

PRZEPŁYWOMIERZ ZWĘŻKOWY DO POMIARU STRUMIENIA OBJĘTOŚCI OLEJU HYDRAULICZNEGO

Andrzej MROWIEC

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego w Kaliszu
tel.: 606 942 976 e-mail: a.mrowiec@pwsz.kalisz.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono zaprojektowany i wykonany kompaktowy przepływomierz z kryzą (mikrokryzą) z wlotem stożkowym. Przepływomierz ten będzie służył do pomiaru strumienia objętości przy niewielkich wartościach liczby Reynoldsa. Badania za pomocą tego przepływomierza przeprowadzono w obszarze przepływu laminarnego dla strumienia oleju hydraulicznego o lepkości kinematycznej $16,4 \dots 42,7 \text{ mm}^2/\text{s}$. Wyniki wzorcowania przedstawiono w postaci wykresów charakterystyk przepływowych $q_v = f(\Delta p)$ i wyznaczonej uśrednionej wartości współczynnika przepływu równej $C = 0,895$ w zakresie liczb Reynoldsa Re_D od 100 do 1000.

Słowa kluczowe: przepływomierz zwężkowy, kryza z wlotem stożkowym, współczynnik przepływu.

1. WPROWADZENIE

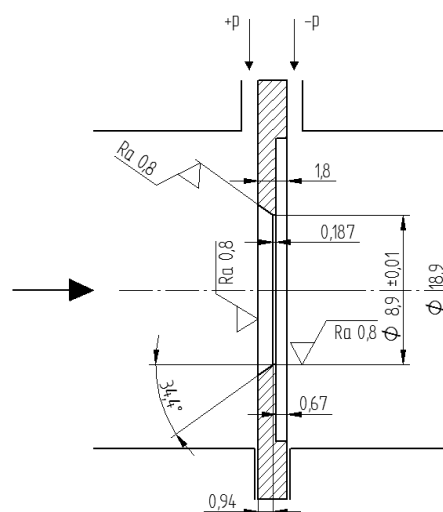
Ogólnie strumieniem objętości nazywamy ilość płynu przepływającą przez przekrój poprzeczny przepływowego kanału hydraulicznego w jednostce czasu. Na wyznaczenie tego strumienia mają wpływ parametry fizyczne płynu takie jak: ciśnienie, temperatura, lepkość oraz jego gęstość. Spośród parametrów tych, temperaturę i ciśnienie mierzy się bezpośrednio w kanale przepływowym i na tej podstawie wyznacza się lepkość oraz gęstość przepływającego w nim płynu. Na podstawie doświadczeń własnych, a także publikacji zagranicznych stwierdzono, że metoda zwężkowa jest najpopularniejszą i najbardziej niezawodną a jednocześnie najtańszą metodą pomiaru strumienia objętości w zastosowaniach przemysłowych. Podejmowane próby zastosowania przepływomierzy wolumetrycznych do pomiaru strumienia objętości cieczy lepkich (np. oleju opałowego lub hydraulicznego) nie dały pozytywnych wyników ze względu na „wyrabianie się” szlifowanych powierzchni (wirujących elementów pomiarowych) lub osadzanie się zanieczyszczeń ograniczających przepływ. W wielu wypadkach zastosowanie typowych zwęzek znormalizowanych nie spełnia warunków pomiaru (obowiązujące normy podają przepisy dla pomiaru przepływu przy liczbie Reynoldsa $Re > 10\ 000$ i średnicy rurociągu $D \geq 50 \text{ mm}$), co zmusza badaczy do opracowywania zwęzek o kształtach nieznormalizowanych wymagających indywidualnego wzorcowania [1].

Przy małych wartościach przepływającej strugi oleju hydraulicznego pomiar strumienia objętości stwarza znaczne problemy metrologiczne. Związane jest to z małą średnicą rurociągu przepływowego, co przy równocześnie zmieniającej się wraz z temperaturą lepkością kinematyczną

oleju, prowadzi do uzyskiwania relatywnie niskich wartości liczby Reynoldsa [2, 3]. Z tego względu do pomiaru strumienia płynów lepkich bardzo przydatna wydaje się być kryza z wlotem stożkowym, dla której współczynnik przepływu zachowuje stałą wartość aż dla niskich wartości liczby Reynoldsa. Kryzę tę można stosować przy spełnieniu następujących ograniczeń: średnica otworu w kryzie $d > 6 \text{ mm}$, średnica rurociągu $D \leq 500 \text{ mm}$ i wartości przewężenia $0,1 \leq \beta \leq 0,316$ [4].

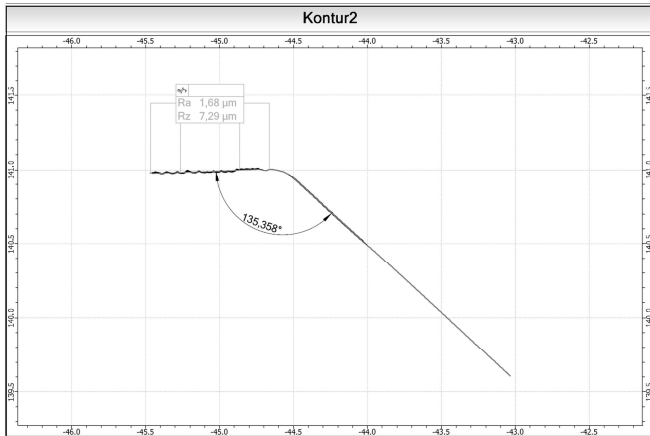
2. PROJEKT I WYKONANIE KRYZY

Projektując kryzę (mikrokryzę) założono, że rurociągiem o średnicy wewnętrznej $\phi 18,9 \text{ mm}$ będzie przepływał olej Hydrol L-HL 22 o gęstości $\rho = 864 \text{ kg/m}^3$. Olej ten będzie przepływał z maksymalnym strumieniem $q_v = 15 \text{ dm}^3/\text{min.}$, przy spiętrzeniu ciśnienia Δp na kryzie nie przekraczającym 10 kPa . Dla tak określonych założeń projektowych, postanowiono wykorzystać kryzę z wlotem stożkowym, którą stosuje się do pomiaru przepływów cieczy lepkich przy małych liczbach Reynoldsa [5]. Założono dla projektowanej kryzy przewężenie $\beta = 0,47$ wraz z podstawowymi wymiarami geometrycznymi, które przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wymiary zaprojektowanej mikrokryzy z wlotem stożkowym

Dla tak zaprojektowanej kryzy wykonano prototyp „w metalu” (stal nierdzewna). Następnie przeprowadzono weryfikację kąta wlotowego kryzy z wlotem stożkowym od strony napływu płynu i chropowatości powierzchni otworu przelotowego. Pomiary przeprowadzono za pomocą profilometru NANOSCAN 855. Wyniki pomiaru geometrii kryzy z otworem o średnicy $\varnothing 8,935$ mm przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Wyniki pomiaru geometrii i chropowatości wykonanej kryzy

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że w stosunku do zaprojektowanej kryzy: jej kąt wlotu został zwiększony o ok. 20° , a przeprowadzona obróbka wykańczająca powierzchni nie zapewniła założonej chropowatości wlotu kryzy, jej wartość została przekroczona - chropowatość wykonanej powierzchni wynosi $Ra = 1,68 \mu\text{m}$.

3. STANOWISKO BADAWCZE

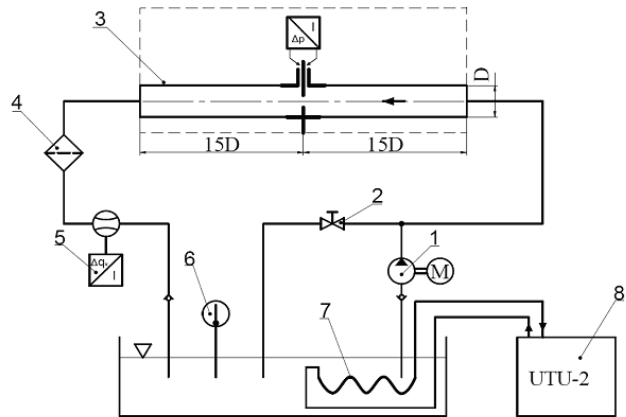
Na rysunku 3 przedstawiono wykonany w oparciu o założenia projektowe zwężkowy przepływomierz z przetwornikiem APR-2000/ALW. Przetwornik ten zastosowano do pomiaru różnicy ciśnienia spiętrzenia na kryzie (z wlotem stożkowym) wbudowanej w korpus z odcinkami rurociągu po stronie dolotowej i wylotowej.



Rys. 3. Widok kompaktowego przepływomierza zwężkowego

Pomiary przepływu strumienia objętości do wyznaczenia charakterystyk przepływowych przy różnych wartościach lepkości kinematycznej oleju, przeprowadzono na zmodyfikowanym stanowisku badawczym (zasilacz hydrauliczny firmy HYDAC), którego uproszczony schemat hydrauliczny przedstawiono na rysunku 4.

Strumień przepływający w układzie hydraulicznym oleju Hydrol L-HL 22 zmieniano płynnie wykorzystując falownik do sterowania obrotami silnika elektrycznego w zakresie 435 ... 1450 obr/min. Silnik (M) połączony poprzez sprzęgło kłowe z pompą zębatą o zazębieniu wewnętrznym (1), która przy nominalnych obrotach ma maksymalną wydajności $q_v = 16 \text{ dm}^3/\text{min}$. Dodatkową płynną regulację pomiarowego przepływu strumienia objętości umożliwia zawór (2), który tworzy dla przepływającego oleju tzw. upust boczny bezpośrednio do zbiornika.



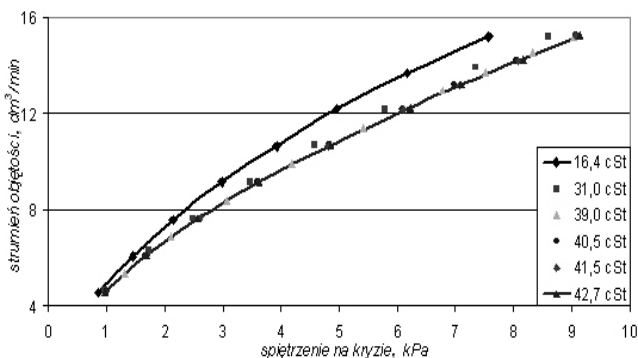
Rys. 4. Schemat hydraulicznego układu przepływowego - opis w tekście

Dalej olej przepływa przez badany przepływomierz kompaktowy (3), skąd poprzez filtr dokładnego oczyszczania (4) wpływa do wlotu przepływomierza owalnego NC4 (5). W tym układzie przepływomierz NC4 przyjęto jako wzorzec pomiaru objętościowego strumienia przepływu. Zmianę lepkości kinematycznej przepływającego oleju regulowano, zmieniając jego temperaturę. W stanowisku pomiarowym do stabilizacji nastawionej temperatury przepływającego oleju wykorzystano wodny ultratermostat UTU-2 (8). Podłączono go do rurowego wymiennika ciepła (7), który został wykonany w postaci miedzianej wężownicy grzewczej zanurzonej w oleju wypełniającego zbiornik. Masywny, stalowy zbiornik stanowi podstawę całego układu hydraulicznego stanowiska badawczego. Temperaturę oleju w układzie mierzono w sposób ciągły wykorzystując rezystancyjny czujnik temperatury Pt100 (6) w obudowie z głowicą zaciskową. W obudowie tej podłączono do czujnika rezystancyjnego Pt100 głowicowy przetwornik temperatury typu AT-2. Przetwornik temperatury zaprogramowano na zakres pomiarowy $0 \dots 80^\circ\text{C}$ z wyjściowym standardowym sygnałem $4 \dots 20 \text{ mA}$ prądu stałego.

Zastosowany jako wzorzec porównawczy do pomiaru przepływającego strumienia oleju, przepływomierz owalnego typu NC4 charakteryzuje się błędem granicznym o wartości $\Delta q_v \leq 0,25\%$ wartości mierzonej w zakresie pomiarowym $q_v = 0,2 \dots 50 \text{ dm}^3/\text{min}$. Powstające na kryzie ciśnienie różnicowe Δp mierzono w sposób przytarczowy punktowy, „inteligentnym” przetwornikiem różnicy ciśnień typu APR-2000/ALW o zaprogramowanym zakresie pomiarowym $0 \dots 10 \text{ kPa}$ dla standardowego wyjścia prądowego $4 \dots 20 \text{ mA}$.

4. POMIARY, OBLICZENIA I SYMULACJE

Wykorzystując zarejestrowane pomiary strumienia objętości oleju hydraulicznego, wykonano punktowe (punkt - średnia z 60 pomiarów z krokiem próbkowania co 5 sekund) charakterystyki przepływu $q_v = f(\Delta p)$ dla badanej kryzy z wlotem stożkowym które przedstawiono na rys. 5. Krzywe skrajne charakterystyk przepływowych przy przepływającym strumieniu objętości $q_v < 16 \text{ dm}^3/\text{min}$ przedstawiono w postaci linii ciągłych, dla lepkości kinematycznych $16,4 \text{ mm}^2/\text{s}$ i $42,7 \text{ mm}^2/\text{s}$. Między nimi zawarte są punkty charakteryzujące pozostałe cztery lepkości kinematyczne dla których wykonywano pomiary.



Rys. 5. Charakterystyki przepływowe $q_v = f(\Delta p)$ w zależności od lepkości kinematycznej

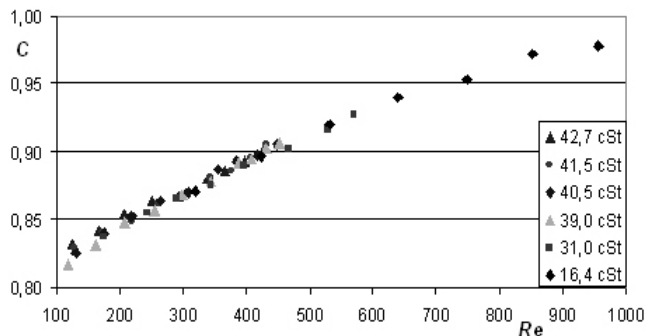
Współczynnik przepływu C dla wykonanej kryzy pomiarowej, zamontowanej w badanym przepływowymierzu kompaktowym, obliczano z równania (1). W obliczeniach wykorzystano zarejestrowane i uśrednione wcześniej wartości spiętrzeń oraz strumieni objętości z charakterystyk przepływowych $q_v = f(\Delta p)$ przedstawionych na rysunku 5.

$$C = \frac{4 \cdot q_v \cdot \sqrt{1 - \beta^4}}{\pi \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}} \quad (1)$$

gdzie:

- C - współczynnik przepływu
- q_v - strumień objętości
- Δp - różnica ciśnień przed i za zwężką w [Pa],
- β - przewężenie,
- ε - współczynnik ekspansji (dla oleju $\varepsilon = 1$),
- d - średnica otworu w kryzy [m],
- ρ - gęstość oleju hydraulicznego [kg/m^3].

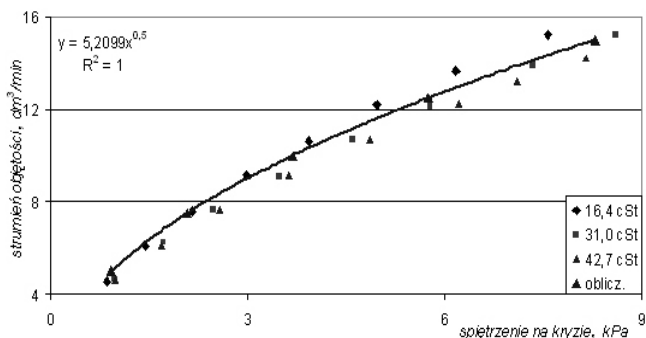
Otrzymane w wyniku obliczeń wartości współczynnika przepływu C dla wybranych lepkości kinematycznych przepływającego oleju w zależności od liczby Reynoldsa przedstawiono w postaci wykresu $C = f(Re)$ na rysunku 6.



Rys. 6. Rozkład współczynnika przepływu w zależności od liczby Reynoldsa

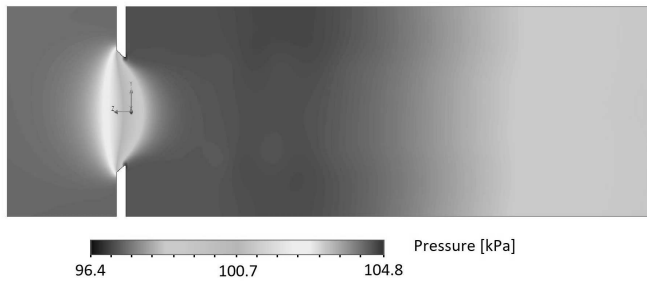
Dla, obliczonych z zależności (1) wartości współczynników przepływu, zaproponowano jego uśrednioną wartość równą $C = 0,895$, którą przyjęto przy strumieniu przepływającego oleju w zakresie liczb Reynoldsa $Re_D = 100 \dots 1000$. Z przedstawionego wykresu wynika też, że dla liczby Reynoldsa $Re > 650$ występuje już widoczne zakrzywienie linii utworzonej z obliczonych wartości współczynnika przepływu w kierunku jej wypłaszczenia.

Dla tak wyznaczonej średniej wartości współczynnika przepływu ($C = 0,895$) wykonano obliczenia inżynierskie strumienia objętości. Pozwalają one na wyznaczenie charakterystyki przepływowej dla kompaktowego przepływowierza z kryzą o wlocie stożkowym przy różnych lepkości kinematycznych oleju z zakresu od $16,4 \text{ mm}^2/\text{s}$ do $42,7 \text{ mm}^2/\text{s}$. Obliczoną charakterystykę przepływową $q_v = f(\Delta p)$ przedstawiono na rys. 7 z wybranymi z badań punktowymi charakterystykami przepływowymi dla wybranych lepkości.

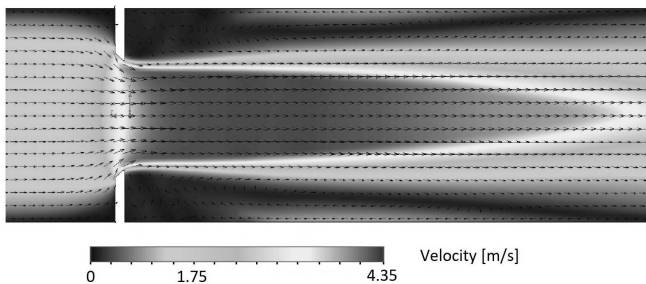


Rys. 7. Obliczona charakterystyka przepływowa $q_v = f(\Delta p)$, na tle wybranych charakterystyk punktowych

Obliczenia numeryczne wykonano w inżynierskim programie SolidWorks dla przepływającego strumienia $q_v = 15 \text{ dm}^3/\text{min}$ oleju hydraulicznego o gęstości $864 \text{ kg}/\text{m}^3$, przy lepkości kinematycznej $16,4 \text{ mm}^2/\text{s}$, w rurociągu z kryzą o wlocie stożkowym rysunek 1. Przykładowy, uzyskany z symulacji rozkład ciśnienia statycznego w obrębie badanej kryzy, przedstawiający gwałtowny jego spadek w miejscu gdzie olej najbardziej przyspiesza, przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Rozkład ciśnienia statycznego w obrębie badanej kryzy



Rys. 9. Wektorowy obraz pola prędkości w obrębie badanej kryzy

Na rysunku 9 przedstawiono uzyskany w wyniku symulacji przykładowy rozkład wektorowego pola prędkości w obrębie badanej kryzy. Uwidoczniono na nim obszar strumienia oleju o wysokiej prędkości w stosunku do jego wartości przed kryzą dla przepływającego strumienia objętości $q_v = 15 \text{ dm}^3/\text{min}$. Za kryzą pomiarową widoczny jest wzrost prędkości w osi przepływu z początkowej wynoszącej $1,467 \text{ m/s}$ do maksymalnej $4,263 \text{ m/s}$ w przewężeniu w przekroju „Vena contracta”. Z kolei w punktach przytarczowego poboru ciśnienia spiętrzenia wartość ciśnienia statycznego maleje z 103886 Pa przed kryzą do $96558,5 \text{ Pa}$ za kryzą.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych, dotyczących przepływu oleju hydraulicznego przez kryzę osiowoosymetryczną z wlotem stożkowym przy przewężeniu $\beta = 0,47$.

Po wykonanych badaniach należy stwierdzić że:

1. wyznaczona średnia wartość współczynnika przepływu w zakresie zmiany liczby Reynoldsa $100 < Re_D < 1000$ dla przebadanej kryzy wynosi $C = 0,895$;
2. jego wartość jest większa od podanej w literaturze: $C = 0,734$ [4], $C = 0,792$ [2], $C = 0,812$ [5];
3. współczynnik przepływu ma najbardziej zbliżoną wartość do podobnie wykonanej kryzy o kącie wlotu 50° dla której $C = 0,885$ [3].

W wyniku badań własnych otrzymano bardzo zbliżoną wartość współczynnika przepływu C do wartości uzyskanej w badaniach przeprowadzonych przez Kuratowa [3] dla oleju opałowego przy przewężeniu $\beta = 0,5$. Wskazuje to na celowość prowadzenia dalszych badań przepływowych dla cieczy lepkich.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Kabza Z.: Pomiary strumieni płynów (przewodnik), Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i monografie z. 90, Opole 1996.
2. Kremlewski P. P.: Raschodimiri i scetciki kolicestva vescestv, Izd. Politechnika SaintPetersburg, 2002.
3. Kuratow T.: Zwężkowy pomiar natężenia przepływu oleju opałowego przy małych wartościach liczby Reynoldsa, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1973.
4. PN/M-42377. Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych. Wytyczne doboru dysz i kryz nie objętych ISO 5167-1.
5. Ho Y.S., Leong T.P.: Performance of conical entrance orifice plates at low Reynolds numbers, International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 6, Issue 2, June 1985, p. 122-125.

CONstriction FLOW-METER FOR THE MEASUREMENTS OF VOLUMETRIC FLOW RATE OF HYDRAULIC OIL

Designed and built compact constriction flow-meter based on flange (micro flange) with a conical inlet having contraction coefficient $\beta = 0,47$ for the measurement of volumetric flow rate with low values of Reynolds number was presented in this article. The experiments were conducted on the hydraulic flow site measuring volumetric flow rate with temperature of flowing oil. The measurements were taken in the area of laminar flow for the stream of hydraulic oil, whose kinematic viscosity was changing in the range $16,4 \dots 42,7 \text{ mm}^2/\text{s}$. Obtained results of the measurements were presented in the form of the graphs of flow characteristics $q_v = f(\Delta p)$. Based on the results of measurements of examined flange, the calculations were made and average value of flow coefficient $C = 0,895$ was proposed for the range of changes of Reynolds number $Re_D = 100 \dots 1000$. The examples of the simulations of velocity and pressure distribution in the area of the flange were also presented.

Key words: constriction flow-meter, flange with a conical inlet, flow coefficient.