

Stanisław WALUŚ, Eugeniusz GROLIK

Instytut Automatyki

Politechnika Śląska

METODY SPRAWDZANIA PRZEPŁYWOMIERZY ULTRADŹWIĘKOWYCH STOSOWANYCH W KANAŁACH I RZEKACH

Streszczenie. Omówiono pośrednią i bezpośrednie metody wzorcowania przepływomierza ultradźwiękowego stosowanego w kanałach i rzekach. Wyznaczono błędy wzorcowania metodą całkowania rozkładu prędkości oraz metodą stężeniową. Przepływomierze ultradźwiękowe stosowane w górskich rzekach zaleca się sprawdzać metodą stężeniową.

1. Wprowadzenie

Rozróżnia się dwie grupy metod wzorcowania przepływomierzy: wzorcowanie bezpośrednie i wzorcowanie pośrednie. Wzorcowanie bezpośrednie stosowane jest zazwyczaj w stacji wzorcowania, rzadziej w miejscu zabudowy przepływomierza za pomocą ruchomego stanowiska. Wzorcowanie pośrednie oparte jest na analizie modelu matematycznego i w przypadku stosowania przepływomierzy ultradźwiękowych w rurociągach daje dokładność około 1 % [14].

Wzorcowanie pośrednie przepływomierza ultradźwiękowego stosowanego w kanale lub w rzece jest możliwe w przypadku równomiernego ruchu wody w korycie, dobrej znajomości przekroju przepływowego oraz powierzchni prędkości /rozkładu prędkości/. Zakłada się, że geometria organu pomiarowego, tzn. usytuowanie sond względem koryta, jest bardzo dobrze znana. Wzorcowanie pośrednie przepływomierza ultradźwiękowego mierzącego strumień objętości w kanale lub rzece o regularnym przekroju jest wystarczające ze względu na dokładność pomiaru. Przepływomierz ultradźwiękowy wywzorcowany metodą pośrednią wymaga jednak jednorazowego sprawdzenia inną metodą. Zależy więc potrzeba analizy metod sprawdzania odpowiednich dla konkretnych przypadków.

W przypadku pomiaru strumienia objętości w rzece czy kanale nie jest praktycznie możliwe sprawdzenie przepływomierza w stacji ze względu na konieczność budowy odcinka pomiarowego w skali 1:1. Nie jest też możliwy demontaż przepływomierza i przewiezienie go do stacji wzorcowania.

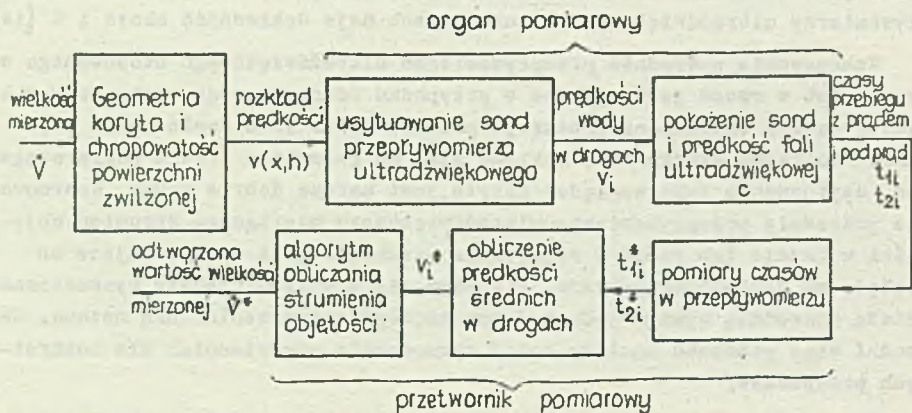
2. Pośrednia metoda wzorcowania

Wzorcowanie przepływomierza ultradźwiękowego zainstalowanego w cieku lub kanale może być dokonane metodą pośrednią, jednak wymaga to spełnienia szeregu warunków :

1. stała powierzchnia prędkości w odcinku pomiarowym, tzn. w odcinku koryta, w którym zainstalowane są sondy przepływomierza,
2. regularny przekrój koryta (stałość jego wyniku z warunku 1) w odcinku pomiarowym,
3. dobra znajomość kształtu rozkładu prędkości (zarówno w pionie jak i w poziomie),
4. dokładne dane o położeniu sond względem koryta.

W praktyce, gdy przekrój koryta jest regularny, w odległości 10 do 20 szerokości koryta w górę oraz około 5 szerokości w dół od miejsca instalowania przepływomierza warunek 1 będzie również spełniony. Warunki 1 i 2 będą na ogół spełnione w kanałach lub w niektórych nizinnych rzekach. Znajomość rozkładu prędkości wymaga uprzedniego wykonania pomiarów, gdyż dokładność modeli teoretycznych nie jest wystarczająca. Dane o położeniu sond wobec obecnych możliwości pomiarów geodezyjnych mogą być wystarczająco dokładne do tworzenia modelu przepływomierza.

Ogólnie pośrednia metoda wzorcowania polega na wyznaczeniu modelu organu pomiarowego i przetwornika pomiarowego przepływomierza ultradźwiękowego według schematu pokazanego na rys.1.



Rys.1. Schemat łańcucha pomiarowego ultradźwiękowego przepływomierza wielodrogowego

Pierwszy blok oznacza obiekt pomiaru ; wielkością mierzoną jest strumień objętości \dot{V} , natomiast przepływomierz ultradźwiękowy reaguje na prędkość w drogach fali ultradźwiękowej, a więc już z zasady pomiaru wynika błąd metody związany z pobraniem wielkości mierzonej. Błąd ten mógłby być wyeliminowany w przypadku znajomości rozkładu prędkości $v(x, h, z)$. Znajomość kształtów rozkładów prędkości opisanych, np. izotachami, dla różnych wartości wielkości mierzonej \dot{V} jest warunkiem znalezienia modelu służącego do odtworzenia wielkości mierzonej \dot{V} w przepływomierzu, a tym samym możliwości wzorcowania na podstawie modelu matematycznego. Ze względu na specyfikę pomiaru przepływu w korytach, gdzie w przeciwieństwie do rurociągów każdy przypadek jest indywidualny, dopiero dla konkretnego punktu pomiarowego można dokonać analizy możliwości stosowania pośredniej metody wzorcowania.

Jak wynika z pobieżnej analizy cieków zasilających GOP w wodę z południa, stosowanie metody pośredniej będzie bardzo trudne ze względu na górski charakter tych cieków (spełniony może być tylko warunek 4).

3. Bezpośrednie metody wzorcowania

Jako bezpośrednią metodę wzorcowania można stosować taką metodę pomiaru, która daje udowodnioną niedokładność pomiaru znacznie mniejszą niż dopuszczalna niedokładność przepływomierza. Koszty stosowania tej metody wraz z kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi przepływomierza ultradźwiękowego w porównaniu z korzyściami stosowania tej metody (stosowanej zamiast przepływomierza ultradźwiękowego) jako metody ciągłej pomiaru - muszą być opłacalne. Jak wynika z analizy metod pomiaru w korytach [12] jako metodę wzorcową można stosować metodę prędkościomierzową (punktową oraz integracyjną) oraz wskaźnikową. W [13] podano analizę porównawczą metody prędkościomierzowej (młynkowej), wskaźnikowej i przelewowej z metodą objętościową. Dla 44 pomiarów metodą młynkową błędy miały wartości od -1,6% do +1% , dla metody wskaźnikowej rozcieńczeniowej (stężeniowej) dla 26 pomiarów błędy zmieniały się w granicach -2,9 % do +2,3% , natomiast metodą wskaźnikową Allena (obłoku) w 27 pomiarach uzyskano błędy zmieniające się w granicach od -2,9 % do +0,2 % . Autor podaje własne szacowanie błędów metody wskaźnikowej : od 1,5 do 2 % dla metody rozcieńczeniowej i metody Allena 2 do 5 % . Wobec powyższego dalej jako ewentualne metody wzorczone będą analizowane dwie : prędkościomierzowa (prowadząca do całkowania rozkładu prędkości) i stężeniowa.

3.1. Metoda prędkościomierzowa z całkowaniem rozkładu prędkości

Metoda ta opisana szczegółowo w [3] i [11] jest obecnie powszechnie stosowana jako pomiarowa i porównawcza. W pracy [7] przeanalizowano stosowanie przepływomierza turbinowego firmy Bestobell [8] .

W tabelicy 1 podsumowano metody całkowania.

Tablica 1. Ocena różnych metod całkowania błędu prędkości.

Metoda	1	2	3	4	5	6	7	8
Kryteria:								
a)	d	d	p	d	p	p	d	pt
b)	r,n	r,(n)	r,n	r,n	r,(n)	m	r,n	r,n
c)	d d	s	d d	d	(bd) _r	dd	(dd) _r	bd
d)	d d	d	d	d d	d d	d d	m	d d

Metody : 1 - Harlachera, 2 - Culmana, 3 - graficzna, 4 - Harlachera - arytmetyczna, 5 - numeryczna, 6 - logarytmiczno-liniowa, 7 - średnich w pionach, 8 - ogólna.

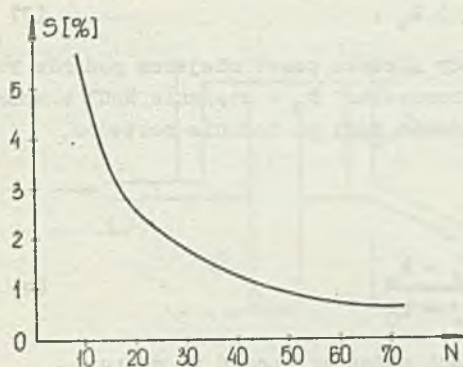
Kryteria : a) uniwersalność - wymagane kształty przekroju przepływowego : d - dowolny, p - prostokątny, t - trapezowy, b) rozkład prędkości : r - regularny, n - nieregularny, m - winien być znany model matematyczny rozkładu, c) dokładność : s - szaba, dd - dość dobra, d - dobra, bd - bardzo dobra, d) nakład pracy obliczeniowej : d - duży, dd - dość duży, m - mały. ()_r - oznacza ograniczony zakres, np. dla przepływów regularnych.

Dla przeprowadzonych badań w kanale prostokątnym o szerokości 1,75 m podano w tablicy 2 błędy wyznaczania \bar{V} dla różnych metod obliczeniowych. Odniesienie stanowił pomiar strumienia objętości za pomocą przelewu Thompsona.

Tablica 2. Błędy wyznaczania \bar{V} przy zastosowaniu różnych metod całkowania (Opis metod w tablicy 1)

Napełnienie [m]	\bar{V} [m ³ /s]	Metoda			
		3	4	5	7
0,090	0,04	-3,75%	-2,83%	-2,7%	-2,58%
0,120	0,04	-3,75%	-4,45%	-4,53%	-4,18%
0,097	0,06	+4,8%	+4,78%	+4,85%	+2,93%
0,120	0,06	+1,67%	+1,57%	+1,7%	+2,87%
0,150	0,06	-4,17%	-3,67%	-3,32%	-4,48%

Stosunkowo duże błędy są związane z małą liczbą poziomów (3) i pionów (11). Na rys. 2 przedstawiono standardowy błąd elementarny pomiarów \bar{V} w zależności od liczby pionów [6].



Rys.2. Standardowy błąd S wynikający z przyjęcia określonej liczby pionów N .

W tabelicy 3 podano oszacowanie błędów pomiarów \dot{V} dla różnych warunków hydraulicznych [6].

Tabela 3. Błędy pomiaru \dot{V} dla różnych warunków hydraulicznych.

Lp.	Rodzaj koryta	Błąd $S \dot{V}$ [%]
1.	Koryto regularne	2 - 4
2.	Koryto nieregularne	3 - 5
3.	Koryto zarastające roślinnością	3 - 5
4.	Pokrywa lodowa z częściowym zatorem	10 - 15
5.	Pokrywa lodowa	1 - 3
6.	Rzeki górskie o względnie regularnym dnie i przepływie	3 - 5
7.	Rzeki górskie z kamienistym dnem i burzliwym przepływem	5 - 10

Oszacowana w [7] wartość błędu średniokwadratowego pomiaru \dot{V} dla koryta regularnego wynosi $\pm 1,8\%$.

3.2. Metoda wskaźnikowo-stężeniowa

Spośród kilku odmian tej metody [1,2] można brać pod uwagę izotopową [9, 12], chemiczną [4] i fizyczną [5, 13]. Metody izotopowe ze względu na ochronę radiologiczną i dokładności pomiaru aktywności próbek nie będą zalecane. Prostota aparatury, dostępność chlorku sodu oraz wiadomy wpływ na jakość wody będą preferowały metodę fizyczną z ciągłym dozowaniem chlorku sodu.

Równanie bilansu chlorku sodu jest następujące :

$$\dot{V} \cdot k_0 + \dot{V}_r k_r = (\dot{V} + \dot{V}_r) k_w, \quad (1)$$

gdzie : \dot{V} - strumień objętości wody w cieku przed miejscem podania roztworu, \dot{V}_r - strumień objętości roztworu, k_0 - stężenie NaCl w wodzie przed dodaniem roztworu, k_w - stężenie NaCl po dodaniu roztworu, k_r - stężenie roztworu.

Z równania (1) otrzymuje się :

$$\dot{V} = \dot{V}_r \frac{k_r - k_w}{k_w - k_0} \quad (2)$$

Błąd wyznaczania strumienia objętości można wyznaczyć ze wzoru :

$$\Delta \dot{V} = \frac{\partial \dot{V}}{\partial \dot{V}_r} \Delta \dot{V}_r + \frac{\partial \dot{V}}{\partial k_w} \Delta k_w + \frac{\partial \dot{V}}{\partial k_r} \Delta k_r + \frac{\partial \dot{V}}{\partial k_0} \Delta k_0. \quad (3)$$

Po wykonaniu obliczeń i założeniu przypadkowego charakteru poszczególnych składników błędów :

$$\delta_{\dot{V}} = \left[\delta_{\dot{V}_r}^2 + a_1^2 \delta_{k_w}^2 + a_2^2 \delta_{k_r}^2 + a_3^2 \delta_{k_0}^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

gdzie : współczynniki a_i wyznacza się dla danych warunków wzorcowania:

$$a_1 = k_w (k_r - k_0) / (k_w - k_0)(k_r - k_w), \quad (5)$$

$$a_2 = k_r / (k_r - k_w), \quad (6)$$

$$a_3 = k_0 / (k_w - k_0). \quad (7)$$

Przykładowo na podstawie [13] $k_r = 200 [\text{kg}/\text{m}^3]$, $\dot{V}_r = 2 \cdot 10^{-4} [\text{m}^3/\text{s}]$ dla $k_w = 4 \cdot 10^{-2} [\text{kg}/\text{m}^3]$ i $k_0 = 0$;

$$\delta_{\dot{V}_r} = 0,5 \% , \quad \delta_{k_w} = 0,3 \% , \quad \delta_{k_r} = 1 \% , \quad \delta_{k_0} = 0 .$$

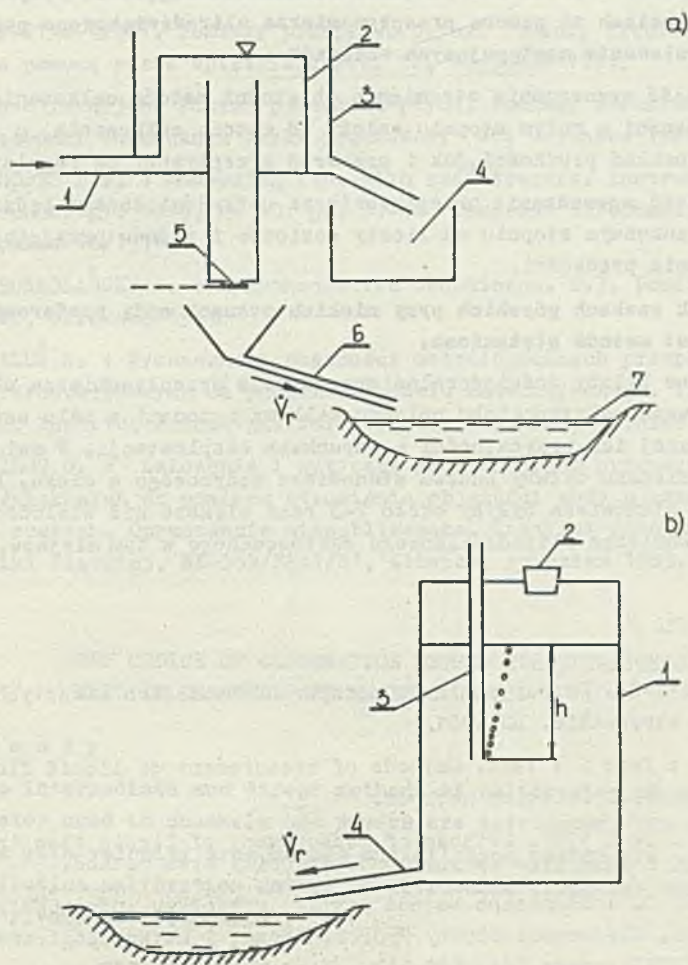
Obliczono wartości a_i i podstawiając do (4) otrzymano w przybliżeniu $\delta_{\dot{V}} = \pm 1,16 \%$.

Błąd $\delta_{\dot{V}_r}$ winien być oszacowany na podstawie analizy urządzenia podającego próbkę roztworu. Zasady działania takich urządzeń pokazano na rys.3.

[5, 13] .

Błąd δ_{k_w} obejmuje nie tylko błąd pomiaru k_w , ale również błąd pobrania próbki (błąd metody) oraz błąd związany z pochłanianiem soli, np. przez roślinność, lub wymianą wody w cieku z wodą gruntową.

Pełna analiza błędów będzie możliwa dla konkretnego przypadku po przeprowadzeniu badań wstępnych.



Rys.3. Zasady podawania stałego strumienia \dot{V}_r :

a) z przelewem : 1 - doprowadzenie roztworu, 2 - zbiornik o stałym napełnieniu, 3 - zbiornik przelewowy, 4 - zbiornik magazynujący, 5 - kłapa, 6 - doprowadzenie roztworu do ciek, 7 - ciek ;

b) ze stałym ciśnieniem, od którego zależy wypływ : 1 - zbiornik zamknięty, 2 - korek, 3 - rurka z powietrzem ustalająca ciśnienie na wysokości dołu rurki, które jest równe atmosferycznemu, 4 - doprowadzenie roztworu do ciek.

Opisana tu metoda stężeniowa może być praktycznie stosowana w przypadku małych cieków przy niskich stanach wody. Woda winna być czysta.

4. Podsumowanie

Dotychczasowe prace nad pomiarem strumienia objętości wody w ciekach i kanałach za pomocą przepływomierza ultradźwiękowego pozwalają na sformułowanie następujących wniosków :

1. Dokładność wyznaczania strumienia objętości metodą całkowania rozkładu prędkości w małym stopniu zależy od metody całkowania, o ile zarówno rozkład prędkości, jak i przekrój przepływu są regularne.
2. Dokładność sprawdzania przepływomierza ultradźwiękowego będzie zależała w znacznym stopniu od liczby poziomów i pionów przyjętych do sondowania prędkości.
3. W małych rzekach górskich przy niskich stanach wody preferowaną metodą jest metoda stężeniowa.
4. Korzystne byłoby doświadczalne sprawdzenie przepływomierza ultradźwiękowego na stanowisku polowym kilkoma metodami w celu ustalenia praktycznej ich przydatności w warunkach eksploatacji. W związku z tym zalecana byłaby budowa stanowiska wzorcowego w cieku. Koszty takiego stanowiska byłyby około 2-3 razy większe niż wielodrogowego przepływomierza ultradźwiękowego zastosowanego w tym miejscu.

LITERATURA

- [1] BN-72-6210-04. Metody pomiarów przepływu w kanałach otwartych. Podział i stosowanie. WN 1981.
- [2] BS 3680 : Part 2 : 1964. Methods of measurement of liquid flow in open channels. Dilution methods.
- [3] BS 3680 : 3A : 1980. Methods of measurement of liquid flow in open channels. Stream flow measurement. Velocity area method.
- [4] CZARNOCKI T. : Chemiczna metoda pomiaru przepływu wody w korytach otwartych. Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej. Tom VI (XVII). zesz. 3/4, (83-84), WKiŁ, Warszawa 1970.
- [5] CZĘDERTYŃSKI B., SZCZĘCER A. : Hydrologia i Hydraulika. WSiP, W-wa 1971.
- [6] PAŁ B. : Przegląd współczesnych metod określania dokładności pomiarów przepływu. Wiadomości Meteorologii i Gospodarki Wodnej. tom III (XXIV) zesz. 3/4, WKiŁ, Warszawa 1976.
- [7] GROLIK E. : Projekt stanowiska wzorcowego do badań przepływomierzy w kanałach otwartych z wykorzystaniem przepływomierza turbinowego typu sonda. Praca dyplomowa magisterska. Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej, Gliwice, czerwiec 1983.
- [8] Katalog firmy BESTOBELL - Wielka Brytania.
- [9] MAKOWSKI J. : Radiometryczne metody pomiaru natężenia przepływu cieków

Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Tom IV (XXV), zesz.4. WKiŁ, Warszawa 1978.

- [10] PN-81/M-42367. Pomiar przepływu płynu. Pomiar prędkości przepływu za pomocą rurek spiętrzających. WN, Warszawa 1981.
- [11] PN-81/M-42366. Pomiar przepływu płynu. Pomiar strumienia objętości metodami całkowania bryły prędkości. WN, Warszawa 1981.
- [12] RHODES D.F. : Measuring flow with radiotracers. Instrumentation Technology, 1975, nr 10, pp. 43-48. Ekspres Informacja, KIT, Moskwa 16/1976.
- [13] TROSKOLAŃSKI A. : Hydromechanika techniczna. T.3, Pomiar wodno. PWT, Warszawa 1957.
- [14] WALUS S. : Wyznaczanie własności metrologicznych przepływomierzy ultradźwiękowych na podstawie modelu matematycznego. Praca doktorska, Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej, Gliwice, kwiecień 1980.
- [15] WALUS S. : Założenia i wytyczne konstrukcyjne przepływomierzy ultradźwiękowych do pomiaru strumienia objętości wody w kanałach otwartych i rzekach. Opracowanie niepublikowane. Instytut Automatyki Politechniki Śląskiej, NB-360/RAu1/81, Gliwice, grudzień 1983.

THE CHOICE OF CALIBRATION METHOD FOR ULTRASONIC FLOWMETER
USED IN CHANNELS AND WATER-COURSES

S u m m a r y

The intermediate and direct methods of calibration of an ultrasonic flowmeter used in channels and rivers are introduced. The calibration errors with velocity area method and dilution method are calculated. The dilution calibration method of ultrasonic flowmeter used in mountain rivers is recommended.

МЕТОДЫ ПОВЕРКИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ
В КАНАЛАХ И ВОДОТОКАХ

Р е з ю м е

В работе оговорены посредственный и непосредственный методы поверки ультразвукового расходомера, применяемого в каналах и реках. Определены ошибки поверки методом интегрирования распределения скорости и методом концентрации. Ультразвуковые расходомеры рекомендуется поверять методом концентрации, ежели они применяются в горных реках.