

BEATA NIEZGODA-ŻELASKO  
JERZY ŻELASKO

Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

## Opory przepływu zawiesiny lodowej w łukach i kolanach

### Wprowadzenie

Lód zawiesinowy należy do grupy chłodziw. Zawiesiny lodowe są mieszaniną kryształków lodu wodnego i wody lub wody z dodatkiem środka obniżającego temperaturę krzepnięcia (soli, glikolu, alkoholu). Zawiesiny lodowe są płynami ni-newtonowskimi.

Opory przepływu zawiesin lodowych (etanolu [1], glikolu propylenowego [1, 2]) przez elementy armatury instalacyjnej były przedmiotem prac [1–3]. Wyniki zawarte w tych pracach przedstawione w postaci graficznej ograniczają się do prędkości przepływu mniejszych niż  $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  i średnic rur  $0,015$ – $0,027 \text{ m}$ . Powyższe prace nie zawierają stosownych uogólnień oraz informacji o promieniach gięcia łuku.

Zagadnienie oporów przepływu zawiesin przez różne elementy armatury (kolana, łuki, trójniki, dyfuzory itp.) podjęto w pracy *Turiana* i innych [4], w której badano  $3,6$ – $12,7\%$  zawiesinę laterytu oraz  $10,7$ – $30\%$  zawiesinę gipsu, będące cieczami *Ostwalda-de Waele*. Jej użyteczność polega na podaniu zależności współczynnika oporów miejscowych od liczby *Reynoldsa*, uogólnionej wg *Metznera-Reeda*.

Prezentowana praca dotyczy przepływu przez łuki i kolana zawiesiny lodowej  $10,6\%$  roztworu etanolu.

### Badania eksperymentalne oporów przepływu w łukach o małych promieniach gięcia

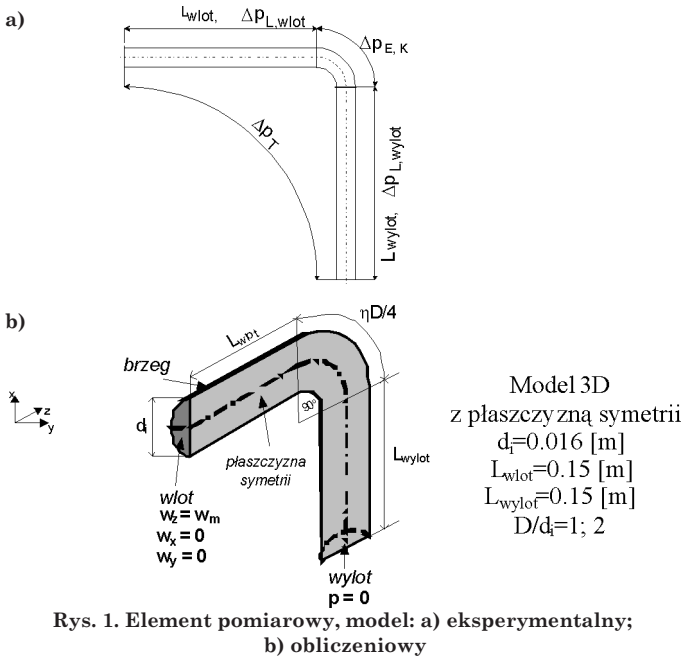
Program badań oporów przepływu w łukach i kolanach obejmował następujące zakresy pomiarowe:

- łuki i kolana o średnicach rur  $d_i = 0,01; 0,016; 0,02 \text{ m}$  oraz stosunkach średnicy gięcia do średnicy rury  $D/d_i = 2,0$  dla łuków oraz  $D/d_i = 1$  dla kolan,
- średnie prędkości przepływu  $0,1 \leq v_m \leq 4,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,
- udziały masowe lodu w zawieszynie  $0 \leq x_s < 30\%$ .

Pomiar spadku ciśnienia dotyczył całkowitego spadku ciśnienia  $\Delta p_T$  w elemencie pomiarowym oraz spadku ciśnienia spowodowanego tarciem w prostoosiowych odcinkach pomiarowych o długości  $L$  [4], [6] (Rys. 1a). Spadek ciśnienia na łuku i kolanie wyznaczany był z zależności:

$$\Delta p_{E.K} = \Delta p_T - \Delta p_L \frac{L_{wlot} + L_{wylot}}{L} \quad (1)$$

Niezależnie od średnicy rury, długości odcinków wlotowych ( $L_{wlot}$ ) i wylotowych ( $L_{wylot}$ ) związanych z pomiarami spadków ciśnienia w łukach i kolanach odpowiadały dziesięciokrotnej wielokrotności średnicy rury. Należy przy tym zaznaczyć, że cały element pomiarowy poprzedzony i zakończony był prostymi odcinkami rur stabilizującymi przepływ czynnika.



Rys. 1. Element pomiarowy, model: a) eksperymentalny; b) obliczeniowy

Obliczanie oporów przepływu w łukach i kolanach wymaga znajomości zastępczego współczynnika oporów miejscowych:

$$\xi_{E,K} = \frac{2\Delta p_{E,K}}{\rho_B u_m^2} \quad (2)$$

Dla przepływu cieczy newtonowskich przez rury zakrzywione Ito [7] zaproponował uzależnienie zastępczego współczynnika oporów miejscowych odniesionego do całkowitych oporów przepływu medium przez łuk od liczby Deana ( $\xi = f(De)$ ,  $De_L = Re\sqrt{d_i/D}$  w zakresie laminarnym,  $De_T = Re(d_i/D)^2$  w zakresie turbulentnym). W rozważanym przypadku przyjęto, że liczba Reynoldsa  $Re$  będzie liczbą uogólnioną według

Metznera-Reada ( $Re = \rho_B v_m^{2-n} d_i^n / (8^{n-1} K)$  [8]). Rys. 2 wskazuje, że w obszarze przepływu laminarnego i turbulentnego niezależnie od średnicy rury i promieni gięcia współczynniki oporów miejscowych są malejącymi funkcjami liczb Deana. W obszarze przepływu przejściowego i turbulentnego obserwowana jest większa stabilizacja współczynnika oporów miejscowych w porównaniu z wartościami  $\xi$  dla zakresu laminarnego.

Jako kryterium zmiany charakteru ruchu przyjęto warunek stabilizacji współczynników oporów miejscowych dla przepływu laminarnego. Przyjęto, że kryterium zmiany charakteru ruchu dla przepływu zawiesiny lodowej przez łuki i kolana jest w tym przypadku liczba Deana  $De_{CL} = Re(d_i/D)^{0.5} = 2500$  [6].

Wyniki pomiarów pozwoliły wyznaczyć zależności określające współczynnik oporów miejscowych w obszarze przepływu laminarnego:

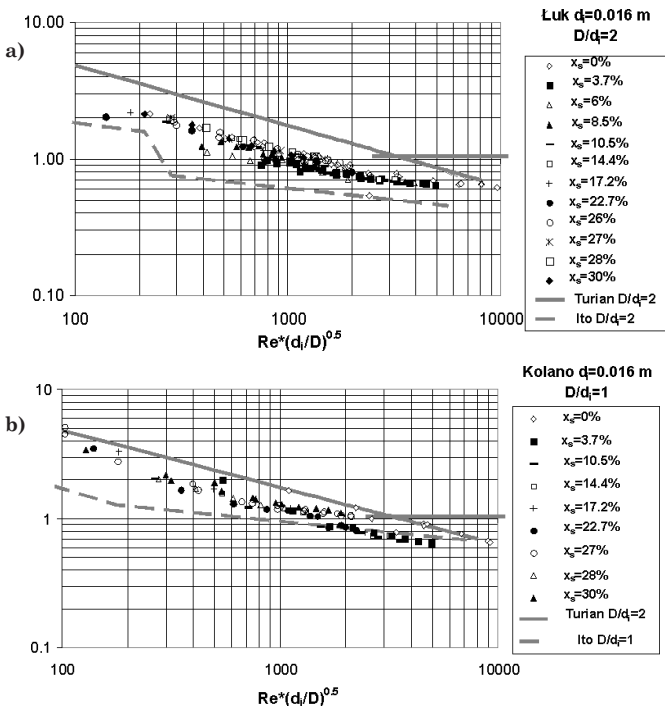
$$\xi\left(De_L; \frac{d_i}{D}\right) = \frac{4,6\left(\frac{d_i}{D}\right)^{0,33}}{[0,87 + 0,1 \log(De_L)]^{8,1}} \quad (3)$$

i turbulentnego:

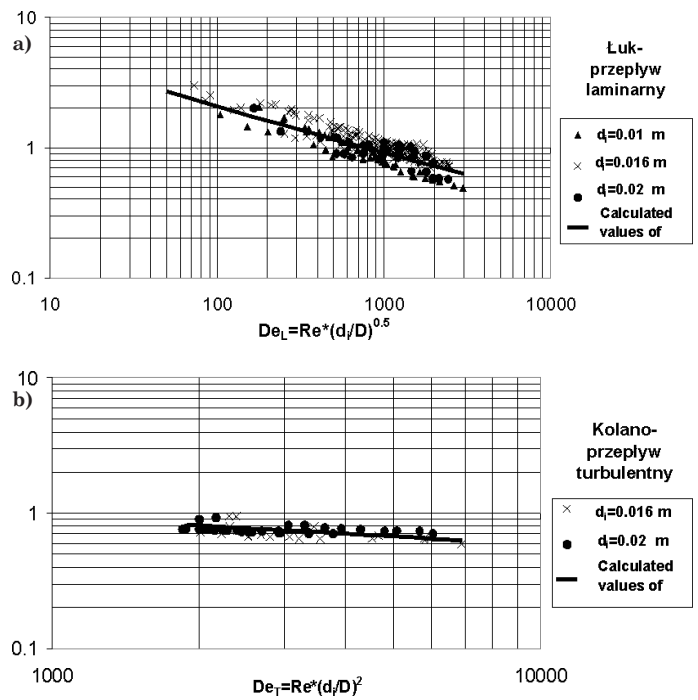
$$\xi\left(De_T; \frac{d_i}{D}\right) = \frac{\left(\frac{d_i}{D}\right)^{-0,306} \left[10,6 - \frac{3,45}{d_i/D}\right]}{15,2 De_T^{0,204}} \quad (4)$$

dla uogólnionego przepływu zawiesiny lodowej przez łuki i kolana.

Rys. 3 przedstawia porównanie zmierzonych i obliczonych współczynników oporów miejscowych dla zawiesiny lodowej w łukach i kolanach dla przepływu laminarnego i turbulentnego. Z prawdopodobieństwem 98% można przyjąć, że przedziały ufności dla zależności (3) i (4) wynoszą odpowiednio 14% i 15%.



Rys. 2. Wyniki badań odniesione do wyników Turiana i in. [4] oraz Ito [7]: a) łuk  $d_i = 0,016$  m,  $D/d_i = 2$ ; b) kolano  $d_i = 0,016$  m,  $D/d_i = 1$

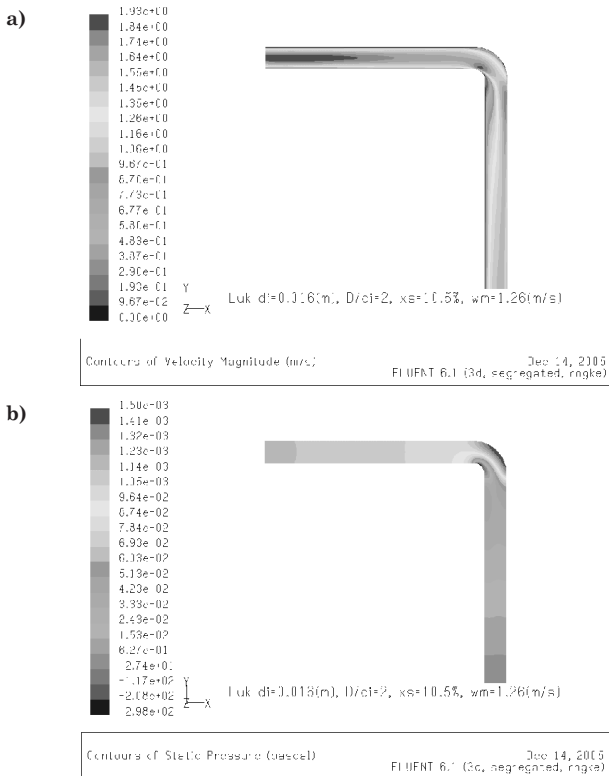


Rys. 3. Zastępczy współczynnik oporów miejscowych w funkcji uogólnionej liczby Deana: a) łuki, przepływ laminarny; b) kolana, przepływ turbulentny

**Modelowanie adiabatycznego przepływu przez łuki i kolana**

Modelowanie przepływu zawiesiny lodowej w łukach i kolanach przeprowadzono dla jednej średnicy rury  $d_i = 0,016$  m oraz dla dwóch udziałów masowych lodu  $x_s = 10,5\%$  i  $27\%$ . Symulacje wykonano za pomocą programu *Fluent* dla modeli 3D (Rys. 1b), zakładając jednofazowy model przepływu zawiesiny lodowej [6]. Symulacje w odcinkach pomiarowych z łukiem lub kolaniem były poprzedzone obliczeniami dla prostych odcinków rur [6]. Obliczenia wstępne pozwoliły wyznaczyć profile prędkości zawiesiny lodowej stanowiące warunek brzoowy na wlocie do układu z elementem armatury.

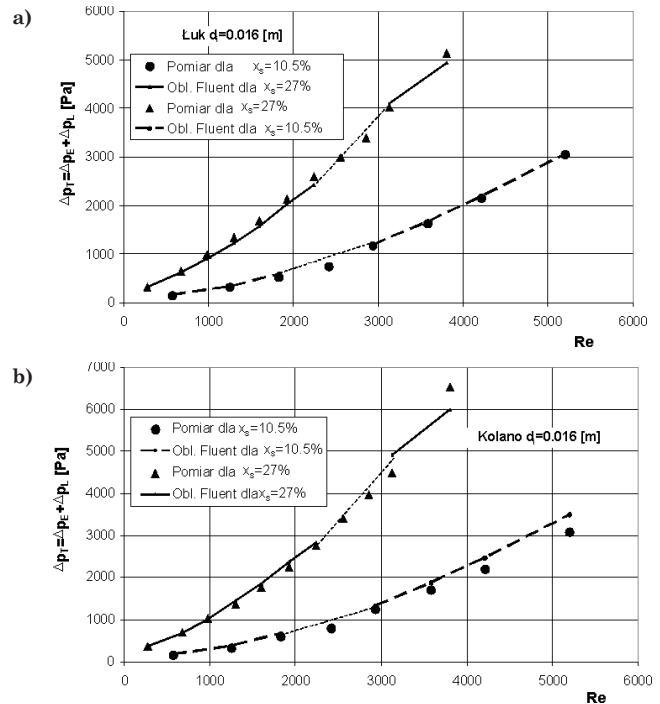
Rys. 4 zawiera przykładowy profil prędkości i rozkład ciśnień w łuku dla udziału masowego lodu  $x_s = 10,5\%$ , oraz prędkości przepływu  $v_m = 1,26$  m·s<sup>-1</sup>. Porównanie całkowitych spadków ciśnień w elemencie pomiarowym z łukiem i kolaniem, odpowiadających wartościom zmierzonym i obliczonym przedstawiono na rys. 5. Średnia względna różnica pomiędzy zmierzonymi i obliczonymi spadkami ciśnień w łukach i kolanach w obszarze laminarnym wynosi 6,4%, a w turbulentnym 6,2%.



Rys. 4. Profil prędkości (a) i rozkład ciśnień (b) w łuku dla udziału masowego lodu  $x_s = 10,5\%$  oraz prędkości średniej  $v_m = 1,26$  m·s<sup>-1</sup> – przepływ turbulentny

**Oznaczenia**

- $D$  – średnica gięcia łuku, kolana, [m],
- $d$  – średnica wewnętrzna rury, [m],
- $K$  – stała konsystencji, [N s<sup>n</sup> m<sup>-2</sup>],
- $L$  – długość rury, [m],
- $n$  – charakterystyczny wskaźnik płynięcia,
- $n = d(\ln\tau_w)/d(\ln\Gamma)$ ,



Rys. 5. Porównanie zmierzonych i obliczonych spadków ciśnień dla modelu jednofazowego przepływu zawiesiny lodowej przez element obejmujący: a) łuk; b) kolano oraz odcinki wlotowe i wylotowe

- $p$  – ciśnienie, [Pa],
- $v_m$  – średnia prędkość przepływu, [m·s<sup>-1</sup>],
- $\mu_p$  – dynamiczny współczynnik lepkości plastycznej, [Pa·s],
- $\rho$  – gęstość, [kg·m<sup>-3</sup>],
- $\tau$  – naprężenie styczne, [Pa],
- $\tau_p$  – graniczne (plastyczne) naprężenie styczne, [Pa],
- $\tau_w$  – naprężenie styczne na ścianie rury, [Pa],
- $\xi$  – współczynnik oporów miejscowych dla łuków i kolan.

**Indeksy**

- $B$  – Bingham,
- $C$  – wartość krytyczna,
- $E$  – łuk,
- $K$  – kolano,
- $L$  – długość, laminarny,
- $T$  – całkowity, burzliwy.

**LITERATURA**

1. O. Bel, A. Lallemand: Int. Journal of Refrigeration **22**, nr 3, 164 (1999).
2. E Nørgaard, T.A. Sørensen, T.M. Hansen, M. Kauffeld: Int. Journal of Refrigeration **28**, nr 1, 83 (2005).
3. E Nørgaard, T.A. Sørensen, T.M. Hansen, M. Kauffeld: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> IIR Workshop on Ice Slurries, Lucerne, 16-18 May 2001.
4. R.M Turian, T.-W. Ma, F.-L. G. Hsu., D.-J. Sung, G.W. Plackmann: Int. Journal of Multiphase Flow **24**, nr 2, 243 (1998).
5. B. Niezgoda-Zelasko, W. Zalewski: Int. Journal of Refrigeration **29**, nr 3, 429 (2006).
6. B. Niezgoda-Zelasko: Wymiana ciepła i opory przepływu zawiesiny lodowej w przewodach, Monografia 334, Wyd. Pol. Krakowskiej, 2006.
7. H. Ito: Journal Basic Engineering Trans. ASME, ser.82 D (1960).
9. W. Kozicki, C.H. Chou, C. Tiu: Chem. Eng. Science **21**, nr 8, 665 (1966).