

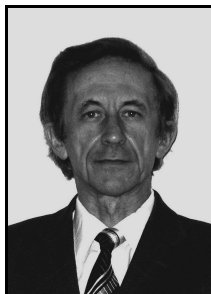
Stanisław WALUŚ, Tomasz DĄBROWSKI, Sławomir JANCZUR
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, INSTYTUT AUTOMATYKI, ZAKŁAD POMIARÓW I SYSTEMÓW STEROWANIA

Wyznaczanie modelu rozkładu prędkości dla pośredniego pomiaru strumienia objętości

Dr hab. inż. Stanisław WALUŚ

Absolwent Wydziału Automatyki Politechniki Śląskiej, dyplom (1970) w zakresie automatyki przemysłowej. Doktorat w 1980 r. Habilitacja na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki w 2004 r. w zakresie dyscypliny KBN: automatyka i robotyka (specjalność: metrologia, miernictwo przemysłowe). Autor lub współautor ponad 110 publikacji naukowych, w tym podręcznika akademickiego: „Przepływomierze ultradźwiękowe. Metodyka stosowania”. Sekretarz Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach.

e-mail: stanislaw.walus@polsl.pl



Mgr inż. Tomasz DĄBROWSKI

Absolwent Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. W 2007 roku uzyskał dyplom na kierunku Automatyka i Robotyka – w zakresie specjalności systemy pomiarowe.



Mgr inż. Sławomir JANCZUR

Absolwent Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. W 2007 roku uzyskał dyplom na kierunku Automatyka i Robotyka – w zakresie specjalności systemy pomiarowe.



Streszczenie

Pośredni pomiar strumienia objętości polega na pomiarze prędkości w pewnym miejscu przekroju przewodu i obliczeniu strumienia objętości na podstawie modelu matematycznego rozkładu prędkości. Dla rurociągu wzięto pod uwagę trzy modele rozkładu prędkości: model Prandtla, model potęgowy trójskładnikowy i model złożony. Dla danych doświadczalnych dokonano oceny tych modeli. Dla kanału o prostokątnym przekroju poprzecznym porównano modele profilu prędkości; dla profilu poziomego porównano dwa modele (Prandtla i uniwersalny), a dla profilu pionowego cztery modele (Bazina1, Bazina2, Hagen i liniowy).

Słowa kluczowe: model rozkładu prędkości, pomiar strumienia płynu, przepływomierz próbkujący.

Velocity distribution model estimation for indirect volume flow-rate measurement

Abstract

Indirect flow-rate measurement depends on the measurement of velocity in some place in the cross section of the pipe or the open channel and the volume flow-rate calculation on the base of the mathematical model of velocity distribution. In the paper three mathematical models for the pipe are taken into account: the Prandtl model, the polynomial model and the composed model. On the experimental data which were collected with help of impact tube in the pipeline of 100 mm inside diameter these three models were compared. The paper is devoting also to the problem of choosing the velocity profile model (horizontal and vertical) for velocity distribution in open channel with rectangular cross section. For horizontal profile two simple models (Prandtl and universal) are analysed. For vertical profile four models are discussed (Bazin1, Bazin2, Hagen and linear).

Keywords: velocity distribution model, flow-rate measurement, sampling flowmeter.

1. Wprowadzenie

Pomiar pośredni strumienia objętości w przewodzie zamkniętym lub otwartym polega na pomiarze prędkości w jednym wybranym miejscu lub w wielu wybranych miejscach przekroju przepływowego i następnie na obliczeniu strumienia objętości według odpowiedniego algorytmu [1]. W przypadku pomiaru

prędkości w jednym miejscu należy znać wartość współczynnika wzorcowania, który jest stosunkiem prędkości średniej w przekroju przepływowym do prędkości mierzonej w danym miejscu. Strumień objętości jest iloczynem pola powierzchni przekroju przepływowego i obliczonej prędkości średniej w przekroju przepływowym. Współczynnik wzorcowania można wyznaczyć teoretycznie na podstawie znajomości modelu matematycznego rozkładu prędkości lub na podstawie wyników pomiarów prędkości miejscowych w całym przekroju przepływowym. Wyznaczanie współczynnika wzorcowania dla jednego czujnika o prostokątnym przekroju czynnym dla zadanego modelu rozkładu prędkości zostało przedstawione w [2]. W przepływomierzu próbkującym pomiar prędkości miejscowej często jest pomiarem punktowym, jak to ma miejsce w przypadku całkowania bryły prędkości [3, 4 s. 277] lub pomiarem odcinkowym – w przypadku przepływomierza ultradźwiękowego [5, 6, 7]. Metoda ultradźwiękowa jest znormalizowana [8, 9].

W przypadku pomiaru prędkości w wielu miejscach można wyróżnić trzy sposoby obliczania strumienia objętości: 1) strumień objętości jest wartością średnią uzyskanych prędkości, 2) strumień objętości wyznacza się jako sumę cząstkowych strumieni objętości, 3) strumień objętości wyznacza się dwuetapowo: wpiery wyznacza się model matematyczny rozkładu prędkości i potem całkując ten model uzyskuje się wielkość mierzoną. W dwóch pierwszych przypadkach nie jest wymagana znajomość modelu matematycznego obiektu pomiaru. W trzecim przypadku niepewność wyznaczenia postaci i parametrów modelu rozkładu prędkości przenosi się na niepewność wyniku pomiaru strumienia objętości. W miarę dokładne wyznaczenie modelu pozwala na bardziej dokładne wyznaczenie współczynnika wzorcowania i tym samym wielkości mierzonej niż w pierwszym i drugim przypadku, szczególnie, gdy liczba punktów pomiaru prędkości miejscowej nie jest zbyt duża. Najlepszym modelem rozkładu prędkości będzie ten, dla którego wartość współczynnika wzorcowania obliczona teoretycznie będzie najmniej różniła się od wartości rzeczywistej.

2. Modele matematyczne rozkładu prędkości w przewodzie o kołowym przekroju poprzecznym

W [1] przedstawiono szereg wzorów opisujących rozkłady prędkości w przewodzie zamkniętym o kołowym przekroju poprzecznym i sformułowano kryteria, jakim powinny odpowiadać te modele matematyczne. Okazuje się, że żaden model nie spełnia wszystkich kryteriów. Korzystając z sugestii R. Krzyżanowskiego autor publikacji [10] wprowadził tzw. wzór uniwersalny, który opisuje rozkład prędkości od przepływu uwarstwionego (laminarnego) do burzliwego (turbulentnego). Wzór ten uzyskuje się ze wzoru (2) przyjmując $a = 0$. Wzór uniwersalny zastosowano do badań modelowych przepływomierza ultradźwiękowego w [11], a w [12] dokonano porównania tego wzoru ze wzorem Prandtla.

Porównania wzoru Prandtla z liniowo-logarytmicznym dokonano w [13], przy czym zastosowano dwie postacie wzoru logarytmiczno-liniowego: dla pierścienia wewnętrznego i dla pierścienia zewnętrznego. Na potrzeby niniejszej pracy przeanalizowano trzy wzory opisujące rozkład prędkości (profil prędkości wzdłuż promienia dla osiowo-symetrycznego rozkładu prędkości) w rurociągu. Wzór Prandtla jest następujący:

$$v = v_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n}, \quad (1)$$

gdzie: v_0 jest prędkością w osi rurociągu, $1/n$ – wykładnikiem zależnym od liczby Reynoldsa i chropowatości ścianki rurociągu.

Do wzoru uniwersalnego nawiązuje wzór potęgowy trójskładnikowy:

$$v = v_0 \left[1 - a \left(\frac{r}{R}\right)^p - (1-a) \left(\frac{r}{R}\right)^m\right], \quad (2)$$

gdzie: a, p, m – parametry dobierane na drodze doświadczalnej.

Do wzoru Prandtla i uniwersalnego nawiązuje wzór złożony:

$$v = v_0 \left\{ a \left(1 - \frac{r}{R}\right)^r + (1-a) \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^m\right] \right\}. \quad (3)$$

gdzie: a, r, m – parametry dobierane na drodze doświadczalnej.

3. Modele matematyczne poziomego profilu prędkości w kanale otwartym

Troskolański [14 s. 303] pisze, że rozkład prędkości w przekrojach poziomych kanału otwartego jest podobny do rozkładu prędkości w przewodach zamkniętych, natomiast dla przewodów zamkniętych podał wzór Prandtla [14 s. 356]. W [1] autor przeanalizował szereg wzorów opisujących rozkład prędkości. Dla kanałów, w których stosunek szerokości do głębokości nie jest zbyt duży może być stosowany zarówno wzór Prandtla, jak i uniwersalny:

$$v(b, h) = v_m(h) \left(1 - \frac{2b}{B(h)}\right)^{1/n}, \quad (4)$$

$$v(b, h) = v_m(h) \left[1 - \left(\frac{2b}{B(h)}\right)^m\right], \quad (5)$$

gdzie: $v_m(h)$ – prędkość maksymalna na głębokości h , $B(h)$ – szerokość kanału na głębokości h , $1/n$ – wykładnik we wzorze Prandtla, m – wykładnik we wzorze uniwersalnym.

Z danych literaturowych [15] i badań własnych autora w kanale betonowym o szerokości 1,7 m w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie wynika, że profil prędkości powinien być w takim przypadku opisywany prostą funkcją sklejaną [7]:

$$v = v_m(h) [1 - H(b - b_0(h))] + v_m(h) \left[1 - \frac{2[b - b_0(h)]}{B(h) - 2b_0(h)}\right]^{1/n} H(b - b_0(h)), \quad (6)$$

$$v = v_m(h) [1 - H(b - b_0(h))] + v_m(h) \left[1 - \left[\frac{2[b - b_0(h)]}{B(h) - 2b_0(h)}\right]^m\right] H(b - b_0(h)), \quad (7)$$

gdzie: $b_0(h)$ – odległość od osi kanału, do której prędkość można uznać za stałą, $H(b - b_0(h))$ – funkcja jednostkowa Heavyside'a.

4. Modele matematyczne pionowego profilu prędkości w kanale otwartym

W [1] zebrano wzory opisujące rozkład prędkości w płaszczyźnie pionowej. W wielu z nich przyjmuje się, że maksymalna prędkość występuje na powierzchni lustra cieczy. Jak wynika z badań doświadczalnych w kanałach otwartych maksymalna prędkość występuje na głębokości 5 do 25 % od poziomu cieczy [16, s. 45]. Wzór Bazina1 jest następujący:

$$v(h, b) = v_m(b) - m \left(\frac{h}{H}\right)^2 \sqrt{JH}, \quad (8)$$

gdzie: $v_m(b)$ – prędkość na powierzchni cieczy w odległości b od osi hydraulicznej kanału, m – współczynnik eksperymentalny zależny od chropowatości kanału, H – odległość od dna kanału do lustra cieczy, h – odległość od lustra cieczy do punktu, w którym określana jest prędkość, J – spadek hydrauliczny.

W przypadku gdy prędkość maksymalna jest pod powierzchnią cieczy, pionowy profil może być opisany wzorem Bazina2:

$$v(h, b) = v_m(b) - m \left(\frac{h - h_0}{H}\right)^2 \sqrt{JH}, \quad (9)$$

gdzie: h_0 – głębokość, na której prędkość jest maksymalna.

Wzory Bazina stanowiły parabole o osi poziomej, natomiast wzór Hagena jest parabolą o osi pionowej i umożliwia przyjęcie niezerowej prędkości na dnie koryta:

$$v(h, b) = v_d(b) + [v_d(b) - v_d(b)] \sqrt{\frac{H - h}{H}}, \quad (10)$$

gdzie: $v_d(b)$ – prędkość na dnie koryta.

Najprostszym modelem jest model liniowy [16], który można traktować jako model graniczny. Modele graniczne [17] mają zastosowanie przy badaniach maksymalnych błędów, jakich można się spodziewać w konkretnych warunkach pomiaru. Model ten opisany jest następującym wzorem:

$$v(h, b) = v_d(b) + [v_m(b) - v_d(b)] \frac{H - h}{H}. \quad (11)$$

5. Modelowanie matematyczne rzeczywistego rozkładu prędkości w przewodzie o przekroju kołowym

Do badań w tej pracy wykorzystano wartości prędkości uzyskane w trakcie realizacji pracy dyplomowej [18]. Prędkości miejscowe były mierzone za pomocą sondy cylindrycznej w 23 punktach rozłożonych nierównomiernie na średnicy rurociągu o średnicy 100 mm, w którym płynęło powietrze. Wyniki pomiarów zestawiono w [19].

5.1. Aproksymacja wyników pomiaru profilu prędkości modelem Prandtla

Wzór Prandtla (1) ma dwa parametry: prędkość w osi rurociągu i wykładnik $1/n$. Analizując dane doświadczalne można zauważyć, że profil prędkości w pobliżu osi rurociągu jest prawie płaski, wobec tego można przyjąć, że prędkość w osi dla modelu matematycznego będzie równa prędkości rzeczywistej w osi rurociągu. W takim przypadku będzie wyznaczany tylko jeden parametr. Poszukiwanie optymalnej wartości n polegało na poszukiwaniu minimum średniokwadratowego błędu oceny profilu prędkości zgodnie ze wzorem:

$$\sigma_v = \sqrt{\sum_{i=1}^N (v_i - v)^2 / (N - q)}, \quad (12)$$

gdzie: N – liczba pomiarów prędkości miejscowej, q – liczba parametrów do wyznaczenia.

Obliczenia wykonano za pomocą programu MATLAB w ramach [20]. Wartość prędkości w osi rurociągu wynosi $v_0 = 18,7$ m/s, wartość parametru $n = 33$ przy $\sigma_v = 0,22$ m/s. W przypadku estymacji dwóch parametrów otrzymano wartość prędkości w osi rurociągu wynoszącą $v_0 = 19,0$ m/s, wartość parametru $n = 27$ przy $\sigma_v = 0,18$ m/s.

5.2. Aproksymacja wyników pomiaru profilu prędkości modelem potęgowym trójskładnikowym

Model potęgowy trójskładnikowy (2) ma cztery parametry. Przy założeniu, że prędkość v_0 w modelu jest równa prędkości rzeczywistej w osi rurociągu otrzymano: $v_0 = 18,7$ m/s, $a = 0,1$, $p = 4$, $m = 140$ przy $\sigma_v = 0,13$ m/s. W przypadku estymacji czterech parametrów otrzymano: $v_0 = 18,5$ m/s, $a = 0,1$, $p = 6$, $m = 150$ przy $\sigma_v = 0,11$ m/s.

5.3. Aproksymacja wyników pomiaru profilu prędkości modelem złożonym

Model złożony (3) ma cztery parametry. Przy założeniu, że prędkość v_0 w modelu jest równa prędkości rzeczywistej w osi rurociągu otrzymano: $v_0 = 18,7$ m/s, $a = 0,5$, $r = 0,2$, $m = 200$ przy $\sigma_v = 0,12$ m/s. W przypadku estymacji czterech parametrów otrzymano: $v_0 = 18,8$ m/s, $a = 0,9$, $r = 0,03$, $m = 39$ przy $\sigma_v = 0,04$ m/s.

5.4. Kryteria podobieństwa modeli rozkładu prędkości z rozkładem rzeczywistym

Można postawić tezę, że należy tak dobrać model matematyczny rozkładu prędkości, aby błąd średniokwadratowy był jak najmniejszy. W praktyce wyznaczony model matematyczny będzie służył do wyznaczania współczynnika wzorcowania i jak to napisano w ostatnim zdaniu wstępu; ten model będzie najlepszy, dla którego wartość obliczona współczynnika wzorcowania będzie najbliższa wartości rzeczywistej tego współczynnika. Dla konkretnego urządzenia pierwotnego przepływomierza próbkującego współczynnik wzorcowania będzie kryterium podobieństwa modelu do rzeczywistego rozkładu prędkości. Można też sformułować inne kryteria podobieństwa – np. stosunek prędkości w połowie średnicy do prędkości w osi rurociągu. W [19] sformułowano i szczegółowo opisano siedem takich kryteriów. W tabeli 1 zestawiono wartości kryteriów i różnic między wartościami obliczonymi z modelu i wartościami rzeczywistymi.

Tab. 1. Wartości kryteriów i różnic w stosunku do wartości rzeczywistych

Tab. 2. Values of criterion and differences in relation to real values

Kryterium	Profil rzecz.	Model Prandtla	Model potęg. trójskł.	Model złożony
	Wartość	Wart. Różn.	Wart. Różn.	Wart. Różn.
K_1	0,961	0,947 -0,014	0,963 +0,002	0,956 -0,005
K_2	0,971	0,964 -0,007	0,975 +0,004	0,971 0,000
K_3	0,990	0,982 -0,008	0,988 -0,002	0,984 -0,006
K_4	0,985	0,974 -0,009	0,998 +0,014	0,981 -0,004
K_5	1,025	1,029 +0,004	1,036 +0,011	1,026 +0,001
K_6	1,011	1,010 -0,001	1,026 +0,015	1,012 +0,001
K_7	0,971	0,956 -0,015	0,988 +0,017	0,968 -0,003

Jak widać z wartości odchyłek model Prandtla i potęgowy trójskładnikowy nie najlepiej przybliżają rozkład rzeczywisty, natomiast model złożony ze względu na mniejsze odchyłki i różne ich znaki jest zdecydowanie najlepszym modelem matematycznym rzeczywistego rozkładu prędkości. Jeżeli natomiast brać pod uwagę konkretne jedno kryterium, to okazuje się, że dla K_1 i dla K_3 najlepszy jest model potęgowy trójskładnikowy, natomiast dla kryterium K_6 najlepsze są model Prandtla i model złożony.

6. Weryfikacja modeli profili prędkości w płaszczyznach poziomych i w płaszczyznach pionowych w kanale otwartym

Dane do badań symulacyjnych zostały przygotowane w [21] na podstawie wykresów izotach przedstawionych w [22 s. 18, 23 s. 133]. Zamiast naturalnego zbliżonego do trapezu przekroju koryta, jakie przedstawiono w normie [22] i w pozycji [23], do badań symulacyjnych w [21] przyjęto koryto o przekroju prostokątnym, co ułatwia obliczenia i porównanie różnych modeli rozkładu prędkości. W [24] przedstawiono dane wejściowe do obliczeń z wyliczeniem prędkości średnich w 14 pionach i 10 poziomach. Przyjmując kwadratowy wskaźnik jakości podzielony przez wartość średnią prędkości dla poszczególnych poziomów wyznaczono w [24] modele Prandtla (wskaźnik Q_{bp}) uniwersalne (wskaźnik Q_{bu}) i wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Aproksymacja profili poziomych modelem Prandtla i uniwersalnym
Tab. 2. Approximation of horizontal profiles with Prandtl and universal model

Nr p.	Model Prandtla			Model uniwersalny		
	v_{mp} [m/s]	n	Q_{bp}	v_{mu} [m/s]	m	Q_{bu}
1	4,18	3,4	0,033	3,78	5,0	0,065
2	4,14	4,9	0,025	3,76	8,3	0,079
3	4,10	6,5	0,019	3,80	10,1	0,060
4	4,10	6,8	0,016	3,82	10,0	0,049
5	4,06	6,6	0,024	3,78	9,5	0,044
6	3,90	7,3	0,024	3,66	10,0	0,042
7	3,68	9,0	0,017	3,48	11,8	0,035
8	3,52	8,6	0,041	3,32	11,2	0,045
9	3,52	6,5	0,101	3,12	8,5	0,084
10	3,16	3,4	0,127	2,88	4,9	0,081

Wartość średnia bezwymiarowego wskaźnika jakości aproksymacji dla modelu Prandtla wynosi 0,043, a dla modelu uniwersalnego – nieco więcej: 0,058. Z przedstawionych w tabeli 2 wyników obliczeń widać, że w poziomach bliższych lustrze wody i w środkowej głębokości model Prandtla jest lepszy niż model uniwersalny. Dla poziomów 5, 6, 7 i 8 wartości wskaźnika dla obu modeli są małe – tam należy umieszczać punkt pomiaru prędkości miejscowej w przypadku przepływomierza.

W tabeli 3 podano przedstawione w [24] wyniki obliczeń wskaźnika Q_b dla czterech modeli matematycznych pionowych profili prędkości.

Tab. 3. Wartości wskaźnika Q_b dla modeli: Bazyna1, Bazyna2, Hagena, liniowy
Tab. 3. Values of indicator Q_b for models: Bazyna1, Bazyna2, Hagena, linear

Nr pionu	1	2	3	4	5
Bazyna1	0,22	0,20	0,21	0,19	0,18
Bazyna2	0,06	0,09	0,14	0,14	0,14
Hagena	0,23	0,18	0,19	0,16	0,16
Liniowy	0,30	0,20	0,25	0,23	0,22
Nr pionu	6	7	8	9	10
Bazyna1	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18
Bazyna2	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14
Hagena	0,14	0,14	0,13	0,15	0,16
Liniowy	0,22	0,21	0,21	0,22	0,23
Nr pionu	11	12	13	14	
Bazyna1	0,20	0,21	0,22	0,23	
Bazyna2	0,15	0,16	0,20	0,14	
Hagena	0,18	0,19	0,20	0,22	
Liniowy	0,24	0,25	0,26	0,28	

Średnia wartość wskaźnika dla modelu Bazina1 wynosi 0,19, dla modelu Bazina 2 wynosi 0,13, dla modelu Hagena 0,17 i dla modelu liniowego 0,24. Widać stąd, że model Bazina2 jest najlepszy, a liniowy najgorszy.

7. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań modelowych można sformułować następujące wnioski:

1. wzór złożony, zaproponowany w pracy najlepiej przybliża profil rzeczywisty w całym zakresie odległości od osi rurociągu i może on mieć zastosowanie przy próbkujących pomiarach strumienia objętości,
2. prędkość w osi rurociągu dla modeli rozkładu prędkości powinna być traktowana jako estymowany parametr; daje to bowiem lepsze rezultaty niż przyjęcie jej wartości równej wartości rzeczywistej, mimo, że profil prędkości w pobliżu osi jest prawie płaski,
3. zastosowane kryteria oceny podobieństwa modelu matematycznego rozkładu prędkości z rozkładem rzeczywistym pozwalają wybrać model w zależności od konkretnych potrzeb i celu pomiaru,
4. w przypadku aproksymacji profili poziomych w poziomach bliższych lustra wody i w środkowej głębokości kanału otwartego model Prandtla jest lepszy niż model uniwersalny, natomiast w większych głębokościach lepszy jest model uniwersalny,
5. dla aproksymacji profilu prędkości w pionie wzór Bazina2 daje najlepsze wyniki aproksymacji, co świadczy o tym, że trzeba w modelowaniu uwzględniać fakt, że największa prędkość występuje pod powierzchnią płynącej cieczy.

8. Literatura

- [1] Waluś S.: Optymalizacja metrologiczna pomiaru strumienia płynu za pomocą przepływomierzy próbkujących, Monografia 43, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
- [2] Krieser W.: Wyznaczanie współczynnika wzorcowania przepływomierzy próbkujących z czujnikiem prostokątnym umieszczonym na cieciewie rurociągu, Pomiary Automatyka Robotyka, 6/2007.
- [3] PN-81/M-42366. Pomiary przepływu płynu. Pomiary strumienia objętości metodami całkowania bryły prędkości, WN, Warszawa 1981.
- [4] Instrument Engineers' Handbook, Process Measurement and Analysis, Vol. I, Lipták B. G. Editor-in-chief, ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C. 2003.
- [5] Vaterlaus H.P., Hossle T., Gabler H., Giordano P., Avanzi C.: Field Experience and Laboratory Tests of the Acoustic Flowmeter in Closed Conduits and Open Channels, Proceedings of FLOMEKO'96, 1996, Beijing, China, Edited by Zhang Bayou, Han Lide, Zhao Xiaona, Beijing 1996, s. 162-168.
- [6] PN-ISO 6416 Pomiary przepływu w korytach otwartych. Pomiar natężenia przepływu metodą ultradźwiękową (akustyczna), grudzień 2001.
- [7] Waluś S.: Przepływomierze ultradźwiękowe. Metodyka stosowania, Podręcznik akademicki, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [8] PN-ISO 6416 Pomiary przepływu w korytach otwartych. Pomiar natężenia przepływu metodą ultradźwiękową (akustyczna), grudzień 2001.
- [9] PN-M-42370: 1998 Pomiar strumienia objętości płynu w przewodach. Przepływomierze ultradźwiękowe, Opracowali: J. Hruban, F. Strzelczyk, S. Waluś.
- [10] Waluś S.: Pomiar strumienia objętości w rurociągu niepełnym przepływomierzem ultradźwiękowym z równoczesnym pomiarem poziomu, VII Krajowa Konferencja Metrologii i Budowy Aparatury Pomiarowej, Wrocław, 9-11 X 1986, Prace Naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, seria: Konferencje 12, s. 92-95.
- [11] Gätke J.: Volumenstrommessung in geraden zylindrischen Rohren mit Hilfe akustischer Strömungsgeschwindigkeitsmesser, msr, Berlin, vol. 29, nr 4, 1986, s. 161-168.
- [12] Waluś S.: Mathematical Modelling of Sampling Flowmeters, XVI IMEKO World Congress, Sept. 25-29, 2000, Vienna, Austria, Proceedings, Volume VI, Editors: M.N. Durkbas, P.H. Osana, A. Afjehi-Sadat, Austrian Society of Measurement and Automation, 2000, s. 115-120.
- [13] Gondek A.: Wykorzystanie modeli rozkładu prędkości w przewodzie kołowym w pomiarach strumienia objętości, Pomiary Automatyka Robotyka, 7-8/2007.
- [14] Troskoleński A.T.: Hydromechanika, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1967.
- [15] Flow Handbook. A Practical Guide: Measurement Technologies – Applications – Solutions, Endress+Hauser Flowtec AG, CH-4153 Reinach/BL, 2004.
- [16] Hagel M., Waluś S.: Koncepcja wielodrogowych przepływomierzy ultradźwiękowych dla kanałów otwartych, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, nr 847, Seria: Automatyka z. 78, Gliwice 1985, s. 189 – 202.
- [17] Waluś S.: The Mathematical Modelling of the Velocity Distribution in Closed Conduits, Proceedings of FLOMEKO'96, 1996, Beijing, China, Edited by Zhang Bayou, Han Lide, Zhao Xiaona, Beijing 1996, s. 474-479.
- [18] Czeszyk G.: Badania doświadczalne i modelowe uśredniających rurek spiętrzających, praca dyplomowa magisterska, Instytut Automatyki, Politechnika Śląska, Gliwice 1997.
- [19] Waluś S., Dąbrowski T.: Wyznaczanie modelu obiektu dla pośredniego pomiaru strumienia objętości w rurociągu, Podstawowe Problemy Metrologii, Sucha Beskidzka, 12-14.05.2008, Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Seria: Konferencje Nr 12, str. 75-84.
- [20] Dąbrowski T.: Weryfikacja doświadczalna modeli matematycznych obiektu pomiaru dla potrzeb pomiaru strumienia objętości w rurociągu, praca dyplomowa magisterska, Instytut Automatyki, Politechnika Śląska, Gliwice 2007.
- [21] Janczur S.: Weryfikacja doświadczalna modeli matematycznych obiektu pomiaru dla potrzeb pomiaru strumienia objętości w kanale otwartym, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Instytut Automatyki, Gliwice 2007.
- [22] PN-EN ISO 748 Pomiary przepływu w korytach otwartych. Metody prędkość – powierzchnia, grudzień 2001.
- [23] Rózdżyński K.: Miernictwo hydrologiczne, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 1998.
- [24] Waluś S., Janczur S.: Wyznaczanie modeli obiektu dla pośredniego pomiaru strumienia objętości w kanale otwartym, Podstawowe Problemy Metrologii, Sucha Beskidzka, 12-13.05.2008, Prace Komisji Metrologii Oddziału PAN w Katowicach, Seria: Konferencje Nr 12, str. 67-74.