

Stanisław KOPACZ, Stanisław WALUŚ
Instytut Automatyki
Politechnika Śląska

BŁĘDY NIESTAŁOŚCI UŚREDNIAJĄCYCH RUREK SPIĘTRZAJĄCYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono prosty model matematyczny uśredniającej rurki spiętrzającej. Korzystając z modelu wyznaczono błędy niestałości spowodowane zmianą oporu przepływu jednego z otworków dla różnych rozkładów prędkości. Na podstawie przeprowadzonej analizy sformułowano wnioski dotyczące konstrukcji i instalowania rurki.

1. Wprowadzenie

Uśredniająca rurka spiętrzająca jest realizowana w postaci cylindra z otworkami na tworzącej po stronie napływającej strugi i po stronie przeciwnej /rys.1/. Ciśnienie różnicowe mierzone jest sumą ważoną ciśnień dynamicznych powstających na wlotach otworków. Właściwości rurki uśredniającej pozwalają uzyskać lepiej powtarzalną zależność pomiędzy strumieniem objętości a ciśnieniem różnicowym niż klasyczne rurki spiętrzające [5] [6] w warunkach zmiennego rozkładu prędkości strugi płynu w rurociągu (zmieniana wartość liczby Re oraz zmienna chropowatość ścianki wewnętrznej rurociągu).

Uśrednianie jest realizowane dzięki oporom przepływu płynu przez otwórki w ściance rurki uśredniającej. Ponieważ w warunkach przemysłowych otwórki mogą ulec zanieczyszczeniu, może to zmienić współczynniki wag sumowanych ciśnień cząstkowych. Zmiana oporów przepływu może więc doprowadzić do powstawania dodatkowych błędów pomiaru. Celem niniejszego opracowania jest oszacowanie wartości tych błędów.

2. Model matematyczny uśredniającej rurki spiętrzającej

Dla rurki pokazanej na rys.1 można zbudować analog elektryczny pokazany na rys.2, który można opisać równaniem :

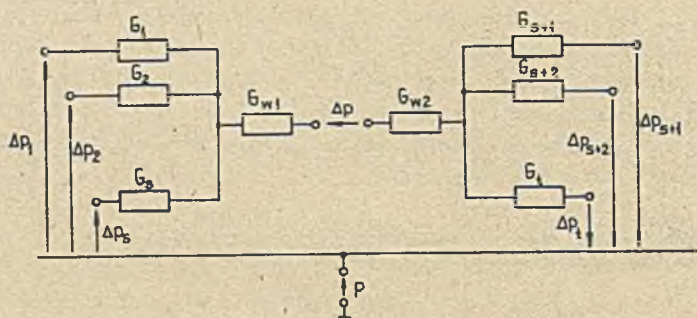
$$\Delta p = \frac{\sum_{i=1}^s \Delta p_i G_i}{\sum_{i=1}^s G_i} + \frac{\sum_{i=s+1}^t \Delta p_i G_i}{\sum_{i=s+1}^t G_i}, \quad /1/$$

gdzie : t - sumaryczna liczba otworków,
 s - liczba otworków po stronie napływowej,
 Δp - ciśnienie różnicowe,
 Δp_1 - dynamiczne ciśnienie cząstkowe,
 G_1 - przewodność hydrauliczna (pneumatyczna) otworków.



Rys. 1. Szkic budowy spiętrzającej rurki uśredniającej

Równanie /1/ wyprowadzono zakładając, że opory przepływu wewnątrz rurki są pomijalnie małe w porównaniu z oporami otworków oraz że ciśnienie różnicowe Δp jest mierzone manometrem o nieskończenie dużej oporności wejściowej. W tych warunkach ciśnienie różnicowe na wyjściu rurki spiętrzającej jest niezależne od przewodności rurek impulsowych G_{w1} i G_{w2} .



Rys. 2. Schemat zastępczy uśredniającej rurki spiętrzającej, gdzie : G_{w1} , G_{w2} - przewodności przewodów.

Rurki spiętrzające buduje się tak, aby $G_i = \text{idem}$, wtedy :

$$\Delta p' = \frac{\sum_{i=1}^s \Delta p_i}{s} + \frac{\sum_{i=s+1}^t \Delta p_i}{t-s} \quad /2/$$

Liczbę i rozmieszczenie otworków w ścianie rurki spiętrzającej dobiera się tak, aby w maksymalnym stopniu uniezależnić wyniki pomiaru od rozkładu prędkości strugi [2, 3, 4].

Zmiany oporów przepływu przez otworki (zmiany G_i) powodują zmiany współczynników wag ciśnień cząstkowych i są przyczyną powstawania błędów dodatkowego określonego wzorem :

$$\Delta(\Delta p) = \Delta p - \Delta p' = \frac{\sum_{i=1}^s (\Delta p_i - \Delta p_s \text{ śr}) \Delta G_i}{\sum_{i=1}^s (G_0 + \Delta G_i)} + \frac{\sum_{i=s+1}^t (\Delta p_i - \Delta p_t \text{ śr}) \Delta G_i}{\sum_{i=s+1}^t (G_0 + \Delta G_i)} \quad /3/$$

Wz. wzorze /3/ przyjęto oznaczenia :

$G_i = G_0 + \Delta G_i$, gdzie G_0 jest dowolnie wybraną wartością przewodności hydraulicznej otworków, np. wartością nominalną
a ΔG_i - odchyłkami od wartości G_0 ;

$\Delta p_s \text{ śr}$ - średnia wartość cząstkowych ciśnień dynamicznych po stronie napływowej ;

$\Delta p_t \text{ śr}$ - średnia wartość cząstkowych ciśnień dynamicznych po stronie odpływowej ;

W typowej konstrukcji uśredniającej rurki spiętrzającej z jednym otworkiem po stronie odpływowej $t = s+1$, a błąd bezwzględny można obliczyć ze wzoru :

$$\Delta(\Delta p) = \frac{\sum_{i=1}^s (\Delta p_i - \Delta p_s \text{ śr}) \Delta G_i}{\sum_{i=1}^s (G_0 + \Delta G_i)} \quad /4/$$

Błąd względny, odniesiony do ciśnienia różnicowego, określa wzór :

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^s (\Delta p_i - \Delta p_s \text{ śr}) \Delta G_i}{(\Delta p_s \text{ śr} + \Delta p_{s+1}) \sum_{i=1}^s (G_0 + \Delta G_i)} \quad /5/$$

Jeżeli wybrać $G_0 = G_{\text{śr}}$, to wzór /5/ upraszcza się i przyjmuje postać :

$$\delta = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^S \frac{\Delta P_i \Delta G_i}{(\Delta P_{S\acute{s}r} + \Delta P_{S+1})^2 G_{\acute{s}r}} \quad /6/$$

3. Błędy niestałości dla przepływu burzliwego

Wartości błędów niestałości wyznaczono zakładając, że przepływ jest burzliwy, gdyż przepływ burzliwy występuje w większości rurociągów przemysłowych [8].

Występujące we wzorze na błąd niestałości wartości ciśnień cząstkowych są zależne od rozkładu prędkości w rurociągu. Rozkład prędkości dla przepływu burzliwego może być opisany wzorem potęgowym Prandtla [1,8]:

$$v = v_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad /7/$$

gdzie: v_0 - prędkość w osi rurociągu,
 R - promień wewnętrzny rurociągu,
 r - odległość od osi rurociągu,
 $\frac{1}{n}$ - wykładnik zależny od liczby Re i chropowatości ścianki rurociągu.

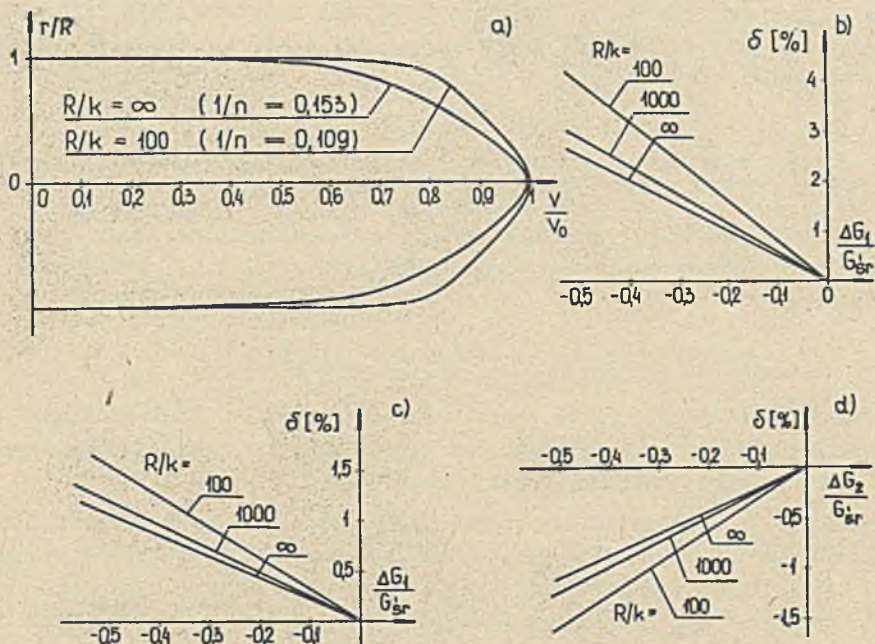
Korzystając ze wzoru wiążącego wartość wykładnika $\frac{1}{n}$ z kształtem rozkładu prędkości [1] oraz z wykresu podanego w [10] obliczono rozkład prędkości dla $Re = 10^6$ i $R/k = \infty, 1000, 100$ oraz wartości $1/n = 0,09534, 0,10859, 0,15285$. Wartość k jest wielkością chropowatości ścianki rurociągu.

Ciśnienie dynamiczne P_d w danym punkcie rurociągu wyraża się wzorem [11]:

$$P_d = \frac{\rho v^2}{2}, \quad /8/$$

gdzie: ρ - gęstość płynu.

Obliczone profile prędkości przedstawiono na rys.3a. Na rys.3b przedstawiono wykres zależności błędu od przyrostu przewodności otworków (dla rurki z czterema otworkami od strony napływającego płynu) obliczone przy założeniu, że zmienia się przewodność tylko jednego skrajnego otworka oraz, że otworek po stronie odpływowej jest umieszczony w miejscu, w którym ciśnienie dynamiczne jest równe zero [5], tzn. $\Delta p_{4+1} = 0$. Otworki lub otworek po stronie odpływowej są usytuowane naprzeciw otworków po stronie napływowej. Wykonano obliczenia dla rurki z 4 otworami po stronie napływowej i jednym po stronie odpływowej (umieszczonym w osi rurociągu).



Rys.3. Błędy niestałości dla różnych wartości chropowatości rurociągu
 a/ profil prędkości dla $1/n = 0,153$ ($R/k = \infty$) oraz $1/n = 0,109$ ($R/k = 100$),
 b/ błędy względne niestałości dla zwiększonego oporu otwarka 1 i jednakowych oporów pozostałych (dla rurki z $\Delta p_{4+1} = 0$),
 c/ błędy względne niestałości dla zwiększonego oporu otwarka 1, otwór po stronie odpływowej w osi rurociągu ;
 d/ błędy względne niestałości dla zwiększonego oporu otwarka 2 otwór po stronie odpływowej w osi rurociągu.

Na rys.3b przedstawiono zależność błędu niestałości od zmiany oporu otworka skrajnego (przy założeniu, że opory pozostałych są niezmiennie), natomiast na rys.3c przedstawiono zależność błędu niestałości od zmiany oporu jednego z otworków środkowych. Błędy na rys.3b i 3c są te same co do modułu, mają jednak przeciwny znak. Porównując błędy na rys. b/ oraz c/ widać, że ze względu na błąd niestałości rurka z jednym otworkiem po stronie odpływowej położonym w osi rurociągu jest korzystniejsza, niż rurka z wyjściem proporcjonalnym do różnicy między średnim ciśnieniem dynamicznym i ciśnieniem statycznym.

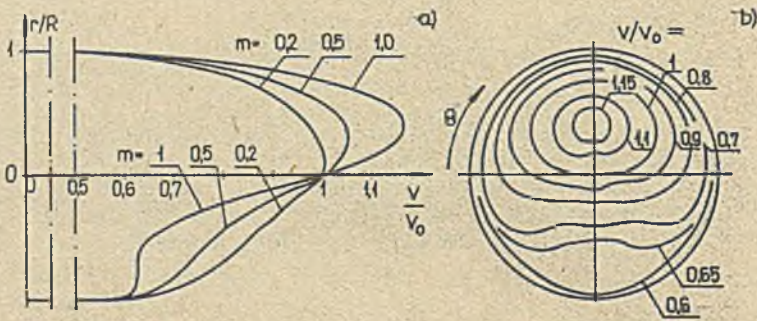
4. Błędy niestałości w przypadku zniekształconego rozkładu prędkości

L. Salami podaje [7] szereg wzorów opisujących zniekształcone rozkłady prędkości. Wybrano praktycznie spotykane zniekształcenie, które może być opisane wzorem :

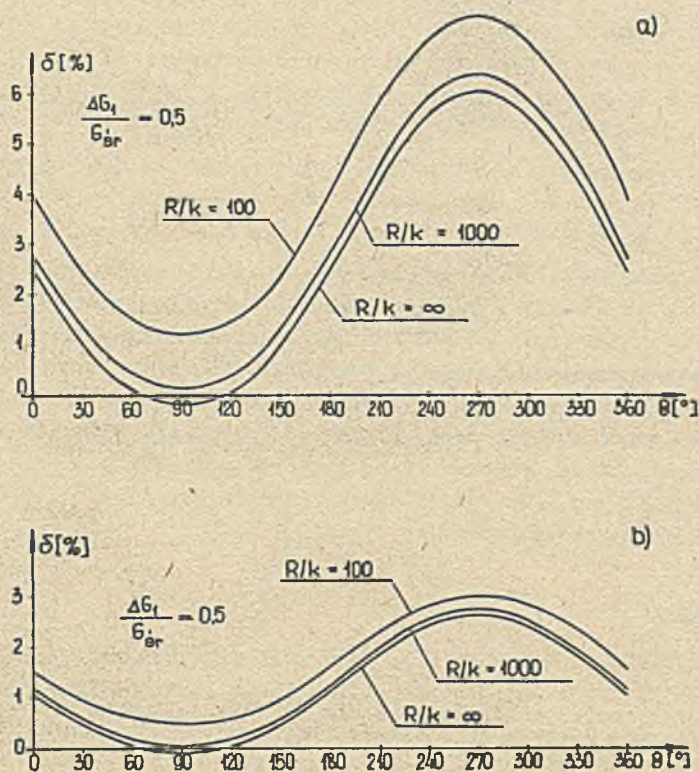
$$v = v_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} + m \frac{r}{R} \left(1 - \frac{r}{R}\right) \sin \theta \quad , \quad /9/$$

gdzie : m - współczynnik charakteryzujący stopień zniekształcenia rozkładu prędkości, θ - współrzędna kątowa charakteryzująca położenie rurki uśredniającej względem rozkładu prędkości.

Na rys. 4a przedstawiono profil prędkości dla różnych wartości współczynnika m , natomiast na rys.4b izotachy dla $m=1$ oraz zaznaczono kąt θ , pod którym rurka uśredniająca jest zainstalowana w rurociągu. Przyjęto, podobnie jak w poprzednim przypadku, że tylko jeden z otworków zmienia swoją przewodność.



Rys.4. Zniekształcony rozkład prędkości : a/ profile dla różnych wartości współczynnika m , b/ izotachy dla $m = 1$.



Rys.5. Błędy względne niestałości spiętrzącej rurki usredniającej w funkcji jej położenia względem zniekształconego rozkładu prędkości dla różnych chropowatości rurociągu.
 a/ otwór po stronie wylotowej w miejscu $\Delta p_{4+1} = 0$,
 b/ otwór po stronie odpływowej w osi rurociągu.

Wartość błędu jest zależna od położenia rurki względem rozkładu prędkości. Zależność tę dla rurki, w której $\Delta p_{4+1} = 0$, ilustruje wykres na rys.5a wyznaczony dla trzech wartości chropowatości R/k : ∞ , 1000 i 100. Wartość $R/k = \infty$ odpowiada rurze hydraulicznie gładkiej, natomiast wartość $R/k = 100$ odpowiada praktycznie największej spotykanej w warunkach przemysłowych chropowatości. Na rys. 5b przedstawiono analogiczną zależność dla rurki z otworem od strony odpływowej, usytuowanym w osi rurociągu.

6. WNIOSKI

1. Błędy niestałości mogą przyjmować znaczące wartości zwłaszcza przy niesymetrycznym przepływie.
2. Ze względu na to, że wartość błędu jest zależna od wartości różnic przewodności poszczególnych otworków, wskazane jest takie montowanie rurki, by wszystkie otworki były w jednakowym stopniu zabezpieczone przed oddziaływaniem zanieczyszczeń.
3. Minimalizacja błędu niestałości w przypadku niesymetrycznych profili prędkości wymaga oszacowania tych profili i odpowiedniego uytuowania rurki.
4. Uśredniająca rurka spiętrzająca z otworkiem umieszczonym po stronie odpływowej w osi rurociągu ma znacznie mniejsze błędy niestałości niż rurka z otworkami umieszczonymi z boku, dla których ciśnienie dynamiczne jest równe zeru.
Ponieważ błędy dodatkowe wynikające z niestałości oporów przepływu przez otworki mogą przyjmować wartości porównywalne z wartościami błędów podstawowych, istnieje potrzeba podjęcia bardziej wnikliwych badań nad wpływem warunków pracy na błędy niestałości uśredniających rurek spiętrzających.

LITERATURA

- [1] BUKOWSKI J., KIJKOWSKI P. : Kurs mechaniki płynów. PWN, Warszawa 1980.
- [2] HICKMAN W.H. : Annubar properties investigation. Proceedings of ISA's Industry Oriented Conference and Exhibit, Milwaukee, October 6-9, 1975. Instrument Society of America, Pittsburg, 1975, Vol.30, Part 3, s.708, (1 + 14).
- [3] Katalog firmy Dieterich Standard Corporation, USA.
- [4] Katalog firmy Industrial Measurement Devices Ltd, Wielka Brytania.
- [5] LENSEK I.S., MOSEJCUK R.N. : Opredelenie raschoda sredy s pomosc'ju integralnykh trubok. Energetik, nr 5, 1975, s.28.
- [6] PR-81/M-42366. Pomiary przepływu płynu. Pomiary strumienia objętości metodami całkowania bryły prędkości. MN, Warszawa, 1981.
- [7] SALAMI L.A. : Errors in the velocity-area method of measuring asymmetric flows in circular pipes. Modern developments in flow measurement Peter Peregrinus, Harwell, 1972, s.381-400.
- [8] TROSKOLAŃSKI A.T. : Hydromechanika. WNT, W-wa 1967.
- [9] WALUŚ S. : Przyczynek do modelu matematycznego rurki uśredniającej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Automatyka, artykuł przyjęty do druku w 1983 r.
- [10] WALUŚ S. : Wyznaczanie własności metrologicznych przepływomierzy ultradźwiękowych na podstawie modelu matematycznego. Praca doktorska. Instytut Automatyki, Gliwice 1980.
- [11] WOJCIECHOWSKI J. : Pomiary w elektrowniach cieplnych. PWT, Warszawa 1958.

UNSTABILITY ERRORS OF AVERAGING IMPACT TUBES

Summary. A simple mathematical model for an averaging impact tube is presented. Then it is applied to estimate instability errors resulting from a change of a resistance of flow for one of the apertures and from different speed distributions. Some conclusions about design and placement of the tube are formulated basing on the analysis.

ОШИБКИ НЕПОСТОЯНСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ НАПОРНЫХ ТРУБОК

/ Резюме /

В работе дана простая математическая модель интегральной напорной трубки. Используя модель определены ошибки непостоянства из-за неустойчивости сопротивления потока одного из отверстий для разного распределения скорости. На основе проведённого анализа сформулированы указания по конструированию и монтажу трубки.