

Janusz WOJTKOWIAK, Czesław OLEŚKOWICZ-POPIEL
Instytut Inżynierii Środowiska, Politechnika Poznańska

LAMINARNY PRZEPLYWOMIERZ SZCZELINOWY (badania eksperymentalne)

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań udoskonalonej wersji przepływomierza szczelinowego o szerokim zakresie pomiarowym, liniowej charakterystyce $\Delta p = f(\dot{V})$ (gdzie: Δp – mierniczy spadek ciśnienia, \dot{V} – strumień objętości płynu) i dużej dokładności. Badano model przepływomierza o zakresie pomiarowym dla wody od 0,2 dm³/min do 5,6 dm³/min i jednostkowym mierniczym spadku ciśnienia ok. 140 Pa/(dm³/min). Zbadano wpływ rozmieszczenia króćców impulsowych na liniowość charakterystyki przepływomierza. Wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń. Pokazano, że tylko dla odpowiednio rozmieszczonych króćców impulsowych charakterystyka przepływomierza szczelinowego jest liniowa i jedynie w takim przypadku charakterystyka ta może być określana analitycznie.

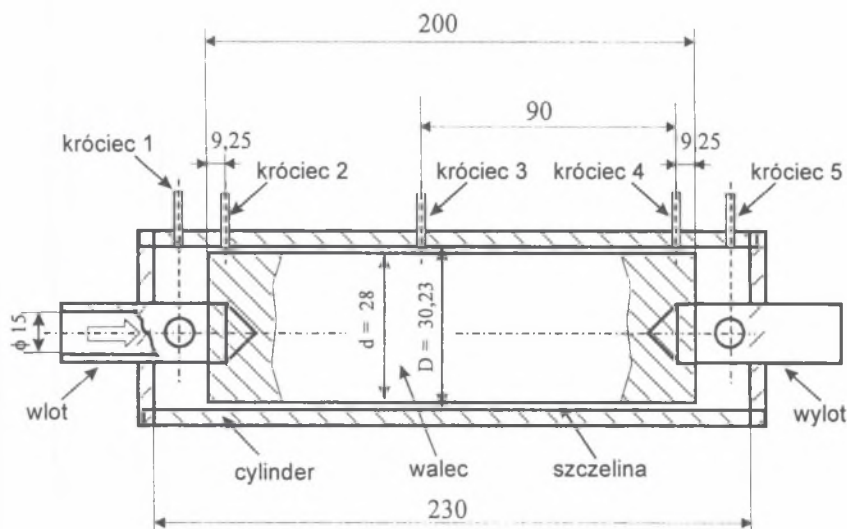
A GAP-TYPE LAMINAR FLOWMETER (experimental investigation)

Summary. An improved version of a laminar gap-type flowmeter of linear characteristics $\Delta p = f(\dot{V})$ (Δp – pressure drop, \dot{V} – volume flow rate), wide measuring range and high accuracy is investigated experimentally using water. The measuring range and pressure drop factor of the tested flowmeter are 0.2 – 5.6 dm³/min and 140 Pa/(dm³/min), respectively. An effect of locations of pressure taps on flowmeter linearity is examined. It is shown that only for appropriate locations of pressure tabs the flowmeter characteristics are linear and only in this case the experimental characteristics are identical with these obtained theoretically.

Wprowadzenie

W inżynierii środowiska często występują sytuacje wymagające pomiarów małych strumieni przepływu. Nowy typ przepływomierza laminarnego, zwany przepływomierzem tłokowym lub szczelinowym [1], bardzo dobrze nadaje się do tego celu, gdyż charakteryzuje się szerokim zakresem pomiarowym, liniową charakterystyką $\Delta p = f(\dot{V})$ i dużą dokładnością. Badany przepływomierz pokazano na rys. 1. Podstawowe części przepływomierza to cylinder

i umieszczony w nim współosiowo walec. Pomiędzy wewnętrzną powierzchnią cylindra i zewnętrzną powierzchnią walca istnieje wąska pierścieniowa szczelina. Jeżeli przepływ w szczelinie jest w pełni rozwinięty i laminarny, to spadek ciśnienia w szczelinie jest wprost proporcjonalny do strumienia przepływającego płynu. Króćce impulsowe przepływomierza powinny być zatem rozmieszczone w taki sposób, aby z mierniczego spadku ciśnienia wyeliminować składniki nieliniowe, a mianowicie zmianę ciśnienia na wlocie do szczeliny, zmianę ciśnienia na wylocie ze szczeliny oraz zmianę ciśnienia związaną z kształtowaniem się w pełni rozwiniętego profilu prędkości w szczelinie, czyli tzw. stratę rozbiegową. Długość i szerokość szczeliny oraz rozmieszczenie króćców impulsowych w przepływomierzu pokazany na rys. 1 określono wykorzystując wyniki wcześniejszych obliczeń [2–4].



Rys. 1. Badany przepływomierz (rysunek bez zachowania skali)
Fig. 1. Tested flowmeter (not in scale)

Celem obecnie opisywanych badań było:

– sprawdzenie, czy przepływomierz pokazany na rys. 1 spełnia założenia projektowe, tzn. czy w zakresie przepływów wody o temperaturze 20°C wynoszącym od $0,2 \text{ dm}^3/\text{min}$ do $5,6 \text{ dm}^3/\text{min}$ charakterystyka przepływomierza jest liniowa oraz czy jednostkowy mierniczy spadek ciśnienia (wynikający z teorii) ma wartość $140 \text{ Pa}/(\text{dm}^3/\text{min})$,

– zbadanie wpływu rozmieszczenia króćców impulsowych na liniowość charakterystyk przepływomierza,

– porównanie teoretycznie wyznaczonych charakterystyk z charakterystykami eksperymentalnymi.

Podstawy teoretyczne

Rozwiązanie równania zachowania pędu dla ustalonego, w pełni rozwiniętego, laminarnego przepływu płynu newtonowskiego w pierścieniowej szczelinie pomiędzy dwoma współosiowymi powierzchniami cylindrycznymi prowadzi do następującej zależności na współczynnik strat ciśnienia K [5]:

$$K = \frac{64}{\text{Re}} \frac{(D-d)^2 (D^2 - d^2)}{D^4 - d^4 - \frac{(D^2 - d^2)^2}{\ln \frac{D}{d}}} \quad (1)$$

gdzie:

$$\text{Re} = \frac{2sU}{\nu}, \quad s = \frac{1}{2}(D-d), \quad U = \frac{4\dot{V}}{\pi(D^2 - d^2)},$$

Re – liczba Reynoldsa dla przepływu w szczelinie,

U – średnia prędkość płynu w szczelinie,

s – szerokość szczeliny,

ν – lepkość kinematyczna płynu,

D – średnica zewnętrzna szczeliny pierścieniowej,

d – średnica wewnętrzna szczeliny pierścieniowej,

\dot{V} – strumień objętości płynu.

Strata ciśnienia Δp w szczelinie dla wyżej określonego przepływu wynosi:

$$\Delta p = K \frac{1}{2} \rho U^2 \frac{L}{2s} \quad (2)$$

lub uwzględniając wzór (1)

$$\Delta p = \frac{128\rho L v \dot{V}}{\pi \left[D^4 - d^4 - \frac{(D^2 - d^2)^2}{\ln \frac{D}{d}} \right]} \quad (3)$$

gdzie:

ρ – masa właściwa płynu,

L – odległość między króćcami impulsowymi.

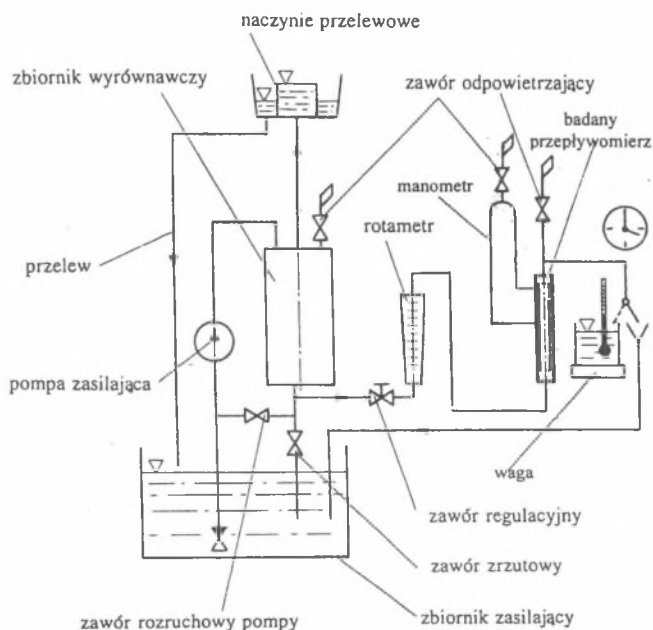
Z równania (3) wynika liniowa zależność Δp od \dot{V} .

Jeżeli konstrukcja, wykonanie i warunki działania przepływomierza szczelinowego spełniają założenia, dla których otrzymano powyższe równania, to zależność (1) będzie charakterystyką bezwymiarową $K = f(Re)$, a zależność (3) charakterystyką wymiarową $\Delta p = f(\dot{V})$ omawianego przepływomierza.

Stanowisko badawcze i metoda badań

Badany przepływomierz (rys. 1) wykonano z bezbarwnego polimetakrylanu metylu (PMMA) i wyposażono w pięć króćców impulsowych. Właściwe króćce impulsowe (3 i 4 na rys. 1) rozmieszczono w taki sposób, aby wyeliminować z mierniczego spadku ciśnienia Δp wszystkie składniki nieliniowe. Dodatkowe króćce (1, 2 i 5 na rys. 1) zastosowano w celu sprawdzenia wpływu składników nieliniowych (tzn. zmiany ciśnienia na wlocie do szczeliny, zmiany ciśnienia na wylocie ze szczeliny oraz zmiany ciśnienia na odcinku rozbiegowym) na charakterystyki przepływomierza. Na rysunku 2 pokazano schemat stanowiska badawczego. Pomiary wykonano w warunkach ustalonych z wykorzystaniem wody. Naczynie przelewowe zapewniało stałą wartość naporu hydrostatycznego i tym samym stałą wartość strumienia wody. Temperatura wody była równa temperaturze otoczenia i wynosiła 20–21°C. Dzięki dużym objętościom zbiornika zasilającego i zbiornika wyrównawczego (łącznie ok. 40 dm³) przyrost temperatury wody podczas pomiarów, spowodowany pracą pompy, nie przekraczał 1°C. Dla zadanej nastawy zaworu regulacyjnego mierzono masę wody za pomocą wagi laboratoryjnej SARTORIUS LC 12001P o zakresie 12 kg i dokładności 0,1 g, czas –

stoperem elektronicznym CASIO HS-5 oraz mierniczy spadek ciśnienia Δp – odwróconymi manometrami wodnymi typu U-rurka.



Rys. 2. Stanowisko badawcze

Fig. 2. Experimental set-up

Bezwzględne niepewności wyników pomiarów wynosiły:

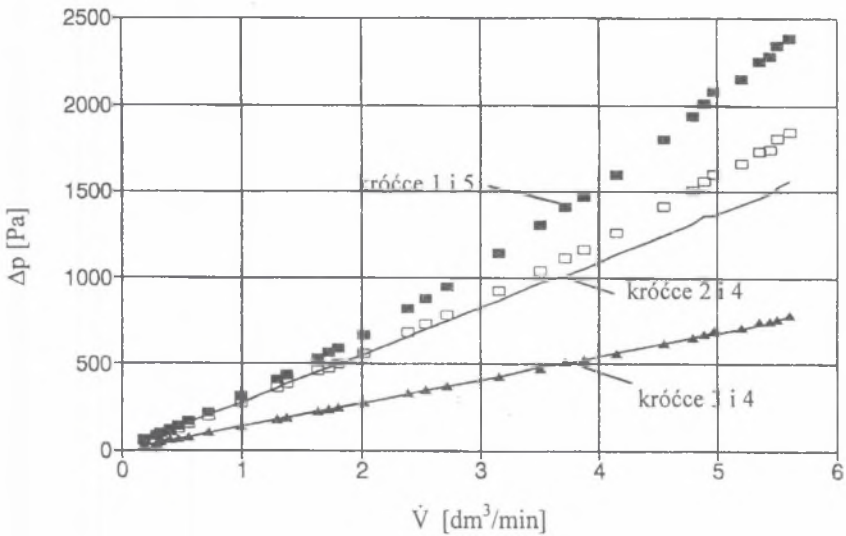
- mierniczy spadek ciśnienia $\pm 0,2 \text{ mm H}_2\text{O}$ (ok. $\pm 2 \text{ Pa}$),
- czasu $\pm 0,01 \text{ s}$,
- masy wody $\pm 0,5 \text{ g}$,
- temperatury wody $\pm 0,1^\circ\text{C}$,
- temperatury otoczenia (cieczy manometrycznej) $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Wyniki badań

Wyniki badań przedstawiono w postaci charakterystyk wymiarowych $\Delta p = f(\dot{V})$ oraz charakterystyk bezwymiarowych $K = f(\text{Re})$, dla trzech par króćców impulsowych (rys. 1): króćców 3 i 4, 2 i 4 oraz 1 i 5. Przy opracowywaniu wyników pomiarów korzystano

z zależności analitycznych określających zależność lepkości i gęstości wody od temperatury [6]. Na rysunku 3 pokazano charakterystyki wymiarowe $\Delta p = f(\dot{V})$, a na rys. 4 charakterystyki bezwymiarowe $K = f(\text{Re})$ badanego przepływomierza. Punkty na rysunkach 3 i 4 oznaczają wyniki pomiarów, natomiast linie prezentują wyniki obliczeń teoretycznych otrzymane za pomocą wzoru (3) – linie na rys. 3 lub wzoru (1) – linia na rys. 4.

Jak wynika z rys. 3, zależność $\Delta p_{3-4} = f(\dot{V})$ (gdzie: Δp_{3-4} – różnica ciśnień w szczelinie pomiędzy króćcami 3 i 4) jest liniowa w całym zbadanym zakresie przepływów, tzn. od $0,2 \text{ dm}^3/\text{min}$ do $5,6 \text{ dm}^3/\text{min}$. Zakres ten odpowiada zmianom liczby Reynoldsa od 70 do 2100 (rys. 4).

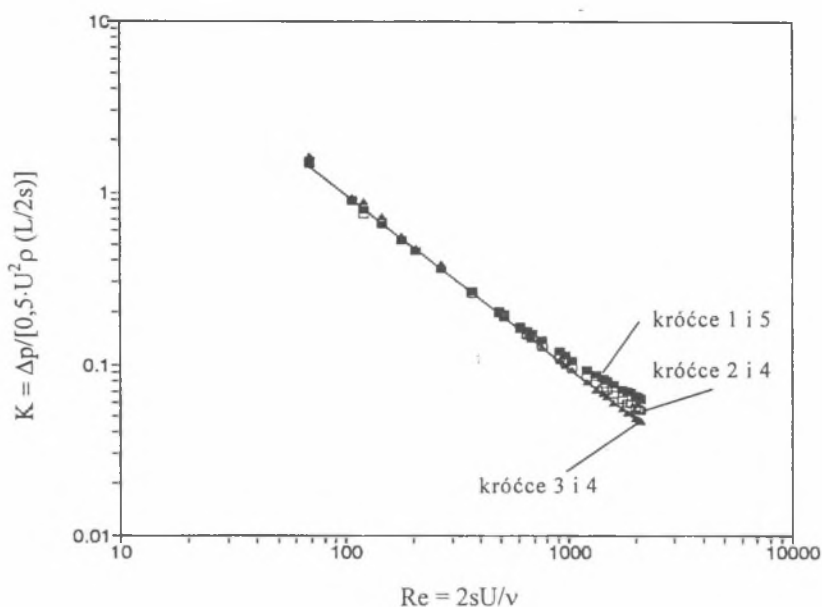


Rys. 3. Charakterystyki wymiarowe $\Delta p = f(\dot{V})$ badanego przepływomierza szczelinowego w zależności od miejsca pomiaru Δp (punkty – wyniki pomiarów, linie – wyniki obliczeń teoretycznych, wzór (3))

Fig. 3. Dimensional characteristics of the tested flowmeter $\Delta p = f(\dot{V})$ for various locations of taps for pressure drop Δp („points” – experimental results, lines – theoretical calculations, Eq. (3))

Rysunki 3 i 4 pokazują bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń teoretycznych z wynikami pomiarów dla funkcji $\Delta p_{3-4} = f(\dot{V})$ i $K_{3-4} = f(\text{Re})$. W zakresie przepływów od ok. $1 \text{ dm}^3/\text{min}$ do $5,6 \text{ dm}^3/\text{min}$, maksymalne różnice procentowe ($\delta\Delta p = 100 (\Delta p_{\text{eksp.}} - \Delta p_{\text{teor.}})/\Delta p_{\text{eksp.}}$) pomiędzy zmierzonymi (eksp.) i obliczonymi (teor.) wartościami Δp_{3-4} nie przekraczają $\pm 3\%$ (rys. 5). Natomiast dla $\dot{V} < 1 \text{ dm}^3/\text{min}$ różnice te są większe, co może być

spowodowane mniejszą dokładnością pomiarów małych wartości Δp . Powyższy rezultat, tzn. liniowość funkcji $\Delta p_{3-4} = f(\dot{V})$ oraz bardzo dobra zgodność wyników pomiarów i obliczeń teoretycznych, odpowiada oczekiwaniom. Króćce 3 i 4 rozmieszczono w taki sposób, aby występująca pomiędzy nimi różnica ciśnień Δp_{3-4} nie obejmowała zmian ciśnienia na wlocie i na wylocie szczeliny. Ponadto króciec 3 jest odsunięty o ok. 90 s od wlotu do szczeliny, dzięki czemu pozostaje poza odcinkiem rozbiegowym. Krytyczna liczba Reynoldsa ($Re = 2sU/\nu$) dla przepływu w szczelinie ma wartość ok. 3200 [7]. Zatem laminarność przepływu w szczelinie pomiędzy króćcami 3 i 4 jest zapewniona z dużym zapasem.

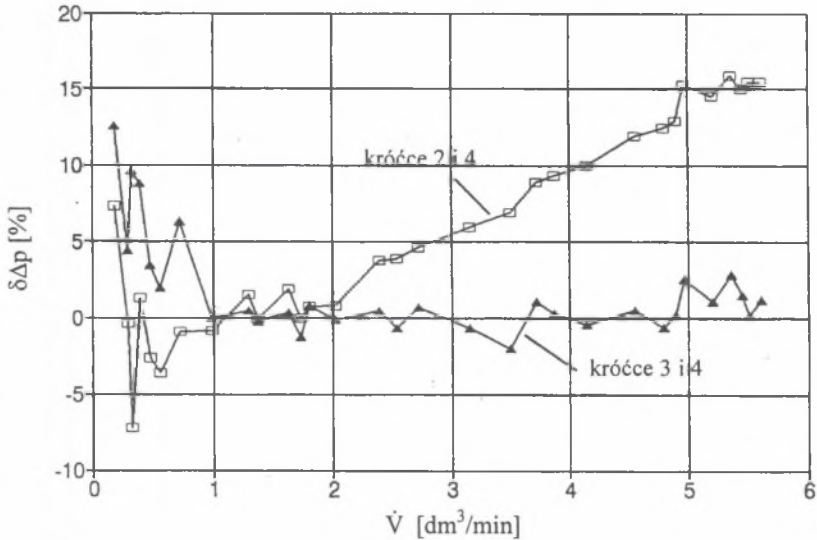


Rys. 4. Charakterystyki bezwymiarowe $K = f(Re)$ badanego przepływomierza szczelinowego w zależności od miejsca pomiaru Δp (punkty – wyniki pomiarów, linia – wyniki obliczeń teoretycznych, wzór (1))

Fig. 4. Dimensionless characteristics of the tested flowmeter $K = f(Re)$ for various locations of taps for pressure drop Δp („points” – experimental results, line – theoretical calculations, Eq. (1))

Bardzo dobra zgodność wyników obliczeń teoretycznych z wynikami pomiarów oznacza, że dla odpowiednio rozmieszczonych króćców impulsowych charakterystyka przepływomierza może być wyznaczana teoretycznie (wzór (3)). Taka możliwość ma bardzo duże znaczenie praktyczne, gdyż oznacza, że przepływomierz szczelinowy można zbudować i stosować do pomiaru strumienia dowolnego płynu newtonowskiego bez konieczności jego wzorcowania. Przeliczenie zmierzonej wartości Δp na odpowiadający jej strumień \dot{V}

wymaga jedynie znajomości lepkości ν i gęstości ρ płynu oraz odległości pomiędzy króćcami L i szerokości szczeliny s .



Rys. 5. Procentowe różnice $\delta\Delta p = 100(\Delta p_{\text{eksp.}} - \Delta p_{\text{teor.}})/\Delta p_{\text{eksp}}$ pomiędzy wynikami pomiarów i wynikami obliczeń mierniczego spadku ciśnienia Δp w funkcji strumienia objętości \dot{V}

Fig. 5. Deviation in $\delta\Delta p = 100(\Delta p_{\text{eksp.}} - \Delta p_{\text{teor.}})/\Delta p_{\text{eksp}}$ vs. volume flow rate \dot{V} , where: Δp_{eksp} – experimental pressure drop, Δp_{teor} – theoretical pressure drop.

Inna sytuacja występuje w przypadku funkcji $\Delta p_{2-4} = f(\dot{V})$, gdzie Δp_{2-4} jest różnicą ciśnień w szczelinie pomiędzy króćcami 2 i 4 (rys. 1). Z rysunku 3 wynika, że eksperymentalna zależność $\Delta p_{2-4} = f(\dot{V})$ przestaje być liniowa dla $\dot{V} > 2 \text{ dm}^3/\text{min}$ oraz dla $Re > 740$, co wynika z rys. 4. Jak widać na rys. 5, po przekroczeniu $\dot{V} = 2,5 \text{ dm}^3/\text{min}$, procentowa różnica pomiędzy zmierzonymi i obliczonymi wartościami Δp_{2-4} wzrasta od ok. 4% do ok. 16%. Przyczyną nieliniowości eksperymentalnej charakterystyki $\Delta p_{2-4} = f(\dot{V})$ są zmiany ciśnienia związane z kształtowaniem się w pełni rozwiniętego profilu prędkości w szczelinie, czyli tzw. straty rozbiegowe. Króciec 2 znajduje się w odległości 8,3 s za wlotem do szczeliny (rys. 1), a więc w miejscu, w którym przepływ jest daleki od przepływu w pełni rozwiniętego. Straty rozbiegowe są proporcjonalne do U^2 [8 i 9], co oznacza, że rosną szybciej ze wzrostem \dot{V} niż straty liniowe, które są proporcjonalne do U . W efekcie dla $\dot{V} > 2 \text{ dm}^3/\text{min}$ straty rozbiegowe mają znaczący udział w Δp , co sprawia, że eksperymentalna funkcja $\Delta p_{2-4} = f(\dot{V})$ jest wyraźnie nieliniowa (rys.3). Natomiast teoretyczna zależność

$\Delta p_{2-4} = f(\dot{V})$ jest linią prostą w całym zakresie przepływu (rys. 3), ponieważ nie uwzględnia się w niej żadnych nieliniowych składników.

Jeszcze wyraźniejszą nieliniowość wykazuje eksperymentalna funkcja $\Delta p_{1-5} = f(\dot{V})$, gdzie Δp_{1-5} oznacza różnicę ciśnień w komorach przepływomierza (króćce 1 i 5, rys. 1). W tym przypadku do straty rozbiegowej dochodzą dwa inne nieliniowe składniki Δp_3 , a mianowicie zmiana ciśnienia na wlocie do szczeliny oraz zmiana ciśnienia na jej wylocie. Jak wynika z rysunków 3 i 4, już dla $\dot{V} > 1 \text{ dm}^3/\text{min}$ $Re > 370$, funkcja $\Delta p_{1-5} = f(\dot{V})$ jest silnie nieliniowa.

Podsumowanie

Do uzyskania w laminarnym przepływomierzu szczelinowym liniowej charakterystyki $\Delta p = f(\dot{V})$ w szerokim zakresie pomiarowym konieczne jest zastosowanie odpowiednio długiej szczeliny i odpowiednie rozmieszczenie króćców impulsowych. Długa szczelina umożliwia uzyskanie w pełni rozwiniętego przepływu. Króciec wyższego ciśnienia (+) należy umieścić w takiej odległości od wlotu do szczeliny, aby znajdował się on poza odcinkiem rozbiegowym (ok. $90s$, gdzie: s – szerokość szczeliny), natomiast króciec niższego ciśnienia (-) najlepiej umieścić tuż przed wylotem ze szczeliny. W ten sposób eliminuje się wpływ nieliniowych składników oporów przepływu na mierniczy spadek ciśnienia.

W badanym przepływomierzu o zakresie pomiarowym od $0,2 \text{ dm}^3/\text{min}$ do $5,6 \text{ dm}^3/\text{min}$ (woda, 20°C) i oporach przepływu ok. $140 \text{ Pa}/(\text{dm}^3/\text{min})$, liniową charakterystykę uzyskano dla szczeliny o długości 200 mm ($161,4s$), szerokości $s = 0,5(D - d) = 1,115 \text{ mm}$, ($D = 30,23 \text{ mm}$, $d = 28 \text{ mm}$), króćca (+) umieszczonego w odległości $100,75 \text{ mm}$ ($90,4s$) od wlotu do szczeliny oraz króćca (-) umieszczonego w odległości $9,25 \text{ mm}$ ($8,3s$) od wylotu ze szczeliny. Charakterystyka laminarnego przepływomierza szczelinowego o odpowiednio rozmieszczonych króćcach impulsowych może być określana analitycznie (wzór (3)).

LITERATURA

1. Peters F., Kuralt T.: A gas flowmeter of high linearity. Flow Measurement and Instrumentation – An Int. Journal, 6(1) 1995, s. 29-32.

2. Wojtkowiak J., Kim W.N., Hyun J.M.: Numerical simulation of a piston type flowmeter of high linearity. *Flow Measurement and Instrumentation – An Int. Journal*, 7(2) 1996, s. 69-75.
3. Wojtkowiak J., Kim W.N., Hyun J.M.: Computations of the flow characteristics of a rotating-piston-type flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation – An Int. Journal*, 8(1) 1997, s. 17-25.
4. Wojtkowiak J., Popiel C.O.: Experimental flow characteristics of a gap-type flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation – An Int. Journal*, 10(2) 1999, s. 117-121.
5. White F.M.: *Fluid mechanics*. McGraw-Hill, New York 1979.
6. Popiel C.O., Wojtkowiak J.: Simple formulas for thermophysical properties of liquid water for heat transfer calculations (from 0°C to 150°C). *Heat Transfer Engineering – An Int. Quarterly*, 19(3) 1998, s. 87-101.
7. Orzechowski Z., Prywer J. Zarzycki R.: *Mechanika płynów w inżynierii środowiska*. WNT, Warszawa 1997.
8. Glück B.: *Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung – Druckverluste*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1988.
9. Gersten K., rozdz. 2.2.2: Ducts w: *Heat exchanger design handbook*, red. G.F. Hewitt, Begell House, New York 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. Jan Kiełbasa
Dr hab.inż. Zbigniew Popiołek
Prof. Politechniki Śląskiej

Abstract

An improved version of a laminar gap-type flowmeter of linear characteristics $\Delta p = f(\dot{V})$ (Δp – pressure drop, \dot{V} – volume flow rate) is investigated experimentally using water. The tested flowmeter consists of a long cylinder inserted into a tube. A measuring range and a relative pressure drop of the flowmeter shown in Fig. 1 are 0.2 – 5.6 dm³/minute and 140 Pa/(dm³/minute), respectively. Fluid flows through a long narrow gap between the lateral surface of the cylinder and the inner wall surface of the tube. For a laminar developed flow in the gap, the flow rate \dot{V} is proportional to the pressure drop Δp in the gap. This linearity between the flow rate and the pressure drop, together with some additional features, such as

high accuracy and wide measuring range are the major advantages of the new type gap flowmeter.

In the present work an effect of pressure taps locations on the linearity of the flowmeter characteristics is examined experimentally. The measured pressure drop is a sum of the laminar friction pressure loss (which is proportional to the flow rate, i.e. it represents a linear component) and the inlet and exit pressure losses (which are proportional to the flow rate squared, i.e. they represent the nonlinear components). Because the nonlinear components should be as small as possible the pressure drop has to be measured in a proper way. Several experimentally obtained characteristics for various pressure taps locations, both in dimensional form $\Delta p = f(\dot{V})$ (Fig. 3) and in dimensionless form $K = f(Re)$ (Fig. 4), where: K – pressure drop coefficient, Re – Reynolds number are compared to the results of theoretical calculations. It is shown if the pressure tap (+) is located behind the gap developing region and the pressure tap (–) is located just before the exit of the gap the flowmeter characteristics are linear. In this case the flowmeter characteristics can be obtained theoretically using formula valid for a fully developed laminar flow of a newtonian fluid in the annular space between two concentric cylinders [5]:

$$\Delta p = \frac{128\rho L v \dot{V}}{\pi \left[D^4 - d^4 - \frac{(D^2 - d^2)^2}{\ln \frac{D}{d}} \right]}$$

where: ρ – density of fluid, L – distance between pressure taps, v – kinematic viscosity of fluid, d , and D – inner and outer diameters of concentric annulus.