

Sprawdzenie możliwości pomiaru kryzą mimośrodową strumienia medium dla małych liczb Reynoldsa

Dariusz Kasprzak, Andrzej Mrowiec

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Kaliszu, Wydział Politechniczny, Katedra Mechaniki i Budowy Maszyn, ul. Nowy Świat 4, 62-800 Kalisz

Streszczenie: Węgiel to podstawowy surowiec energetyczny w Polsce. Od połowy ubiegłego wieku podejmowano próby spalania koloidalnych zawiesin pyłu węglowego w oleju napędowym lub opałowym. Ze względów ekonomicznych podjęto badania nad wykorzystaniem koloidalnych zawiesin wodno-węglowych CWL (Coal-Water Liquid), jako paliwa w energetyce ciepłowniczej. Pozwala to na obniżenie zawartości NO_x i SO_x bez konieczności inwestowania w drogie układy odsiarczania i odpylania, co jest atutem ekologicznym i ekonomicznym. Wymagane, ze względów technologicznych, układy pomiaru strumienia dostarczanego paliwa, powinny być tanie w eksploatacji, niezawodne oraz odporne na zanieczyszczenia. Warunki te mogą spełnić kryzy mimośrodowe lub segmentowe. W artykule przedstawiono stanowisko doświadczalno-pomiarowe, pozwalające na przeprowadzenie przepływowych badań wstępnych, kryz mimośrodowych z punktowym odbiorem ciśnienia różnicowego, przy małych liczbach Reynoldsa. Wyniki wykonanych pomiarów charakterystyk przepływowych oraz symulacji numerycznych przedstawiono w tabelach i na wykresach. Dla wybranej kryzy mimośrodowej wyznaczono wartość współczynnika przepływu C w funkcji liczby Reynoldsa. Przedstawione w artykule analizy dotyczą przepływu wody. Planowane są dalsze badania dla oleju hydraulicznego.

Słowa kluczowe: kryza mimośrodowa, liczba Reynoldsa, współczynnik przepływu, przetwornik różnicy ciśnienia

1. Wprowadzenie

Obecnie istnieje wiele sposobów pomiaru przepływu cieczy w przemysłowych instalacjach przesyłowo-przepływowych. W zależności od istniejących możliwości, można takiego pomiaru dokonywać różnymi metodami, wykorzystując przepływomierze [1, 4, 5, 7].

Jedną z najczęściej stosowanych metod pomiaru strumienia przepływu cieczy jest metoda zwężkowa, charakteryzująca się dokładnością ok. 1,5...2%. Nie bez znaczenia jest w tym wypadku fakt, że należy ona do metod tanich i polega na pomiarze spadku ciśnienia spiętrzenia na elemencie pomiarowym (spiętrzącym). W charakterze zwężki spiętrzącej przepływ bardzo często stosuje się kryzy pomiarowe. W wielu przypadkach za podstawowy element pomiarowy przyjmuje się kryzę standar-

dową (normalną). Gdy nie można spełnić warunków przepływowych cieczy, które są objęte normą ISO 5167-1, to istnieje możliwość zastosowania kryz niestandardowych takich jak: kwadrantowa (wykorzystywana zwłaszcza dla małych liczb Reynoldsa), segmentowa (dla cieczy zanieczyszczonych), czy opisana w niniejszym opracowaniu kryza mimośrodowa [2, 6].

Stosowanie kryz mimośrodowych, przy zachowaniu prostoty wykonania i instalowania jest zalecane zwłaszcza wówczas, gdy medium jest na tyle zanieczyszczone, że stosowanie kryz centrycznych (normalnych) może prowadzić do ich znacznego przewężenia, a co za tym idzie uzyskanie wiarygodnych wyników pomiaru będzie niemożliwe. Podobnie jak w przypadku kryz segmentowych, w celu zapobiegania osadzaniu się zanieczyszczeń przed zwężką, korzystne jest umieszczanie otworu kryzy mimośrodowej w dolnej części zwężki. W znacznym stopniu niezależni to niepewność pomiaru strumienia od faktu możliwości występowania w nim osadów. Dla wszystkich rodzajów kryz obowiązują takie same wymagania dotyczące ich wykonania. Do obliczenia strumienia przepływu stosuje się zależności takie same jak dla kryzy normalnej jednak należy znać wartość współczynnika przepływu zależnego od średnicy otworu zwężki jak i wartości przewężenia. Literatura przedmiotu zaleca, aby przewężenie kryzy (stosunek średnic $\beta = d/D$) zawierało się w przedziale 0,3–0,8 przy liczbie Reynoldsa nie mniejszej niż 10000 [8].

Autor korespondujący:

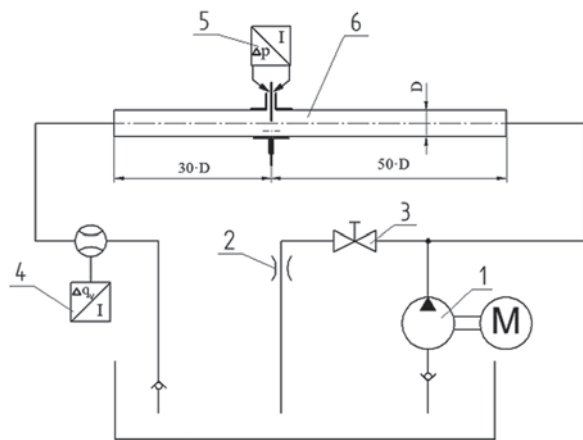
Dariusz Kasprzak, darkas1@wp.pl

Artykuł recenzowany

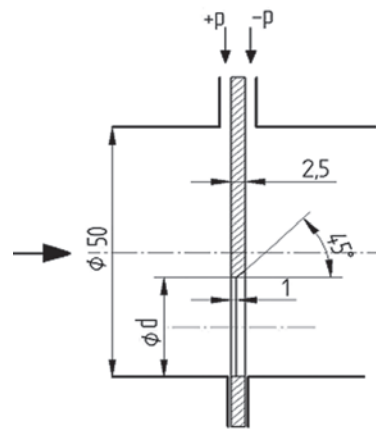
nadesłany 4.05.2016 r., przyjęty do druku 25.06.2016 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Schemat stanowiska hydraulicznego do badania kryzy mimośrodkowej
Fig. 1. Diagram of the hydraulic stand for studying the eccentric orifice



Rys. 2. Schemat badanej kryzy mimośrodkowej
Fig. 2. Diagram of the studied eccentric orifice

2. Przeprowadzenie pomiarów

Badania przeprowadzono na zbudowanym autorskim stanowisku laboratoryjnym (rys. 1), w którym przepływ w instalacji hydraulicznej wymuszano pompą wirową (1) w obiegu zamkniętym. Do pomiaru przepływającego strumienia wody przez badane kryzy mimośrodkowe umieszczone w rurociągu (6) z stali nierdzewnej o średnicy wewnętrznej $D = 50$ mm, jako przepływomierz odniesienia wykorzystano przepływomierz elektromagnetyczny typu PROMAG 30AT15 (4) o błędzie granicznym $\Delta q_v = 0,0092$ dm³/s w badanym zakresie pomiarowym. Powstające na kryzie ciśnienie spiętrzenia różnicowego Δp mierzono w sposób przytarczowy punktowy inteligentnym przetwornikiem różnicy ciśnień

typu APR-2000/ALW (5) o zakresie pomiarowym $-0,5...7$ kPa. Zawór odcinający (3) z wymiennymi stałymi dławikami (2) służy do skokowej regulacji przepływu strumienia wody poprzez upust boczny.

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla 5 kryz mimośrodkowych, różniących się średnicą otworu przepływowego d (rys. 2), a co za tym idzie przewężeniem kryzy $\beta = d/D$ – tabela 1.

Badania doświadczalne kryz mimośrodkowych w zakresie małych liczb Reynoldsa ($Re_D = 3000...10000$) wykonano w rurociągu przy przepływie wody. Pomiary wykonano w temperaturze $t = 21^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. Równanie charakterystyki badanych doświadczalnie przepływomierzy spiętrzających zbudowanych na podstawie typoszeregu kryz mimośrodkowych (tabela 1), przedstawiono zależnością (1):

$$q_v = C^* \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (1)$$

Tabela 1. Parametry geometryczne badanych kryz mimośrodkowych
Table 1. Geometrical parameters of the studied eccentric orifice

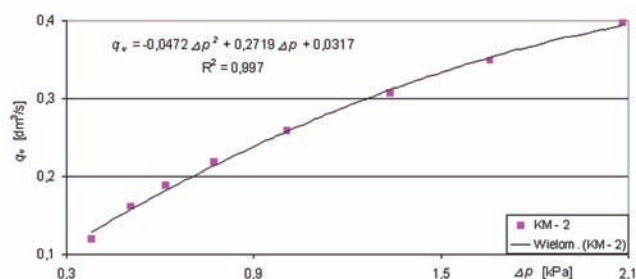
Kryza mimośrodkowa	d [mm]	β [-]
KM-1	15,0	0,3
KM-2	20,0	0,4
KM-3	25,0	0,5
KM-4	30,0	0,6
KM-5	35,0	0,7

gdzie: Δp – różnica ciśnień przed i za zwężką [Pa], C^* – stała przepływu badanego przepływomierza spiętrzającego $C^* = f\{C, \beta, \varepsilon, D, \rho\}$.

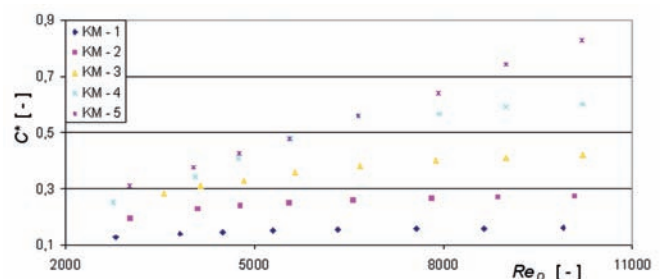
Na rys. 3 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskanych doświadczalnie pomiarów strumienia objętości $q_v = f(\Delta p)$ dla wybranej kryzy mimośrodkowej KM - 2.

Na rys. 4 przedstawiono uzyskane w trakcie badań eksperymentalnych wyniki stałej przepływu C^* dla badanych kryz mimośrodkowych w zależności od liczby Reynoldsa ($3000 < Re_D < 10000$).

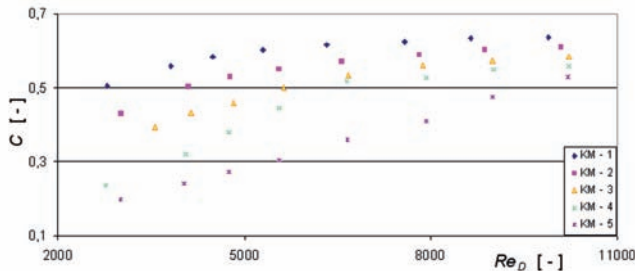
Na rys. 5 przedstawiono uzyskane w trakcie badań i obliczeń wartości współczynnika przepływu C wg zależności (2), dla przebadanych doświadczalnie kryz mimośrodkowych w zależności od liczby Reynoldsa ($3000 < Re_D < 10000$).



Rys. 3. Eksperymentalne wyniki pomiaru strumienia objętości $q_v = f(\Delta p)$
Fig. 3. Experimental results of the flow rate $q_v = f(\Delta p)$



Rys. 4. Wyznaczone eksperymentalnie stałe przepływu $C^* = f(Re_D)$
Fig. 4. Experimentally determined flow constant $C^* = f(Re_D)$



Rys. 5. Obliczone wartości współczynnika przepływu $C=f(Re_D)$
Fig. 5. Calculated value of flow constant $C=f(Re_D)$

3. Symulacja numeryczna przepływu

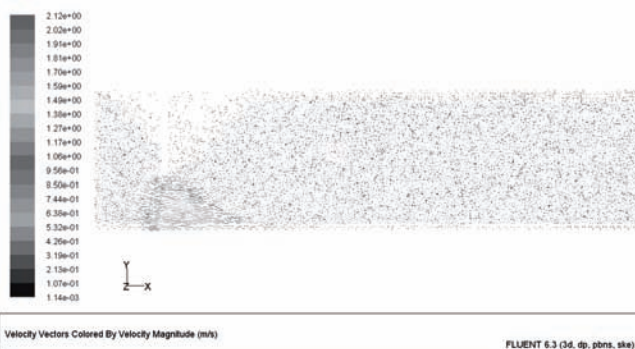
Przeprowadzono również symulacje numeryczne badanego procesu przepływowego dla modelu 3D $k-\epsilon$, wybranej kryzy mimośrodowej (KM-2) [9]. Do jego realizacji wykorzystano program FLUENT [3], przyjmując jako parametr wejściowy strumień masy $q_m = 0,3955$ kg/s.



Rys. 6. Rozkład ciśnienia statycznego dla modelu 3D $k-\epsilon$ (dla kryzy mimośrodowej KM-2 przy liczbie $Re_D = 10\ 000$)

Fig. 6. Distribution of static pressure for the model 3D $k-\epsilon$ (for eccentric orifice KM-2 for $Re_D = 10\ 000$)

Na rys. 6 przedstawiono wyznaczony numerycznie rozkład ciśnienia statycznego przy przepływie wody ($Re_D = 10\ 000$) przez kryzę mimośrodową w przekroju osiowym w płaszczyźnie przekroju wzdłużnego.



Rys. 7. Rozkład pola prędkości w postaci wektorowej dla modelu 3D $k-\epsilon$ (dla kryzy mimośrodowej KM-2, $Re_D = 10\ 000$)

Fig. 7. Distribution of the velocity field in the vector form for the model 3D $k-\epsilon$ (for eccentric orifice KM-2 for $Re_D = 10\ 000$)

Na rys. 7 przedstawiono wyznaczony numerycznie rozkład pola prędkości w postaci wektorów przy przepływie wody ($Re_D = 10\ 000$) przez kryzę mimośrodową w przekroju osiowym w płaszczyźnie przekroju wzdłużnego.

Na podstawie przeprowadzonej symulacji dla kryzy mimośrodowej KM-2 obliczono współczynnik przepływu $C = 0,577$.

Z porównania wyników badań doświadczalnych oraz przeprowadzonych symulacji, dla modelu 3D $k-\epsilon$, oszacowano względny błąd symulacji spiętrzenia ciśnienia na kryzie mimośrodowej (KM-2) dla strumienia masy $q_m = 0,3955$ kg/s, różnica ta nie przekracza 11,9%.

4. Wnioski końcowe

W artykule omówiono wyniki podjętej próby sprawdzenia możliwości pomiaru strumienia objętości przy małych liczbach Reynoldsa za pomocą kryzy mimośrodowej w warunkach przemysłowych. Bardzo istotnym jest to, że dla kryzy mimośrodowej o przewężeniu $\beta = 0,3$ (KM-1) uzyskano w zakresie liczby $Re_D = 6000 \dots 10\ 000$ praktycznie stałą wartość współczynnika przepływu $C = 0,631 \pm 0,005$ o charakterystyce zbliżonej do linii prostej. Dla większych wartości liczby Reynoldsa norma PN-M-42377 [10] podaje wartość współczynnika przepływu $C = 0,628 \pm 0,001$ przy przewężeniu $\beta = 0,45 \dots 0,7$. Stałe wartości współczynnika przepływu uzyskano dla kryzy KM-2 przy liczbie $Re_D = 7500 \dots 10\ 000$, a dla kryzy KM-3 przy liczbie $Re_D = 9000 \dots 10\ 000$. Kryzy KM-4 i KM-5 nie nadają się do zastosowania w badanym zakresie liczby Reynoldsa.

Z analizy przedstawionych rezultatów badań wynika, że stosowanie w warunkach przemysłowych kryz mimośrodowych dla małych liczb Reynoldsa ($Re_D < 10\ 000$) każdorazowo wymaga przeprowadzania kalibracji.

Bibliografia

1. Bonfig K.W., *Technische Durchflussmessung*, Vulkan-Verlag, Essen 1977.
2. Crabtree M.A., *Industrial Flow Measurement*, Master Thesis, University of Huddersfield, 2009.
3. *Fluent 6.1 User's Guide*, Fluent Inc., 2003.
4. Goldstein R.J., *Fluid Mechanics Measurements*, Hemisphere Publishing Corp., 1983.
5. Kabza Z., *Pomiary strumieni płynów (przewodnik)*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i monografie, Z. 90, Opole 1996.
6. Kabza Z., Kostyrko K., Zator S., Łobozowski A., Szkolnikowski W., *Regulacja mikroklimatu pomieszczenia*, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2005.
7. Kremlewski P.P., *Raschodimiery i scetniki kolicestva vescestu*, Izd. Politechnika, Sankt Petersburg 2002.
8. Liptak B.G., *Flow Measurement*, Chilton Book Company, Radnor, Pennsylvania 1993, 85–86.
9. Mrowiec A., *Analiza numeryczno-doświadczalna rozkładu parametrów przepływu w kolanie pomiarowym*, XIII Krajowa i IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Metrologia w Technikach Wytwarzania, Poznań-Żerków, 2009, 305–308.
10. PN-M-42377. *Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych. Wytyczne doboru dysz i kryz nie objętych ISO 5167-1.*

Analysis of the Possibilities of Measurement with Eccentric Orifice of Flow Medium for Small Reynolds Numbers

Abstract: The energy industry in Poland is mostly based on coal as an energy resource. Until the half of the previous century studies and attempts were made at burning coal dust-based suspensoids in gas oil and furnace oil, with positive results. For economic reasons, studies and attempts were made at using coal and water-based CWL (Coal-Water Liquid) suspensoids as fuel in the heating industry. Using this fuel leads to a reduction in NO_x and SO_x percentage without the need for an expensive desulphurization and dust extraction installation, which is a huge economic and ecological advantage. For technological reasons required are systems for measuring the flow of the injected fuel that are cheap in use, reliable and residue-resistant. These requirements can be met by segmental and eccentric orifices. In the article, presented was a research and measurement station which enables its users to conduct introductory flow measurements for eccentric orifices with point reception of differential pressure for small Reynolds numbers. The results of the flow characteristic measurements as well as of numerical simulations were presented in the form of tables and charts. For the selected eccentric orifice the C flow parameter in the Reynolds number function was determined. The analysis of the study results presented in the article refers to the flow of water. The next planned stage of the research will involve flow studies and measurements with the use of hydraulic oil as the medium.

Keywords: eccentric orifice, Reynolds number, flow factor, differential pressure sensor

dr inż. Dariusz Kasprzak

darkas1@wp.pl

Pracownik dydaktyczny w Katedrze Mechaniki i Budowy Maszyn Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Kaliszu. Studia na Wydziale Elektrotechnicznym Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie ukończył w 1983 r. Od 1997 r. doktor nauk technicznych. Obszary zainteresowań: mechanika lotu, optymalizacja warunków przepływów, metody częstotliwościowe w diagnostyce obiektów, zastosowanie metod nieniszczących w lokalizacji stref naprężeń materiałów.



dr inż. Andrzej Mrowiec

a.mrowiec@pwsz.kalisz.pl

Pracownik dydaktyczny w Katedrze Mechaniki i Budowy Maszyn Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Kaliszu. Studia na Wydziale Budowy Maszyn Politechniki Częstochowskiej ukończył w 1979 r. Pracował w Laboratorium Prób Typu Zakładów Automatyki Przemysłowej w Ostrowie Wielkopolskim. W 2013 r. uzyskał tytuł doktora na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej. Obszary naukowych zainteresowań: mechanika płynów, mechatronika oraz metody pomiaru i rejestracji wielkości energetycznych.

