MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-M/2012
ZESZYT 6
ROK 109
ISSUE 6
YEAR 109

ŁUKASZ MIKA[1]

OPORY PRZEPŁYWU ZAWIESINY LODOWEJ W ZWĘŻENIACH

FLOW RESIST OF THE SLURRY ICE IN CONTRACTIONS

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań przepływu zawiesiny lodowej w zwężeniach. W badaniach wykorzystano dwa zwężenia miedzianego rurociągu o stosunku średnic 0,650 oraz 0,800. Udziały masowe drobinek lodu w zawiesinie wynosiły w badaniach od 5 do 30%. Wyniki badań doświadczalnych potwierdziły, że współczynniki strat miejscowych zawiesiny lodowej w zakresie turbulentnym są zbliżone do wartości współczynników strat miejscowych dla cieczy Newtonowskich.

Słowa kluczowe: przepływ zawiesiny lodowej, ciecz nienewtonowska, płyn Binghama

Abstract

The paper presents the results of the experimental research on the ice slurry flow resist during its flow through sudden contractions. Experimental studies were conducted using two contractions of copper pipes. Two contraction ratios were covered: 0,650 and 0,800. In the experimental research, the mass fraction of solid particles in the slurry ranged from 5 to 30%. The results of experimental investigations confirmed that the loss coefficients in contractions in turbulent (transitional) flow of the ice slurry are the same as in the case of Newtonian liquids.

Keywords: slurry ice flow, non-newtonian liquid, Bingham liquid

[1] Dr inż. Łukasz Mika, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Szkodliwe oddziaływanie na środowisko naturalne niektórych stosowanych powszechnie w chłodnictwie i klimatyzacji czynników ziębniczych wymusza poszukiwanie czynników nowych, które nie wpływałyby destrukcyjnie na warstwę ozonową oraz nie zwiększałyby tzw. efektu cieplarnianego. Coraz częściej stosowane są naturalne czynniki chłodnicze jak: amoniak, dwutlenek węgla, węglowodory czy woda (lub jej roztwory).

Zawiesina lodowa należy do takich ekologicznych chłodziw, stosowanych w pośrednich systemach chłodzenia. Jest to mieszanina cieczy bazowej oraz drobinek lodu o wymiarach do 0,5 mm. Dzięki takim zaletom tego chłodziwa jak obojętność dla środowiska, doskonałe właściwości cieplne może być ono wykorzystywane jako czynnik bezpośrednio chłodzący lub czynnik w którym akumulowane jest zimno. Systemy wykorzystujące zawiesinę lodową zaczęły powstawać od początku lat osiemdziesiątych między innymi w Niemczech, Szwajcarii, Austrii, Kolumbii i Singapurze. Obecnie chłodziwo to jest najczęściej wykorzystywane do procesowania powietrza przepływającego w instalacjach klimatyzacyjnych różnych budynków oraz w systemach chłodzących powietrze w kopalniach. Jest ono również spotykane w supermarketach, jako chłodziwo szaf i lad chłodniczych oraz komór chłodniczych do przechowywania żywności. Zawiesina lodowa także może być stosowana w przemyśle petrochemicznym, technice medycznej i pożarniczej.

W literaturze pojawiają się już publikacje dotyczące oporów tarcia zawiesiny lodowej w prostych odcinkach rurociągu o różnych przekrojach, oporach tarcia w przewodach szczelinowych czy oporach miejscowych w łukach i kolanach o przekroju okrągłym [5]. Wyników badań pozostałej części armatury takiej jak: zawory kulowe, grzybkowe i regulacyjne, redukcje, trójniki oraz rozdzielacze w literaturze brakuje.

2. Metodyka badań doświadczalnych

Schemat stanowiska badawczego do badania przepływu zawiesiny lodowej przez zwężenia przedstawiono na rys. 1. Przygotowanie serii pomiarowej wymaga przygotowania stanowiska badawczego, polegającego na montażu badanego elementu wraz z odcinkami prostymi (16) (rozbiegowymi) o długości 4.9m oraz uzbrojenia go w wymienne przyrządy pomiarowe. Całość przygotowań kończy wytworzenie w wytwornicy zawiesiny lodowej (2) oraz zgromadzenie w zbiorniku akumulacyjnym (4) zawiesiny lodowej o odpowiednim udziale drobinek lodu, które trwa od kilku do kilkudziesięciu godzin.

Podstawowa regulacja strumienia masy (prędkości przepływu) czynnika w odcinku pomiarowym stanowiska może być dokonywana poprzez obejście (12) (by-pass) usytuowane bezpośrednio za zespołem pompowym lub poprzez falownik (6) napędu pompy (5). Kolejna regulacja prędkości (strumienia masy) możliwa jest poprzez drugi by-pass, wydłużający lub skracający drogę przepływu lodu zawiesinowego w instalacji pomiarowej.

Pomiar temperatury zawiesiny oparty był na precyzyjnych czujnikach oporowych Pt 100 firmy HART SCIENTIFIC, umieszczonych w tulejach termometrycznych (11).

Pomiary ciśnień i różnicy ciśnień, służące do wyznaczania oporów przepływu, wykonywane były miernikami firmy FUJI ELECTRIC o różnych zakresach pomiarowych. Ze względu na właściwości lodu zawiesinowego zdecydowano się na pomiar ciśnienia

w instalacji, poprzez króćce impulsowe o średnicy 4 mm (13) z zastosowaniem nieizolowanych, przezroczystych przewodów impulsowych.

Strumień masy zawiesiny lodowej mierzono przepływomierzami masowymi typu MASSFLO firmy Danfoss (Siemens) (7), które dodatkowo mierzą w sposób ciągły gęstość przepływającego medium. Zestawienie ważniejszych przyrządów użytych w badaniach doświadczalnych podano w tabeli 1.

Tabela 1

Wykaz ważniejszych przyrządów pomiarowych

Przyrząd	Typ	Zakres pomiarowy	Dokładność (odczyt bezpośredni)
Przetworniki ciśnienia	FUJI ELECTRIC seria FKC(G)V	0 - 1 kPa 0 - 6 kPa 0 - 32 kPa 0 - 130 kPa	0,07 %
Czujniki temperatury	HART SCIENTIFIC Pt100	–100 - 100 °C	0,018 °C
Masowy miernik przepływu	SIEMENS MASSFLO 2100	0 - 52000 kg/h 0,1 - 2,9 g/cm^3	0,1 % 0,0005 g/cm^3

Badania eksperymentalne dotyczyły przepływu zawiesiny lodowej o udziale drobinek lodu: 30%, 25%, 20%, 15%, 10% i 5%, wykonanej na bazie 10,6% wodnego roztworu alkoholu etylowego. Zawiesina lodowa o żądanym udziale drobinek lodu została każdorazowo przygotowywana w zasobniku lodu, gdzie była też nieustannie mieszana za pomocą mieszadła (3).

Aby uniknąć przepływu heterogenicznego, minimalna prędkość zawiesiny lodowej w badaniach doświadczalnych wynosiła od 0,15 m/s do 0,25 m/s, w zależności od średnicy rury i zawartości drobinek lodu [1], [3], [6].

Strumień masy, gęstość zawiesiny lodowej oraz udział drobinek lodu były kontrolowane przed i za badanym elementem, aby uniknąć pozostawania drobinek w części pomiarowej stanowiska oraz kontrolować brak wytapiania się drobinek lodu.

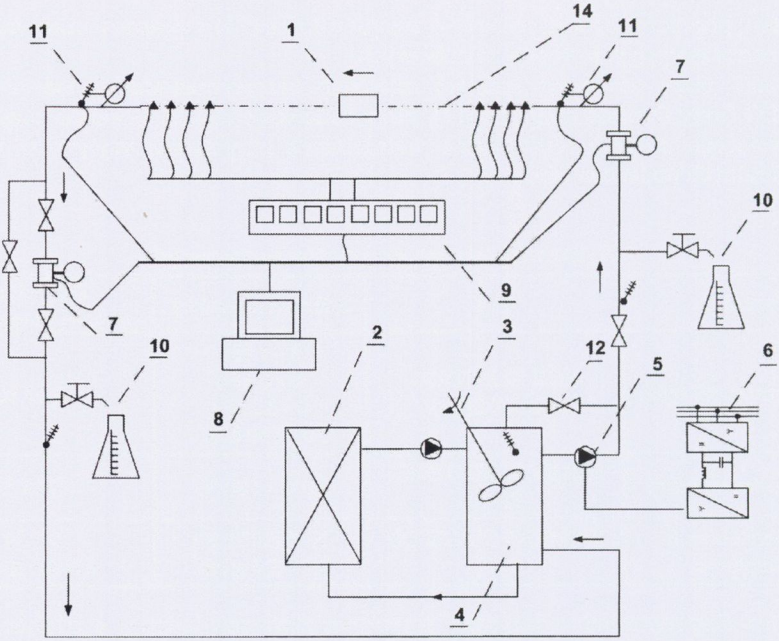
Pomiaru dokonywano pośrednio, poprzez komputerowy system akwizycji danych (8). System akwizycji danych oparty był o moduły IDAM 7000 o dokładności 0,5%.

Badaniami doświadczalnymi objęto przepływ zawiesiny lodowej przez 2 zwężenia uskokowe o oznaczeniu i wymiarach podanych w tabeli 2.

Tabela 2

Podstawowe dane geometryczne badanych zwężeń i rozszerzeń

Zwężenie uskokowe (oznaczenie)	22/18	22/15
Stosunek średnic, β	0,800	0,650
Mniejsza średnica wewnętrzna [mm]	16	13
Większa średnica wewnętrzna [mm]	20	20



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – badane zwężenia, 2 – wytwornica lodu zawiesinowego, 3 – mieszadło, 4 – zasobnik, 5 – zespół pomp, 6 – falownik, 7 – przepływomierz masowy, 8 – system akwizycji, 9 – zespół pomiarowy ciśnienia i różnicy ciśnienia, 10 – kontrola udziału lodu, 11 – pomiar temperatury i ciśnienia, 12 – regulacja obejściowa, 13 – króciec pomiarowy ciśnienia, 14 – odłączalne sekcje pomiarowe stanowiska

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental test stand: 1 – contraction, 2 – ice slurry generator, 3 – mixer, 4 – storage tank, 5 – main pump, 6 – main pump inverter, 7 - mass flow-meter, 8 – data collecting, 9 – multipoint measurement of pressure, 10 – control of ice fraction, 11 - measurement of temperature and pressure, 12 – bypass, 13 – pressure measurement stub, 14 – removable section of test the stand

Podczas wykonywania badań oporów miejscowych wyznaczono również opory tarcia w rurach prostych o średnicach wewnętrznych: ϕ13 mm, ϕ16 mm i ϕ20 mm.

Udział masowy lodu wyznaczono na podstawie pomiarów dwóch wielkości mierzonych równocześnie w sposób ciągły. Były to pomiary temperatury i gęstości mieszaniny, którą odczytywano przepływomierzem masowym. Warunkiem poprawności pomiaru było otrzymanie jednakowych gęstości mieszaniny uzyskanych za pomocą przepływomierza i poprzez pomiar temperatury. Przy wyznaczaniu zawartości drobinek lodu za pomocą pomiaru temperatury wykorzystano krzywą zamarzania roztworu według Melindera [4]. Zawartość lodu wyznaczona tymi metodami w całym zakresie badań nie różniła się o więcej niż o 2%.

3. Metodyka wyznaczania oporów przepływu w zwężeniu

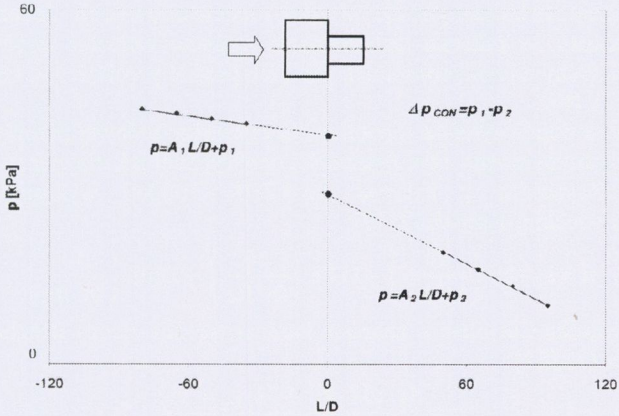
Ze względu na kłopotliwy oraz wprowadzający zakłócenia do przepływu zawiesiny lodowej pomiar ciśnienia dynamicznego, przyjęto w pracy metodę wyznaczania oporów w przepływie zawiesiny lodowej opartą o pomiar ciśnienia statycznego. Znajomość różnicy ciśnienia statycznego pozwala na wyznaczenie, w oparciu o współczynniki Coriolisa, współczynników strat miejscowych. Znając wartości tych współczynników oraz gęstość zawiesiny lodowej, można dla dowolnej wartości prędkości przepływu, wyznaczyć miejscowe opory przepływu tej zawiesiny.

W związku z zastosowaną metodą badawczą wyznaczano również opory tarcia w rurach prostych o średnicach wewnętrznych: ϕ13 mm, ϕ16 mm oraz ϕ20 mm. Do pomiarów zmierzających do wyznaczenia oporów przepływu w zwężeniu i rozszerzeniu rurociągu, wykorzystano metodę polegającą na pomiarze ciśnienia statycznego (oraz kontrolnie różnic ciśnienia statycznego w wybranych punktach pomiarowych np. przy niskim gradiencie ciśnienia statycznego) wzdłuż przepływu zawiesiny lodowej przez cały odcinek pomiarowy [2]. W skład odcinka pomiarowego wchodzi badany element, dla którego mają być wyznaczone opory miejscowe oraz wydłużone odcinki rozbiegowe (uzyskanie w pełni rozwiniętego profilu prędkości). Na wydłużonych odcinkach prostych znajdują się niewielkie króćce do pomiaru ciśnienia statycznego wzdłuż przepływu zawiesiny lodowej.

Użyta w pracy metoda polega na ekstrapolacji w pełni rozwiniętego gradientu ciśnienia do miejsca zainstalowania badanego elementu, oddzielnie po obu stronach tego elementu.

Na podstawie informacji zebranych w próbnej serii pomiarowej, zamontowano króćce pomiarowe ciśnienia statycznego na odcinku pomiarowym w następujących odległościach:

- przed badanym elementem: 80D, 65D, 50D i 35D,
- za badanym elementem: 95D, 80D, 65D oraz 50D.



Rys. 2. Schemat ideowy obliczeń spadku ciśnienia w zwężeniu

Fig. 2. Schematic diagram of pressure loss calculation in contraction

Dla tak przygotowanej sekcji pomiarowej zamontowanej na stanowisku badawczym, dokonano pomiarów dwóch zwężeń uskokowych. Schemat ideowy obliczeń spadku ciśnienia w zwężeniu został przedstawiony na rys. 2.

Po wykonaniu wszystkich badań doświadczalnych i wyznaczeniu rozkładów ciśnienia statycznego kolejnymi krokami w obliczeniach były [2]:

- analiza otrzymanych wyników badań ciśnienia statycznego i ewentualne odrzucenie danych uzyskanych z punktów pomiarowych, gdzie profil prędkości nie był w pełni ukształtowany,
- wyznaczenie, na podstawie aproksymacji wyników badań, punktu przecięcia charakterystyki ciśnienia statycznego z osią rzędnych przed i za badanym elementem (rys. 2),
- obliczenie wartości ciśnienia statycznego w miejscu instalacji badanego elementu po obu jego stronach, a stąd spadku ciśnienia na tym elemencie (rys. 2),
- wyznaczenie współczynnika strat miejscowych dla badanego elementu przy wykorzystaniu wyznaczonego wcześniej spadku ciśnienia oraz zależności (1) dla zwężeń uskokowych:

$$k = \frac{2\Delta p}{\rho V_2^2} - \alpha_2 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{V_2^2} \tag{1}$$

gdzie, indeksy 1 i 2 odnoszą się do strumienia zawiesiny przed i za badanym elementem.

3.1. Współczynnik Coriolisa dla przepływu zawiesiny lodowej

Do wyznaczenia współczynnika strat miejscowych w elementach, w których następuje zmiana prędkości przepływu konieczna jest znajomość współczynnika Coriolisa w zakresie laminarnym i turbulentnym po obu stronach badanego elementu.

W literaturze trudno znaleźć sprawdzone korelacje do wyznaczania współczynnika Coriolisa w zakresie turbulentnym dla płynów nienewtonowskich. Jednak, jak pokazują prace innych badaczy, w zakresie turbulentnym zarówno wartości współczynników strat miejscowych dla cieczy nienewtonowskich jak i ich profile prędkości są zbliżone do cieczy newtonowskich [2], [8].

Do wyznaczania współczynnika Coriolisa dla zawiesiny lodowej przepływającej w rurze w zakresie turbulentnym można użyć zależności empirycznej jak dla cieczy newtonowskich.

Dla liczby Reynoldsa z zakresu $Re = 2800 - 100000$ wykorzystano zależność Strzeleckiej i Jeżowieckiej-Kabsch (2) [7]:

$$\alpha = 1 + 105 \cdot \left(\frac{10}{\ln^2 \mathrm{Re}}\right)^3 - 11{,}88 \cdot \left(\frac{10}{\ln^2 \mathrm{Re}}\right)^2 + 1{,}208 \cdot \left(\frac{10}{\ln^2 \mathrm{Re}}\right) \tag{2}$$

Wartość współczynnika Coriolisa w zakresie laminarnym dla cieczy Binghama określano w pracy z zależności (3) [84]:

$$\alpha = \frac{54 \cdot \left(47 \cdot \varepsilon_B^2 + 58 \cdot \varepsilon_B + 35\right)}{35 \cdot \left(\varepsilon_B^2 + 2 \cdot \varepsilon_B + 3\right)^3} \tag{3}$$

Właściwości zawiesiny lodowej określono w pracy na podstawie korelacji przedstawionych w pracach [84].

4. Wyznaczanie oporów przepływu w zwężeniach uskokowych

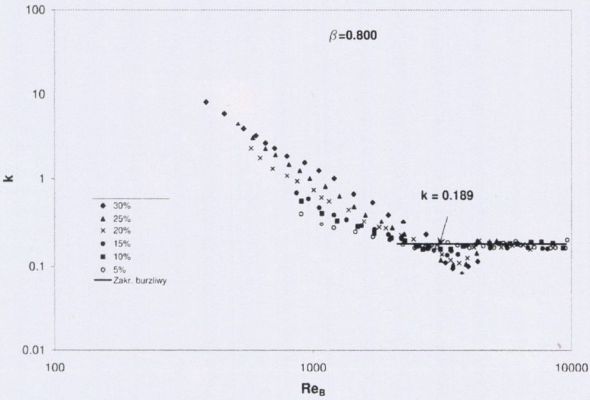
Na podstawie wyników badań zwężeń wyznaczono pochylenia prostych gradientu ciśnienia oraz punkty przecięcia się tych prostych z osią ciśnienia statycznego (oddzielnie po obu stronach zwężenia).

Analogiczne obliczenia wykonano dla wszystkich zmierzonych wartości ciśnienia przed i za zwężeniem. Posłużyły one do wyznaczenia różnicy ciśnienia statycznego dla zawiesiny lodowej przepływającej przez to zwężenie. Analogicznie wykonano obliczenia dla pozostałych zawartości lodu w zawiesinie przepływającej przez to zwężenie. Zebrane wyniki obliczeń różnicy ciśnienia statycznego na zwężeniu 22/18 mm dla zawiesiny o zawartości drobinek lodu od 5% do 30%, posłużyły do obliczenia współczynników strat miejscowych. Wartości tych współczynników wyznaczono za pomocą zależności (1).

Wyniki badań doświadczalnych zawiesiny lodowej w zwężeniach uskokowych oraz wyznaczone wartości współczynników Coriolisa posłużyły do wyznaczenia współczynników strat miejscowych w tych elementach.

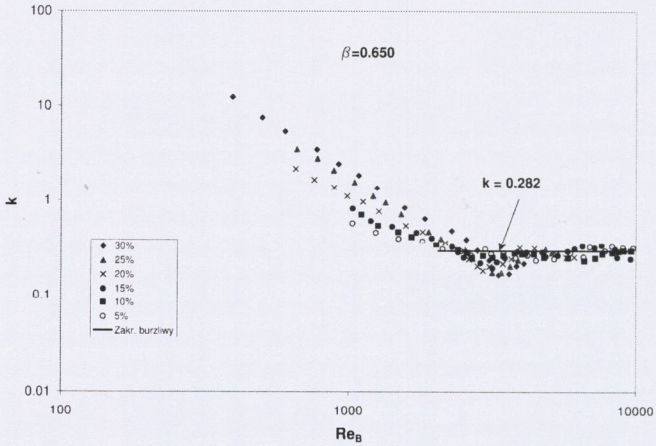
Na rys. 3 ÷ 4 zostały zaprezentowane wartości współczynników strat miejscowych w funkcji liczby Reynoldsa (dla cieczy Binghama) dla badanych zwężeń, przy zawartościach drobinek lodu w zawiesinie wynoszących od 5% do 30%.

Następnie wyznaczono opory miejscowe zawiesiny lodowej w tym zwężeniu. Na rys. 5 zaprezentowano przykładowe wyniki obliczeń oporów miejscowych dla zwężenia 22/18 mm, przez które przepływa zawiesina lodowa o różnych udziałach drobinek lodu. Załamania przebiegu oporów miejscowych oznaczają moment zmiany zakresu przepływu z laminarnego na turbulentny. Dla zwężenia 22/15 przeprowadzono obliczenia według tej samej procedury.



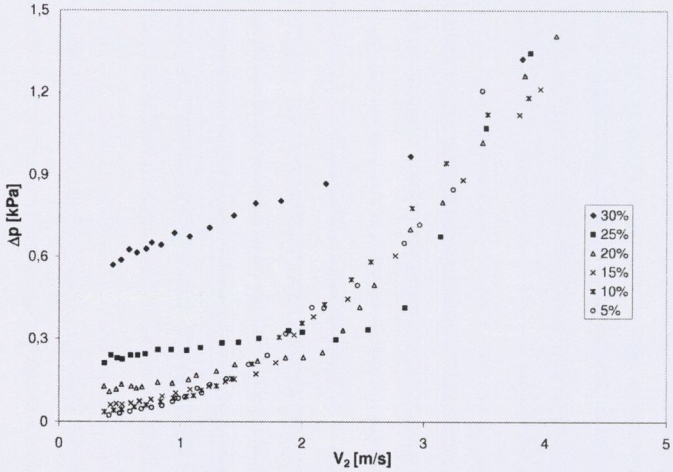
Rys. 3. Zależność współczynnika strat miejscowych zawiesiny lodowej (5% ÷ 30%) w funkcji liczby Reynoldsa dla cieczy Binghama dla zwężenia 22/18 (β = 0,800)

Fig. 3. Local loss coefficient for slurry ice (5% ÷ 30%) in correlation of Reynolds number for Bingham liquid in 22/18 contraction (β = 0,800)



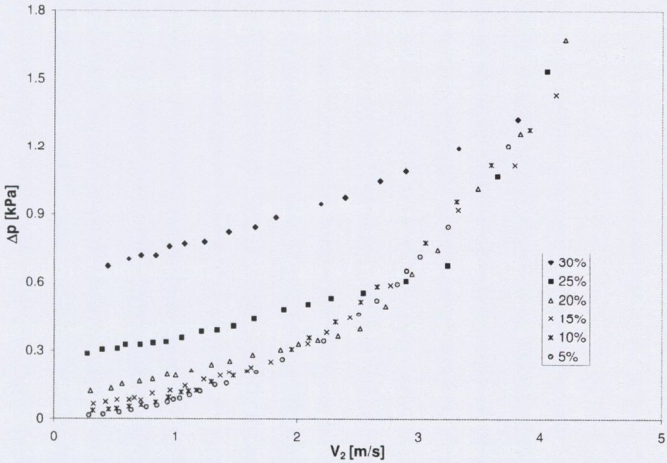
Rys. 4. Zależność współczynnika strat miejscowych zawiesiny lodowej (5% ÷ 30%) w funkcji liczby Reynoldsa dla cieczy Binghama dla zwężenia 22/15 (β = 0,650)

Fig. 4. Local loss coefficient for slurry ice (5% ÷ 30%) in correlation of Reynolds number for Bingham liquid in 22/15 contraction (β = 0,650)



Rys. 5. Opory miejscowe na zwężeniu uskokowym 22/18 dla różnych zawartości lodu w zawiesinie

Fig. 5. Flow resist in 22/18 contraction for various ice fraction in the slurry



Rys. 6. Opory miejscowe na zwężeniu uskokowym 22/15 dla różnych zawartości lodu w zawiesinie

Fig. 6. Flow resist in 22/15 contraction for various ice fraction in the slurry

5. Wnioski

Na podstawie przebiegu zmienności współczynników strat miejscowych, przedstawionych na rys. 3 i 4, dla zawiesiny lodowej o udziale drobinek lodu 5-30%, przepływającej przez badane zwężenia, potwierdzono zgodność tych współczynników, w zakresie turbulentnym, z wartościami teoretycznymi, podawanymi jak dla cieczy newtonowskiej. Uzyskana zgodność pokrywa się z wynikami badań innych autorów badających opory miejscowe w elementach rurociągu, podczas przepływu różnych cieczy nienewtonowskich. W zakresie laminarnym widać duży wpływ udziału drobinek lodu na przebieg zmienności współczynników strat miejscowych w funkcji liczby Reynoldsa (im większy udział drobinek lodu tym większa wartość współczynnika oporów miejscowych). Im większa zawartość drobinek lodu w mieszaninie tym większa jest jej lepkość, co bezpośrednio wpływa na wzrost wartości współczynnika strat miejscowych oraz oporów miejscowych w zwężeniu. Na wartość współczynnika strat miejscowych oprócz tego znaczny wpływ ma stosunek średnic wewnętrznych rury za i przed zwężeniem oraz wartość liczby Reynoldsa.

Oznaczenia

k	–	współczynnik strat miejscowych	[-]
Re_B	–	liczba Reynoldsa dla cieczy Binghama	[-]
V	–	prędkość	[m/s]

α	–	współczynnik Coriolisa	[-]
β	–	iloraz średnicy za zwężeniem do średnicy przed zwężeniem	[-]
Δp	–	spadek ciśnienia statycznego	[Pa]
ε_B	–	iloraz czynnych naprężeń stycznych cieczy Binghama	[-]
ρ	–	gęstość	[kg/m^3]

Literatura

[1] Ayel V., Lottin O., Peerhossaini H.: International Journal of Refrigeration, 26, (2003), 95-107.

[2] Fester V., Mbiya B., Slatter P.: The Chemical Engineering Journal 145, (2008), 57-63.

[3] Kitanovski A., Vuarnoz A., Ata-Caesar D., Egolf P. W., Hansen T. M., Doetsch Ch.: International Journal of Refrigeration, 28, (2005), 37-55.

[4] Melinder A.: *Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants. Tables and diagrams for the refrigerants industry*, IIF/IIR, Paris, 1997.

[5] Niezgoda-Żelasko B.: *Wymiana ciepła i opory przepływu zawiesiny lodowej w przewodach*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2006.

[6] Niezgoda-Żelasko B., Żelasko J.: Chemical and Process Engineering, 46, (2007), 895-904.

[7] Strzelecka K., Jeżowiecka-Kabsch K.: Ochrona Środowiska, 30, (2008), 21-25.

[8] Turian R. M., Ma T. W., Hsu F. L. G., Sung M. D. J., Plackmann G. W.: International Journal of Multiphase Flow, 24, (1998), 243-269.