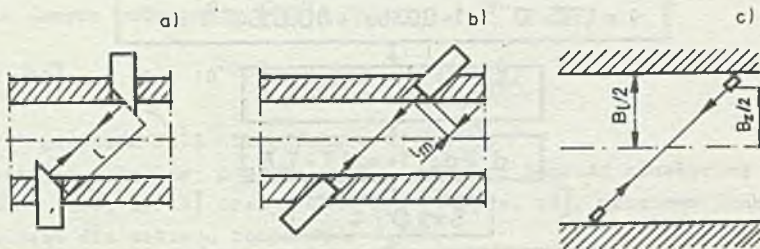
Rys. 7.3. Algorytm wyznaczania wartości K przy zmiennej temperaturze wody
 Fig. 7.3. Algorithm of determining the value of K at variable water temperature

- 2) dodawanie się do czasów przebiegu fali ultradźwiękowej w wodzie czasów przebiegu fali ultradźwiękowej w ścianie rurociągu i w głowicach w przypadku głowic nakładanych na rurociąg,
- 3) opóźnienia sygnału elektrycznego.

7.5.1. Wpływ położenia przetworników piezoelektrycznych względem strugi

Na rys. 7.4 przedstawiono trzy typowe sytuacje położenia przetworników elektroakustycznych względem strugi wody. Dla sytuacji jak na rys. 7.4b zmierzone w przetworniku pomiarowym czasy należy pomniejszyć o wartość t_r :

$$t_r = 2 l_m / c. \quad (7.23)$$



Rys. 7.4. Położenie przetworników piezoelektrycznych względem strugi

- a) fala ultradźwiękowa przechodzi przez całą strugę, b) fala ultradźwiękowa przechodzi przez całą strugę oraz przestrzenie martwe, c) fala ultradźwiękowa przechodzi przez część strugi (głowice zainstalowane wewnątrz kanału), l_m - długość drogi fali ultradźwiękowej w polu martwym

Fig. 7.4. Location of piezoelectric transducers with respect to the stream

- a) ultrasonic wave crosses the whole stream, b) the ultrasonic wave crosses the whole stream and the dead volumes, c) the ultrasonic wave crosses a part of the stream (heads inside the channel), l_m - length of the ultrasonic path within the dead volume

O ile przestrzeń martwa jest wypełniona ciałem stałym, to w miejsce c należy podstawić prędkość fali ultradźwiękowej w tym materiale.

Gdy głowice są zainstalowane wewnątrz kanału, jak pokazano na rys. 7.4c, zmierzona prędkość wody po drodze między głowicami v_z będzie większa niż wartość średnia v_1 wzdłuż drogi łączącej boki kanału. Korekcję uzyskuje się mnożąc różnicę czasów przez współczynnik w będący stosunkiem prędkości średnich v_1/v_z :

$$w = \int_0^{B_1/2} v(b) db : \int_0^{B_z/2} v(b) db. \quad (7.24)$$

7.5.2. Korekcja czasów dla czujnika z głowicami nakładanymi na ściankę rurociągu

W przypadku przedstawionym na rys. 3.13 zmierzone w przetworniku pomiarowym czasy należy zmniejszyć o wartość t_n , to znaczy o sumę czasów przebiegu fali ultradźwiękowej w ściance rurociągu i głowicach:

$$t_n = \frac{2g(\operatorname{tg}^2 \beta_2 - 3) \cdot 1)^{0,5}}{c_2} + \frac{(l_1 + l_4)}{c_1}, \quad (7.25)$$

gdzie: kąt β_2 oblicza się ze wzoru:

$$\beta_2 = \arcsin((\sin \beta_1) c_2 / c_1), \quad (7.26)$$

gdzie: kąt β_1 jest kątem padania fali ultradźwiękowej na ściankę rurociągu w głowicy.

W przypadku czujnika wielowarstwowego [17] czas t_n jest sumą czasów w poszczególnych warstwach (ciała stałe i np. ciecze chłodzące).

7.5.3. Opóźnienia sygnałów elektrycznych

Opóźnienia sygnałów elektrycznych mogą powodować zarówno zwiększenie zmierzonych czasów t_i w stosunku do czasów przelotu fali ultradźwiękowej w wodzie, jak i ich zmniejszenie. Mierzony czas t_i wynosi:

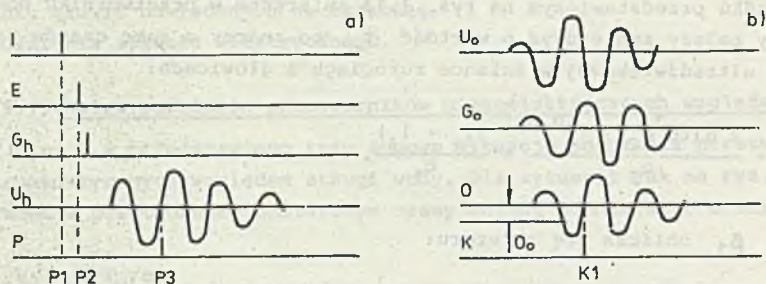
$$t'_i = t_i - \Delta t_{in} + \Delta t_{id}, \quad (7.27)$$

gdzie: t_i oznacza czas t_1 lub t_2 wyznaczony ze wzoru (3.40) lub (3.41) Δt_{in} - różnica czasu między początkiem pomiaru czasu t_i a chwilą początku emisji impulsu ultradźwiękowego z głowicy nadawczej, Δt_{id} - różnica czasu między końcem pomiaru czasu t_i a chwilą początku odbioru impulsu w głowicy odbiorczej.

Różnica Δt_{id} jest zawsze dodatnia lub w granicznym przypadku zbliża się do zera, natomiast wartość Δt_{in} może być zarówno dodatnia, jak i ujemna. Wartość Δt_{in} zależy od różnicy czasów między sygnałem inicjującym nadawanie oraz sygnałem początku pomiaru t_i , opóźnienia w nadajniku, opóźnienia w kablu łączącym przetwornik pomiarowy z głowicą nadawczą i opóźnienia w samej głowicy. Na rys. 7.5a przedstawiono sygnały od strony nadajnika.

Po sygnale inicjacji nadajnika I (rys. 7.5a) następuje emisja sygnału pobudzającego głowicę przez nadajnik. Sygnał początku emisji został oznaczony literą E. Początek sygnału pobudzającego głowicę oznaczono literą G_n , natomiast U_n oznacza sygnał ultradźwiękowy emitowany przez przetwornik piezoelektryczny w głowicy nadawczej. Sygnał P początku pomiaru czasu t_i może być równoczesny z sygnałem inicjacji (P1), równoczesny z sygnałem pobudzającym z nadajnika wysyłanym do kabla łączącego przetwornik pomiarowy

z głowicą nadawczą (P2) lub za późny w stosunku do emisji fali ultradźwiękowej (P3).



Rys. 7.5. Opóźnienia sygnałów po stronie

a) nadawczej, b) odbiorczej

Fig. 7.5. Signal delays

a) at the transmitting side, b) at the receiving side

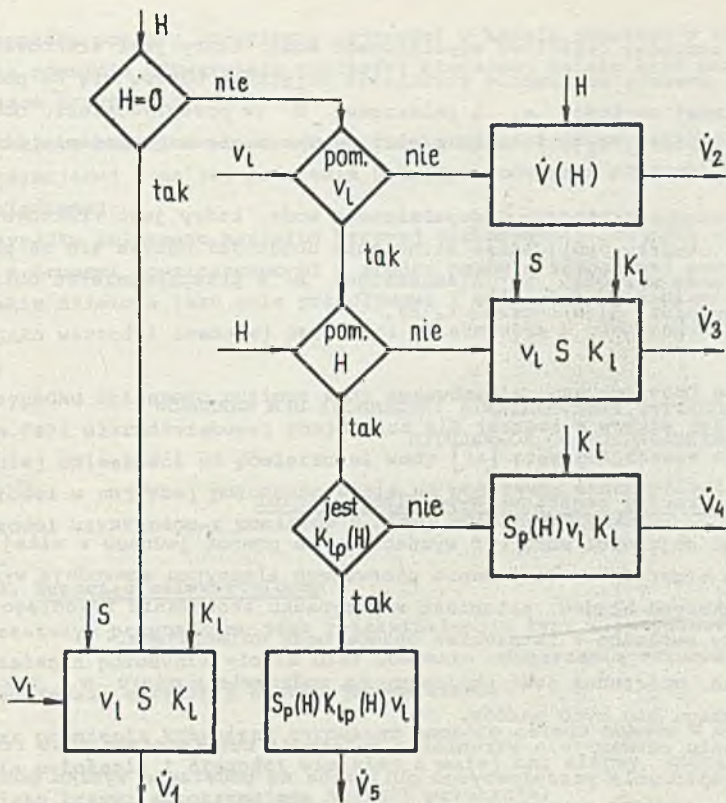
Symbolem U_o (rys. 7.5b) oznaczono sygnał ultradźwiękowy odbierany przez głowicę odbiorczą, G_o oznacza sygnał elektryczny na wyjściu głowicy odbiorczej, natomiast O oznacza sygnał elektryczny na wejściu odbiornika (opóźniony w stosunku do G_o o opóźnienie w kablu i odbiorniku). Symbolem K oznaczono sygnał końca pomiaru czasu t_1 , np. $K1$ oznacza detekcję pierwszego przejścia przez zero po detekcji na poziomie O_o . Najdokładniej czasu t_1 można zmierzyć, gdy sygnał początku pomiaru odpowiadałby określonemu (np. koniec 1,5 lub 2 okresów) przejściu sygnału elektrycznego w głowicy nadawczej przez zero, natomiast sygnał końca odpowiedniej chwili (1,5 lub 2 okresy) sygnału odbieranego. Opóźnienia w obu kablach winny być jednakowe.

7.6. ALGORYTMY PRZETWARZANIA INFORMACJI DLA POMIARU W KANALE O PRZEKROJU KOŁOWYM

Strumień objętości \dot{V} może być odtwarzany na podstawie wyniku pomiaru v_1 (dla rurociągu pełnego lub częściowo wypełnionego wodą), gdy nie jest mierzona wielkość H (rys. 5.7) lub na podstawie wartości v_1 i H . Ponieważ współczynnik czułości K_1 zależy od zmian poziomu wody [53, 84, 217], więc mogą zajść sytuacje przedstawione na rys. 7.6.

Wielkość mierzona \dot{V} jest odtwarzana w różny sposób w zależności od wielkości bezpośrednio mierzonych oraz od znajomości $K(H)$:

\dot{V}_1 - dla rurociągu pełnego znane jest pole przekroju przepływowego równe polu przekroju rurociągu i obliczana jest tylko wielkość v_1 na podstawie wyników pomiarów czasów t_1 i t_2 (pomiar bez błędu metody)



Rys. 7.6. Schemat możliwych algorytmów odtwarzania wielkości mierzonej w przepływomierzu jednorodnym w przypadku rurociągu nie zawsze całkowicie wypełnionego wodą

Fig. 7.6. Scheme of possible algorithms of reproducing the measured quantity in a one-path flowmeter in the case of not always partly-filled pipe with water

\dot{V}_2 - dla rurociągu częściowo wypełnionego wodą obliczenie strumienia objętości odbywa się na podstawie zmierzonej wartości H i uprzednio wyznaczonej krzywej konsumpcyjnej. Błąd wyznaczania \dot{V} może wynikać z histerezy krzywej konsumpcyjnej związanej ze zmianami poziomu lub niestałości krzywej konsumpcyjnej spowodowanej np. wzrostem oporów hydraulicznych.

\dot{V}_3 - dla rurociągu częściowo wypełnionego wodą obliczenie strumienia objętości odbywa się na podstawie uzyskanej wartości v_L i przyjętego pola powierzchni przepływowej S_p , równego $\pi D^2/4$ (co zachodzi tylko dla $H = 0$). Błąd metody wynika z nieuwzględnienia zmian H (a tym samym S_p) oraz zależności K_L od H .

\dot{V}_4 - dla rurociągu częściowo wypełnionego wodą, który jest traktowany jako kanał otwarty obliczenie strumienia objętości odbywa się na podstawie uzyskanej wartości v_1 i zmierzonej H (w przepływowierzu obliczana jest wartość $S_p(H)$). Błąd metody wynika z nieuwzględnienia zależności $K_1(H)$.

\dot{V}_5 - dla rurociągu częściowo wypełnionego wodą, który jest traktowany jako kanał otwarty, obliczenie strumienia objętości odbywa się na podstawie uzyskanej wartości v_1 i zmierzonej H . W przepływowierzu obliczane są wartości $S_p(H)$ oraz $K_1(H)$.

7.7. ALGORYTMY PRZETWARZANIA INFORMACJI DLA WARUNKÓW ODBIEGAJĄCYCH OD NORMALNYCH

7.7.1. Rurociąg częściowo wypełniony osadami

Strumień objętości może być wyznaczony za pomocą jednego z niżej przedstawionych algorytmów. Stosowanie pierwszego algorytmu spowoduje wystąpienie największych błędów, natomiast w przypadku stosowania trzeciego algorytmu błędy związane z istnieniem osadów będą najmniejsze.

- 1) Strumień objętości jest obliczany na podstawie pomiaru v_1 tak, jakby w rurociągu nie było osadów.
- 2) W równaniu odtwarzania strumienia objętości uwzględniana jest rzeczywista wartość pola przepływowego obliczona na podstawie wyniku pomiaru grubości osadów G . Zakłada się, że powierzchnia osadów jest pozioma.
- 3) Strumień objętości jest obliczany z uwzględnieniem rzeczywistej wartości pola przepływowego (obliczonej na podstawie wyniku pomiaru G) oraz przyjętej zależności współczynnika czułości K_1 od grubości osadów G . Głównym źródłem błędu będzie różnica między przyjętą a rzeczywistą zależnością $K_1(G)$.

7.7.2. Zniekształcony rozkład prędkości

W przypadku pomiaru strumienia objętości w rurociągu algorytm ustalania współczynnika czułości będzie następujący:

- 1) stwierdzenie występowania rozkładu prędkości, który nie jest osiowo-symetryczny na podstawie wyników pomiaru $v_1(\theta)$ z zewnątrz rurociągu;
- 2) wyznaczenie wartości K z definicji na podstawie pomiarów punktowych prędkości w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach lub również w średnicach pośrednich. Jeden z kierunków sondowania winien się pokrywać z rzutem drogi fali ultradźwiękowej na płaszczyznę prostopadłą do osi rurociągu;
- 3) w przypadku zniekształconego rozkładu prędkości o zmiennym stopniu i charakterze zniekształcenia zastosowanie czujnika wielodrogowego.

W przypadku pomiaru strumienia objętości w kanale otwartym w algorytmie ustalania równania odtwarzania wielkości mierzonej należy brać pod uwagę następujące przypadki:

- 1) dla stałego kształtu pionowego profilu prędkości identyfikacja krzywej aproksymującej i na jej podstawie ustalenie równania odtwarzania wielkości mierzonej;
- 2) w przypadku zmiennego kształtu krzywej zastosowanie czujnika wielodrogowego z drogami rozmieszczonymi w środku pasów o jednakowej powierzchni, na jakie dzielone jest pole przepływowe i obliczanie strumienia objętości jako wartości średniej prędkości zmierzonych w poszczególnych pasach;
- 3) w przypadku zmiennego poziomu wody sprawdzanie, czy najwyższej położona droga fali ultradźwiękowej znajdująca się jeszcze w wodzie jest w odpowiedniej odległości od powierzchni wody [72] oraz obliczenie strumienia objętości w najwyższym położonym pasie na podstawie ekstrapolacji profilu prędkości uzyskanego z pomiarów w niższych położonych pasach.

7.7.3. Rurociąg zniekształcony

Najczęstszym przypadkiem jest zniekształcenie typu eliptycznego. Algorytm ustalania położenia głowic oraz równania odtwarzania strumienia objętości będzie się składał z następujących etapów:

- 1) pomiar promienia krzywizny rurociągu naokoło całego obwodu w celu wyznaczenia położenia i długości wielkiej i małej osi elipsy, którą wybiera się jako krzywą aproksymującą kształt przekroju;
- 2) zainstalowanie głowic w miejscu wyznaczonym na podstawie wykresu przedstawionym na rys. 4.7b;
- 3) o ile instalacja głowic według zalecenia podanego wyżej jest niemożliwa ze względów technicznych, należy wyznaczyć rzeczywistą wartość współczynnika czułości i wprowadzić ją do równania odtwarzania wielkości mierzonej.

8. PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy wyniki badań teoretycznych, uzupełnione doświadczeniem autora zebranych podczas wielu badań laboratoryjnych i polowych pozwalają sformułować istotne zagadnienia pomiaru strumienia objętości wody przepływomierzami ultradźwiękowymi:

- 1) Dokładne poznanie obiektu, jakim jest strumień objętości wody w rurociągu czy kanale otwartym oraz warunków, jakie będą wpływały na kształt rozkładu prędkości w czasie stosowania przepływomierza.
- 2) Wyznaczenie modelu matematycznego organu pomiarowego i przetwornika pomiarowego przepływomierza. Przy wyznaczaniu modelu matematycznego organu pomiarowego należy zwrócić uwagę na zmienność rozkładu prędkości, dobór odpowiedniego wzoru aproksymującego rozkład prędkości oraz wybór liczby dróg i ich rozmieszczenie.

Oryginalnym dorobkiem autora jest sformułowanie warunków, jakie powinny spełniać wzory opisujące rozkład prędkości w rurociągu oraz zaproponowanie prostego wzoru spełniającego te warunki i bardziej odpowiadającego rzeczywistym rozkładom prędkości niż powszechnie stosowany wzór potęgowy Prandtla. Autor podał również wzór dobrze przybliżający profil prędkości w płaszczyźnie poziomej w kanale otwartym oraz zaproponował trzy modele opisujące rozkład prędkości w kanale o przekroju kołowym.

- 3) W przypadku normalnych warunków stosowania przepływomierza ultradźwiękowego ustalenie równania odtwarzania wielkości mierzonej nie przedstawia zbyt trudności i dla przepływomierzy jednodrogowych z głowicami zainstalowanymi w ścianie rurociągu należy posługiwać się opracowaną przez autora pracy normą [147]. W normie tej podano metodykę wzorcowania pośredniego, a w jej ramach sposób szacowania błędu pomiaru. Podana w normie metodyka może być podstawą do szacowania błędu pomiaru strumienia objętości dla innych typów przepływomierzy (wielodrogowe, z głowicami nakładanymi, dla kanałów otwartych). Oryginalnym dorobkiem autora jest opracowanie wykresu zależności współczynnika kształtu rozkładu prędkości w rurociągu od liczby Reynoldsa i chropowatości względnej powierzchni wewnętrznej ścianki rurociągu.
- 4) Stosowanie przepływomierza ultradźwiękowego w warunkach odbiegających od normalnych wymaga każdorazowo wnikliwego badania (na ogół zarówno teoretycznego, jak i doświadczalnego) obiektu pomiaru z uwzględnieniem wielkości wpływających. Celem tych badań jest ustalenie modelu matematycznego zawierającego zarówno równanie przetwarzania, jak i algorytm odtwa-

rzania wielkości mierzonej. Oryginalnym dorobkiem autora jest podanie zasady tworzenia modeli zniekształconych rozkładów prędkości oraz podanie przykładów opisu zniekształconych rozkładów prędkości. Korzystając z tych modeli, autor wyznaczył wzory na współczynniki czułości. Dalszym oryginalnym dorobkiem autora jest wprowadzenie pojęcia granicznych rozkładów prędkości, co pomogło w analizie pracy przepływomierza w warunkach odbiegających od normalnych (rurociąg częściowo wypełniony osadami i o przekroju odbiegającym od kołowego).

- 5) Zebrany na podstawie literatury przegląd właściwości metrologicznych ma znaczenie praktyczne dla użytkowników przepływomierzy ultradźwiękowych. Zaproponowane przez autora algorytmy odtwarzania wielkości mierzonej wymagają użycia wbudowanego w przetwornik pomiarowy mikroprocesora lub zastosowania minikomputera przetwarzającego informację z wielu przepływomierzy.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

a	- wymiar charakterystyczny rurociągu o kształcie przekroju odbiegającym od kołowego	rys. 4.3
b	- wymiar charakterystyczny rurociągu o kształcie przekroju odbiegającym od kołowego	rys. 4.3
b	- pozioma współrzędna bieżąca w kanale otwartym	rys. 5.1
B	- szerokość kanału otwartego	rys. 5.1
c	- prędkość fali ultradźwiękowej	wz. (2.3)
c_1	- prędkość fali ultradźwiękowej podłużnej	wz. (2.1)
c_t	- prędkość fali ultradźwiękowej poprzecznej	wz. (2.2)
d	- rzut odległości na oś rurociągu	rys. 3.9
D	- średnica wewnętrzna rurociągu	rys. 3.9
f	- częstotliwość fali ultradźwiękowej	wz. (2.7)
g	- grubość ścianki rurociągu	rys. 3.13
G	- grubość warstwy osadu na dnie rurociągu	rys. 4.1
h	- współrzędna bieżąca w kanale otwartym liczona od powierzchni wody	rys. 5.1
h_o	- głębokość, na której prędkość wody w kanale otwartym jest maksymalna	wz. (5.4)
H	- wysokość poziomu wody (mierzona od dna kanału otwartego)	rys. 5.1
I	- spadek hydrauliczny	wz. (5.4)
k	- chropowatość bezwzględna	wz. (3.16)
K	- liczba kształtu (współczynnik kształtu rozkładu prędkości)	wz. (3.54)
K_1	- współczynnik czułości	wz. (3.44)
l	- długość drogi fali ultradźwiękowej	rys. 3.6
m	- wykładnik we wzorze (3.14) modelującym rozkład prędkości	wz. (3.14)
m	- współczynnik eksperymentalny zależny od chropowatości kanału otwartego	wz. (5.4)

n	- odwrotność wykładnika we wzorze Prandtla	wz. (3.6)
r	- promień bieżący	rys. 3.1
r_{oi}	- odległość i-tej drogi fali ultradźwiękowej od średnicy rurociągu	rys. 3.16
R	- promień wewnętrzny rurociągu	rys. 3.1
Re	- liczba Reynoldsa	wz. (3.7)
S	- pole przekroju rurociągu	wz. (3.53)
S_p	- pole przekroju przepływowego	wz. (5.30)
S_i	- pole przekroju i-tego pasa w organie pomiarowym wielodrogowym	rys. 3.16
t	- czas przelotu fali ultradźwiękowej	wz. (2.14)
T	- temperatura	wz. (2.4)
v	- prędkość wody	(rys. 2.1)
v_d	- prędkość dynamiczna	wz. (3.17)
v_d	- prędkość wody na dnie kanału otwartego	wz. (5.5)
v_l	- prędkość wody średnia po drodze fali ultradźwiękowej ..	wz. (3.52)
v_s	- prędkość wody średnia po przekroju poprzecznym rurociągu lub po polu przepływowym	wz. (3.53)
w	- współrzędna bieżąca liczona od dna kanału otwartego ...	rys. 5.4
α	- kąt między drogą fali ultradźwiękowej a osią rurociągu lub kanału otwartego	rys. 5.1
α	- kąt między tworzącą stożka pola dalekiego a prostą prostopadłą do powierzchni promieniującej	rys. 2.7
α_c	- współczynnik tłumienia	wz. (2.6)
β	- kąt padania, załamania lub odbicia fali ultradźwiękowej	rys. 2.8
δ	- błąd względny	
Δ	- błąd bezwzględny, różnica wielkości	
η	- lepkość dynamiczna	wz. (2.7)
ϑ	- współrzędna katowa	rys. 3.5
λ	- długość fali ultradźwiękowej	wz. (2.7)
λ	- liniowy współczynnik oporu (współczynnik tarcia rurociągu)	wz. (3.3)
ν	- liczba Poissona	wz. (2.1)
ν	- lepkość kinetyczna	wz. (7.21)
ρ	- gęstość	wz. (2.1)

WSKAŹNIKI DOLNE

- b - dotyczy przepływu burzliwego
- m - maksymalna wartość
- o - warunki odniesienia
- o - miejsce początkowe
- u - dotyczy przepływu uwarstwionego
- x - miejsce x

LITERATURA

1. Al-Khazraji Y.A., Al-Rabeh R.H., Baker R.C., Hemp J.: Comparison of the effect of a distorted profile on electromagnetic, ultrasonic and differential pressure flowmeters, Proceedings of FLOMEKO 1978, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1978, s. 215-222.
2. ANSI/ASME MFC-5M-1985, Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits Using Transit-Time Ultrasonic Flowmeters, An American National Standard, s. 1-14.
3. Antonov N.N., Boricevič E.A., Dmitriev E.V., Rešetnikov V.A., Safin A.G.: Mnogokanal'nyj ul'trazvukovoj raschodomer, Izmeritel'naja Technika, 1979, nr 10, s. 43-44.
4. Antonov N.N., Dmitriev E.V., Rešetnikov V.A., Safin A.G.: Mnogokanal'nyj častno-vremennoj ul'trazvukovoj raschodomer, Izmeritel'naja Technika, 1976, nr 8, s. 45.
5. Antonov N.N., Klimačev A.F., Rešetnikov V.A., Safin A.G.: Peresčet charakteristik ul'trazvukovych raschodomerov, Izmeritel'naja Technika, 1979, nr 10, s. 39-40.
6. Antonov N.N.: Mnogokanal'nyj ul'trazvukovoj raschodomer, Izmeritel'naja Technika, tom XXXVII, 1979, nr 10, s. 43-44.
7. Antonov N.N., Safin A.G., Kolmakov I.A.: Opredelenie vremeni rasprostraneniya signala ot izlučatelja do priemnika v ul'trazvukovom raschodome-re, Trudy metrologičeskich institutov SSSR, vypusk 182 /242/, Izdatel'stvo standartov, Moskva, 1977, s. 60-67.
8. Bailey S.J.: Computer Enhanced Metering Results In Better Flow Control, Control Engineering, Feb. 1983, vol. 30, nr 2, s. 71-75.
9. Bajš L.G., Rapaport R.I.: Ob ocenke obščej pogrešnosti sredstv izmerezhenija v eksploatacionnyh uslovijach, Trudy metrologičeskich institutov SSSR, Vypusk nr 135 /195/, Izdatel'stvo standartov, Moskva-Kazan', 1972, s. 272-273.
10. Ball K.E.; Fluid Dynamics: So Familiar, So Obscure. The International Journal of Instrumentation and Control, vol. 33, Number 12, Dec. 1986, s. 9-12.
11. Baumel J.: Application considerations and performance capability of the time differential clamp-on ultrasonic flowmeter, Proceedings of the Symposium on Flow Measurement in Open Channels and Closed Conduits. National Bureau of Standards, Gaithersburg, 1977, s. 267-276.
12. Baumel J.: Comparative analysis of controlotron clamp-on ultrasonic flowmeter performance. Proceedings of ISA's Industry Oriented Conference and Exhibit, Milwaukee, 1975. Instrument Society of America, Pittsburgh, 1975.
13. Baumel J.: Ultrasonic flowmeter senses liquid flow from outside of pipe. Canadian Pulp and Paper Industry, 1976, vol. 30, nr 3, s. 34-36.
14. Benedict R.P., Wyler H.: Determining flow rate from velocity measurement use fluid dynamics to calculate in-line flow. 1974 Instrum. and Control Systems, 1974, vol. 47, nr 2, s. 47-50, Ekspres-informacija, KIT, nr 28, 1974, s. 10-17.
15. Bernard H.: Ultraschall-durchflussmessung. Messen Prüfen Automatisieren, Dezember 1985, s. 676-681.

16. Bernard H.: Ultraschall-Durchflußmessung, Messen+Prüfen, 19 Jahr, Heft 5, Mai 1983, s. 258-263.
17. Birger G.I., Bražnikov N.I.: Ul'trazvukovye raschodometry, Metallurgija, Moskva, 1964.
18. Birger G.I.: Elementy obščej teorii ul'trazvukovyh raschodomerov. Izmeritel'naja Technika, 1961, nr 4, s. 42-48.
19. Birger G.I.: Nekotoryje voprosy graduirovki ul'trazvukovyh raschodomerov. Izmeritel'naja Technika. 1962, nr 10, s. 53-55.
20. Bobrovnikov G.N., Sarafanov V.G.: O liniejnosti vychodnoj charakteristiki ul'trazvukovyh raschodomerov, Izmeritel'naja Technika, 1977, nr 5, s. 63-64.
21. Bonfig K.W.: Technische Durchflussmessung. Vulkan-Verlag, Essen, 1977.
22. Bonfig K.W.: Wirbelfrequenz-Durchflußmessung, Messen und Prüfen. 1978, nr 12, s. 954-856, 959.
23. Botma H.C.: Acoustic Flow Meter for Use with Hydraulic Models, Flow Measurement Proceedings of FLOMEKO 1978, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford 1978, s. 385-390.
24. Brand F.L.: Akustische Verfahren zur Durchflussmessung, Messen Prüfen Automatisieren, April 1987, s. 198-205.
25. Brandt F.L.: Akustische Verfahren zur Durchflußmessung, VDI-Berichte 254, Durchfluß-Meßtechnik, Tagung Düsseldorf, 1976, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1975, s. 107-123.
26. Bražnikov N.I.: Beskontaktnye akustičeskie izmeritel'nye preobrazovately ul'trazvukovyh raschodomerov. Izmeritel'naja Technika, 1965, nr 10, s. 26-31.
27. Bražnikov N.I.: Teoretičeskij analiz osnovnyh parametrov ul'trazvukovyh raschodomerov. Izmeritel'naja Technika, 1966, nr 8, s. 57-62.
28. Bražnikov H.I.: Ul'trazvukovoj fazovyy dvuchkanal'nyj raschodomer UZR-1. Pribory i Sistemy Upravlenija, 1972, nr 11, s. 13-14.
29. Brody W.R., Meindl J.D.: Theoretical Analysis of the CW Doppler Ultrasonic Flowmeter. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1974, BME-21, nr 3, s. 183-192. Teoretičeskij analiz dopplerovskogo ul'trazvukovo raschodomera, Ekspres-Infomacija, KIT, 1974, nr 34.
30. Brown A.E., Allen G.W.: Ultrasonic Flow Measurement, Instruments and Control Systems, 1967, vol. 40, nr 3, s. 130-134.
31. Bruner R.F.: Theoretical and experimental assessment of uncertainties in non-instrusive, ultrasonic flow measurement, Proceedings of the Symposium on Flow Measurement in Open Channels and Closed Conduits, National Bureau of Standards, Gaithersburg, 1977, s. 277-291.
32. BS 3680: Part 3E: 1986, Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method.
33. Bukowski J.: Mechanika płynów. PWN, Warszawa 1975.
34. De Carlo J.P.: Fundamentals of flow measurement, Instrument Society of America, Research Triangle Park, 1984.
35. Chow te Ven: Open-Channel hydraulics, Mc Graw-Hill Book Company, Inc., New York, Toronto, London 1959.
36. Coulthard J.: The principle of ultrasonic crosscorrelation flowmetering. Measurement and Control, 1975, vol. 8, nr 2, s. 65-70. Ul'trazvukovoj metod izmerenija raschoda židkosti ili gaza na osnovie principa vzaimnoj korreljacii. Ekspres-Infomacija, KIT, 1975, nr 15.
37. Cousins T.: The Doppler ultrasonic flowmeter. Proceedings of FLOMEKO 1978, North-Holland Publishing Company, Amsterdam New York, Oxford, 1978, s. 513-518.
38. Crest Electronics, Southport, Wielka Brytania, 1983, materiały firmy.

39. Czetwertyński E., Utrysko B.: *Hydraulika i hydromechanika*. PWN, Warszawa 1969.
40. D 3857-79 (Reapproved 1984), Measurement of water velocity in open channels by acoustic means, 1987 Annual Book of ASTM Standards, Volume 11.01 Water (I), s. 98-103.
41. D 4408-84, Open channel flow measurement by acoustic means, 1987 Annual Book of ASTM Standards, vol. 11.01 Water (I), s. 112-119.
42. Dahlke H., Welkowitz W.: A New Ultrasonic Flowmeter for Industry, *ISA Journal*, vol. 7, nr 10, s. 50-63.
43. Danfos, Nordborg, Dania, 1983, Electronic measurement of liquid flow, materiały firmy.
44. Demarais J.C.: Débitmètre à ultrasons pour la mesure de débits de liquides, *Mesures régulation automatisme*, 1978, nr 6/7, s. 55-65.
45. Dorden Dž.: Charakteristiki izmerenij stacionarnogo i niestacionarnogo raschoda i eksploatacionnye charakteristiki ul'trazvukovogo raschodomera. VIII Kongress IMEKO, Moskwa, 1979, Preprint nr 12: Izmereniya skorosti i raschoda, s. 42.51.
46. Drenthen J.C., Builtjes P.J.H., Vermeulen P.E.J.: The Accuracy of the Total Discharge Determined by Acoustical Velocity Measurement, *Flow Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 2, ISA, Research Triangle Park, USA, 1981, s. 531-549.
47. Erickson G., Bistrrian J.M.: Application of ultrasonic flowmeters to hydroelectric plant flow measurements, FLOMEKO'85, International Conference on Flow Measurement, Sponsored by IMEKO-TC9, Melbourne, 20-23.VIII. 1985, Editor: E.A. Spencer, OBE, Bedford, 1985, s. 181-186.
48. Fischbacher R.E.: The ultrasonic flowmeter. *Transaction of the Society of Instrument. Technology*, 1959, vol. 11, nr 2, s. 114-119.
49. Fischer S.G., Spink P.G.: Ultrasonics as a standard for volumetric flow measurement. Modern developments in flow measurement, Peter Peregrinus, Harwell, 1972, s. 139-159.
50. Froněk V.: Ultrasonic measurement of oil flow in a laminar flow - turbulent flow transition region. *Proceedings of FLOMEKO 1978*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1978, s. 141-146.
51. Garšin P.A., Tupičenkov A.A.: Matematičeskaja model' tečenija v diafragme. *Trudy metrologičeskich institutov SSSR*, vypusk 182 (242), Izdatel'stvo standartov, Moskva, 1977, s. 68-73.
52. Gätke J.: Volumenstrommessung in geraden zylindrischen Rohren mit Hilfe akustischer Strömungsgeschwindigkeitsmesser, *msr*, Berlin 29, nr 4, 1986, s. 161-168.
53. Gätke J.: Zur Durchflußmessung an geradlinigen Gerinnen mit kreisförmigen Querschnitt, *msr*, Berlin 30, nr 10, 1987, s. 463-469.
54. Gazetov S.P.: Odnokanal'nyj ul'trazvukovoj raschodomer s častotno-impul'snym detektorom. *Izmeritel'naja Technika*, 1975, nr 10, s. 45-47.
55. Gendeal Limited, Walton-on-Thames, Wielka Brytania, informacja firmy, *Control and Instrumentation*, vol. 15, 1983, nr 7, s. 55.
56. Gerard D.: Multi-path flowmeters give sound readings, *Control and Instrumentation*, December 1985, s. 29-31, 33.
57. Gerrard D.: The many benefits of ultrasonic flowmeters, *Control and Instrumentation*, vol. 15, 1983, nr 7, s. 51, 53.
58. Gerrard D.: Ultrasonic flowmetering has come of age. *Process Engineering*, 1978, nr 12, s. 39, 41.
59. Gersgal D.A., Fridman V.M.: Ul'trazvukovaja technologičeskaja apparatura. *Energija*, Moskva, 1976.
60. Grabarczyk C.: Kryteria rozstrzygające strefę przepływu w rurociągach, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, tom XLVII, nr 3, 1973, s. 86-89.

61. Grabarczyk Cz., Szymaczek E.: Podstawowe typy zadań hydraulicznego obliczania przewodów. *Gaz, Woda, Technika Sanitarna*, Tom XLVII, 1973, nr 2, s. 52-54.
62. Grabarczyk Cz.: Wyznaczanie wartości współczynnika liniowego oporu hydraulicznego dla przejściowej strefy burzliwego przepływu w rurach chropowatych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 1974, nr 2, s. 34-38.
63. Del Grosso V.A., Mader C.W.: Speed of Sound in Pure Water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1972, vol. 52, nr 5, (część 2), November 1972.
64. Del Grosso V.A.: New equation for the speed of sound in natural waters (with comparison to other equations). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, vol. 56, nr 4, s. 1084-1091.
65. Gryboś R.: *Mechanika płynów*. Skrypty uczelniane nr 1433, Politechnika Śląska, Gliwice 1989.
66. Hagel M.: Model matematyczny przepływomierza ultradźwiękowego. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 1978, nr 8, s. 239-241.
67. Hagel M., Waluś S.: Koncepcja wielodrogowych przepływomierzy ultradźwiękowych dla kanałów otwartych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* nr 847, seria: Automatyka zesz. 78, Gliwice 1985, s. 189-204.
68. Halliday R.A., Archer W.M., Campbell P.I.: The Niagara River Acoustic Streamflow Measurement System, *Proceedings of the International Seminar and Exposition on Water Resources Instrumentation*, June 4-6, 1974, Chicago, USA, s. 109-128.
69. Hall J.: Solving tough flow monitoring problems, *Instruments- and Control Systems*, Feb. 1980, vol. 53, nr 2, s. 41-46.
70. Halttunen J., Luntta E.: Electromagnetic flowmeter in district heat metering. *Preprints of the International Symposium on District Heat Metering*, 4-5 XI 1987, Lund, Sveden, s. 1-14.
71. Herschy R.W., Green M.J.: Site calibration of electromagnetic and ultrasonic river gauging stations, *Modern Developments in Hydrometry, Proceedings of the International Seminar convened by the World Metrological Organization*, Padua, Włochy, 8-13 September 1975, s. 209.
72. Herschy R.W.: Open channel flow, *Artykuł w książce: Developments in Flow Measurement - 1*, edited by R.W.W. Scott, Flow Measurement Division, National Engineering Laboratory, East Kilbridge, Glasgow, 1982.
73. Herschy R.W.: *The Ultrasonic Method of River Gauging*, Water Services, June 1974, s. 198-200.
74. Hinze J.O.: *Turbulence. An Introduction to Its Mechanism and Theory*, Mc Graw Hill Book Company, Inc., New York, Toronto, London 1959.
75. Hoene E.: Ultrasonic flowmeter. *Proceedings of FLOMEKO 1978*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, s. 147-151.
76. International Ultrasonic Inc. USA, Ultrasonic flowmeter, *Informacja firmowa*, Oil and Gas Journal, 1962, vol. 60, nr 3, s. 121.
77. ISO 4006-1977, Measurement of fluid flow in closed conduits - Vocabulary and symbols.
78. ISO 6416 : 1985, Liquid flow measurement in open channels, Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method.
79. ISO 6418 : 1985, Liquid flow measurement in open channels, Ultrasonic (acoustic) velocity meters.
80. ISO 7194. Measurement of fluid flow in closed conduits - Velocity - area methods of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of currentmeters or pitot static tubes, 1983.
81. Ivanov A.A., Rešetnikov W.A.: Metodičeskie pogrešnosti izmerenija pul'sirujuščich raschodov fazovymi ul'trazvukovymi raschodomerami. *Izmeritel'naja Technika*, 1976, nr 8, s. 46-47.

82. Kabza Z.: Modele matematyczne przepływomierzy zwężkowych. Prace Naukowe Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Seria: Monografie, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1977.
83. Kämäräinen V.J., Hiismäki P., Knuttila M., Viitanen P.: Flow measurement with radiotracers and acoustic methods, 2nd International Conference on Flow Measurement, London, UK: 11-13 May 1988, Paper F2, s.173-186.
84. Kamińska H., Waluś S.: Błędy jednodrogowego przepływomierza ultradźwiękowego występujące przy niecałkowitym wypełnieniu rurociągu cieczą. Symposium Metrologia '86, Warszawa, 11-13.VI.1986, CUP MiSP, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1986, Tom II, s. 62-71.
85. Katys G.P.: Sistemy avtomatičeskogo kontrolja polej skorostej i raschodov, Izdatel'stvo "Nauka", Moskva 1965.
86. Kent Industrial Measurement, Wielka Brytania 1988, informacja firmy.
87. Kivilis S.S., Rešetnikov V.A.: Vlijanije profilja ustanovivsegojsja potoka na pogrešnost' ul'trazvukovyh raschodomerov. Izmeritel'naja Technika, 1965, nr 3, s. 52-54.
88. Kluge Hm.: Gibt es Alternativen zur konventionellen Mengen- und Durchflußmeßtechnik? MSR, vol. 27, 1985, nr 4, s. 146-151.
89. Knapp C.: Geschwindigkeits- und Mengenmessung strömender Flüssigkeiten mit Ultraschall, VDI Berichte, 86, Durchflußmessung Offene Probleme Neuere Methoden. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1964, s. 65-71.
90. Kołodziej K., Wawrzyniak R., Waluś S.: Ultradźwiękowy przepływomierz-wodomierz UMP-10. PAK, nr 6, 1983, ss. 181-183.
91. Kremlevskij P.P.: Raschodomery i Źčetčiki količestva, Mašinostrojenije, Leningrad 1975.
92. Krest'janinov A.V.: Puti povyšeniya točnosti izmereniya raschoda i količestva veščestv, Trudy metrologičeskich institutov SSSR, vypusk nr 135 (195), Izdatel'stvo standartov, Moskva-Kazan', 1972, s. 16-19.
93. Krigman A.: Flow Measurement: A State of Flux, Instrumentation Technology, Oct. 1984, s. 9-13.
94. Krohne Meßtechnik GmbH Co KG, Duisburg, RFN, 1987, materiały firmowe.
95. Kühlein H., Stark R., Meß- und Prüftechnik eines Ultraschall-Wärmezählers, Preprints of the International Symposium on District Heat Metering, 4-5 November 1987, Lund, Sveden, s. 1-10.
96. Lanning C.C., Ehrhart R.W.: Application of Acoustic Velocity Flowmeters, Journal American Water Works Association, 1977, nr 2, s. 102-105.
97. Larsen J.: Ultrasonic flowmetering in district heating systems - Experiences in Scandinavia and Switzerland, Preprints of the International Symposium on District Heat Metering, 4-5 November 1987, Lund, Sveden.
98. Lauer R.: Ultraschall-Messgerät für gasgeschwindigkeiten, Messen Prüfen Automatisieren, Dezember 1985, s. 682-685.
99. Lautrich R.: Tabellen und Tafeln zur hydraulischen Berechnung von Druckrohrleitungen Abwasserkanalen und Rinnen, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 1976.
100. Lechner H.: Ultrasonic flow metering based on transit time differentials which are insensitive to flow profile, J. Acoust. Soc. Am., 74(3), September 1983, s. 955-959.
101. Leszczyński M.: Pomiary przepływu - przegląd nowych metod. Przemysł chemiczny w świecie, tom VII, nr 20 (145), s. 11-13.
102. Liptak B.G., Kamiński R.K.: Ultrasonic instruments for level and flow, Instrumentation Technology, 1974, vol. 21, nr 9, s. 49-59. Ekspres-informacja, KIT, 1975, nr 7.
103. Lobačev P.V., Mjasnikov V.I.: Sniženiye gidrodinamičeskoy pogrešnosti ul'trazvukovyh raschodomerov, Izmeritel'naja Technika, t. XL, 1981, nr 11, s. 38-39.

104. Lobačev P.V., Mjasnikov V.I.: Vlijanie šerochovatosti podvodjaščich truboprovodov na pokazanija ul'trazvukovyh raschodomerov, Izmeritel'naja Technika, 1980, nr 12, s. 53-54.
105. Loosemore W.R., Muston A.H.: A new ultrasonic flowmeter, Ultrasonics, 1969, vol. 7, s. 43-45.
106. Loosemore R.W.: Ultrasonic river gauging. Seminarium World Metrological Organization, Modern Developments in Hydrometry 8-13.IX.1975, Padua, vol. II.
107. Lowell F.C.: Acoustic Flowmeters for Open Channels: Designing to Meet a Specified Accuracy, Flow Measurement of Fluids, Proceedings of FLO-MEKO 1978, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1978, s. 371-378.
108. Lynnworth L.C.: Clamp-on ultrasonic flowmeters, Instrumentation Technology, 1975, vol. 22, nr 9, s. 37-44. Ekspres-informacija, KIT, 1976, nr 11.
109. Malone D.P.: Slurry Flow Measurement: A Case History, International Instrumentation, Nov, 1985, s. 59-61.
110. Marcyniuk A.: Teoria pomiaru. Podstawy metrologicznej interpretacji wyniku pomiaru. Politechnika Śląska, Gliwice 1977, Skrypt uczelniany nr 687.
111. Matuschek J.: Technika ultradźwięków. WNT, Warszawa 1961.
112. Medlock R.S.: The techniques of flow measurement (Part 1), Measurement and Control, vol. 15, Dec. 1982, s. 458-463.
113. Medlock R.S.: The techniques of flow measurement (Part 2), Measurement and Control, vol. 16, Jan. 1983, s. 9-13.
114. Merrit R.: Flow monitoring update, Instruments and Control Systems, Feb. 1982, vol. 55, nr 2, s. 43-49.
115. de Montaigne J.: Mesure des débits liquides: le débitmètre a'ultrasons. Electronique et applications industrielles, 1978, nr 12, s. 17-19.
116. Morris H.: Ultrasonic Flowmeter Uses Wide Beam Technique to Measure Flow, Control Engineering, July 1980, vol. 27, nr 7, s. 99-101.
117. Morris H.M.: What's Available in Ultrasonic Flowmeters, Control Engineering. 1979, nr 8, s. 41-45.
118. Nolan M.E., O'Hair J.G. An ultrasonic flowmeter for the accurate measurement of high pressure gas flows. Proceedings of FLOMEKO 1983, IMEKO Conference on Flow Measurements, Budapest, Hungary, September 20-22, 1983, E.A. Spencer, Akademiai Kiado, Budapest, 1984, s. 147-155.
119. Novamed Société Anonyme, Lausanne, Szwajcaria, 1985, Materiały firmy.
120. Obraz J., Froněk V., Bartoš O.: Ultrasonic measurement of cooling water flow. Czechoslovak Heavy Industry, 1970, nr 4, s. 20-28.
121. Obraz J.: Ultradźwięki w technice pomiarowej. WNT, Warszawa 1983.
122. Opie R.: Looking back at flow theory, Control and Instrumentation, Feb. 1988, s. 39, 41.
123. Orzechowski Z.: Mechanika płynów. Skrypty dla szkół wyższych, Politechnika Łódzka, Łódź 1975.
124. Panametrics Limited, Shannon, Irlandia, 1988, Materiały firmowe.
125. Patent nr 1 341 581, Ultrasonic flow-velocity meters, Int. Cl. G 01P5/00G0159/66.
Tamura K., Japonia, Filed 17 June 1971, Complete Specification published 28 Dec. 1973, s. 1-5.
126. Patent. Polska, nr 124 390, Sposób i urządzenie do pomiaru prędkości przepływu cieczy, Nnt. Cl. G01F 1/66, G01P 5/00, Kołodziej K., Polska, zgłoszono 15.07.1980, Opis patentowy opublikowano 30.04.1984.

127. Patent. Wielka Brytania. nr 1 344 106, Ultrasonic flowmeter systems, Int. Cl. GO1P 5/00, Westinghouse Electric Corporation, USA, Field 6 March 1970, Complete Specification published 16 Jan. 1974, s. 1-20.
128. Patent. Wielka Brytania, nr 2 167 857 A, Ultrasonic Gas Flow metering apparatus, Int. Cl. GO1F 1/66, Redding R.J., Miessler M.H., Wielka Brytania, Date of filing 22 Nov. 1985, Application published 4 June 1986, s. 1-11.
129. Patent. USA, nr 2 923 155, Ultrasonic Flowmeter, Welkowitz W., USA, Field Nov. 20, 1956, Patented Feb. 2, 1960, s. 1-3.
130. Patent USA, nr 2 959 054, Ultrasonic Flowmeter, Welkowitz W., USA, Filed Jan. 14, 1957, Patented Nov. 8, 1960, s. 1-6.
131. Patent. USA nr 2 999 650, Sonic flow meter, Katzenstein H.S. Katzenstein J., filed Mar. 7, 1956, patented Juli 11, 1961.
132. Patent. USA, nr 3 564 912, Fluid flow measurement system, Int. Cl. GO1P 5/00, Malone J.T., Whirlow D.K., USA, Field Oct. 28, 1968, Patented Feb. 23. 1971, s. 1-8.
133. Patent. USA, nr 4 257 275, Velocity detecting apparatus, Int. Cl. GO1F 1/70, GO1P 5/18, Kurita Y., Shibata Y., Japonia, Field Sep. 4, 1979, Date of Patent Mar. 24, 1981, s. 1-9.
134. Patent. USA nr 4 483 202, Ultrasonic flowmeter, Int. Cl. GO1F 1/66, Ogura I., Itoh A., Japonia, Field Mar. 29, 1983, Date of Patent Nov. 20, 1984, s. 1-13.
135. Patent. USA, nr 4633 719, Digital flow meter circuit and method for measuring flow, Int. Cl. GO1F 1/66, Heyden W.H.V., USA, Field Mar. 27, 1985, Date of Patent Jan. 6. 1987, s. 1-20.
136. Patent. USA, nr 4 663 977, Sonic measurement of gas flow, Int. Cl. GO1F 1/66, Heyden W.H.V., USA, Field Jan. 3, 1986, Date of Patent May 12, 1987, s. 1-18.
137. Pederson N.E., Lynnworth L.C., - Nonintrusive dynamic flowmeter, 1973 Ultrasonic Symposium Proceedings, Monterey, California, Paper B1, Nov. 5-7, 1973.
138. Peronneau P.A., Hinglais J.R., Leger F.: Velocimetre ultrasonore Doppler a impulsions mesure des velocites et des debits determination des profils d'ecoulement. IMEKO V, Budapest, 25-30.V.1970, Versailles, B-502.
139. Piotrowski J.: Podstawy metrologii. PWN, Warszawa 1976.
140. Piotrowski J.: Pomiar przepływu wody w rurociągach w systemie wodno-gospodarczym. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej nr 611, Seria: Automatyka zesz. 48, ss. 137-156, Gliwice 1979.
141. Piotrowski J.: Teoria pomiarów. PWN, Warszawa 1986.
142. PN-65/M-53950. Pomiar natężenia przepływu płynów za pomocą zwęzek. WN, Warszawa 1970.
143. PN-71/N-02050. Metrologia. Nazwy i określenia. WN, Warszawa 1972.
144. PN-73/M-04251. Struktura geometryczna powierzchni. Określenia podstawowe i parametry. WN, Warszawa 1974.
145. PN-79/H-74244. Rury stalowe ze szwem przewodowe. WN, Warszawa 1979.
146. PN-81/M-42366. Pomiar przepływu płynu. Pomiar strumienia objętości metodami całkowania bryły prędkości. WN, Warszawa 1981.
147. PN-86/M-42370. Pomiar strumienia objętości cieczy w rurociągach za pomocą przepływomierzy ultradźwiękowych. Przepływomierze działające na zasadzie pomiaru różnicy czasów z głowicami montowanymi w ścianie rurociągu. Projekt Polskiej Normy wprowadzony do doświadczonego stosowania od 1 stycznia 1986 r. PIAiP, Warszawa 1985, s. 37. Opracował Stanisław Waluś, Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach, IV.1984.

148. Polysonics, Houston, USA, 1989 - materiały firmowe.
149. Poradnik inżyniera. Mechanika. Tom I. WNT, Warszawa 1968.
150. Prandtl L.: Dynamika płynów. PWN, Warszawa 1956.
151. Redding R.: Principles and Prospects for Continuous-wave Ultrasonic Flowmetering, The International Journal of Instrumentation and Control, vol. 33, nr 9, Sept. 1986, s. 14-26.
152. Redding R.J.: Temperature compensation in level measurement, Measurement and Control, vol. 15, nr 6, June 1982, s. 216.
153. Richter H.: Rohrhydraulik, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1971.
154. Robinson Ch.: Obstructionless Flowmeters: Smooth Sailing for Some, Rough Passage for Others, The International Journal of Instrumentation and Control, Vol. 33; nr 12, Dec. 1986, s. 33-36.
155. Romer E.: Miernictwo przemysłowe. PWN, Warszawa 1978.
156. Róždźwiński K.: Metody hydrometrii ultradźwiękowej. Prace Instytutu Budownictwa Wodnego PAN, nr 14, PAN, Instytut Budownictwa Wodnego, Gdańsk 1984.
157. Safin A.G., Antonov N.N.: Ocenka sostavljajuščich pogrešnostej obrazcovogo ul' trazvukogo raschodomera, Izmeritel'naja Technika, 1976, nr 10, s. 70-71.
158. Salami I.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.
159. Sanderson M.L., Torley B.: A self calibrating clamp-on transit time ultrasonic flowmeter, FLOMEKO 85, International Conference on Flow Measurement, sponsored by IMEXO-TG9, Melbourne 20-23.VIII.1985, editor: E.A. Spencer, OBE, Bedford, 1985, s. 163-170.
160. Saratoga Systems, Inc., Cupertino, USA, The Ultrameter, Ultrasonic flow meter. Materiały firmy.
161. Scarpa Laboratories. Metuchen, USA. Non-contacting ultrasonic flow sensor. Informacja firmowa, Instrumentation Technology, 1971, July, s. 61.
162. Sheen S.H., Raptis A.C.: Acoustic Flow Instruments for solid/gas flows. Particulate Science and Technology 5, Hemisphere Publishing Corporation, 1987, s. 219-234.
163. Schinzel Ges.m.b.H., Wien 1986, materiały firmowe.
164. Schlichting H.: Grenzschicht-Theorie, Verlag G. Braun, Karlsruhe 1958.
165. Schmidt D.Ph.: Acoustic Flow Measurement in Wide Rivers, Flow Measurement of Fluids. Proceedings of FLOMEKO 1978, North-Holland Publ. Comp., Amsterdam, New York, Oxford s. 391-395.
166. Schneider H.J. - INTERKAMA 86: Sensorsysteme für die Betriebsmesstechnik, Automatisierungstechnische Praxis, 29 Jahr, Heft 3/1987, s.102-116.
167. Schuster J.C.: Measuring Water Velocity by Ultrasonic Flowmeter, Journal of the Hydraulics Division, December 1975, s. 1503-1517.
168. Scott C.: Sounding out ultrasonic flowmeters. Control and Instrumentation, vol. 16, nr 8, s. 27 i 29, August, 1984.
169. Scott R.W.W.: The Changing Scene Around Established Features, s. 1-30, artykuł w książce: Developments in Flow Measurement-1, edited by R.W.W. Scott, National Engineering Laboratory, East Kilbridge, Glasgow, UK, 1982.
170. Schröder A.: Durchflußmeßtechnik - eine Übersicht. Technisches Messen. Vol. 46, 1979, nr 4, s. 145-149.
171. Schweiger M.: Durchflußmessungen mittels Ultraschall, Feingeratetechnik, Heft 5, 1963, s. 260-265.

172. Sheen S.H., Raptis A.C.: Active Ultrasonic Cross-Correlation Flowmeters for Mixed-Phase Pipe Flows, ISA Transactions, Vol. 24, No 2, 1985, s. 53-58.
173. Segall J.: Application considerations for controlotron ultrasonic clampitron flowmeter, Advances in Instrumentation, Proceedings of ISA's Industry Oriented Conference and Exhibit Milwaukee, October 6-9, 1975, USA, ISA, Pitsburg, 1975, vol. 30, part 4, s. 822, 1-4.
174. Shane J.L.: Ultrasonic Flowmeter Basics, Instrumentation Technology, 1971, nr 7, s. 44-48.
175. Shelly E., Kirkpatrick A.: Sewer flow measurement - a state-of-the art assessment. Municipal Environmental Research Laboratory, Cincinnati 1975.
176. Siemens, Karlsruhe, RFN. Den Durchfluß von Flüssigkeiten in Rohrleitungen genau erfassen - mit dem Ultraschall-Durchflußmesser, Material firmy.
177. Sinotin V.I.: O raspredelenii skorostej v potoke pod ledjanyj pokrovom, Hidrotechničeskoe stroitel'stvo, nr 2, 1967, s. 29-30.
178. Skibiński J.: Hydraulika, PWN, Warszawa 1969.
179. Skibiński J.: Hydraulika, PWRiL, Warszawa 1975.
180. Smirnov R.E., Garšin P.A., Tupičenkov A.A.: Opredelenie učastka deformacii potoka sužajuščimi ustrojstvami, Izmeritel'naja Technika, 1977, nr 6, s. 49-50.
181. Słownik elektrotechniczny polsko-angielski-rosyjski. Wyd. II. WNT, Warszawa 1985.
182. SONIX Przemysłowe Urządzenie Pomiarowe, Krzysztof Kołodziej Warszawa, Przepływomierz PKK-1, materiały firmowe, 1988.
183. Spink L.K.: Principles and Practice of Flow Meter Engineering, The Foxboro Company, Foxboro, Massachusetts, USA, 1978.
184. Strauß K.H.: Discharge in partly-filled pipes, Proceedings of FLOWEKO 1978, North-Holland Publishing Company, Amsterdam New York, Oxford, 1978, s. 187-214.
185. Streeter V.L.: Handbook of fluid dynamics, Mc Graw-Hill Book Company, INC, New York, Toronto, London, 1961.
186. Strohrmann G.: atp-Marktanalyse Durchflußmeßtechnik, Automatisierungstechnische Praxis, 28 Jahr., Heft 4, 1986.
187. Suzuki H., Nakabori H., Hoshikawa T., Satake T.: Ultrasonic method of flow measurement in an open channel, Water Power, May/June 1970, s. 213-218.
188. Suzuki N., Nakabori H., Yamamoto M.: Ultrasonic method of flow measurement in large conduits and open channels, Modern development in flow measurement, Peter Peregrinus, Harwell, 1972, s. 115-132.
189. Suzuki N., Nakabori H., Yamamoto M.: Ultrasonic method of flow measurement. Water Power, 1968, nr 7, s. 266-269.
190. Swengel R.C., Hess W.B., Waldorf S.K.: Demonstration of the Principles of the Ultrasonic Flowmeter, Electrical Engineering, vol. 73, 1954, nr 12, s. 1082-1084.
191. Swengel R.C., Hess W.B., Waldorf S.K.: Principles and Applications of the Ultrasonic Flowmeter, Power Apparatus and Systems, 1955, nr 17, s. 112-118.
192. Szebeszczyk J., Walus S.: The Possibility of using of microprocessor in the ultrasonic flowmeters, 4 Pochtagung, Anwendung von Mikrorechnern in der Mess- und Automatisierungstechnik, 11 und 12 September 1986, Magdeburg, ss. 84-87.
193. Szymański J.: Hydraulika. Politechnika Śląska, Skrypty uczelniane nr 532, Gliwice 1975.

194. Thompson E.J.: Mid-radius ultrasonic flow measurement, Proceedings of FLOMEKO, 1978, North Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1978, s. 153-161.
195. Tinnam B.: Is flow technology still in its infancy? Control and Instrumentation, Feb. 1988, s. 45-52.
196. Tinnam B. Sounding out variety of parameters with ultrasonic flow technology. Control and Instrumentation, vol. 17, 1985, nr 12, s. 21.
197. Troškolański A.T.: Hydraulika. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1955.
198. Troškolański A.T.: Hydromechanika. WNT, Warszawa 1967.
199. Tupičekov A.A., Pafurin A.B.: Osnovnye napravlenija gidrodinamičeskich issledovanij pri rešenii metrologičeskich zadač v oblasti izmierenija raschoda i količestva veščestv, Trudy metrologičeskich institutov SSSR, Vypusk No 135/195 Izdatelstvo standartov, Moskwa-Kazan', 1972, s. 20-25.
200. Uematsu M., Odajima K., Inoue Y.: New sensors for monitoring water and wastewater, Hitachi Rev., vol. 29, nr 5, Oct. 1980, s. 249-254.
201. Ujda K.: Określenie napięcia przepływu w korytach naturalnych na podstawie elementów hydraulicznych koryta. Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej, Tom IX, (XXI), 1973, zes. 2-3 (94-95), s. 29-38.
202. Ultradźwięki w chemii. Praca zbiorowa pod red. A. Piotrowskiej. PWN, Warszawa 1968.
203. Ultraflux, Francja, Materiały firmowe.
204. Walden H., Stasiak J.: Mechanika cieczy i gazów, PWN, Warszawa 1969.
205. Waller J.M.: Guidelines for Applying Doppler Acoustic Flowmeters, Instrumentation Technology, vol. 27, nr 20, October 1980, s. 55-57.
206. Walshe G.: What's so different about ultrasonic flowmeters? Canadian Controls and Instruments, 1978, vol. 17, nr 9, s. 44-45.
207. Waluś S.: Analityczne wzorcowanie przepływomierza ultradźwiękowego w normalnych warunkach zabudowy. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr 645, seria: Automatyka, zes. 52, Gliwice 1980, s. 97-109.
208. Waluś S.: Analiza porównawcza właściwości metrologicznych i eksploatacyjnych przepływomierzy ultradźwiękowych. Konferencja naukowo-techniczna "Pomiary przepływów i poziomów w energetyce". Ślesin 16-18.IV.1986. Koła SEP przy: Zakładach pomiarowo-badawczych energetyki ENERGOPOMIAR - Gliwice, Zespole elektrywni Patnów-Adamów-Konin, 1986, s. 116-130.
209. Waluś S.: Błędy metody przepływomierza ultradźwiękowego. Sympozjum Metrologia 83 - Metrologia wielkości mechanicznych i kontrola jakości produkcji. Warszawa, CUP MiSP Politechniki Warszawskiej, 22-24 listopada 1983, Politechnika Warszawska, Warszawa 1983, ss. 393-401.
210. Waluś S.: Błędy wielodrogowych przepływomierzy ultradźwiękowych, XVII Międzuczelniana Konferencja Metrologów, Poznań 19-21.IX.1984. Materiały konferencyjne, tom I, Instytut Technologii Budowy Maszyn, Politechnika Poznańska, Poznań 1984, s. 279-286.
211. Waluś S.: Dobór modelu rozkładu prędkości cieczy w rurociągu dla przepływomierza ultradźwiękowego. XVIII Międzuczelniana Konferencja Metrologów, WSI w Zielonej Górze, wrzesień 1985, Zielona Góra, s. 247-250.
212. Waluś S., Grolik E.: Metody sprawdzania przepływomierzy ultradźwiękowych stosowanych w kanałach i rzekach. Zeszyty Naukowe Polit. Śląskiej nr 847, seria: Automatyka zes. 78, Gliwice 1985, s. 205-214.
213. Waluś S.: Metodyka stosowania przepływomierzy ultradźwiękowych. PAN, Oddział w Katowicach, Prace Komisji Naukowych, zes. 12, Katowice 1987. s. 60-63.
214. Waluś S.: Możliwość stosowania przepływomierza ultradźwiękowego w kanałach i rzekach. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 916, seria: Automatyka zes. 89, Gliwice 1987, s. 163-171.

215. Waluś S.: Możliwość wykorzystania wybranych nowoczesnych przepływomierzy w układach automatyki. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 772, Seria: Automatyka zesz. 71, Gliwice 1983, s. 165-173.
216. Waluś S.: Nieklasyczne metody pomiaru strumienia objętości wody w kanałach otwartych. Studia i Materiały Oceanologiczne, nr 47, PAN i KBM, Gdańsk 1985, s. 105-122.
217. Waluś S.: Pomiar strumienia objętości w rurociągu niepełnym przepływomierzem ultradźwiękowym z równoczesnym pomiarem poziomym. VII Krajowa Konferencja Metrologii i Budowy Aparatury Pomiarowej, Wrocław, 9-11. IX. 1986, Prace Naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej Seria: Konferencje 12, s. 92-95.
218. Waluś S.: Przepływomierze ultradźwiękowe - własności metrologiczne. PAK, nr 1, 1978, s. 8-9.
219. Waluś S.: The Mathematical Model of One-path Ultrasonic Flowmeter for Open Channels. Proceedings of the 11-th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation, IMEKO XI, Houston, Texas, USA, 16-21 October 1988, Tom Metrology, p. 301-307.
220. Waluś S.: The mathematical model of ultrasonic flowmeter with clamp-on transducers, 30 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, 21-25. 10.1985, Technische Hochschule Ilmenau, DDR. Heft 2, Vortragsreihe B, C, s. 103-106.
221. Waluś S.: The possibility of the analytical setting of ultrasonic flowmeter characteristic in the standard conditions of settlement, Proceedings of 28-th JUREMA Annual Meeting, Zagreb 1983. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl. nr 969, Seria: Automatyka zesz. 93, Gliwice 1988, s. 273-282.
222. Waluś S.: The use of the ultrasonic flowmeter in the conditions other than normal, FLOMEKO '85, International Conference on Flow Measurement sponsored by IMEKO-TC9, Melbourne, 20-23.VIII.1985, editor: E.A. Spencer, OBE, Bedford 1985, s. 171-176.
223. Waluś S.: Warunki stosowania przepływomierzy ultradźwiękowych w gospodarce wodnej, Zesz. Naukowe Politechniki Śląskiej nr 695, seria: Automatyka zesz. 60, Gliwice 1981, s. 93-106.
224. Waluś S.: Wpływ montażu na błąd przepływomierza ultradźwiękowego, XV Międzynarodowa Konferencja Metrologów, Warszawa 23-25.IX.1981. Materiały konferencyjne, tom I, Politechnika Warszawska, Instytut Podstaw Elektroniki, Warszawa 1981, s. 119-124.
225. Waluś S.: Wyznaczanie własności metrologicznych przepływomierzy ultradźwiękowych na podstawie modelu matematycznego. Praca doktorska (niepublikowana), Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej, Gliwice 1980.
226. Waluś S.: Zastosowanie przepływomierza ultradźwiękowego do pomiaru strumienia objętości w kanałach otwartych, XVI Międzynarodowa Konferencja Metrologów, Lublin 1983. Materiały pokonferencyjne. Prace Instytutu Przetwarzania i Użytkowania Energii Elektrycznej. Seria C, nr 12. Politechnika Lubelska, Lublin 1984, s. 79-84.
227. Wartini Chr.: Problemy pomiaru przepływu za pomocą ultradźwięków ze szczególnym uwzględnieniem metody przesunięcia fazowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 645, seria: Automatyka, zesz. 52, Gliwice 1980, s. 85-96.
228. Watson C.A.: Ultrasonic flow meters. Proceedings of FLOMEKO 1978, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1978, s. 571-577.
229. Wechman A.: Hydraulik, VEB Berlag fur Bauwesen, Berlin 1966.
230. Westinghouse Electric Corporation, USA, Katalog firmowy, 1977.
231. Wleczyński J.: Pęcherze powietrza w przewodach z wodą. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1975, nr 9, s. 272-276.

232. Wilson W.D.: Speed of Sound in Distilled Water as a Function of the Temperature and Pressure, Journal of the Acoustical Society of America, 1959, vol. 31, s. 1067-1072.
233. Wodociągi i Kanalizacja. Poradnik. Arkady, Warszawa 1971.
234. Wojciechowski J.: Pomiar w elektrowniach ciepłych. PWT, Warszawa 1958.
235. Yada H., Koho M., Kobori T., Kiruchi A.: A Clamp-on Ultrasonic Flow Meter for High Temperature Fluids in Small Conduits, FLOW Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 2, ISA, Research Triangle Park, USA, 1981, s. 549-561.
236. Zacharias E.M.: Process Measurements by Sound Velocimetry. Instruments and Control Systems, 1970, nr 9, s. 112-113.
237. Zakład Doświadczalny IPPT PAN "TECHPAN", Warszawa 1982, Ultradźwiękowy przepływomierz-wodomierz typ UMP-10, ulotka informacyjna.
238. Železnjakov G.V., Talmaz V.F.: Zavisimost' parametrov profilej skorostej ot gidravličeskich soprotivlenij, Hidrotehničeskoe stroitel'stvo 1973, nr 8, s. 33-35.
239. Hagel M., Szebeszczyk J., Waluś S.: Sposób pomiaru strumienia objętości cieczy w rurociągu i przepływomierz ultradźwiękowy z nakładanymi głowicami, (wynalazek zgłoszony do opatentowania), Biuletyn Urzędu Patentowego, Nr 25/417 Rok XVII, G01F A1/21 272862 [22] 88 06 03, s. 58-59.
240. Szebeszczyk J.: Correction of Nonlinearity Errors in Microprocessor-Based Ultrasonic Flowmeters. IMEKO TC7, 6th International Symposium on Measurement Theory and Its Application to Practice "Signal processing in measurement", Budapest, Hungary, June 10-12, 1987, s. 185-190.
241. Szebeszczyk J.: Measurement of Volumetric Flow of Liquides in Pipes by Microprocessor-Based Ultrasonic Flowmeter, Proceedings of the 11-th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation, IMEKO XI, Houston, Texas, USA, 16-21 October 1988, Tom Sensors, s. 83-90.
242. Szebeszczyk J., Pietraszek S., Waluś S.: Model użytkowy przepływomierza ultradźwiękowego do bezzakłócenowego pomiaru przepływu cieczy jednorodnych w rurociągach, Artykuł przyjęty do druku w czasopiśmie "Metrologia i Systemy Pomiarowe".
243. Waluś S.: Raport nt. krajowego zapotrzebowania na przepływomierze (komunikat); PAK nr 2/1989, s. 40.
244. Waluś S.: The compensation of sensitivity changes and the influence of liquid temperature in the microprocessor-based multi-path ultrasonic flowmeter, 5. Fachtagung, Anwendung von Mikrorechnern in der Meß- und Automatisierungstechnik, 5. und 6. September 1989, Technische Universität Magdeburg, DDR, s. 215-218.

ULTRADŹWIĘKOWE POMIARU STRUMIENIA OBJĘTOŚCI WODY
W RUROCIĄGACH I W KANAŁACH OTWARTYCH

S t r e s z c z e n i e

Praca jest poświęcona pomiarom strumienia objętości wody w rurociągach i kanałach otwartych przepływomierzami ultradźwiękowymi. We wprowadzeniu zwrócono uwagę, że o dokładności pomiaru przepływomierzem ultradźwiękowym decyduje przede wszystkim znajomość modelu matematycznego organu pomiarowego przepływomierza (rys. 3.9), to znaczy zależność między wielkościami mierzonymi w przetworniku pomiarowym a strumieniem objętości. W rozdziale drugim przedstawiono sposoby wykorzystania ultradźwięków do pomiaru prędkości i strumienia objętości (rys. 2.1 do 2.6). Przedstawiono podstawowe wiadomości z literatury i zaproponowano podział przepływomierzy.

Tematem następných dwóch rozdziałów pracy jest stosowanie przepływomierzy ultradźwiękowych w rurociągach. Zestawiono wzory opisujące rozkład prędkości w rurociągu i sformułowano warunki, jakie powinny te wzory spełniać biorąc pod uwagę zarówno prawa fizyki jak i wyniki pomiarów rozkładów rzeczywistych. Zaproponowano prosty wzór opisujący rozkład prędkości dobrze odzwierciedlający wyniki pomiarów. Zdefiniowano warunki normalne i wprowadzono modele matematyczne organów pomiarowych dla różnych przypadków: pomiaru prędkości miejscowej (rys. 3.6), prędkości średniej wzdłuż cięciwy (rys. 3.11), w średnicy rurociągu oraz dla przepływomierza wielodrogowego (rys. 2.2 i 3.6). Przedmiotem modelowania są zarówno przepływomierze z głowicami montowanymi w ścianie (rys. 3.9) jak i nakładanymi na rurociąg (rys. 3.13). W równaniu odtwarzania wielkości mierzonej uwzględniono korekcję wpływu temperatury na równanie przetwarzania. Wyprowadzono wzory opisujące rozkłady prędkości w warunkach odbiegających od normalnych (zniekształcony rozkład prędkości (rys. 4.9), rurociąg częściowo wypełniony osadami (rys. 4.1), przekrój odbiegający od kołowego (rys. 4.3 i 4.4) oraz równania przetwarzania dla tych przypadków. Zdefiniowano graniczne modele rozkładów prędkości (rys. 3.4 i 3.5).

Przedmiotem rozdziału piątego jest pomiar strumienia objętości wody w kanałach otwartych (rys. 5.1). Uzupełniono znane z literatury wzory na rozkład prędkości o wzór dobrze odpowiadający wynikom badań doświadczalnych. Wyprowadzono modele matematyczne dla przepływomierzy jednodrogowych i wielodrogowych oraz przeanalizowano wpływ zmian poziomu wody i kształtu rozkładu prędkości na współczynnik czułości przepływomierza (rys. 5.2, 5.3, 5.5, 5.6).

Problematyka eksploatacji przepływomierzy ultradźwiękowych obejmuje opis właściwości metrologicznych z podaniem wielu przykładowych danych z literatury i metodykę szacowania błędów przepływomierza w normalnych warunkach stosowania z odwołaniem się do opracowanej przez autora normy. W rozdziale siódmym przedstawiono wybrane algorytmy przetwarzania informacji pomiarowej dla przepływomierzy różnych typów nawiązując do wyprowadzonych wcześniej modeli matematycznych (rys. 7.2; 7.3; 7.6).

ULTRASONIC MEASUREMENTS OF WATER VOLUME FLOW RATE IN PIPES AND OPEN CHANNELS

S u m m a r y

The work discusses the problems of water volume flow rate measurements in pipes and open channels applying ultrasonic flowmeters. In the introduction the author points out that the accuracy of measurements with ultrasonic flowmeters depends mainly on the knowledge of a mathematical model of a primary device (Fig. 3.9), i.e. of the relationship of the quantities measured by the secondary device and the volume flow rate. Chapter 2 presents the main concepts of application of ultrasonic waves for velocity and volume flow rate measurements (Fig. 2.1 to 2.6). The basic concepts known from literature have been presented and the classification of flowmeters has been proposed.

The next two chapters discuss the applications of the ultrasonic flowmeters in pipes. The formulae describing the velocity distribution in pipe have been reported together with conditions to be met with respect to physical laws as well as the measurement results of actual distributions. A simple formula has been proposed describing the velocity distribution and well-conforming to measurement results. Standard conditions have been defined and the mathematical models of primary devices have been derived for different cases (pointwise velocity measurement (Fig. 3.6), mean velocity over a chord (Fig. 3.11), mean over a pipe diameter, the case of a multi-path flowmeter (Fig. 2.2 and 3.6). The subject of modelling are both the flowmeters with transducers mounted in the pipe walls (Fig. 3.9 as well as with clamp-on transducers (Fig. 3.13). The correction of the temperature influence on conversion equation has been assumed in the equation of reproducing the measured quantity. The formulae have been derived, describing the velocity distributions at the conditions different from standard (distorted velocity distributions (Fig. 4.9), a pipe with sediment (Fig. 4.1), cross-section different from circular (Fig. 4.3 and 4.4). The conversion equations for these cases have been derived. The limiting models of the velocity distributions have been defined.

Chapter 5 discusses the water volume flow rate measurements in open channels (Fig. 5.1). The formulae, known from literature, describing the velocity distribution were supplemented with a formula wellconforming to experimental results. The mathematical models for one and multi-path flowmeters have been derived and the influence of the water level variations

as well as the velocity distribution shape on the sensitivity coefficient of a flowmeter have been discussed (Fig. 5.2; 5.3; 5.5; 5.6).

The problems of operation of the ultrasonic flowmeters include the description of their metrological properties with a number of literature data cited, as well as the methodology of estimating the flowmeter error at standard conditions. The reference is made to a standard worked out by this author. Chapter 7 presents the selected algorithms of processing the measurement information in different types of flowmeters, with reference made to the mathematical models derived (Fig. 7.2; 7.3; 7.6).

5 1 2 4 4 4

The next two chapters discuss the application of the ultrasonic flowmeters in pipes. The formulas describing the velocity distribution in pipes have been reported together with conditions to be met with respect to physical laws as well as the measurement results of actual distributions. A single formula has been proposed describing the velocity distribution and self-correcting the measurement results. Standard conditions have been defined for the use of the mathematical models of primary devices have been derived for different cases (pointwise velocity measurement (Fig. 5.2), mean velocity over a cross (Fig. 5.3), area over a pipe diameter, the case of a multi-point flowmeter (Fig. 5.4 and 5.5). The method of installing and both the flowmeters with transducers mounted in the pipe walls (Fig. 5.6) as well as with disks or transducers (Fig. 5.7). The correction of the temperature influence on conversion equation has been assumed in the opinion of requiring the measured quantity. The formulas have been derived, describing the velocity distributions at the conditions different from standard (Fig. 5.8), a pipe with eccentricity (Fig. 5.9), the conversion of the velocity distribution (Fig. 5.10 and 5.11). The conversion conditions for these cases have been derived. The limiting models of the velocity distributions have been defined.

Chapter 8 discusses the water velocity flow rate measurements in open channels (Fig. 5.12). The formulas, known from literature, describing the primary distribution were supplemented with a formula well-conforming to experimental results. The mathematical models for one and multi-point flowmeters have been derived and the influence of the water level variations

Chapter 9 discusses the water velocity flow rate measurements in open channels (Fig. 5.13). The formulas, known from literature, describing the primary distribution were supplemented with a formula well-conforming to experimental results. The mathematical models for one and multi-point flowmeters have been derived and the influence of the water level variations

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СТРУИ ОБЪЕМА ВОДЫ В ТРУБОПРОВОДАХ И ОТКРЫТЫХ КАНАЛАХ

Р е з ю м е

Работа посвящена измерениям струи объема воды в трубопроводах и открытых каналах ультразвуковыми расходомерами. Во введении обращается внимание на факт, что определение математической модели измерительного органа (рис. 3.9), то есть зависимости между величинами измеряемыми измерительным преобразователем, а величиной струи объема, имеет решающее значение для точности измерения ультразвуковым расходомером.

Во второй главе представлены способы использования ультразвука для измерения скорости и струи объема (рис. 2.1 до 2.6). Представлены основные сведения из литературы на эту тему, предложена классификация расходомеров.

Следующие две главы работы посвящены использованию ультразвуковых расходомеров в трубопроводах. Составлен набор формул, описывающих распределение скорости в трубопроводе и сформулированы условия для них, учитывая как законы физики так и результаты измерений действительных распределений. Предложена простая формула, описывающая распределение скорости, хорошо отражающая результаты измерений. Определены нормальные условия и введены математические модели измерительных органов для различных измерительных ситуаций: измерения местной скорости (рис. 3.6), средней скорости вдоль хорды (рис. 3.11), в просвете трубопровода, а также для многоканального расходомера (рис. 2.2 и 3.6). Предметом моделирования являются как расходомеры с головками монтированными в теле стенки трубопровода (рис. 3.9), так и накладываемыми на трубопровод (рис. 3.13). В уравнении, воспроизводящем измеряемую величину, учтена корректировка влияния температуры на уравнение преобразования. Введены формулы, описывающие распределения скоростей для условий, отличающихся от нормальных (деформировано распределение скорости) (рис. 4.9), трубопровод частично наполнен осадком (рис. 4.1), сечение трубопровода, отличающееся от круглого (рис. 4.3 и 4.4), а также уравнения преобразования для этих случаев. Определены граничные модели распределений скоростей (рис. 3.4 и 3.5).

Предметом пятой главы является измерение струи объема воды в открытых каналах (рис. 5.1). Известные из литературы формулы, описывающие распределение скорости, пополнены формулой, хорошо отражающей результаты опытных испытаний. Введены математические модели для одноканальных и многоканальных расходомеров, проведен анализ влияния измерений уровня воды и форм

распределения скорости на чувствительность расходомера (рис. 5.2, 5.3, 5.5, 5.6).

Проблематика эксплуатации ультразвуковых расходомеров включает в себе описание их метрологических свойств с представлением решений многих примеров из литературы, методику оценки ошибки расходомера для нормальных условий его эксплуатации, в частности, со ссылкой на разработанную автором норму. В седьмой главе представлены избранные алгоритмы преобразования измерительной информации для расходомеров разных типов в связи с введёнными ранее математическими моделями (рис. 7.2, 7.3, 7.6).

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej

P. 3342/90/99