

JANUSZ POSPOLITA\*

## Eksperymentalne badania przepływów płynów potęgowych przez kryzę

### 1. Wstęp

Własności reologiczne wszystkich gazów oraz cieczy i ich roztworów o małej masie cząsteczkowej opisać można w oparciu o koncepcję płynu lepkiego Newtona, czyli płynu, dla którego istnieje prosta proporcjonalność między tensorem naprężeń i tensorem prędkości deformacji. Płyny te zwane są płynami newtonowskimi. Natomiast wszystkie płyny, dla których zależność między tymi wielkościami nie jest linią prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych noszą nazwę płynów nienewtonowskich. Przykładem mogą tutaj być roztwory polimerów, wodne zawiesiny niektórych tlenków, wodne roztwory wapna, klejów, gliny i innych substancji. Rozwój wielu gałęzi przemysłu, w których płyny nienewtonowskie odgrywają podstawową rolę spowodował, że istotnym problemem stał się pomiar strumienia masy takich płynów. Ważna jest również odpowiedź na pytanie w jakim zakresie konwencjonalne przepływomierze, projektowane i wzorcowane dla płynów newtonowskich, wykorzystać można do pomiaru strumienia masy płynu nienewtonowskiego. Jest to zagadnienie mało zbadane. Jego wagę poruszono w monografii Millera (1983), nie podając jednak danych, pozwalających określić wpływ parametrów reologicznych na dodatkowe błędy pomiaru.

Przeprowadzenie własnych badań eksperymentalnych dotyczących przepływu płynów nienewtonowskich przez kryzy podyktowane głównie było niewielką liczbą i fragmentarycznością takich badań w literaturze przedmiotu. Spośród nich wymienić można eksperymentalne prace Bate'a (1967), Gilesa (1969), Shimy (1984) dotyczące przepływów polimerów przez kryzy. Z wymienionych pozycji najbardziej interesujące są przedstawione przez Shimę wyniki pomiarów przepływów roztworów poliakryloamidu kryzami o modułach  $m = 0,6; 0,44$  i  $0,316$ . Wartości liczby przepływu dla polimeru porównano z wartościami  $\alpha$  dla wody. Stwierdzono, że w zakresie przepływów laminarnych liczba  $\alpha$  dla polimeru jest nieco mniejsza niż dla wody, a w zakresie przepływów turbulentnych liczba przepływu jest większa i różnice są tu istotne. Różnice między tymi

\*Dr inż. Janusz POSPOLITA, Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu, ul. Zrzeszenia Studentów Polskich 5, 45-233 Opole

wartościami zmniejszają się wraz ze zmniejszaniem modułu kryzy. W pracy Shimy w zasadzie brak jest interpretacji uzyskanych wyników.

Wyniki uzyskane przez Gilesa (1969), dotyczące przepływów roztworów związków polietylenu przez kryzę, wskazują, że w zakresie przepływów laminarnych liczba  $\alpha$  dla roztworów jest mniejsza niż dla wody i różnice te rosną wraz ze wzrostem stężenia roztworu. Z kolei różnice te maleją wraz ze wzrostem strumienia masy i dla rozwiniętego przepływu turbulentnego praktycznie ich nie ma.

Bate (1967) porównał wartości liczby  $\alpha$  dla tego samego masowego przepływu przez kryzę wody i wodnego roztworu tlenu polietylenu o małym stężeniu. Liczba  $Re$  dla wody zmieniała się w zakresie  $0 \div 2,5 \cdot 10^3$ . Porównanie to wykazało, w przeciwieństwie do Gilesa (1969) i Shimy (1984), że w badanym zakresie zmienności  $M$  liczba przepływu dla polimeru jest większa niż dla wody. Wyniki te trudno jednak odnieść do rezultatów przedstawionych u Gilesa (1969) i Shimy (1984) ze względu na brak u Bate'a (1967) informacji dotyczących zakresu zmienności liczby  $Re$  dla roztworu polimeru.

Bilgen (1973) badał przepływ roztworów tlenu polietylenu i wody przez kryzę wypływową w zakresie liczb  $Re$   $10 \div 1000$ . Stwierdzono, podobnie jak w pracy Gilesa, że liczba przepływu dla roztworów polimeru jest mniejsza niż dla wody (dla tej samej wartości liczby  $Re = UD\rho/\eta$ , gdzie  $\eta$  jest współczynnikiem lepkości dynamicznej przepływającego medium). Przedstawiona przez autora analiza, a także eksperymentalna weryfikacja jej wyników, wykazała, że wartości liczby przepływu należy wyrażać w funkcji liczby Reynoldsa i liczby Weissenberga ujmującej reologiczne własności płynu.

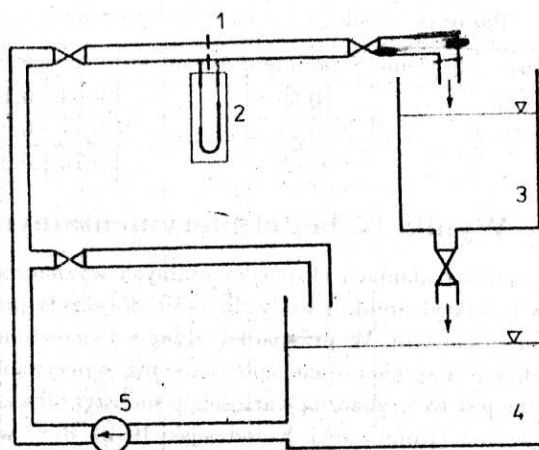
Badania Hasegawy (1979), Hasegawy i in. (1984) oraz Chhabry (1985) dotyczące przepływu roztworów polimerów przez otwory o małej średnicy, mimo że obejmowały stosunkowo szeroki zakres zmian parametrów reologicznych płynu, nie są przydatne z punktu widzenia metrologii przepływów.

Własne badania eksperymentalne stanowią pewne uzupełnienie cytowanych wyników. Obejmują one głównie przepływy laminarne oraz tzw. strefę przejściową. Uzasadnione jest to tym, że spotykane w praktyce ciecze nienewtonowskie posiadają dużą lepkość. Małe wartości liczb Reynoldsa charakteryzujących strumień stanowią także sugestię, aby badaniom poddać zwięźki specjalne zalecane do pomiarów tej klasy przepływów.

## 2. Realizacja badań eksperymentalnych

Badania przeprowadzono w laboratorium mechaniki płynów Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej na stanowisku do wyznaczania charakterystyk przepływomierzy zwężkowych. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1. Badano przepływy przez nieznormalizowane kryzy z przykryzowym pomiarem różnicy ciśnień o modułach 0,2; 0,4 i 0,6 zainstalowane w rurociągu o średnicy  $D = 0,04$  m. Ciśnienie różnicowe mierzono za pomocą manometru różnicowego z rtęcią oraz wodą jako cieczami manometrycznymi. Strumień masy  $M$  wyznaczono metodą objętościową. Następnie ze wzoru:

$$\alpha = \frac{M}{A_o \sqrt{2\rho\Delta p}} \quad (1)$$



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – kryza pomiarowa, 2 – manometr różnicowy, 3 – zbiornik pomiarowy, 4 – zbiornik zasilający, 5 – pompa

w którym  $A_0$  jest powierzchnią otworu kryzy, a  $\rho$  gęstością płynu, określano liczbę przepływu  $\alpha$  kryzy. Pojemność zbiornika pomiarowego, wynosząca  $0,7 \text{ m}^3$  oraz średnio kilkuminutowe czasy jego napełniania pozwalały ze stosunkowo dużą dokładnością wyznaczyć strumień masy. Dokładność pomiaru różnicy ciśnień zależała od mierzonej wartości  $\Delta p$ . Dla kryzy o module  $m = 0,6$ , dla najmniejszych mierzonych wartości strumienia masy błąd pomiaru przyjmował maksymalną, kilkuprocentową wartość. Tłumaczyć to może stosunkowo duży rozrzut wartości  $\alpha$  dla kryzy o tym module dla małych wartości strumienia. Wykorzystane stanowisko posiadało układ przepływowy z pompą, a nie zalecany przy tego typu pomiarach układ ze zbiornikiem grawitacyjnie zapewniającym stały napór cieczy. Jednak przy niezmiennych nastawach zaworów stwierdzono stałość wartości różnicy ciśnień na kryzie oraz powtarzalność wyznaczonych wartości liczby przepływu.

Jako ciecz nienewtonowską wykorzystano dostępny w kraju roztwór wodny polimeru produkowanego na bazie akryloamidu, Rokrysol WF-2. Analizowano przepływy roztworów o różnych stężeniach. Krzywe płynięcia zastosowanych cieczy wyznaczono reometrem rotacyjnym typu Reothest-2 produkcji NRD. Kształt krzywych płynięcia roztworów wskazuje, że są to ciecze rozrzedzane ścinaniem, dla których związek między naprężeniem  $\tau$  i prędkością deformacji  $\dot{\gamma}$  opisać można zależnością potęgową (Astarita, Marrucci 1974), (Wilkinson 1963)

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

Wartości współczynnika konsystencji  $k$  i wykładnika  $n$  badanych roztworów zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Parametry reologiczne badanych roztworów

Roztwór	Stężenie % polimeru w wodzie	$n$	$k \frac{NS^n}{m^2}$
Rokrysol	0,50	0,63	0,174
WF-2	0,25	0,72	0,053
	0,125	0,76	0,020

### 3. Wyniki badań eksperymentalnych

W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych wyznaczono charakterystyki kryz dla roztworów poliakryloamidu i wody. Badania dotyczyły przepływów w zakresie laminarnym i przejściowym. W przypadku płynów nienewtonowskich przepływy laminarne są w praktyce znacznie częściej spotykane niż w przypadku czynników newtonowskich. Związane jest to ze znaczną wartością współczynnika konsystencji szeregu płynów nienewtonowskich (Kombowski, Kołodziejcki 1972), dużo większą niż wartości współczynnika lepkości dynamicznej spotykanych w praktyce płynów newtonowskich. Stwierdzono również (Kombowski, Kołodziejcki 1972), że zakres ruchu przejściowego dla płynów nienewtonowskich jest kilkakrotnie większy niż dla płynów newtonowskich i zależy on również od wartości wykładnika  $n$ .

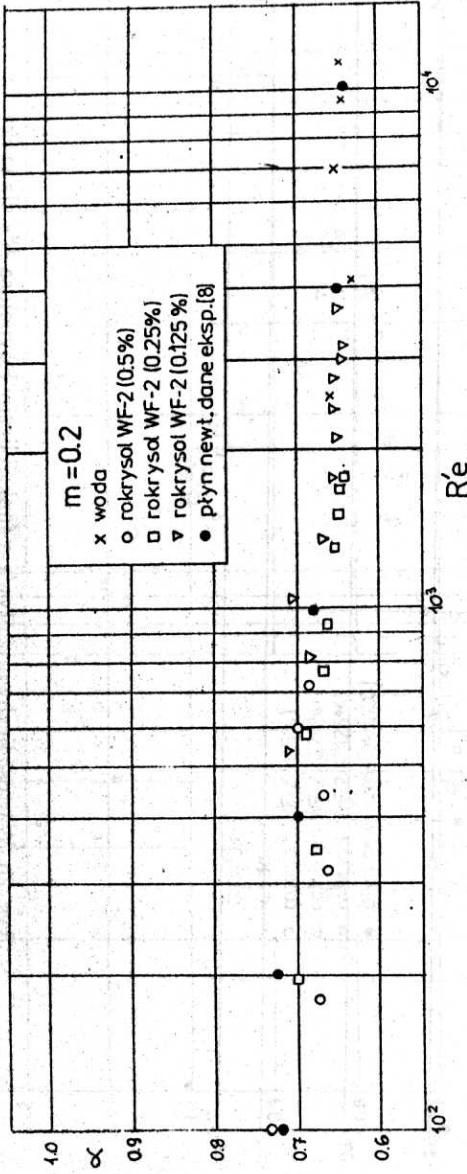
W opracowaniach badań przepływów płynów nienewtonowskich wykorzystuje się różnie zdefiniowane liczby Reynoldsa. Stosuje się także liczbę  $Re$  określoną jak dla płynów newtonowskich z tym, że wprowadza się do tak przyjętej liczby kryterialnej różnicę, umownie definiowany współczynnik lepkości dynamicznej. Szeroki przegląd definicji stosowanych liczb Reynoldsa zawarty jest m. in. w pracy Kombowskiego i Kołodziejckiego (1972). Przy opracowaniu charakterystyk kryz dla badanych roztworów polimerów przyjęto, zalecaną przez Dodge'a i Metznera dla tego typu płynów nienewtonowskich, uogólnioną liczbę Reynoldsa

$$Re = \frac{U^{2-n} D^n \rho}{8^{n-1} k ((3n+1)/4n)^n} \quad (3)$$

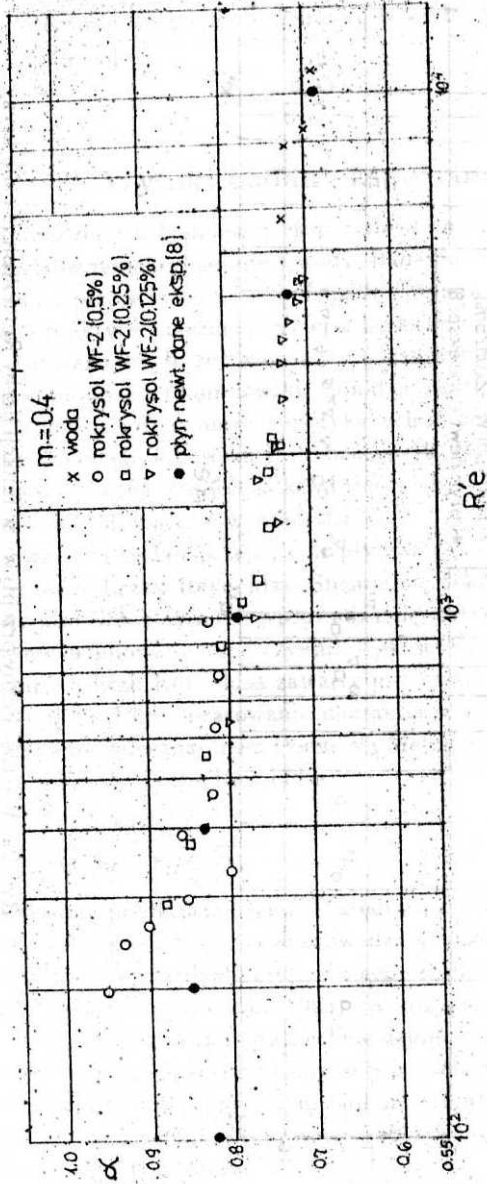
gdzie  $U$  jest średnią prędkością płynu,  $D$  średnicą rurociągu,  $\rho$  gęstością.

Postać tej liczby uzyskać można wprowadzając wzór na współczynnik oporów liniowych dla laminarnego przepływu płynu potęgowego przez kanał o przekroju kołowym, po przyjęciu  $\lambda = 64/Re$  (Wilkinson 1963). W przypadku przepływów płynów newtonowskich ( $n = 1$ )  $Re$  jest równa powszechnie definiowanej liczbie Reynoldsa. Wykonując pomiary stwierdzono znaczne różnice w wartościach liczby przepływu dla poszczególnych badanych czynników, przy tym samym strumieniu masy płynu. Wynikają one głównie stąd, że poszczególne płyny w sposób istotny różnią się wartościami współczynnika konsystencji (lepkością).

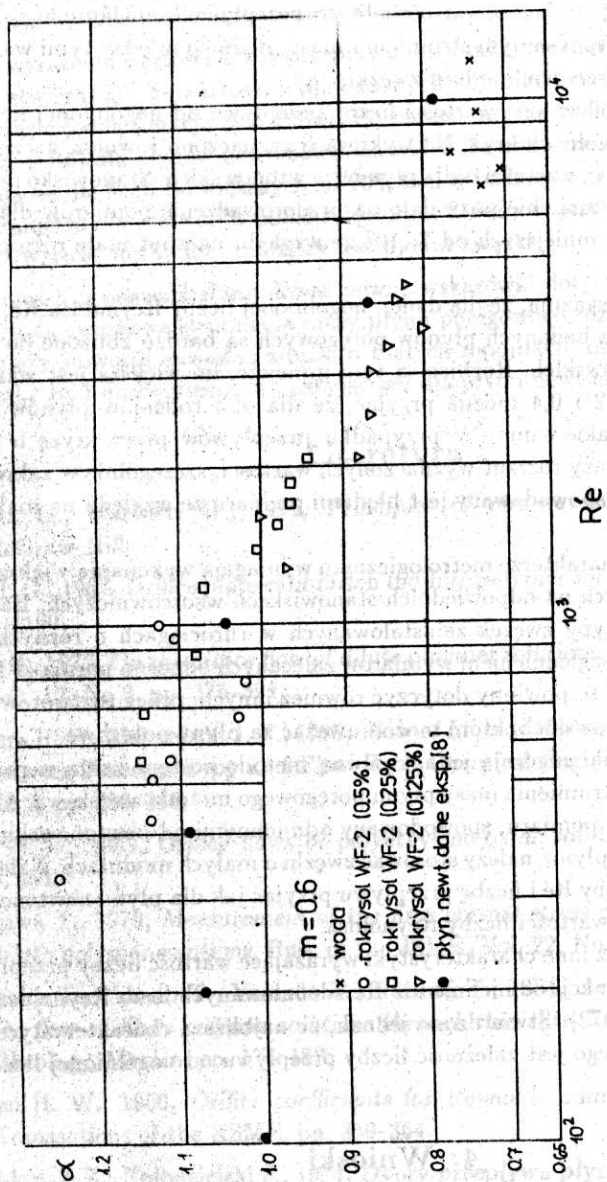
Wyznaczone wartości liczby Reynoldsa  $Re$  wskazują, że dla tego samego strumienia masy, w przypadku wody, przepływ może być turbulentny, zaś w przypadku roztworów Rokrysolu laminarny bądź przejściowy. Zakres zmian liczby przepływu dla wody i rokrysolu wzrasta wraz ze wzrostem modułu zwężki. Wynik ten jest zbieżny z rezultatami pomiarów Shimy (1984), które również dotyczą przepływu wody oraz roztworów



Rys. 2a. Wartość liczby przepływu w funkcji liczby Reynoldsa  $Re$  dla krzyży o module  $m = 0.2$



Rys. 2b. Wartość liczby przepływu w funkcji liczby Reynoldsa  $Re$  dla kryży o module  $m = 0.4$



Rys. 2c. Wartość liczby przepływu w funkcji liczby Reynoldsa  $Re$  dla kryzy o module  $m = 0.6$

poliakryloamidu. Zarówno w jednym, jak i w drugim przypadku turbulentny przepływ wody charakteryzuje się mniejszą wartością liczby przepływu  $\alpha$  niż laminarny przepływ poliakryloamidu przy tym samym strumieniu masy. Różnice między tymi wartościami maleją wraz ze zmniejszeniem modułu zwężki.

Na rys. 2a, b, c uzależniono wartości liczby przepływu od uogólnionej liczby Reynoldsa  $Re$  dla poszczególnych kryz. Na wykresach zaznaczono również, zaczerpnięte z literatury (Iversen 1956), wartości  $\alpha$  dla płynów newtonowskich. Stanowisko pomiarowe wykorzystane przez autora, nie pozwalało na przeprowadzenie pomiarów dla wody w zakresie liczb  $Re$  ( $Re$ ) mniejszych od  $7 \cdot 10^3$  ze względu na zbyt małe różnice ciśnień na kryzach.

Wykresy 2a, b, c wskazują, że dla danej, uogólnionej liczby Reynoldsa  $Re$ , wartości liczby przepływu  $\alpha$  dla badanych płynów potęgowych są bardzo zbliżone do wartości  $\alpha$  dla płynów newtonowskich. Różnice są tym mniejsze, im większa jest wartość  $Re$ . Dla modułów  $m = 0,2$  i  $0,4$  można przyjąć, że dla obu rodzajów płynów wartości liczby przepływu są takie same. W przypadku przepływów przez kryzę o module  $m = 0,6$ , stosunkowo duży rozrzut wyznaczonych wartości, szczególnie w zakresie liczb  $Re$  mniejszych od  $10^3$ , spowodowany jest błędami pomiaru ze względu na małe spadki ciśnienia na kryzie.

Szersze wnioski o charakterze metrologicznym wymagają wykonania większej liczby badań przeprowadzonych na odpowiednich stanowiskach wzorcowniczych. Badania te powinny objąć różne typy zwęzek zainstalowanych w rurociągach o różnych średnicach ze szczególnym uwzględnieniem wymiarów zalecanych odnośną normą (PN-65/M-53950, 1966). Badania te powinny dotyczyć również innych, prócz roztworów polimerów, płynów nienewtonowskich, które można uważać za płyny potęgowe.

Przedstawione wyniki sugerują jednak pewną metodę postępowania w przypadku konieczności pomiaru strumienia masy płynu potęgowego metodą zwężkową. Aby ograniczyć dodatkowy błąd pomiaru, spowodowany odmiennymi od newtonowskich reologicznymi własnościami płynu, należy stosować zwężki o małych modułach. Należy oszacować zakres zmian liczby  $Re$  i liczbę przepływu przyjmując jak dla płynu newtonowskiego w powyższym zakresie wartości liczby Reynoldsa.

Analizowano również inne charakterystyki wyrażające wartość liczby przepływu dla płynu potęgowego w funkcji odmiennie niż  $Re$  zdefiniowanych liczb Reynoldsa (Kombowski, Kołodziejski 1972). Stwierdzono jednak, że najbliższą charakterystyce zwężki dla płynu newtonowskiego jest zależność liczby przepływu od uogólnionej liczby Reynoldsa (3).

#### 4. Wnioski

Zrealizowane badania eksperymentalne pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- a) Dla tego samego strumienia masy wody i roztworów polimerów (płynów nienewtonowskich potęgowych rozrzedzanych ścinaniem) występują różnice w wartościach liczby przepływu. Liczba przepływu ma większą wartość dla roztworu polimeru.



Różnica ta jest tym większa, im większy jest moduł zwężki oraz stężenie roztworu; maleje wraz ze wzrostem strumienia masy.

- b) Po wyrażeniu wartości liczby przepływu  $\alpha$  w funkcji uogólnionej liczby Reynoldsa  $Re$  stwierdzono, że wartości  $\alpha$  dla badanych czynników o różnym stężeniu można wyrazić jedną funkcją  $\alpha = f(Re)$ . Po naniesieniu na tych wykresach zależności  $\alpha = f(Re)$  dla płynów newtonowskich widać, że oba przebiegi w zasadzie pokrywają się dla liczb  $Re$  większych od 200, tzn. w badanym zakresie zmienności tego parametru dla roztworów poliakryloamidu. Zbieżność jest tym lepsza, im wyższa jest wartość liczby  $Re$  i mniejszy jest moduł zwężki.
- c) Wniosek b pozwala sformułować pewne wskazówki dotyczące sposobu pomiaru metodą zwężkową strumienia masy płynu potęgowego rozrzedzonego ścinaniem. Należy wówczas stosować zwężki o małych modułach, oszacować zakres zmian liczby  $Re$  i liczbę przepływu przyjmując jak dla płynu newtonowskiego.

### Literatura

- Astarita G., Marrucci G., 1974, *Principles of non-newtonian fluid mechanics*, McGraw-Hill.
- Bate H. G., 1967, *Orifice plate calibration indilute polymer solution*, Nature, Vol. 216, p. 1100.
- Bilgen E., 1973, *On the orifice flow of dilute polymer solutions*, Journal de Mécanique, Vol. 12, No 3, pp. 375-391.
- Chhabra R. P., Richardson J. F., 1985, *Flow of Liquids through Screens: Relationship between Pressure Drop and Flow Rate*, Chemical Engineering Science, Vol. 40, No 2, pp. 313-316.
- Giles W. B., 1969, *Orifice flows of polyethylene oxide solutions*, Nature, Vol. 224, p. 584.
- Hasegawa T., 1979, *Measurement of the first normal stress differences of water and dilute polymer solutions*, Bull. of the JSME, Vol. 22, No 163, pp. 54-62.
- Hasegawa T., Takano T., Yamada T., Narumi T., 1984, *An experimental study of the flow of dilute polymer solutions through thin slits*, Proc. IX Int. Congress on Rheology, Mexico, pp. 175-182.
- Iversen H. W., 1956, *Orifice coefficients for Reynolds numbers from 4 to 50 000*, Transactions of the ASME, pp. 359-364.
- Kemblowski Z., Kołodziejaki J., 1974, *Opory przepływu płynów nienewtonowskich w ruchu przejściowym i burzliwym*, Inżynieria Chemiczna, s. 603-629.
- Miller R. W., 1983, *Flow measurement engineering handbook*, McGraw-Hill Company, New York.
- PN-65/M-53950 *Pomiar natężenia przepływu płynów za pomocą zwężek*, 1966, Wyd. Normalizacyjne, Warszawa.

Shima N., 1984, *Loss and discharge characteristics of a flow of polymer solutions through pipe orifices*, Bull. of the JSME, Vol. 27, No 225, pp. 443-449.

Wilkinson W. L., 1963, *Ciecze nienewtonowskie*, WNT, Warszawa.

### Summary

In the paper the results of experiments on flows of the power-law fluid, diluted by shearing, through the non-standard orifices with moduli  $m = 0.2, 0.4$  and  $0.6$  have been presented. Water solutions (with various concentrations) of a polymer produced on the basis of acrylamide Rokrysol WF-2 were used as non-Newtonian fluids. Values of the discharge coefficient for the orifices have been determined and compared with values of  $\alpha$  for the flow of water while the same mass flux. It has been found that the values of the flow number for the polymer solutions are bigger than those for water and the differences are more visible when concentrations of solution and modulus of the orifice are bigger. The values of the discharge coefficient have been also presented for particular fluids versus the generalized Reynolds number. It has been found that those characteristics are generally the same for the examined media with different concentrations and water for  $m = 0.2$  and  $m = 0.4$ . Some conclusions of metrological type have been formulated.