

Łukasz MIKA

e-mail: mikaluk@mech.pk.edu.pl

Zakład Chłodziwa i Klimatyzacji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

Badania współczynnika strat miejscowych podczas przepływu zawiesiny lodowej przez nagłe zwężenie rury

Wstęp

Zawiesina lodowa jest to mieszanina cieczy nośnej (bazowej) oraz drobinek lodu o wymiarach do 0,5 mm. Wykorzystywana jest ona jako ekologiczne chłodziwo, stosowane w pośrednich układach chłodzenia w przemyśle spożywczym, chemicznym i technice klimatyzacyjnej. Zawiesina lodowa ma wiele zalet jak np.: obojętność dla środowiska, doskonałe właściwości cieplne (duża pojemność cieplna, współczynnik przewodzenia ciepła oraz właściwa wydajność cieplna). Może być ona wykorzystywana jako czynnik bezpośrednio chłodzący lub czynnik w którym akumulowane jest „zimno”. Jej właściwości przepływowe zależą przede wszystkim od udziału drobinek lodu.

W obliczeniach hydraulicznych instalacji z zawiesiną lodową, ze względu na brak badań doświadczalnych w tym zakresie, dużym problemem jest wyznaczenie współczynnika strat miejscowych.

W instalacjach z tradycyjnymi chłodziwami (np. woda czy glikole) wyznaczenie strat energetycznych wywołanych oporami miejscowymi polega na dobieraniu wartości współczynnika strat miejscowych z literatury. Kryterium takiego doboru stanowi geometria danego oporu. Zależności do obliczania wartości współczynników strat miejscowych tradycyjnych chłodziw zostały wyznaczone dzięki badaniom doświadczalnym ze względu na skomplikowany charakter zjawisk towarzyszących takiemu przepływowi. Dla zawiesiny lodowej w literaturze brakuje wyników takich badań doświadczalnych i dlatego trudno jest wyznaczyć teoretyczną wartość współczynnika strat miejscowych na poszczególnych elementach armatury.

Celem niniejszej pracy przedstawiono jest przedstawienie oryginalnych wyników badań doświadczalnych współczynnika strat miejscowych dla zawiesiny lodowej, o udziałach drobinek lodu 5–30%, podczas przepływu przez nagłe zwężenie rury (redukcja średnicy). Badaniom doświadczalnym podano kilka wariantów najczęściej spotykanych redukcji rury miedzianej.

Metodyka badań

Dla cieczy newtonowskich decydujący wpływ na wartość współczynnika strat miejscowych ma struktura przepływu za nagłym zwężeniem rury. Struga cieczy ulega tam dodatkowemu przewężeniu (kontrakcji) i dopiero później wypełnia cały przekrój rury. Struktura przepływu jest dość skomplikowana i trudna do opisu głównie ze względu na występujące w niej strefy przepływów powrotnych. Dla uproszczenia przyjmuje się, że straty miejscowe są powodowane głównie przez zmiany struktury przepływającej strugi cieczy (w praktyce przez zmianę geometrii rury). Dzięki temu uniezależnia się obliczeniowy współczynnik strat miejscowych od liczby *Reynoldsa*. Nie jest to zgodne z wynikami badań tego współczynnika, którego doświadczalna wartość zależy od liczby *Reynoldsa* (przy niskich jej wartościach).

W większości wypadków zawiesina lodowa traktowana jest w literaturze jak ciecz nienewtonowska o tłokowej strukturze przepływu (płyn *Bingham*). Jak pokazują poprzednie prace autora [1], mieszanina ta podczas przepływu w rurociągu zachowuje się inaczej niż tradycyjnie stosowane chłodziwa – charakteryzuje się innymi wartościami oporów przepływu na tym samym rurociągu.

Stanowisko badawcze, na którym wykonywane były badania doświadczalne współczynnika strat miejscowych podczas przepływu przez nagłe zwężenie rury, w układzie poziomym, składało się z: wytwornicy

lodu zawieszinowego wraz ze zbiornikiem i mieszadłami, odpowiedniej długości odcinków pomiarowych (zapewniających stabilizację profili prędkości), przepływomierza masowego (mierzący przepływ, a także gęstość przepływającej zawiesiny lodowej), czujników różnicy ciśnień z przetwornikami oraz termometrów. W przypadku zawiesiny lodowej należało jeszcze kontrolować na bieżąco udziały drobinek lodu.

W dotychczas przeprowadzonych, własnych badaniach doświadczalnych służących do wyznaczenia współczynników strat miejscowych wykorzystano następujące redukcje średnicy miedzianego rurociągu: 28/22 mm, 28/18 mm, 28/15 mm, 22/18 mm, 22/15 mm oraz 18/15 mm. W badaniach udziały masowe drobinek lodu w poszczególnych mieszaninach wynosiły: 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30%.

Do wyznaczenia liczby *Reynoldsa* dla płynu *Binghama* (w zakresie 200÷9000) posłużono się wyznaczoną doświadczalnie zależnością na lepkość plastyczną [2]:

$$\mu_p = 0,0035 + 0,0644 \alpha_i - 0,7394 \alpha_i^2 + 5,6963 \alpha_i^3 - 19,759 \alpha_i^4 + 26,732 \alpha_i^5, \quad (1)$$

gdzie: α_i – udział drobinek lodu [–].

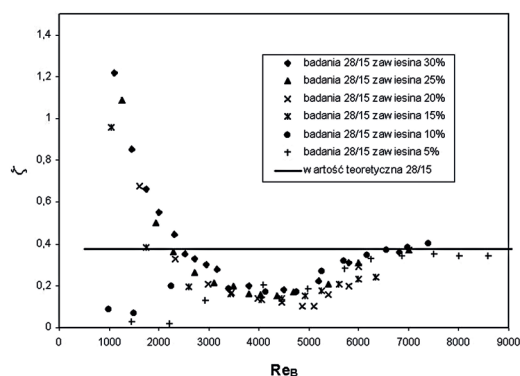
Na tak przygotowanym stanowisku badawczym można zmierzyć wspólne opory przepływu na nagłym zwężeniu rury i znacznej długości odcinkach prostych obu rur. Aby wyznaczyć współczynniki strat miejscowych na nagłym zwężeniu rury należy odliczyć wartość oporów przepływu na prostych odcinkach obu rur oraz uwzględnić także wpływ zmiany prędkości medium, które za redukcją przyspiesza.

Współczynniki strat miejscowych

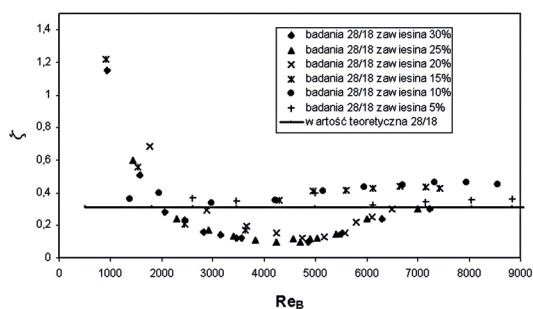
Na rys. 1–6 przedstawiono porównanie wyników badań współczynnika strat miejscowych zawiesiny lodowej podczas przepływu przez sześć różnych, nagłych zwężeń rury z wynikami obliczeń teoretycznych tego współczynnika według zależności [3, 4]:

$$\zeta = 0,5 \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right), \quad (2)$$

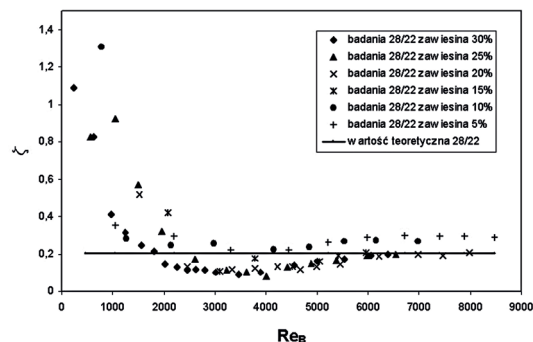
Na rys. 1–6 widać, że podczas przepływu przez nagłe zwężenie rury inaczej niż pozostałe zachowują się zawiesiny lodowe o niższym udziale drobinek lodu (zawiesiny o udziałach 5%, 10%, 15%). Charakteryzują się one nieco większym współczynnikiem strat miejscowych niż



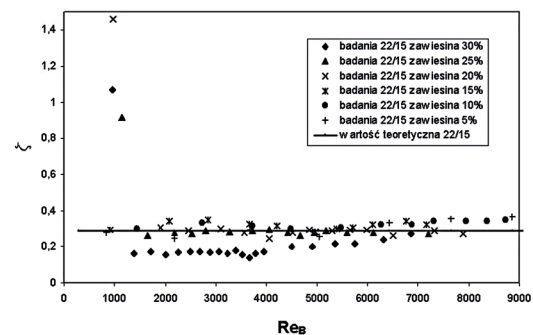
Rys. 1. Zależność współczynnika strat miejscowych od liczby *Reynoldsa* dla zawiesiny lodowej traktowanej jako płyn *Bingham* na nagłym zwężeniu rury (28/15)



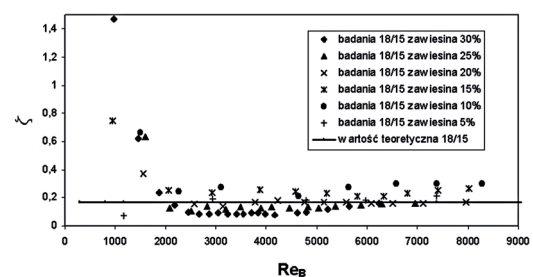
Rys. 2. Zależność współczynnika strat miejscowych od liczby Reynoldsa dla zawiesiny lodowej traktowanej jako płyn Bingham na nagłym zwężeniu rury (28/18)



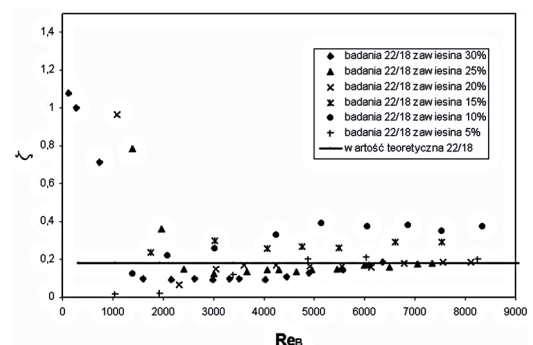
Rys. 3. Zależność współczynnika strat miejscowych od liczby Reynoldsa dla zawiesiny lodowej traktowanej jako płyn Bingham na nagłym zwężeniu rury (28/22)



Rys. 4. Zależność współczynnika strat miejscowych od liczby Reynoldsa dla zawiesiny lodowej traktowanej jako płyn Bingham na nagłym zwężeniu rury (22/15)



Rys. 5. Zależność współczynnika strat miejscowych od liczby Reynoldsa dla zawiesiny lodowej traktowanej jako płyn Bingham na nagłym zwężeniu rury (18/15)



Rys. 6. Zależność współczynnika strat miejscowych od liczby Reynoldsa dla płynu Bingham na nagłym zwężeniu rury (22/18)

wynikałoby z obliczeń teoretycznych według zależności (2) (wartość teoretyczna). Należy tutaj zaznaczyć, że zależność ta daje nieco zawyżone wartości współczynnika strat miejscowych np. w odniesieniu do rzeczywistych współczynników strat miejscowych dla wody (o kilkanaście procent) [4]. Wyjątkiem od tej reguły jest przedstawiona na rys. 1 redukcja 28/15. Dla tego zwężenia wszystkie zawiesiny w przedziale liczby Reynoldsa od 2400–6300 zachowują się w podobny sposób. Dla liczby Reynoldsa poniżej 2400 zawiesiny 5, 10, 15% zachowują się podobnie jak tradycyjnie stosowane chłodziwa np. woda [4].

Dla zawiesin o niskiej zawartości drobinek lodu można również zauważyć, że wartość doświadczalnego współczynnika strat miejscowych zaczyna się stabilizować od wartości liczby Reynoldsa dla płynu Bingham między 5000–5500. Poniżej tej wartości liczby Reynoldsa (wartość graniczna) współczynnik strat miejscowych waha się. Poniżej wartości granicznej liczby Reynoldsa współczynnik strat miejscowych jest zależny od wartości tej liczby.

Zawiesiny o udziałach 20% i więcej wykazują bardzo duże wartości współczynników strat miejscowych dla niskich wartości liczby Reynoldsa (do około $Re = 2000$). W tym zakresie liczby Reynoldsa współczynnik ten może osiągać wartość nawet powyżej 2 i więcej. Jest to więc nawet kilkanaście razy więcej niż wartość teoretyczna obliczona zależnością (2) (np. dla wody). Jest to zakres niepolecany dla zawiesiny lodowej.

Dla liczby Reynoldsa około 2000 współczynnik strat miejscowych zbliża się do wartości teoretycznej, a następnie osiąga wartości niższe niż obliczone zależnością (2). Dla zawiesiny o udziale drobinek lodu 30% i liczby Reynoldsa między 3500–4500 osiąga nawet około 2 razy niższą wartość niż uzyskana z obliczeń teoretycznych.

Zawiesiny o zawartości drobinek lodu 20, 25 i 30% podczas przepływu przez nagłe zwężenie rury w zakresie liczby Reynoldsa 2000–6000 wykazują niższe wartości współczynnika strat miejscowych niż wartości teoretyczne, obliczane zależnością (2).

Wnioski

Przepływ zawiesiny lodowej przez nagłe zwężenie rury jest dość skomplikowanym do opisu zjawiskiem, na które wpływ ma nie tylko geometria samego zwężenia, zawartość drobinek lodu w mieszaninie, ale także liczba Reynoldsa.

Zachowanie poszczególnej zawiesiny lodowej podczas przepływu przez nagłe zwężenia można uogólnić dzieląc ją na dwie grupy. Podobny charakter zmian współczynnika strat miejscowych wykazują zawiesiny 5, 10, 15% oraz 20, 25, 30%. Wyjątkiem jest zwężenie 28/15, gdzie wszystkie zawiesiny zachowują się podobnie.

Rzeczywista wartość współczynnika strat miejscowych dla zawiesiny lodowej 20, 25, 30% może znacznie odbiegać od wartości teoretycznej. Może być ona od niej nawet kilkakrotnie razy większa dla liczby Reynoldsa poniżej 2000.

Zawiesiny o zawartości drobinek lodu 20, 25 i 30% w zakresie liczby Reynoldsa 2000–6000 wykazują niższe rzeczywiste wartości współczynnika strat miejscowych niż wartości teoretyczne (zawiesina 30% nawet 2 razy niższe dla liczby Reynoldsa między 3500–4500).

LITERATURA

- [1] *L. Mika*: Inż. Ap. Chem. **48**, nr 6, 123 (2009).
- [2] *B. Niezgoda-Zelasko*: Wymiana ciepła i opory przepływu zawiesiny lodowej w przewodach. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
- [3] *C. Grabarczyk*: Przepływ cieczy w przewodach. Metody obliczeniowe. Envirotech, Poznań 1997.
- [4] *W. Wędrychowicz, K. Jeżowiecka-Kabsh, A. Grigoriev, K. Strzelecka*: Ochr. Środow. nr 3 (2006).

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008–2010 jako projekt badawczy.