

Analiza numeryczno-doświadczalna przepływomierzy kolanowych

Antoni Gondek, Grzegorz Sztaba

Instytut Inżynierii Ciepłej i Procesowej, Politechnika Krakowska

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych przepływomierzy kolanowych wybranych z seryjnie produkowanych elementów armatury (metalowa, plastikowa) w zakresie średnic 15–40 mm. Przeprowadzone badania symulacyjne przepływu wewnątrz kolana pozwoliły na przyjęcie odpowiedniego modelu prędkości, który był podstawą przy wyprowadzeniu teoretycznej zależności między wartością strumienia płynu a pomiarową różnicą ciśnienia Δp występującą między zewnętrzną i wewnętrzną ścianą kolana. Na podstawie wyników badań i ich opracowania podano postać funkcji aproksymującej zależność współczynnika przepływu „ μ ” od geometrycznego współczynnika „ ϵ ” charakteryzującego kształt kolana.

Słowa kluczowe: pomiar strumienia płynu, przepływomierz krzywakowy, właściwości metrologiczne

1. Wstęp

Przepływomierze spiętrzające w zespole urządzeń pomiaru strumienia płynu stanowią najliczniejszą grupę stosowaną zarówno w praktyce laboratoryjnej, jak i przemysłowej. Grupa ta obejmuje metody pomiaru strumienia płynu oparte na pomiarze różnicy ciśnień Δp powstałej na elemencie spiętrzającym (zweźki pomiarowe, sondy uśredniające, krzywaki) [1–5]. Wartość Δp stanowi miarę strumienia objętości płynu \dot{V} , jeżeli znana jest postać funkcji $\dot{V}=f(\Delta p)$. Ta wspólna zasada pomiarowa dla przepływomierzy należących do tej grupy sprowadza się do aproksymowania strumienia objętości wzorem strukturalnym postaci $\dot{V}=k\Delta p^{1/2}$. Dla każdego z przepływomierzy, w zależności od przyjętych założeń teoretycznych związanych z zasadą działania, wartość współczynnika funkcyjnego „ k ” jest wyrażona za pomocą innego równania.

Z przepływomierzy tej grupy najmniej przebadane są przepływomierze kolanowe (krzywakowe). Wyniki dotychczasowych badań [6–9] wykazują rozbieżności wynikłe z przyjęcia różnych modeli prędkości w przekroju poprzecznym kolana, jak również dowolności wyboru kolana będących przedmiotem badań, często z pominięciem bezwymiarowego parametru geometrycznego związanego z kształtem

$$\epsilon = \frac{R}{r_k}.$$

Przyjmowane modele przepływu przez przewód zakrzywiony to przepływ utożsamiany z tzw. ruchem okrężnym wymuszonym [8–10] charakteryzującym się stałą prędkością kątową wszystkich elementów płynu. Takiemu założeniu odpowiada liniowy model profilu prędkości z maksymalną prędkością na łuku zewnętrznym kolana

$$\frac{v}{r} = C = \text{const.}$$

Inny model przepływu to ruch okrężny swobodny [6] opisany stałością krętu, któremu odpowiada hiperboliczny rozkład prędkości w rozpatrywanym przekroju poprzecznym kolana $v \cdot r = C = \text{const.}$

Wyniki dotychczasowych badań przedstawione w literaturze są ogólne, często sprzeczne i niewystarczające do zastosowania metody krzywakowej pomiaru strumienia płynu w konkretnych warunkach eksploatacji.

2. Symulacja przepływu czynnika przez przewód zakrzywiony

Do rozwiązania zagadnień przepływu płynu przez przewód zakrzywiony o przekroju kołowym wykorzystano komercyjne oprogramowanie Fluent 6.1 [12, 13] oparte na metodzie elementów skończonych. W modelowaniu numerycznym wykorzystano model turbulencji $k-\epsilon$. Jako warunki modelowania czujnika przepływomierza kolanowego przyjęto, że rozwiązane zagadnienie ma charakter przepływu ustalonego trójwymiarowego, turbulentnego, w którym czynnik jest nieściśliwy oraz nie zachodzi proces wymiany ciepła ze ścianami przewodu.

Jako medium w symulacji zastosowano wodę. Przyjęcie stałej wartości prędkości czynnika na wlocie, przy założeniu równoległości wektora prędkości do osi przewodu o przekroju kołowym, było kolejnym uproszczeniem przyjętym w obliczeniach symulacyjnych. Uproszczenie to ma uzasadnienie, gdy stosunek długości przewodu do jego średnicy przyjmuje dużą wartość. W takim przypadku rozkład prędkości czynnika w przewodzie w płaszczyźnie instalacji kolana jest utrzymywany ze względu na dużą odległość tej płaszczyzny od wlotu.

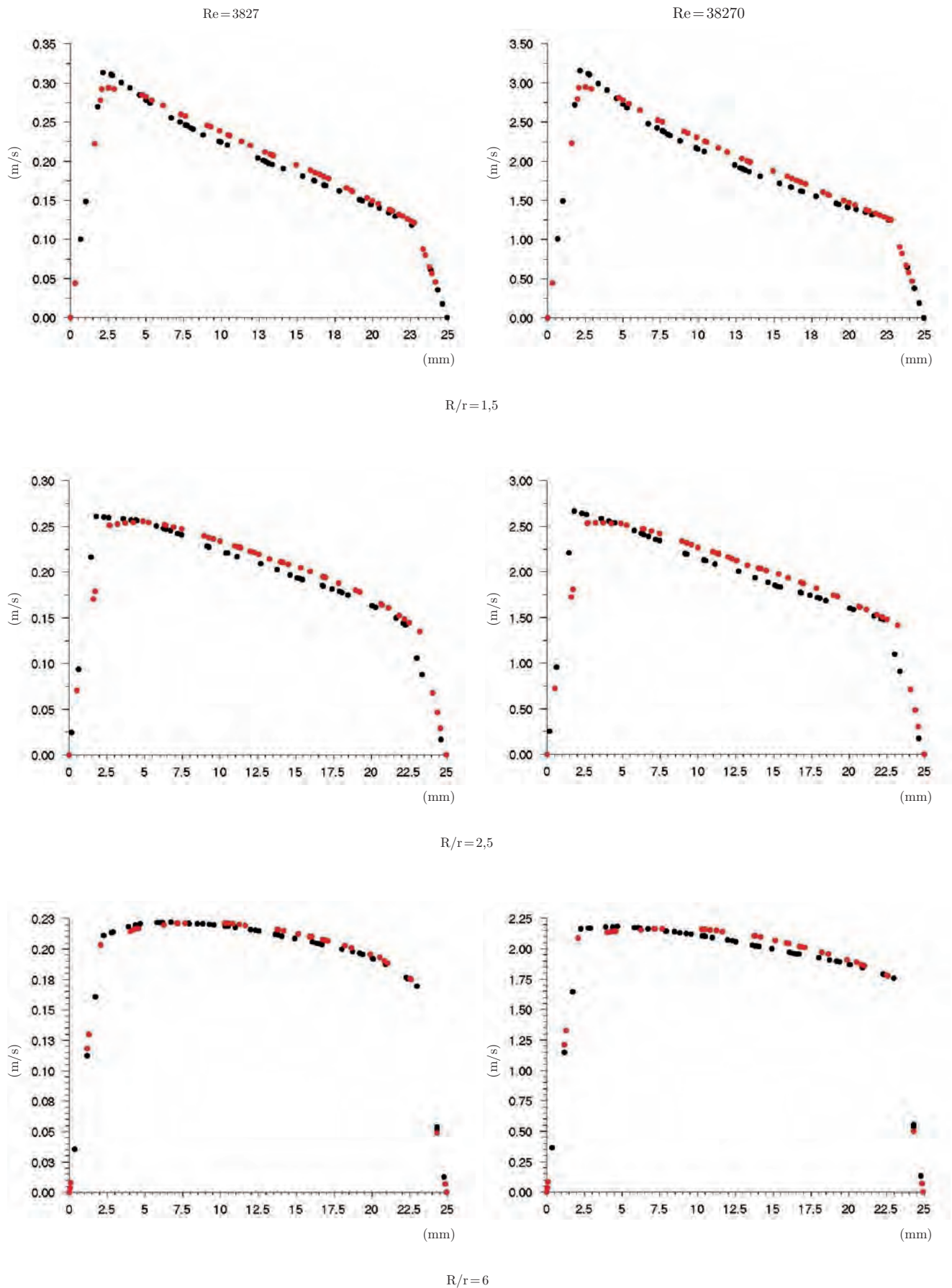
Wymagana długość odcinków prostych została określona na podstawie badań symulacyjnych przepływu w przewodzie prostym, w którym wywoływano zakłócenia przepływu (zasuwa, kolano).

Z przeprowadzonych badań wynika, że do stabilizacji parametrów mających wpływ na dokładność pomiaru przepływomierzem kolanowym przy wywołanych zaburzeniach przepływu wymagany jest odcinek prosty poprzedzający przekrój pomiarowy o długości równej $30D$, natomiast za przekrojem pomiarowym wystarczający jest odcinek o długości $5D$.

Jednym z etapów symulacji przepływu przez czujnik przepływomierza kolanowego było wyznaczenie rozkładu prędkości w jego wnętrzu.

Na rys. 1 przedstawiono krzywe rozkładu prędkości wzdłuż osi pomiaru ciśnienia w płaszczyźnie zgięcia przewodu (czujnika) w zależności od liczby Reynoldsa oraz bezwymiarowego parametru charakteryzującego geometryczny kształt kolana

$$\epsilon = \frac{R}{r_k}.$$



Rys. 1. Porównanie rozkładu prędkości w płaszczyźnie pomiarowej dla przepływu bez zaburzenia i zaburzonego szczeliną łączeniową
Fig. 1. Comparison of the distribution of velocity in the measurement for the flow with and with out distribution in a connection slot

Przedstawione wyniki symulacji są jedynie fragmentem całości badań. Na rys. 1 oprócz krzywej rozkładu prędkości w płaszczyźnie pomiarowej dla przepływu niezaburzonego naniesiono rozkład prędkości dla przepływu zaburzonego szczeliną połączeniową czujnika kolanowego z przewodem doprowadzającym i odprowadzającym. Wyniki wskazują na znikomo mały wpływ szczeliny połączeniowej na krzywą rozkładu prędkości.

Porównanie rozkładu ciśnień w przekroju osiowym kolana pozwala na określenie obszarów występowania największych różnic ciśnienia, co potwierdza słuszność przyjęcia osi pomiarowej w środku krzywizny.

3. Model przepływu

Jak wynika z przeprowadzonych badań symulacyjnych, w środkowym przekroju poprzecznym kolana prędkość elementu płynu osiąga maksimum lokalne poniżej osi, a więc bliżej ściany wewnętrznej. Zważywszy dodatkowo, że krzywizna rzeczywistego rozkładu prędkości z wyłączeniem obszarów przyściennych jest bardzo mała (praktycznie równa zero), zdecydowano aproksymować krzywą rzeczywistego rozkładu prędkości odcinkiem linii prostej.

Celem opisanie profilu prędkości wykorzystano równanie prostej przechodzącej przez punkt o współrzędnych $(v(R); R)$ leżący w osi przewodu:

$$v(r) - v(R) = a(r - R) \quad (1)$$

przyjmując współczynnik kierunkowy prostej

$$a = \alpha \cdot \frac{v(R)}{R} \quad (2)$$

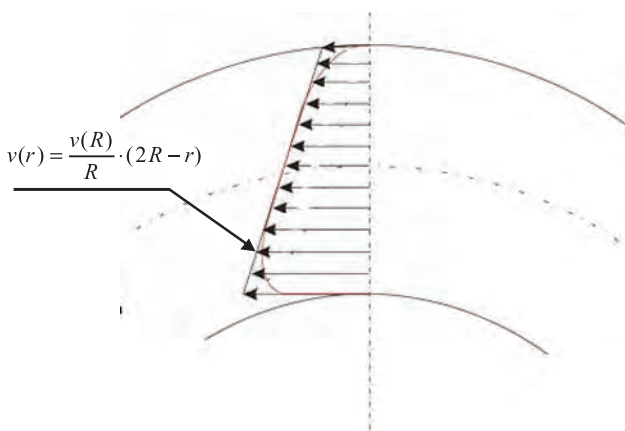
Równanie (1) możemy zapisać w postaci:

$$v(r) = v(R) + \alpha \cdot \frac{v(R)}{R} (r - R) = \frac{v(R)}{R} (R - \alpha R + \alpha r) \quad (3)$$

Przyjmując przedział zmienności „ α ”

$$-1 \leq \alpha \leq 1$$

zabezpieczamy się przed występowaniem ujemnych profili prędkości przy ścianie przewodu zakrzywionego.



Rys. 2. Profil prędkości w płaszczyźnie przekroju środkowego
Fig. 2. Velocity profile in surface of middle section

Dla $\alpha = -1$ równanie (3) przyjmuje postać:

$$v(r) = \frac{v(R)}{R} \cdot (2R - r) \quad (4)$$

Jak wynika z równania (4), profil prędkości w rozpatrywanym przekroju poprzecznym kolana jest linią prostą z maksimum prędkości $v = v_{max}$, występuje na łuku wewnętrznym.

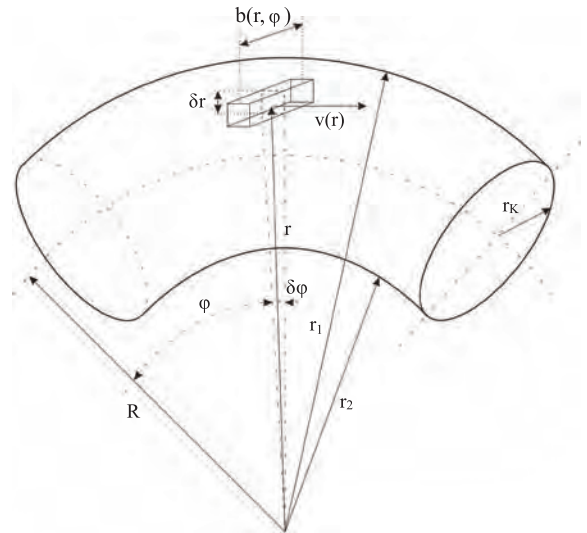
Na podstawie założeń upraszczających związanych z przyjęciem rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym kolana zgodnie z równaniem (4), przyjęcia ustalonych warunków przepływu przez kolano oraz przy pominięciu wpływu sił ciężkości (łączy się z przyjęciem położenia osi kolana w płaszczyźnie poziomej) można wyprowadzić przybliżony wzór na strumień objętości w funkcji spadku ciśnienia $\Delta p = p_1 - p_2$ między punktami położonymi w przekroju pomiarowym w płaszczyźnie zgięcia na ścianie zewnętrznej i wewnętrznej kolana.

Objętość δV i masa δm wyodrębnionego na rys. 3 elementu płynu o polu podstawy $\delta A = b(r, \varphi) \cdot r \cdot \delta r \cdot \delta \varphi$ odpowiednio wynoszą:

$$\delta V = \delta A \cdot \delta r = b(r, \varphi) r \cdot \delta r \cdot \delta \varphi \quad (5)$$

$$\delta m = \rho \cdot \delta V = \rho b(r, \varphi) r \cdot \delta r \cdot \delta \varphi \quad (6)$$

gdzie: $b(r, \varphi)$ – szerokość elementu płynu.



Rys. 3. Wyodrębniony element płynu

Fig. 3. Distinct element of fluid

Siłę bezwładności działającą na rozpatrywany element określa równanie:

$$\delta B = \frac{v^2(r)}{r} \delta m = \rho v^2(r) \cdot b(r, \varphi) \delta r \cdot \delta \varphi \quad (7)$$

gdzie: $v(r)$ – prędkość obwodowa (liniowa) elementu.

Działanie siły bezwładności δB powoduje zmianę ciśnienia δp w kierunku promieniowym (prostopadłym do kierunku przepływu), a tym samym wzrost siły powierzchniowej wyrażamy jako:

$$\delta P = \delta p \cdot \delta A = \delta p \cdot b(r, \varphi) \cdot r \cdot \delta \varphi \quad (8)$$

Z porównania zależności (7) i (8) otrzymujemy jest elementarny przyrost ciśnienia δp na przemieszczeniu δr :

$$\delta p = \rho \frac{v^2(r)}{r} \delta r \quad (9)$$

Po podstawieniu równania (3) do równania (9):

$$\Delta p = \int_{R-r_k}^{R+r_k} \rho \left[\frac{v(R)}{R} (R - \alpha R + \alpha r) \right]^2 \frac{\delta r}{r} \quad (10)$$

Przeprowadzając całkowanie otrzymuje się wyrażenie na skończony spadek ciśnienia między punktami rozpatrywane go przekroju kolana na ścianie zewnętrznej i wewnętrznej:

$$\Delta p = \rho v^2(R) (1 - \alpha)^2 \ln \frac{R+r_k}{R-r_k} + \rho v^2(R) \cdot 2\alpha(2-\alpha)^2 \frac{v(R)}{R} \quad (11)$$

a stąd po uwzględnieniu bezwymiarowego parametru

$$\varepsilon = \frac{R}{r_k} :$$

$$\Delta p = \left[2(1-\alpha)^2 \ln \frac{\varepsilon+1}{\varepsilon-1} + \frac{4}{3} \alpha(2-\alpha) \right] \frac{\rho v^2(R)}{2} \quad (12)$$

Dla przyjętego modelu przepływu ($\alpha = -1$), oznaczając prędkość średnią $\bar{v} = v(R)$, równanie (12) przyjmuje postać:

$$\Delta p = \left[8 \ln \frac{\varepsilon+1}{\varepsilon-1} - \frac{12}{\varepsilon} \right] \frac{\rho \bar{v}^2}{2} \quad (13)$$

Stąd

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{8\varepsilon \ln \frac{\varepsilon+1}{\varepsilon-1} - 12}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (14)$$

Teoretyczna wartość strumienia objętości płynu przez przepływomierz kolanowy o kołowym przekroju przepływu wyniesie:

$$\dot{V} = A \cdot \bar{v} = \pi \cdot r_k^2 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{8\varepsilon \ln \frac{\varepsilon+1}{\varepsilon-1} - 12}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (15)$$

Ponieważ zależność (15) została wyprowadzona w oparciu o model rozkładu prędkości w przekroju pomiarowym przewodu zakrzywionego (kolana) jedynie zbliżony do rzeczywistego rozkładu prędkości, dlatego dopiero uzupełnienie równania (15) bezwymiarowym doświadczalnym współczynnikiem przepływu μ umożliwia jego praktyczne zastosowanie.

Rzeczywista wartość strumienia objętości płynu przez przewód zakrzywiony (kolano) po uwzględnieniu współczynnika przepływu wynosi:

$$\dot{V}_{rz} = \mu \cdot A \cdot \bar{v} \quad (16)$$

4. Rodzaj badanych czujników kolanowych oraz wyniki badań

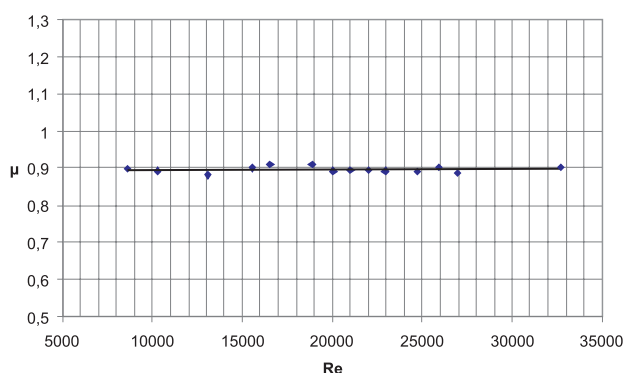
Badania doświadczalne przeprowadzono na szesnastu czujnikach kolanowych, które wybrano z seryjnie produkowanych

kolan plastikowych, stalowych, miedzianych o średnicach z zakresu 15–40 mm. Parametry charakteryzujące kształt geometryczny badanych kolan były zawarte w przedziale (1,25–7,08). Badania doświadczalne przeprowadzono na specjalnym stanowisku pomiarowym stosując jako medium obiegowe wodę. Badania kalibracyjne przepływomierzy kolanowych obejmowały przedział liczb Reynoldsa (8000–50 000).

Uśrednioną wartość $\bar{\mu}_i$ dla każdego przepływomierza kolanowego w całym zakresie przeprowadzonych badań określono metodą najmniejszych kwadratów. Uogólnienie otrzymanych wyników badań sprowadzało się do przyjęcia postaci analitycznej funkcji aproksymacyjnej zależności $\bar{\mu} = \bar{\mu}(Re, \varepsilon)$ i wyznaczeniu na podstawie danych pomiarowych parametrów tej przyjętej funkcji.

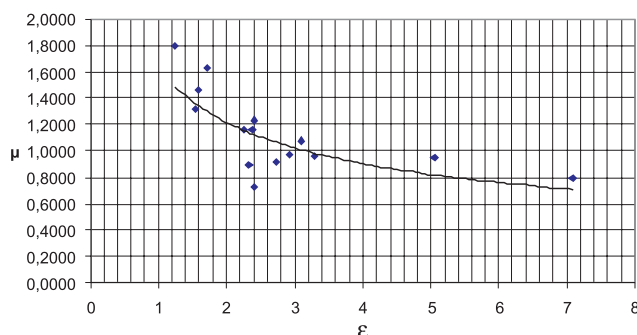
Ze względu na słabą zależność liczby μ od liczby Reynoldsa (rys. 4) oraz zależność tej funkcji od bezwymiarowego parametru ε przyjęto, że funkcja $\bar{\mu}(Re, \varepsilon)$ ma postać:

$$\bar{\mu}(Re, \varepsilon) = \alpha \cdot \varepsilon^{-\beta} \quad (17)$$



Rys. 4. Wartość liczby μ dla przepływomierzy kolanowych w funkcji liczby Reynoldsa dla $\varepsilon = 2,33$

Fig. 4. Value of μ for the elbow flow meter in function of Reynolds number for $\varepsilon = 2,33$



Rys. 5. Przebieg zmienności współczynnika przepływu μ w funkcji parametru kształtu przepływomierza kolanowego ε

Fig. 5. Changeability of the calibration coefficient μ in function to geometrical parameters characterizing shape of the elbow flow meter ε

Parametry tej funkcji uogólnione metodą najmniejszych kwadratów wynoszą:

$$\alpha = 1,6355; \beta = 0,4273$$

Ostatecznie więc strumień objętości płynu przy wykorzystaniu sondy uśredniającej należy obliczać z równania:

$$\dot{V} = 1,6355 \cdot \varepsilon^{-0,4273} \cdot \pi \cdot r_k^2 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{8\varepsilon \ln \frac{\varepsilon+1}{\varepsilon-1} - 12}} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (18)$$

Na rys. 5 przedstawiono przebieg zmienności współczynnika przepływu μ w funkcji bezwymiarowego parametru geometrycznego charakteryzującego kształt czujnika

$$\varepsilon = \frac{R}{r_k}$$

5. Podsumowanie

Przepływomierze kolanowe zbudowane na bazie seryjnie produkowanych elementów armatury instalacyjnej w postaci łuków i kolan metalowych i z tworzyw sztucznych umożliwiają pomiar strumienia masy lub objętości bez konieczności każdorazowego wzorcowania przy wykorzystaniu równań (18).

Wykorzystanie elementów armatury – kolan, łuków – jako czujników przepływomierzy umożliwia ciągłą kontrolę i rejestrację przepływu oraz jego automatyczną regulację. Usytuowanie otworów piezometrycznych w środku krzywizny umożliwia pomiar strumienia objętości w obu kierunkach.

Przeprowadzona analiza niepewności pomiaru wskazuje, że dla obliczonej ze wzoru (18) wartości strumienia płynu niepewność względna jest rzędu $\delta_v = \pm 2,6\%$.

Z analizy niepewności składowych wyznaczania strumienia objętości wynika, że największe wartości przyjmują człony dotyczące liczby kalibracji μ oraz współczynnika kształtu ε .

Ograniczenie niepewności wynikającej z pomiaru wielkości geometrycznych R , r_k można uzyskać przez zastosowanie przyrządów i technik pomiarowych pozwalających na pomiar z dokładnością rzędu 0,01 mm.

Nowoczesne technologie powodują, że wykonane elementy armatury instalacyjnej w postaci łuków i kolan odznaczają się wysoką precyzją. Towarzysząca procesowi wykonania owalizacja przekroju przepływu jest minimalna, a w kolanach plastikowych nie występuje.

Przepływomierz kolanowy zbudowany na bazie seryjnie produkowanych elementów armatury stanowi dla potencjalnego użytkownika urządzenie odznaczające się prostotą i łatwością wykonania.

Bibliografia

1. Baker R. C.: *An Introductory guide to flow measurement*, Alden Press, Oxford, 1989.
2. Blechinger C.J., Sherif A.: *Devices for Flow Measurement and Control*. The Fluids Engineering Conference, NY ASME 1993, Vol. 159, s. 68.
3. Spitzer D. W.: *Flow Measurement, Practical Guides for Measurement and Control*, Instrument Society of America, 1991.
4. Strzelczyk F.: *Metody i przyrządy w pomiarach cieplno-energetycznych*, Wyd. Politechniki Łódzkiej Łódź 1993.
5. Miller R.W.: *Flow measurement engineering handbook*, Mc Graw Hill Book Co., 1983.
6. Spink L.K.: *Principles and Practice of Flow Meter Engineering Ninth Edition Foxboro*, Massachusetts USA 1972.

7. Kremlewski P.P.: *Raschodomiery i sozetoziiki koliczestwa*, Leningrad 1975
8. Romer E.: *Miernictwo przemysłowe*, PWN, Warszawa 1970.
9. Pfeffer W.: *Durchflussmessung mit Rohrkrumern*. VDI-Berichte, nr 86 1964.
10. Reploge I.A., Myers L.E.: *Evaluation of pipe elbows as flow meters*. *Journal of the Irrigation and Drainage Division Proceedings of the ASCE*, September 1966, s. 17–31.
11. Rakoczy T.: *Mengenmessung stromender Flussigkeiten oder Gase durch einen Krammer*. HLH. 11 1986, s. 329–342.
12. Gondek A.: *Pomiarowy przetwornik strumienia masy o śrubowej linii przepływu*. *Zeszyt naukowy Nr 62*, 1988, s. 129–140.
13. Andruszkiewicz A., Górecki J., Kubas K.: *Stanowisko pomiarowo-dydaktyczne do wyznaczania strumienia przepływu gazu przepływomierzami niestandardowymi*. Materiały Konferencyjne XXXV MKM Kraków 2003, s. 115–118.
14. *Fluent 6.1 User's Guide*, Fluent Inc. 2003.
15. *Gambit 2.0 User's Guide*, Fluent Inc. 2003. ■

Numerical and experimental analysis elbow flow meters

Abstract: The result of investigation on pipe elbow flow meter chosen from mass production elements of armature (metal, plastic) within the diameter range 15–40 mm have been presented in this article. The simulation research regarding distribution of the velocity within elbow allowed to chose proper model velocity profile. Basis on this velocity profile model a theoretical dependence of the value flow rate with elbow as the difference pressure Δp (between outer and inner wall elbow) has been defined. On the base of tests results and their calculation the calibration coefficient μ has been established as the function geometrical parameters ε characterizing shape of elbow.

Keywords: flow meter, flow model, metrological analysis

dr hab. inż. Antoni Gondek, prof. PK

Pracownik Instytutu Inżynierii Ciepłej i Procesowej Politechniki Krakowskiej w Krakowie. Jego główne zainteresowania to metody i pomiary natężenia przepływu płynów oraz badanie i pomiar maszyn i urządzeń cieplnych.



dr inż. Grzegorz Sztaba

Ukończył studia na Wydziale Paliw i Energii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w 2002 r. Po ukończeniu Studium Doktoranckiego na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej w 2006 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych z zakresu pomiaru strumienia objętości płynów przy wykorzystaniu przepływomierzy spiętrzących. Obecnie jako samodzielny pracownik Urzędu Marszałkowskiego specjalizuje się w tworzeniu baz danych dla wdrażania funduszy europejskich w ramach Małopolskiego Regionalnego Programu Operacyjnego.

