

Kazimierz RUP, Łukasz MALINOWSKI

POLITECHNIKA KRAKOWSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, INSTYTUT APARATURY PRZEMYSŁOWEJ I ENERGETYKI

Metoda pomiaru strumienia objętości płynu w zastosowaniach do przepływomierzy kolanowych

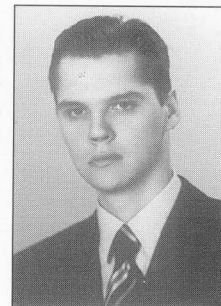
prof. dr hab. inż. Kazimierz RUP

Jest pracownikiem Instytutu Aparatury Przemysłowej i Energetyki Politechniki Krakowskiej. Jego główne zainteresowania to pomiary wielkości przepływowo-cieplnych takich jak: natężenie przepływu płynów, współczynniki przewodności cieplnej płynu i materiału ścianki rurociągu, współczynniki ciepła właściwego płynu itp.

e-mail: krup@riad.usk.pk.edu.pl

mgr inż. Łukasz MALINOWSKI

Jest doktorantem na Wydziałowym Studium Doktoranckim o specjalności Mechanika Komputerowa. Jego główne zainteresowania to pomiary natężenia przepływu płynów oraz zastosowanie modelowania komputerowego w mechanice.

e-mail: lucam@interia.pl**Streszczenie**

W pracy zaproponowano metodę pośredniego pomiaru strumienia objętości płynu w zastosowaniu do przepływomierzy kolanowych. Idea metody polega na wyborze takiego rozwiązania numerycznego równań ruchu płynu wraz z równaniami modelu turbulencji, które spełnia zadaną dokładnością warunek równości zmierzonej i obliczonej różnicy ciśnienia w skrajnych punktach siecznej przepływomierza kolanowego.

W celu praktycznej realizacji metody zbudowano stanowisko doświadczalne. Obliczenia numeryczne wykonano za pomocą pakietu FLUENT. Otrzymane rezultaty pomiaru pośredniego porównano z odpowiednimi wynikami wyznaczonymi za pomocą kryzy.

Abstract

In this paper the indirect measurement method of flow rate in application to elbow meters is proposed. The idea of the method is to choose the proper numerical solution of the flow and turbulence model equations, which will satisfy with required exactness the equality condition of measured and calculated values of pressure difference between edge points on the secant of elbow meter.

With the aim of practical realisation of the method experimental facility was built. Numerical calculations were performed with application of FLUENT CFD software. Obtained results were compared to corresponding ones, measured with use of orifice meter.

1. Wstęp

Pomiary strumienia przepływającego płynu są jednymi z najczęściej wykonywanych w praktyce przemysłowej oraz laboratoryjnej. Różnorodność warunków stawianych samemu pomiarowi, modernizacja i rozwój procesów technologicznych, ich automatyzacja oraz konkurencyjność produktów są czynnikami, które wymuszają poszukiwanie coraz to nowszych i doskonalszych metod pomiarowych. Generalnie przyrządy do pomiaru przepływów można podzielić na dwie grupy: do pomiarów bezpośrednich oraz pośrednich. Przyrządy z pierwszej grupy charakteryzują się dużą dokładnością i odtwarzalnością, dzięki czemu często używane są do kalibracji urządzeń do pomiarów pośrednich [1,2,3].

Pomiary przepływu przy zastosowaniu spadku ciśnienia są najszersze stosowanymi technikami dzięki swojej prostocie, niezawodności, powtarzalności oraz niskim kosztom. Trzema najpopularniejszymi urządzeniami opartymi o tę metodę są kryzy, zwężki Venturiego oraz dysze [1,2,3]. Ich zasada działania oparta jest na pomiarze ciśnienia spiętrzenia wywołanego istnieniem wbudowanego w kanał przewężenia. Strumień masy przepływającego płynu można wyznaczyć na podstawie zmierzonej wartości różnicy ciśnień, wykorzystując informacje dotyczące przepływającego płynu i warunków, w jakich element przewężenia został zamontowany.

Odmianym przyrządem należącym do tej grupy jest przepływomierz kolanowy [1,4,5]. Zasada działania tego przepływomierza polega na wykorzystaniu zależności objętościowego strumienia przepływu płynu od różnicy ciśnienia zmierzonego w punktach po obu stronach kolana. W praktyce otwórki impulsowe umieszcza się na siecznej kąta kolana to jest dla kąta $\theta = 45^\circ$. Stosuje się też roz-

wiązanie z pomiarem ciśnienia przez otwórki impulsowe umieszczone na linii położonej pod kątem $\theta = 22,5^\circ$ mierząc od wlotu płynu do przestrzeni kolana. W tym, ostatnim przypadku niesymetrycznego ułożenia otworków impulsowych możliwy jest pomiar przepływu tylko w jednym kierunku. Znany sposób pomiaru sprowadza się do wyznaczenia wspomnianej różnicy ciśnienia, następnie do przyporządkowania odpowiedniego strumienia objętości opierając się na wcześniej wykonanej charakterystyce przyrządu. Niekiedy zamiast charakterystyk przyrządu wykorzystuje się proste zależności algebraiczne otrzymane z opracowania wyników badań doświadczalnych. Zależności te określone są dla konkretnych parametrów przepływu i obciążone mogą być dużym stopniem niepewności pomiaru [1,2,3]. W celu uzyskania zadowalającej dokładności i powtarzalności pomiaru znane przepływomierze kolanowe muszą być często wzorcowane indywidualnie nawet dla tego samego płynu z uwagi na zmieniające się warunki pracy [1].

W niniejszej pracy zostanie zaprezentowana oryginalna metoda pomiaru strumienia objętości w zastosowaniu do przepływomierzy kolanowych. Cechą charakterystyczną prezentowanej metody jest dwuparametrowe (Δp , Re) badanie wyznaczanego strumienia płynu. Poszukiwaną wartość strumienia objętości płynu wyznacza się w sposób numeryczny dokonując minimalizacji wyrażenia stanowiącego różnicę pomiędzy wielkością zmierzoną Δp_{zm} i odpowiednią obliczoną Δp_{obl} .

2. Opis prezentowanej metody pomiaru strumienia płynu

Istota metody polega na tym, że dokonuje się w warunkach przepływu ustalonego, pomiaru różnicy ciśnienia w dwóch, skrajnych punktach leżących na siecznej kąta kolana, po jego obu stronach. W następnej fazie pomiaru porównuje się zmierzoną wartość różnicy ciśnienia z odpowiednią wartością, wyznaczaną na drodze rozwiązania numerycznego równań bilansu masy i pędu, tak dopasowując badaną wartość strumienia objętości (masy) w procesie obliczeń, by był spełniony z założoną dokładnością warunek równości porównywanych wielkości:

$$f(\text{Re}) = |\Delta p_{zm} - \Delta p_{obl}| \leq \varepsilon \quad (1)$$

gdzie: ε - zadana, mała wielkość, której wartość równa się np. niedokładności pomiaru ciśnienia.

W obliczeniach numerycznych uwzględnia się rzeczywistą geometrię obszaru przepływu oraz zmierzoną temperaturę płynu. W pierwszym kroku obliczeń zakłada się dwie skrajne wartości liczby Reynoldsa (Re), którym odpowiada odpowiednio minimalna i maksymalna wartość mierzonego strumienia objętości.

W następnej fazie pomiaru, poszukiwaną wartość strumienia objętości wyznacza się w sposób numeryczny dokonując minimalizacji wyrażenia stanowiącego różnicę pomiędzy wartością zmierzoną (Δp_{zm}) i odpowiednią obliczoną (Δp_{obl}). Proces minimalizacji wspomnianej różnicy ciśnień (różnica zmierzona i obliczona) do-

konywany jest za pomocą metody siecznych [6]. Metoda polega praktycznie na wyborze takiego rozwiązania numerycznego równań ruchu płynu wraz z równaniem ciągłości przepływu i równaniami modelu turbulencji, które spełniają opisany warunek (1) dotyczący obliczonej i zmierzonej różnicy ciśnień. Innymi słowy idea prezentowanej metody sprowadza się do takiego wyboru wartości liczby Reynoldsa traktowanej jako współczynnik równań różniczkowych ruchu płynu, dla której wyliczona różnica ciśnień Δp_{obl} spełnia warunek (postulat) (1).

Ze względu na burzliwą formę badanych przepływów charakteryzujących się dużymi wartościami liczby Reynoldsa do ich zamodelowania zastosowano dwurównaniowy model turbulencji $k-\omega$. Model ten oparty jest o równania transportu energii kinetycznej turbulencji k oraz specyficznej prędkości dyssypacji energii kinetycznej ω , zdefiniowanej wg [7,8] za pomocą wzoru:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (2)$$

W modelu tym podlegająca wyznaczeniu lepkość turbulentna μ_t wyliczana jest z zależności:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (3)$$

gdzie:

α^* - parametr modelu turbulencji,

ρ - gęstość płynu.

W celu jednoznacznego opisu badanego przepływu konieczne jest zdefiniowanie warunków brzegowych. Oprócz zerowania wektora prędkości oraz energii kinetycznej turbulencji na ścianach definiowana jest wartość średnia prędkości oraz intensywność turbulencji I w przekroju wlotowym rury. Wartość specyficznej prędkości dyssypacji energii kinetycznej na ścianie wynika z zadanej intensywności turbulencji I na wlocie oraz z założonych zmian energii kinetycznej k .

Bardzo ważną czynnością prowadzącą do uzyskania realistycznych rezultatów obliczeń numerycznych jest opracowanie modelu geometrycznego zainstalowanego przepływomierza kolanowego. Model ten zawiera dokładnie odwzorowany przestrzenny łuk kolana wraz z odcinkami prostej rury o długości 30 średnic po stronie dopływowej oraz 10 średnic po stronie odpływowej, który następnie wypełniono siatką objętości skończonych w programie GAMBIT, w preprocesorze załączonym do pakietu FLUENT [7]. Aby otrzymać zadaną dokładność wyników zagęszczono siatkę podziału szczególnie w miejscach gdzie występują duże gradienty obliczanych wielkości, to jest w pobliżu ścianek. Grubość najmniejszego elementu graniczącego ze ścianą wynosi 0,2mm, a współczynnik przyrostu grubości (stosunek grubości elementu poprzedniego do następnego) 1,5. Warto zaznaczyć, że wygenerowaną siatkę podziału cechuje wysoka jakość określona za pomocą małych wartości parametru skośności elementów objętościowych [7]. Maksymalna wartość wspomnianego parametru skośności nie przekraczała w rozważanych przypadkach $q = 0,5$. W celu wyznaczenia obliczeniowej różnicy ciśnień (Δp_{obl}) dokonano numerycznego całkowania wspomnianych równań ruchu płynu wraz z równaniami wybranego modelu turbulencji. Do obliczeń zastosowano pakiet o nazwie FLUENT 6.1 [7]. Ze względu na brak procedur optymalizacyjnych w pakiecie FLUENT wynika konieczność opracowania odpowiedniej procedury sprzęgającej ten pakiet ze wspomnianą procedurą numeryczną realizującą ideę metody siecznych. Procedura ta została napisana w języku C++. Do uruchomienia kolejnych iteracji wykorzystane zostały pliki „journal“ pakietu FLUENT [7]. Po zakończeniu obliczeń dla danej liczby Re procedura porównuje wartości różnicy ciśnień po czym uruchamia kolejne obliczenia dla nowo wyznaczonej liczby Re , bądź też przerywa proces iteracji jeśli zależność (1) została spełniona.

W celu wyznaczenia wartości zmierzonej różnicy ciśnień (Δp_{zm}) zbudowano specjalne stanowisko badawcze. Podstawową częścią stanowiska jest rurociąg o średnicy wewnętrznej $D_w = 100,6\text{mm}$ wykonany z PVC, złożony z trzech części: odcinka pionowego o długości

$L_1 = 6\text{m} \approx 59,6D_w$, kolana 90° o średnim promieniu $R = 394\text{mm}$ oraz odcinka poziomego za kolaniem o długości $L_2 = 3\text{m} \approx 29,8D_w$. W połowie pionowego odcinka rury umieszczono znormalizowaną kryzę pomiarową o średnicy otworu $d = 78\text{mm}$. Pomiaru spadku ciśnienia na kryzie dokonano manometrem wodnym typu U-rurka.

Na siecznej kolana wykonano dwa otwory impulsowe do pomiaru ciśnienia za pomocą zestawu przetwornika ciśnienia ALMEMO FD8612, wyskalowanego przy użyciu mikromanometru Askania wraz z miernikiem cyfrowym ALMEMO 2290-3. Do wymienionego miernika podłączona została również sonda do pomiaru temperatury ALMEMO PT010-P444. Za kolaniem umieszczono prosty odcinek rury o długości $L_2 = 3\text{m}$. Koniec rurociągu połączono za pomocą stożka z blachy z króćcem ssącym wentylatora. Badany strumień objętości regulowano za pomocą tyrystorowej przetwornicy częstotliwości, która umożliwiała płynną regulację obrotów wentylatora.

Uzyskane za pomocą wspomnianej kryzy wyniki pomiarów strumienia objętości wykorzystano do weryfikacji otrzymanych rezultatów za pomocą przepływomierza kolanowego.

3 Praktyczna realizacja metody

Badania doświadczalne umożliwiające otrzymanie danych pomiarowych w celu wyznaczenia strumienia objętości przeprowadzono na opisanym wyżej stanowisku badawczym. Pomiaru różnicy ciśnienia w dwóch miejscach to jest na kolanie oraz dla porównania na kryzie zamontowanej na pionowym odcinku rurociągu przed kolaniem dokonywano przy stałej nastawie obrotów wentylatora.

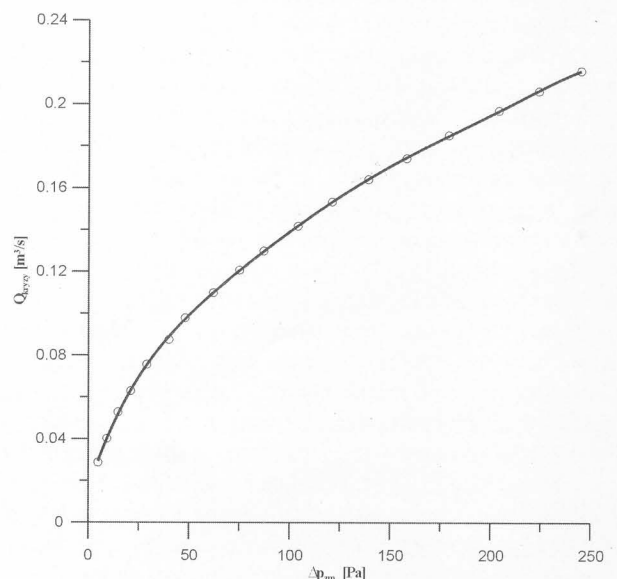
Na podstawie pomierzonych różnic ciśnienia na kryzie wyznaczono odpowiadające im strumienie objętości Q_{kryzy} . Wartości wyznaczonych strumieni za pomocą kryzy posłużyły do zbudowania charakterystyki przepływomierza kolanowego, to jest zależności:

$$Q_{kryzy} = f(\Delta p_{zm}) \quad (4)$$

gdzie:

Δp_{zm} - zmierzona różnica ciśnień po obu stronach kolana.

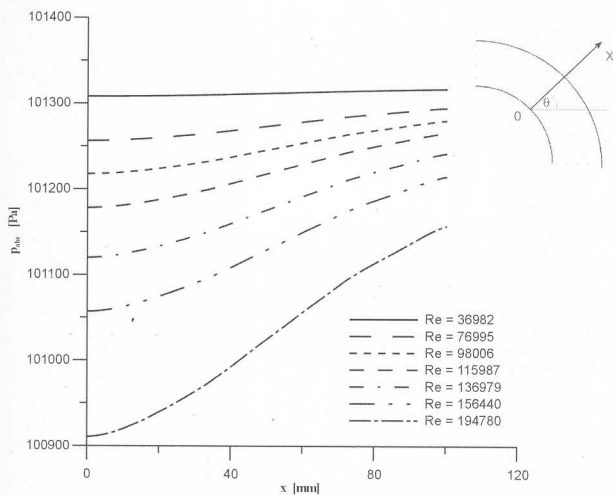
Na rys.1 przedstawiono omawianą charakterystykę rozważanego przepływomierza kolanowego. Z przebiegu krzywej opisującej tę charakterystykę wynika, że rozważany przepływomierz kolanowy posiada bardzo dobre właściwości metrologiczne w zakresie mierzonych strumieni objętości o wartościach $Q > 0,06\text{m}^3/\text{s}$. W zakresie mniejszych strumieni charakterystyka przepływomierza jest bardzo stroma. Oznacza to, że dla niewielkich przyrostów ciśnienia obserwuje się duże przyrosty mierzonego strumienia objętości. Zaznaczyć trzeba, że różnice mierzonych ciśnień w tym zakresie ($Q < 0,06\text{m}^3/\text{s}$) są stosunkowo małe, w związku z czym niepewności



Rys. 1. Charakterystyka przepływomierza kolanowego

pomiarowe omawianych ciśnień mają duży wpływ na dokładność pomiaru strumienia objętości.

Na rys.2 przedstawiono wyliczone w sposób numeryczny profile ciśnienia absolutnego wzdłuż siecznej kolana dla różnych strumieni. Warto dodać, że przedstawione na rys.2 profile ciśnienia zostały uzyskane z warunku spełnienia postulatu (1) odnośnie różnic ciśnienia obliczonych (Δp_{obl}) i odpowiednich zmierzonych (Δp_{zm}) w skrajnych punktach siecznej rozważanego przepływomierza kolanowego. Z rys.2 wynika, że największe wartości różnicy ciśnienia Δp_{zm} obserwuje się przy największych strumieniach. W przypadku mniejszych, mierzonych na omawianym stanowisku strumieni ($Re \leq 36982$) rozkład ciśnienia absolutnego wzdłuż siecznej kolana wykazuje duży stopień jednorodności charakterystyczny prawie poziomym przebiegiem omawianego profilu ciśnienia. Jak wspomniano w ramach analizy rys.1, w przypadku mierzonych małych strumieni, niepewności pomiaru omawianej różnicy ciśnienia mają istotny wpływ na błąd pomiaru tej wielkości.



Rys. 2. Wyznaczone w sposób numeryczny profile ciśnienia absolutnego na siecznej kolana

W tabeli 1 przedstawiono wyznaczone zgodnie z ideą prezentowanej metody wartości liczby Reynoldsa odpowiadające zmierzonym różnicom ciśnienia na kolanie (Δp_{zm}). Warto zaznaczyć, że wartości mierzonego w sposób pośredni strumienia objętości powietrza Q są jednoznacznie związane ze wspomnianymi wartościami liczby Reynoldsa za pomocą zależności:

$$Q = \frac{\pi D_w v}{4} Re \quad (5)$$

gdzie:

D_w - średnica wewnętrzna rurociągu,

v - lepkość kinematyczna powietrza w temperaturze pomiaru.

Dla porównania przytoczono również odpowiednie wartości uzyskane za pomocą kryzy pomiarowej (Q_{kryzy}). W tabeli 1 przytoczono ponadto wartości mierzonych różnic ciśnienia na kolanie (Δp_{zm}) i na kryzie (Δp_{kr}). Łatwo zauważyć, że mierzone na kryzie wartości różnicy ciśnienia są o wiele razy większe od odpowiednich mierzonych na siecznej kolana.

Przedstawione w tabeli 1 odchylenia względne wyznaczonych na

Tab. 1. Zestawienie zmierzonych i obliczonych wartości poszczególnych wielkości

Δp_{kr}	Q_{kryzy}	Re_{kryzy}	Δp_{zm}	Δp_{obl}	Re	$\frac{ Re_{kryzy} - Re }{Re_{kryzy}} \cdot 100\%$
Pa	m ³ /s	—	Pa	Pa	—	%
78,5	0,040163	34799	9,0	8,97	36982	6,27
382,6	0,087460	75779	39,0	38,48	76995	1,60
608,2	0,109903	95225	62,0	62,20	98006	2,92
853,5	0,129863	112519	87,0	87,02	115987	3,08
1196,8	0,153371	132887	121,0	121,31	136979	3,08
1550,0	0,174142	150885	158,0	157,24	156440	3,68
2403,5	0,215855	187026	245,0	245,43	194780	4,15

podstawie eksperymentu wartości liczby Re_{kryzy} i odpowiednich otrzymanych w wyniku realizacji idei zaproponowanej metody Re charakteryzują się małymi wartościami. Maksymalne odchylenie względne wynosi 6,27% i dotyczy pomiaru najmniejszego strumienia objętości na rozważanym przepływomierzu kolanowym. Jak wspomniano wyżej głównym źródłem niedokładności pomiarów w zakresie $Q < 0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ są niedokładności pomiaru małych różnic ciśnienia (Δp_{zm}). Warto zaznaczyć, że przytoczone wartości liczby Reynoldsa Re_{kryzy} wyznaczone na podstawie kryzowego pomiaru strumienia objętości (Q_{kryzy}), wzięte do porównania, są również obciążone pewnymi niedokładnościami pomiarowymi.

4. Uwagi końcowe

Zaprezentowana w pracy metoda pośredniego pomiaru strumienia objętości odznacza się wysokim stopniem zgodności mierzonych strumieni objętości w porównaniu do metody zwężkowej. Pomiar strumienia objętości zgodnie z ideą zaprezentowanej metody cechuje się powtarzalnością oraz nie wymaga wzorcowania przepływomierza kolanowego. Wysoką dokładność pomiaru umożliwia między innymi opracowany, realistyczny model matematyczny, złożonego przepływu płynu w obszarze przepływomierza. Poszukiwaną wartość strumienia objętości płynu wyznacza się w sposób numeryczny, żądając spełnienia postulatu (1) odnośnie zmierzonej i obliczonej różnicy ciśnienia w skrajnych punktach siecznej przepływomierza kolanowego. W obliczeniach numerycznych oprócz zmierzonej różnicy ciśnienia (Δp_{zm}) uwzględnia się rzeczywistą geometrię obszaru przepływu. Wykorzystuje się również zmierzoną wartość temperatury płynu dla uwzględnienia odpowiednich wartości współczynników opisujących termofizyczne właściwości płynu.

Rozważany przepływomierz kolanowy realizujący prezentowaną pośrednią metodę pomiaru może być zastosowany do wyznaczenia strumienia objętości gazów jak również cieczy. W przypadku zrealizowanego pomiaru strumienia powietrza większą zgodność otrzymanych rezultatów w porównaniu do metody zwężkowej uzyskano dla większych strumieni objętości ($Q > 0,06 \text{ m}^3/\text{s}$) ze względu na większe, mierzone wartości różnicy ciśnienia Δp_{zm} . W celu osiągnięcia większej dokładności pomiaru w zakresie mniejszych wartości mierzonych strumieni objętości do budowy przepływomierza należy zastosować rurę o mniejszej średnicy.

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że mierzone różnice ciśnienia Δp_{zm} w skrajnych punktach siecznej kolana są prawie dziesięć razy mniejsze od odpowiednich różnic ciśnienia mierzonych na kryzie dla tego samego strumienia objętości.

5. Literatura

- [1] Bean H.S.; Fluid Meters: Their Theory and Application Sixth Edition, ASME, New York 1971,
- [2] Kabza Z.; Pomiar strumieni płynów (przewodnik), Politechnika Opolska, Opole 1996,
- [3] Spitzer D.W.; Flow Measurement - Practical Guides for Measurement and Control 6th Edition, ISA, 2001,
- [4] Andruszkiewicz A., Górecki J., Kubas K.; Pomiar strumienia cieczy za pomocą bezwładnościowego przepływomierza kolanowego, Materiały konferencyjne XXXV MKM, Kraków 2003, s.111-114,
- [5] 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,
- [6] Burden R.L., Faires J.D.; Numerical Analysis, PWS-KENT Publ. Comp., Boston 1985,
- [7] FLUENT 6.1 User's Guide, Fluent Inc., 2003,
- [8] Wilcox D.C.; Turbulence Modeling for CFD Second Edition, DCW Industries, Anaheim 1998.

Title: The indirect measurement method of flow rate in application to elbow meters

Artykuł recenzowany